



**INAOE**

**Análisis de parámetros del Viento Solar  
mediante datos de Centelleo Interplanetario  
y la sonda Parker Solar Probe**

por

**Elvia Patricia Barrón Cano**

Tesis sometida como requisito parcial  
para obtener el grado de

**MAESTRA EN CIENCIAS EN EL ÁREA DE  
CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL ESPACIO**

por el

**Instituto Nacional de Astrofísica,  
Óptica y Electrónica**

Septiembre 2024

Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

**Dr. Alberto Carramiñana Alonso, INAOE**

**Dr. Julio César Mejía Ambriz, UNAM**

**©INAOE 2024**

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de  
reproducir y distribuir copias de esta tesis en su  
totalidad o en partes mencionando la fuente.





# A mi esposo y hermanos.

En memoria de nuestro pequeño:

*Isaac de Jesús Díaz Barrón<sup>+</sup>*

En memoria de mis padres:

*Enrique Barrón Martínez<sup>+</sup>*

*Laura Cano Flores<sup>+</sup>*

En memoria de mis suegros:

*Rogelio Díaz García<sup>+</sup>*

*Estelia González Elizondo<sup>+</sup>*

En memoria de mis hermanos:

*Daniel Enrique Barrón Cano<sup>+</sup>*

*Jesús Alejandro Barrón Cano<sup>+</sup>*

# Resumen

---

El centello interplanetario identificado en la década de los 60 mediante radiotelescopios es una herramienta idónea para caracterizar la heliosfera interna de forma remota, logrando obtener información física global de la distribución del viento solar entre el Sol y la Tierra. Esta información es esencial para el monitoreo y estudio del Clima Espacial, en el que México participa desde el 2014 al establecer el Servicio de Clima Espacial México y dos años después con el Laboratorio Nacional del Clima Espacial (LANCE).

Esta tesis tiene como objetivo colaborar en la automatización del análisis de las observaciones de centelleo interplanetario del MEXART, que opera con un *back-end* digital desde el 2020. Procesando la información registrada por éste hasta el 2023, por medio de programas en Python para el manejo de los datos, filtrado, obtención de espectros de potencia de centelleo e índices de centelleo. Con ello, registrar información de la velocidad y densidad del viento solar en un formato conocido mundialmente como WIPSS, del cual se puede extraer información para generar mapas del viento solar.

Se completó el ciclo de desarrollo y pruebas de campo en el MEXART, recibiendo retroalimentación por parte de algunos investigadores y estudiantes de la UNAM, de miembros del LANCE y por la comunidad de centello interplanetario. Para algunos eventos, se complementaron los mapas de viento solar obtenidos con el MEXART, con los resultados de centelleo de LOFAR, ISEE y datos in situ de la *Parker Solar Probe*.

Se ha hecho un avance en el procesamiento de la información con el nuevo *back-end* digital del MEXART empleando rutinas escritas en Python. Quedando pendiente la revisión del método de filtrado, el cual puede mejorarse.

# Abstract

---

The interplanetary scintillation was identified in the 1960s and today, around 60 years later, it is an ideal tool to characterize the internal heliosphere remotely, managing to obtain global physical information on the distribution of the solar wind between the Sun and the Earth. This information is very relevant for the monitoring and study of Space Weather, in which Mexico has participated at the government level since 2014 by establishing the Mexico Space Weather Service, creating the National Space Weather Laboratory ([LANCE](#)) two years later.

This thesis aims to collaborate in the automation of the analysis of interplanetary scintillation observations from MEXART, which has operated with a digital back-end since 2020. Processing the information recorded by it until 2023, through Python programs for data management, filtering, obtaining scintillation power spectra and scintillation indices. With this, information on the speed and density of the solar wind is recorded in a format known worldwide as WIPSS, from which information can be extracted to generate maps of the solar wind.

The development and field-testing cycle at MEXART were completed, receiving feedback from some researchers and students from UNAM, members of LANCE, and by the interplanetary scintillation community. For some events, the solar wind maps obtained with MEXART were complemented with scintillation results from LOFAR, ISEE and in situ data from the Parker Solar Probe.

Progress has been made in information processing with the new MEXART digital back-end using routines written in Python. Pending the review of the filtering method, which can be improved.

# Agradecimientos

---

Quisiera expresar mi más sincera gratitud al INAOE por la oportunidad otorgada para estudiar este posgrado, al CONAHCYT por su financiamiento (CVU 1148344), a la Dirección de Formación Académica del INAOE por el apoyo brindado para la estancia en el MEXART, la participación en el XIV COLAGE e ISSS y concederme la Beca de Tesis Proyecto Terminal. Al Laboratorio Nacional de Supercómputo en el INAOE, como a la Administración de Cómputo General y sus administradores de sistemas, por el uso de los recursos de alto rendimiento.

A mis asesores Dr. Alberto Carramiñana, Dr. Julio Mejía, Dra. Esmeralda Romero por su invaluable ayuda. A la Dra. Oyuki Chang por su asesoría sobre el MEXART y acceso de los formatos WIPSS del ILT. Al ISEE por el uso de los formatos WIPSS. A la misión Parker Solar Probe por el uso de los datos de la suite SWEAP, instrumentación que fue diseñada, desarrollada y operada bajo el contrato NNN06AA01C de la NASA, como también por las contribuciones extraordinarias del equipo de ingeniería de naves espaciales y operaciones de la misión PSP en el *John Hopkins University Applied Physics Laboratory*. A la Dra. Tatiana Niembro por la información y asesoría brindada acerca de la sonda. Los productos de datos empleados de la PSP corresponden a los instrumentos:

(a) SPC, niveles 2 y 3, versión 2:

*psp\_swp\_spc\_l2i, sp\_swp\_spc\_l3i\_<date>\_v02,*

(b) SPAN-Ai nivel 3 función de distribuciones para protones, versión 4:

*psp\_swp\_spi\_sf00\_L3\_mom\_<date>\_v04.*

A los miembros del jurado, Dr. Eduardo Mendoza Torres, Dr. José Silvano Guichard Romero, Dr. Ernesto Aguilar Rodríguez por sus correcciones y sugerencias. Al Dr. Américo González quien me incentivó y orientó para estudiar un posgrado en Clima Espacial.

Al Dr. Julio Mejía y el Dr. Ernesto Aguilar por el uso de programa auto-mexart.pro y su colaboración en la migración a Python. A la Mtra. Griselda Barón y al Mtro. Pablo Villanueva por el uso del programa clean-filter-MEXART.py, catálogos de radiofuentes radio-sources.cat y radio sources.txt y por la asesoría de ambos. Al Dr. Julio Mejía y al Mtro. Pablo Villanueva, por el acceso a los datos de CIP del MEXART y ejecución de las rutinas en Python en el MEXART.

Al Dr. Christopher Torrence y el Dr. Gilbert Compo por el uso de su implementación de la transformada Wavelet en IDL (wavelet.pro) y en Python (wavelet.py). Al Dr. Alfonso Martínez Cruz y al Ing. Diego Cruz Aguilar por sus aportaciones en el escrito y la programación.

A Dios por permitirme regresar a las aulas después de muchos años de graduada. A mi esposo, hermanos y amigos por su apoyo.

¡GRACIAS!

# Tabla de contenido

---

Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Agradecimientos.....	v
Prefacio.....	1
<b>1 Introducción.....</b>	<b>4</b>
1.1 Antecedentes.....	4
1.2 Pertinencia de la Tesis .....	9
1.3 Justificación .....	9
1.4 Objetivos.....	12
1.4.1 Objetivos Específicos .....	12
1.5 Estructura de la tesis .....	14
<b>2 Marco Teórico .....</b>	<b>15</b>
2.1 El Sol y el viento solar .....	15
2.1.1 Perspectiva histórica.....	16
2.1.2 Viento Solar .....	18
2.1.3 Variaciones por el Ciclo Solar.....	20
2.1.4 Forma: Espiral de Parker.....	22
2.1.5 Impacto sobre el Sistema Solar .....	23
2.1.6 Límites del Viento Solar.....	23
2.2 Observaciones en radio.....	24
2.2.1 Perspectiva histórica.....	24
2.2.2 Ondas de Radio.....	27
2.2.3 Radiofuentes.....	28
2.2.4 Radiotelescopios .....	30
2.2.6 El Jansky .....	32

2.2.7 Intensidad específica y radiación del cuerpo negro .....	32
2.2.8 Patrón de radiación y potencia de antena .....	33
2.2.9 Sistema Celeste de Coordenadas .....	36
2.2.10 Índices de Centelleo Interplanetario .....	37
2.2.11 Geometría de CIP .....	42
2.2.12 Modelo del Espectro de Potencias de CIP .....	46
2.2.13 Formato WIPSS .....	59
2.2.14 Mapas de Centelleo .....	61
<b>3 Instrumentos .....</b>	<b>65</b>
3.1 MEXART .....	65
3.2 Parker Solar Probe .....	69
3.2.1 SWEAP .....	76
3.2.1.1 SPC .....	80
3.2.1.2 SPAN .....	85
3.3 ILT .....	92
3.4 ISEE .....	95
<b>4 Metodología .....</b>	<b>97</b>
4.1 Implementación para el MEXART .....	99
4.1.1 Adquisición de series de tiempo .....	101
4.1.2 Obtención de parámetros del VS y formato WIPSS .....	107
4.1.3 Cálculo del índice g .....	117
4.1.4 Gráficas de mapas de centello .....	120
4.1.5 Programación de las observaciones .....	121
4.1.6 Programa para pruebas de filtrado .....	123
4.2 Programa para manejo de datos de la PSP .....	125
4.3 Combinación de observaciones de CIP y PSP .....	130
<b>5 Resultados .....</b>	<b>132</b>
5.1 MEXART .....	141
5.1.1 Multiclean (Series de Tiempo) .....	141

5.1.2 Auto-mexart (Parámetros VS & WIPSS).....	145
5.1.3 Wipss (Índice g) .....	152
5.1.4 MapV & MapM (Mapas de centelleo).....	155
5.1.5 Elong (Programar observaciones) .....	156
5.2 Parker Solar Probe .....	156
5.3 Caso de Estudio. - Encuentro 6 .....	167
5.3.1 Condiciones del Clima Espacial.....	168
5.3.2 Datos de CIP (ILT, ISEE, MEXART).....	168
5.3.3 Parker Solar Probe .....	182
5.3.4 Pruebas de Filtrado .....	191
5.3.5 Soluciones Alternativas para el Método de Filtrado.....	200
6 Conclusiones.....	201
6.1 Alcances .....	202
6.2 Trabajo a futuro .....	203
Anexo A Encuentro 6, PSP .....	205
Anexo B Filtrado.....	212
Índice de Figuras.....	217
Índice de Tablas .....	222
Lista de Acrónimos.....	223
Bibliografía .....	225



# Prefacio

---

La influencia del Sol en todo el sistema solar ha sido estudiada por siglos. Cuantificada su actividad en un principio por el registro de las manchas solares. Al campo de estudio que se encarga de investigar sobre la actividad solar, su influencia en el medio interplanetario, a través de la expansión de la corona solar vía el viento solar y campos magnéticos, afectando las magnetósferas planetarias y sus diferentes capas atmosféricas, como la ionósfera y la termosfera en la Tierra, se le denomina clima espacial.

El primer evento solar a gran escala observado y registrado por un astrónomo, fue en 1859, nombrado como evento Carrington en honor al astrónomo inglés Richard Carrington quién estaba monitoreando el Sol dibujando las manchas solares, cuando se produjo en el Sol un gran destello, ráfaga solar, y la expulsión de una gran cantidad material proveniente de la corona solar, denominada eyección de masa coronal. Como consecuencia de esta actividad se observaron auroras en ambos hemisferios por un par de días a latitudes tan bajas como en Hawái, Colombia y Cuba, las comunicaciones telegráficas en Europa y Norteamérica experimentaron grandes perturbaciones e interrupciones al haber sobrecargas en las redes de distribución eléctrica, ocasionándose incendios en algunas oficinas y quemaduras severas a un operador, en Washington, por choque eléctrico. Ésta ha sido la tormenta solar más grande en los últimos 500 años registrada en la historia ([National Research Council, 2008](#)).

De ese evento a la fecha, siglo XXI, la infraestructura eléctrica terrestre alámbrica e inalámbrica, satelital, sondas espaciales se ha incrementado exponencialmente, como también la necesidad del estudio del clima espacial alrededor del mundo.

En México, el Laboratorio Nacional del Clima Espacial<sup>1</sup> (LANCE), a través del Servicio de Clima Espacial México, recopila y procesa información del entorno espacial para informar sobre el estado del clima espacial y el desarrollo de las tormentas geomagnéticas. El LANCE cuenta con instrumentación y observatorios en México como el de Michoacán, un observatorio que incluye el *Mexican Array Radio Telescope* (MEXART) para medir emisiones de radiofuentes, estaciones Callisto para detectar estallidos solares, ionosondas para el seguimiento de perturbaciones ionosféricas y magnetómetros para detectar perturbaciones geomagnéticas locales. Otro observatorio está en Nuevo León, en donde se han implementado instrumentos Callisto, magnetómetros y ionosondas.

Cuenta también con estaciones GPS en distintas ubicaciones del país para monitoreo de la ionosfera sobre territorio nacional, así como un observatorio de rayos cósmicos en la Ciudad de México para identificar las eyecciones de masa coronal en el medio interplanetario [[www.lance.unam.mx](http://www.lance.unam.mx)]. Parte de la información recabada por los instrumentos es procesada por su Centro de Super Cómputo y los datos más relevantes son publicados en el repositorio institucional de clima espacial (RICE) [[www.rice.unam.mx](http://www.rice.unam.mx)]. Adicionalmente, tiene acceso a la información compartida por el *International Space Environment Service*.

En el ámbito internacional, es miembro desde junio de 2015 del *Regional Warning Center*. Participa en el *World Meteorological Organization Space Program* y en las reuniones de la *United Nations Office for Outer Space Affairs*.

En particular, el MEXART es el elemento principal de percepción remota para el monitoreo del viento solar, regiones activas y eventos a gran escala. Mediante este radiotelescopio se mide las fluctuaciones de flujo electromagnético causadas por la dispersión de las ondas de radio

---

<sup>1</sup> Proyecto de colaboración de la UNAM, UANL y CONAHCyT.

provenientes de radiogalaxias y cuásares, que al encontrarse con el viento solar no homogéneo se difracta produciendo un patrón de interferencia que se mueve con el viento solar, a este fenómeno se le conoce centelleo interplanetario.

De su análisis estadístico se pueden estimar parámetros físicos del viento solar como la velocidad, el índice de turbulencia, su densidad, el ancho de las radiofuentes y la escala de las irregularidades. Al observar fuentes a diferentes ángulos se obtiene información del viento solar sobre zonas no exploradas de la heliosfera interna donde no hay datos *in-situ* de naves.

El MEXART forma, también, parte de la red internacional de observatorios de centelleo interplanetario, la *Worldwide Interplanetary Scintillation Stations Network (WIPSS Network)*, que desde el 2014, estableció un formato para compartir la información obtenida desde las diferentes estaciones participantes. A éste se le denomina formato WIPSS y posee información de la ubicación del observatorio, la ascensión recta y declinación de las radiofuentes y su ubicación relativa versus el Sol y la Tierra, además de los estimados obtenidos para la velocidad del viento solar y nivel de centelleo o de densidad, con un índice conocido como ***g***.

Entre el 2019 y 2020, el MEXART cambió su *back-end* de análogo a digital, logrando con ello mejorar su sistema de direccionamiento, disponer de un haz dirigible en el meridiano local, aumentar el ancho de banda y mejorar su sensibilidad.

Esta tesis tiene como objetivo principal contribuir en la automatización de las observaciones del MEXART con el nuevo *back-end* digital.

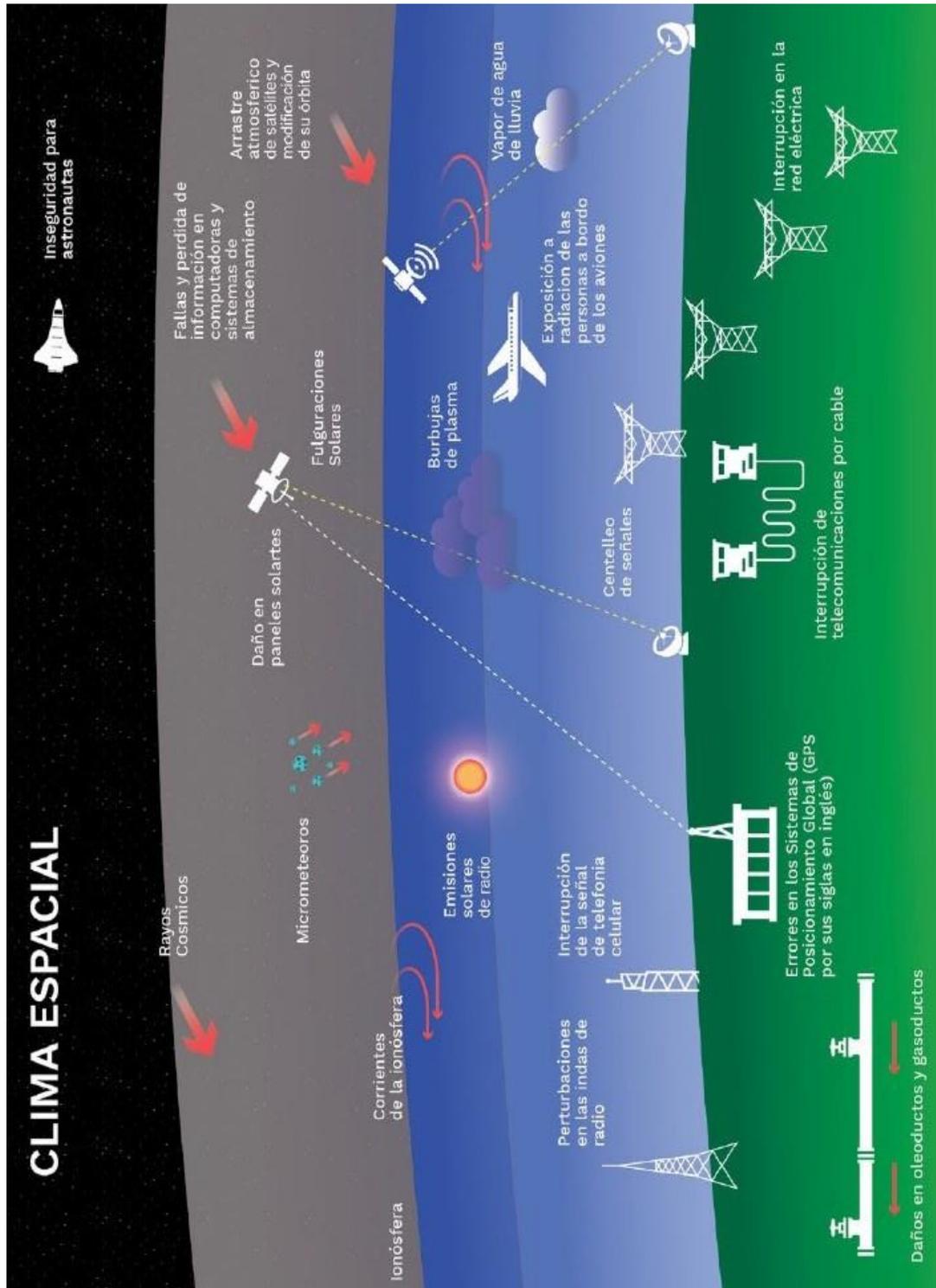
## 1.1 Antecedentes

El Sol es monitoreado constantemente y se registra su actividad las 24 horas del año para poder alertar, a nivel mundial, de los eventos a gran escala como los son las Eyecciones de Masa Coronal (EMC) y las Regiones de Interacción entre Corrientes (RIC). Estos eventos pueden alterar distintas tecnologías, como las señaladas en la [Figura 1.1](#). Por medio del viento solar (VS) dichos eventos llegan a la magnetósfera terrestre, alteran la ionósfera, afectan a los sistemas electrónicos, eléctricos y de cómputo en las sondas, satélites, estaciones espaciales y aviones en vuelo, como a su tripulación, impacta el movimiento de los satélites, y además, provoca interrupciones en las comunicaciones, más daños a generadores de energía eléctrica, oleoductos y gasoductos ([González-Esparza, 2022b](#)).

Hay en la actualidad un número importante de sondas y satélites que orbitan alrededor del Sol y de la Tierra, además de telescopios y observatorios solares alrededor del mundo. En la [Figura 1.2](#), se muestran las sondas y satélites que conforman el *Heliophysics System Observatory* de la NASA.

En México, con la aprobación de las modificaciones a los artículos 2, 20 y 82 de la Ley General de Protección Civil, en junio 2014, se incluyó los fenómenos astronómicos y se reconoció la importancia de vigilar el clima espacial en términos de Seguridad Nacional, estableciendo un mandato para la Agencia Espacial Mexicana (AEM) y para el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) de establecer políticas públicas de protección civil ante la ocurrencia de estos fenómenos naturales ([Gonzalez-Esparza et al., 2017](#)).

Figura 1.1 Efectos del clima espacial



Posibles daños a elementos de infraestructura tecnológica por clima espacial [González-Esparza \(2022b, p.51\)](#).

Figura 1.2 Satélites y sondas del Heliophysics System Observatory, NASA



Imagen tomada de <https://svs.gsfc.nasa.gov/30822/>.

En octubre del 2014, inició operaciones el Servicio de Clima Espacial México (SCiESMEX) con apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología<sup>2</sup> (CONAHCYT) mediante el programa Cátedras CONACYT, siendo su sede el Instituto de Geofísica, unidad Michoacán de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), y meses más tarde contó con ayuda de la AEM. En mayo 2016, se aprobó la creación del Laboratorio Nacional del Clima Espacial (LANCE). Este laboratorio es una colaboración entre la UNAM, la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y el CONAHCYT ([González-Esparza, 2022b](#)).

Además, cuentan con el Repositorio Institucional de Clima Espacial (RICE), el Centro de Supercómputo de Clima Espacial (CESCOM) y la Red de Instrumentación de Clima Espacial de la UNAM y de la UANL. En la [Figura 1.3](#) se muestra la distribución de su instrumentación en el año 2022.

En junio del 2015, el SCiEMEX fue nombrado *Regional Warning Center* (RWC) por el *International Space Environment Service* (ISES), ver [Figura 1.4](#). Y como centro certificado de alertamiento el LANCE tiene el compromiso, no tan sólo de emitir los avisos correspondientes sobre el clima espacial, sino poner a disposición de la comunidad científica la información de manera segura a través de la Internet.

---

<sup>2</sup> Actualmente, Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías

**Figura 1.3** Infraestructura del Laboratorio Nacional de Clima Espacial

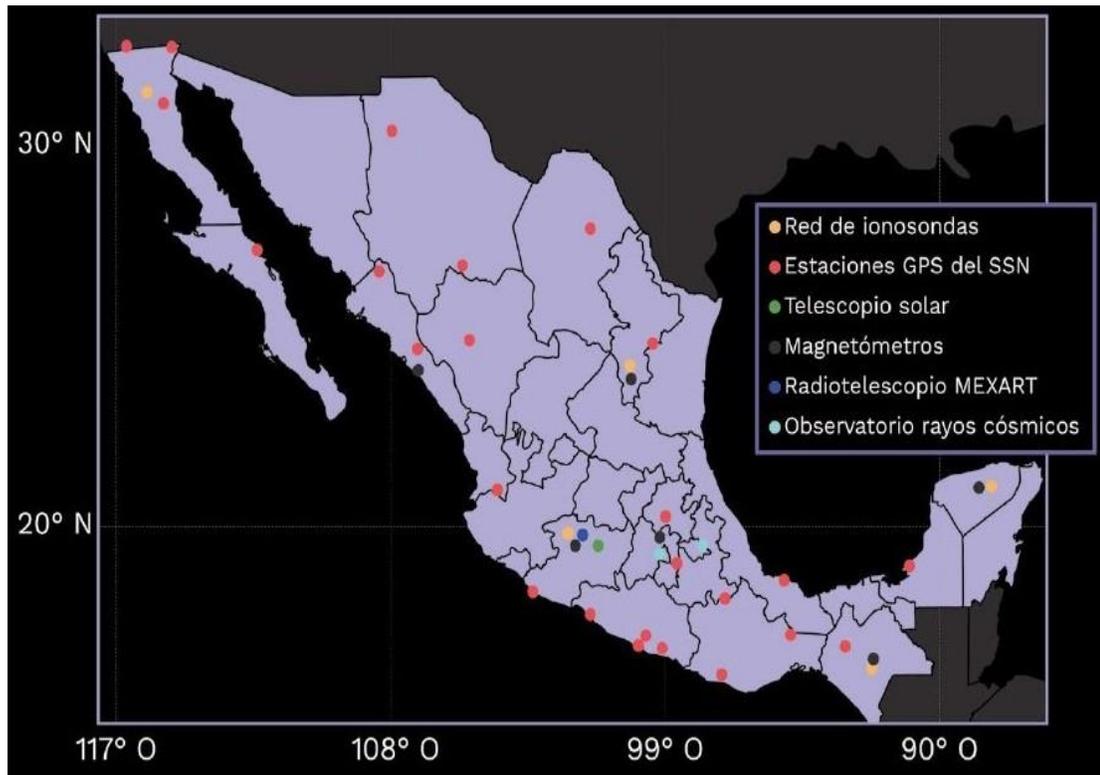


Imagen tomada de [González-Esparza \(2022b, p.85\)](#).

**Figura 1.4** Centros regionales de alertas del ISES (2016)



Imagen tomada de [Onsager et al. \(2017, p.4\)](#)

## 1.2 Pertinencia de la Tesis

En el proceso de mejora, el personal del LANCE busca contar con una cobertura más amplia en el país, lo que requerirá el involucramiento de más investigadores y estudiantes para la operación de los instrumentos y análisis de los datos. Visitando las instalaciones del LANCE, en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) en Monterrey, y entrevistándome con la Dra. Esmeralda Romero y el Dr. Julio Mejía del Instituto de Geofísica de la UNAM en Morelia encontré que uno de sus requerimientos, en el que podría participar, consistía en la implementación de software para el análisis de datos de centelleo interplanetario con el nuevo *back-end* digital. Donde se tenía la necesidad de migrar un software a lenguaje Python e implementar nuevas rutinas para generar automáticamente los formatos de la *Worldwide Interplanetary Scintillation Stations* (WIPSS) que contienen información del VS.

Este trabajo es parte de un esfuerzo por tener observaciones en tiempo casi real del VS con el *Mexican Array Radio Telescope* (MEXART), que consiste en recabar información de cada observación tan solo unos 15 minutos después de registrar una fuente y así tener un monitoreo constante del VS.

## 1.3 Justificación

Un cambio importante en el MEXART se dio en el 2019 cuando se decidió cambiar el *back-end* analógico, con el que se contaba desde su inauguración en 2005, por uno digital. El analógico constaba de una matriz de Butler, una tarjeta adquisidora de la *National Instrument* y una computadora para almacenar los datos. A partir de noviembre del 2019, se inició la etapa digital por fases, y hasta inicios del 2021 el sistema digital estuvo bajo pruebas y verificación ([Magro et al., 2021](#)).

El lenguaje de programación IDL (*Interactive Data Language*), desarrollado por David Stern en los 1970s, y usado por la NASA para el análisis de datos en diversas misiones, ha llegado a ser ampliamente utilizado en los campos de la astronomía, física atmosférica y procesamiento de

imágenes médicas, por estar orientado a el análisis y la visualización de conjuntos de datos multidimensionales, además de su soporte multiplataforma (Unix, Linux, Windows y Mac). Este es un software propietario, vendido inicialmente por la compañía norteamericana *Research Systems Inc.* y a la fecha de la escritura de esta tesis por *NV5 Geospatial* ([IDL \(programming language\), 2023](#)).

La mayor parte del software que se ha elaborado para el MEXART fue escrito en IDL. Con el cambio del back-end se han incorporado rutinas en otros lenguajes de programación como C y Python.

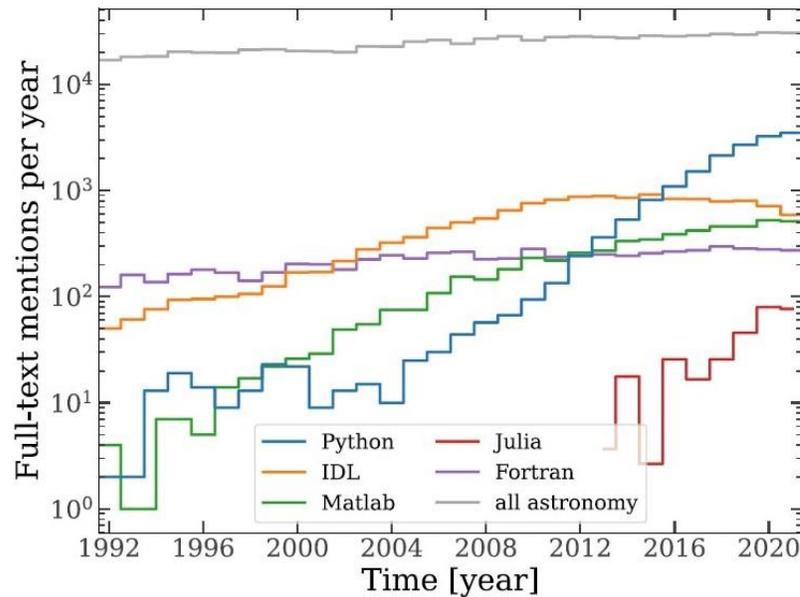
Python creado a finales de los años 80 por Guido van Rossum, se ha vuelto muy popular y es ampliamente utilizado en el desarrollo de software como: *frameworks*, aplicaciones web, creación de prototipos, scripts web, integración de aplicaciones y servicios a través de APIs, desarrollo de GUI de escritorio, ciencia de datos, *machine learning* y más ([Kumar, 2023](#)). Al ser de código abierto, licencia libre y multiplataforma en la actualidad ya existe una amplia colección de bibliotecas y *frameworks* desarrollados en Python, como *Astropy* (2012) orientada a Astronomía y Astrofísica.

Python se ha considerado como el futuro de los lenguajes de programación porque a nivel mundial fue el lenguaje más popular en el 2023, según informó PYPL, dado que es el que más creció en su uso en los últimos 5 años a una razón del 7.8%. Además, de ser el principal lenguaje de codificación para alrededor del 80% de los desarrolladores ([Baruffati, 2023](#)). Por lo que se optó por programar en Python.

[Gerardo Blanco](#) en su artículo sobre el uso de Python en las investigaciones astronómicas menciona: *“El lenguaje más citado en las publicaciones revisadas por pares en la década de 1990 era Fortran. Una década más tarde, IDL tomó la delantera. Luego, Python usurpó esa posición”* (14 de octubre de 2022).

En el artículo publicado por [Astropy Collaboration et al., 2022](#), se comparten las siguientes dos gráficas [Figuras 1.5 y 1.6](#) donde se observa su clara penetración en el mercado durante los últimos diez años.

**Figura 1.5** Evolución del uso de diferentes lenguajes de programación



Estadística basada en citas de la base de datos de revistas de la Astrophysics Data System (ADS) [The Astropy Collaboration et al. \(2022, p. 4\)](#).

**Figura 1.6** Número de usuarios por país de la librería Astropy

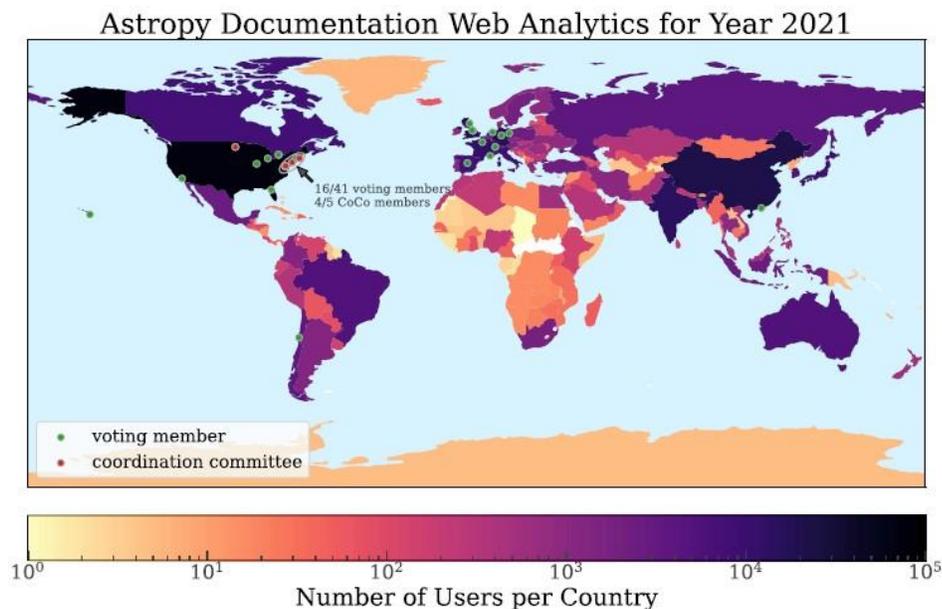


Imagen tomada de [The Astropy Collaboration et al. \(2022, p. 16\)](#).

## 1.4 Objetivos

Esta tesis tiene como objetivo dar continuidad a los trabajos realizados en el MEXART, implementando una plataforma de software en Python para el análisis de datos de centelleo interplanetario (CIP), casi en tiempo real, con el nuevo sistema de adquisición de datos digital. Procesándose los datos del 2020 al 2023 para la generación de formatos WIPSS y mapas de CIP durante dicho período. Además, se plantea complementar los resultados del MEXART con los obtenidos por el International LOFAR Telescope (ILT) y las antenas del Institute for Space Earth Environment (ISEE), más datos in situ de la velocidad y densidad del viento solar registrados por la sonda espacial *Parker Solar Probe* (PSP).

### 1.4.1 Objetivos Específicos

1. En relación al desarrollo de software:
  - a) Migrar y mejorar los programas en IDL, [auto-mexart.pro](#) y [elongation.pro](#) a Python. En auto-mexart se obtienen los parámetros del viento solar (velocidad, índice espectral y razón axial), formatos WIPSS y mapas de centelleo. En elongation se calcula el ángulo de elongación solar.
  - b) Integrar y mejorar las rutinas para la adquisición de las series de tiempo.
  - c) Elaborar un programa para la obtención de los índices g.
  - d) Establecer e implementar los criterios de validación para descartar los espectros de potencia con mucho ruido y/o poca potencia.
  - e) Unificar los dos catálogos de radiofuentes disponibles en el LANCE y validar la AR & Dec de las mismas con la base de datos de [NASA/IPAC](#).
  - f) Incluir todas las fases de desarrollo de software, durante el período de la elaboración de la tesis, que son: diseño, implementación, pruebas, ejecución en sitio y mantenimiento.

2. Efectuar el análisis de los datos del MEXART obtenidos con el back-end digital del 2020 al 2023.
3. En los resultados para el MEXART se debe de incluir:
  - a) La estimación de la velocidad del VS mediante observaciones de CIP para una estación.
  - b) El cálculo de los índices de centelleo (m y g).
  - c) La escritura y validación del formato WIPSS.
  - d) Producir mapas de distribución del VS en base a la información del formato WIPSS.
  - e) Elaborar archivos y gráficas del espectro de potencia para uso interno del LANCE.
4. Obtener la velocidad y la densidad del VS con los datos de la PSP.
5. Obtener resultados del ILT e ISEE.
6. Avanzar en la identificación de eventos del clima espacial donde MEXART, ILT, ISEE y PSP se puedan complementar.

## 1.5 Estructura de la tesis

1. **Introducción.** Antecedentes, objetivo general de la tesis y objetivos específicos.
2. **Marco Teórico.** Sobre el VS, centelleo, CIP, índices de CIP, modelo del espectro de potencias de CIP, formato WIPSS y mapas de CIP.
3. **Instrumentos.** Aspectos generales de los radiotelescopios MEXART, ILT, ISEE y de la PSP.
4. **Metodología.** Descripción de los programas desarrollados para la automatización del MEXART y los programas para la lectura de los datos de ILT, ISEE y PSP. Definiéndose cuáles serán los datos de entrada y de salida, qué hacen, su implementación y ejecución.
5. **Resultados.** Recuento de los resultados obtenidos en el procesamiento de los datos del 2020 al 2023, resumen del proceso de automatización del MEXART, resultados de la PSP encuentro 5, análisis de los resultados del 24 al 30 septiembre 2020, encuentro 6 de la PSP, MEXART, ILT e ISEE. Además, un análisis preliminar al problema de filtrado y posibles acciones.
6. **Conclusiones.** Sobre el cumplimiento de los objetivos, comentarios, alcances y trabajo a futuro.

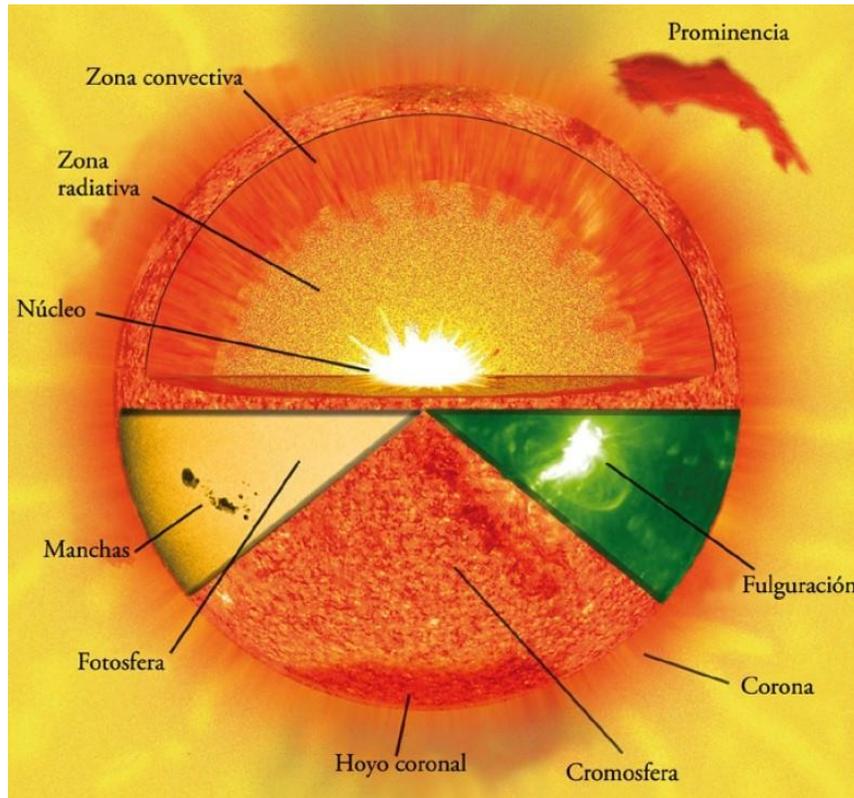
## 2.1 El Sol y el viento solar

*La presente sección está basada el capítulo 8 del libro de “The Sun” publicado en el 2009 por el [David Alexander](#).*

El Sol fuente principal de energía y objeto de estudio en la Meteorología del Espacio o Clima Espacial, es una estrella tipo G, ubicada cerca de la mitad de la secuencia principal, con una masa de  $\approx 2 \times 10^{30}$  kg y un radio de  $\approx 695,700$  km. En el Clima Espacial, además de medir y analizar en tiempo real las propiedades físicas del Sol, también se estudia el medio interplanetario, la magnetosfera, la atmósfera y la superficie terrestre, ya que son influenciadas directa o indirectamente por la actividad solar.

La estructura del Sol, [Figura 2.1](#), está constituida por tres capas internas: (a) el núcleo, (b) la zona radiativa y (c) la zona convectiva; y tres capas externas, que conforman su atmósfera: (a) la fotosfera, donde se forman las manchas solares y fáculas, y se producen llamaradas y erupciones solares; (b) la cromosfera, donde se observan los filamentos, prominencias, espículas y playas solares; (c) la corona, donde se producen los Rayos UV, los Rayos X y las EMC, y se forman los cascocs y hoyos coronales ([Mendoza-Ortega, 2013](#)).

De todos estos fenómenos, las eyecciones son los eventos que repercuten más en el clima espacial, pues se logra desprender una cantidad de masa arrojándola al medio interplanetario. Cuando ocurre, pueden darse a la par llamaradas solares, también denominadas ráfagas o fulguraciones donde se genera radiación en todo el espectro electromagnético y la expulsión de partículas cargadas.

**Figura 2.1** Estructura del Sol

La imagen muestra las distintas capas en que se suelen dividir los procesos físicos y fenómenos que ocurren en el Sol [Mendoza-Ortega \(2013, p. 56\)](#).

### 2.1.1 Perspectiva histórica

Estudios sobre la influencia del Sol sobre su entorno se puede datar desde inicios del siglo XVII, en ese tiempo ya se teorizaba sobre la composición de la luz en partículas llamadas corpúsculos. Por ejemplo, en 1619 el matemático alemán Johannes Kepler (1571-1630) sugirió que las colas de los cometas eran formadas por la acción de la luz solar sobre este objeto celeste. Casi dos siglos después, en 1916 el físico noruego Kristian Birkeland (1867-1917) predijo que el Sol debía ser la fuente de un flujo constante de partículas rápidas, en su estudio sobre auroras boreales y australes, sugiriendo así una conexión directa entre eventos terrestres y el Sol. En particular, propuso que las partículas cargadas producidas por el Sol viajan a través del sistema solar y que algunas de estas partículas capturadas por el

campo magnético terrestre son canalizadas hacia los polos que al interactuar con las partículas cargadas de la atmósfera produce las auroras.

En 1927, se identificó una periodicidad de 27 días en la ocurrencia de ciertas tormentas geomagnéticas, atribuyéndolas a zonas cercanas al ecuador del Sol. Algunas otras tormentas ya habían sido asociadas a grandes llamaradas solares desde mediados del siglo XIX.

En 1932, el geofísico alemán Julius Bartels (1899-1964) encontró recurrencias también en las tormentas, más él las asoció a ciertas regiones en el Sol que denominó *regiones M*. Cerca de veinte años después, el astrónomo M. J. Smyth del Observatorio Real de Edimburgo al estudiar ocho eventos entre el 1950 y 51 encontró que posterior a las tormentas se daba el tránsito de regiones más opacas en la corona. Dichas áreas fueron identificadas por la misión Skylab a inicios de la década de 1970 y éstas, ahora, son conocidas como *hoyos coronales*. Era claro en ese entonces que para la generación de esos disturbios geomagnéticos era necesario la producción de partículas, *los corpúsculos*, que fueran transportados a la Tierra y fue desarrollado el concepto de *viento corpuscular*.

Además, mediante observaciones y estudios sobre los cometas se logró estimar una velocidad del flujo de partículas, procedentes del Sol, de alrededor de unos pocos cientos de kilómetros por segundo, pero el planteamiento teórico sobre la dinámica de la atmósfera solar en la corona fue resuelto hasta 1958 por el astrofísico norteamericano Eugene Parker (1927-2022). Partiendo de una atmósfera solar estática y resolviendo las ecuaciones de hidrodinámica encontró que era inconsistente versus las observaciones, lo que implicaría que para que el Sol mantuviera su equilibrio gravitatorio era necesario considerar otro factor además de los gradientes de presión con la altura, que fue la salida de material, y a ese flujo lo llamó viento solar (VS).

La confirmación de la existencia del viento solar fue al año siguiente, mediante la sonda *Lunik 2*, que Rusia lanzó hacia la Luna, logrando medir fluctuaciones significativas en los detectores de partículas ionizadas cuando la

sonda apuntaba hacia el Sol. En 1961, la NASA por medio del satélite *Explorer 10* obtuvo mediciones similares. Resultados concluyentes se obtuvieron con la sonda espacial *Mariner 2* ([Snyder & Neugebauer, 1965](#)), misión a Venus de la NASA lanzada en 1962. No tan sólo detectó el flujo continuo de partículas cargadas procedentes del Sol, sino variaciones en densidad y velocidad<sup>3</sup>; regiones de compresión con una mezcla de flujos rápidos y lentos, donde las bajas densidades se dan en flujos de mayor velocidad. También, se observó la repetición de zonas de compresión cada 27 días, como el período de rotación del Sol en el ecuador, implicando su origen solar.

### 2.1.2 Viento Solar

Las altas temperaturas en la atmósfera solar crean un flujo continuo de gas ionizado, plasma solar, constituido de iones, protones y electrones, altamente conductivo, que se expande y cubre el medio interplanetario y acarrea consigo las líneas de campo magnético, a éste se le denomina VS.

Uno de los descubrimientos más importante fue el distinguir dos tipos de VS, que es caracterizado por su velocidad; es decir, VS rápido y lento.

Observaciones con la sonda *Solar and Heliospheric Observatory, SOHO* ([Domingo, Fleck & Poland, 1995](#)), puesta en órbita en 1995, detectaron pequeñas estructuras en la base de los hoyos coronales. Estas estructuras serían la fuente de VS rápido que fluye en los bordes de redes magnéticas con líneas de campo abiertas. Su velocidad es alrededor de los  $10 \text{ km s}^{-1}$  y a través de su paso por la corona se eleva como a  $750 \text{ km s}^{-1}$ .

Adicional a éstas, se han encontrado lo que denominan *espículas*, que podrían ser los bloques de construcción del VS, ya que sobre la superficie del Sol hay cientos de miles de espículas en extensiones de 500 km y de 500 km

---

<sup>3</sup> Densidades de:  $1 \times 10^6$  partículas  $\text{m}^{-3}$  a  $50 \times 10^6$  partículas  $\text{m}^{-3}$ ;

Velocidad de  $300 \text{ km s}^{-1}$  a  $800 \text{ km s}^{-1}$ .

de alto que eyectan material a  $22 \text{ km s}^{-1}$  cada cinco minutos. La mayoría de este material retorna al Sol, pero se estima que si el 1% de éste pudiera escapar de la gravedad del Sol podría ser el origen del VS.

La velocidad terminal al cual escapan las partículas ionizadas del VS rápido y lento es diferente. Mediante mediciones de la sonda *Ulises* se encontró que el VS lento se origina en regiones con temperaturas de  $2$  a  $3 \times 10^6 \text{ K}$ , mientras que el VS rápido en los hoyos coronales, que son zonas más frías, a  $1 \times 10^6 \text{ K}$ . Además, se descubrió que toma mucho tiempo acelerar el viento solar lento a una velocidad terminal de  $\approx 400 \text{ km s}^{-1}$  para alcanzar unos 20 radios solares<sup>4</sup> o más ( $\approx 15 \times 10^6 \text{ km}$ ) de la superficie del Sol. En cambio, el viento solar rápido se acelera muy rápidamente a  $750 \text{ km s}^{-1}$  a una altura de  $5$  a  $7 \times 10^6 \text{ km}$ , pero no hay un consenso sobre qué fuentes de energía provoca tales aceleraciones.

Con el desarrollo de una mejor instrumentación se llegó a determinar que a gran escala el viento solar<sup>5</sup> rápido está compuesto en  $\approx 95\%$  electrones y protones,  $5\%$  iones de Helio (partículas alfa<sup>6</sup>) y trazas de iones más pesados. Al estar constituido por diferentes partículas, el viento solar oscila en un amplio rango de temperaturas.

A continuación, en la [Tabla 2.1](#), se listan algunas de las características del VS lento y rápido, y valores nominales para la velocidad, temperatura y densidad.

---

<sup>4</sup> 1 Radio Solar ( $R_{\odot}$ ) =  $6.957 \times 10^5 \text{ km}$

<sup>5</sup> The bulk of the solar wind

<sup>6</sup> Núcleos de He ionizados con 2 protones+2 neutrones (He-4,  ${}^4\text{He}$ ) y carga +2e

**Tabla 2.1** Propiedades del viento solar

Propiedad	Viento Solar Rápido	Viento Solar Lento
Origen Solar: Mínimo Solar	Hoyos Coronales (HC)	Casco Coronal a $\pm 35^\circ$ latitud
Origen Solar: Máximo Solar	HC Polar y a bajas latitudes	Todas las latitudes
Naturaleza del viento	Continuo y uniforme	Altamente variable
Velocidad promedio	700 km s <sup>-1</sup>	350 km s <sup>-1</sup>
Temperatura de protones	280,000 K	55,000 K
Temperatura de electrones	130,000 K	190,000 K
Temperatura de iones de Helio	730,000 K	170,000 K
Densidad de protones a 1UA	~ 3 partículas cm <sup>-3</sup>	~ 5-10 partículas cm <sup>-3</sup>

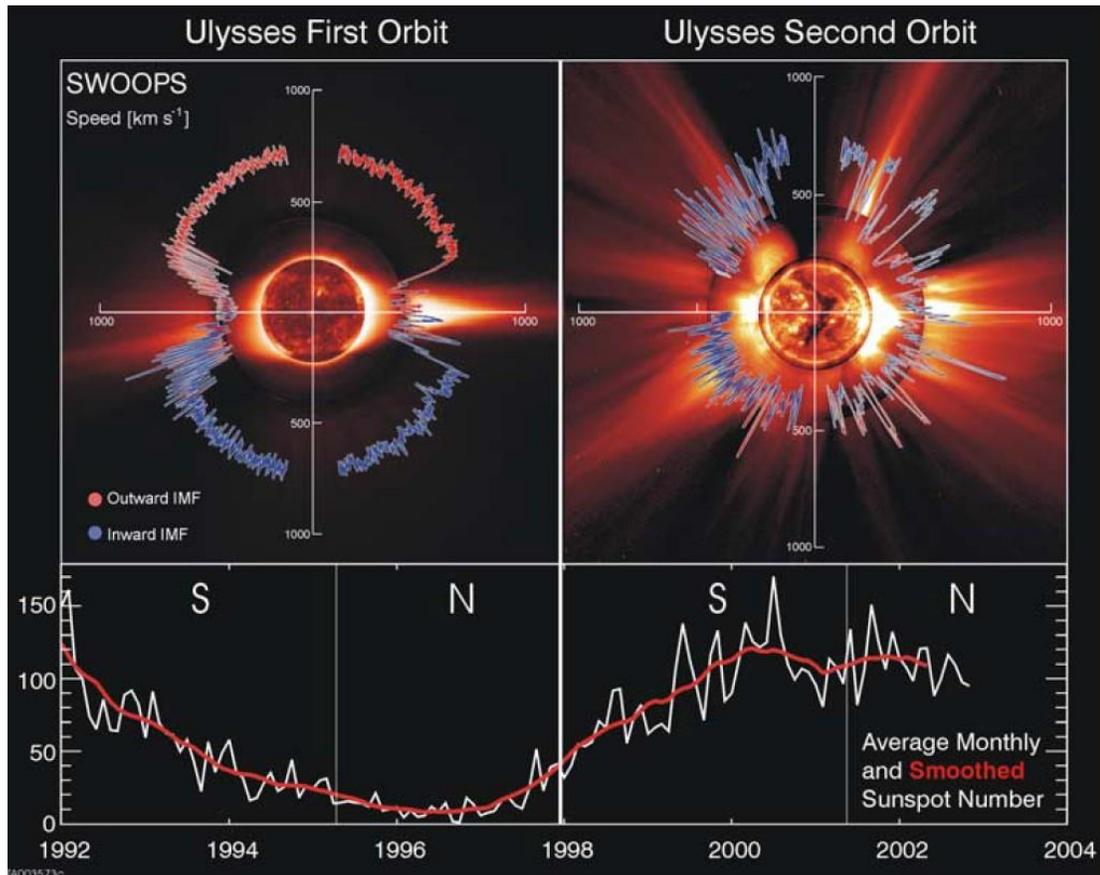
*Tabla adaptada de Alexander (2009, p.122).*

### 2.1.3 Variaciones por el Ciclo Solar

En 1990 se lanzó la primera sonda espacial, nombrada Ulises, que observaba al Sol fuera de la eclíptica<sup>7</sup>, viajando desde el ecuador a los polos con un período orbital de 6.3 años. Finalizando su misión en el 2009 al agotarse su fuente de energía nuclear, proporcionó casi dos décadas de información científica sobre las propiedades del VS y su variación con el tiempo, como se muestra en la [Figura 2.2](#).

Durante su primera órbita, el Sol estaba en la fase descendente del ciclo solar 22 e iniciando el ciclo 23. En su segunda vuelta, el Sol se encontraba en su fase ascendente del ciclo 23. En las dos gráficas superiores de la [Figura 2.2](#) se representa la velocidad del VS en función de la latitud. Durante el mínimo la velocidad del VS se decrementa al acercarse al ecuador y aumenta en los polos. Mientras que, en la fase ascendente y máximo, tanto el VS rápido como el lento pueden emerger desde cualquier latitud entremezclándose. En las gráficas también se señala la dirección del campo magnético interplanetario, entrante en azul y saliente en rojo.

<sup>7</sup> Proyección del movimiento aparente del Sol sobre la esfera celeste, debido a la traslación de la Tierra.

**Figura 2.2** Observaciones del VS por la misión Ulyses del 1992 al 2003

(Sup.) Velocidad del VS para Sol quieto (izda) & activo (dcha.). (Inf.) número de manchas solares entre 1992 al 2004. [McComas et al. \(2003, p. 24-2\)](#).

El VS rápido se genera en los hoyos o agujeros coronales, que son regiones más frías y menos densas donde las líneas de campo magnético están abiertas. Durante el mínimo solar los hoyos coronales se localizan principalmente sobre los polos y el VS rápido se encuentra bien estructurado a altas latitudes. Hacia el máximo solar, se incrementa las regiones activas que al interactuar con los campos polares genera pequeños hoyos coronales a bajas latitudes o grandes extensiones de los hoyos coronales polares hacia el ecuador, resultando en una mezcla de viento solar rápido con el VS lento por la presencia de los cascos coronales, estructuras de campo magnético cerrado que limitan la salida de plasma y dan lugar al VS lento.

Durante el mínimo, la corona solar se aproxima a una estructura dipolar donde las líneas de campo magnético cerradas y abiertas están separadas por grandes áreas, cascos y hoyos coronales, asociadas con el VS lento y rápido respectivamente. La gráfica inferior en la [Figura 2.2](#) proporciona el número promedio mensual de manchas solares versus el tiempo, señalando la polaridad de las regiones activas (S=Sur, N=Norte). La línea roja es la suavizada.

#### 2.1.4 Forma: Espiral de Parker

Las partículas ionizadas, que conforman el VS, son obstaculizadas por las líneas de campo magnéticas, pero fluye fácilmente alineadas a ellas. El campo magnético, y el viento solar que van a la par, permean el medio interplanetario y forma el campo magnético interplanetario. Aunque el campo emana en forma radial, por el giro del Sol sobre su eje toma la forma de una espiral de Arquímedes denominada *espiral de Parker*, que a su vez ondula por la discrepancia con su eje magnético, dando la apariencia de una falda de bailarina, [Figura 2.3](#).

**Figura 2.3** Espiral de Parker

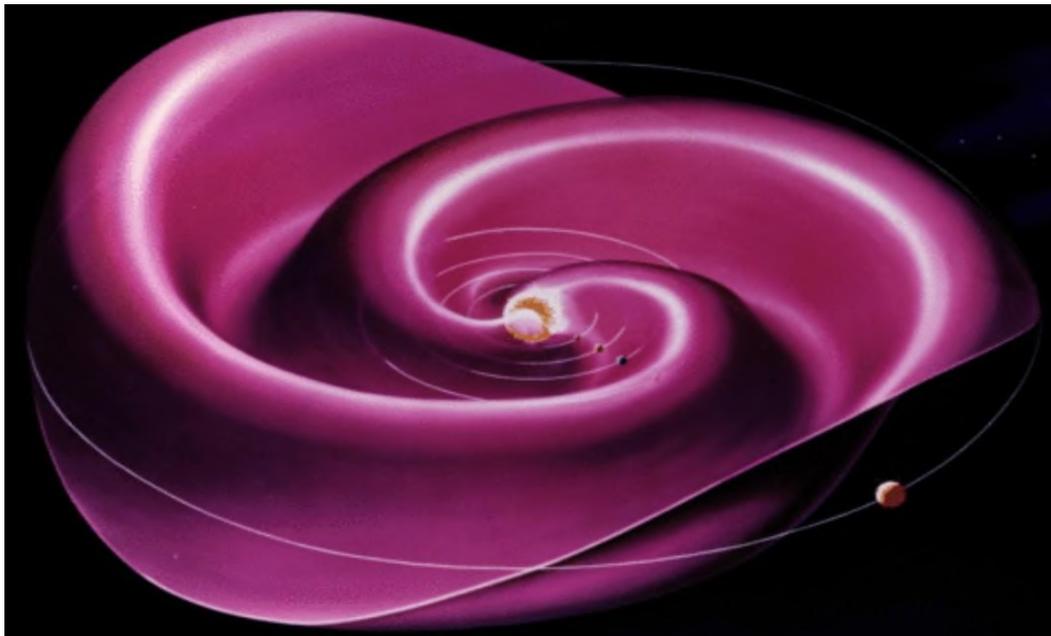


Imagen tomada de [Alexander \(2009, p. 120\)](#).

La imagen es una representación artística de la espiral de Parker, elaborada por la NASA, donde se señala la orientación de las líneas de campo y la distribución del VS en el medio interplanetario emergiendo del Sol, el centro de la espiral, y girando alrededor de él los planetas Mercurio, Venus, Tierra, Marte y Júpiter, representados por pequeñas esferas, e indicando mediante líneas más claras el trazo de sus trayectorias.

### **2.1.5 Impacto sobre el Sistema Solar**

La manera en cómo el viento solar afecta a los planetas depende si éstos cuentan con un campo magnético significativo. Sin este, como en el caso de Venus y Marte, la atmósfera será calentada por la acción de la luz visible y UV, y va siendo erosionada por la acción del viento solar. Su deterioro dependerá de la distancia al Sol, su masa planetaria y la de la atmósfera. Se estima que en la historia temprana del sistema solar el viento solar pudo haber sido 1000 veces más denso y ser el responsable de la escasa atmósfera en Marte y de ser tan seco.

Los otros planetas son protegidos del viento solar por su campo magnético que canaliza las partículas cargadas hacia los polos. La interacción del campo magnético interplanetario con el planetario<sup>8</sup> produce fluctuaciones significativas en este último, comprimiéndolo del lado del Sol y formándose una gran cola en la dirección contraria al Sol. En la Tierra, por la acción del Sol, por ejemplo, se producen auroras, tormentas geomagnéticas, interrupciones de radio y los satélites quedan expuestos al viento solar.

### **2.1.6 Límites del Viento Solar**

El viento solar extiende la esfera de influencia del Sol más allá del espacio interestelar. Al espacio que es directamente afectado por el viento solar y el campo magnético del Sol se le denomina *heliosfera*. Una estimación

---

<sup>8</sup> Magnetosfera

de los límites de la heliosfera es de 90-120 UA ([Voyager Fact Sheet, s.f.](#); [Gurnett & Kurth, 2019](#)).

La presión del viento solar no permite que el medio interestelar traspase la heliosfera, aunque es transparente para los átomos neutros, polvo interestelar y rayos cósmicos de alta energía, que llegan a interactuar con el viento solar. Las partículas neutras son ionizadas por el viento solar y las eyecciones de masa coronal, mientras que los rayos cósmicos son de tan elevada energía que atraviesan todo el sistema solar y sus efectos pueden ser detectados en la superficie de la Tierra.

## 2.2 Observaciones en radio

El Centelleo se podría definir como el titilar o parpadeo de una fuente luminosa observada a lo lejos; pero más formalmente, es la variación aleatoria de la intensidad recibida de una fuente luminosa por efecto de su dispersión al atravesar un medio no homogéneo; es decir, por la difracción del frente de onda cuando pasa por el medio; que en general, posee diferentes concentraciones y por ende diferentes índices de refracción, generando un patrón de interferencia.

Dependiendo del medio, se ha identificado cuatro tipos de centelleo: (a) atmosférico, a nivel de la tropósfera, (b) ionosférico (c) interplanetario, (d) interestelar. Dichas fluctuaciones son detectadas en el rango de luz visible para el primer caso y en radio para los otros tres tipos empleando radiotelescopios.

### 2.2.1 Perspectiva histórica

*En esta sección se tomó como base el capítulo 1 de [Marr et al. \(2016\)](#).*

El estudio de los objetos celestes en la banda de radio; es decir, la radioastronomía, emergió en la primera mitad del siglo XX (con Jansky y Reber, como pioneros), pero el verdadero desarrollo fue en la segunda mitad del siglo. Las radiofuentes o fuentes de radio cósmicas son objetos del espacio exterior que emiten de manera natural energía electromagnética en el espectro

de radio por procesos térmicos (radiación de cuerpo negro) o no térmicos como radiación de frenado (Bremsstrahlung) y radiación de sincrotrón. Entre las fuentes que emiten en radio se tienen: al Sol, núcleos activos de galaxias, pulsares, cuásares y remanentes de supernovas.

Se ha desarrollado el estudio en otras longitudes de onda como en rayos gamma, X, UV, y luz infrarroja; pero, dado que sólo la luz visible y las ondas de radio son transparentes a la atmósfera terrestre casi todos los radiotelescopios están en Tierra, mientras estos otros estudios se llevan a cabo desde el espacio.

Los estudios previos en el siglo XIX sobre electricidad y magnetismo sentaron las bases para el desarrollo de la radioastronomía. En 1887, Heinrich Hertz produjo ondas de radio en su laboratorio e inspiró a otros científicos a buscar ondas de radio en el espacio. Tres años después, en 1890, Thomas Edison y Arthur Kennelly propusieron buscar la correlación entre el número de Manchas Solares y las señales de radio. En 1894, Sir Oliver Lodge trató de detectar las señales de radio procedentes del Sol, pero falló atribuyéndolo a interferencia local. Otros astrónomos lo intentaron sin éxito, como Johannes Wilsing, Julius Scheiner y Charles Nordmann.

Ahora se conoce que se debió a que los equipos de radio no eran lo suficientemente sensibles. Se requería la amplificación de las señales captadas por la antena. Fue hasta 1932, que Karl Jansky de los Laboratorios Bell hizo la primera detección exitosa de una emisión de radio astronómica. Este era un chasquido proveniente del centro galáctico, localizado en la constelación de Sagitario.

En 1937, Grote Reber, ingeniero de profesión construyó una antena de 30 pies en su casa, con sus propios recursos, en Wheaton, Illinois, logrando captar señales de radio del centro de la Galaxia a 160 MHz y de las fuentes ahora conocidas como Casiopea A (remanente de una supernova) y Cisne A (una galaxia). Publicó sus resultados en 1940 y 1944.

En febrero de 1942, James Stanley Hey, físico inglés, quién estaba a cargo de analizar todos los informes de interferencia en los equipos de radar del ejército, detectó interferencia en los radares y concluyó que la causa estaba relacionada con una gran mancha presente en el Sol. Aunque esta justificación no fue del todo aceptada. En ese año, el *Southworth of Bell Labs* reportaron emisiones de radio con el Sol quieto observada en los GHz. Estos dos estudios fueron el inicio para el desarrollo de la radioastronomía solar.

Un desarrollo teórico esencial para el estudio del Universo usando las ondas de radio, inició en 1944 con el cálculo de la línea de emisión de 21 cm para el Hidrógeno sugerido a Hendrik van de Hulst, estudiante de doctorado, por el astrofísico Jan Oort. Detectándose hasta 1951 por investigadores de Harvard.

Hey y colaboradores, en 1946, observaron fuentes de radio, con mayor precisión que Reber, y constataron que las emisiones captadas del Cisne variaban con el tiempo. Reconocieron al Cisne A como una fuente de radio puntual versus las emisiones provenientes de la Vía Láctea. Y en 1948, determinaron la asociación de los estallidos de radio con las manchas y llamaradas solares.

También en el 1946, se dio el primer paso para el desarrollo de la radioastronomía de alta resolución cuando Sir Martin Ryle y D. D. Vonberg realizaron la primera observación astronómica utilizando un par de antenas de radio como interferómetro. Observaciones interferométricas hechas posteriormente por varios investigadores resultó en la medición precisa de las posiciones de varias fuentes importantes de radio, como lo son: Cisne A, Casiopea A y la Nebulosa del Cangrejo.

Con interferómetros más avanzados, un catálogo con las 471 fuentes más brillantes en la frecuencia de los 159 MHz fue publicado en 1959 por la Universidad de Cambridge. Este catálogo fue conocido como el Tercer Catálogo de Cambridge de Fuentes de Radio (3C). Una versión revisada, el

catálogo 3CR a los 178 MHz fue publicado años más tarde y en 1967 el catálogo 4C.

En la década de 1950, se investigó sobre la naturaleza de la emisión continua en radio y se determinó que esta radiación procede de la emisión de fotones por electrones acelerados a velocidades relativistas que siguen las líneas de campo magnético en forma de espiral en algún medio astrofísico. Este tipo de radiación se le denominó “radiación de sincrotrón”. Además, se sentaron las bases para la identificación del centelleo interplanetario, porque se caracterizó el centelleo ionosférico.

En los 60's, se descubrieron pulsares, cuásares, la radiación cósmica de fondo y continuó el desarrollo de los interferómetros de radio, con mayor cantidad de arreglos de antenas e inclusive con antenas separadas a distancias continentales como en los *very long baseline interferometry*.

A principio esa década, Margaret Clarke, estudiante de doctorado, identificó por primera vez variaciones de flujo de radiofuentes semejantes a las producidas por centelleo ionosférico durante su estancia en el Mullard Radio Astronomy Observatory (MRAO). Encontraron que estas fluctuaciones estaban bien correlacionadas con la posición de la fuente respecto al Sol y que las radiofuentes deberían de ser de un diámetro angular menor a un segundo de arco. En 1964, Antony Hewish en conjunto con Scott y Wills acuñaron el termino de *Interplanetary Scintillation* (IPS), o por sus siglas en español CIP ([Hewish, Scott, Wills, 1964](#)).

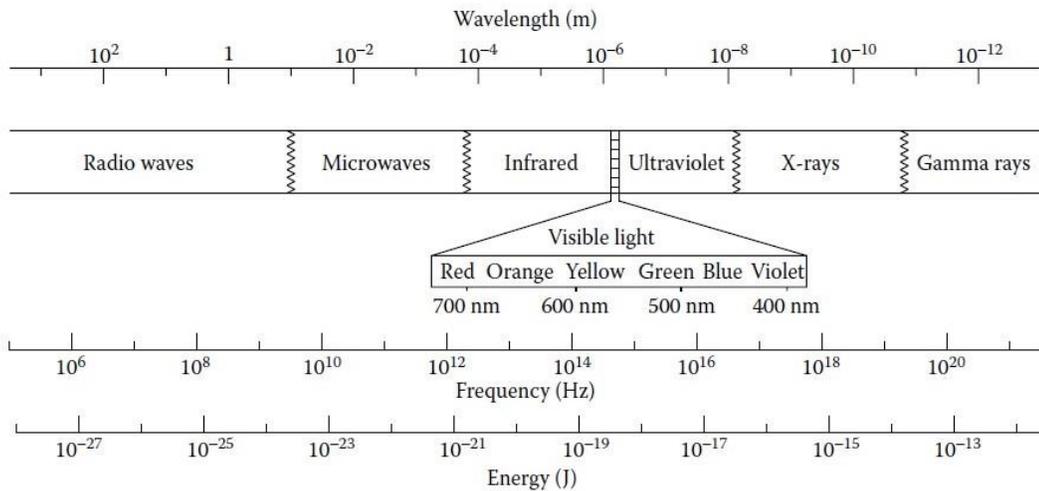
### 2.2.2 Ondas de Radio

Las Ondas de Radio son una forma de Radiación Electromagnética (EM). Esta clase de radiación es producida por partículas cargadas, generalmente electrones bajo aceleración. En el Espectro EM hay diferentes bandas definidas por su energía, frecuencia o longitud de onda ([Figura 2.4](#)). La relación entre estas tres cantidades está dada por las ecuaciones:

$$E = h\nu , \quad c = \lambda\nu, \quad \text{por lo que } E = \frac{hc}{\lambda} ,$$

sustituyendo se obtiene que su energía es directamente proporcional a la frecuencia, pero inversamente proporcional a la longitud de onda, donde  $h$  = constante de Planck =  $6.626 \times 10^{-34}$  J s,  $\nu$  = frecuencia,  $\lambda$  = longitud de onda y  $c$  = velocidad de la luz.

**Figura 2.4** Bandas del espectro electromagnético



Clasificación por nivel de energía, frecuencia y longitud de onda [Marr et al. \(2016, p. 6\)](#).

La ventana de radio, [Figura 2.5](#), donde las ondas no son absorbidas ni reflejadas por la atmósfera, se encuentra en los rangos de frecuencia de 10 MHz a 300 GHz, longitudes de onda de 30 m a 1 mm.

### 2.2.3 Radiofuentes

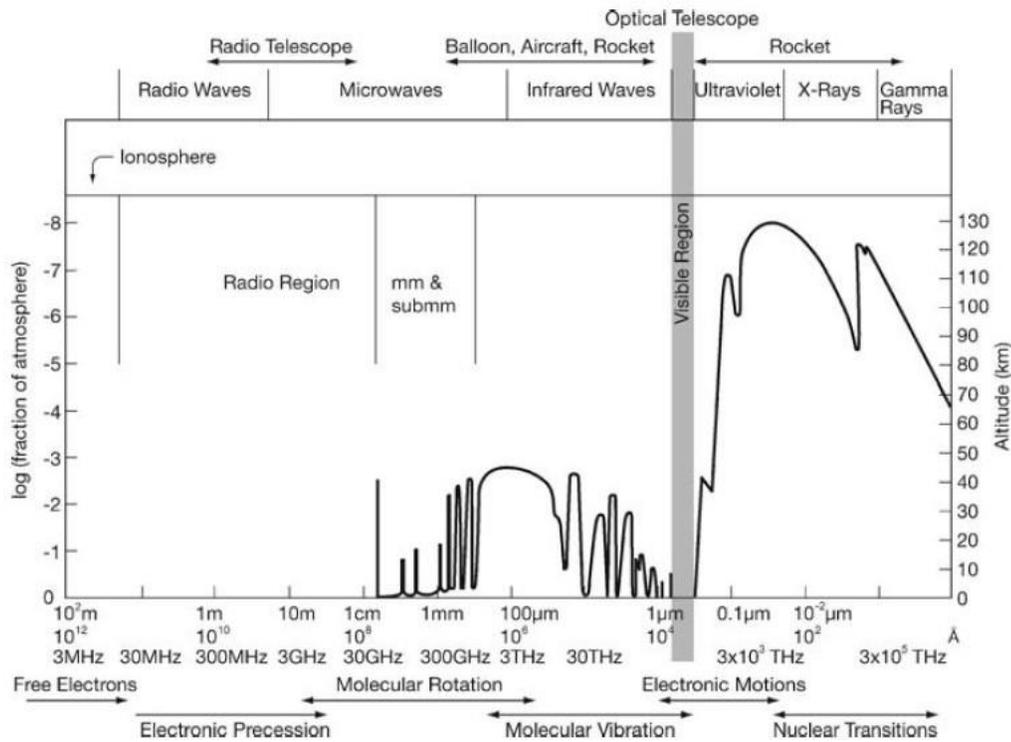
Las radiofuentes son objetos en el cosmos que emiten de manera natural radiación EM en longitudes de onda de radio. El Sol es la fuente más intensa en radio en nuestro sistema planetario. Dentro de la Vía Láctea, tenemos a Sagitario A (centro galáctico) y remanentes de supernovas como la Nebulosa del Cangrejo.

Otras fuentes celestes extra galácticas fuertes son las galaxias activas (AGNs), como Cassiopeia A & Cygnus A; cuásares como 3C273 & 3C279 y hoyos negros supermasivos (SMBH) como Virgo A & Hércules A (3C348).

Las fuentes de radio se pueden clasificar por sus mecanismos de radioemisión en: térmicos y no térmicos. Térmicos, por su emisión tipo cuerpo

negro, como en el Sol. No térmicos, cuando la emisión es debido a cargas aceleradas a velocidades relativistas, como en las reconexiones magnéticas producidas en la corona solar y en los remanentes de supernovas o núcleos galácticos.

**Figura 2.5** Atenuación de las ondas EM por la atmósfera terrestre



La gráfica muestra los niveles de energía que atraviesan la atmósfera. En el eje horizontal inferior, la longitud de onda en m y Å, la frecuencia, y tipo de proceso que dominan ese rango de frecuencias. En el eje horizontal superior, clasificación e instrumentos de observación. En el eje vertical, altitud en km (dcha.) y el porcentaje de absorción en escala logarítmica (izda.). [Wilson et al. \(2009, p. 3\).](#)

También, se pueden clasificar por su diámetro angular en puntuales, compactas y extendidas. Las fuentes puntuales son las que tienen un tamaño físico infinitesimal por lo que pueden considerarse adimensionales, compactas las de menos de un segundo de arco y extendidas de más de 1 segundo de arco. El *diámetro angular* o *tamaño angular* es el diámetro aparente del objeto celeste observado desde la Tierra. En particular, las radiofuentes que

presentan el fenómeno de CIP se encuentran dentro del rango de diámetros angulares de 0.1 a 0.5 segundos de arco ([Chang, 2017](#); [Rao et al., 1974](#)).

En los albores de la radioastronomía, cuando se detectaron las fuentes de radio más intensas, las radiofuentes fueron nombradas por la constelación en la que se localizaba más una letra, siguiendo el orden alfabético como Taurus A. Al irse generalizando la construcción y el empleo de radiotelescopios e irse descubriendo más fuentes se optó por nombrarlas por orden de aparición en el estudio, precedido por el identificador del catálogo. Por ejemplo, Taurus A es identificada en el catálogo de Messier (1774-1781) como **MESSIER 001**, en el catálogo de NGC (1880) como **NGC 1952** y en el catálogo 3C (1959) como **3C144**. Años después se empleó la ascensión recta y declinación, ambas coordenadas ecuatoriales, como en el catálogo de Parkes (1969). Por último, la *International Astronomical Union* recomienda usar un acrónimo junto con **J** para indicar que sus coordenadas fueron actualizadas al equinoccio del 2000, o **B** si lo fueron con respecto al año de 1950, seguido de sus coordenadas para nombrar objetos astronómicos ([Chang, 2017](#)).

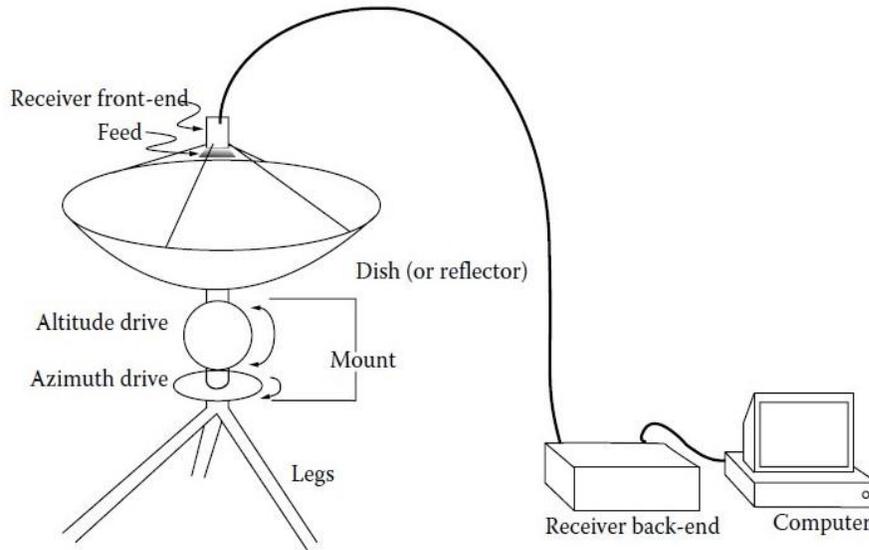
#### 2.2.4 Radiotelescopios

Se conoce comúnmente a los radiotelescopios como instrumentos que soportan una parábola conocida como plato o disco. En la [Figura 2.6](#) se muestra un *radiotelescopio de disco*, también conocido como *reflector primario* porque el disco parabólico, que es la primera superficie donde incide la radiación EM, hace la función de reflector concentrando la luz que incide en el punto focal de éste, donde se encuentra un alimentador que es una antena tipo corneta.

Otro tipo de radiotelescopio de disco es el Cassegrain, donde en el punto focal del reflector primario se encuentra un reflector secundario que es un espejo cóncavo que redirige el haz de luz a la distancia focal del espejo donde se encuentra el alimentador y que suele estar en la parte trasera de la

antena. La ventaja de esta segunda configuración es la facilidad de operación y mantenimiento al receptor.

**Figura 2.6** Radiotelescopio de disco



*Componentes de un radiotelescopio tipo reflector primario: soporte, montura tipo azimutal, disco reflector, antena alimentadora, receptor delantero (del lado de la antena) y trasero (del lado de la computadora), línea de transmisión entre los receptores y equipo de cómputo. [Marr et al. \(2016, p. 21\)](#).*

El reflector recibe la señal eléctrica y la dirige a los receptores. Estas señales son amplificadas y filtradas en el receptor frontal, *receiver front-end*, definiendo el rango de frecuencias de las ondas EM que serán enviadas por las líneas de transmisión y se transforma las señales analógicas a digitales por el receptor trasero, *receiver back-end* ([Marr, 2016](#)).

Los radiotelescopios parabólicos requieren además de un soporte y de un mecanismo para girarlo. La montura puede ser de dos tipos, si se emplea un sistema de coordenadas horizontal (azimut-altitud), o ecuatorial (ascensión recta y declinación).

Si el radiotelescopio está constituido por varias antenas se le denomina interferómetro, porque operan bajo ese principio, usando grupos de reflectores de disco o parabólicos cilíndricos o arreglos de antenas dipolares de manera que en conjunto operan como si fuera una sola antena.

### 2.2.6 El Jansky

La energía procedente de alguna fuente luminosa, no es medible directamente, porque la mayoría de ella es emitida en direcciones fuera del alcance del telescopio y sólo logrará captar una fracción de la luminosidad total emitida por la fuente sobre un área finita, dentro de un ángulo sólido, y a ciertas frecuencias, empleando para ello la irradiancia espectral  $E_\nu$ , en  $\text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$ , y la radiancia espectral  $L_\nu$ , en  $\text{W sr}^{-1} \text{m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$ . Ambas cantidades son medibles pero muy pequeñas, por lo que el estándar es usar los Jansky para evitar los exponentes negativos muy grandes, donde un Jansky (**Jy**) =  $10^{-26} \text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$ .

### 2.2.7 Intensidad específica y radiación del cuerpo negro

De electrodinámica se sabe que la *intensidad específica* o brillo es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico ( $E_0$ ),

$$I_\nu \propto E_0^2. \quad (2.1)$$

Donde  $I_\nu$  tiene unidades en el de  $\text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1} \text{sr}^{-1}$ .

La potencia que a traviesa un área infinitesimal  $d\sigma$  se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$dP = I_\nu \cos\theta d\Omega d\sigma d\nu,$$

donde  $d\nu$  es un diferencial de ancho de banda,  $d\Omega$  es un diferencial de ángulo sólido,  $d\sigma$  es un diferencial de área y  $\theta$  es el ángulo entre la normal al diferencial de área y la dirección de  $d\Omega$  (ver [Figura 2.8](#)).

La irradiancia espectral ( $\text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$ ) se obtendría integrando el brillo sobre el ángulo sólido subtendido por la fuente, donde  $\varphi$  es el ángulo de acimut a la radiofuente

$$S_\nu = \int_{\Omega_S} I_\nu(\theta, \varphi) \cos\theta d\Omega,$$

la mayoría de las fuentes que se captan con el MEXART emiten flujos del orden de 10 a cientos de janskys.

En el caso de fuentes no térmicas, el flujo aumenta con la longitud de onda de observación, guardando la siguiente relación

$$S_{\lambda} \propto \lambda^{\alpha}, \quad (2.2)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda y  $\alpha$  es el índice espectral que depende de la radiofuente. Por lo general, el índice espectral se encuentra entre 0.3 y 1.3 (Kraus, 1986).

Por otro lado, la radiación de cuerpo negro en longitudes de onda de radio, puede ser aproximada a

$$B_{\nu}(T) \approx \frac{2kT}{\lambda^2}, \quad (2.3)$$

donde:

$B_{\nu}$ = Intensidad específica, brillo o radiancia espectral ( $\text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1} \text{sr}^{-1}$ ),

$k$ = Cte de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23} \text{J K}^{-1}$ ),  $T$ = Temperatura (K).

Esta expresión es conocida como la Ley de Rayleigh-Jeans y tiene la forma de la [ecuación \(2.2\)](#) con el índice espectral igual a -2.

Las fuentes no térmicas tienen un índice espectral  $\alpha$  positivo, y las térmicas poseen un índice espectral negativo ([Raulin y Pacini, 2005](#)).

Despejando la temperatura de la [ecuación \(2.3\)](#), quedaría:

$$T = T_B = \frac{B_{\nu} \lambda^2}{2k}.$$

A esta temperatura se le llama temperatura de brillo y se aplica independientemente si el flujo proviene de un cuerpo negro o no, aunque de ser así,  $T_B$  sería la temperatura de la fuente observada.

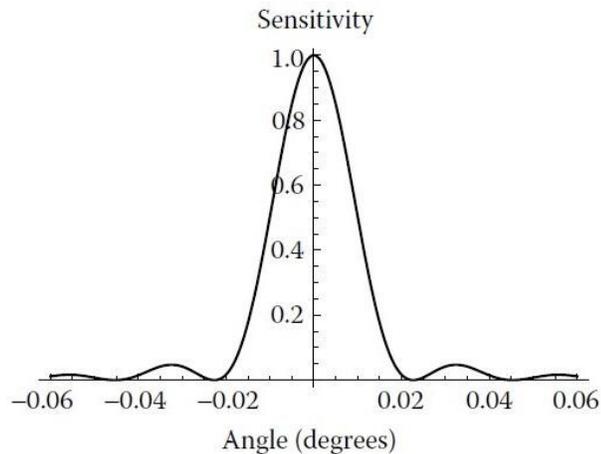
### 2.2.8 Patrón de radiación y potencia de antena

El patrón de radiación es una medida de la sensibilidad del telescopio a las señales de radio entrantes o salientes en función de la posición angular en el cielo. Idealmente, se quisiera que cada antena recibiera las señales de radio desde una sola dirección; pero, por efecto de la difracción de la luz la señal captada proviene de otras direcciones.

Un ejemplo de gráfica de la sensibilidad de un reflector parabólico como una función del ángulo está en la [Figura 2.7](#). Cuando el ángulo es  $1.22\lambda/L$  radianes al eje de observación las señales resultan en una suma destructiva y la potencia es 0 (primer mínimo). Donde  $L$  es el ancho de la apertura.

La sensibilidad del telescopio, tiene pequeños incrementos después de que alcanza su primer cero. Al ir aumentando el ángulo, una serie de crestas y valles con interferencia constructiva parcial y destructiva aparecerán, éstos se le denominan lóbulos laterales, *sidelobes*, y no son deseables porque pueden ser causa de error en las observaciones. El pico central del patrón de sensibilidad se le llama lóbulo principal o mayor, *main beam*, este corresponde también al haz del telescopio.

**Figura 2.7** Patrón de radiación de un reflector parabólico

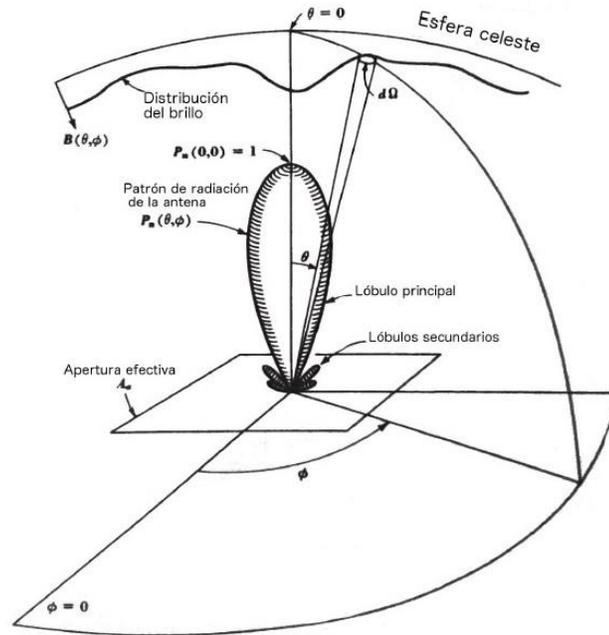


*Perfil típico de la sensibilidad relativa, o patrón de respuesta normalizado, de un radiotelescopio como una función del ángulo relativo al eje central del telescopio, observado a  $\lambda = 1.4$  cm y un diámetro de 40 m [Marr et al. \(2016, p. 83\)](#).*

El ancho del pico central del patrón es usado para definir la resolución angular de un telescopio. Por convención, se mide el ancho angular de este pico entre dos puntos donde la potencia recibida cae al 50% del máximo. Este ángulo es denominado el FWHM, *full width at half maximum*, del lóbulo principal. En general, el patrón de radiación de una antena es bidimensional,

ver [Figura 2.8](#), y puede ser circular o elíptico. Para el caso de una apertura circular como el de la [Figura 2.7](#), el FWHM es  $1.02\lambda/L$ .

**Figura 2.8** Geometría para el cálculo de la potencia de antena



Patrón de antena normalizado [Chang-Martínez \(2017, p. 12\)](#).

Es deseable tener una resolución angular pequeña para que fuentes muy próximas puedan ser distinguidas, y dado que el FWHM del lóbulo principal es inversamente proporcional al diámetro del reflector, entonces los telescopios de diámetro grande no sólo colectan más potencia de una fuente astronómica, sino también proveen una mejor resolución angular.

Para encontrar la potencia espectral o potencia por unidad de ancho de banda  $P_\nu$ , captada por el telescopio, se integra a lo largo de un ángulo sólido  $\Omega$  en el cielo mediante la siguiente ecuación:

$$P_\nu = 1/2 A_e \int_{\Omega} \int B(\theta, \phi) P_n(\theta, \phi) d\Omega ,$$

donde  $A_e$  es el área efectiva del telescopio,  $B$  es la intensidad específica, y  $P_n$  es el patrón de radiación de la antena, ver [Figura 2.11](#). El factor de un medio es debido a que la luz captada de un objeto celeste es no polarizada, por lo que sólo se detecta la mitad de la potencia.

### 2.2.9 Sistema Celeste de Coordenadas

Un sistema de coordenadas empleado para ubicar las fuentes celestes de radio es el Ecuatorial, [Figura 2.9](#). El plano fundamental como su nombre lo indica es el ecuador celeste que es una proyección del ecuador terrestre sobre la esfera celeste. Sus componentes son ascensión recta (*right ascension*, **RA** o  $\alpha$ ) y declinación (**DEC** o  $\delta$ ). La ascensión recta y la declinación se miden a partir del punto vernal (punto Aries, equinoccio vernal) y del ecuador celeste, respectivamente.

**Figura 2.9** Sistema de coordenadas ecuatorial

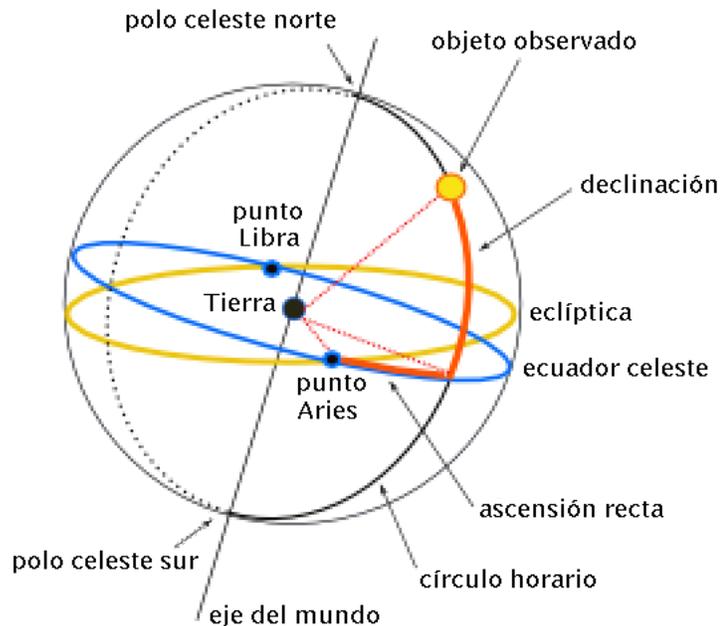


Imagen tomada de [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Coordenadas\\_ecuatoriales.png&oldid=504153143](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Coordenadas_ecuatoriales.png&oldid=504153143).

A similitud del sistema de coordenadas geográficas, la DEC de un objeto celeste es análogo a la latitud, pues se mide a partir del ecuador y va de  $[-90^\circ, +90^\circ]$ ; pero, la longitud, en el geográfico, se mide a partir del meridiano de Greenwich de la Tierra versus RA que es a partir del punto vernal hacia el Este sobre la esfera celeste hasta la intersección del círculo de declinación con el plano fundamental. Tanto la longitud como la RA cubren los

360°; pero, esta última se expresa en horas, minutos y segundos, y puede ir desde 00h 00m 00s hasta 23h 59m 59s.

Otra diferencia entre RA/DEC & latitud/longitud es que, en el cielo, los equivalentes de los Polos, Ecuador y el Primer Meridiano, varían con el tiempo, así que al dar una RA/DEC, se debe también especificar su época; es decir, el tiempo para el cual son válidas, como J2000.

### 2.2.10 Índices de Centelleo Interplanetario

Las mediciones del índice de centelleo a varias distancias del Sol proveen un medio para monitorear los niveles de turbulencia del viento solar, estudiar las fluctuaciones de densidad de electrones en estructuras de gran escala y realizar estudios de largo plazo para analizar los ciclos solares. En esta sección, se presentará como se obtienen los *índices de centelleo m y g*. Ambos índices están relacionados con la variación en la densidad del viento solar.

La variación en intensidad o potencia  $I(t)$  de una fuente en un instante de tiempo  $t$  se puede representar como:

$$\Delta I(t) = I(t) - I_0 ,$$

donde  $I_0$  es el promedio.

El *índice de centelleo m* es un indicador del grado de centelleo; es decir, es una medida del tamaño de las fluctuaciones y se define como la razón entre la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de las fluctuaciones, root mean square, rms<sup>9</sup>, y el promedio; es decir,

$$m = \frac{\Delta I_{rms}}{I_0} ,$$

donde  $\Delta I_{rms}$  se calcula como:

---

<sup>9</sup> rms = Raíz de la media cuadrática, conocida como valor cuadrático medio o media cuadrática.

$$\Delta I_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta I^2(t)}{N}}$$

y que corresponde a la desviación estándar de las intensidades.

Analizando esta relación en el continuo, para un intervalo de tiempo  $\Delta T$  centrado en  $t = 0$ , se tiene que:

$$I_0 = \langle I(t) \rangle = \frac{1}{\Delta T} \int_{-\frac{\Delta T}{2}}^{\frac{\Delta T}{2}} I(t) dt, \quad \Delta I_{rms} = [\langle \Delta I^2(t) \rangle]^{1/2} = \left[ \frac{1}{\Delta T} \int_{-\frac{\Delta T}{2}}^{\frac{\Delta T}{2}} \Delta I^2(t) dt \right]^{1/2}.$$

Se puede obtener otra forma de calcular  $m$  en el continuo usando la función de autocorrelación  $C$ , donde

$$C(\tau) = \frac{1}{\Delta T} \int_{-\frac{\Delta T}{2}}^{\frac{\Delta T}{2}} \Delta I(t + \tau) \Delta I(t) dt = \langle \Delta I(t + \tau) \Delta I(t) \rangle. \quad (2.4)$$

Esta función nos dice cuán similares son las dos fluctuaciones entre sí, si son similares el valor de la integral será grande, y en caso contrario pequeño.

Del teorema de Wiener-Khinchine que establece que, el espectro de potencia es igual a la transformada de Fourier de la función de autocorrelación. Se tiene que el espectro de potencias puede expresarse como:

$$P(f) = \int C(\tau) \exp(-i2\pi f\tau) d\tau.$$

Aplicando la transformada inversa para obtener  $C(0)$ , evaluando en  $\tau = 0$ , se obtiene que:

$$C(0) = \int P(f) df.$$

Pero de la [ecuación \(2.4\)](#) tenemos que  $C(0)$  también es:

$$C(0) = \langle \Delta I^2(t) \rangle.$$

Entonces, el índice  $m$  se puede escribir como ([Manoharan, 1991](#)):

$$m = \frac{\sqrt{C(0)}}{I_0} = \frac{\sqrt{\int P(f) df}}{I_0}. \quad (2.5)$$

Por lo tanto, el índice  $m$  se puede calcular mediante la raíz cuadrada del área bajo la curva del espectro de potencias normalizando con la intensidad media de la fuente.

Debido al movimiento de traslación terrestre, el ángulo de elongación<sup>10</sup>  $\epsilon$  cambia  $\sim 1^\circ$  diariamente para cada fuente de radio. Dependiendo de la frecuencia de observación, el índice de centelleo va aumentando mientras se acerca la línea de visión de la fuente (LOS) al Sol, es decir mientras decrece  $\epsilon$ , hasta llegar a un límite ( $\epsilon_0$ ) donde comienza a disminuir abruptamente (Figuras 2.10, 2.11).

A la distancia más corta entre el Sol y LOS le llamamos  $p$  y el punto de intersección correspondiente entre la línea que marca esa distancia y la línea de visión a la fuente, *punto P* (ver Figura 2.12). En unidades astronómicas se puede ver que  $p = \text{sen}(\epsilon)$ .

**Figura 2.10** Índices de centelleo normalizado para seis radiofuentes

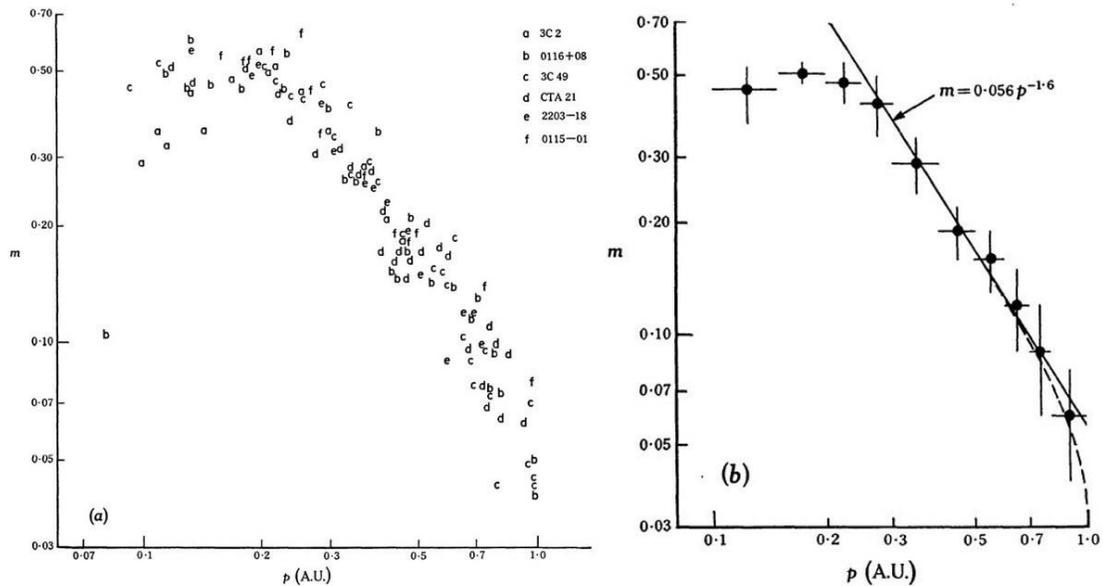
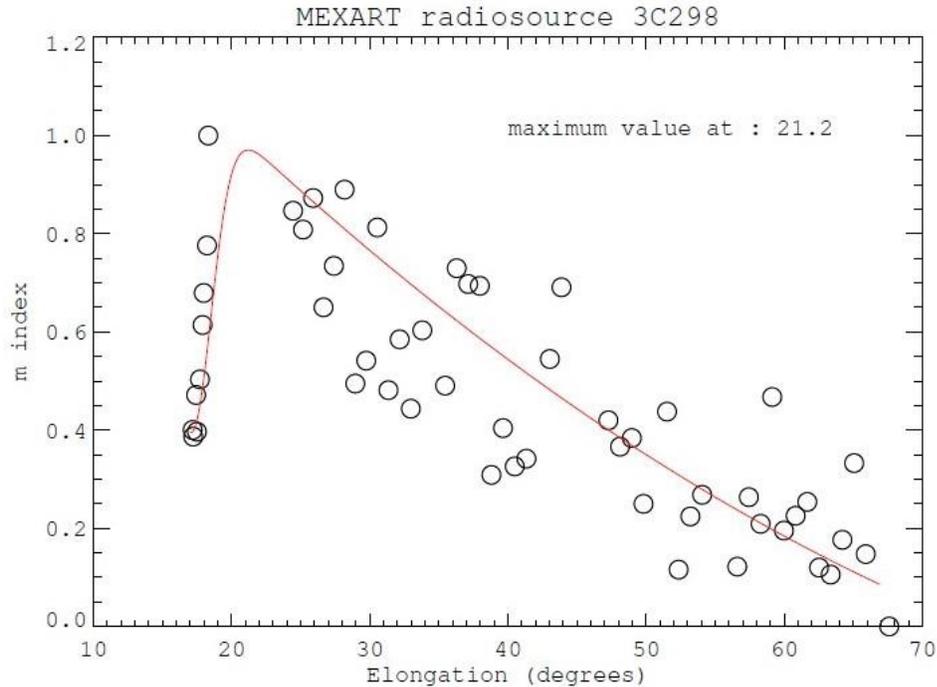


Imagen adaptada de [Rao et al. \(1974, p. 106\)](#).

<sup>10</sup>  $\epsilon$  = Ángulo entre la línea Tierra-Sol & Tierra-Radiofuente

**Figura 2.11** Índice de centelleo  $m$  vs elongación para la radiofuente 3C298

Observaciones de octubre a diciembre de 2014 [Chang \(2017, p. 33\)](#).

A la zona que se encuentra desde este límite hacia el exterior del Sol le llamamos región de dispersión débil y la de dentro, donde decrece rápidamente el centelleo, región de dispersión fuerte. Los estudios de centelleo asociados a propiedades físicas del viento solar en esta tesis aplican en la región de dispersión débil ([Bastian, 2000](#)).

Graficando los índices  $m$  por un período largo ( $\sim 1$  año), como en la [Figura 2.10](#), se observa un comportamiento asintótico en escala logarítmica (log-log), por lo que una ley de potencias da un buen ajuste en el régimen de dispersión débil ([Rao et al., 1974](#)). Se ha encontrado experimentalmente que en esta región:

$$m \propto p^{-b} \quad \text{para } \epsilon_0 < \epsilon < 90^\circ .$$

Como el valor de  $b = 1.6$  reportado en 1974 empleando el radiotelescopio de Ooty que opera a 327 MHz ([Rao et al., 1974](#)), o de  $b = 1.55 \pm 0.05$  usando el *Interplanetary Scintillation Array* de Cambridge a una frecuencia de 81.5 MHz ([Readhead et al., 1971](#)). Esta región se distingue por

inducir desviaciones angulares de la señal  $\ll 1$  rad y por esta razón se le denomina régimen de dispersión débil. En la zona donde las desviaciones angulares  $\gtrsim 1$  rad corresponde al régimen de dispersión fuerte.

Se puede considerar entonces el promedio de  $m$  en la región de dispersión débil

$$\bar{m} = m_0 * p^{-b}, \quad (2.6)$$

donde:

$\bar{m}$  = valor esperado bajo condiciones de VS quieto,

$m_0, b$  = Constantes, y  $m_0$  es el índice de centelleo en  $p = 1$  ( $\epsilon = 90^\circ$ ).

Para el MEXART, [Figura 2.11](#), se obtuvo un valor máximo de  $\epsilon_0 = 21.2^\circ$  ([Chang, 2017](#)). Resultados adicionales obtenidos a diferentes frecuencias de observación se presentan en la [Tabla 2.2](#).

**Tabla 2.2** Límites de dispersión débil a diferentes frecuencias de observación

Frecuencia (MHz)	$\epsilon_0(^\circ)$	$p (R_\odot)$	referencias
74	40	138	Armstrong y Coles [1978]
81.5	35	123	Purvis <i>et al.</i> [1987]
103	30	107	Janardhan y Alurkar [1993]
178	17	64	Little y Hewish [1966]
327	11	40	Manoharan [1991], Manoharan y Ananthakrishnan [1990]
408	10	37	Milne [1976]
930	7	28	Breen <i>et al.</i> [2000]

Tabla tomada de [Mejía-Ambríz \(2012, p. 36\)](#)

Encontrados los valores de  $m_0$  y  $b$  para cada radiofuente, se normaliza los índices  $m$  obteniendo los índices  $g$ , [ecuación \(2.7\)](#).

Estos nuevos índices se obtienen con la razón entre el grado de centelleo observado y la media, y representa el factor de perturbación en la densidad del VS ([Gapper \*et al.\*, 1982](#); [Hick \*et al.\*, 1996](#); [Tokumar \*et al.\*, 2000](#)). Mediante éste se puede identificar las zonas de compresión o rarefacción ([Romero, 2015](#)).

$$g = \frac{m}{\bar{m}} \begin{cases} g > 1; \text{Incremento en la densidad del viento solar} \\ g = 1; \text{Viento solar quieto} \\ g < 1; \text{Decremento en la densidad del viento solar} \end{cases} \quad (2.7)$$

El decremento continuo de  $m$  con  $p$  en el régimen de dispersión débil es debido a que la densidad electrónica en el VS  $N_e$  y  $\Delta N_e$  decaen con  $R^{-2}$  ([Gonzalez-Esparza, 2010](#)).

El **índice  $g$**  y la densidad del viento solar  $N$  en el medio interplanetario se han asociado con la siguiente relación:

$$g = A * R^\alpha * N_p^\beta, \quad (2.10)$$

donde:

- $A, \alpha, \beta$     Constantes,
- $R$             Distancia heliocéntrica,
- $N_p$           Densidad de los protones,

como los valores reportados de  $\alpha = 3.60$  y  $\beta = 0.70$  ([Jackson et al., 2023](#)).

### 2.2.11 Geometría de CIP

Las observaciones de CIP pueden verse desde distintas perspectivas, aquí se muestra un diagrama, [Figura 2.12](#), para un observador fuera del entorno Sol Tierra, con distintos parámetros geométricos que describen una configuración en el medio interplanetario.

Donde:

**Latitud heliocéntrica  $\gamma$**  - Ángulo formado entre el punto  $P$  y la eclíptica, pasando por A,

$l$  - Escala del patrón de difracción,

$\Delta z$  - Espesor de la región difractante,

$R$  - Distancia heliocéntrica entre el Sol y cualquier punto sobre LOS,

$\theta$  - Ángulo entre la dirección del Viento Solar y la línea Sol-P,

$V_x$  - Componente del viento solar perpendicular a la línea de visión.

Se considerará que la onda EM emitida por la fuente de radio es plana y monocromática, con una longitud de onda  $\lambda = 2\pi/k$ , donde  $k$  es el número

de onda. La onda se propaga en la dirección  $\mathbf{z}$  y encuentra pantallas o capas delgadas de espesor  $\Delta z$  que desvían el haz, por las variaciones de densidad en el medio. Como resultado se proyecta en Tierra un patrón de difracción que viaja a la velocidad del VS.

**Figura 2.12** Geometría de las observaciones de CIP

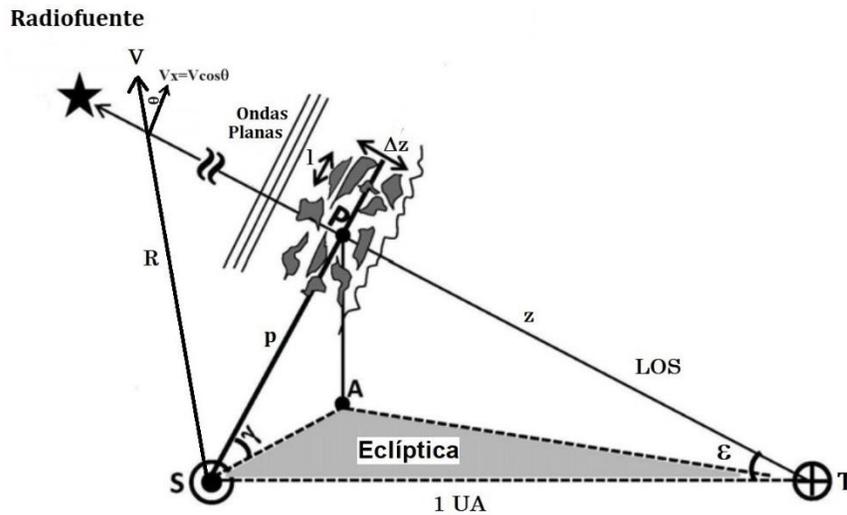


Imagen adaptada de [Bisoi et al. \(2014, p. 2\)](#).

### CÁLCULO DEL ÁNGULO DE ELONGACIÓN Y LATITUD HELIOCÉNTRICA

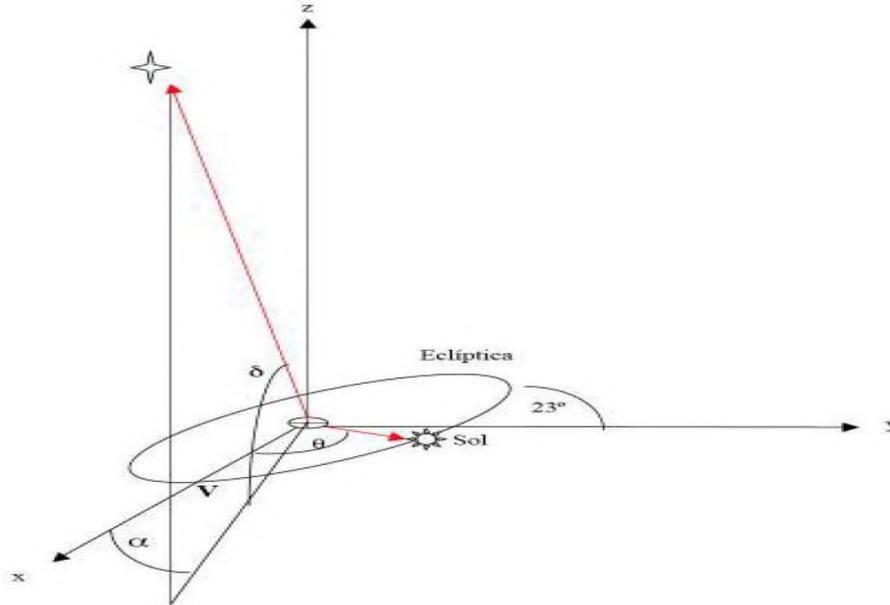
El ángulo de elongación  $\epsilon$  y la latitud heliocéntrica  $\gamma$  nos permiten ubicar la posición de la radiofuente en el año y definir la posición del punto  $P$ , donde se espera detectar la mayor contribución al espectro de potencias de CIP. Para la obtención de estos dos ángulos se usará el sistema de referencia mostrado en la [Figura 2.13](#).

Este es un sistema de referencia inercial en la Tierra. El punto vernal  $V$  está sobre el eje  $x^+$  en su intersección con la trayectoria del Sol, que gira sobre la eclíptica. El ángulo entre el vector que apunta al Sol y el vector en dirección a la fuente es el ángulo de elongación  $\epsilon$ . La ascensión recta de la fuente es el ángulo  $\alpha$ , y su declinación el ángulo  $\delta$ .

Para calcular el ángulo de elongación de cierta fecha, es necesario ubicar la posición del Sol. Sobre la eclíptica, el Sol recorre  $0.9856^\circ$  por día a

partir del punto **V** (~21 de marzo) y su declinación cambia de  $-23.5^\circ$  a  $+23.5^\circ$  en el transcurso del año.

**Figura 2.13** Sistema de referencia para cálculo del ángulo de elongación



Representa la ubicación del Sol y la radiofuente con respecto a la Tierra, la trayectoria del Sol sobre la eclíptica y el ángulo de inclinación de ésta con respecto a la Tierra. Fijando el eje  $x^*$  hacia el punto Vernal **V** (equinoccio) y ángulos para la ubicación del Sol y la radiofuente. [Mejía-Ambriz \(2012, p. 28\)](#).

Partiendo de un vector unitario  $\mathbf{i} = (1,0,0)$ , que señala la posición del Sol en el punto **V**, equinoccio de marzo. Primero, se rotará el vector  $\mathbf{i}$  en torno al eje  $y$  un ángulo  $l$  que corresponde a la latitud del Sol y luego se rota sobre el eje  $z$  un ángulo  $\theta$  que corresponde al trayecto del Sol sobre la eclíptica. Entonces, el vector  $\mathbf{i}$  cambiará a un vector unitario  $\mathbf{r}_\odot$  que apunta a la posición del Sol, esto es:

$$\hat{r}_\odot = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\text{sen } \theta & 0 \\ \text{sen } \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos l & 0 & -\text{sen } l \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen } l & 0 & \cos l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Para la radiofuente, el vector unitario  $\mathbf{i}$  es rotado en torno al eje  $y$  un ángulo  $\delta$  que corresponde a la declinación de la fuente y luego se rota sobre el eje  $z$  un ángulo  $\alpha$  que corresponde a la ascensión recta. Entonces, el vector

**i** cambiará a un vector unitario  $\hat{r}_f$  que apunta a la posición de la fuente de radio, esto es:

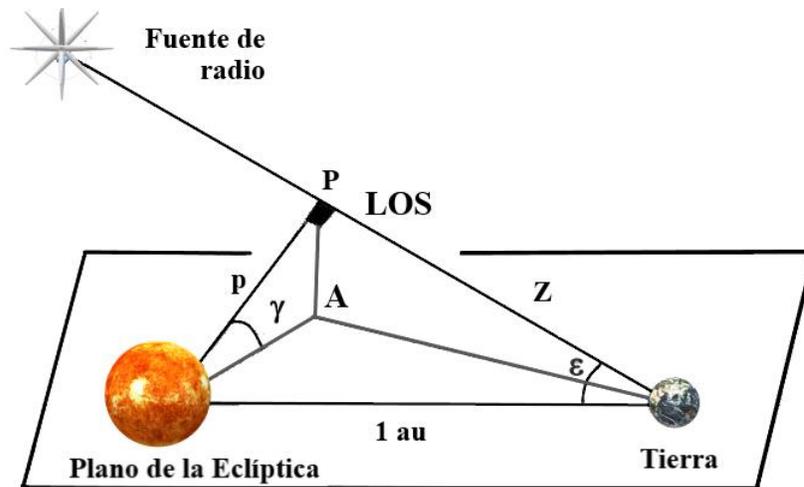
$$\hat{r}_f = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\text{sen } \alpha & 0 \\ \text{sen } \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \delta & 0 & -\text{sen } \delta \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen } \delta & 0 & \cos \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} .$$

Del producto escalar entre ambos vectores se obtiene el coseno del ángulo entre las dos direcciones, esto es el coseno del ángulo de elongación  $\epsilon$ , determinado por:

$$\cos \epsilon = \cos l \cos \delta \cos(\theta - \alpha) + \text{sen } l \text{sen } \delta$$

Para obtener el ángulo  $\gamma$ , se usará el sistema de referencia ilustrado a la [Figura 2.14](#).

**Figura 2.14** Sistema de referencia para cálculo la latitud heliocéntrica



*Nota.* Disposición de Sol, Tierra y radiofuente señalando los puntos, distancias y ángulos requeridos para obtener la latitud heliocéntrica  $\gamma$ . Imagen adaptada de [Romero \(2015, p. 16\)](#).

En la figura, se considera del Sol a la Tierra 1 UA, el segmento de **P-A** es perpendicular al plano eclíptico y su magnitud es  $|PA|$ . La distancia más corta de LOS al Sol es  $p = \text{sen } \epsilon$  y la distancia de la Tierra al punto **P** es  $Z = \cos \epsilon$ , entonces por la ley trigonométrica de los senos, se tiene que:

$$\frac{\text{sen } \gamma}{|PA|} = \frac{1}{p} = \frac{1}{\text{sen } \epsilon} \Rightarrow |PA| = \text{sen } \gamma \text{sen } \epsilon . \tag{2.8}$$

Por otro lado, el ángulo formado por los puntos **P**, Tierra y punto **A** con vértice en la Tierra es la diferencia entre la declinación y la latitud del Sol,  $\delta - l$ , entonces se cumplen que:

$$\frac{\text{sen}(\delta - l)}{|PA|} = \frac{1}{\cos \varepsilon} \Rightarrow |PA| = \text{sen}(\delta - l) \cos \varepsilon. \quad (2.9)$$

De las relaciones (2.8) y (2.9) se obtiene el ángulo de latitud heliocéntrica  $\gamma$  determinado por la siguiente expresión:

$$\text{sen } \gamma = \cot \varepsilon \text{ sen}(\delta - l) .$$

La latitud solar  $l$ , se puede calcular usando la expresión en series de Fourier construida por Spencer (1971), donde el error en la aproximación es de sólo 0.0006 radianes ( $< 3'$ ) y tiene una mejor aproximación que la conocida ecuación del tiempo del Sol. Para ello, hacemos uso del parámetro  $\beta$

$$\beta = \frac{2\pi(N - 1)}{365} \text{ (en radianes) ,}$$

donde:  $N$  = días transcurridos del año ( $N = 1$  corresponde al primero de enero).

Entonces la latitud del Sol  $l$  en grados está dada por la serie

$$l = \frac{180^\circ}{\pi} \left[ \begin{array}{l} 0.006918 - 0.399912 \cos \beta + 0.070257 \text{ sen } \beta - 0.006758 \cos 2\beta + \\ 0.000907 \text{ sen } 2\beta - 0.002697 \cos 3\beta + 0.00148 \text{ sen } 3\beta \end{array} \right] .$$

## 2.2.12 Modelo del Espectro de Potencias de CIP

*La información sobre el modelo del espectro de potencias fue extraída de la sección 2.4 del capítulo 2 y del Apéndice B de [Mejia-Ambriz \(2012\)](#), y de [Manoharan \(1991\)](#).*

La velocidad del VS se puede obtener de las potencias espectrales  $P_v$ , de las series de tiempo de tránsitos de fuentes de CIP. Para ello se ajusta un espectro de potencias teórico (modelo) que resulta de la propagación de ondas EM en un plasma [Scott et al. \(1983\)](#), [Manoharan y Ananthakrishnan \(1990\)](#), [Bastian \(2000\)](#) y [Oberoi \(2000\)](#). Este modelo brinda información de las

propiedades físicas del VS a lo largo de la línea de visión hacia fuentes que exhiben CIP, donde la región de mayor contribución es alrededor del **punto P**.

El modelo o espectro de potencias teórico  $P(q)$ , se aplica a la región de dispersión débil, está en función del número de onda  $q$  de las irregularidades de densidad del VS. Este se puede convertir a un espectro de potencias en función de la frecuencia de centelleo  $P(f)$  que es ajustado al espectro observado  $P_o(f)$ , esto es:

$$P(q) \rightarrow P(f) \approx P_o(f) .$$

### ECUACIÓN DE ONDA

Para encontrar un modelo del VS en base a las observaciones de CIP, partimos de **la ecuación de una onda plana monocromática**, a lo largo de la línea de visión, **que se propaga a través de un medio dispersivo estacionario localmente**, donde el **índice de refracción depende sólo de la posición**. Se asumen **fluctuaciones pequeñas** tanto en su **dispersión angular** como en el **índice de refracción**.

Bajo esas condiciones [Tatarskii \(1971\)](#) sugiere que es aceptable considerar la ecuación de onda escalar para describir el campo; se tiene entonces que, la ecuación de Maxwell para una componente del campo eléctrico  $E$  no polarizado en un medio dispersivo es:

$$\nabla^2 E + k^2(1 + \Delta n)^2 E = 0 . \quad (2.10)$$

Una solución válida para el campo eléctrico que este en función de las características aleatorias del medio  $F(x,y,z)$ , se puede expresar como:

$$E(x, y, z) = F(x, y, z) \exp(ikz) .$$

Sustituyendo  $E$  en la [ecuación \(2.10\)](#) se obtiene:

$$2ik \frac{\partial F}{\partial z} + \nabla^2 F + 2k^2 \Delta n F = 0 .$$

Al seguir el planteamiento de Mariani (1975) y usar la condición de dispersión angular pequeña ( $\psi_d \ll 1$ ), se puede expresar la función  $F$  como:

$$F(x, y, z) = \exp \left( i \left\{ k'_x x + k'_y y + k \left[ \Delta n - \frac{1}{2} \psi_d^2 (1 + \Delta n)^2 \right] z \right\} \right) ,$$

y haciendo  $k' = (1+\Delta n)k$  y  $\xi = \psi_d k'$ , entonces  $F$  queda expresada como:

$$F(x, y, z) = \exp\left(i\left\{k'_x x + k'_y y + \Delta n k z - \frac{\xi^2 z}{2k}\right\}\right).$$

Sacando las parciales y segundas parciales se encuentra que los términos de la  $\frac{\partial^2 F}{\partial z^2}$  son muy pequeños dado que van al cuadrado y a la cuarta para  $\xi$  y al cuadrado  $\Delta n$ , entonces se omite esta parcial, quedando la ecuación parabólica:

$$2ik \frac{\partial F}{\partial z} + \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + 2k^2 \Delta n F = 0. \quad (2.11)$$

### CONDICIONES DE FRONTERA (CAPA DELGADA)

Cuando la onda plana pasa a través de la capa dispersora se produce un cambio de fase. La capa tiene un espesor  $\Delta z$  y es paralela al plano  $xy$ . La onda emerge de la capa con una fase  $\phi(r, z)$  donde  $r = (x, y)$ . Expresando el campo incidente como  $F_{in}$  y al campo emergente como  $F_{em}$ , se tiene que:

$$F_{em} = F_{in} \exp(i\phi[r, z]), \quad (2.12)$$

Al expandir  $F_{em}$  en serie de potencias y omitir los términos de orden mayor a uno, y tomar en cuenta que las rms de las fluctuaciones de fase a la salida son pequeñas. Para longitudes de onda métricas  $\phi_{rms} \ll 1$  rad, del orden de  $10^{-5}$  a  $10^{-6}$  rad. Entonces  $F_{em}$  se expresa como:

$$F_{em} = F_{in}[1 + i\phi(r, z)].$$

Sustituyendo  $F_{em}$  en la [ecuación \(2.11\)](#) y considerando una onda plana de amplitud unitaria,  $F_{in} = 1$ , además que  $\Delta n \ll 1$ , se llega a la siguiente relación entre la fase y las fluctuaciones del índice de refracción:

$$\phi(x, y) = k \int_{\Delta z} \Delta n(x, y, z, k) dz. \quad (2.13)$$

Por lo que, la desviación de la fase para una capa delgada de espesor  $\Delta z$ , que cumple con la condición de ser mucho menor a un radian, está dada por:

$$\phi = k \Delta n \Delta z \ll 1 \text{ rad}. \quad (2.14)$$

El valor típico encontrado de  $\Delta n$  en el MIP es de  $10^{-6}$  a  $10^{-12}$  ([Manoharan, 1991](#)). En general, al aumentar  $\lambda$  o disminuir la frecuencia se tiene un mayor rango para  $\Delta z$ . Para el MEXART, que opera en una longitud de onda  $\lambda = 2.14$  m,  $k = 2.93$  m<sup>-1</sup> y tomando los valores de  $\Delta n$  entre [ $10^{-12}, 10^{-6}$ ], se obtiene un  $\Delta z \ll 10^2 - 10^8$  km.

### RELACIONES ENTRE FASE Y DENSIDAD ELECTRÓNICA

En nuestro caso, en el régimen de dispersión débil, se cumple que la frecuencia del plasma<sup>11</sup>  $w_p$  es mucho menor a la frecuencia angular de la señal<sup>12</sup>  $w_0$  y que la velocidad térmica de los electrones<sup>13</sup>  $V_{Te}$  es mucho menor que la velocidad de la onda; es decir,  $w_p \ll w_0$  y  $V_{Te} \ll w_0/k$ .

El índice de refracción  $n$  en el plasma esta dado por

$$n = \sqrt{1 - \frac{w_p^2}{w_0^2}}.$$

Expresando el índice  $n$  en función de la densidad  $N$  y longitud de onda  $\lambda$ , y considerando que el radio del electrón  $r_e = e^2/4\pi\epsilon_0 m_e c^2$ , tenemos que:

$$n = \sqrt{1 - \frac{Nr_e \lambda^2}{\pi}}.$$

Simplificando, al expresar la raíz cuadrada por su serie de potencias y aproximando a 1<sup>er</sup> orden se tiene que:

$$n = 1 - \frac{Nr_e \lambda^2}{2\pi}.$$

Entonces, las variaciones en el índice están dadas por:

$$\Delta n = \frac{r_e \lambda^2}{2\pi} \Delta N.$$

<sup>11</sup>  $w_p^2 = Ne^2/(\epsilon_0 m_e)$ , donde  $N$  es la densidad electrónica,  $\epsilon_0$  es la permitividad en el vacío e y  $m_e$  son la carga y la masa del electrón.

<sup>12</sup>  $w_0 = 2\pi\nu_0$ , donde  $\nu_0$  es la frecuencia de observación.

<sup>13</sup>  $V_{Te} = [k_B T_e/m_e]^{1/2}$ , donde  $k_B$  es la constante de Boltzmann y  $T_e$  es la temperatura del electrón.

Sustituyendo  $\Delta n$  en la [ecuación \(2.13\)](#), se tiene una expresión entre la fase y la densidad dada por:

$$\phi(x, y) = r_e \lambda \int_{\Delta z} \Delta N(x, y, z) dz . \quad (2.15)$$

### AUTOCORRELACIÓN

Las fluctuaciones de fase son caracterizadas por la función de autocorrelación

$$\begin{aligned} C_\phi(x_0, y_0) &= \langle \phi(x, y) \phi(x + x_0, y + y_0) \rangle \\ &= \int_x \int_y \phi(x, y) \phi(x + x_0, y + y_0) dx dy . \end{aligned}$$

Sustituyendo  $\phi$  en función de  $N$ , [ecuación \(2.15\)](#), en la expresión anterior:

$$\begin{aligned} C_\phi(x_0, y_0) &= (r_e \lambda)^2 \Delta z \int_x \int_y \int_{\Delta z} \Delta N(x, y, z) \Delta N(x + x_0, y + y_0, z) dx dy dz , \\ C_\phi(x_0, y_0) &= (r_e \lambda)^2 \Delta z \int_{\Delta z} \langle \Delta N(x, y, z) \Delta N(x + x_0, y + y_0, z) \rangle dz , \\ C_\phi(x_0, y_0) &= (r_e \lambda)^2 \Delta z \int C_{\Delta N}(x, y, z) dz . \end{aligned} \quad (2.16)$$

Usando la transformada de Fourier bidimensional de la función de autocorrelación  $C_\phi(x, y)$  se puede obtener el espectro de potencias bidimensional de las fluctuaciones de fase,  $\Phi_\phi(q_x, q_y)$ , donde  $q_x$  y  $q_y$  son las componentes del número de onda tridimensional asociado con la escala de las irregularidades:

$$\Phi_\phi(q_x, q_y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_x \int_y C_\phi(x, y) e^{i(q_x x + q_y y)} dx dy . \quad (2.17)$$

Análogamente, el espectro tridimensional de las fluctuaciones de densidad es

$$\Phi_{\Delta N}(\mathbf{q}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int C_{\Delta N}(\mathbf{r}) e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}} d\mathbf{r} , \text{ donde } r = (x, y, z), q = (q_x, q_y, q_z) . \quad (2.18)$$

Sustituyendo el valor de  $C_\phi(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  dado por la [ecuación \(2.16\)](#) en la [ecuación \(2.17\)](#) y tomando  $q_z = 0$  en la [ecuación \(2.18\)](#), se obtiene una relación entre el espectro de fase bidimensional y el espectro de fluctuaciones de densidad tridimensional

$$\Phi_\phi(q_x, q_y, z) = 2\pi(r_e\lambda)^2 \Delta z \Phi_{\Delta N}(q_x, q_y, q_z = 0, z). \quad (2.19)$$

### ESPECTRO DE INTENSIDAD

En el modelo de capa delgada, la turbulencia se concentra en el plano  $z = 0$ . Para distancias  $z$  mayor a cero, la onda se propaga libremente. Más allá de la capa dispersiva no hay fluctuaciones en el índice de refracción y entonces la [ecuación \(2.11\)](#) se simplifica:

$$2ik \frac{\partial F}{\partial z} + \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = 0. \quad (2.20)$$

Considerando un campo incidente  $F_{in}$ , como el de la [ecuación \(2.12\)](#), en la [ecuación \(2.20\)](#) y aplicando la transformada de Fourier queda la siguiente ecuación:

$$F(\mathbf{r}, z) = \int F(\mathbf{q}, z) \exp(-i\hat{\mathbf{q}} \cdot \hat{\mathbf{r}}) d\mathbf{q}, \text{ con } \mathbf{r} = (x, y), \mathbf{q} = (q_x, q_y), q^2 = q_x^2 + q_y^2,$$

$$2ik \int \frac{\partial}{\partial z} [F(\mathbf{q}, z) e^{-i\hat{\mathbf{q}} \cdot \hat{\mathbf{r}}}] d\mathbf{q} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} [F(\mathbf{q}, z) e^{-i\hat{\mathbf{q}} \cdot \hat{\mathbf{r}}}] d\mathbf{q} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} [F(\mathbf{q}, z) e^{-i\hat{\mathbf{q}} \cdot \hat{\mathbf{r}}}] d\mathbf{q} = 0$$

$$\int \left[ 2ik \frac{\partial F}{\partial z} - q^2 F \right] e^{-i\hat{\mathbf{q}} \cdot \hat{\mathbf{r}}} d\mathbf{q} = 0.$$

La solución a la ecuación diferencial en términos de  $q_x, q_y, z$  es:

$$F(\mathbf{q}, z) = F(\mathbf{q}, 0) \exp\left(\frac{-iq^2 z}{2k}\right), \text{ donde } F(\mathbf{q}, 0) \text{ es el campo en } z = 0. \quad (2.21)$$

El término  $\exp(-iq^2 z/2k)$  describe las propiedades de propagación, oscilando con mayor frecuencia a medida que se aleja de la superficie de dispersión.

Para conocer el espectro de intensidad para un observador a una distancia  $z$  de la capa, se usará una ecuación similar a la obtenida en la [ecuación \(2.17\)](#) para las fluctuaciones de fase, dada por la expresión ([Romero, 2015](#)):

$$\Phi_I(q_x, q_y, z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \int \langle I^2 \rangle C_I(\mathbf{r}, z) e^{i(\hat{\mathbf{q}} \cdot \hat{\mathbf{r}})} d\mathbf{r} ,$$

donde  $C_I$  es la función de autocorrelación de la intensidad normalizada,

$$C_I(r, z) = \frac{\langle I(r_0, z) I(r_0 + r, z) \rangle}{\langle I^2 \rangle} ,$$

$I(r_0, z)$  e  $I(r_0+r, z)$  son las intensidades medidas en los puntos  $r_0$  y  $r_0+r$  en el plano  $z$ , e  $\langle I^2 \rangle$  es el promedio de la intensidad al cuadrado en el plano  $z$ .

Como menciona [Romero \(2015\)](#), en el plano de observación, la interferencia es ocasionada por las ondas dispersadas y no dispersadas, y en este caso el espectro de las fluctuaciones de intensidad sería:

$$\begin{aligned} \Phi_{\Delta I}(q) &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int \int \langle (I(r_0) - \langle I \rangle)(I(r_0 + r) - \langle I \rangle) \rangle e^{i(\hat{\mathbf{q}} \cdot \hat{\mathbf{r}})} d\mathbf{r} \\ &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int \int (\langle I(r_0) I(r_0 + r) \rangle - \langle I \rangle^2) e^{i(\hat{\mathbf{q}} \cdot \hat{\mathbf{r}})} d\mathbf{r} , \\ \Phi_{\Delta I}(q) &= \Phi_I(q) - 4\pi^2 \langle I \rangle^2 \delta(q) . \end{aligned} \quad (2.22)$$

Por otro lado, aplicando la ecuación de un campo eléctrico, [ecuación \(2.21\)](#) para una onda monocromática plana que incide en una capa delgada con propiedades de dispersión débil, se obtiene que el espectro de intensidad a una distancia  $z$  de la capa está descrita por:

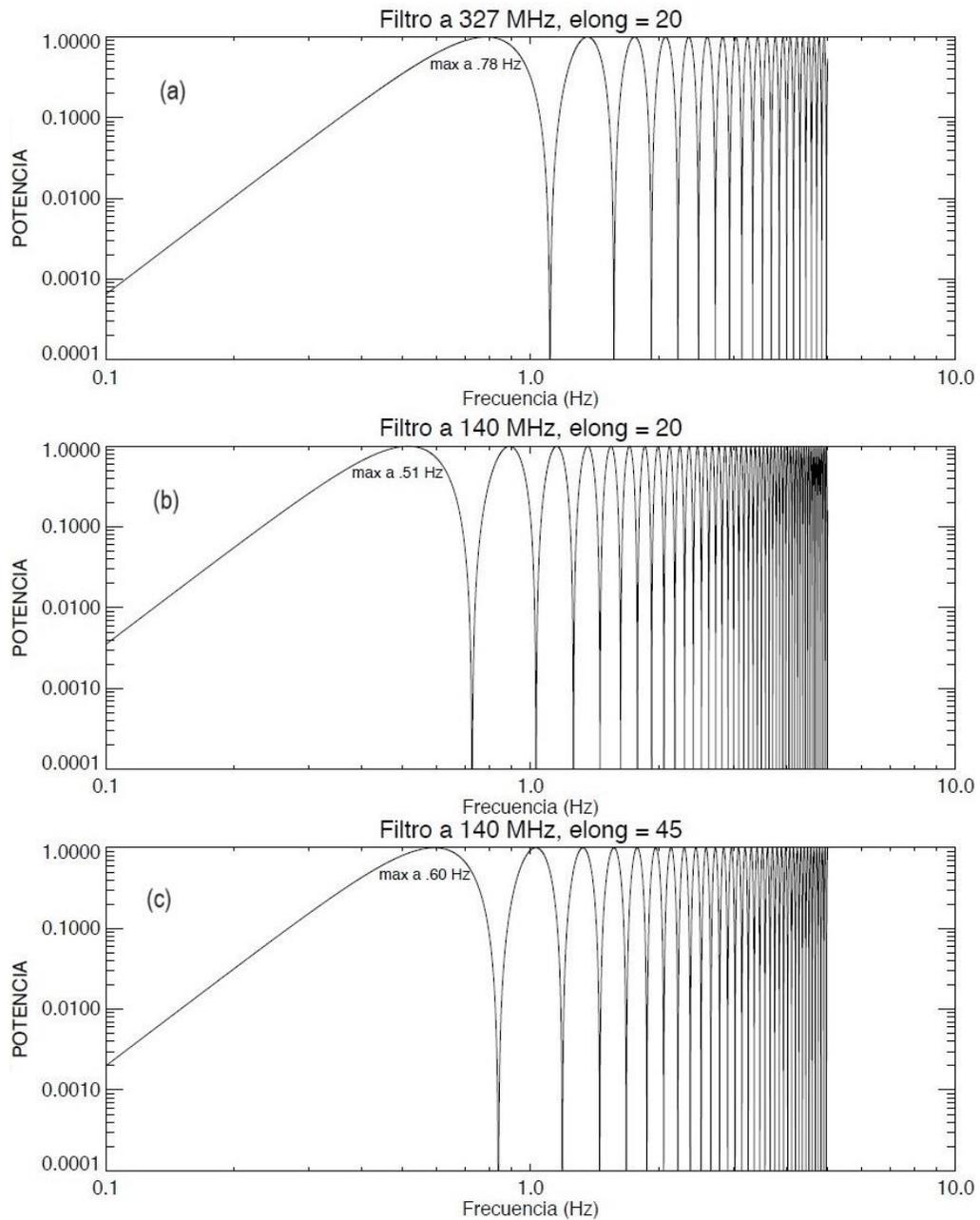
$$\Phi_I(\mathbf{q}, z) = 4\pi^2 \langle I \rangle^2 \delta(\mathbf{q}) + 4 \operatorname{sen}^2 \left( \frac{q^2 z}{2k} \right) \Phi_\phi(\mathbf{q}) ,$$

donde  $\Phi_\phi$  es el espectro de fase  $\phi$ . Sustituyendo  $\Phi_I$  en la [ecuación \(2.22\)](#) se obtiene que:

$$\Phi_{\Delta I}(\mathbf{q}) = 4 \operatorname{sen}^2 \left( \frac{q^2 z}{2k} \right) \Phi_\phi(\mathbf{q}) . \quad (2.23)$$

El factor  $\operatorname{sen}^2(q^2 z / 2k)$  es conocido como la función de propagación de Fresnel ([Manoharan, 1991](#)) o filtro de Fresnel ([Oberoi, 2000](#)).

Dicha función tiene máximos y mínimos que ocasionan oscilaciones y éstas representan los efectos de interferencia originados por el centelleo en el régimen de dispersión débil. En la [Figura 2.15](#) se muestran tres gráficas del filtro de Fresnel.

**Figura 2.15** Tres representaciones del filtro de Fresnel

Las imágenes muestran el efecto de corrimiento de los máximos al aumentar la frecuencia de observación y/o el ángulo de  $\epsilon$  manteniendo fija la velocidad a 400 km s<sup>-1</sup> [Mejía-Ambriz \(2012, p. 43\)](#).

Las gráficas de los incisos (a) y (b) son con el mismo ángulo de elongación  $\varepsilon$  de  $20^\circ$ , pero a diferentes frecuencias de observación, donde la primera fue a una frecuencia de 327 MHz y la segunda a 140 MHz. La última gráfica está a una  $\varepsilon = 45^\circ$  y fue observada a una frecuencia de 140 Hz. A mayor frecuencia, el 1<sup>er</sup> máximo se da una frecuencia mayor, y entre mayor sea el ángulo de elongación, el 1<sup>er</sup> máximo se dará una frecuencia mayor, también. Note que, el filtro atenúa las componentes en bajas frecuencias.

### CAPA EN MOVIMIENTO

El VS emana del Sol radialmente y con éste las irregularidades en el medio interplanetario. Las variaciones de intensidad registradas en el tiempo se transforman en variaciones espaciales a lo largo de la dirección del movimiento de las irregularidades. Aunque su movimiento es radial, **por simplificación se considera que las irregularidades se mueven únicamente sobre el eje x**, entonces la relación entre la frecuencia temporal  $f$  y la componente espacial en el eje  $x$  está dada por:

$$q_x = \frac{2\pi f}{V_x}, \text{ donde } V_x \text{ es la componente del VS en } x .$$

Considerando, como se mencionó con anterioridad, que las irregularidades están localmente estacionarias; es decir, que el patrón de irregularidades cambia muy lentamente, entonces la relación entre el espectro de intensidad en frecuencias temporales  $P(f)$  versus el de frecuencias espaciales  $P(q)$  está dado por:

$$P(f) = \frac{2\pi}{V_x} \int \Phi_{\Delta l} \left( q_x = \frac{2\pi f}{V_x}, q_y \right) dq_y . \quad (2.24)$$

Por lo que, la ubicación de la rodilla de Fresnel en el intervalo espectral, es en relación a la velocidad del viento solar. De manera que, un cambio en la velocidad hace un corrimiento, en la frecuencia, y por ende en la rodilla.

## MEDIO EXTENDIDO

Para considerar un **medio dispersivo extendido** o una pantalla dispersora gruesa, se puede aplicar la aproximación de Born cuando la dispersión de la onda incidente es poca, aunque en general, la onda sería dispersada aleatoriamente en distintos puntos a lo largo de su camino.

Como explica [Manoharan \(1991\)](#), en la aproximación de Born, el medio extendido se descompone en capas delgadas de ancho  $\Delta z$ , en las cuales ocurre sólo una dispersión. Las capas se consideran independientes para que las modulaciones de fase entre capas adyacentes no estén correlacionadas.

El cambio de fase impuesto por una sola capa, [ecuación \(2.17\)](#), es:

$$\phi = k\Delta n\Delta z, \quad \text{con } |\phi| \ll 1 .$$

La idea es sumar las contribuciones de cada capa a lo largo del camino de propagación de la onda, que corresponde al eje  $z$ , o sea sobre la línea de visión, desde la radiofuente hasta una distancia  $z = Z$ . Usando la [ecuación \(2.23\)](#) obtenida en el cálculo del espectro de intensidad:

$$\Phi_{\Delta l}(\mathbf{q}) = \int_{-\infty}^Z 4 \text{sen}^2\left(\frac{q^2 z}{2k}\right) \Phi_{\phi}(\mathbf{q}, z) dz .$$

Para obtener el espectro total, la integración sería sobre la coordenada espacial en  $y$ ; es decir, en  $q_y$ , y tomando en cuenta la velocidad del VS, la [ecuación \(2.24\)](#) queda como:

$$P(f) = 2\pi \int_{-\infty}^Z \frac{dz}{V_x(z)} \int_{-\infty}^{\infty} 4 \text{sen}^2\left(\frac{q^2 z}{2k}\right) \Phi_{\phi}(\mathbf{q}, z) dq_y .$$

Sustituyendo ahora  $\Phi_{\phi}$ , [ecuación \(2.19\)](#), en  $P(f)$ :

$$P(f) = (2\pi r_e \lambda)^2 \int_{-\infty}^Z \frac{dz}{V_x(z)} \int_{-\infty}^{\infty} 4 \text{sen}^2\left(\frac{q^2 z}{2k}\right) \Phi_{\Delta N}(q_x, q_y, q_z = 0, z) dq_y . \quad (2.25)$$

## FUENTES DE RADIO

Para considerar **radiofuentes con ancho angular finito** en lugar de fuentes puntuales, como una primera aproximación se puede tratar la radiofuente como si fuera muchas fuentes puntuales independientes que irradian a la misma longitud de onda. Entonces, la señal captada por el

radiotelescopio está compuesta por un conjunto de ondas planas incoherentes, con fases aleatorias, distribuidas en una pequeña región. El tamaño de esta zona dependerá de la extensión angular de la fuente. El promedio de intensidad recibida será la suma de intensidades debido a cada punto de radiación que conforma la fuente.

Consideremos una fuente con una distribución de brillo  $B(\theta)$ , a la transformada de Fourier de esta función se define como la función de visibilidad<sup>14</sup>  $\tilde{V}$  expresada como:

$$\tilde{V}(\mathbf{q}, z) = \int B(\theta) e^{-iz\theta \cdot \mathbf{q}} d\theta ,$$

donde  $\theta = (\theta_x, \theta_y) \ll 1$  rad y es la posición angular de la fuente puntual.

Conforme a lo formulado por [Manoharan \(1991\)](#), el espectro de intensidad de la fuente extendida será el espectro de intensidad puntual por su visibilidad, mediante la expresión:

$$\Phi_{I_{ext}}(\mathbf{q}, z, \theta) = \Phi_{I_{point}}(\mathbf{q}, z) |\tilde{V}(\mathbf{q}, z, \theta)|^2 .$$

El espectro de intensidad de la fuente puntual descrito en la [ecuación \(2.19\)](#) se sustituye en el espectro extendido, y este en la [ecuación \(2.25\)](#) en lugar  $\Phi_\phi$ , queda

$$P(f) = (2\pi r_e \lambda)^2 \int_{-\infty}^z \frac{dz}{V_x(z)} \int_{-\infty}^{\infty} 4 \text{sen}^2 \left( \frac{q^2 z}{2k} \right) |\tilde{V}(\mathbf{q}, z, \theta)|^2 \Phi_{\Delta N}(\mathbf{q}, z, \theta) dq_y . \quad (2.26)$$

Considerando como adecuada una distribución de brillo normalizada con simetría gaussiana ( $\mu = 0$ ,  $\sigma = \theta_0$ ) para la fuente extendida ([Mejia-Ambriz, 2012](#)), entonces  $B(\theta)$  está expresada como:

$$B(\theta) = \frac{1}{\theta_0 \sqrt{2\pi}} \exp \left( - \frac{\theta^2}{2\theta_0^2} \right) .$$

donde  $\theta_0$  se expresa en radianes y se cumple que  $\int B(\theta) d\theta = 1$ , al estar  $B$  normalizada.

---

<sup>14</sup> La tilde en la V de la función de visibilidad es para no confundirla con la velocidad.

Después, será necesario obtener el módulo cuadrado de la transformada de Fourier de  $B(\theta)$

$$|\tilde{V}(\mathbf{q}, z, \theta_0)|^2 = \exp(-q^2 z^2 \theta_0^2) . \quad (2.27)$$

Consideraremos el ancho a potencia media de la distribución de brillo como una medida del ancho angular de la fuente  $\Theta$ . Este ancho está definido por:

$$\theta = 2\sqrt{2 \ln 2} \theta_0 \approx 2.35 \theta_0 .$$

Despejando  $\theta_0$  e incorporando esta expresión a la [ecuación \(2.27\)](#), el espectro de potencia queda como:

$$P(f) = (2\pi r_e \lambda)^2 \int_{-\infty}^z \frac{dz}{V_x(z)} \int_{-\infty}^{\infty} 4 \operatorname{sen}^2 \left( \frac{q^2 z}{2k} \right) e^{-\left(\frac{qz\theta}{2.35}\right)^2} \Phi_{\Delta N}(\mathbf{q}, z, \theta) dq_y . \quad (2.28)$$

Para  $qz\theta_0 > 1$  o frecuencias  $q > 1/(z\theta_0)$ , la intensidad del espectro total se atenúa significativamente. Al valor de  $q_c = 1/(z\theta_0)$  se le llama *frecuencia de corte*, source-size cut-off frequency, que está relacionada con el tamaño de la fuente.

Mejía-Ambriz (2012) comenta: “Por ejemplo, tomando  $z = 1$  UA, una fuente de  $\Theta = 15$  msa<sup>15</sup> afecta el espectro a frecuencias espaciales  $q > 0.22$  km<sup>-1</sup>, correspondiendo a frecuencias temporales  $f > 14$  Hz (para una velocidad de VS de 400 km s<sup>-1</sup>), y una fuente del doble de ancho,  $\Theta = 30$  msa, afecta al espectro a frecuencias  $q > 0.11$  km<sup>-1</sup> y  $f > 7$  Hz” (p.48).

Cuando la frecuencia de corte  $q_c$  es menor al 2º mínimo en la gráfica del filtro de Fresnel, la función de visibilidad afecta la rodilla y por ende el cálculo de la velocidad del VS. Para que el tamaño de la fuente no afecte la rodilla debe de cumplirse que:

---

<sup>15</sup> 1 msa = milisegundos de arco

$$\theta < 0.374 \sqrt{\frac{\lambda}{z}}, \text{ donde } \theta \text{ está en radianes (1 rad } \approx 206264.8'')$$

Por lo que, para observatorios que operen a longitudes de onda mayores, les será posible detectar CIP en radiofuentes con mayor ancho angular. Para el MEXART, como en la gráfica de la [Figura 2.18b](#), donde  $\epsilon = 20^\circ$ , el ancho angular de una fuente para que no interfiera con la rodilla debe ser  $\theta \lesssim 300$  msa ([Mejia-Ambriz, 2012](#)).

### ESPECTRO DE TURBULENCIA

El nivel de turbulencia afectará el espectro de fluctuaciones de densidad electrónica  $\Phi_{\Delta N}$ , [ecuación \(2.21\)](#), que depende de  $\lambda$ , y de otros dos nuevos parámetros. El primero es por la consideración de capa extendida. Se ha encontrado que la contribución de las capas de irregularidades decrece aproximadamente en  $R^\beta$ , donde  $R$  es la distancia heliocéntrica a la capa, y en particular para la región de dispersión débil decrece en  $R^{-4}$  ([Readhead, 1971](#); [Armstrong & Coles, 1978](#); [Manoharan, 1991](#)). Este rápido decaimiento implica que las ondas dispersadas se encuentran localizadas principalmente en la cercanía de la línea de visión.

Se ha determinado también, que el espectro de potencia depende del número de onda  $q$  o de las escalas de las irregularidades  $l$  ( $l = 2\pi/q$ ). Al inicio, antes de 1970, se pensó que seguía una distribución gaussiana, pero tras mediciones in situ se encontró que sigue una ley de potencias ([Intriligator & Wolfe, 1970](#); [Unti et al., 1973](#)) y observaciones posteriores confirmaron este hecho ([Woo & Armstrong, 1979](#); [Yakovlev et al., 1980](#)). Su relación es:

$$p(q) \propto q^{-\alpha}, \quad \text{donde } q = \frac{2\pi}{l}$$

Para el régimen de dispersión débil, la escala de las irregularidades es de  $l \approx (100 \text{ km}, 900 \text{ km})$ , y al considerar un medio anisotrópico, las irregularidades que provocan el CIP se extienden a lo largo del campo

magnético interplanetario y del viento solar, reflejándose en la componente  $y$  del número de onda,  $q_y$  (Mejia-Ambriz, 2012). Esta relación está dada por:

$$q \rightarrow \tilde{q} = \sqrt{q_x^2 + \frac{q_y^2}{AR^2}}, \quad \text{donde } AR = \text{Razón Axial } (AR = 1 \text{ si isotrópico}).$$

Por lo que el espectro de fluctuaciones de densidad electrónica es:

$$\Phi_{\Delta N}(q, R) = R^{-\beta} \tilde{q}^{-\alpha}.$$

### ESPECTRO DE POTENCIAS FINAL

Sustituyendo  $\Phi_{\Delta N}$  en la [ecn. \(2.28\)](#), se obtiene la expresión final para el espectro de potencias en la región de dispersión débil, donde  $\beta=4$ , es:

$$P(f) = (2\pi r_e \lambda)^2 \int_{-\infty}^Z \frac{1}{V_x(z)} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} 4 \operatorname{sen}^2 \left( \frac{q^2 z}{2k} \right) e^{-\left(\frac{qz\theta}{2.35}\right)^2} R^{-4} \tilde{q}^{-\alpha} dq_y \right\} dz \quad (2.29)$$

En base a los espectros de potencia observados de CIP se realiza un ajuste por mínimos cuadrados empleando esta ecuación. Obteniendo un estimado de los parámetros físicos del VS. En el MEXART, al realizarse el análisis por radiofuente, en un intervalo de tiempo específico, se fija la frecuencia de observación, el ángulo de elongación y el ancho de la fuente, quedando libres para estimar la velocidad, razón axial y alfa.

### 2.2.13 Formato WIPSS

En el 2014 y años subsecuentes la comunidad de CIP conformada principalmente por investigadores del *Korean Space Weather Center*, *Rutherford Appleton Laboratory* (RAL) del Reino Unido, el *ISEE* de Japón<sup>16</sup> y el MEXART promovieron una red mundial de estaciones de centelleo interplanetario, la *WIPSS Network*. Invitando a participar a observatorios en radio, como lo es el *IPS radio array* en Ooty, India, el *Big Scanning Array* en Rusia., el *ILT* y *EISCAT* en la Unión Europea, el *MWA* en Australia entre otros.

<sup>16</sup> *Solar-Terrestrial Environment Laboratory*, STELab

En el *Third Remote Sensing Workshop*<sup>17</sup> se llegó al consenso de compartir los resultados de CIP, de ser posible, casi en tiempo real, en sitios web mediante un formato estandarizado, llamado formato WIPSS. En dicho formato, [Tabla 2.3](#), se lista cada radiofuente observada mediante una sola línea de texto ASCII, donde se incluye: la fecha y hora de observación, su configuración técnica, los valores geométricos de la configuración de CIP y los parámetros derivados del VS.

**Tabla 2.3** Lista de parámetros del formato estándar WIPSS

Campo	Descripción	No. Caracteres
Date	Fecha de Observación, con formato <i>yyyymmdd</i>	8
MidObsUT	Tiempo medio de la observación en UT	9
Dur	Longitud de la observación en minutos	5
Site	Nombre abreviado del observatorio	5
Freq	Frecuencia de Observación Central en MHz	5
BW	Ancho de Banda de Observación en MHz	3
Source	Nombre de la Radiofuente (3C/4C/CTA/J2000)	6
Size	Tamaño Angular de la Radiofuente (ms de arco)	8
RA-J2000	Ascensión Recta en coordenadas J2000	10
DC-J2000	Declinación en coordenadas J2000	10
Limb	Limbo solar (E,O) de ubicación aparente de la fuente	4
Dist	Distancia al punto P en Radios Solares	9
Lat	Latitud Heliocéntrica	6
PA	Posición angular desde el norte del Sol y en sentido antihorario	7
Elong	Ángulo de Elongación	6
Vel	Estimación de la Velocidad del VS	7
V-err	Error en el cálculo de Vel.	7
g-value	Estimación del Índice g	7
g-err	Error en el cálculo del Índice g	7
Method	Método usado para el cálculo de los estimados	8

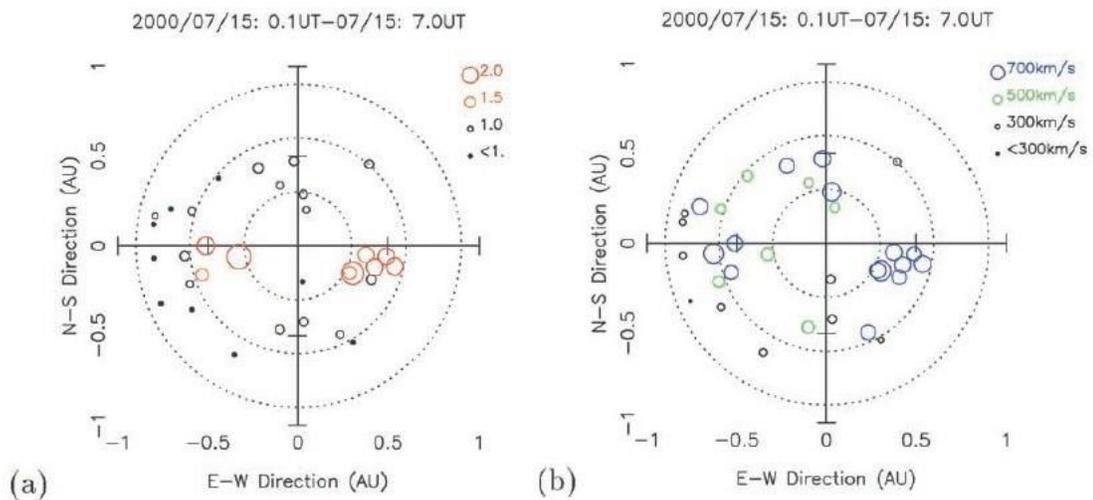
Valores requeridos para cada observación. Tabla adaptada de [Jackson et al. \(2023, p. 17\)](#).

<sup>17</sup> Del 20–24 octubre, 2015 en Morelia Mich. Mx

## 2.2.14 Mapas de Centelleo

La representación en los mapas de centelleo, aquí generados, es similar al empelado por [Tokumaru \(2003\)](#), [Figura 2.16](#), para mostrar las amplitudes de los índices  $g$  y la velocidad  $V$ . Mediante observaciones de un día, se pueden situar la posición aparente de las fuentes en el cielo vistas desde la Tierra, representadas con distintos tamaños de círculos, que indican el nivel o magnitud de velocidad que se detecta mediante CIP en sus respectivas ubicaciones. De la información extraída de los formatos WIPSS se puede generar esta versión de mapas, en que el Sol se encuentra en el origen y alrededor se ubican las radiofuentes.

**Figura 2.16** Mapas del cielo con valores  $G$  y velocidad, ISEE, 15/jul/2000

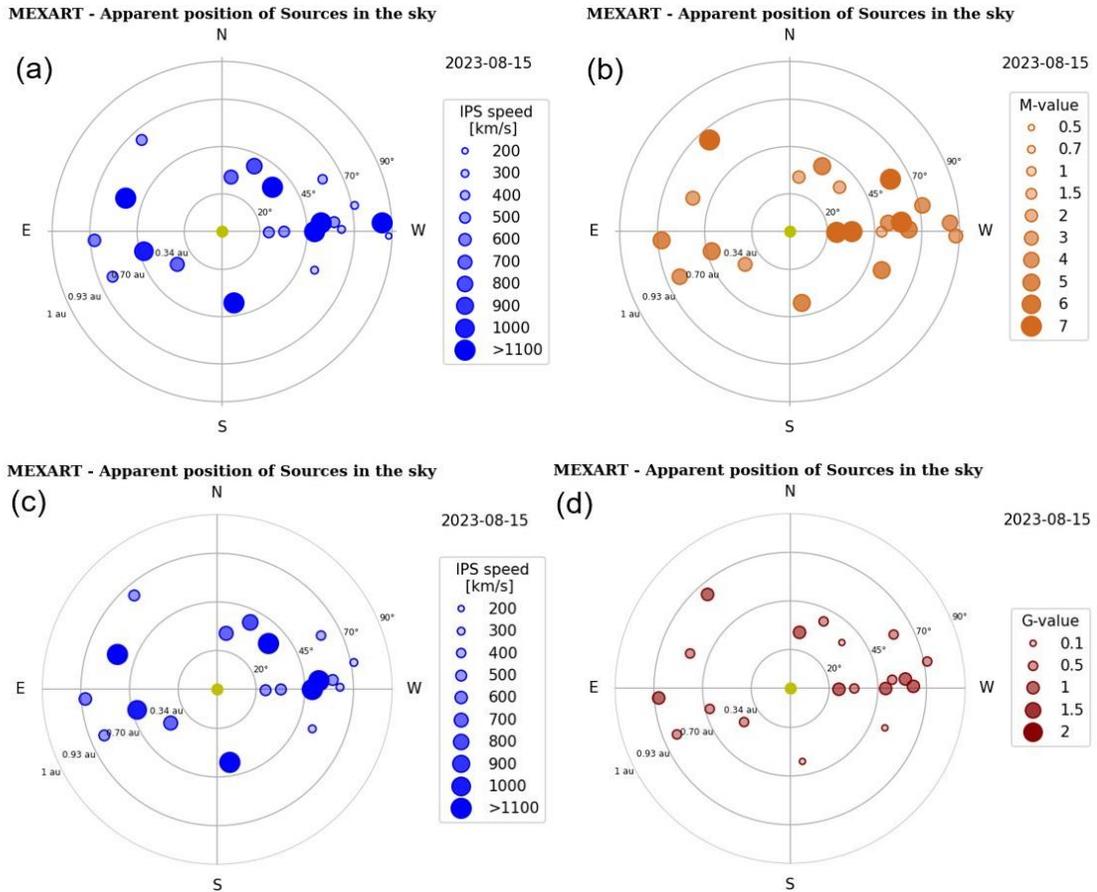


En ambas gráficas, se muestra la posición aparente, con círculos pequeños, de las fuentes observadas en un día vistas desde la Tierra con el Sol en el centro. Cada círculo concéntrico punteado indica una distancia heliocéntrica. En la gráfica de la izquierda se representan los índices  $g$  y a la derecha la rapidez de la velocidad del VS en la ubicación de las fuentes. [Tokumaru \(2003, p. 12-6\)](#).

En el presente trabajo, se incluyen el mismo tipo de gráficas, pero incluyendo las del índice  $m$ , como se muestra en la [Figura 2.17](#). Cada radiofuente es representada por un círculo cuyo tamaño y tonalidad dependerá de la magnitud de la **velocidad** o del índice  $m$  o  $g$ . Cada círculo concéntrico representa ángulos de elongación constante, que en este caso están a  $20^\circ$ ,

45°, 70°, y 90° y su equivalente,  $p = \text{sen}\epsilon$ , en unidades astronómicas 0.34, 0.70, 0.93, 1 respectivamente. Las fuentes se ubican en el plano mediante coordenadas polares, donde la distancia radial al Sol será el ángulo de elongación  $\epsilon$ , de 0° a 90°, y el ángulo  $PA$  entre el polo norte y la radiofuente, de 0° a 360°.

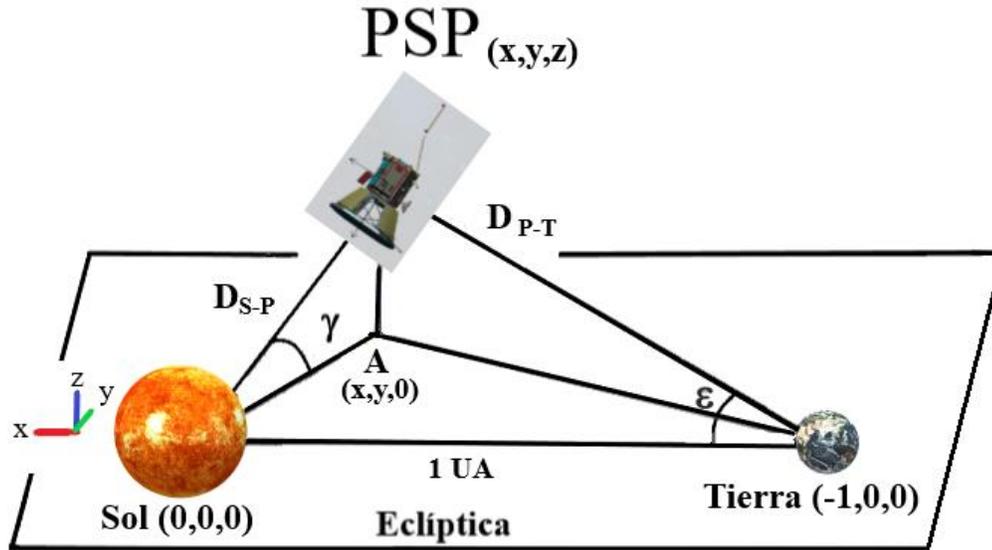
**Figura 2.17** Mapas de CIP, MEXART, 15/ago/2023



Adicionalmente, para ubicar a la PSP en los mapas de CIP se pueden usar los ángulos  $\epsilon$  &  $\gamma$  para la sonda, para ello se empleará la disposición mostrada en la [Figura 2.18](#).

Se obtuvo la posición de la PSP de los diferentes encuentros, en coordenadas **GSE**, *Geocentric Solar Ecliptic*, dado que se considera el más adecuado ya que su plano fundamental es la eclíptica y el eje **z** está hacia el polo norte.

**Figura 2.18** Geometría para la ubicación de la PSP en mapas de CIP



Sistema de coordenadas heliocéntrico, donde  $D_{S-P}$  representa la distancia Sol-PSP,  $D_{P-T}$  la distancia PSP-Tierra, el punto A se encuentra en el plano de la eclíptica,  $\epsilon$  es el ángulo entre la línea Tierra-Sol y Tierra-PSP y  $\gamma$  es el ángulo entre la línea Sol-PSP y Sol-punto A. Imagen adaptada de [Romero \(2015, p. 16\)](#).

En dicha figura se tiene el origen en el centro del Sol, el eje  $x$  está en dirección de la línea Tierra y Sol, y el eje  $z$  apunta al polo norte. La PSP se encuentra en la posición  $(x,y,z)$ , el Sol en  $(0,0,0)$ , la Tierra en  $(-1,0,0)$ , entonces se puede obtener el ángulo de elongación  $\epsilon$  aplicando la ley de los cosenos.

Donde:  $\vec{D}_{S-P}$  es el vector del Sol a la PSP,  $\vec{D}_{S-T}$  es el vector del Sol a la Tierra,  $\vec{D}_{P-T}$  es el vector de la PSP a la Tierra,  $\vec{D}_{S-A}$  es el vector del Sol al punto A (proyección de la PSP sobre la eclíptica),  $\vec{D}_{P-A}$  es el vector desde la PSP al punto A.

$$\begin{aligned} \vec{D}_{S-P} &= (x, y, z); |D_{S-P}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; \\ \vec{D}_{S-T} &= (-1, 0, 0); |D_{S-T}| = 1 \\ \vec{D}_{P-T} &= -\vec{D}_{S-P} + \vec{D}_{S-T} = (-x - 1, -y, -z); |D_{P-T}| = \sqrt{(x + 1)^2 + y^2 + z^2} \\ \cos(\epsilon) &= \frac{|D_{S-T}|^2 + |D_{P-T}|^2 - |D_{S-P}|^2}{2 * |D_{S-T}| * |D_{P-T}|} \end{aligned} \quad (2.30)$$

Aplicando, también, la ley de los cosenos para obtener la latitud heliocéntrica  $\gamma$ :

$$\begin{aligned}\vec{D}_{S-A} &= (x, y, 0); |D_{S-A}| = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \vec{D}_{P-A} &= -\vec{D}_{S-P} + \vec{D}_{S-A} = (-x + x, -y + y, -z); |D_{P-A}| = \sqrt{z^2} = |z| \\ \cos(\gamma) &= \frac{|D_{S-A}|^2 + |D_{S-P}|^2 - |D_{P-A}|^2}{2 * D_{S-A} * D_{S-P}} .\end{aligned}\quad (2.31)$$

## 3.1 MEXART

En México, a mediados de 1992 empezó la construcción de un arreglo dipolar de gran área, con el objetivo principal de estudiar el viento solar mediante análisis de CIP ([Carrillo-Vargas, 1998, p. 75](#)). El proyecto se desarrolló en el Instituto de Geofísica de la UNAM dirigido por la Dra. Silvia Bravo.

Para su diseño se tomó como base el radiotelescopio de centelleo interplanetario de Cambridge, Inglaterra<sup>18</sup>, además de experiencias y opiniones de otros especialistas como de la India, del *National Centre for Radio Astrophysics of Tata Institute of Fundamental Research*, y de Cuba, del Instituto de Geofísica y Astronomía ([Carrillo-Vargas, 2007](#)).

Se realizó un prototipo en las instalaciones de la Estación Geomagnética de Teoloyucan, Edo. de México<sup>19</sup>. Entró en operación a mediados de 1995 y permaneció funcionando hasta 1999 ([Carrillo-Vargas, 2007](#)).

La segunda fase del proyecto inició en 1998 con la selección de un lugar idóneo. Eligiendo para su construcción la Ciénega de Zacapu, del municipio de Coeneo, Michoacán. Posteriormente, se trabajó en su urbanización, la construcción del observatorio, su equipamiento y formación de personal técnico en radiotelescopía contando con el apoyo de especialistas de EU, India y Cuba. Se inauguró en diciembre de 2005 ([Carrillo-Vargas, 2007](#); [Observatorio de Centelleo Interplanetario de Coeneo, Michoacán \(MEXART\), 2005](#); [González-Esparza & Ramón, 2005b](#)).

---

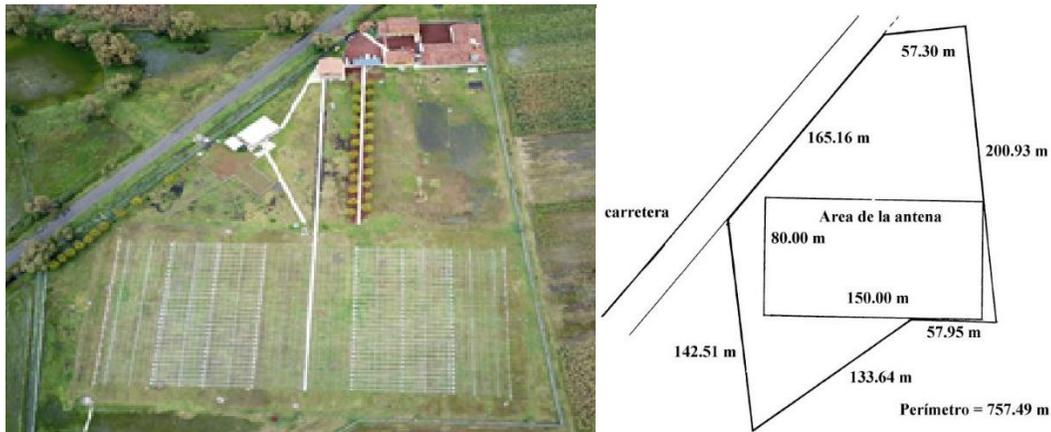
<sup>18</sup> Construido en la década de los setentas y operado hasta los noventas.

<sup>19</sup> Perteneciente al Instituto de Geofísica, UNAM.

El radiotelescopio *Mexican Array Radio Telescope*, conocido por el acrónimo MEXART, observa a una frecuencia central de 139.65 MHz. Éste lo conforma un arreglo de 4,096 dipolos (64x64) de onda completa ( $\lambda=2.14\text{m}$ ), donde cada línea orientada de Este a Oeste contiene 64 dipolos y están separadas  $\frac{1}{2} \lambda$  en un área física de  $8,401\text{m}^2$  ( $136.16\text{ m [E-W]} \times 61.70\text{ m [N-S]}$ ). En 2020, el MEXART actualizó su back-end, donde aumentó su ancho de banda de 2 a 12.5 MHz, dividiendo la señal en 512 canales (ancho espectral de  $\approx 25\text{ kHz}$ ) y con una capacidad de dirigir un haz en cualquier altura del meridiano local. Sus coordenadas geográficas son latitud  $19^\circ 48' 49''$  Norte, longitud  $101^\circ 41' 39''$  Oeste y a una altura de 1974 m sobre el nivel del mar ([Gonzalez-Esparza, 2022a](#)).

En la [Figura 3.1](#), se presenta una vista aérea del Observatorio y la geometría del terreno.

**Figura 3.1** Vista aérea del observatorio y del terreno en Coeneo, Mich.



(Izda.) Vista aérea del MEXART [Villanueva et al. \(2021, p. 4\)](#). (Dcha.) Especificaciones del terreno [Carrillo-Vargas \(2007, p. 38\)](#).

El *back-end*, Figura 3.3, opera de la siguiente manera: 64 señales de radio frecuencia (RF), correspondientes a 64 líneas de dipolos, son amplificadas y filtradas en 3 etapas hasta llegar a 2 módulos de procesamiento, cada módulo conocido como TPM (*Tile Processing Module*) recibe 32 de las señales. Los TPMs digitalizan, seleccionan el ancho de 12.5 MHz y canalizan la señal. Enseguida las señales son enviadas a un

servidor que cuenta con una GPU (Graphics Processing Unit) que se encarga de generar haces en distintas alturas en el meridiano local.

La operación, seguimiento, control y calibración es mediante una interfaz API<sup>20</sup> basada en la Web, haciendo uso de objetos JSON<sup>21</sup>, bases de datos REDIS & MongoDB<sup>22</sup>, y almacenando los haces en formato HDF5<sup>23</sup>. La tarjeta TPM consiste de conectores de RF, un convertidor análogo digital, dos FPGAs y dos interfaces de 40 Gb ([Magro, 2019](#)).

**Figura 3.3** Diagrama de bloque del nuevo back-end digital del MEXART

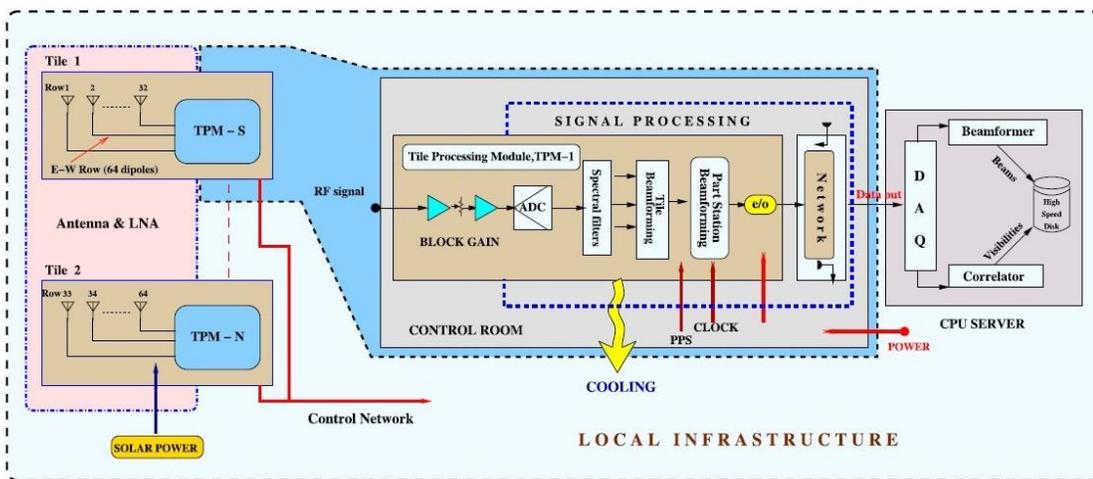


Imagen tomada de [Gonzalez-Esparza et al. \(2022a, p. 4\)](#).

En las siguientes fotografías tomadas, dentro del cuarto de control, se puede apreciar las tarjetas TPM y su conectividad en la [Figura 3.4](#), y los componentes del back-end completo en la [Figura 3.5](#).

En la [Figura 3.5](#) (a) se muestra las 64 señales (32 Norte + 32 Sur) que vienen del front-end de la antena vía cables coaxiales y su conectividad a las 2 tarjetas TPM. En el inciso (b) la etapa de filtrado y amplificación previo a la

<sup>20</sup> API = Application Programming Interface (Aplicación. cliente/servidor)

<sup>21</sup> JSON = JavaScript Object Notation

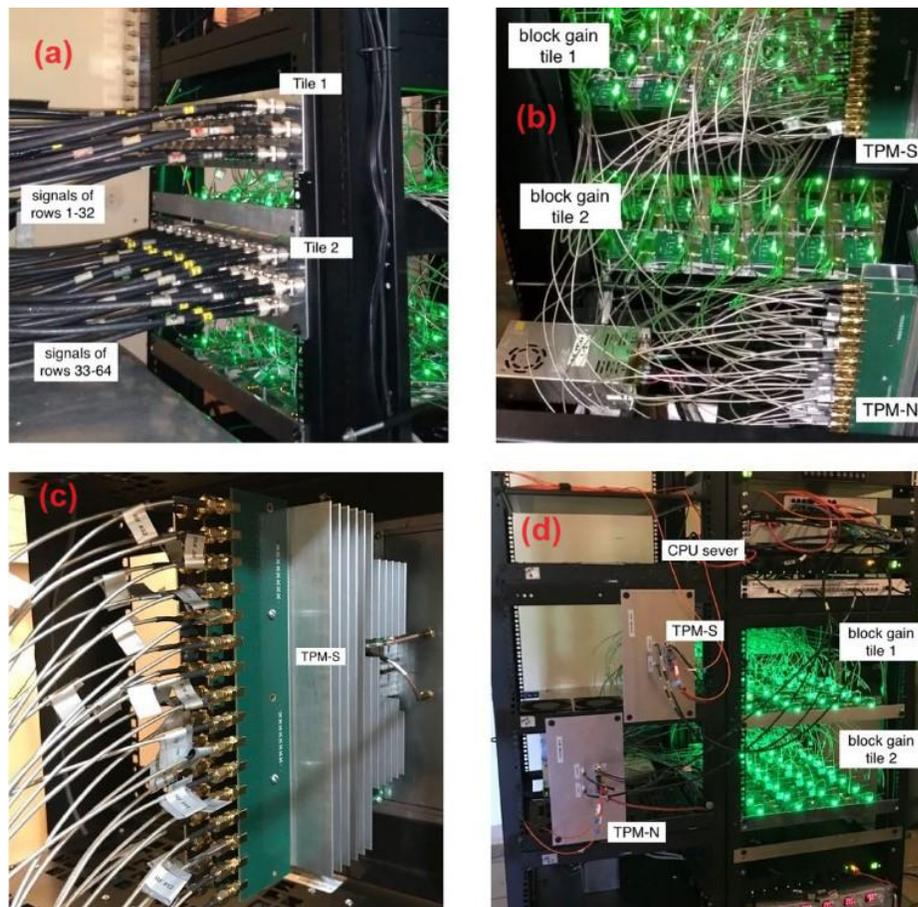
<sup>22</sup> REDIS & Mongo = Bases de Datos del tipo NO SQL. De código abierto.

<sup>23</sup> HDF5 = Hierarchical Data Format. Creado por el Centro Nacional de Aplicaciones en Supercómputo de EU, para el manejo de grandes cantidades de datos. De código abierto

entrada de las TPMs. En el inciso (c) una toma más de cerca a la interfase de entrada al TPM-S. En el inciso (d), una vista lateral del bloque de amplificación, TPMs y servidor ([Gonzalez-Esparza, 2022a](#)).

En esta tesis se usan observaciones con 1 haz, conocido como haz sintético ( $1^\circ$  E-O,  $2^\circ$  N-S), que se puede apuntar a cualquier altura en el meridiano local y esperar el tránsito de una fuente que exhiba CIP. En la práctica se producen 2 haces, uno que apunta hacia la fuente esperada y otro que apunta a la misma altura, pero con un ángulo azimutal  $180^\circ$  mayor. Cada observación almacena ambos registros de los haces.

**Figura 3.4** Vista trasera y lateral del back-end digital del MEXART



En (a) se muestran las 64 señales llevadas por cable coaxial al cuarto de control. En (b) la última etapa de filtraje y amplificación. En (c) las conexiones de 32 señales a una TPM. En (d) el rack mostrando las 2 TPMs, los bloques de amplificación y el servidor. [Gonzalez-Esparza et al. \(2022a, p. 5\)](#).

**Figura 3.5** Vista frontal del rack con el back-end del MEXART

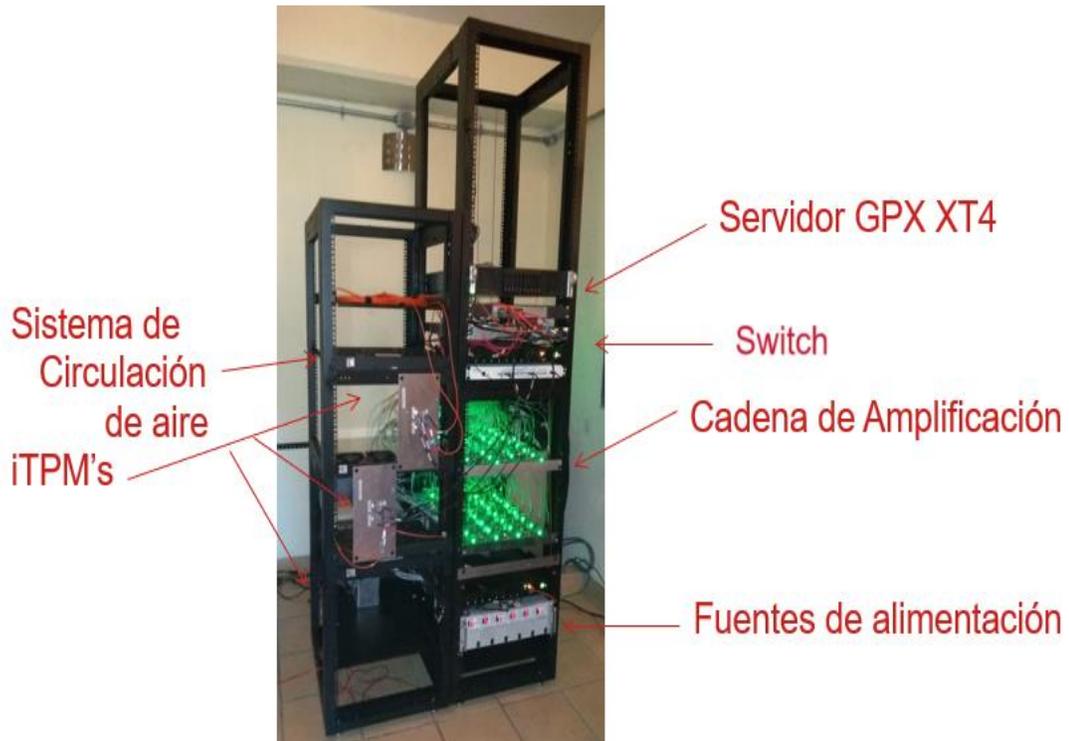


Imagen tomada de [Villanueva et al. \(2021, p. 4\)](#).

## 3.2 Parker Solar Probe

*Esta sección está basada en el artículo “The Solar Probe Plus Mission: Humanity’s First Visit to Our Star” de [Fox et al., 2016](#).*

El proyecto inicialmente presentado en el 2004 se pospuso; pero, se activó en el 2009 con el nombre de *Solar Probe Plus*. Su diseño y construcción fue llevado a cabo por el Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory. El año anterior a su puesta en órbita; en el 2017, la sonda fue renombrada como *Parker Solar Probe* (PSP) en honor al Dr. Eugene Parker.

La PSP se distingue por su trayectoria. Está programada para que en el 2025 logre su mayor acercamiento al Sol, de aproximadamente  $9.86 R_{\odot}$ , y que no orbité exclusivamente sobre la eclíptica.

La sonda fue lanzada el 12 agosto 2018 para estar en operación hasta el 2025, y durante ese tiempo hacer 24 tránsitos alrededor del Sol con 7

asistencias gravitatorias de Venus, como se muestra en la [Figura 3.6](#) para lograr pasar desde su primer perihelio, el más lejano, a  $36R_{\odot}$  ( $0.163$  UA) al último perihelio, el más cercano a  $9.86R_{\odot}$  ( $0.044$  UA) en el 2025; y pasar de un período orbital de 168 a 88 días. En esta gráfica también se incluyen sus perihelios (P), afelios (A) y las asistencias gravitacionales a Venus (*Venus Flyby*, VF) representándose con las esferas marrones.

**Figura 3.6** *Distancia Sol - PSP*

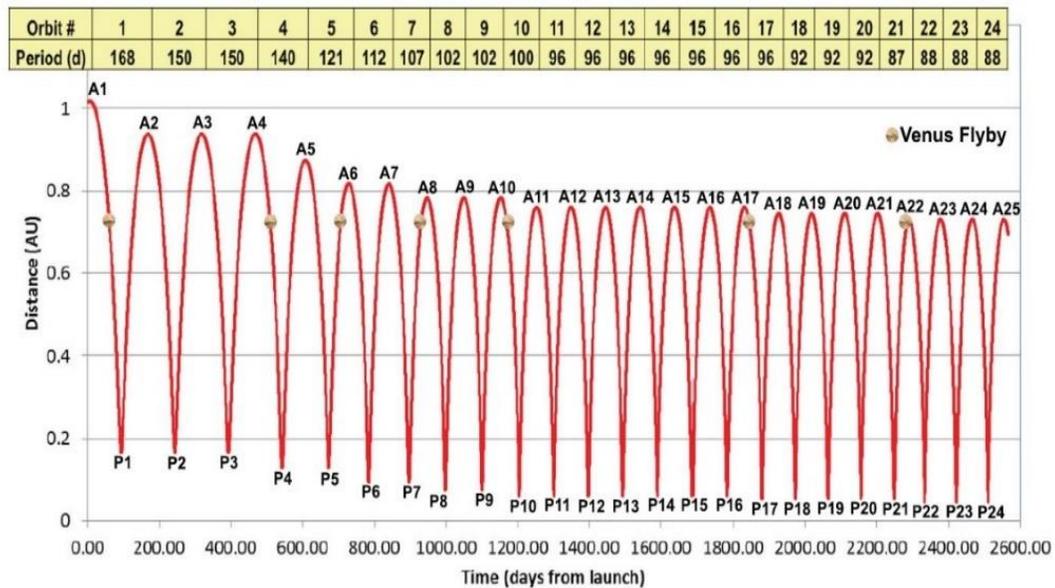


Imagen tomada de [Fox et al. \(2016, p. 30\)](#).

En la [Figura 3.7](#), se muestran las trayectorias planeadas para la sonda, con sus fechas tentativas para el lanzamiento y asistencias gravitacionales. Como su lanzamiento se aplazó doce días se recorrieron todas las fechas.

En cada órbita la sonda opera de dos formas o fases, la fase de encuentro, a menos de  $0.25$  UA, y la fase de crucero o trasmisión, a más de  $0.25$  UA. Durante la fase de encuentro, en su acercamiento al Sol, se almacenan los datos de los instrumentos y de la sonda. Las trasmisiones son limitadas a las requeridas para monitorear la nave y aparatos de medición. En la fase de crucero, se transmiten los datos científicos y de mantenimiento como: maniobras de corrección y carga de comandos.

Los objetivos científicos principales de la misión son:

1. Trazar el flujo de energía que calienta la corona y acelera el viento solar.
2. Determinar la estructura y la dinámica de los campos magnéticos que dan origen al viento solar.
3. Determinar qué mecanismos aceleran y transportan partículas energéticas.

**Figura 3.7** Trayectorias planeadas para la Parker Solar Probe

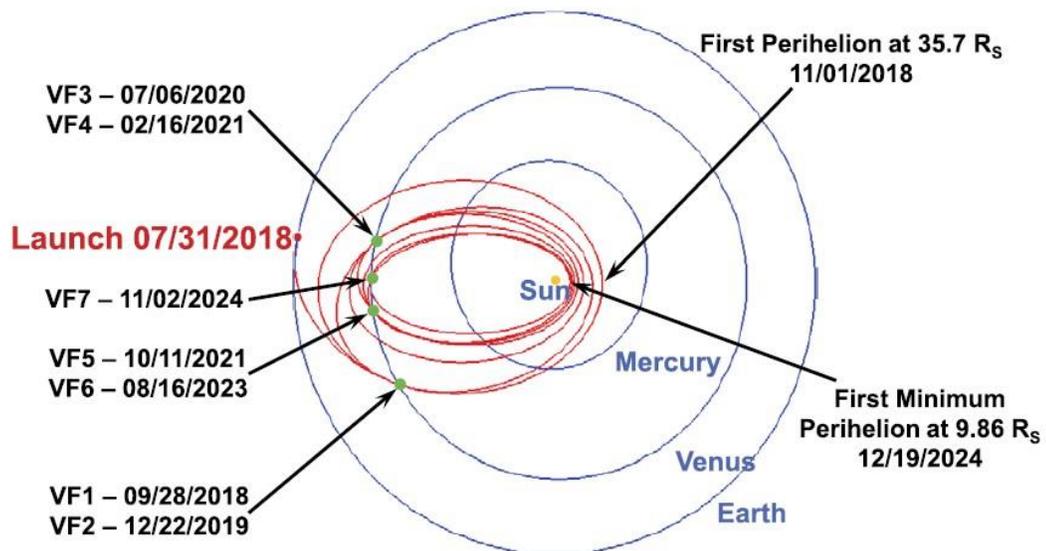


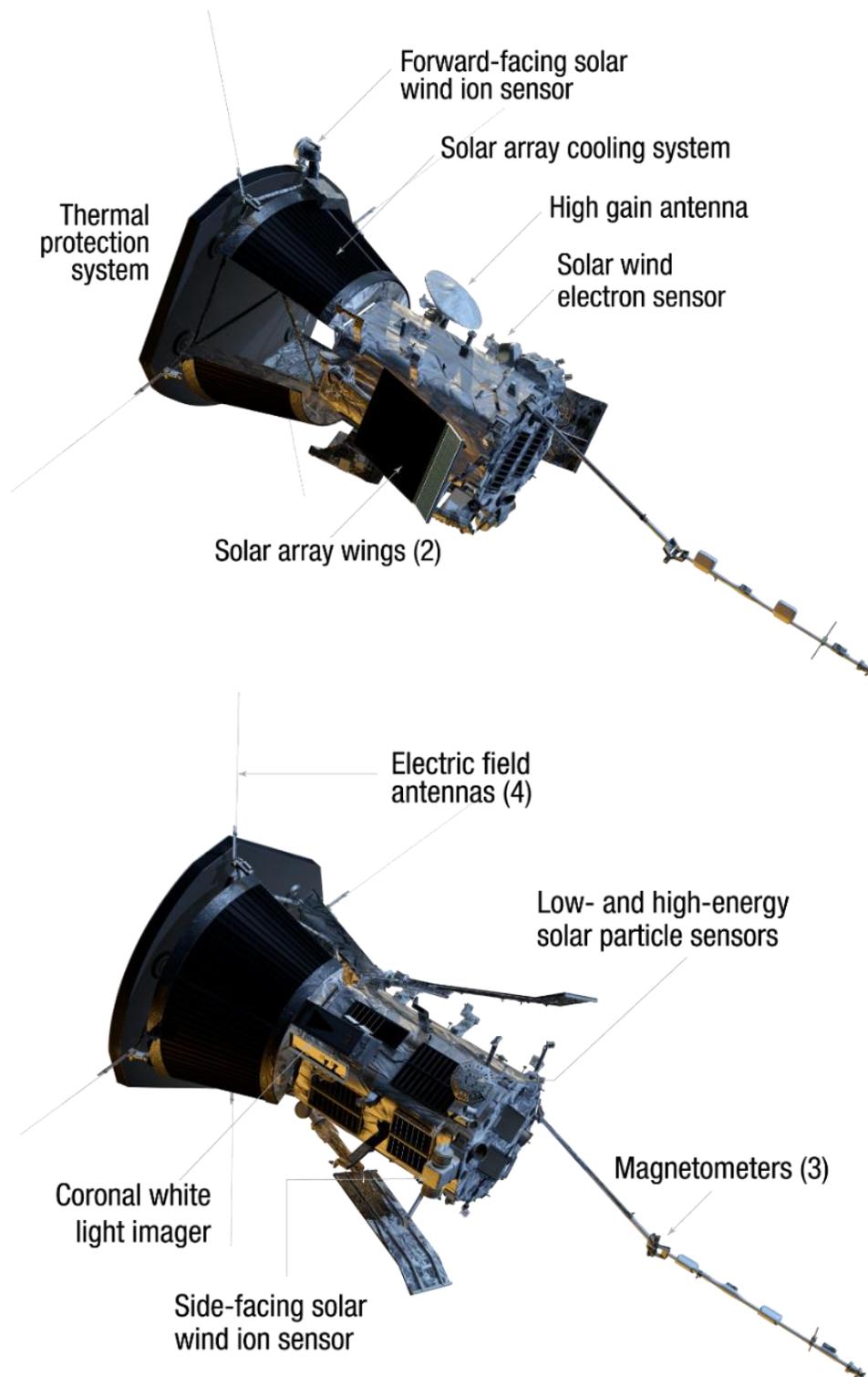
Imagen tomada de [Fox et al. \(2016, p. 30\)](#).

Para ello cuenta con instrumentos para la detección de plasma, campos electromagnéticos, partículas energéticas y toma de imágenes, como los mostrados en la [Figura 3.8](#).

Tres sensores para el plasma, cinco antenas para la medición del campo eléctrico, tres magnetómetros para registrar el campo magnético, un par de sensores para la detección de partículas de baja y alta energía, un par de telescopios en el visible para la toma de imágenes de la corona.

Los dispositivos y sus datos están organizados en esas cuatro áreas de investigación, proyectos que la NASA seleccionó en septiembre 2010. En la [Figura 3.9](#), se especifican estas agrupaciones y sus dispositivos asociados.

**Figura 3.8** Vistas laterales de la Parker Solar Probe



Imágenes tomadas de <http://parkersolarprobe.jhuapl.edu/Spacecraft/index.php>.

**Figura 3.9** Instrumentos por área de investigación de la Parker Solar Probe

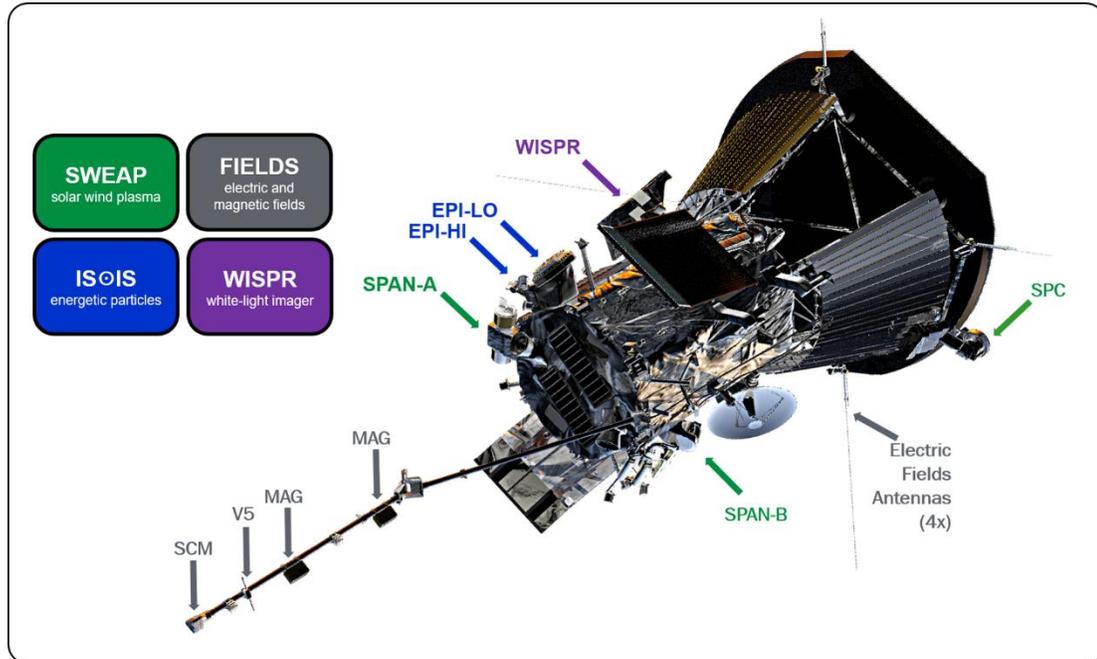


Imagen tomada de [http://sweap.cfa.harvard.edu/PSP\\_Spacecraft.html](http://sweap.cfa.harvard.edu/PSP_Spacecraft.html).

### FIELDS.- The Electromagnetic **F**ields Investigation

Enfocado al estudio de los campos electromagnéticos en general, ya sea al asociado por el viento solar lento o rápido. Midiendo los campos y obteniendo algunas propiedades derivadas como: vectores de Poynting, densidad del plasma, temperatura de electrones, densidad en las emisiones de radio y potencial de la nave. Haciendo uso de tres magnetómetros (MAG, MAG, SCM) y cinco sensores de voltaje (antenas V1 a V5).

### IS☉IS.- The **I**ntegrated **S**cience **I**nvestigation of the **S**un, Energetic Particle Instruments

Empleado para la detección de partículas: iones pesados, protones y electrones, con el fin de estudiar su ciclo de vida. Es decir, los mecanismos que las originan y cómo son aceleradas a altas energías, desde decenas de keV a 100 MeV en la atmósfera solar y en la heliosfera interna. Empleando para ello dos sensores, EPI-Lo y EPI-Hi, para bajas y altas energías respectivamente.

### SWEAP - The Solar Wind Electrons Alphas and Protons Investigation

Destinado a la medición de las principales partículas que componen el viento solar; es decir, de electrones, protones y partículas alfa (iones de He). Determinando su velocidad, su concentración y temperatura de dichas partículas. Empleando para ello, dos tipos de instrumentos, la SPC y los SPAN A y B, con un sensor, dos sensores y un sensor respectivamente. En esta tesis se usa datos obtenidos de SWEAP.

### WISPR - The Wide Field Imager for Solar Probe Plus

Dedicado a la adquisición de imágenes de lo que ocurre en la corona y la heliosfera interna, mediante dos telescopios ópticos, con el fin de ser el eslabón que ayude a asociar las observaciones in-situ de la sonda y las estructuras de gran escala observadas en la corona. Además de obtener el espectro de potencia de la densidad de electrones y tomas del polvo interplanetario y de los cometas rasantes ([Vourlidas et al., 2015](#)).

Las instituciones que participan en cada una de estas áreas de investigación se mencionan a continuación, en la [Tabla 3.1](#).

Los datos de la sonda son descomprimidos, revisados y procesados por las diferentes universidades, laboratorios u observatorios involucrados. A los datos originales se le denominan de nivel L0, a los descomprimidos de nivel L1 y a los revisados y procesados de nivel L2. Los datos a nivel L2 procedentes de cada grupo de instrumentos son calibrados, y puestos en las coordenadas y unidades de uso común para ser compartidos a la comunidad científica en general desde el sitio oficial para la PSP del *John Hopkins University Applied Physics Laboratory*, el portal es: *Parker Solar Probe Science Gateway* (<https://psp-gateway.jhuapl.edu/>).

También existe los productos de datos a nivel L3, en estos se conjunta información procedente de los otros sensores de la sonda para obtener datos derivados, como la distribución de las partículas del viento solar en una

dirección específica. Se previó un nivel adicional, L4, donde por ejemplo ya se identificarían eventos y el lugar en el Sol donde se generaron.

**Tabla 3.1** Áreas de Investigación de la PSP y organismos involucrados

Área	Institución Líder	Grupo de Instituciones
FIELDS	University of California, Berkeley. Prof. Stuart Bale	CNRS/LPC2E, Orleans, France; NASA/GSFC; Obs. Meudon, France; SAO; Univ. Colorado; Univ. Maryland, College Park; Univ. Minnesota; Univ. New Hampshire
IS $\odot$ IS	Southwest Research Institute (SwRI). Dr. David McComas of the Princeton University	Caltech, JPL; JHU/APL; NASA/GSFC; Univ. Delaware; Univ. New Hampshire; Univ. Arizona
SWEAP	Smithsonian Astrophysics Observatory (SAO). Prof. Justin Kasper of the University of Michigan	Univ. California-Berkeley; Univ. Michigan; NASA/MSFC; JHU/APL; LPP Ecole Polytechnique; Obs. Paris LESIA- CNRS; NASA/GSFC; Los Alamos National Laboratory; Univ. Alabama- Huntsville; Univ. Iowa; Univ. New Hampshire
WISPR	Naval Research Laboratory (NRL). Dr. Mark Linton	JHU/APL; JPL; Predictive Sciences Inc.

Tabla adaptada de [Fox et al. \(2016, p.28\)](#).

Los datos también son accesibles desde repositorios de la NASA y de observatorios virtuales del Sol. Para conocer el detalle sobre los diferentes niveles de productos de datos de la misión PSP y su disponibilidad posterior a la fase de encuentro consulte la [Tabla 3.2](#).

Los datos a nivel L2 y L3 para los instrumentos de FIELDS, IS $\odot$ IS & SWEAP son archivados en formato CDF (Common Data Format) y para el WISPR en formato FITS (Flexible Image Transport System). En particular, para los fines de esta tesis se emplean los datos de SWEAP (SPC & SPAN) a nivel L2 y L3 para obtener la velocidad y densidad del viento solar.

**Tabla 3.2** Niveles de productos de datos de la misión PSP

Nivel de Datos	Descripción	Disponibilidad
L0	Datos y comandos sin procesar, inclusive paquetes de sincronización, encabezados de comunicación, instrucciones tipo remover datos duplicados, etc.	14 días
L1	Tiempos de muestreo de los instrumentos, datos auxiliares, como las efemérides de la sonda.	14 días
L2	Datos calibrados a las apropiadas unidades científicas y transformación a sistema de coordenadas heliofísicas.	30 días
L3	Datos transformados que no puede revertirse al nivel anterior pues han sido normalizados, re-muestreados y/o promediados.	90 días
L4	Datos al más alto nivel que involucra el uso de modelos y datos externos. Aplicable sólo a algunos subconjuntos de datos.	1 año

Tabla adaptada de [Raouafi y Kusterer \(2021, p. 37\)](#).

### 3.2.1 SWEAP

En esta sección se proporcionan características generales de los sensores de este grupo, como su ubicación, propiedades físicas, qué detectan y cómo lo hacen.

SWEAP emplea tres instrumentos para la detección de partículas, la SPC que es el acrónimo de *Solar Probe Cup* y los dos SPAN cuyo acrónimo es *Solar Probe ANalyzer*, que son mostrados a continuación en la [Figura 3.10](#). El SPAN-A contiene dos sensores SPAN-Ae, para la detección de electrones y el SPAN-Ai (SPAN-I, SPAN-A+) para los iones. El SPAN-B se emplea solo para medir electrones. Al SPAN-Ae y el SPAN-B se les denomina colectivamente por SPAN-E.

Los instrumentos SPC y SPAN están diseñados para tener campos de visión complementarios y superpuestos. La SPC está de cara al Sol, por lo que está optimizada para medir los flujos de plasma provenientes a lo largo de la línea Sol-nave espacial, perpendicular al escudo térmico, opera bajo

temperaturas extremas y tiene un campo de visión (FOV) de  $\sim 30^\circ$ . Los SPAN, van a los costados, por lo que están optimizados para captar los flujos en ángulos más amplios. Su FOV cubre  $\pm 60^\circ$  de elevación y  $247.5^\circ$  de acimut (coordenadas horizontales). El FOV de la SPC cae dentro del campo de visión del SPAN-Ai.

**Figura 3.10** Sensores de plasma de la Parker Solar Probe

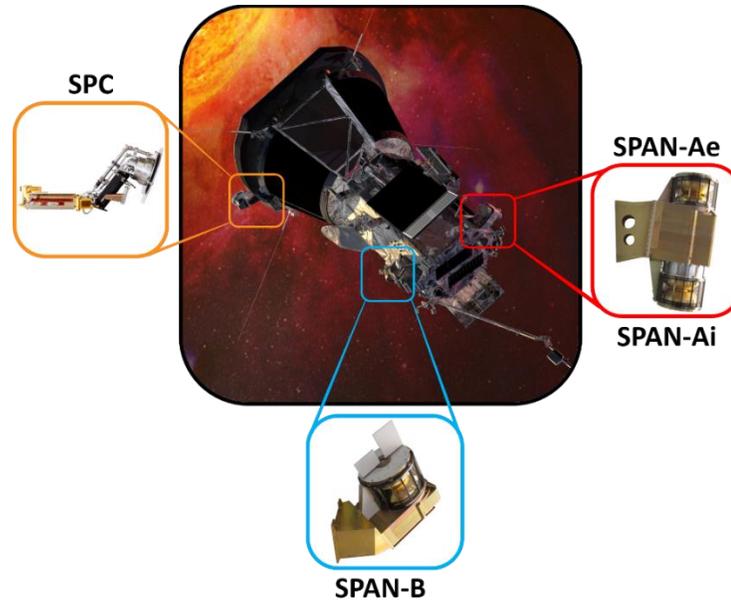


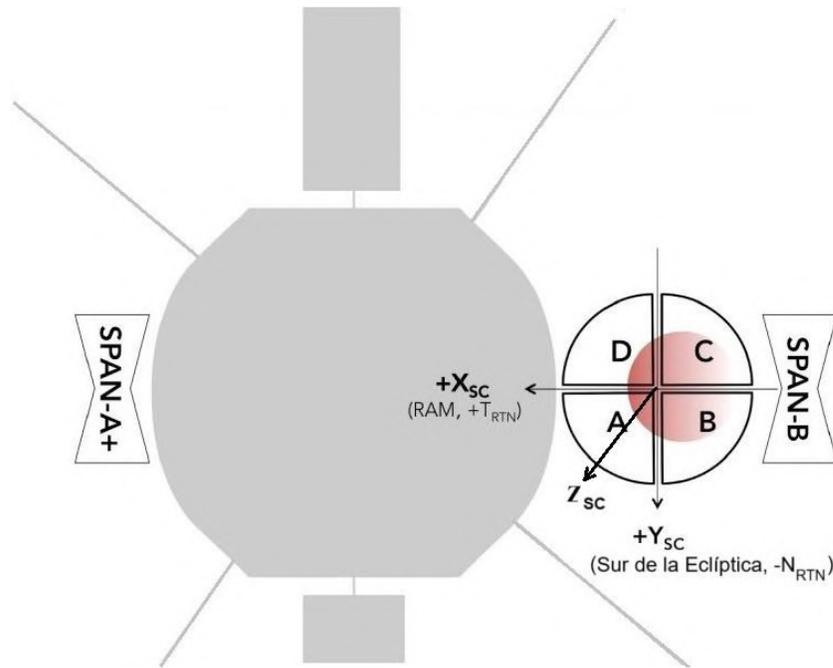
Imagen tomada de <http://sweap.cfa.harvard.edu/>.

En la [Figura 3.11](#) se muestra la sonda de cara al Sol, la ubicación de los tres sensores: SPAN-A (lado RAM, en la dirección de giro de la nave), SPC y SPAN-B (lado anti-RAM), los dos marcos de referencia, el de la nave (PSP Spacecraft frame, SC frame) y el heliocéntrico inercial (**R**adial-**T**angential-**N**ormal heliospheric reference frame, RTN frame), y la relación entre ambos.

El marco de referencia inercial RTN ha sido usado ampliamente en misiones interplanetarias, como en las Voyager ([Bridge et al., 1977](#)), Helios ([Porsche, 1981](#)), Ulysses ([Wenzel et al., 1989](#)) y STEREO ([Kaiser et al., 2008](#)). El vector  $R_{RTN}$  apunta a lo largo de la línea Sol-nave espacial, el vector  $T_{RTN}$  es tangente a la rotación del Sol, sobre la eclíptica y en dirección al movimiento de la nave y  $N_{RTN}$  es normal a ambos vectores. El marco de referencia de la

nave y de la SPC es el mismo, el vector  $X_{SC}$  apunta hacia la dirección RAM,  $Y_{SC}$  hacia el sur de la eclíptica y  $Z_{SC}$  de la sonda al Sol. Por lo que,  $R_{RTN} = -Z_{SC}$ ,  $T_{RTN} = X_{SC}$  y  $N_{RTN} = -Y_{SC}$ . Adicionalmente para la SPC, se ilustra la orientación de las cuatro secciones (A, B, C y D) que forman la placa colectora.

**Figura 3.11** Vista desde el Sol de la PSP



Ubicación y marcos de referencia para los instrumentos SPC, SPAN A y SPAN-B [SWEAP Science Team \(2020, p. 7\)](#).

Las mediciones son tomadas a más de  $9.5 R_{\odot}$ . En la [Figura 3.12](#) se muestra la proporción de tiempo que el VS es observado por la SPC y el SPAN-Ai. Cuando la sonda se va aproximando al Sol (*inbound*), la SPC se desempeña mejor a distancias mayores a  $15 R_{\odot}$  que el SPAN-Ai, porque la SPC capta aproximadamente la totalidad del VS por ser éste casi radial. Reduciéndose a menos de un 60% en el perihelio. Al irse alejando del Sol (*outbound*), disminuye como a un 20% a  $10 R_{\odot}$  para volver a cubrir ~100% a menos de  $\sim 50 R_{\odot}$ . En cambio, las mejores mediciones del SPAN-Ai se obtienen a menos de  $10 R_{\odot}$  cubriendo como el 70% del flujo a lo más, tanto al

acercarse como al alejarse. El conteo de partículas por el SPAN-Ai tenderá a un mínimo de unos cuantos protones a distancias mayores a los 35  $R_{\odot}$ .

**Figura 3.12** Cobertura de los instrumentos SPC y SPAN-Ai

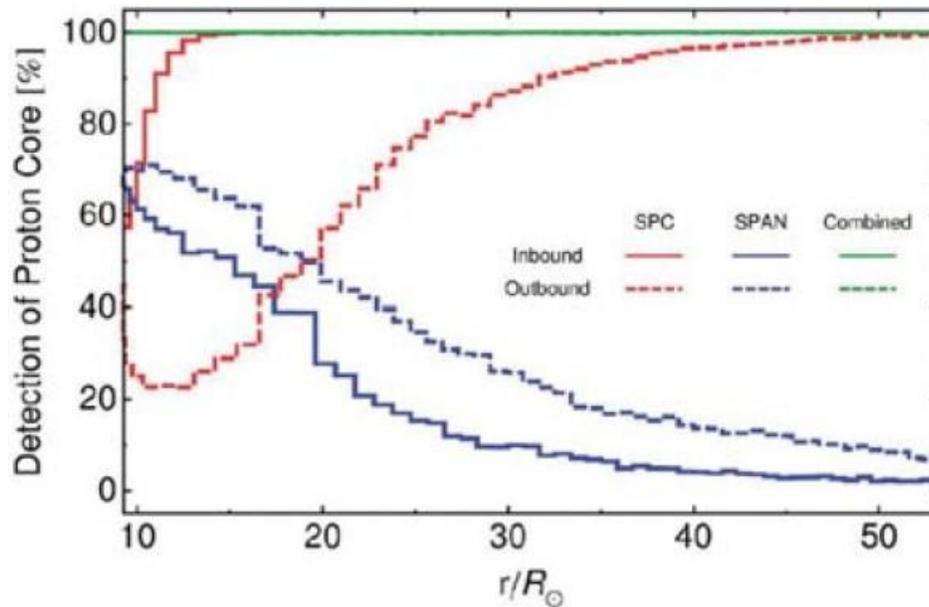


Imagen tomada de [Case et al. \(2013, p. 459\)](#).

La SPC es una copa de Faraday que consta de un conjunto de rejillas metálicas planas y paralelas para producir los campos electrostáticos necesarios modulando la corriente de partículas en función de su relación energía/carga; es decir, del nivel de voltaje aplicado. En base al nivel se obtiene una función de distribución unidimensional de la velocidad de las partículas y mediante el colector segmentado se determina su dirección.

Los SPAN son analizadores electrostáticos que determina la distribución tridimensional de la velocidad de las partículas (Velocity Distribution function, VDF) haciendo uso de hemisferios concéntricos para la discriminación de éstas basada en su relación energía/carga, y de múltiples deflectores electrostáticos y ánodos para determinar la dirección del flujo. Adicionalmente, el instrumento SPAN-Ai contiene una sección de tiempo de vuelo (Time-of-Flight, ToF) que permite la identificación de la masa de las

partículas ([Livi et al., 2022](#); [Whittlesey et al., 2020](#)). En la [Tabla 3.3](#) se encuentra un resumen de estas características.

**Tabla 3.3** Instrumentos del SWEAP

Nombre	Sensor	Partículas	Medición
SPAN-Ai	Analizador Electrostático + ToF	Iones	3D VDF + masa
SPAN-Ae	Analizador Electrostático	Electrones	3D VDF
SPAN-Be	Analizador Electrostático	Electrones	3D VDF
SPC	Copa de Faraday	Electrones + Iones	1D VDF + energía en función del ángulo

*Tabla adaptada de Case et al. (2020, p. 2)*

### 3.2.1.1 SPC

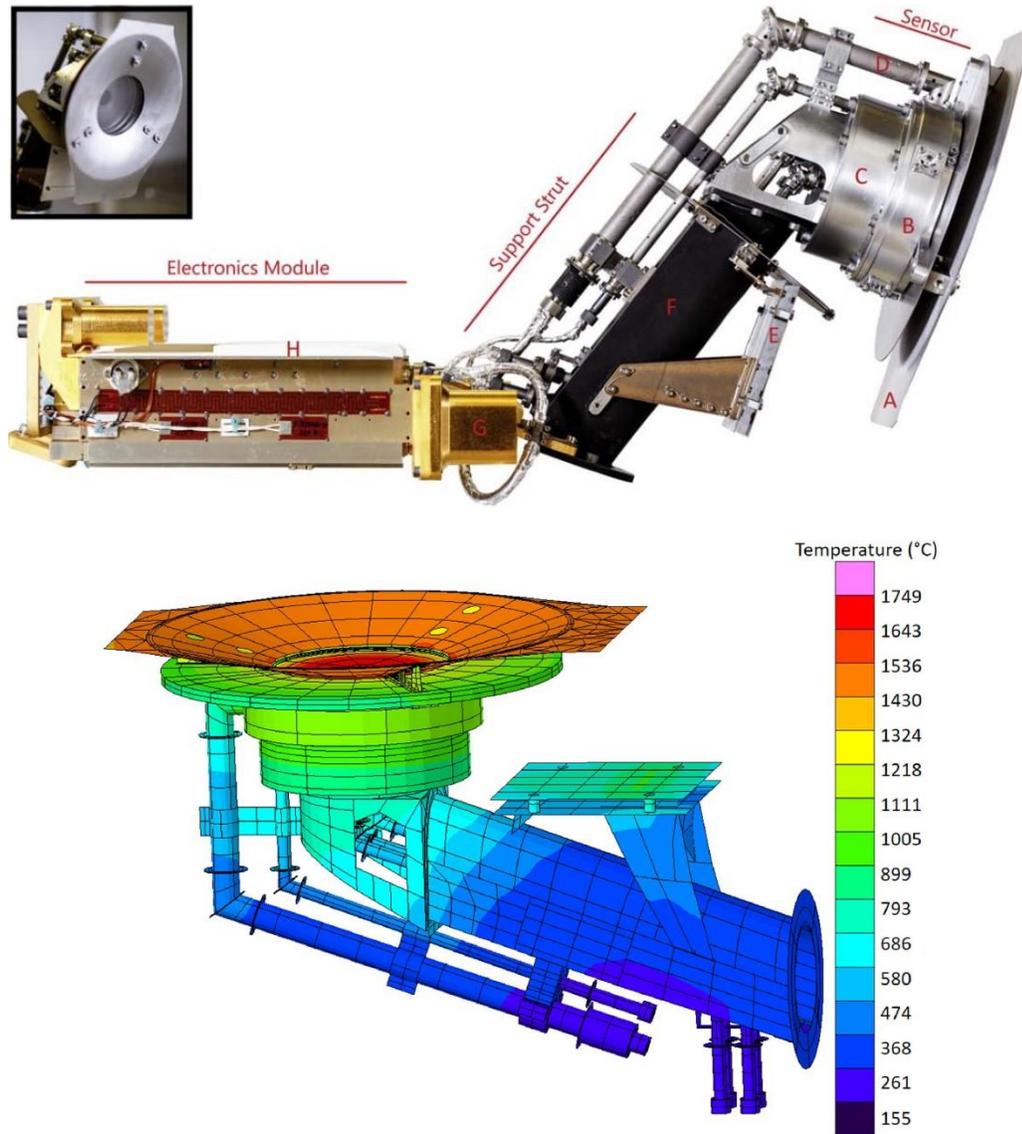
Esta sección está basada en “The Solar Probe Cup on the Parker Solar Probe”, [Case et al., 2020](#).

Versiones anteriores de este instrumento se han empleado en numerosas misiones con éxito, como en: las Voyager 1 y 2 ([Bridge et al., 1977](#)), Wind ([Ogilvie et al., 1995](#)), Spektr-R ([Zastenker et al., 2013](#)), y del Deep-Space Climate Observatory, DSCOVR ([Burt & Smith, 2021](#)), pero a diferencia de éstas la SPC requiere soportar ~475 veces más la radiación solar versus la recibida en Tierra a 1 UA.

Los desafíos técnicos incluyeron: (a) resistencia a las altas temperaturas empleando metales refractarios como: tungsteno, niobio, molibdeno, y aleaciones con titanio, hafnio, circonio, (b) aisladores que soporten las altas temperaturas y alta tensión, como el zafiro, (c) la conducción y radiación térmica, y (d) emisión fotoeléctrica y termoiónica.

Los componentes de la SPC, [Figura 3.13](#), son: (A) escudo térmico, (B) modulador de alto voltaje, (C) placa colectora, (D) cableado, (E) segundo escudo térmico, (F) soporte, (G) amortiguador y (H) componentes electrónicos. En la imagen inferior, los valores estimados de la temperatura en el dispositivo durante su perihelio más próximo al Sol.

**Figura 3.13** Vista lateral y de frente del instrumento Solar Probe Cup



(Sup.) Componentes (Inf.) Temperaturas esperadas a  $9.86 R_{\odot}$ , en su máximo acercamiento al Sol [Case et al. \(2020, p. 3, 4\)](#).

El escudo térmico “A” refleja, absorbe y vuelve a irradiar cualquier flujo de fotones solares. El instrumento utiliza un campo eléctrico para aceptar o rechazar las partículas entrantes en función de su carga, haciendo uso de una serie de rejillas metálicas planas y paralelas en el modulador “B” y colector “C” para controlar el potencial en el sensor.

La placa colectora de forma circular, mostrada en la [Figura 3.11](#), está dividida en cuatro segmentos independientes, orientados: “A y B” hacia el nadir, “C y D” hacia el zenit, “A y D” hacia la dirección ram, y “B y C” en dirección anti-ram. La relación de corriente sobre cada sección determina el ángulo de flujo del plasma en la copa. La señal de cada una se transmite por su propio cable coaxial, sección “D”, al módulo electrónico “H”.

Un diagrama que muestra cómo es procesada la señal de los colectores se presenta en la [Figura 3.14](#). La corriente de cada placa pasa por un amplificador operacional traduciendo los niveles de corriente a voltaje, luego por un filtro pasa banda, y por tres etapas de amplificación adicional antes de llegar a un par de convertidores análogos digital y de allí, al arreglo de compuertas programable donde se realiza un escaneando a 128 Hz a través de un conjunto de ventanas a diferentes potenciales; es decir, de niveles de energía por carga ( $E/q$ ), almacenándolos dependiendo del tipo de análisis que se requiera hacer.

**Figura 3.14** Diagrama de los componentes electrónicos de la SPC

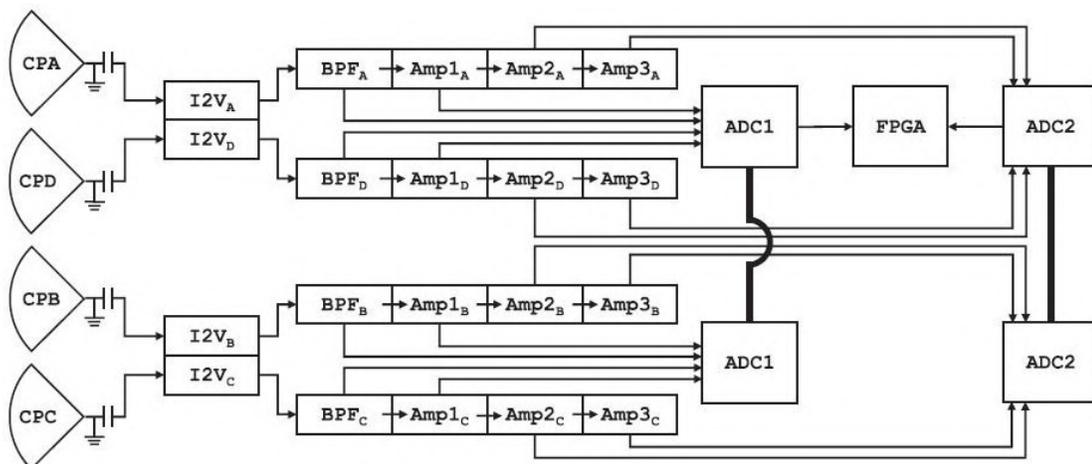


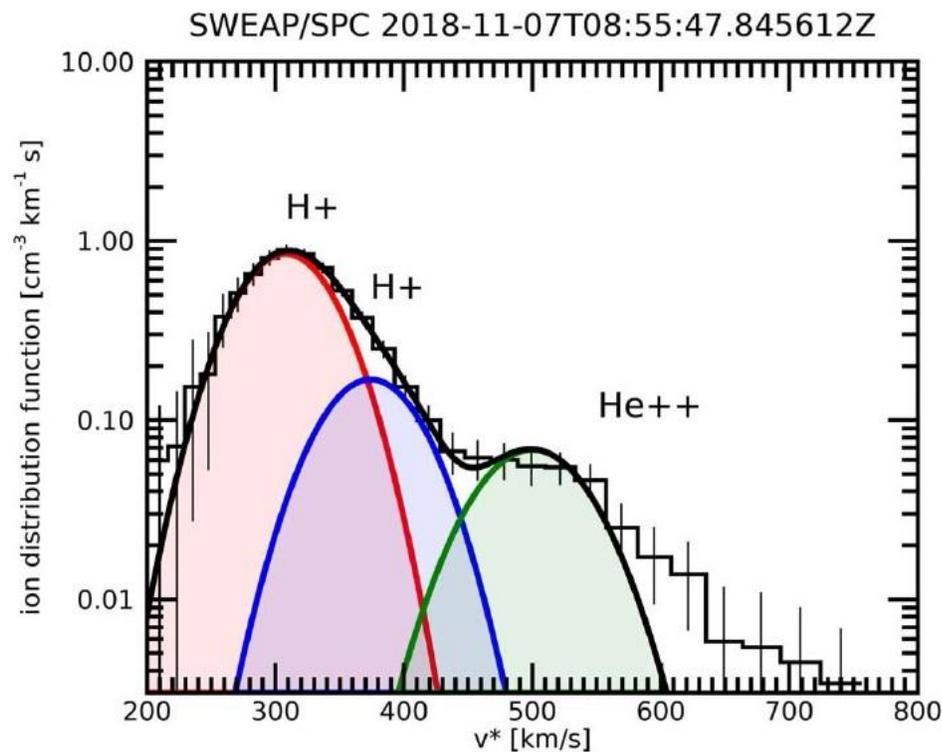
Imagen tomada de [Case et al. \(2020, p. 6\)](#).

Los espectros obtenidos se traducen a una VDF unidimensional. Las ventanas determinan la porción del VDF que será resuelta y la cadencia a la que se generará el producto de datos dependiendo del modo de operación de la SPC. Esta puede ser programada para: (a) calibración, (b) *full scan*, análisis

completo, (c) *peak tracking*, seguimiento de picos y (d) *flux-angle*, detección de ángulo de flujo ([Case et al., 2013](#)).

Dado que las partículas alfa comúnmente fluyen a una velocidad similar a los protones son detectables por la SPC. Si el plasma es lo suficientemente frío, los máximos en la VDF serán distintos entre sí, como se muestra en la [Figura 3.15](#), donde se logró identificar tres conjuntos de partículas.

**Figura 3.15** Funciones de distribución de iones, SPC, 7/Nov/2028 08:55:47



Datos registrados después del perihelio del primer encuentro [Case et al. \(2020, p. 10\)](#).

En los puntos más cercanos al Sol, donde el plasma está más caliente, el instrumento SPAN-Ai será más adecuado para determinar el flujo de partículas alfa. En la gráfica se señala los tres ajustes, una distribución Maxwelliana para el haz principal de protones en rojo, otro haz secundario de protones en azul y la población de partículas alfa en verde. La línea sólida en negro representa la distribución modelada total. El histograma y las barras de error son las mediciones de la función de distribución reducida, *Reduced Distribution Function* (RDF), y los errores asociados en cada medición.

Dado que la copa apunta directamente al Sol, hay fuentes grandes de ruido que influye como: fotones, electrones emitidos termoiónicamente y partículas de carga opuesta que podrían ser detectados. Para evitar esto, la corriente de cada placa colectora es acoplada al detector y filtrada para eliminar cualquier señal que no esté cerca de la frecuencia a la que se oscila la rejilla moduladora.

El rango de densidad de corriente que se mide en la SPC es del orden de  $10^{-12}$  a  $10^{-8}$  A cm<sup>-2</sup>. El nivel de potencial para los iones es de 100 a 6000 V, por lo que la SPC será capaz de identificar protones con velocidades entre 139 a 1072 km s<sup>-1</sup>, y detectar electrones con potenciales de -100 a -1500 V.

Para finalizar esta sección, se verán los productos datos compartidos a nivel L2 y L3 para la SPC. Para información adicional, consultar [SWEAP Science Team \(2020\)](#).

En todos los archivos se incluye información sobre la confiabilidad de las mediciones, *quality flags* y especificaciones del archivo en sí para control, que no serán mencionados en su descripción, como: tamaño de paquete, encriptación, razón de compresión, origen, matriz de rotación del instrumento, tiempo transcurrido de la misión y otros datos necesarios.

### SPC LEVEL 2 ION DATA

*Este producto de datos contiene mediciones de la densidad de iones en función de su energía.*

Nombre de archivo: [psp swp spc l2i yyyyymmdd vXX.cdf](#)

Variables: Serie de tiempo, límites inferior y superior de voltaje ( $V_{lo}$ ,  $V_{hi}$ ) por cada nivel de potencial ( $E/q$ ) con sus incertidumbres; además, las corrientes con sus incertidumbres en cada placa colectora ( $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $I_D$ ), los ángulos (*acimut  $\phi$* , *elevación  $\theta$* ) y sus incertidumbres para cada haz de partículas que ingresa al instrumento, los diferenciales de densidad de corriente  $D$  y sus incertidumbres en cada una de las ventanas de voltaje.

### SPC LEVEL 3 ION DATA

*Este producto de datos contiene mediciones derivadas como la densidad, temperatura y velocidad de las partículas que componen el VS. Aplicando para su obtención tanto el método de ajuste, mediante una o más distribuciones maxwellianas isotrópicas, como el método de momentos usando la RDF.*

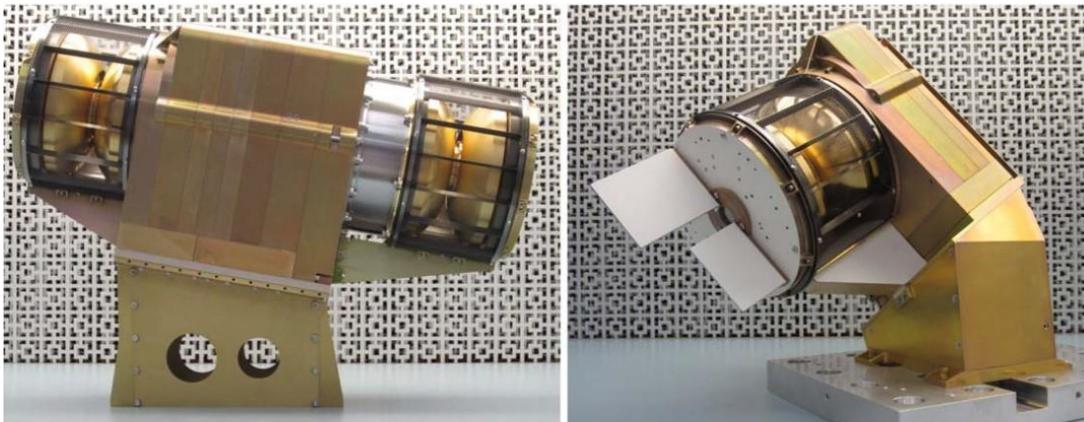
Nombre de archivo: [psp\\_swp\\_spc\\_l3i\\_yyyymmdd\\_vXX.cdf](#)

Variables: Serie de tiempo, posición y velocidad de la nave, densidad, velocidad térmica y velocidad del VS ( $p$ ,  $\alpha$  y otros) junto con sus incertidumbres. La velocidad se proporciona en dos sistemas de coordenadas (**SC** & **RTN**).

#### 3.2.1.2 SPAN

Diferentes diseños de analizadores electrostáticos han sido ampliamente usados desde el inicio de la era espacial, como en la Mariner 2 lanzada en 1962 ([Chase & Schwarz 1963](#)). En la [Figura 3.16](#) se pueden ver estos dispositivos, los cuales son del tipo *top-hat* hemisférico clásico desarrollado por el *U.C. Berkeley Space Sciences Laboratory* ([Carlson et al., 1982](#)). Similares se han usado en las misiones STEREO y MAVEN ([Jakosky et al., 2015](#)).

**Figura 3.16** Sensores electrostáticos



(Izda.) SPAN-Ae y SPAN-Ai. (Dcha.) SPAN-B. [Whittlesey et al. \(2020, p. 2\)](#).

Las partículas que ingresan al analizador, ver [Figura 3.17](#), se seleccionan según su  $E/q$  desde  $\sim 0$  a varios kV para medir la energía de iones y electrones que van desde unos pocos eV/q a 30 keV/q. Atraviesan los deflectores y continúan su camino hacia los ánodos. Su posición se determina precisamente por medio de estos dos elementos. El **ángulo de elevación**  $\theta$ , es el ángulo que hace la partícula con respecto al deflector, y el **ángulo acimutal**  $\varphi$  es definido por el ánodo que la detecta ([Kasper et al., 2016](#)).

**Figura 3.17** Vista transversal del SPAN-Ai

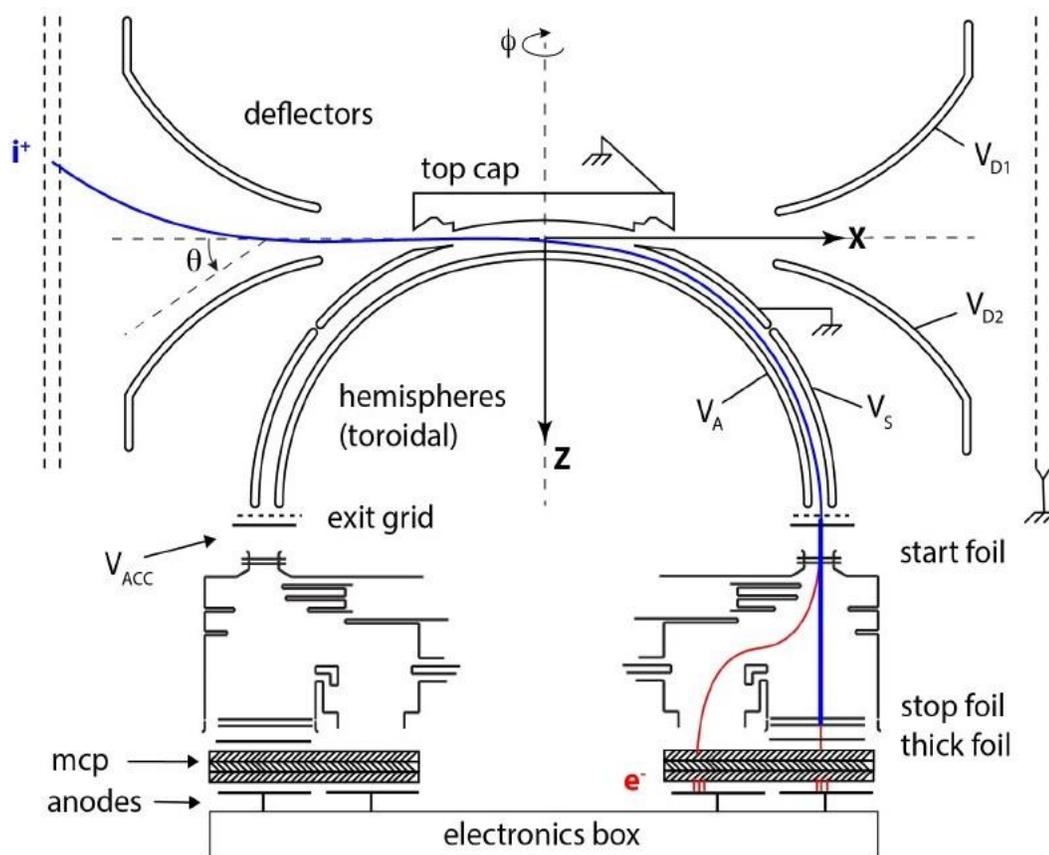
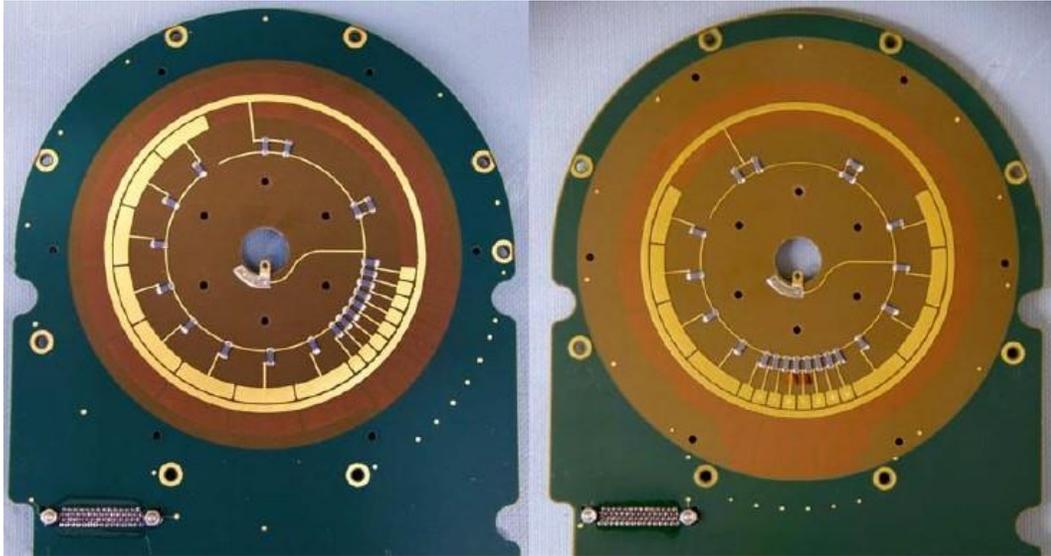


Imagen tomada de [Livi et al. \(2022, p. 4\)](#).

Una imagen de la distribución de los ánodos para el SPAN-Ae y el SPAN-B se muestra en la [Figura 3.18](#). Los ánodos más angostos están ubicados alrededor de la eclíptica. Los instrumentos SPAN-Ae y SPAN-B juntos tienen FOV que cubren más del 90% del cielo. Cada SPAN-E individual tiene un campo de visión de  $\pm 60^\circ$  en  $\theta$  y  $240^\circ$   $\varphi$  ([Whittlesey et al. 2020](#)).

**Figura 3.18** Tarjeta de ánodos del SPAN-Ae y SPAN-B



(Izda.) SPAN-Ae. (Dcha.) SPAN-B [Whittlesey et al. \(2020, p. 5\)](#).

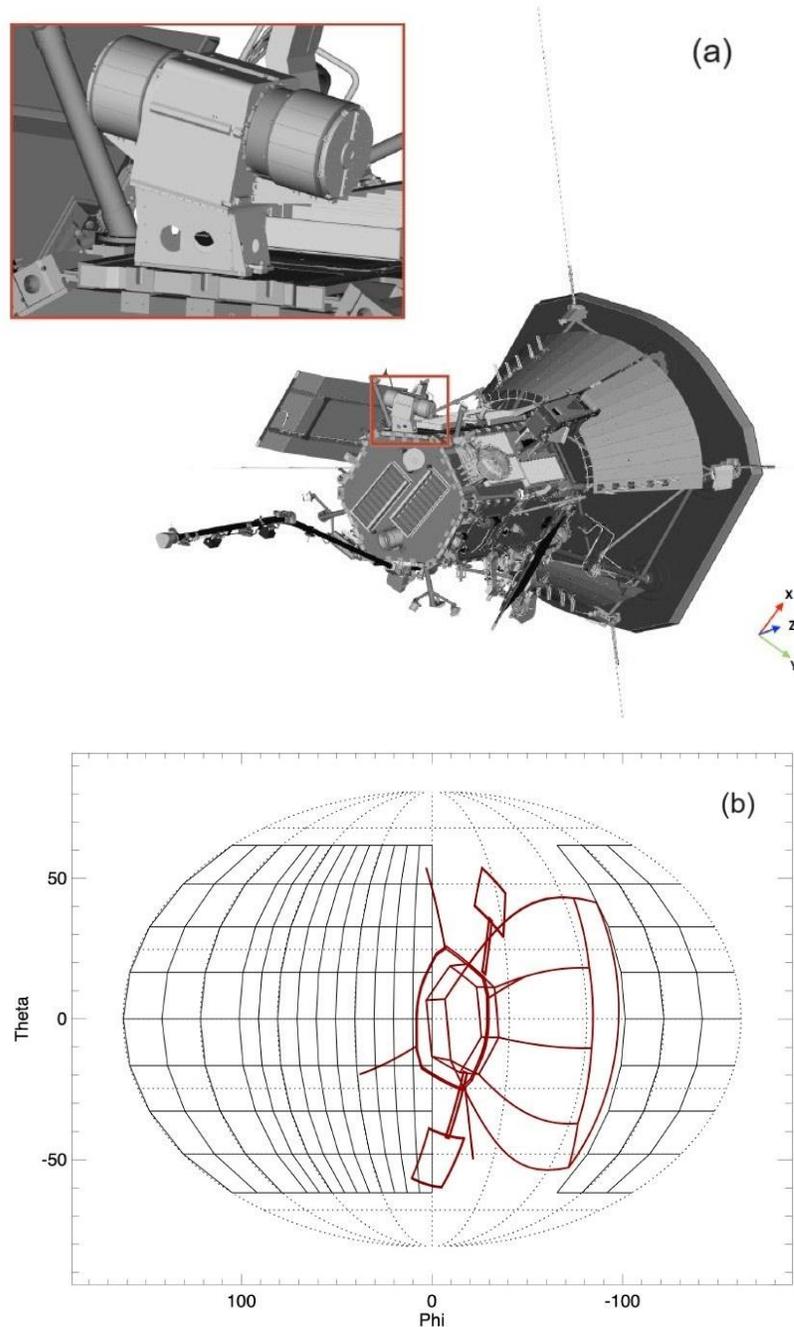
A continuación, en la [Figura 3.19](#) inciso (a) se muestra el SPAN-A, colocado con una rotación de  $20^\circ$  alrededor del eje Z de la nave espacial, y su montura en relación con la sonda. En el inciso (b) el FOV de SPAN-Ai resultante, considerando la obstrucción, en rojo, por la nave espacial y su escudo térmico.

Tanto los sensores de iones como los de electrones utilizan detectores de placas de microcanales (*MicroChannel Plate*, MCP) para el recuento de partículas en los ánodos. La cantidad de partículas en cada ánodo se acumulan en contadores que se leen cada 0.5 ms. Para su contabilización se utiliza un preamplificador multicanal ASIC desarrollado por el *Laboratoire de Physique des Plasmas* para la misión Solar Orbiter ([Müller et al., 2020](#)). El sensor de iones también utiliza este módulo para determinar la masa de los iones por carga ( $m/q$ ).

Las fuentes de poder de bajo y alto voltaje son muy similares a las usadas en las misiones FAST ([Carlson, Pfaff & Watzin, 1998](#)), THEMIS ([Sweetser et al., 2011](#)) y MAVEN ([Jakosky et al., 2015](#)), que también emplean analizadores electrostáticos. Los sensores incluyen un mecanismo para

reiniciar la memoria de forma manual (*Shape Memory Alloy*, SMA) después del lanzamiento, para evitar la contaminación de los detectores MCP electrostáticos ([Kasper et al., 2016](#)).

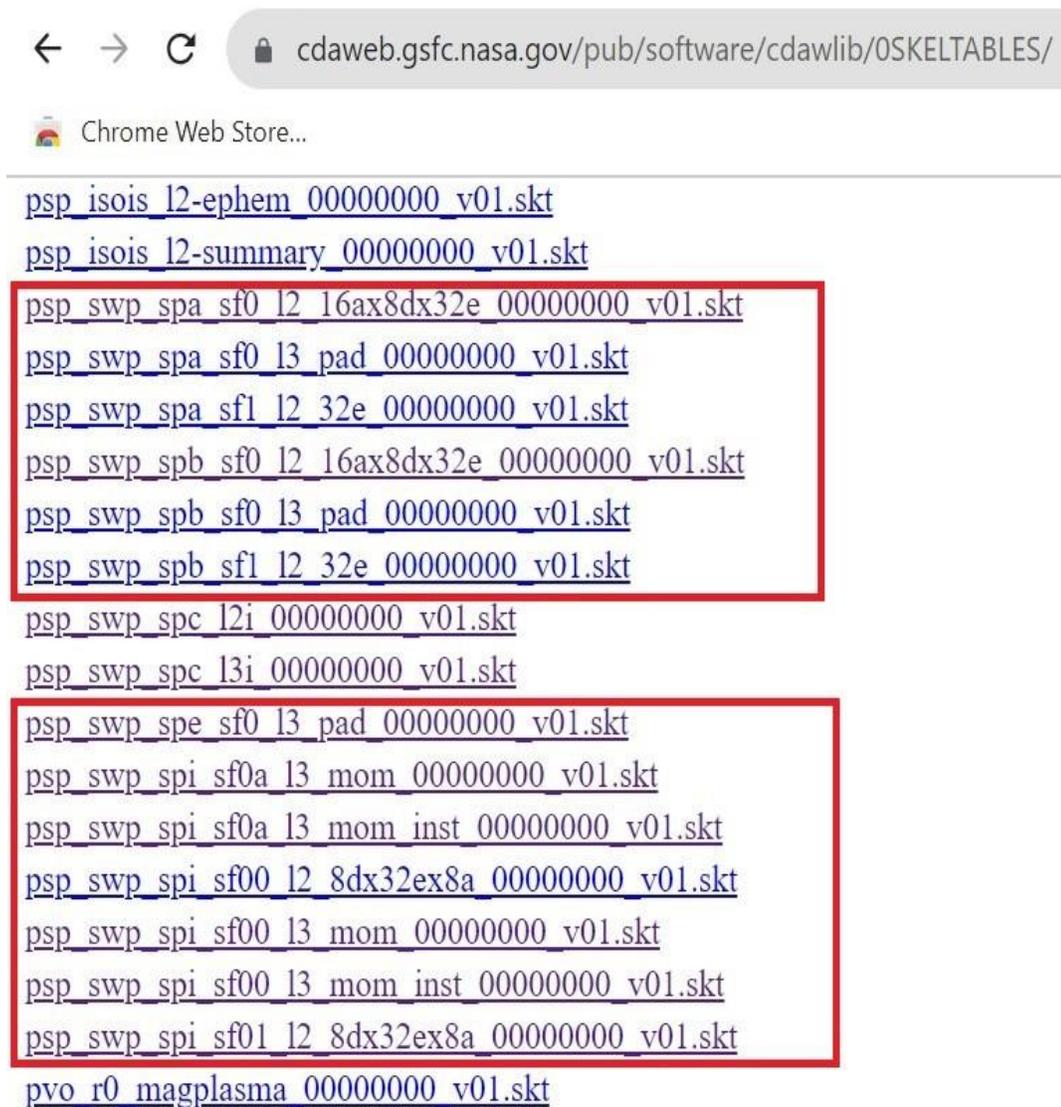
**Figura 3.19** Vista SPAN-A y FOV del SPAN-Ai



(a) Vista lateral y ubicación del SPAN-A. (b) Proyección Mollweide del FOV del instrumento SPAN-Ai. [Livi et al. \(2022, p.4\)](#).

Como el SPAN comprende tres instrumentos, hay varios productos de datos generados por cada uno de ellos y un producto adicional que conjunta los datos de SPAN-Ae + SPAN B en SPAN-E. En el sitio de *Coordinated Data Analysis Web* (CDAWeb) del *Goddard Space Flight Center* de la NASA, se puede obtener los datos, además de una descripción de los mismos. Cómo se puede ver en la [Figura 3.20](#), hay 6 productos de datos a nivel L2 y 7 a nivel L3. A continuación, se presentará una breve descripción de éstos.

**Figura 3.20** Productos de datos de la PSP, SWEAP



Listado obtenido de <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/pub/software/cdawlib/OSKELTABLES/>.

### SPI LEVEL 2 DATA, PROTON & ALPHA 3D SPECTRA

Los dos productos principales para el SPAN-Ai son **SF00** y **SF01**. Contienen las distribuciones 3D de protones y partículas  $\alpha$ , respectivamente. La letra **S** es de survey. La **F** indica full, barrido completo sobre los niveles de E/q. El primer dígito nos dice el tipo de datos y el segundo se refiere a qué partículas se está observando: **0** para protones, **1** para partículas  $\alpha$ , **2** para partículas con una razón m/q mayor y **3** para masas más pesadas.

Nombre de archivo: [psp swp spi sf00 l2 8dx32ex8a YYYYMMDD vXX.cdf](#)  
[psp swp spi sf01 l2 8dx32ex8a YYYYMMDD vXX.cdf](#)

Variables: Serie de tiempo, niveles de energía, ángulos de elevación y de acimut ( $\theta$ ,  $\phi$ ), radiancia por deflector, energía y ánodo (8Dx32Ex8A).

### SPAN-E LEVEL 2, FULL 3D ELECTRON SPECTRA DATA

En los productos **SFO** se comparte los espectros de electrones de cada instrumento, ya sea para el SPAN-Ae o el SPAN-B.

Nombre de archivo:

[psp swp spa sf0 L2 16Ax8Dx32E YYYYMMDD vXX.cdf](#),  
[psp swp spb sf0 L2 16Ax8Dx32E YYYYMMDD vXX.cdf](#)

Variables: Serie de tiempo, niveles de energía, ángulos de elevación y de acimut, radiancia por ánodo, deflector y energía (16Ax8Dx32E).

### SPAN-E LEVEL 2, ELECTRON ENERGY SPECTRA DATA

En los productos **SF1**, se proporciona el espectro de energía global por instrumento para cada nivel de energía.

Nombre de archivo: [psp swp spa sf1 L2 32E YYYYMMDD vXX.cdf](#),  
[psp swp spb sf1 L2 32E YYYYMMDD vXX.cdf](#)

Variables: Serie de tiempo, niveles de energía, radiancia por nivel de energía (32E).

### **SPI LEVEL 3 DATA, PROTON & ALPHA DISTRIBUTION FUNCTION (instrument frame)**

*Este producto contiene mediciones parciales de la función de distribución de protones (SF00) y partículas  $\alpha$  (SF0A) en el marco de referencia del instrumento (INST).*

Nombre de archivo: [psp swp spi sf00 l3 mom inst YYYYMMDD vXX.cdf](#)  
[psp swp spi sf0a l3 mom inst YMMDDDD vXX.cdf](#)

Variables: Serie de tiempo, niveles de energía, ángulos de elevación y de acimut, densidad, velocidad, tensor de temperatura, radiancia por nivel de energía, radiancia por ángulo de elevación, radiancia por ángulo de acimut.

### **SPI LEVEL 3 DATA, PROTON & ALPHA DISTRIBUTION FUNCTION (INST, SC, RTN)**

Este producto contiene mediciones parciales de la función de distribución de protones (SF00) y partículas  $\alpha$  (SF0A) en el marco de referencia del instrumento (INST), de la nave (SC) y el heliocéntrico (RTN).

Nombre de archivo: [psp swp spi sf00 l3 mom YYYYMMDD vXX.cdf](#)  
[psp swp spi sf0a l3 mom YYYYMMDD vXX.cdf](#)

Variables: Serie de tiempo, niveles de energía, ángulos de elevación y de acimut, densidad, velocidad en los tres sistemas de coordenadas, tensor de temperatura en INST, radiancia por nivel de energía, radiancia por ángulo de elevación, radiancia por ángulo de acimut, posición de la sonda versus el Sol y Venus, velocidad de la sonda en coordenadas RTN, campo magnético en coordenadas INST y SC.

### **SPAN-E LEVEL 3, PITCH ANGLE DISTRIBUTION DATA: PADS**

Este producto contiene mediciones de la distribución de electrones versus el ángulo de campo para el SPAN-Ae y SPAN-B. Estas distribuciones están en función de la dirección del campo magnético. Los ángulos de  $0^\circ$  están alineados con el vector del campo magnético, y los ángulos de  $180^\circ$  son antiparalelos al campo magnético. Los datos se muestrean en 12 intervalos de  $15^\circ$  de ancho, para cubrir de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ .

Nombre de archivo: [psp swp spa sf0 l3 pad YYYYMMDD vXX.cdf](#),

[psp swp spb sf0 l3 pad YYYYMMDD vXX.cdf](#)

Variables: Series de tiempo, niveles de energía, ángulo de campo **PA**, ángulos de elevación y de acimut en SC, radiancia por **PA** y energía, espectrograma de la radiancia por energía y **PA**, espectrograma de la radiancia por **PA** y energía, radiancia por nivel de energía, radiancia por ángulo de acimut y energía, radiancia por ángulo de elevación y energía, campo magnético en coordenadas *INST* y *SC*.

Nombre de archivo: [psp swp spe sf0 l3 pad YYYYMMDD vXX.cdf](#)

En el archivo **spe** se conjunta la información de ambos sensores (SPAN-A, **spa** y SPAN-B, **spb**).

Variables: Series de tiempo, niveles de energía, ángulo de campo **PA**, radiancia por energía y **PA**, radiancia por nivel de energía, campo magnético en coordenadas *SC*.

### 3.3 ILT

El *International LOFAR Telescope (ILT)* inició como un proyecto nacional de los Países Bajos por el *Netherlands Institute for Radio Astronomy*, ASTRON, a principios de siglo XXI en Dwingeloo y fue nombrado como el *Low Frequency Array*, conocido por el acrónimo de **LOFAR**. Este es el radiotelescopio más grande que opera a bajas y muy bajas frecuencias, de 10-250 MHz ([Van Haarlem, 2013](#)).

Institutos e investigadores extranjeros se sumaron a este proyecto y solicitaron construir una o más estaciones de antena LOFAR en sus países. En el 2010 se consolidó con los otros países y pasó a ser el ILT, ver [Figura 3.21](#). El arreglo está constituido, en 2024, de 38 estaciones en los Países Bajos, 6 estaciones en Alemania, 3 estaciones en Polonia y de una estación en los países de Francia, Irlanda, Letonia, Suecia, Reino Unido, Italia y Bulgaria.

**Figura 3.21** Red de estaciones que conforman el ILT

Imagen tomada de <https://www.astron.nl/telescopes/lofar/>.

Tiene como objetivo explorar el universo en el espectro radioeléctrico con frecuencias desde 10 MHz hasta 8 GHz. El ILT no es un instrumento dedicado al 100% a observaciones de CIP, se programan campañas de observación durante los perihelios de la PSP. Usan el método de correlación cruzada entre estaciones y de una estación para medir velocidades de VS. En el MEXART se emplea la misma metodología empleada por el ILT para obtener el índice de centelleo  $g$ , aunque con muchas más observaciones obtenidas durante el año (Jackson *et al.*, 2022).

Se denomina *superterp* al núcleo central de antenas ubicado cerca de Exloo, [Figura 3.22](#).

**Figura 3.22** Vista aérea del núcleo central LOFAR



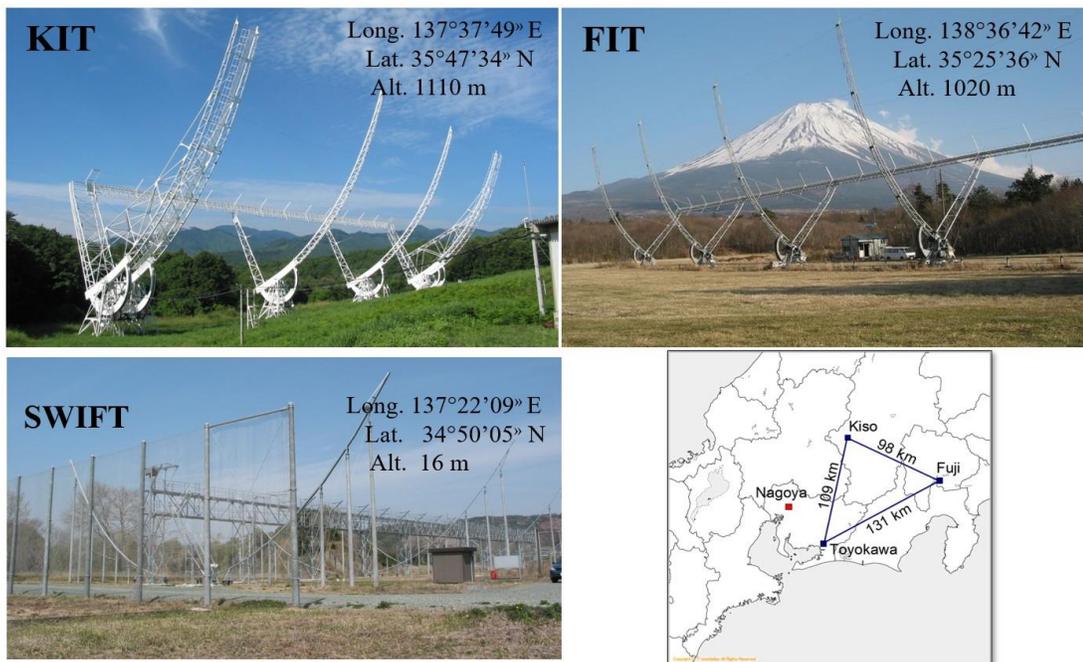
Imagen tomada de [ASTRON \(2020, p.36\)](#).

### 3.4 ISEE

El [Institute for Space-Earth Environmental Research](#) (ISEE) de Nagoya University, opera desde 1990, inicialmente nombrado como el *Solar Terrestrial Environment Laboratory* (STEL)<sup>24</sup>, empleaba un arreglo de cuatro radiotelescopios en UHF, localizados en Toyokawa, Fuji, Sugadaira y Kiso. El de Sugadaira ya no está activo.

Las antenas son del tipo reflectoras parabólicas cilíndricas asimétricas, [Figura 3.23](#), con una frecuencia de observación de 327 MHz y un ancho de banda de 10 MHz. La apertura física del Kiso IPS Telescope, KIT ([Asai et al., 1996](#)) es de 74 m E-O, 27 m N-S. El Fuji IPS Telescope, FIT ([Asai et al., 1995](#)) tiene una apertura de 100m E-O, 20 m N-S. El de Toyokawa, el *Solar Wind Imaging Facility Telescope*, SWIFT ([Tokumaru et al., 2011](#)) tiene una apertura de 40 m E-O, 108 m N-S.

**Figura 3.23** Radiotelescopios de UHF del ISEE y ubicación



Imágenes adaptadas de [https://stsw1.isee.nagoya-u.ac.jp/uhf\\_ant-e.html](https://stsw1.isee.nagoya-u.ac.jp/uhf_ant-e.html).

<sup>24</sup> Renombrado el 1 de octubre del 2015.

El ISEE está dedicado mayormente a observaciones de CIP, empleando, como en el ILT ambas metodologías, la de varias estaciones, (KIT, FIT, SWIFT), y de una estación. Siguen el mismo método para la obtención de los índices  $g$  que en el ILT y MEXART.

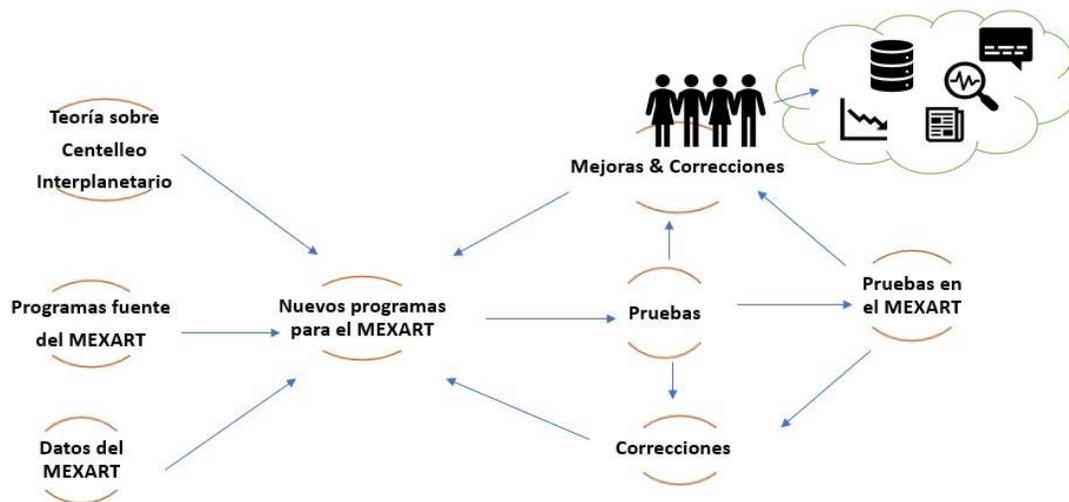
ILT, ISEE y MEXART son parte de los observatorios que han convenido en generar el formato unificado de resultados de CIP, el formato WIPSS.

El fin principal de esta tesis es procesar las observaciones de CIP del nuevo *back-end* digital, años 2020 al 2023, con el lenguaje de programación Python. Además, obtener resultados del ILT, ISEE y PSP para hacer un análisis en conjunto de ellos, tomando como base los días de campaña para la observación de la PSP por ILT. E identificar como se pueden complementar o comparar los instrumentos.

Para el análisis de CIP en el MEXART con el *back-end* analógico se desarrolló software en IDL. En esta tesis, se implementan nuevas rutinas, se actualizan y complementan otras, generándose por primera vez los formatos WIPSS anuales para el MEXART del 2020 al 2023.

Para el desarrollo de los programas del MEXART se siguió el procedimiento ilustrado en la [Figura 4.1](#).

**Figura 4.1** Diagrama del proceso de desarrollo de software del MEXART

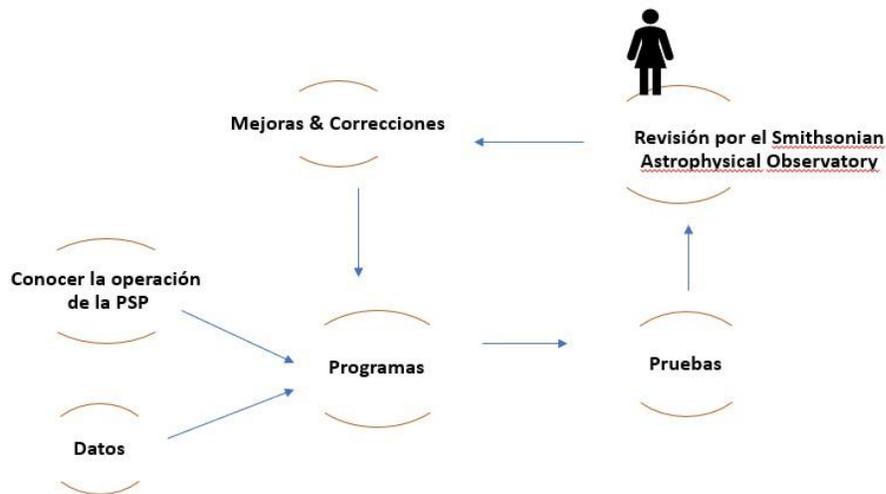


Esta metodología consiste en: (1) adquirir las bases teóricas, los programas fuentes en IDL y datos de prueba a procesar, (2) desarrollar el software, (3) realizar pruebas con un número reducido de datos, (4) hacer pruebas de campo; es decir, ejecutando los programas en el servidor del

observatorio, (5) identificar y corregir los errores, (6) recibir retroalimentación de los usuarios del MEXART, LANCE y UNAM, y colaboradores de la UCSD e ILT, (7) implementar las correcciones y mejoras sugeridas al programa y/o crear nuevas rutinas.

Para la PSP, se siguió el procedimiento presentado en la [Figura 4.2](#).

**Figura 4.2** Diagrama del proceso de desarrollo de software de la PSP



Esta metodología consiste en: (1) aprender sobre la operación general de la sonda y los sensores SPC y SPAN-Ai, (2) obtener los productos de datos requeridos, (3) desarrollar los programas, (4) hacer pruebas, (5) validar resultados con la Dra Niembro del Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO), (6) tomar en cuenta sus correcciones y sugerencias para hacer cambios.

Para el ILT e ISEE, [Figura 4.3](#), sólo fue necesario solicitar o bajar los archivos WIPSS. Los resultados del ILT, los solicité a la Dra. Chang del RAL. El ISEE pone a disposición de la comunidad científica de CIP sus datos mediante la página de <https://stsw1.isee.nagoya-u.ac.jp/vlist/>.

En las secciones a continuación se detallan los programas creados para el radiotelescopio MEXART, la sonda Parker Solar Probe y los programas para conjuntar la información de los tres radiotelescopios y la PSP.

**Figura 4.3** Diagrama de proceso para el ILT e ISEE

## 4.1 Implementación para el MEXART

De acuerdo al programa de observaciones del MEXART, alrededor de 35 radiofuentes son registradas diariamente, con duraciones de entre 3 a 8 minutos. Las señales captadas por el arreglo completo de dipolos son conjuntadas, amplificadas y filtradas en varias etapas llegando al *back-end* que las procesa y almacena las observaciones en archivos HDF5. Dichos archivos son la entrada del programa *multiclean.py*, que canal por canal mitiga las radio interferencias, obtiene la potencia total al sumar los canales y guarda la información en archivos ASCII con extensión DAT e imágenes de graficas.

A los archivos HDF5 con la información de los 2 haces sintéticos y 512 canales con un tamaño de 100 a 200 MB, se les extrae información que genera almacenamiento de 0.5 a 1 MB, que corresponde a la potencia total (serie de tiempo total) tanto de los datos crudos como filtrados en archivos de texto ASCII. Estos archivos ASCII son la entrada del programa *auto-mexart.py* y es aquí donde usando el modelo del espectro de potencias se obtiene un estimado de varios de los parámetros del viento solar, entre ellos la velocidad; además, se obtiene el índice de centello *m* y se añade una entrada por radiofuente en un archivo WIPSS diario.

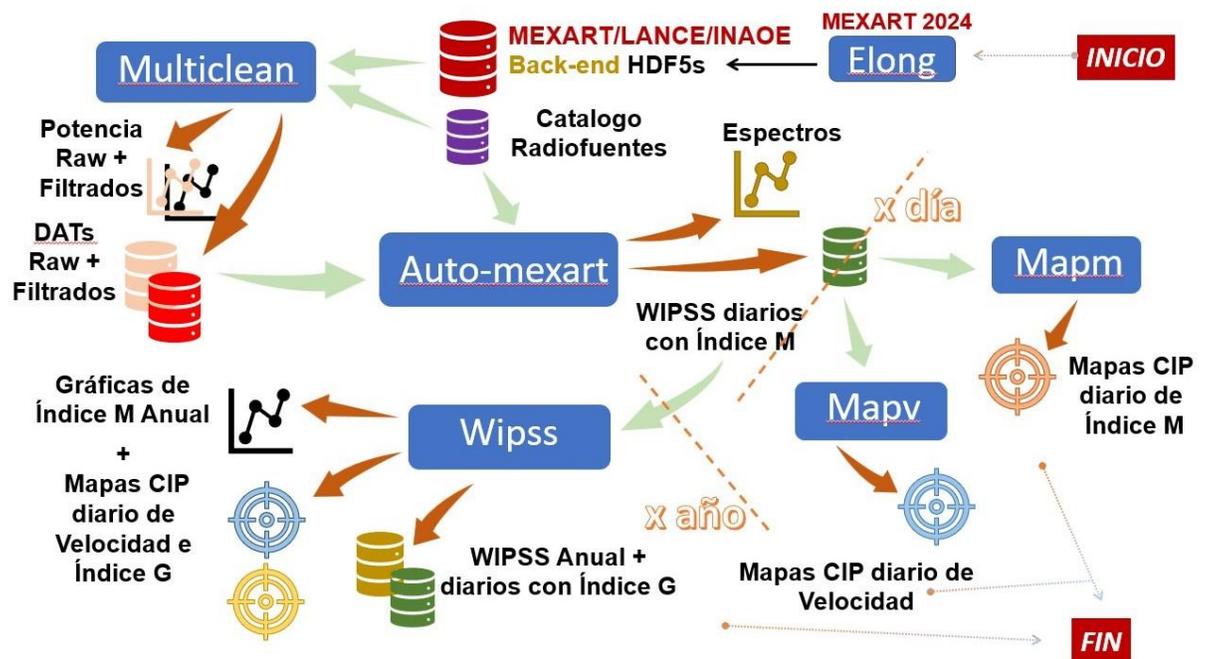
Tomando la información de los formatos WIPSS de algún período, ya sea de uno o varios días, se ejecutan los programas *mapv.py* y *mapm.py* para generar los mapas diarios de CIP con los valores de la velocidad del VS y del índice *m*, respectivamente.

Para el cálculo del índice  $g$ , se analizan los archivos WIPSS diarios de un año completo, para estimar el índice por radiofuente, obtener el archivo WIPSS anual y los nuevos WIPSS diarios con el índice  $g$  mediante el programa *wipss.py*. Además, también se generarán los mapas de centelleo con sus valores de velocidad e índice  $g$ .

Se añadió la rutina *elong.py* en el 2024 para auxiliar en la programación de las observaciones en base al ángulo de elongación y su ascensión recta.

Una característica común implementada en todos los programas es el registro en consola y en disco de las operaciones que se van llevando a cabo. Un esquema de la interacción entre los programas del MEXART y sus archivos de entrada & salida se muestra en la [Figura 4.4](#).

**Figura 4.4** Componentes del sistema para el MEXART



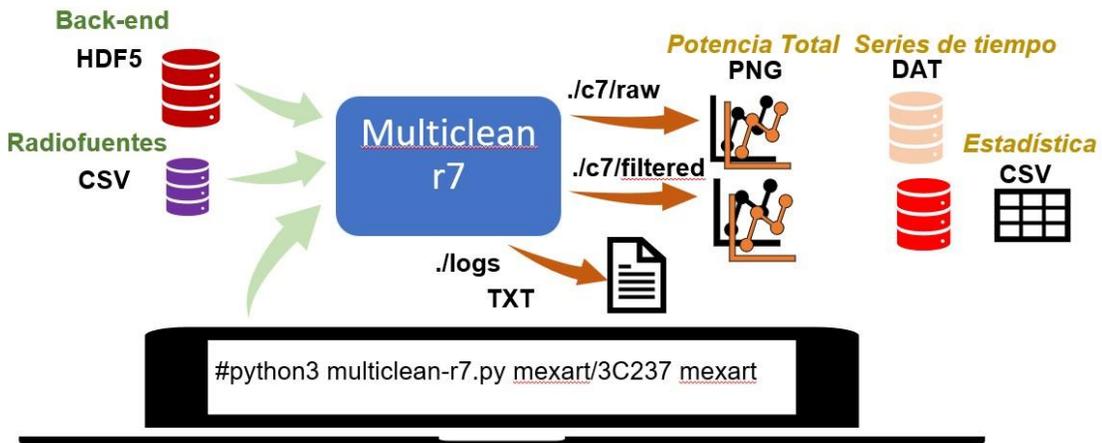
En los siguientes apartados, se explicará cómo ejecutar cada uno de los programas y qué es lo que hacen. Los programas en Python usan extensión *py* que, por simplicidad, se omitirá a continuación al referirse a cada uno de ellos.

### 4.1.1 Adquisición de series de tiempo

Con un programa nombrado *multiclean* se extrae la información de los archivos HDF5, se obtiene, se gráfica y almacena la potencia total del haz elegido, sumando los 512 canales. Posteriormente, se analiza y se limpia las series de tiempo por canal bajo la técnica propuesta por [Barón \(2024\)](#), y de igual forma se obtiene, se gráfica y almacena la potencia total filtrada, que es la suma de los canales limpios.

El programa está configurado para que en la línea de comandos se especifique uno o varios archivos a procesar o carpeta, pero no se limitó la cantidad ni de archivos ni de carpetas. Esto con la finalidad de que puedan ser procesados conforme lleguen por hora, día o algún otro período en particular. En la [Figura 4.5](#), se muestra un diagrama de proceso donde se especifica los archivos de entrada, las carpetas de salidas, tipo de información generada y un ejemplo de ejecución, indicando en primer lugar en dónde se encuentra la información a analizar y en segundo dónde se desea que escriba los resultados.

**Figura 4.5** Componentes del sistema para *multiclean*



Para obtener la lista de archivos HDF5 a procesar, se emplean dos comandos claves que son: *os.path.join* y *glob.glob*. Empleando el comodín `***` en el primero para formar paths válidos y en el segundo especificando *recursive=True* para realizar una búsqueda recursiva con dicho patrón.

El catálogo de fuentes de radio es un archivo de texto donde los campos están separados por comas, ver [Figura 4.6](#). Este fue creado en Excel y salvado con el formato de CSV (delimitado por comas).

**Figura 4.6** Vista parcial del catálogo de radiofuentes

	A	B	C
1	name	ra_dec	flag
2	3C002/3C02	000622-000424	y
3	TYCHO/3C010	002514+640842	n
4	3C026	005408-033355	y
5	3C043/3C43	012959+233820	y
6	3C048/3C48	013741+330935	y
7	3C067/3C67	022412+275011	y
8	3C071/3C71	024240-000047	y
9	3C084/3C84	031948+413042	y
10	3C089	033415-011056	y

El archivo posee tres campos: (a) nombre(s), (b) ascensión recta y declinación, (c) bandera. En el primer campo se permite el uso de uno o dos nombres, porque hay algunas fuentes que fueron registradas de una o de otra manera como, por ejemplo: **3C043** y **3C43**, **TYCHO** y **3C010**. Se emplea la diagonal “/” para separar ambos nombres dado que la “,” se empleará para separar los campos. Para la ubicación de las fuentes se escribe de forma contigua **RA** y **DEC**, separados por el “+” o “-” de su declinación, en el formato de horas, minutos, segundos para **RA** (**hhmmss**) y grados, minutos y segundos para **DEC** (**ggmmss**). Finalmente, la bandera se emplea para discriminar los objetos celestes y definir cuáles serán observadas para CIP y cuales no, como **Cygnus**, **Hércules**, etc.

Pasando ahora a la lectura de los datos, el formato HDF5 permite almacenar grandes cantidades de datos heterogéneos, organizados en forma jerárquica mediante metadatos para manipularlos fácilmente. Existen en la

actualidad diferentes implementaciones para el manejo de ellos, y en particular se usó el paquete H5PY (HDF5 for Python)<sup>25</sup>.

Para abrir el archivo, equivalente a la instrucción *open* de IDL, es el comando *h5py.File(filename, "r")*, que al asignarlo a una variable apuntará al inicio del archivo. Para cerrarlo, es de la forma convencional con *variable.close()*. Para conocer la estructura del archivo y poder acceder a sus metadatos se emplea el comando *list* y atributo *items* de nuestra variable, de la manera que está ilustrada en la [Figura 4.7](#).

Con el primer comando se abre el archivo para lectura y con el segundo se obtiene la jerarquía inicial e informa que cuenta con dos metadatos: *observation\_data* y *observation\_info*. El primero a su vez posee dos metadatos *integrated\_beams* y *timestamps*; y el segundo, un único metadato con nombre *beam\_pointings*. La instrucción nos regresa su estructura y clase. Todos poseen números flotantes de 4 bytes, *integrated\_beams* es un arreglo de 2 x 512 x 25088 elementos, *timestamps* contiene 196 números y *beam\_pointings* es un arreglo de 2 x 2 elementos.

**Figura 4.7** Acceso y metadatos de un archivo HDF5

```
In [19]: f = h5py.File("beam_20200604_182126.hdf5", "r")

In [20]: list(f.items())
Out[20]:
[('observation_data', <HDF5 group "/observation_data" (2 members)>),
 ('observation_info', <HDF5 group "/observation_info" (1 members)>)]

In [21]: list(f['/observation_data'].items())
Out[21]:
[('integrated_beams',
 <HDF5 dataset "integrated_beams": shape (2, 512, 25088), type "<f4">),
 ('timestamps', <HDF5 dataset "timestamps": shape (196,), type "<f4">)]

In [22]: list(f['/observation_info'].items())
Out[22]: [('beam_pointings', <HDF5 dataset "beam_pointings": shape (2, 2), type "<f4">)]
```

Para conocer los atributos y valores de *observation\_data* y *observation\_info* se emplea también la función *list*, pero listando los atributos

<sup>25</sup> Sitio: <https://www.h5py.org/>. Documentación en: <https://docs.h5py.org/>

de un metadato en particular mediante *attr.keys* y *attrs.values*, de la manera mostrada en la [Figura 4.8](#).

**Figura 4.8** Lista de atributos y valores de un metadato en HDF5

```
In [32]: data = f['/observation_data']
In [33]: list(data.attrs.keys())
Out[33]: []
In [34]: list(data.attrs.values())
Out[34]: []
In [35]: info = f['/observation_info']
In [36]: list(info.attrs.keys())
Out[36]:
['channel_bandwidth',
 'nof_beams',
 'nof_channels',
 'observation_start_time',
 'sampling_time',
 'scanning_beam_source',
 'start_frequency']
In [37]: list(info.attrs.values())
Out[37]: [0.0244140625, 2, 512, 1591294869.20915, 0.02097152, '3C119', 133398437.5]
```

En particular, *observation\_data* no cuenta con atributos, pero *observation\_info* sí, en éste nos proporciona el nombre de la radiofuente y los datos necesarios para reconstruir la serie de tiempo y de frecuencia, mediante: la hora de la primera observación en *timestamp*, el tiempo de muestreo en segundos, la frecuencia inicial en Hz, el número de haces y canales y el ancho de banda de cada canal en MHz.

En *integrated\_beams* es donde se encuentra la información de los 2 haces, 512 canales y, en este caso, 25,088 mediciones de potencia por canal para cada haz. Para acceder al primer haz sería como se ilustra en la [Figura 4.9](#) y para el segundo haz se accede con *dataset[1]*.

**Figura 4.9** Accediendo a las mediciones del back-end

```
In [45]: dataset = f["/observation_data/integrated_beams"]
In [46]: beam0 = dataset[0]
In [47]: beam0.shape
Out[47]: (512, 25088)
```

Consiguiendo el acceso a los datos, se suman los 512 canales para obtener la potencia total de la observación. Se graba a disco tanto la serie de tiempo como la potencia en formato ASCII (archivo *\*.dat*). Además, se generan, se despliegan y salvan un par de figuras, la primera corresponde a la potencia total y la segunda es una imagen del haz con sus 512 canales.

Después, se lleva a cabo el filtrado, analizando cada canal mediante percentiles, cuartiles y el rango intercuartil, para evaluar la dispersión y la tendencia central de los datos. según el método y la rutina en Python propuesta por Barón (2024). Para facilitar la manipulación de los arreglos se usa *Pandas*, la cual es una librería de Python especializada para el análisis de datos.

Primeramente, se obtiene el percentil del 90% para cada uno de los canales, almacenándose en un arreglo y en base a este arreglo se buscan los valores fuera del siguiente rango *outliers1* =  $[Q_1 - 1.2 \cdot IQR, Q_3 + 1.2 \cdot IQR]$ , identificando de esta forma los canales que muestran más dispersión en sus mediciones de potencia (alta asimetría). Donde  $Q_1$  es el cuartil del 25%,  $Q_3$  es el cuartil del 75%, y el IQR es el rango intercuartil que equivale a la diferencia entre  $Q_3$  y  $Q_1$ .

Después, para los *outliers1* se obtiene el valor de  $rt = Q_3/\text{mediana}$  y si este valor es  $\geq 5$  el canal completo es *nulificado*; pero si no se da esta condición se identifica, sobre el canal, los valores que caen fuera del rango *outliers2* =  $[Q_1 - 1.5 \cdot IQR, Q_3 + 1.5 \cdot IQR]$  siendo remplazados por la *mediana* de ese intervalo.

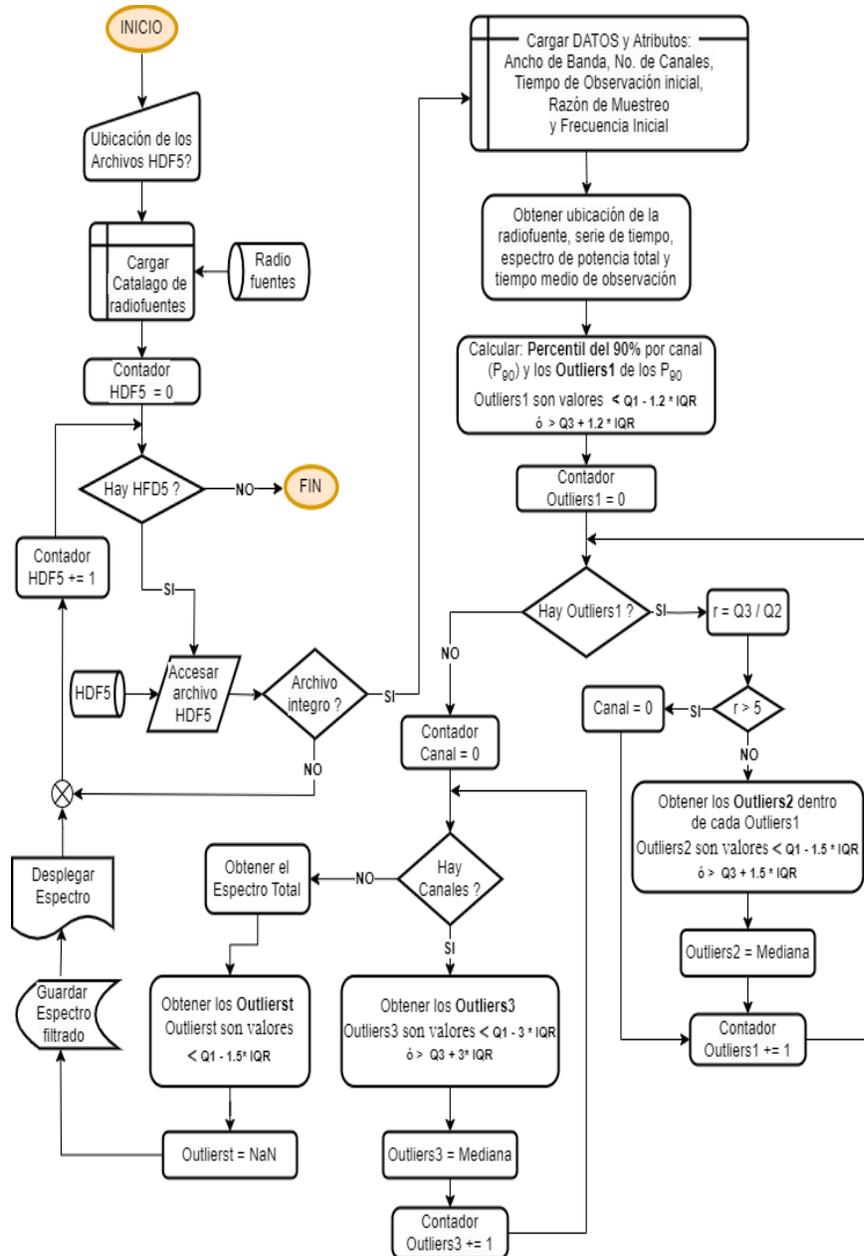
Hecho esto, nuevamente se examina todos los canales para buscar los valores que están al doble de la diferencia anterior; es decir, fuera del rango *outliers3* =  $[Q_1 - 3 \cdot IQR, Q_3 + 3 \cdot IQR]$  y estos son remplazados por la *mediana* de ese intervalo.

Para concluir el proceso de filtrado, se obtiene la potencia total de ese nuevo arreglo y se remplazan por *NaNs* los valores inferiores a *outlierst* =  $Q_1 - 1.5 \cdot IQR$ .

Por último, para la información filtrada, se genera y salva el archivo **DAT**, se generan, despliegan y salvan el par de figuras, la potencia total y la imagen del haz con sus 512 canales.

Repitiéndose este proceso para cada uno de los archivos HDF5. En la [Figura 4.10](#) se muestra un diagrama de flujo de este programa.

**Figura 4.10** Diagrama de flujo del programa **multiclean**

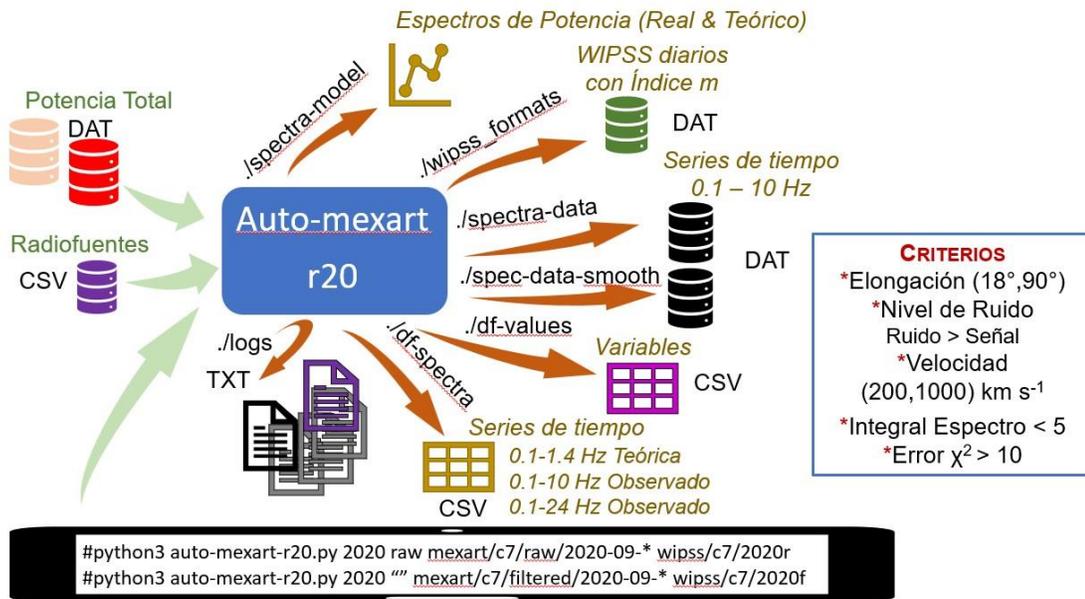


### 4.1.2 Obtención de parámetros del VS y formato WIPSS

El programa nombrado *auto-mexart*, toma las series de tiempo de CIP en formato ASCII y genera el espectro de potencias observado. Ajusta el modelo de la [ecuación \(2.32\)](#) para obtener los parámetros del VS, calcula el índice *m* y genera los formatos WIPSS diarios.

Este programa está configurado para que en la línea de comandos se especifique uno o varios archivos o carpetas a procesar; pero a diferencia del programa anterior, se especifica el año al que pertenecen los archivos, ver [Figura 4.11](#). Esto es requerido porque en el nombre de las carpetas podría no incluir el año, aunque sí en el de los archivos. Se toma en cuenta que la fecha del equinoccio de marzo, permanecerá constante, ocurriendo cada 20 de marzo según los cálculos previstos hasta el 2050 a excepción del 2044 y del 2048 que serán el 19 marzo.

**Figura 4.11** Componentes del sistema para *auto-mexart*



En el diagrama se especifican los archivos de entrada, las carpetas de salidas, tipo de información generada y un ejemplo de ejecución. En el primer ejemplo, se procesará los datos en crudo de septiembre de 2020 y se guardaran los resultados bajo la carpeta wipss/c7/2020r. En el segundo

ejemplo, se procesará los datos filtrados de septiembre de 2020 y se guardaran los resultados bajo la carpeta wipss/c7/2020f.

El catálogo de radiofuentes también es usado aquí y se carga al inicio del programa usando el comando `read_csv` de *Pandas*. Después, obtiene la lista de archivos a procesar validando que sea una fuente usada para CIP.

Simultáneamente, revisa si se encuentra en el catálogo de radiofuentes y si es así, almacena su RA & DEC (ángulos  $\alpha$  y  $\delta$ , ver Figura 2.17), más la fecha del archivo a analizar.

El programa da de alta las variables, algunas de ellas dependientes de la cantidad de días en el año y del número de archivos a analizar. Además, para el Sol se calcula su RA y latitud a lo largo del año.

Se procesa cada archivo; primeramente, se calcula la latitud y ascensión recta aparente del Sol (ángulos  $l$  y  $\theta$ , ver Figura 2.16). A partir de estas cantidades se obtiene la elongación (ángulo  $\epsilon$ ), la latitud heliocéntrica (ángulo  $\gamma$ ), la ubicación aparente de la radiofuente en el limbo este  $E$  u oeste  $O$  y el ángulo principal ( $PA$ ) que es el ángulo con respecto al polo norte del Sol y el punto  $P$ . Esto en base a la [sección 2.2.11](#).

Se extrae la serie de tiempo, correspondiente al tránsito de la fuente y la potencia total. Se valida si hay *NaNs* y de haberlos se remplazan por la media. Se obtiene el tiempo medio de tránsito y se calcula la diferencia de la potencia total y su versión suavizada, para quitar las fluctuaciones de baja frecuencia ( $\sim 0.1\text{Hz}$ ), empleando una ventana de 10 segundos.

Para el suavizado se implementó el algoritmo utilizado por la función *smooth* en IDL:

$$R_i = \begin{cases} \frac{1}{w} \sum_{j=0}^{w-1} A_{i+j-w/2} & \text{si } \frac{w-1}{2} \leq i \leq N - \frac{w+1}{2} \\ A_i & \text{para cualquier otro punto} \end{cases}$$

donde:

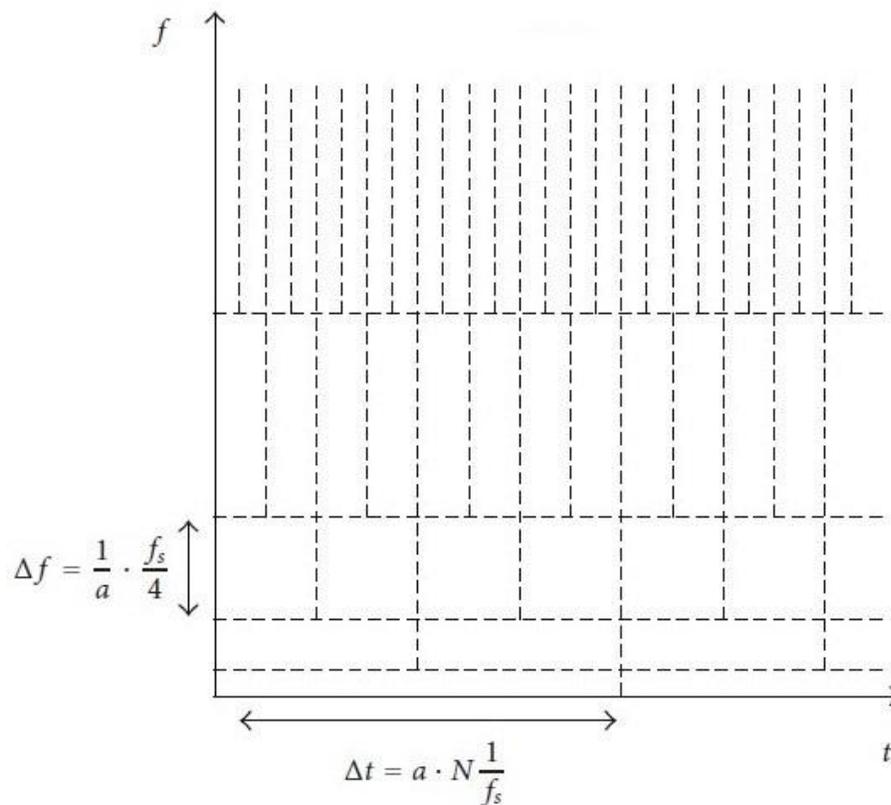
$w$  es el ancho de puntos a suavizar

$N$  el número de elementos del arreglo

Se truncan valores extremos, como el algoritmo de IDL, correspondiente a */edge\_truncate*,  $R_0 = (2A_0+A_1)/3$  y  $R_{N-1} = (A_{N-2}+2*A_{N-1})/3$ .

Para obtener el espectro de potencias se usa la transformada *Wavelet*. Las *wavelets* u ondículas, son las funciones bases empleadas para el análisis de la señal y son generadas, a su vez, a partir de una función *Wavelet* básica o madre, mediante escalamiento y traslación. La transformada permite seccionar una señal en pequeños componentes a diferentes escalas frecuencia-tiempo para analizarse en forma separada, [Figura 4.12](#).

**Figura 4.12** Resolución tiempo-frecuencia para la transformada Wavelet



Donde  $f_s$  es el tiempo de muestreo,  $N$  es el número de muestras,  $a$  es el factor de escalamiento [Chen & Zhu \(2007, p. 4\)](#).

Un rasgo importante, mostrada en la figura, es su no uniformidad en el tiempo y la frecuencia, ajustando las resoluciones al variar la escala  $a$ . Mediante ésta, la wavelet madre se estira o comprime durante la

transformación. A bajas frecuencia cuando la variación es lenta, la resolución en tiempo es gruesa mientras que la resolución en la frecuencia es buena. En el rango de alta frecuencia, cuándo ocurren los cambios rápidos, la resolución en tiempo es pequeña. Permitiendo un seguimiento en la frecuencia y el tiempo.

La expresión matemática de las funciones *Wavelet* es (Chen & Zhu, 2007):

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right),$$

donde: **a** es el factor de escalamiento, **b** es el factor de desplazamiento,  $\Psi$  es la función *Wavelet* madre. La función *Wavelet* madre empleada en el programa es la “**Morlet**”, [Figura 4.13](#), dada por la ecuación:

$$\psi = e^{-t^2/2} \cos(5t).$$

**Figura 4.13** Wavelet Morlet

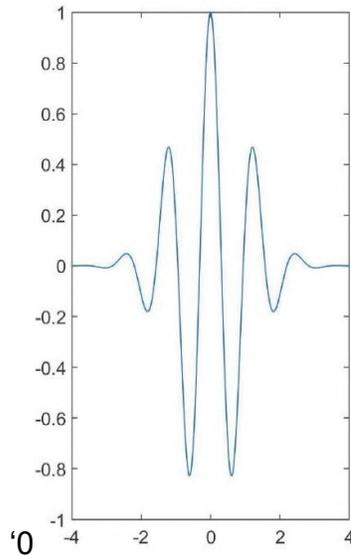


Imagen tomada de [Bassam, et al. \(2021, cap. 3, p. 6\)](#).

Para una función, su transformada *Wavelet* se obtiene como la convolución de dicha función con la función *Wavelet*

$$W\{f(a,b)\} = \langle f, \Psi_{a,b} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \Psi_{a,b}^*(t) dt \quad ,$$

donde los corchetes indican convolución y el asterisco indica la conjugada.

La rutina empleada para el cálculo de la transformada Wavelet en Python fue tomada del mismo sitio que comparte su versión en IDL: <https://paos.colorado.edu/research/wavelets/>.

El programa invoca la rutina *wavelet* con los siguientes valores: (a) *so* factor de escala inicial de 0.04 seg, que es dos veces la razón de muestreo (50 muestras por segundo), (b) *dj* espacio entre escalas de 0.0625 seg, (c) *J* número de factores de escala menos uno, es de 224 (=14/dj). La transformada nos regresa las 225 componentes principales del espectro de potencias Wavelet, las escalas empleadas para cada una de ellas, la serie de tiempo, y el cono de influencia *coi*. El *coi* contiene los tiempos en que el resultado es confiable; es decir, nos especifica hasta donde el resultado no es afectado por los límites de la serie (bordes).

Se calcula el espectro de potencia al integrar en el tiempo la transformada Wavelet al cuadrado y el índice *m*. Para el índice se emplea la [ecuación \(2.7\)](#), en concordancia a la usada por [Jackson, B. V. et al. \(2023\)](#), donde en lugar de usar la media global se le resta el valor esperado del nivel de ruido.

$$m = \sqrt{\int_{f_B}^{f_R} \frac{(P(f) - R)df}{R}}$$

donde:

*P(f)* Espectro de potencias de las series de tiempo de CIP,

*R* Nivel de Ruido

*f<sub>B</sub>, f<sub>R</sub>* Frecuencia Baja y Frecuencia de Ruido.

En la [Figura 4.14](#), se muestra una representación gráfica del área a integrar y sus límites.

Se toma el espectro de potencias de la serie de tiempo en un intervalo de ±1 minuto del tiempo de tránsito. Las frecuencias establecidas para este cálculo son: *f<sub>B</sub>* = 0.3 Hz, *f<sub>R</sub>* = 3 Hz, *f<sub>max</sub>* = 10.17 Hz. Se estima *R* como la

potencia media entre  $f_R$  y  $f_{max}$  para efectuar la integral del espectro. Se incluye un método para identificar espectros con interferencias o con una baja potencia, los cuales son descartados para su análisis.

**Figura 4.14** Espectro de potencia ideal

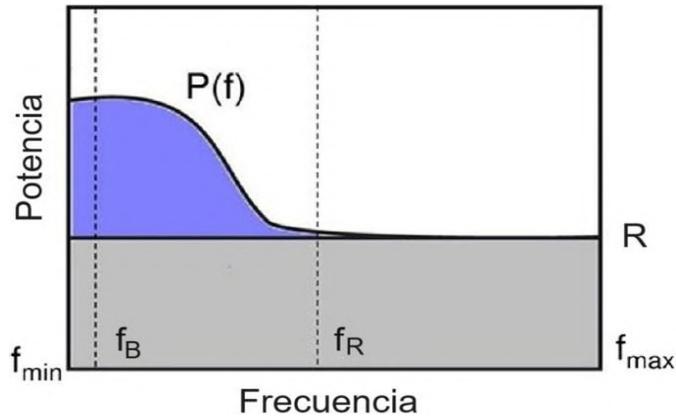


Imagen adaptada de [Jackson et al. \(2023, p. 4\)](#).

Se salvan los niveles de potencia más significativos para el análisis de centello y el espectro suavizado, de 0.099 Hz a 10.17 Hz. Se suaviza la señal y se realiza un ajuste lineal sobre las potencias con frecuencias inferiores a 0.3 Hz.

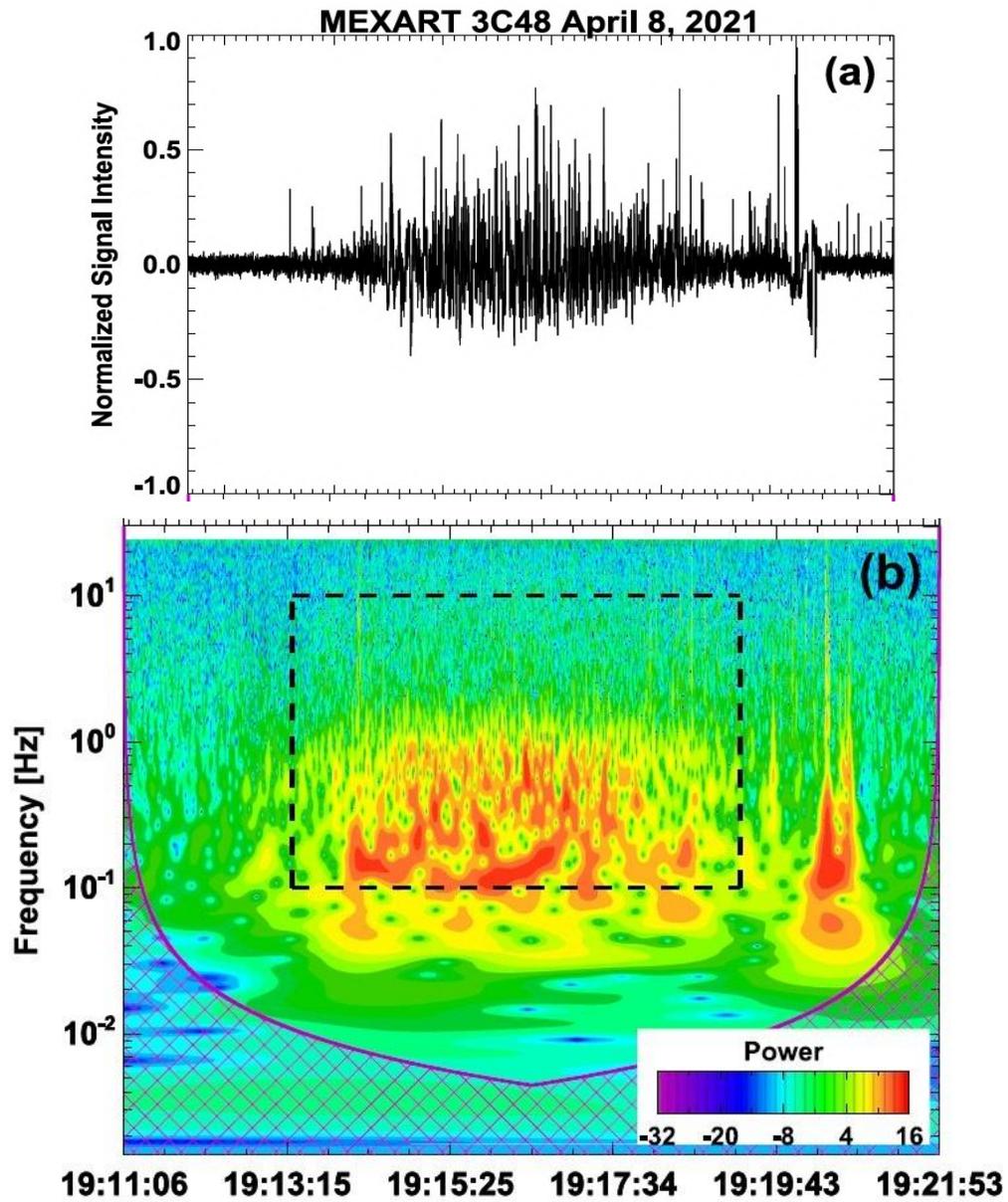
El *auto-mexart* calcula la velocidad del VS haciendo un ajuste por mínimos cuadrados del espectro de potencias teórico ([ec. 2.32](#)) al observado. La integración en  $z$  se realiza en intervalos de  $\Delta z = 0.05$  UA desde 0 hasta 2 UA. La integración en  $q_y$  en pasos de  $\Delta q_y = 1 \times 10^{-3}$  km<sup>-1</sup> desde  $1 \times 10^{-3}$  km<sup>-1</sup> a 0.5 km<sup>-1</sup>. Un ancho angular  $\Theta = 0.2''$  es fijado para todas las radiofuentes.

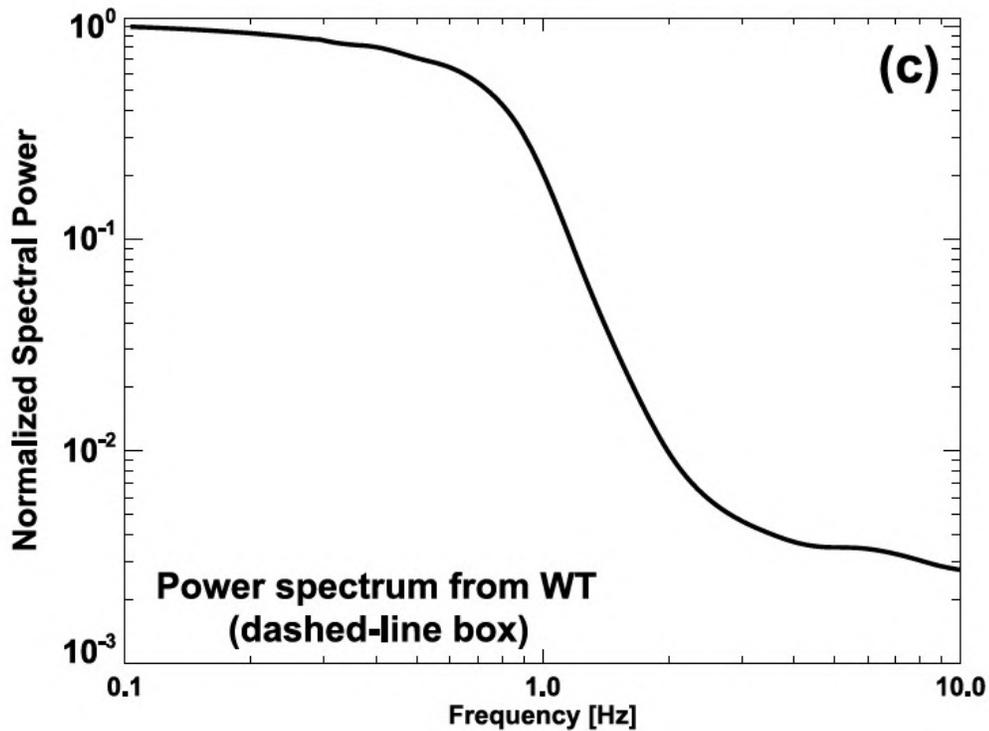
Puede en realidad ajustar uno o varios valores a la vez: el índice  $\alpha$ , la razón axial  $AR$ , el ancho angular  $\Theta$  y la velocidad  $V$ . Los parámetros  $\alpha$  y  $AR$ , son cantidades relacionadas con el nivel de turbulencia y morfología de las irregularidades en el VS.

Un ejemplo de una serie de tiempo correspondiente al tránsito de una fuente de CIP, su transformada Wavelet y el espectro de potencia obtenido se muestra en la [Figura 4.15](#). En este caso el tránsito de la fuente no refleja el

patrón de antena dado que se ha restado ese efecto, sin afectar las fluctuaciones de centelleo.

**Figura 4.15** Resultados del cuásar 3C48, 8/Abr/2021





(a) Serie de tiempo del tránsito de una fuente centellando. (b) Transformada Wavelet mostrando el cono de influencia. (c) Espectro de potencia suavizado obtenido de integrar en el tiempo la transformada wavelet. ([Gonzalez-Esparza, 2022a](#)).

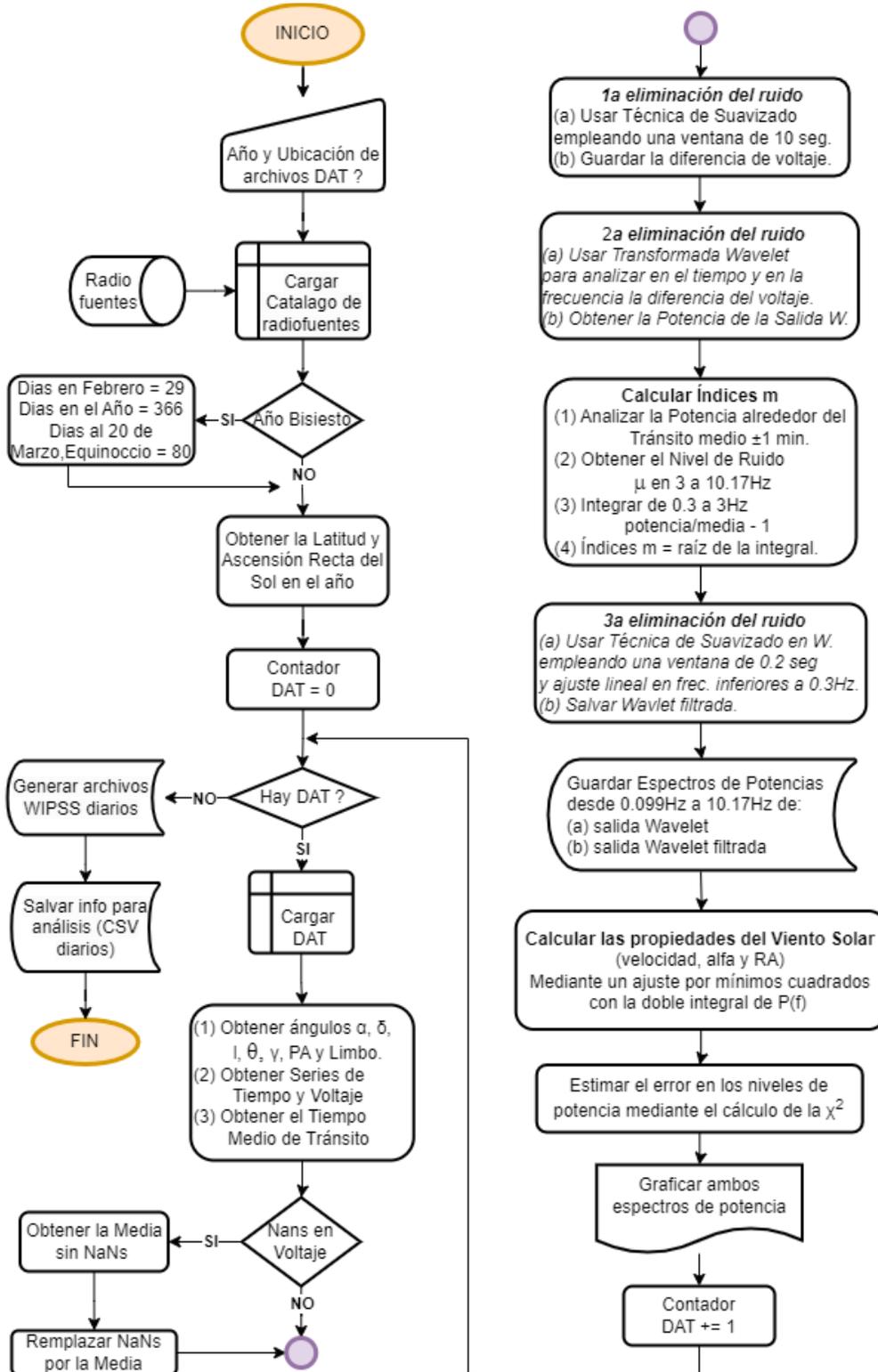
Se obtiene el espectro de potencia teórico con los mejores estimados resultantes del ajuste. Se calcula el error entre los valores reales y el modelo, mediante una prueba  $\chi^2$ . Y se muestran ambos espectros, salvando la gráfica y los datos de ambos espectros de potencia a un archivo CSV en disco duro.

Después de procesarse todos los archivos, se generan los archivos WIPSS diarios que incluirán el estimado de la velocidad del VS y del índice  $m$  más los datos descritos en la [Tabla 2.3](#).

Para finalizar, se salvan por día en archivos **\*.csv** los siguientes datos: (a) fecha, (b) nombre de la radiofuente, (c) su posición (ascensión recta y declinación), (d) la elongación, (e) la latitud heliocéntrica, (f) limbo, (g) ángulo PA, (h) la distancia al punto P, (i) el valor de la integral, (j) los estimados obtenidos para: la velocidad, el índice espectral y la razón axial, (k) el valor de la  $\chi^2$ , y (l) la bandera de condición.

La bandera es un carácter que nos indica si la fuente fue procesada con éxito **K** o no. Será **O** si la elongación está fuera del intervalo ( $18^\circ, 90^\circ$ ). Será **C** si la señal está contaminada; es decir, si el nivel de ruido superior a la potencia,  $\text{integral} < 0$ . O será **R**, si el espectro es rechazado por alguna de las siguientes condiciones: (a) velocidad fuera del rango de ( $200 \text{ km s}^{-1}, 1000 \text{ km s}^{-1}$ ), (b) potencia baja,  $\text{integral} < 5$  ó (c) ajuste no satisfactorio,  $\chi^2 > 10$ . Sólo los espectros con la bandera en **oK** serán graficados y registrados en los formatos WIPSS diarios. Un diagrama de flujo de este programa se muestra a continuación, en la [Figura 4.16](#).

Figura 4.16 Diagrama de flujo del programa **auto-mexart**



### 4.1.3 Cálculo del índice g

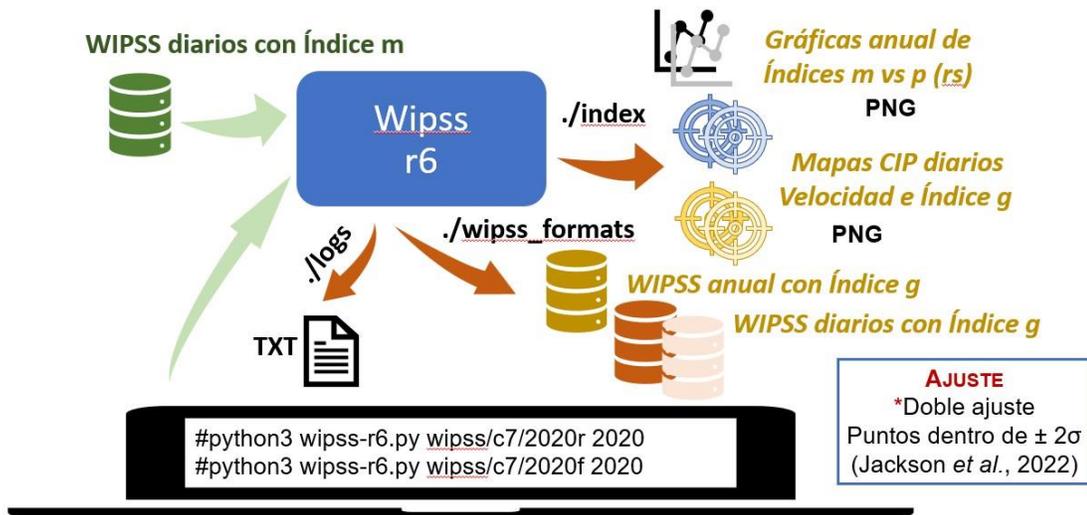
Con un programa llamado *wipss*, a partir de los archivos WIPSS diarios con los índices *m* se obtienen los índices *g* por medio de las [ecuaciones \(2.6\)](#) y [\(2.7\)](#). Donde,  $p = \text{sen}(\epsilon) * 1 \text{ UA}$  es la distancia heliocéntrica al punto *P*, *m<sub>0</sub>* y *b* son constantes

$$\bar{m} = m_0 * p^{-b}, \tag{2.6}$$

$$g = \frac{m}{\bar{m}} \begin{cases} g > 1; \text{Incremento en la densidad del Viento Solar} \\ g = 1; \text{Viento Solar quieto} \\ g < 1; \text{Decremento en la densidad del Viento Solar} \end{cases} \tag{2.7}$$

Para ejecutar este programa se requiere especificar además de dónde tomará la entrada, el año o fecha a analizar, ver [Figura 4.17](#). En el primer ejemplo, leerá los archivos WIPSS con los resultados de los datos en crudo para que en base a éstos generará los índices *g* diarios de todo el año; pero, si se indica una fecha procesará de esa fecha hacia atrás un número definido de archivos que aún está por establecerse por ser un tema de investigación, para luego estimar el índice *g* de ese día. Para el ejemplo se fijó a 90 días, es decir que se procesará ese archivo y 89 más.

**Figura 4.17** Componentes del sistema para *wipss*

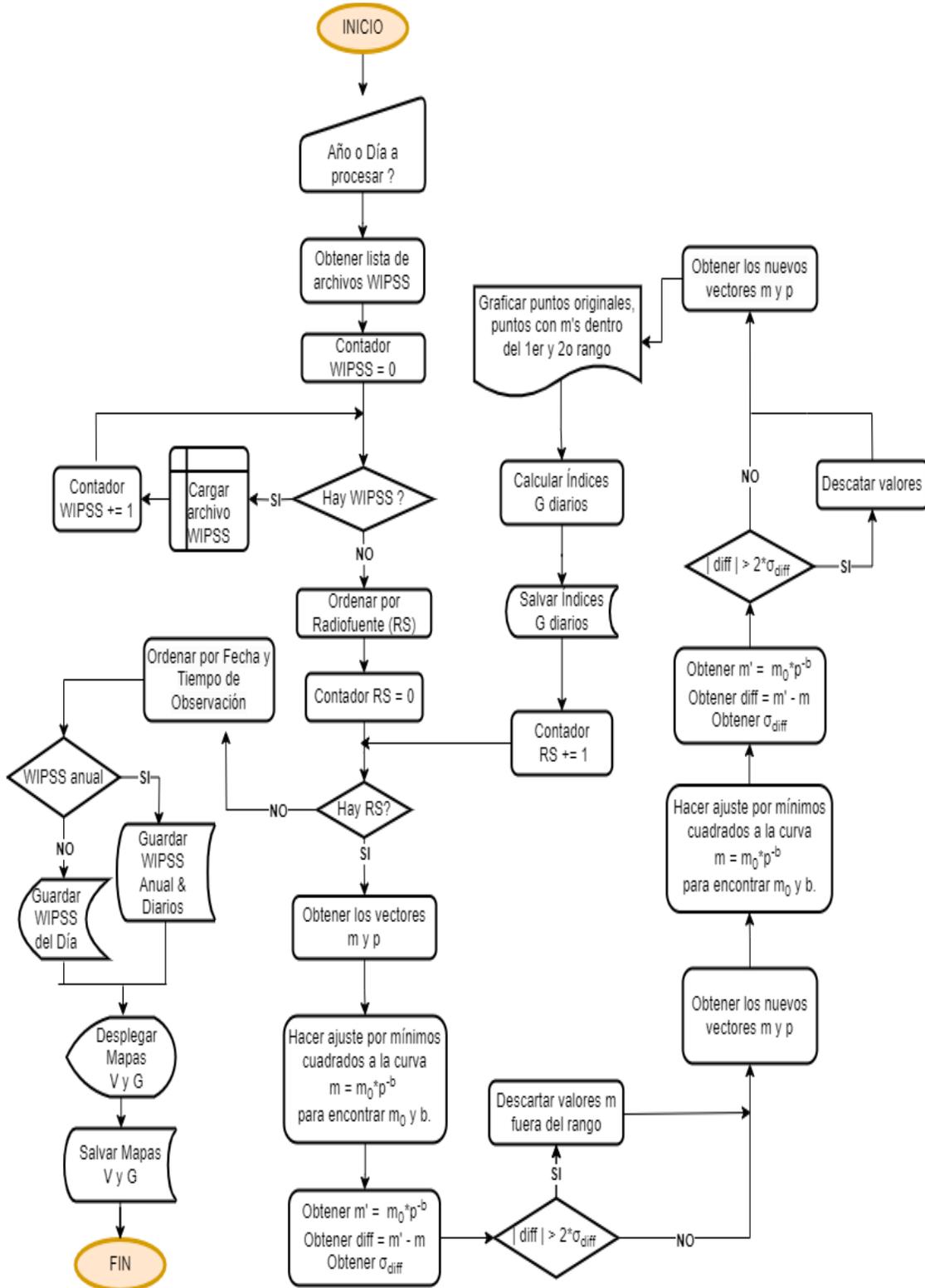


Definidos los archivos por procesar, carga toda la información a memoria, sorteándola por radiofuente, pues los archivos WIPSS diarios vienen organizados por fecha y por tiempo de observación.

A continuación, para cada fuente de radio se hace lo siguiente: (1) un primer ajuste por mínimos cuadrados para determinar un valor inicial para  $m_0$  y  $b$ , (2) obtener el error; es decir, la diferencia entre los valores  $m$  y los obtenidos por la curva  $m=m_0*p^{-b}$  y además su desviación estándar  $\sigma$ , (3) determinar que valores de  $m$  están fuera del rango de  $2\sigma$  y descartarlos, (4) con los puntos que queden, por segunda vez, estimar una nueva  $m_0$  y  $b$ , (5) obtener el error y  $\sigma$ , (6) determinar que valores de  $m$  están fuera del rango de  $2\sigma$  y descartarlos, (7) graficar los valores  $m$  de entrada y las curvas obtenidas de ambos ajustes, (8) calcular los *índices g* y guardar los resultados.

Después de procesar todas las radiofuentes, generará los archivos WIPSS diarios y el anual con los *índices g*, más los mapas diarios de velocidad  $V$  y  $g$  asociados. A continuación, se incluye el diagrama de flujo en la [Figura 4.18](#).

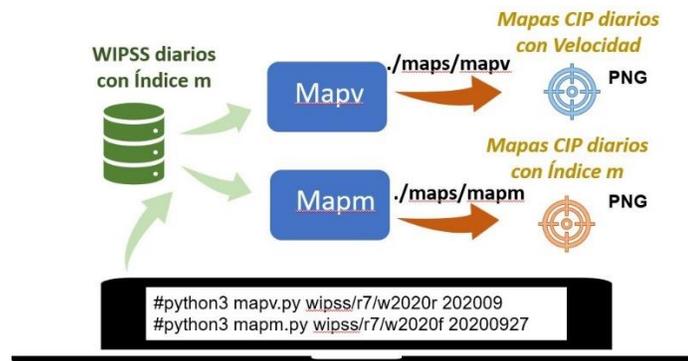
Figura 4.18 Diagrama de flujo del programa **wipss**



#### 4.1.4 Gráficas de mapas de centello

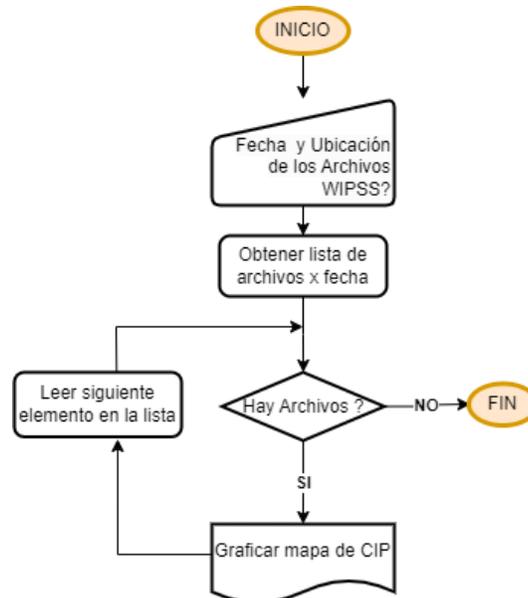
Con los programas **mapv** y **mapm**, [Figura 4.19](#), se generan las gráficas de los mapas de CIP con los valores de la velocidad del VS e índice *m*. Especificando en la línea de comandos la ubicación de los archivos a analizar y la fecha o fechas a analizar. En el primer ejemplo, se solicita graficar todos los de un mes, septiembre 2020. En el segundo, sólo se graficará el mapa del 27 de septiembre de 2020.

**Figura 4.19** Componentes del sistema para **mapv & mapm**



La programación de **mapv** y **mapm** es muy similar, sólo varía el color asignado de las radiofuentes y la escala de valores que se puede obtener. A continuación, en la [Figura 4.20](#), su diagrama de flujo.

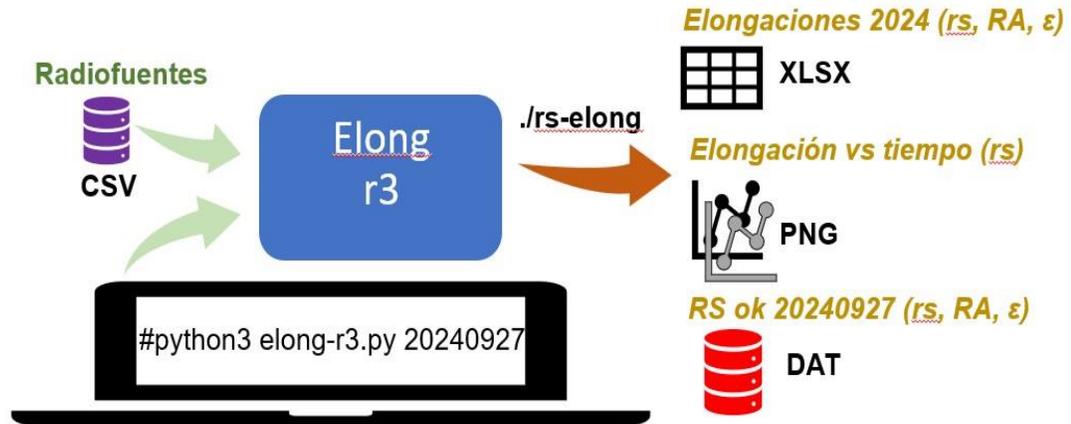
**Figura 4.20** Diagrama de flujo de los programas **mapv & mapm**



### 4.1.5 Programación de las observaciones

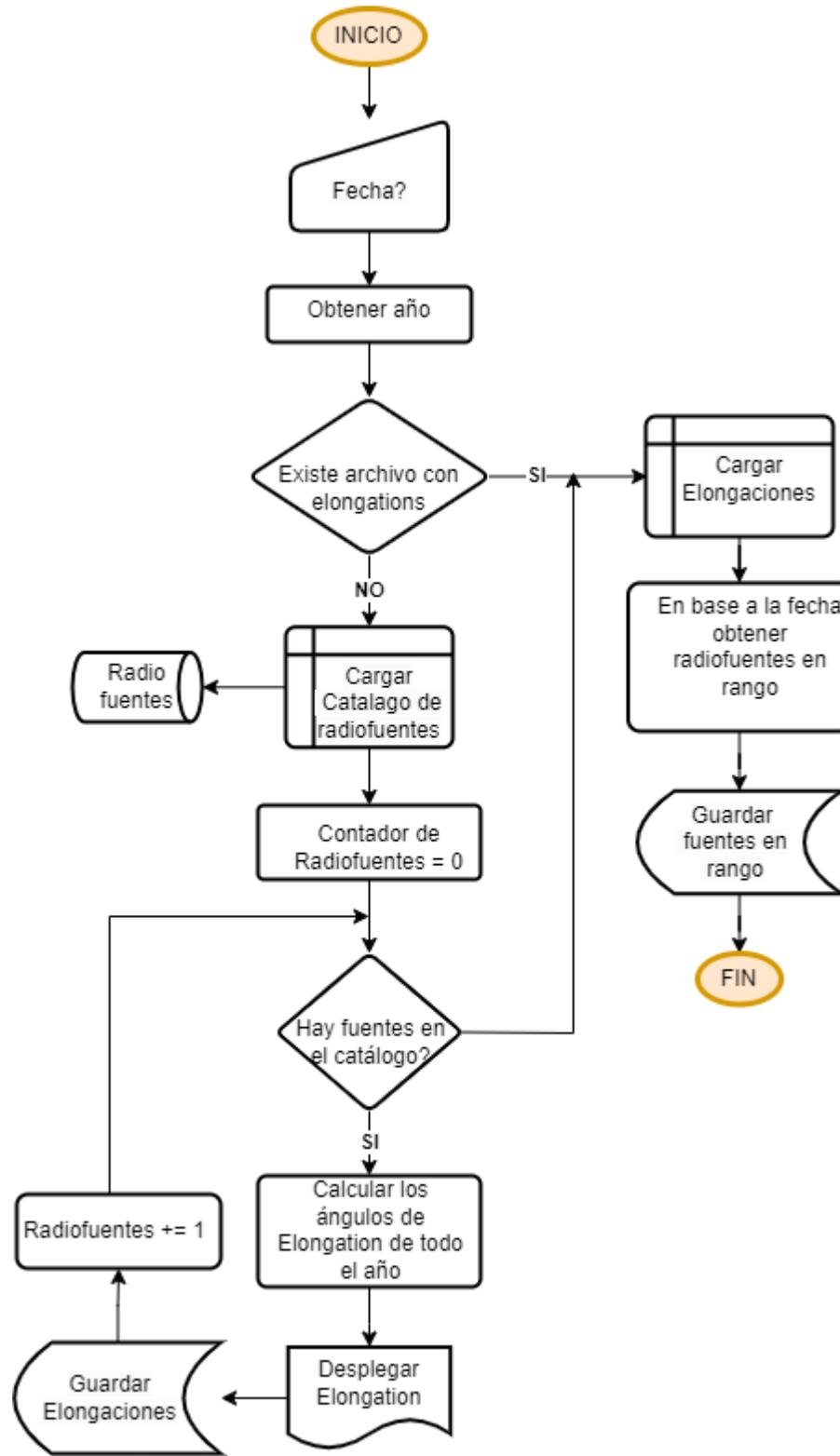
Con un programa llamado *elong* se obtiene cuáles radiofuentes, para una fecha señalada, se encuentran dentro del rango de ángulos de elongación válidos para la región de dispersión débil, ver [Figura 4.21](#).

**Figura 4.21** Componentes del sistema para *elong*



Para el año a analizar, revisa primeramente si ya existe el archivo de Excel con extensión XLSX, de no ser así, lo genera calculando el ángulo de elongación para los 365 o 366 días, si fuera año bisiesto, añadiendo la ascensión recta además del nombre de la radiofuente y grafica los valores obtenidos. Y finalmente, en base a la fecha obtiene la lista de fuentes que están en rango y lo salva en un archivo DAT. En la [Figura 4.22](#) se incluye el diagrama de flujo.

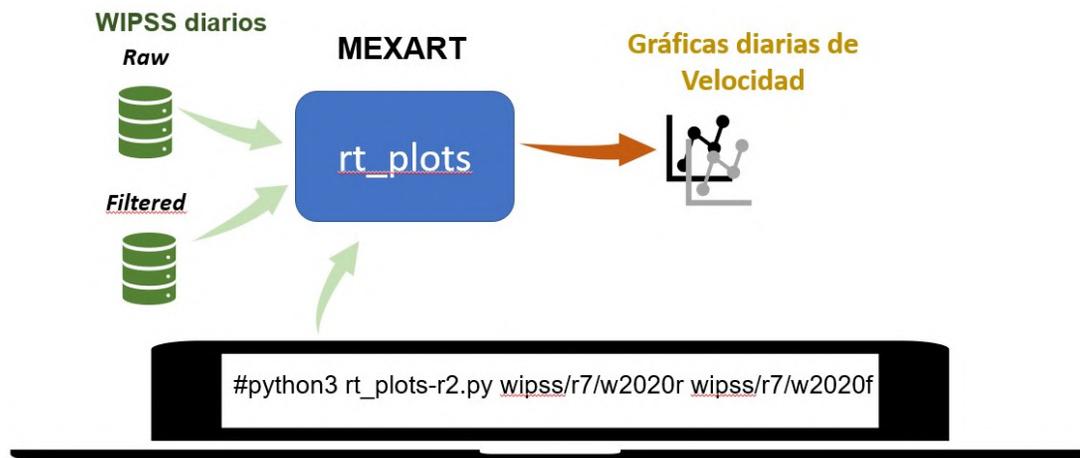
Figura 4.22 Diagrama de flujo del programa **elong**



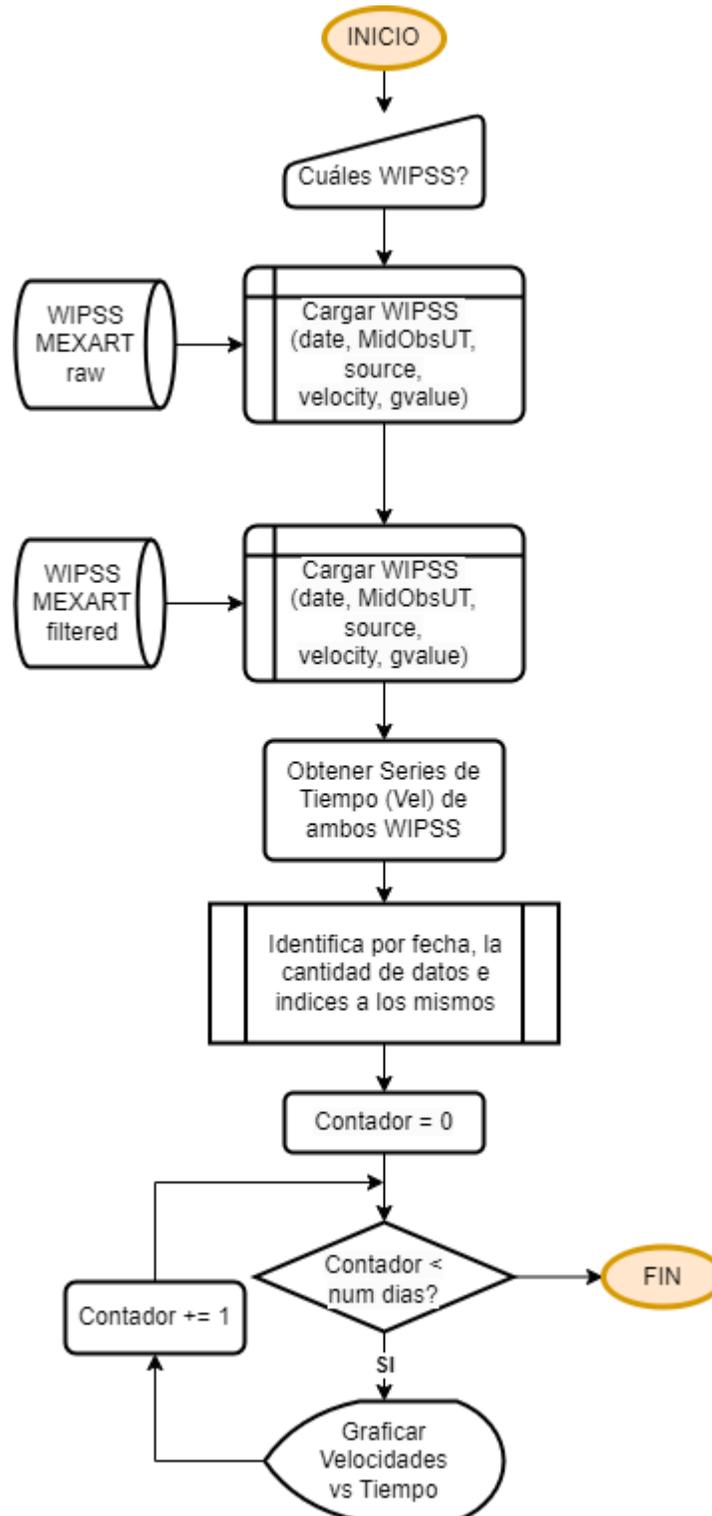
#### 4.1.6 Programa para pruebas de filtrado

Además de hacer las modificaciones necesarias al programa *multiclean* para registrar los cambios hechos durante el proceso de filtrado elaboré el programa *rt\_plots* para graficar de manera conjunta los resultados de los WIPSS de los datos crudos y filtrados del MEXART, ver [Figura 4.23](#). Para ejecutarlo, se requiere especificar los nombres de archivos o carpetas WIPSS a graficar.

**Figura 4.23** Componentes del sistema para *rt\_plots*



La lógica de programación para *rt\_plots* es la siguiente: (1) cargar los WIPSS respectivos, (2) se forma arreglos con las series de tiempo y las velocidades del VS, (3) se sortea por fecha y (4) por día se grafican ambas series de tiempo. Su diagrama de flujo se encuentra en la Figura 4.24.

Figura 4.24 Diagrama de flujo del programa `rt_plots`

## 4.2 Programa para manejo de datos de la PSP

Para obtener la velocidad y densidad del VS de la PSP, se hizo el programa *sweap* el cual toma datos de los instrumentos SPAN-Ai y SPC.

Las fuentes de información empleadas para acceder datos, manuales, notas sobre los diferentes reléase de datos, manuscritos y librerías están listadas en la [Tabla 4.1](#).

**Tabla 4.1** Fuentes de Información sobre la PSP

SITIO	URL
Parker Solar Probe Home Page	<a href="https://parkersolarprobe.jhuapl.edu/">https://parkersolarprobe.jhuapl.edu/</a>
PSP Science Gateway	<a href="https://psp-gateway.jhuapl.edu/">https://psp-gateway.jhuapl.edu/</a>
NASA Living With a Star	<a href="https://science.nasa.gov/heliophysics/programs/living-with-a-star">https://science.nasa.gov/heliophysics/programs/living-with-a-star</a>
SWEAP Home Page	<a href="http://sweap.cfa.harvard.edu/">http://sweap.cfa.harvard.edu/</a>
FIELDS Home Page	<a href="https://fields.ssl.berkeley.edu/">https://fields.ssl.berkeley.edu/</a>
WISPR Home Page	<a href="https://wispr.nrl.navy.mil/">https://wispr.nrl.navy.mil/</a>
ISOIS Home Page	<a href="https://spacephysics.princeton.edu/missions-instruments/isois">https://spacephysics.princeton.edu/missions-instruments/isois</a>
Space Physics Data Facility	<a href="https://spdf.gsfc.nasa.gov/">https://spdf.gsfc.nasa.gov/</a>
Descripción de Recursos de la PSP en HPDE.io	<a href="https://hpde.io/NASA/NumericalData/ParkerSolarProbe/index.html">https://hpde.io/NASA/NumericalData/ParkerSolarProbe/index.html</a>
Coordinated Data Analysis Web	<a href="https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/misc/NotesP.html">https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/misc/NotesP.html</a>
pycdf	<a href="https://spacepy.github.io/pycdf.html">https://spacepy.github.io/pycdf.html</a>
cdflib	<a href="https://cdflib.readthedocs.io/en/latest/">https://cdflib.readthedocs.io/en/latest/</a>

Se inició el desarrollo por definir qué productos de datos utilizar y las fechas a analizar. En la [Tabla 4.2](#), hay un listado completo de las fechas con los perihelios y las asistencias gravitacionales de la PSP, especificándose la distancia de la PSP al Sol y el ángulo formado entre la Tierra y la PSP con vértice en el Sol.

Por una limitante de no tener datos, en la nueva etapa digital, previos a junio del 2020 por parte del MEXART, y no contar con datos posteriores al

2020 del ILT, el análisis en conjunto de los observatorios y la PSP quedó acotado a los encuentros 5 y 6.

**Tabla 4.2** Lista de encuentros y asistencias gravitacionales para la PSP

Evento	Fecha	Distancia	∠ PSP-Tierra
Venus Flyby 1	Máximo Acercamiento: 2018-10-03/08:44	0.7 UA	-14 grados
Encuentro 1	Perihelio: 2018-11-06/03:27	0.17 UA (35.6 R <sub>☉</sub> )	103 grados
Encuentro 2	Perihelio: 2019-04-04/22:39	0.17 UA (35.6 R <sub>☉</sub> )	-48 grados
Encuentro 3	Perihelio: 2019-09-01/17:50	0.17 UA (35.6 R <sub>☉</sub> )	168 grados
Venus Flyby 2	Máximo Acercamiento: 2019-12-26/18:14	0.7 UA	-99 grados
Encuentro 4	Perihelio: 2020-01-29/09:37	0.13 UA (27.8 R <sub>☉</sub> )	25 grados
Encuentro 5	Perihelio: 2020-06-07/08:23	0.13 UA (27.8 R <sub>☉</sub> )	-103 grados
Venus Flyby 3	Máximo Acercamiento: 2020-07-11	0.7 UA	23 grados
Encuentro 6	Perihelio: 2020-09-27/09:16	0.09 UA (20.3 R <sub>☉</sub> )	143 grados
Encuentro 7	Perihelio: 2021-01-17/17:40	0.09 UA (20.3 R <sub>☉</sub> )	30 grados
Venus Flyby 4	Máximo Acercamiento: 2021-02-20	0.07 UA	160 grados
Encuentro 8	Perihelio: 2021-04-29/08:48	0.074 UA (15.9 R <sub>☉</sub> )	-76 grados
Encuentro 9	Perihelio: 2021-08-09/19:11	0.074 UA (15.9 R <sub>☉</sub> )	174 grados
Venus Flyby 5	Máximo Acercamiento: 2021-10-16	0.07 UA	-50 grados
Encuentro 10	Perihelio: 2021-11-21/08:23	0.062 UA (13.3 R <sub>☉</sub> )	87 grados
Encuentro 11	Perihelio: 2022-02-25/15:38	0.062 UA (13.3 R <sub>☉</sub> )	-11 grados
Encuentro 12	Perihelio: 2022-06-01/22:51	0.062 UA (13.3 R <sub>☉</sub> )	-106 grados
Encuentro 13	Perihelio: 2022-09-06/06:04	0.062 UA (13.3 R <sub>☉</sub> )	162 grados
Encuentro 14	Perihelio: 2022-12-11/13:16	0.062 UA (13.3 R <sub>☉</sub> )	66 grados
Encuentro 15	Perihelio: 2023-03-17/20:30	0.062 UA (13.3 R <sub>☉</sub> )	-31 grados
Encuentro 16	Perihelio: 2023-06-22/03:46	0.062 UA (13.3 R <sub>☉</sub> )	-125 grados
Venus Flyby 6	Máximo Acercamiento: 2023-08-21	0.07 UA	5 grados
Encuentro 17	Perihelio: 2023-09-27/23:28	0.053 UA (11.4 R <sub>☉</sub> )	144 grados
Encuentro 18	Perihelio: 2023-12-29/00:54	0.053 UA (11.4 R <sub>☉</sub> )	51 grados
Encuentro 19	Perihelio: 2024-03-30/02:20	0.053 UA (11.4 R <sub>☉</sub> )	-42 grados
Encuentro 20	Perihelio: 2024-06-30/03:46	0.053 UA (11.4 R <sub>☉</sub> )	-131 grados
Encuentro 21	Perihelio: 2024-09-30/05:13	0.053 UA (11.4 R <sub>☉</sub> )	141 grados
Venus Flyby 7	Máximo Acercamiento: 2024-11-06	0.07 UA	-81 grados
Encuentro 22	Perihelio: 2024-12-24/11:41	0.046 UA (9.9 R <sub>☉</sub> )	52 grados
Encuentro 23	Perihelio: 2025-03-22/22:25	0.046 UA (9.9 R <sub>☉</sub> )	-37 grados
Encuentro 24	Perihelio: 2025-06-19/09:09	0.046 UA (9.9 R <sub>☉</sub> )	-123 grados

Tabla adaptada de <https://psp-gateway.jhuapl.edu/website/SciencePlanning/Encounters/>.

Como se mencionó en la [sección 3.2.1.1](#), el instrumento SPC se desempeña mejor a distancias heliocéntricas mayores cuando el flujo del VS

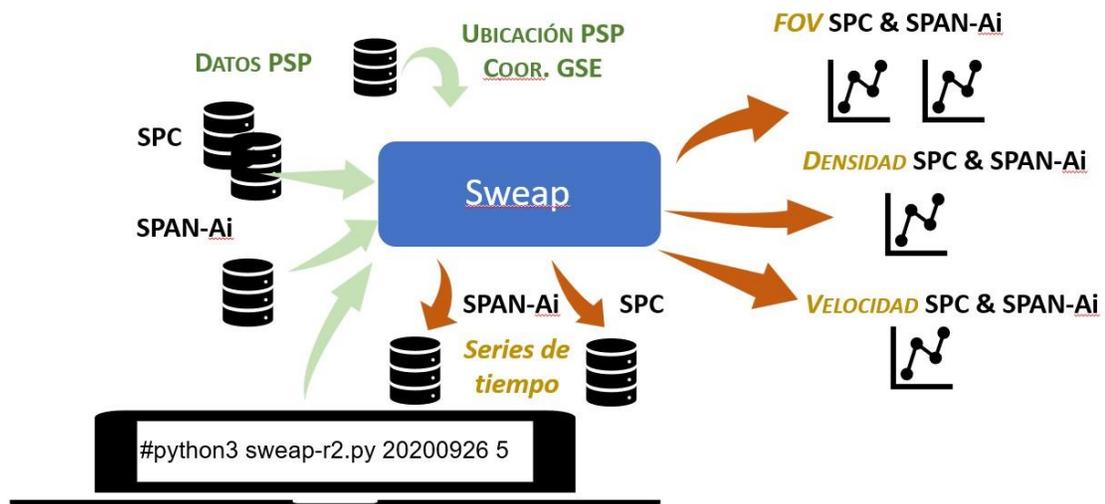
es casi radial y el SPAN-Ai lo hace a pequeñas distancias, ver [Figura 3.13](#). Por lo que se utilizó datos de ambos instrumentos, en los siguientes niveles:

- (1) SPC a nivel L2. - Para extraer los ángulos de acimut y elevación de la copa.
- (2) SPC a nivel L3. - Para obtener la ubicación de la PSP, la densidad y velocidad de los protones.
- (3) SPAN-Ai a nivel L3, en las coordenadas *INST*, *SC* y *RTN*. - Para obtener la densidad y velocidad de los protones, el ángulo de acimut  $\phi$  y la radiancia versus  $\phi$ .

Adicionalmente de orientarme la Dra. Niembro del SAO sobre qué archivos y campos emplear para las gráficas, me proporcionó la posición de la sonda de los encuentros 1 (comenzando el 31 oct. 2018) hasta el número 17 (terminando al 3 oct. 2023), para poder calcular el ángulo de elongación  $\epsilon$  y la latitud heliocéntrica  $\gamma$  de la PSP, cotejando con ella las ecuaciones empleadas. Los archivos con la ubicación de la sonda tienen una frecuencia de un minuto.

Los archivos son analizados especificando la fecha inicial y el número de días a procesar, ver [Figura 4.25](#). Los datos están organizados cómo en <http://sweap.cfa.harvard.edu/pub/>.

**Figura 4.25** Componentes del sistema para la PSP



La operación general del programa es la siguiente: (1) en base al número de encuentro, se generan las listas de archivos a procesar, (2) se carga la órbita, PSP\_Orbit\_E0x\_GSE.txt, (3) por día se efectúa las siguientes operaciones: (a) extraer los datos necesarios de los archivos CDF, (b) para SPAN-Ai, se grafica la radiancia versus el ángulo Phi, (c) para SPC, se grafica  $R$  y los ángulos  $\varphi$  &  $\theta$ , (d) se grafica la densidad registrada por SPC y SPAN-Ai, eliminando del arreglo los *fillval*, *NaNs*, y además, para la SPC se consideran las banderas sobre la calidad de los datos (*DQFs*), (e) en la carpeta de reportes, se guardan las gráficas de velocidad y densidad y se salvan en archivos CSV esta información.

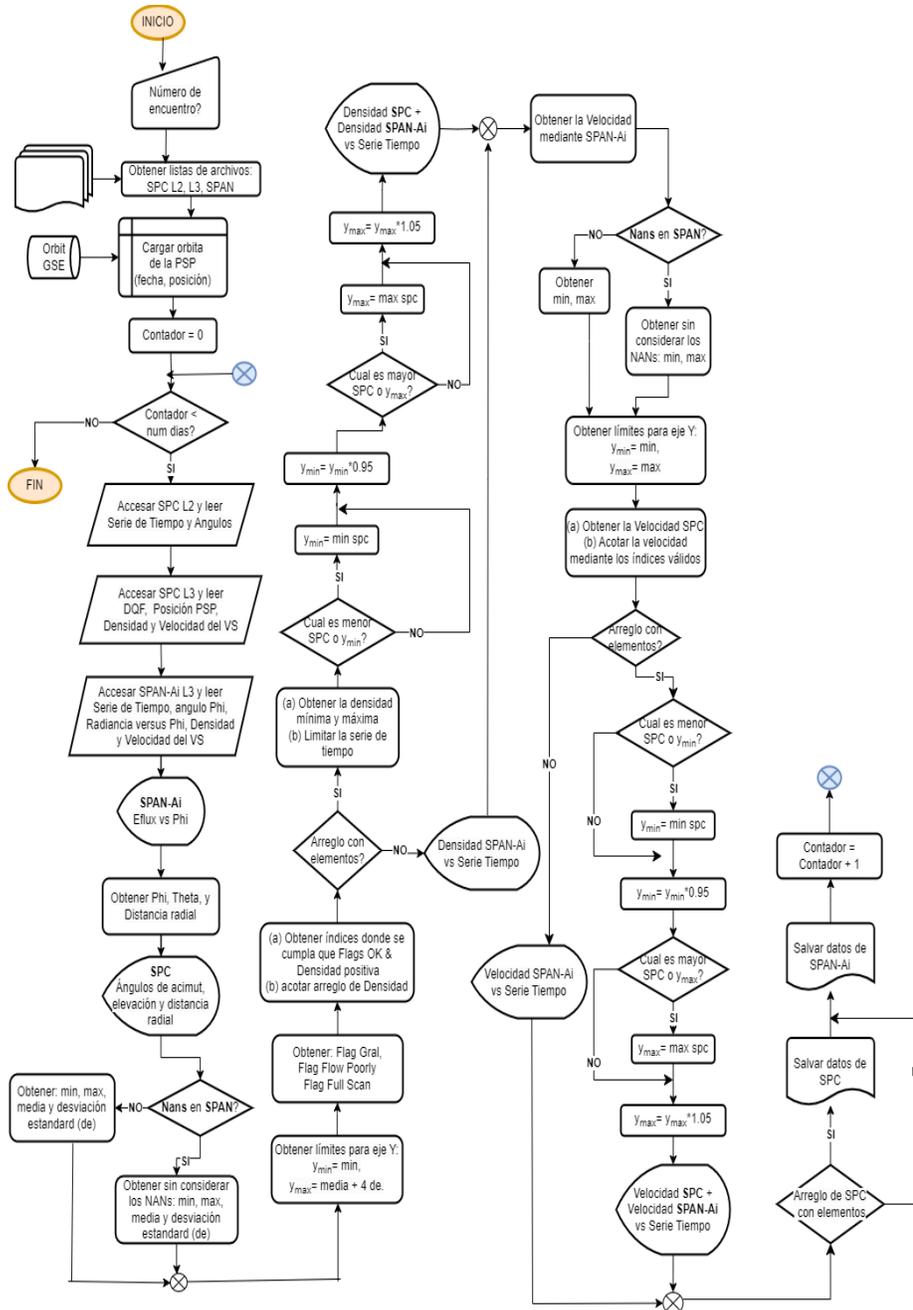
Por comunicación personal con la Dra. Niembro, se sabe que los datos de SPAN-Ai vienen validados, es decir que fueron omitidos datos inválidos y no es necesario revisar la bandera de calidad de los datos en el SPAN; sin embargo, vienen algunos *NaNs*. Por lo que, la serie de tiempo vs densidad y la serie de tiempo vs velocidad de cada instrumento poseen diferentes longitudes y son salvados en diferentes archivos CSV.

En cuanto a la SPC, me indicó las tres banderas principales que ellos emplean para identificar si no hubo algún problema en la medición, son las *DFQ* 0, 7 y 16; es decir, 0= bandera general, 7= dirección de flujo no determinado o poco definido, y la 16= operación en modo de escaneo completo de protones. Las tres banderas deben de estar apagadas (0) para indicar que la condición es la correcta. Además de esto, se valida si el campo no fue llenado con un *fullval* ( $-1 \times 10^{31}$ ) o *NaN*. Adicionalmente, me aclaró que la SPC se apaga alrededor del perihelio por protección pues soporta hasta 1,371 C.

Para el cálculo de la distancia heliocéntrica a la PSP, es recomendado usar la componente  $R$  de la SPC, dado que desde el encuentro #5 (jun 2020) hasta el 2023, se registró un problema en dos de las 4 placas colectoras que no permitieron la correcta operación y el cálculo del ángulo de elevación  $\theta$ .

Además, me especificó que el ángulo  $\varphi$  debe de estar en entre  $[-20^\circ, 20^\circ]$  en la SPC, y para los encuentros 5 y 6 de la SPAN-Ai deben de estar entre  $[100^\circ, 160^\circ]$  para considerarse mediciones representativas. A continuación, se presenta en la [Figura 4.26](#) el diagrama de flujo de este programa.

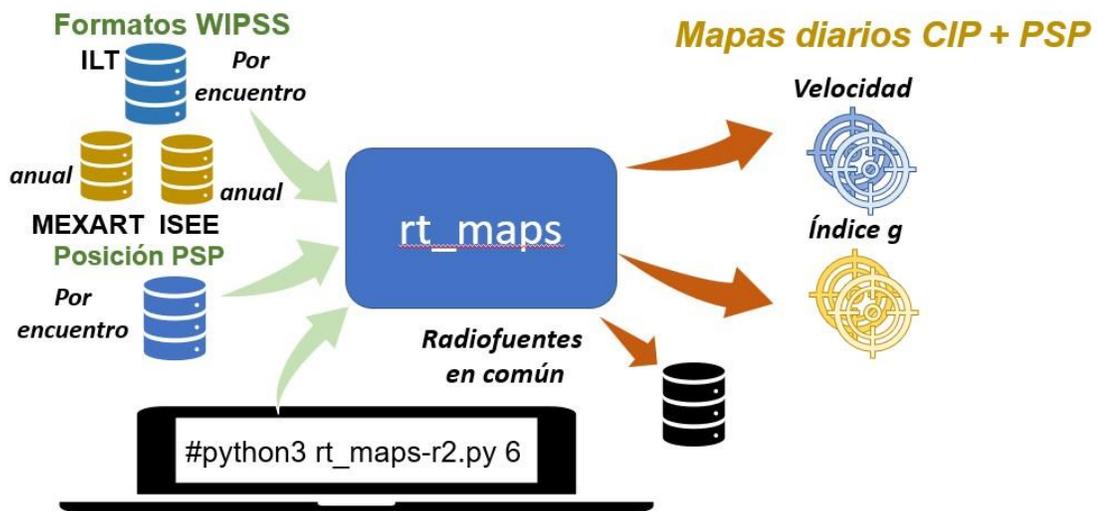
**Figura 4.26** Diagrama de flujo del programa **swcap**



## 4.3 Combinación de observaciones de CIP y PSP

Para combinar y complementar resultados de las observaciones de CIP con la PSP, se elaboró el programa *rt\_maps* que grafica los resultados de diferentes observatorios y la ubicación de la PSP. En el programa se ingresa el número de encuentro a analizar, esperando uno o dos dígitos, como en la [Figura 4.27](#) y usa como entrada los archivos WIPSS más la posición de la PSP. Por día, se generan dos gráficos, uno de velocidades y otro de índices  $g$ , salvando las fuentes de radio común a los tres observatorios en archivos CSV.

**Figura 4.27** Componentes del sistema para *rt\_maps*

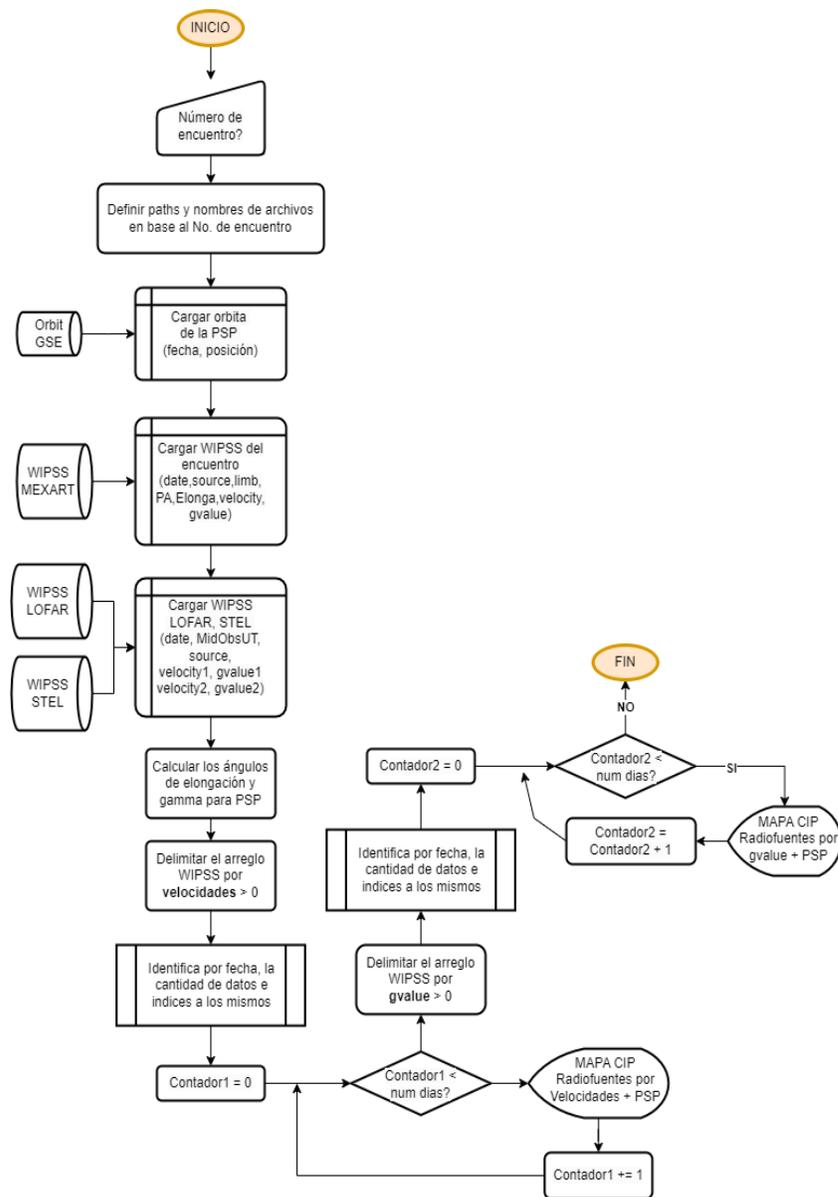


El cálculo de los ángulos de elongación  $\epsilon$  y gamma  $\gamma$  para la sonda Parker Solar Probe es de acuerdo a lo explicado en la [sección 2.2.14](#), usando las [ecuaciones \(2.33\)](#) y [\(2.34\)](#) conforme al diagrama de la [Figura 2.27](#). En ambas rutinas se emplea la librería de *Pandas* y el uso de *series* y *dataframes* para salvar la información en archivos CSV para posterior análisis.

La lógica de programación para el programa *rt\_maps* es la siguiente: (1) por número de encuentro se localizan y se carga el archivo de la ubicación de la PSP en coordenadas GSE y los archivos WIPSS respectivos, (2) se determina el ángulo de elongación  $\epsilon$  y gamma  $\gamma$  para la Parker Solar Probe,

(3) por día se grafica dos mapas, cada una de las radiofuentes representándolas mediante un **círculo** rojo para el MEXART, un **rombo** azul para el ITL y una **estrella** verde para ISEE, cuyo diámetro e intensidad es proporcional a la velocidad o al índice **g**, más la ubicación de la sonda, marcando con un **punto** negro el inicio de su trayectoria y con un **rombo**, en color aqua, su posición final. El diagrama de flujo del programa *rt\_maps* está en la [Figura 4.28](#).

**Figura 4.28** Diagrama de flujo del programa *rt\_maps*



# 5 Resultados

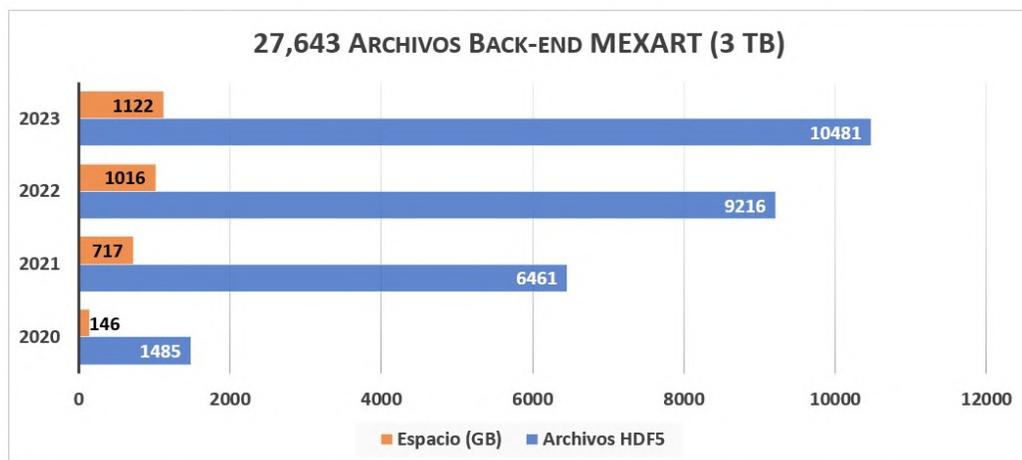
En el año 2020, se registraron datos en 98 días observando en modo CIP con el MEXART, en los años subsecuentes: 280, 332 y 320 días respectivamente, sumando un total de 1,030 días en operación, como se muestra en la [Figura 5.1](#).

**Figura 5.1** Días en operación en modo CIP con el MEXART, 2020-2023



Estos más de mil días de operación generaron un espacio ~3 TB en el servidor de Coeneo, Mich., [Figura 5.2](#). Las barras en azul representan la cantidad de archivos y en naranja su respectivo espacio en GB por año.

**Figura 5.2** Observaciones en modo CIP, MEXART, 2020-2023



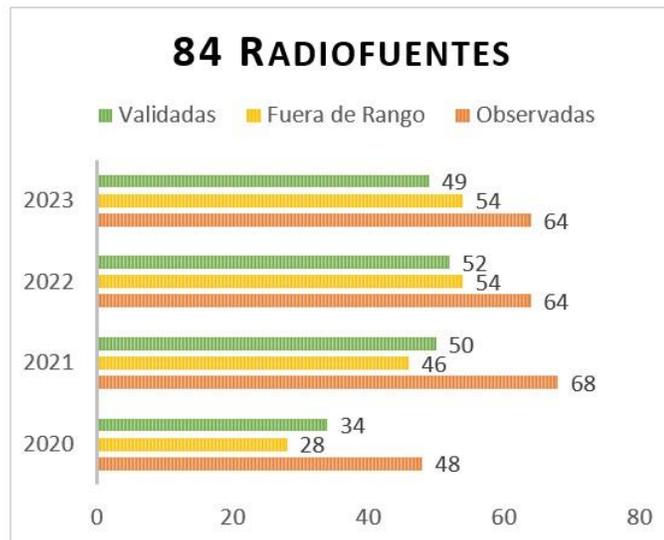
Dicha información es primero duplicada en un servidor del LANCE en Morelia, Mich., para después ser copiada en el Laboratorio de Supercómputo del INAOE en Tonantzintla, Pue., [Figura 5.3](#). La replicación de los datos fue verificada en más de tres ocasiones.

**Figura 5.3** Ubicación de los HDF5s



Durante los 4 años, se les dio seguimiento a 84 radiofuentes, [Figura 5.4](#). Por año, se contabiliza la cantidad de fuentes observadas (barra en color naranja), analizadas y válidas (color verde), analizadas y fuera del rango de elongación (color amarillo) según los criterios de la [sección 4.1.2](#).

**Figura 5.4** Radiofuentes observadas, MEXART, 2020-2023



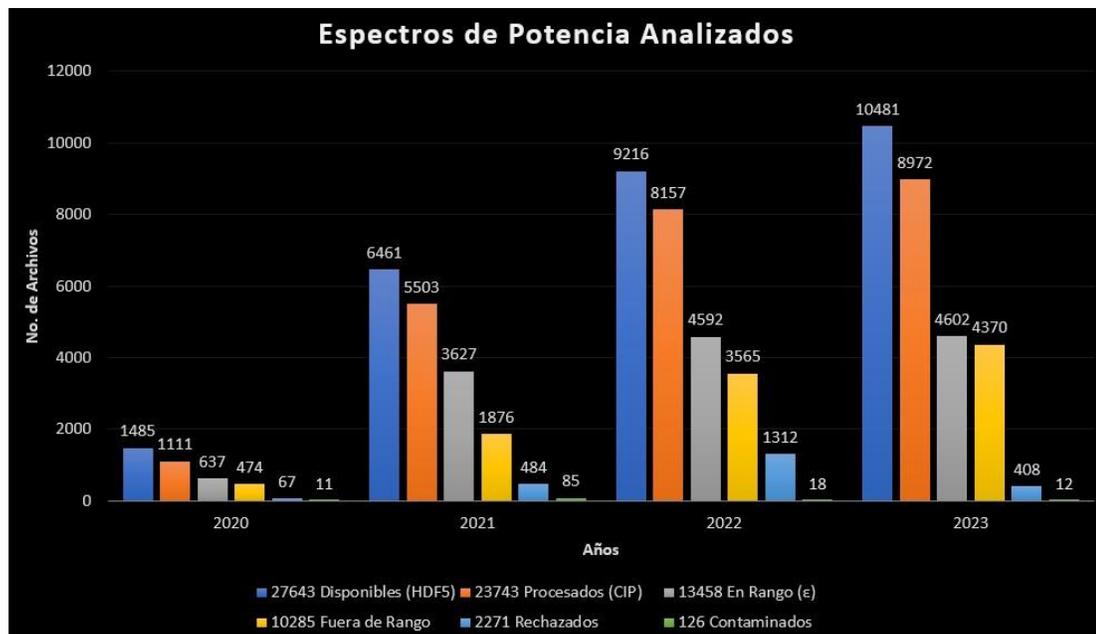
En el 2020, la suma de las validadas más las de fuera de rango rebasan el total de radiofuentes para ese año, porque 28 de 48 fuentes tuvieron elongaciones menores a  $18^\circ$  o mayores de  $90^\circ$  y 34 de 48 quedaron registradas en el formato WIPSS. Esto puede suceder porque la contabilización es anual, y hay períodos en que cada radiofuente está en rango o fuera de rango.

El catálogo de radiofuentes y la información de los HDF5 son leídos por el programa *multiclean*, [Figura 4.5](#). Mediante este programa se obtienen la serie de tiempo, se almacena y grafica la potencia total de los datos crudos en la carpeta *raw* y la potencia total de los datos filtrados en la carpeta *filtered*.

Posteriormente se ejecuta el programa *auto-mexart*, [Figura 4.11](#), se aplica la transformada Wavelet a los archivos DAT, para obtener los espectros de potencia y calcular los índices  $m$ . Después, se estiman algunos de los parámetros del VS ( $V$ ,  $\alpha$  y  $AR$ ) haciendo un ajuste por mínimos cuadrados del espectro de potencias teórico ([ecn. 2.29](#)) al observado, y se grafican ambos espectros. Para concluir, después de procesar todos los DATs, se generan los archivos WIPSS diarios con índices  $m$ .

De un total de 23,743 archivos analizados sólo se registraron 13,458 (~57%) en los formatos WIPSS, [Figura 5.5](#). Como se muestra en la gráfica no todos los archivos HDF5 *disponibles* son analizados por el programa *auto-mexart* porque adicionalmente se observa el Sol, el cielo frío u objetos celestes anchos usados para calibración, como Centaurus; pero el resto de las radiofuentes son *procesadas* creándose un archivo DAT por archivo HDF5.

**Figura 5.5** Espectros de potencia analizados por *auto-mexart*, 2020-2023



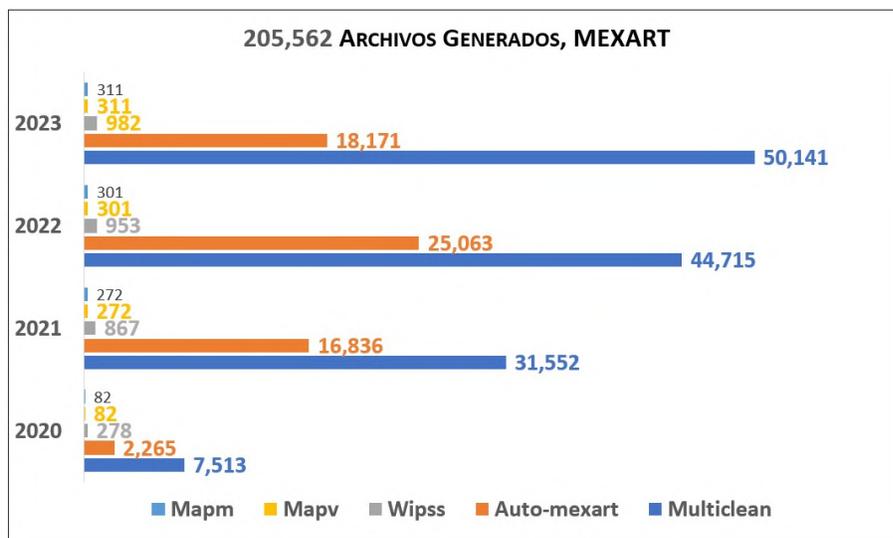
Se calcula los índices *m* a los espectros que están en el rango de elongación. Si el nivel de ruido supera a la integral del espectro de potencia entre  $f_B$  y  $f_R$  se clasifican como *contaminadas*. El resto de espectros son examinados por el modelo de velocidades. Posteriormente, se valida el rango de la velocidad obtenida, su índice *m* y el error  $\chi^2$  para proceder a la representación gráfica de los espectros real y teórico, e indicar que sea grabado en el formato WIPSS o en caso contrario señalarlo como *rechazado*.

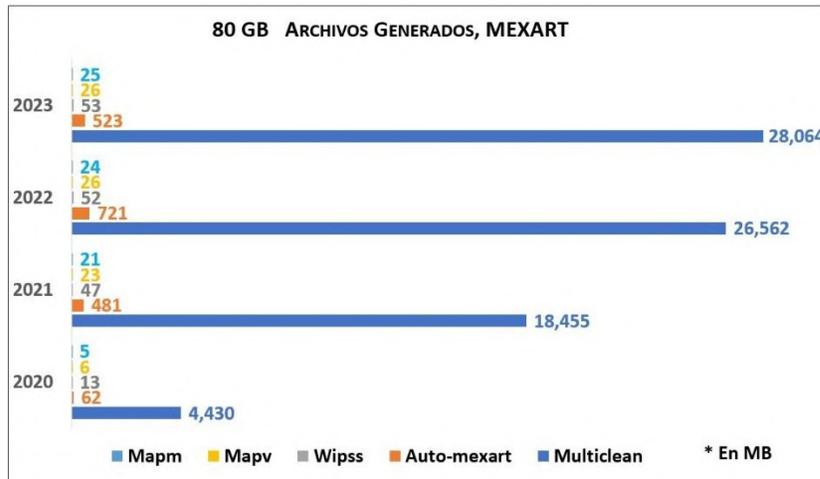
Empleando los formatos WIPSS, [Figura 4.19](#), se pueden obtener los mapas de CIP con las velocidades e índices *m*, invocando los programas *mapv* y *mapm*, respectivamente.

Mediante el programa *wipss*, [Figura 4.17](#), se obtienen los índices de centelleo anual, índice *g*, generándose los formatos WIPSS oficiales, anual y diarios, para compartir con la comunidad internacional de CIP. Y de forma adicional, el programa grafica los mapas diarios de CIP de velocidades e índices *g* para el año analizado.

De la ejecución de estos cinco programas se generaron alrededor de 205.5 mil archivos. Incrementándose en 7 la cantidad de archivos y ocupando ~80 GB extras de espacio, [Figura 5.10](#).

**Figura 5.10** Resultados generados por el sistema, 2020-2023

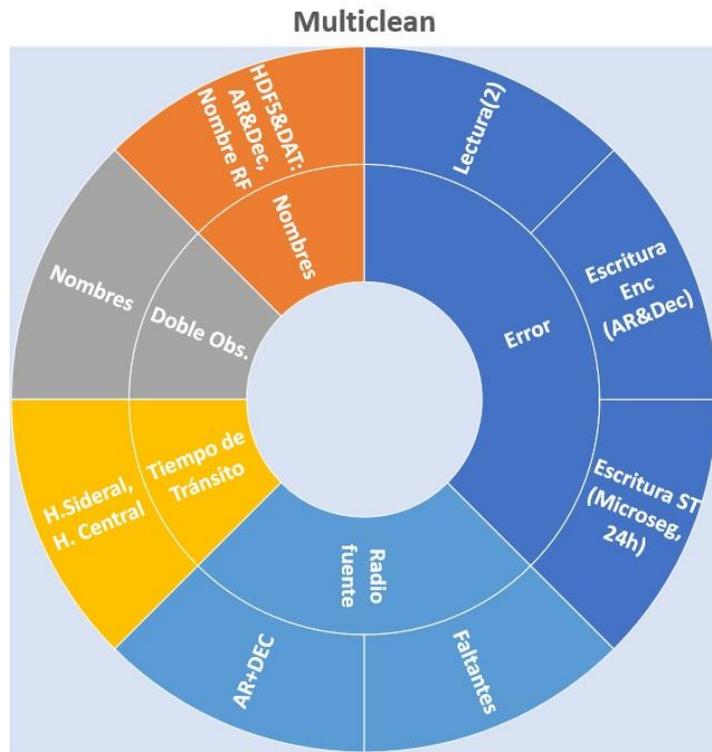




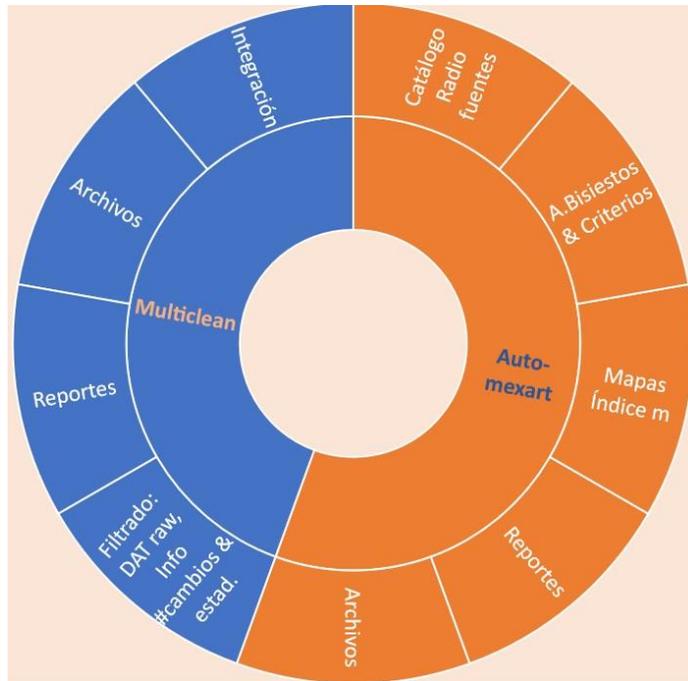
Para cumplir con los objetivos específicos de desarrollo de *software* para el MEXART, mencionados en la [sección 1.4.1](#), se detectaron y corrigieron los problemas mostrados en la [Figura 5.11](#) para el *auto-mexart* y *multiclean*. Se implementaron tres nuevos programas y se añadieron características al *auto-mexart* y *multiclean*, ver [Figura 512](#).

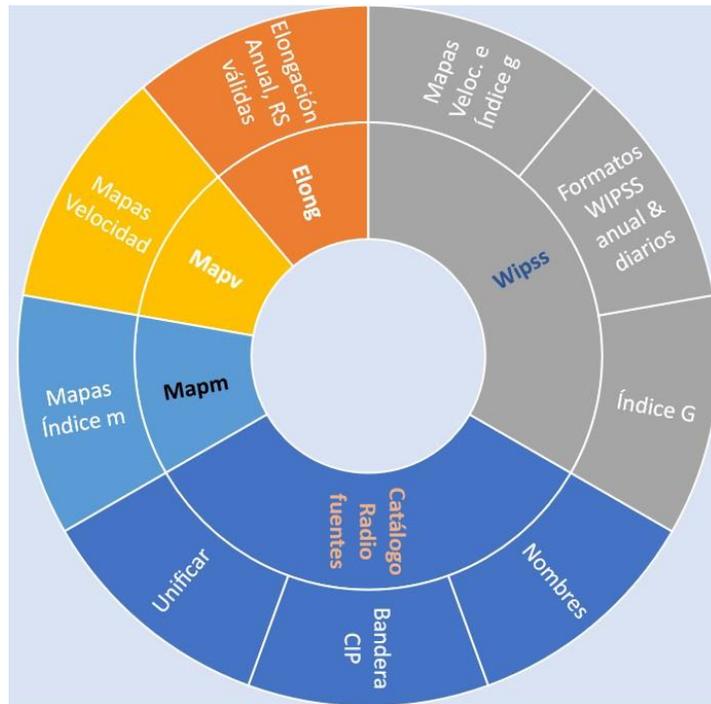
**Figura 5.11** Problemas corregidos por la nueva implementación en Python





**Figura 5.12** Características añadidas por la nueva implementación en Python





Para el *multiclean*, [Figura 5.11](#), en los HDF5 se encontró: dos tipos de error de lectura, nombres incompletos y doble observación; errores en el encabezado por omisión de ceros en la ascensión recta (**RA**) & declinación (**DEC**) y error en el cálculo del tiempo de tránsito durante el horario de verano; errores en los datos por hora equivocada o falta de decimales.

Para el *auto-mexart*, [Figura 5.11](#), se eliminó código obsoleto en IDL y Python. Se corrigió en los DATs el manejo de las declinaciones negativas y los ceros faltantes. Se definió el manejo de los **NaNs**. Se plantearon otras dos formas de obtener el índice m. El formato WIPSS fue revisado por miembros de la comunidad de CIP de la UCSD haciéndose las correcciones. El número de parámetros a ajustar en el modelo varió de 4 a 3, como también los valores iniciales y los límites. Las gráficas de los espectros se extendieron a 24.2 Hz.

En la [Figura 5.12](#), para el *multiclean*, primero se unificó un *script* y dos programas en Python; se agregó el soporte para procesar múltiples archivos HDF5 y se añadió la lógica para nombrar los archivos en base al nombre de la fuente de radio versus **RA** y **DEC**; se adicionó mensajes al operador y el registro de las operaciones realizadas; y finalmente, para analizar el problema

de filtrado, se agregó la escritura de la serie de tiempo de los datos en crudo, obtener información estadística sobre los canales y contabilizar los cambios hechos durante el filtrado. Para el *auto-mexart*, también se añadió el soporte para procesar múltiples archivos DATs y la lógica para nombrar los archivos en base al nombre de la fuente de radio versus **RA** y **DEC**; se agregó el soporte de años bisiestos; los espectros fueron analizados y se definieron los criterios mencionados en la [sección 4.1.2](#), se agregó los mapas de índices **m**, los mensajes al operador y el registro de las operaciones realizadas.

En el *auto-mexart*, se reporta al operador la cantidad de archivos que procesó, cuántos estuvieron en rango, fuera de rango, contaminados o rechazados, inclusive la cantidad de **NaNs** en el espectro. Lista los archivos con problemas, indicando la falla, y registrándolos en archivos diferentes. Uno para los que estuvieron fuera de rango, otro para los contaminados y otro para los rechazados. Además, si llegara haber alguna radiofuente que no esté en el catálogo, se reporta y también genera una lista.

La **RA** y la **DEC** de los dos catálogos de *radiofuentes* se cotejaron y se generó un nuevo catálogo, al que se le agregó el soporte de hasta dos nombres para cada una de ellas y un campo adicional para identificar si la fuente será o no empleada para CIP.

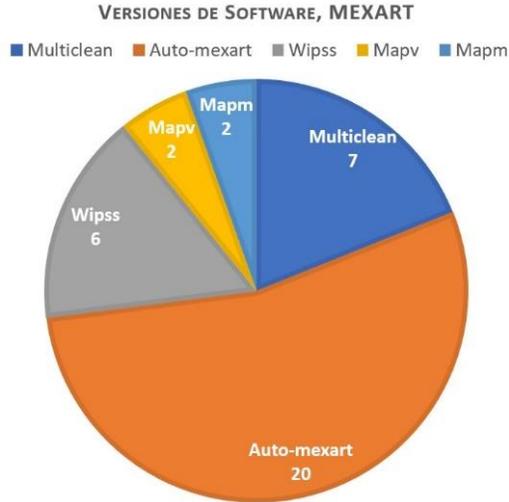
Se creó el programa *wipss*, donde se obtiene los índices **g**, los nuevos archivos WIPSS y los nuevos mapas de velocidad e índice **g**. La parte de la representación gráfica de los mapas se eliminó del *auto-mexart* y se crearon los programas *mapv* y *mapm* para generar los mapas de velocidad y de índices **m**, respectivamente.

Se creó el programa *elong*, donde se calcula los ángulos de elongación para todo el año, se grafican e identifica que radiofuentes están en rango para cierta fecha en particular.

El programa que requirió más recursos, [Figura 5.13](#), fue el programa *auto-mexart*, que estuvo en continuas revisiones y mejoras, generándose 20 versiones de esta rutina, 7 para *multiclean*, 6 para *wipss*, 2 para *mapv* y

*mapm*. En la [Figura 5.14](#), se presenta una fotografía sobre las primeras pruebas en sitio efectuadas el 14 de febrero del 2023.

**Figura 5.13** Versiones de los componentes del sistema para el MEXART



**Figura 5.14** Publicación del LANCE sobre las primeras pruebas en sitio



Nota. Primeras pruebas usando la versión en Python del programa principal AUTO-MEXART realizadas en las instalaciones del SCIESMEX. Tomada de <https://www.facebook.com/sciesmex/posts/pfbid02WwTzo9ViS7ySHp5mgK1q2YSLFv6RxSiEy5qovX5ZyDigQc5Qy9Tii6gVSHbXw1sUI>

## 5.1 MEXART

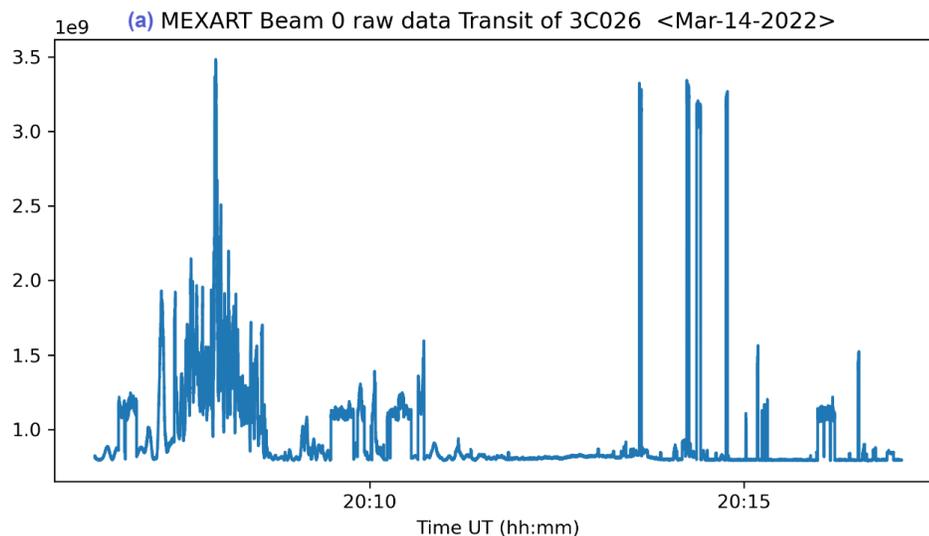
A continuación, se presentan imágenes de los archivos de texto, gráficas y reportes generados por los programas descritos en la [sección 4.1](#) de metodología.

### 5.1.1 Multiclean (Series de Tiempo)

En la [Figura 5.15](#), se muestra para la radio galaxia 3C026 en la fecha del 14 de marzo del 2022, la potencia total de la señal sin filtrar (inciso a) y la potencia de los 512 canales sin filtrar (inciso b), la potencia total de la señal filtrada (inciso c) y la potencia de los 512 canales filtrados (inciso d).

Continuando con los resultados de ese día para la misma radiogalaxia, en la [Figura 5.16](#), se presenta una vista parcial de los archivos DAT generados, es decir, la serie de tiempo y la potencia total del haz sin filtrar (inciso a) y del filtrado (inciso b). En la primera línea comentada, usando el carácter de “#”, contiene el nombre del observatorio y número de haz. En la 2ª línea, nombre de radiofuente, fecha, *RA*, *DEC* y el tiempo de observación medio en UT. En la 3ª línea, la frecuencia inicial, el número de canales y el ancho de banda. En la 4ª línea, el formato para la serie de tiempo. Los valores en la amplitud varían de un DAT a otro.

**Figura 5.15** Graficas de potencia, *multiclean r7*, 3C026, 14/03/2022



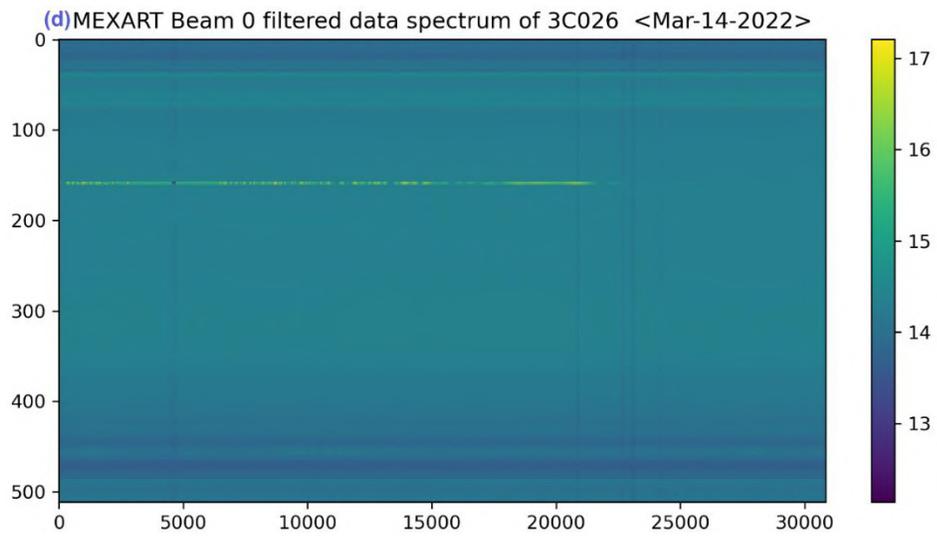
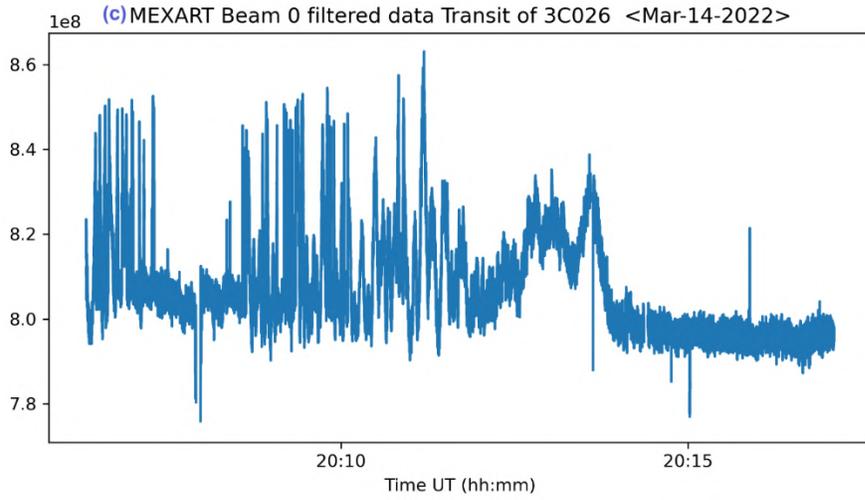
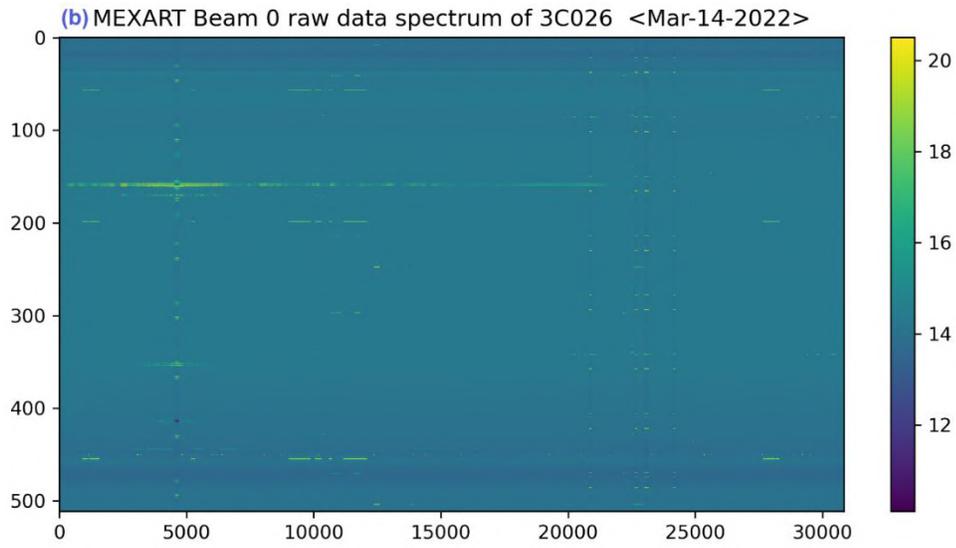




Figura 5.18 Vista parcial de archivo CSV, *multiclean r7*, 14/03/2022

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	date	source	data	ch_hi12	hac	hi15	ch_hi30	hi30	lo
2	14/03/2022	3C454.3	30720	76	0	21469	403	27215	0
3	14/03/2022	1830-210	25088	0	0	0	83	11801	0
4	14/03/2022	3C433	30848	0	0	0	512	332560	393
5	14/03/2022	3C071	25088	3	0	13226	386	52568	4
6	14/03/2022	HYDRA	30848	4	61696	7631	259	66763	0
7	14/03/2022	1621-11	30720	9	0	14215	306	29069	746
8	14/03/2022	HERCULES	30848	6	0	30195	65	36987	0
9	14/03/2022	3C048	30848	2	0	1262	510	191924	278
10	14/03/2022	1938-15	13568	0	0	0	152	19300	460
11	14/03/2022	3C422	30720	5	0	16155	511	137954	912
12	14/03/2022	2318-16	25088	3	25088	4716	65	8535	0
13	14/03/2022	3C446	30592	8	0	34337	510	88714	742

Figura 5.19 Vista parcial de archivo LOG, *multiclean r7*, 03/2022

```

log-20240331-190822.txt
1
2 CLEAN FILTER - MEXART
3
4 BEGING at Sun Mar 31 19:08:22 2024
5 Running ... multiclean-r7.py
6
7 Processing the file #1/839 => ../mexart/hdf5/2022/2022-03/IPS_2022_03_30/HYDRA_beam_obs_30_03_2022/beam_20220330_033013.hdf5
8 (1) Getting Source, Right Ascension & Declination
9 Source = HYDRA, HYDRA
10 R.A. = 091805, Dec = -120543
11 (2) Generating TIME & FREQUENCY VECTOR
12 (3) Getting FULL POWER of Beam0
13 a. Saving DATA Raw
14 b. Plotting DATA Raw
15 (4) Cleaning the DATA
16 outliers1# 3; median= 57 199 455
17 50% 1.313682e+06 1.300156e+06 1326886.625
18 => inrang1 = 1816097.875
19 Outliers1
20 57 15917855.8
21 199 51159103.6
22 455 545562880.0
23 Name: 0.9, dtype: float64
24 outliers1 => 57
25 rt= 1.0423386875082132
26 outliers2# 3277
27 => inrange2 = 1386877.25
28 outliers1 => 199
29 rt= 1.40772869446627
30 outliers2# 3218

1033064 Processing the file #776/839 => ../mexart/hdf5/2022/2022-03/IPS_2022_03_14/3C026_beam_obs_14_03_2022/beam_20220314_200638.hdf5
1033065 (1) Getting Source, Right Ascension & Declination
1033066 Source = 3C026, 3C026
1033067 R.A. = 005408, Dec = -033355
1033068 (2) Generating TIME & FREQUENCY VECTOR
1033069 (3) Getting FULL POWER of Beam0
1033070 a. Saving DATA Raw
1033071 b. Plotting DATA Raw
1033072 (4) Cleaning the DATA
1033073 outliers1# 24; median= 20 ... 495
1033074 50% 1619867.625 ... 1633520.25
1033075
1033076 [1 rows x 24 columns]
1033077 => inrang1 = 1765123.4375
1033078 Outliers1
1033079 20 9.992032e+05
1033080 57 2.907045e+07
1033081 158 1.158153e+08
    
```

```

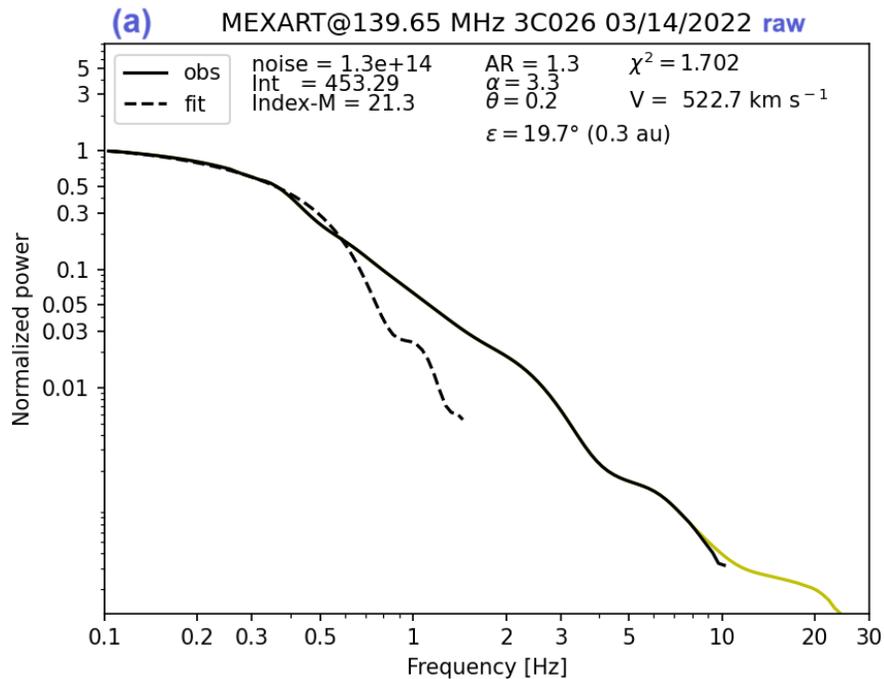
log-20240331-190822.txt
1034679 => inrange3 = 1337646.125
1034680 No. Channel= 506
1034681 outliers3# 42
1034682 => inrange3 = 1328344.75
1034683 No. Channel= 507
1034684 outliers3# 40
1034685 => inrange3 = 1393589.25
1034686 No. Channel= 508
1034687 outliers3# 37
1034688 => inrange3 = 1358048.75
1034689 No. Channel= 509
1034690 outliers3# 155
1034691 => inrange3 = 1297598.5
1034692 No. Channel= 510
1034693 outliers3# 61
1034694 => inrange3 = 1397721.0
1034695 No. Channel= 511
1034696 outliers3# 31
1034697 => inrange3 = 1255224.375
1034698 outlierst# 575median= 804350208.0 *****
1034699 Channels_Changes= 24
1034700 Changes_HAC = 0
1034701 Changes_HI_1.5 = 51818
1034702 Channels_Changes= 493
1034703 Changes_HI_3.0 = 107608
1034704 TOTAL of Changes HI = 159426
1034705 Changes_LO = 575
1034706 *****
1034707 a. Saving DATA Filtered
1034708 b. Plotting DATA Filtered
1034709
1034710 Processing the file #777839 => ../mexart/hdf5/2022/2022-03/IPS_2022_03_14/3C119_beam_obs_14_03_2022/beam_20220314_234555.hdf5

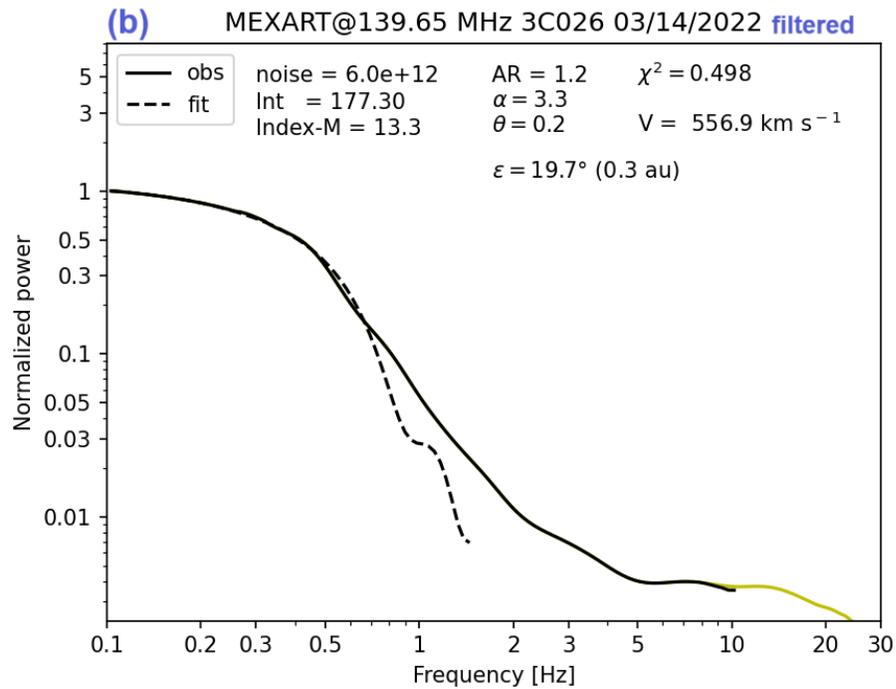
1119785 *****
1119786 | Summary |
1119787 |-----|
1119788 | Number of files processed = 839 |
1119789 | ENDING at Sun Mar 31 20:51:39 2024 |
1119790 |-----|
1119791 |*****|
    
```

### 5.1.2 Auto-mexart (Parámetros VS & WIPSS)

En la [Figura 5.20](#) se muestra el espectro de potencia real y el resultado del ajuste en base a los datos en crudos (inciso a) y filtrados (inciso b).

**Figura 5.20** Espectro de potencia, *auto-mexart r20*, 3C026, 14/03/2022





Para la galaxia 3C026 que se encuentra a una  $\epsilon = 19.7^\circ$  (0.34 UA), se obtuvo para el primer caso, una  $V = 522.7 \text{ km s}^{-1}$ , un índice espectral  $\alpha = 3.3$  (min.), una razón axial  $AR = 1.3$  (max.), con un error  $\chi^2 = 1.702$ . En el segundo, una  $V = 556.9 \text{ km s}^{-1}$ , un índice espectral  $\alpha = 3.3$  (min.), una razón axial  $AR = 1.2$ , con un error  $\chi^2 = 0.498$ . Aplicando el filtrado, se reduce el ruido en dos cifras, de  $1.3 \times 10^{14}$  pasa a  $6 \times 10^{12}$ , como también la integral, el índice  $m$  y el error  $\chi^2$ , pero un ligero incremento en la velocidad de  $\sim 6.5\%$ .

En la [Figura 5.21](#), se despliega el formato WIPSS generado a partir de los datos de CIP sin filtrar y filtrados para el 14 de marzo del 2022. Sólo 11 radiofuentes estuvieron en rango ( $\epsilon$  entre  $18^\circ$  y  $90^\circ$ ) y cumplieron con los otros criterios explicados en la sección 4.1.2.

Al pasar por la rutina de filtrado y reemplazar algunos valores de la serie de tiempo por la mediana (*multiclean*) y la media (*auto-mexart*), el estimado de la velocidad del VS se ve afectado. En la [Tabla 5.1](#), que conjunta los resultados de ambos WIPSS, en un 60% se da un incremento de un 8% a un 59%, y un decremento de un 3% a un 36%.

Figura 5.21 Formatos WIPSS, *auto-mexart r20*, 14/03/2022

MEXART_WIPSSm_20220314.dat (a) raw														
1	Date	MidObsUT	Dur.	Site	Freq	BW	Source	Size	RA-J2000	Dec-J2000	Limb	Dist.	Lat.	PA
2	20220314	13:20:15	2.0	MXRT	140	12	1759+13	0.2	18 01 38	+13 51 23	W	213.94	1.6	272.8
3	20220314	13:41:13	2.0	MXRT	140	12	1819-096	0.2	18 22 28	-09 38 56	W	210.24	-1.5	268.3
4	20220314	14:59:49	2.0	MXRT	140	12	1938-15	0.2	19 41 15	-15 24 31	W	184.19	-7.5	261.8
5	20220314	16:05:25	2.0	MXRT	140	12	3C422	0.2	20 47 10	-02 36 22	W	143.86	0.3	270.3
6	20220314	16:41:45	2.0	MXRT	140	12	3C433	0.2	21 23 44	+25 04 11	W	144.94	30.8	324.7
7	20220314	17:32:30	2.0	MXRT	140	12	3C444	0.2	22 14 25	-17 01 35	W	88.90	-32.7	234.4
8	20220314	20:11:43	2.0	MXRT	140	12	3C026	0.2	00 54 08	-03 33 55	E	72.39	-2.1	92.3
9	20220314	20:55:17	2.0	MXRT	140	12	3C048	0.2	01 37 41	+33 09 35	E	155.04	34.4	43.2
10	20220314	21:41:42	2.0	MXRT	140	12	3C067	0.2	02 24 12	+27 50 11	E	166.77	24.5	60.7
11	20220314	21:59:58	2.0	MXRT	140	12	3C071	0.2	02 42 40	-00 00 47	E	156.96	2.6	86.9
12	20220314	23:50:00	2.0	MXRT	140	12	3C119	0.2	04 32 36	+41 38 28	E	211.91	6.9	81.1

MEXART_WIPSSm_20220314.dat											
1	Elong	Vel.	V-err	M-value	g-err	Method	Vel.	V-err	g-value	g-err	Method
2	84.3	1003.7	-999	11.574	-999	1-St. PS					
3	77.9	715.7	-999	8.278	-999	1-St. PS					
4	58.9	398.9	-999	14.207	-999	1-St. PS					
5	42.0	426.9	-999	16.253	-999	1-St. PS					
6	42.4	418.1	-999	17.300	-999	1-St. PS					
7	24.4	835.9	-999	8.280	-999	1-St. PS					
8	19.7	522.7	-999	21.291	-999	1-St. PS					
9	46.1	625.7	-999	18.042	-999	1-St. PS					
10	50.9	567.6	-999	9.875	-999	1-St. PS					
11	46.9	429.1	-999	16.966	-999	1-St. PS					
12	80.3	478.8	-999	11.864	-999	1-St. PS					

MEXART_WIPSSm_20220314.dat (b) filtered														
1	Date	MidObsUT	Dur.	Site	Freq	BW	Source	Size	RA-J2000	Dec-J2000	Limb	Dist.	Lat.	PA
2	20220314	13:20:15	2.0	MXRT	140	12	1759+13	0.2	18 01 38	+13 51 23	W	213.94	1.6	272.8
3	20220314	13:52:30	2.0	MXRT	140	12	1830-210	0.2	18 33 39	-21 03 39	W	208.05	-4.7	264.7
4	20220314	14:59:49	2.0	MXRT	140	12	1938-15	0.2	19 41 15	-15 24 31	W	184.19	-7.5	261.8
5	20220314	16:05:25	2.0	MXRT	140	12	3C422	0.2	20 47 10	-02 36 22	W	143.86	0.3	270.3
6	20220314	16:41:45	2.0	MXRT	140	12	3C433	0.2	21 23 44	+25 04 11	W	144.94	30.8	324.7
7	20220314	17:32:30	2.0	MXRT	140	12	3C444	0.2	22 14 25	-17 01 35	W	88.90	-32.7	234.4
8	20220314	20:11:43	2.0	MXRT	140	12	3C026	0.2	00 54 08	-03 33 55	E	72.39	-2.1	92.3
9	20220314	20:55:17	2.0	MXRT	140	12	3C048	0.2	01 37 41	+33 09 35	E	155.04	34.4	43.2
10	20220314	21:41:42	2.0	MXRT	140	12	3C067	0.2	02 24 12	+27 50 11	E	166.77	24.5	60.7
11	20220314	21:59:58	2.0	MXRT	140	12	3C071	0.2	02 42 40	-00 00 47	E	156.96	2.6	86.9
12	20220314	22:37:19	2.0	MXRT	140	12	3C084	0.2	03 19 48	+41 30 42	E	198.49	16.9	66.9
13	20220314	23:50:00	2.0	MXRT	140	12	3C119	0.2	04 32 36	+41 38 28	E	211.91	6.9	81.1

MEXART_WIPSSm_20220314.dat											
1	Elong	Vel.	V-err	M-value	g-err	Method	Vel.	V-err	g-value	g-err	Method
2	84.3	1591.4	-999	2.476	-999	1-St. PS					
3	75.4	922.1	-999	2.660	-999	1-St. PS					
4	58.9	627.4	-999	4.651	-999	1-St. PS					
5	42.0	479.2	-999	12.346	-999	1-St. PS					
6	42.4	468.5	-999	8.961	-999	1-St. PS					
7	24.4	532.1	-999	3.844	-999	1-St. PS					
8	19.7	556.9	-999	13.315	-999	1-St. PS					
9	46.1	406.9	-999	17.354	-999	1-St. PS					
10	50.9	550.7	-999	3.575	-999	1-St. PS					
11	46.9	462.4	-999	8.055	-999	1-St. PS					
12	67.4	321.9	-999	3.139	-999	1-St. PS					
13	80.3	519.4	-999	3.236	-999	1-St. PS					

Se guarda en archivos DAT los valores del espectro de potencias sin y con el *smooth* correspondientes al rango de frecuencias [0.103,10.17] Hz. En el spectra-data se salvan de la frecuencia mayor a la menor y en el spec-data-smooth de menor a mayor, como los mostrados en la [Figura 5.22](#), que fueron generados empleando los datos filtrados.

**Tabla 5.1** Tabla comparativa, WIPSS 14/03/2022

Date	MidObsUT	Source	Vel. Raw	Date	MidObsUT	Source	Vel. Filtered	$V_f/V_r-1$
20220314	13:20:15	1759+13	1003.7	20220314	13:20:15	1759+13	1591.4	59%
20220314	13:41:13	1819-096	715.7	20220314	13:52:30	1830-210	922.1	
20220314	14:59:49	1938-15	398.9	20220314	14:59:49	1938-15	627.4	57%
20220314	16:05:25	3C422	426.9	20220314	16:05:25	3C422	479.2	12%
20220314	16:41:45	3C433	418.1	20220314	16:41:45	3C433	468.5	12%
20220314	17:32:30	3C444	835.9	20220314	17:32:30	3C444	532.1	-36%
20220314	20:11:43	3C026	522.7	20220314	20:11:43	3C026	556.9	7%
20220314	20:55:17	3C048	625.7	20220314	20:55:17	3C048	406.9	-35%
20220314	21:41:42	3C067	567.6	20220314	21:41:42	3C067	550.7	-3%
20220314	21:59:58	3C071	429.1	20220314	21:59:58	3C071	462.4	8%
20220314	23:50:00	3C119	478.8	20220314	22:37:19	3C084	321.9	-33%
				20220314	23:50:00	3C119	519.4	

En la carpeta *df-values* se salva por día los valores de 19 variables para el control y análisis de los resultados en archivos CSV. Un ejemplo de este se presenta en la [Tabla 5.2](#). Aunque RA y DEC son especificadas como campos que contienen 6 y 7 caracteres respectivamente, quedan grabados como números enteros (pendiente por corregir). Se analizaron 26 radiofuentes, de las cuales 12 están fuera de rango, 3 fueron rechazadas y 11 cumplieron con todas las condiciones.

**Figura 5.22** Valores del espectro de potencia, **3C026**, 14/03/2022

3C026-20220314-spectrum.dat			3C026-20220314-spectrum-smooth.dat		
1	10.1749865202	4898265890556.22168	1	0.1030884765	1393938189444202.75000
2	9.7436004728	4919258930950.57910	2	0.1076525932	1383578217799009.75000
3	9.3305037786	5003587115078.13379	3	0.1124187807	1372759571023243.50000
4	8.9349210290	5144349364332.73242	4	0.1173959854	1361461941833967.75000
5	8.5561096901	5325782385483.20703	5	0.1225935497	1349664123868020.50000
3C026-20220314-spectrum.dat			3C026-20220314-spectrum-smooth.dat		
103	0.1225935497	23782821871699864.00000	103	8.5561096901	5385621513817.86035
104	0.1173959854	21290567406361056.00000	104	8.9349210290	5144349364332.73242
105	0.1124187807	17541609982611852.00000	105	9.3305037786	5003587115078.13379
106	0.1076525932	13457269663837606.00000	106	9.7436004728	4919258930950.57910
107	0.1030884765	9916309687999436.00000	107	10.1749865202	4905263570687.67480
108			108		

En la carpeta *df\_spectra* se graban por radiofuente y día, los dos o tres espectros graficados en *spectra-model* en forma numérica, para poder reproducir las imágenes sin la necesidad de procesar los archivos DAT. Un ejemplo de este tipo de archivo se presenta en la [Tabla 5.3](#). El ajuste va de [0.103, 1.448] Hz, el espectro observado va de [0.103, 10.175] Hz, y el arreglo completo va de [0.103, 24.200] Hz.

**Tabla 5.2** Dataframe con variables del Sistema, raw, 14/03/2022

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
2	date	MidObsUT	source	flag	ra	dec	elong	he	S	arc
3	20220314		1621-11	O	162359	-114043	106.8423588		0	0
4	20220314		1638-025	O	164039	-23943	103.5113988		0	0
5	20220314		3C147	O	54236	495107	93.32986524		0	0
6	20220314		3C157	O	61637	223154	100.6078723		0	0
7	20220314		3C318	O	152005	201605	122.5885019		0	0
8	20220314		3C353	O	172028	-5846	93.67092687		0	0
9	20220314		CRAB	O	53431	220052	90.86459405		0	0
10	20220314		HYDRA	O	91805	-120543	142.7713548		0	0
11	20220314	00:42:06	3C138	R	52109	163822	87.41101041	0.863598278	E	179.0596114
12	20220314	13:20:15	1759+13	K	180138	135123	84.31413552	1.638330249	W	2.794971375
13	20220314	13:41:13	1819-096	K	182228	-93856	77.92311531	-1.455397066	W	358.2804272
14	20220314	13:52:30	1830-210	R	183339	-210339	75.38969714	-4.677355404	W	354.682686
15	20220314	14:59:49	1938-15	K	194115	-152431	58.94796	-7.533764887	W	351.8360487
16	20220314	16:05:25	3C422	K	204710	-23622	42.0005087	0.250132612	W	0.30101448
17	20220314	16:41:45	3C433	K	212344	250411	42.38805245	30.8425791	W	54.69784855
18	20220314	17:32:30	3C444	K	221425	-170135	24.42351574	-32.68386975	W	324.3810923
19	20220314	17:43:45	3C446	O	222547	-45701	17.48281373	-6.741473034	W	352.7542412
20	20220314	18:30:17	3C456	O	231228	91929	13.42798	61.88348161	W	73.76288107
21	20220314	18:39:33	2318-16	O	232102	-162305	14.00392871	-69.99406853	W	279.1369499
22	20220314	19:24:06	3C002	O	622	-424	8.223533922	19.44758878	E	142.4856412
23	20220314	20:11:43	3C026	K	5408	-33355	19.67474452	-2.053055235	E	182.2744381
24	20220314	20:55:17	3C048	K	13741	330935	46.14605777	34.37505451	E	133.2383116
25	20220314	21:41:42	3C067	K	22412	275011	50.8667848	24.5195985	E	150.7066164
26	20220314	21:59:58	3C071	K	24240	-47	46.89020154	2.638072098	E	176.8523869
27	20220314	22:37:19	3C084	R	31948	413042	67.39925718	16.91522097	E	156.9333769
28	20220314	23:50:00	3C119	K	43236	413828	80.26763666	6.901179997	E	171.0951963

	noise	integral	mvalue	pa	pd	velocity	alpha	ar	chisq
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	2.4344E+14	4.77852356	2.18598343	89.0596114	0.99897927	1814.73305	3.8	1.3	1.00652282
12	1.2309E+14	133.95532	11.5739069	272.794971	0.99508004	1003.67045	3.79792134	1.10182456	0.20114321
13	2.6331E+14	68.5288284	8.27821409	268.280427	0.97786773	715.708489	3.3	1.3	0.25125804
14	2.0287E+15	1.36091358	1.16658201	264.682686	0.96766383	1205.60639	3.8	1.3	10.150047
15	4.5823E+14	201.830765	14.2067155	261.836049	0.85669915	398.918988	3.3	1.3	0.48268722
16	1.05E+16	264.162713	16.2530832	270.301014	0.6691372	426.906028	3.3	1.3	0.972066
17	5.4507E+15	299.284352	17.2998368	324.697849	0.67414839	418.105069	3.3	1.27954522	1.02796639
18	1.1014E+14	68.5614105	8.28018179	234.381092	0.41347816	835.944024	3.8	1.3	1.09559517
19	3.1616E+14	129.875256	11.3962826	262.754241	0.30041971	457.039838	3.3	1.20920363	2.63627234
20	4.3369E+15	211.246843	14.5343332	343.762881	0.23222292	464.726546	3.3	1.2241135	1.86624417
21	1.019E+14	41.4282341	6.43647684	189.13695	0.24198843	1027.53706	3.8	1.3	0.99401389
22	2.4376E+14	256.5884	16.0183769	52.4856412	0.14303547	780.257991	3.3	0.7	4.01851534
23	1.2524E+14	453.287895	21.2905588	92.2744381	0.33668023	522.654876	3.3	1.29652458	1.70227491
24	2.8762E+15	325.531514	18.0424919	43.2383116	0.72110828	625.688172	3.56032562	1.3	0.04089801
25	4.0282E+14	97.5063151	9.8745286	60.7066164	0.77568066	567.630399	3.3	1.01117533	0.64951712
26	6.8672E+14	287.857723	16.9663704	86.8523869	0.73004542	429.146559	3.3	1.27933959	0.58114403
27	4.9729E+15	8.16010026	2.85658892	66.9333769	0.92320523	703.762383	3.8	1.3	17.4098251
28	1.0056E+14	140.760589	11.8642568	81.0951963	0.98560814	478.763986	3.8	0.99481817	0.13204779

**Tabla 5.3** Dataframe de los espectros de potencia, filtered, 3C026,  
14/03/2022

	A	B	C	D	E	F	G
2		Frec_tot	Power_tot	Frec_obs	Power_obs	Frec_fit	Power_fit
3		0.1030885	1	0.1030885	1	0.1030885	1
4		0.1076526	0.9950329	0.1076526	0.9950329	0.1076526	0.9933215
5		0.1124188	0.9869078	0.1124188	0.9869078	0.1124188	0.9862453
61		1.2718733	0.0300108	1.2718733	0.0300108	1.2718733	0.0125947
62		1.328184	0.0272603	1.328184	0.0272603	1.328184	0.0090564
63		1.3869877	0.0248461	1.3869877	0.0248461	1.3869877	0.0072944
64		1.4483949	0.0226982	1.4483949	0.0226982	1.4483949	0.0069155
65		1.5125208	0.0207447	1.5125208	0.0207447		
106		8.934921	0.0038182	8.934921	0.0037267		
107		9.3305038	0.0037721	9.3305038	0.0036474		
108		9.7436005	0.0037359	9.7436005	0.0035378		
109		10.174987	0.0037143	10.174987	0.0035311		
110		10.625472	0.003708				
126		21.250943	0.0026512				
127		22.191803	0.0025394				
128		23.174318	0.0024441				
129		24.200333	0.0022886				

El archivo log correspondiente es el mostrado en la [Figura 5.23](#). Se mandó analizar todo el mes de marzo del 2022, detectando 779 fuentes de CIP de los 839 archivos DATs disponibles. Procesando la información en un tiempo ~3hrs. Para finalizar hace un recuento del número de archivos analizados, cuantos estuvieron en rango o fuera de rango, con NaNs o sin ellos, contaminados o rechazados, lista los archivos con problemas.

Para complementar el reporte al operador, ver [Figura 5.24](#), se salvan en archivos separados en la carpeta de *logs*, la lista de archivos de entrada que estuvieron fuera de rango y por lo cual no fueron analizados, *out\_range*, los contaminados con ruido de tal forma que al integrar para el cálculo del índice m, resultado negativa, *contaminated*, y los rechazados por las otras tres

condiciones, *rejected*. Si se llegara a detectar una radiofuente que no estuviera en el catálogo, también es reportada.

**Figura 5.23** Vista parcial de archivo LOG, *auto-mexart r20*, filtered, 03/2022

```

log-20240405-192523.txt
1
2 A U T O - M E X A R T
3
4 BEGING at Fri Apr 5 19:25:23 2024
5 Running ... auto-r20.py to year = 2022
6 WIPSS Directory ... ./wipss/r20/w2022f/
7 779 Files were Found to Analyze
8
9 PROCESSING the file #1/779 => ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-01/3C456/20220301_3C456.dat
10 (1) Computing elongation & others
11 elong = 18.596862866534185
12 (2) Obtaining Time Series
13 ==> There are(is) 240 NANS
14 (3) Obtaining Wavelet
15 (4) Calculating the M-Index
16 (5) Generating the Power Spectrum Data file
17 (6) Generating the Power Spectrum Data Smooth file
18 (7) Calculating SPEED
19
20 `ftol` termination condition is satisfied.
21 Function evaluations 20, final cost= 0.02943962991359963 & first-order optimality= 1.764911225218442e-05
22
23 (8) Reconstructing the Theoretical Spectrum
24 (9) Calculating Chi Square
25 (10) Plotting the REAL & THEORETICAL SPECTRUM

11818 PROCESSING the file #779/779 => ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-31/1759+13/20220331_1759+13.dat
11819 (1) Computing elongation & others
11820 elong = 99.1677462130998
11821
11822 * The ELONGATION parameter is OUT OF RANGE (< 18° or > 90°) *
11823 Elongation = 99.1677462130998
11824
11825 *****
11826 S u m m a r y
11827
11828 It were processed 779 radio sources
11829 460 of them were in range: 389 with nans + 71 without nans
11830 319 of them were OUT OF RANGE
11831
11832 1 of them were Contaminated
11833
11834 The spectrum of 94 of them were REJECTED

11836 This file was not included in the WIPSS file because Elongation was out of range => ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-01/1638-025/20220301_1638-025.dat
11837 This file was processed but the spectrum was rejected => ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-01/2318-16/20220301_2318-16.dat
11838 This file was not included in the WIPSS file because Elongation was out of range => ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-01/3C444/20220301_3C444.dat
11839 This file was not included in the WIPSS file because Elongation was out of range => ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-01/3C318/20220301_3C318.dat
11840 This file was processed but the spectrum was rejected => ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-01/3C353/20220301_3C353.dat
11841 This file was not included in the WIPSS file because Elongation was out of range => ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-01/3C446/20220301_3C446.dat
11842 This file was not included in the WIPSS file because Elongation was out of range => ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-01/3C147/20220301_3C147.dat
11843 This file was not included in the WIPSS file because Elongation was out of range => ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-01/1621-11/20220301_1621-11.dat

12224 This file was processed but the spectrum was rejected => ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-31/3C444/20220331_3C444.dat
12225 This file was not included in the WIPSS file because Elongation was out of range => ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-31/3C318/20220331_3C318.dat
12226 This file was not included in the WIPSS file because Elongation was out of range => ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-31/3C353/20220331_3C353.dat
12227 This file was not included in the WIPSS file because Elongation was out of range => ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-31/1819+096/20220331_1819+096.dat
12228 This file was not included in the WIPSS file because Elongation was out of range => ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-31/1621-11/20220331_1621-11.dat
12229 This file was not included in the WIPSS file because Elongation was out of range => ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-31/3C002/20220331_3C002.dat
12230 This file was not included in the WIPSS file because Elongation was out of range => ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-31/HYDRA/20220331_HYDRA.dat
12231 This file was not included in the WIPSS file because Elongation was out of range => ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-31/1830-210/20220331_1830-210.dat
12232 This file was not included in the WIPSS file because Elongation was out of range => ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-31/1759+13/20220331_1759+13.dat
12233
12234 *****
12235 GENERATING THE WIPSS FILES & Dataframe Files ...
12236
12237 ENDING at Fri Apr 5 22:25:04 2024

```

**Figura 5.24** Vista parcial de listas de archivos con problemas, *auto-mexart r20*, filtered, 03/2022

```

out_range-20240405-192523.txt (a)
1 ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-01/1638-025/20220301_1638-025.dat
2 ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-01/3C444/20220301_3C444.dat
3 ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-01/3C318/20220301_3C318.dat
4 ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-01/3C446/20220301_3C446.dat
5 ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-01/3C147/20220301_3C147.dat

```

```

contaminated-20240405-192523.txt (b)
1  ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-17/3C002/20220317_3C002.dat

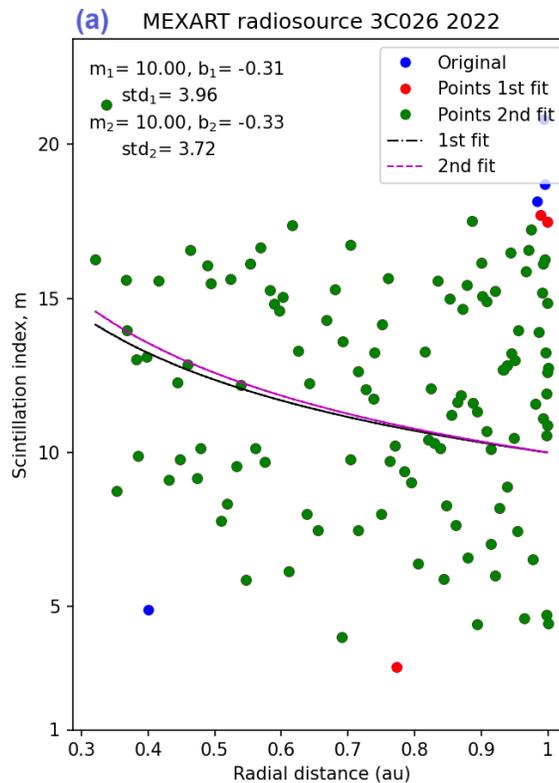
rejected-20240405-192523.txt (c)
1  ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-01/2318-16/20220301_2318-16.dat
2  ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-01/3C353/20220301_3C353.dat
3  ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-01/3C084/20220301_3C084.dat
4  ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-02/3C353/20220302_3C353.dat
5  ../mexart/r7/2022/filtered/2022-03-02/1830-210/20220302_1830-210.dat

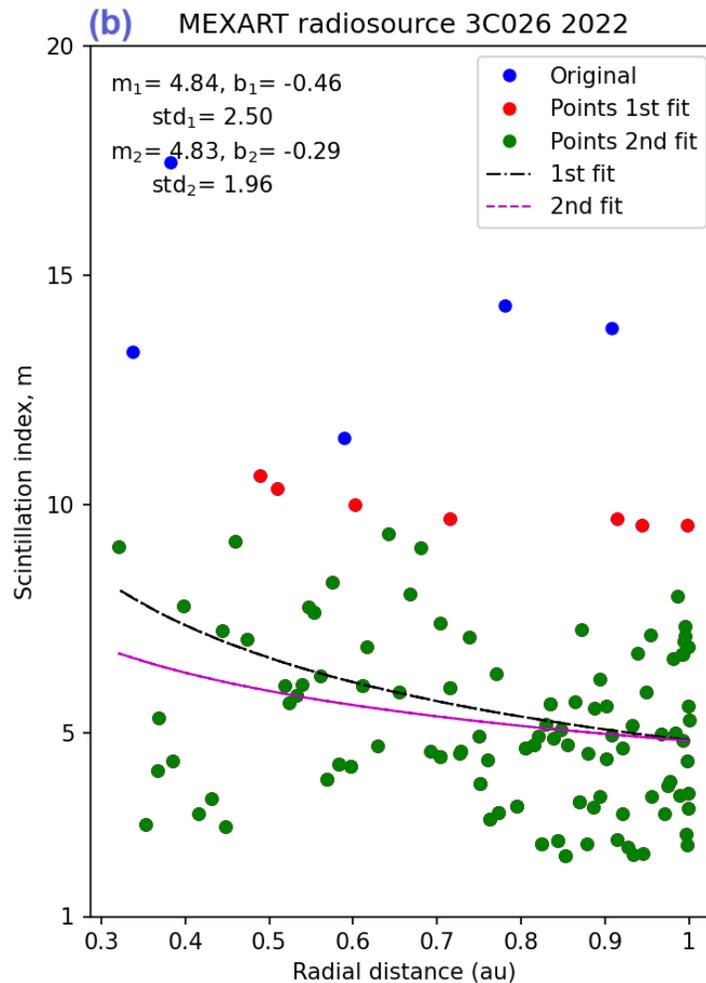
```

### 5.1.3 Wipss (Índice g)

Para obtener los índices g anuales, se requiere primeramente ajustar los índices m a la [ecuación \(2.6\)](#), en las gráficas de la [Figura 5.25](#) se presenta en (a) la correspondiente a los datos sin filtrar y en el (b) la obtenida con los datos filtrados.

**Figura 5.25** Ajuste anual de índices m, 3C026, 2022, *wipss r6*





Con los datos en crudo, sólo 6 mediciones son descartadas (3 en el 1<sup>er</sup> ajuste y 3 en el 2<sup>o</sup> ajuste) versus 12 con los datos filtrados. Aunque la pendiente en (a) es  $\sim 2$  veces que en (b) y la desviación es 190% más elevada en los datos en crudo. El vector de índices  $g$  se obtiene empleando la [ecuación \(2.7\)](#). Sus mapas de CIP se presentan en la [Figura 5.26](#), la radiofuente **3C026** es la más cercana al Sol a casi 20 UA, con un PA  $\sim 90^\circ$ .

En este programa se conjunta la información de los WIPSS diarios con índices  $m$ , generados por *auto-mexart*, a uno anual, [Figura 5.27](#), reemplazando los valores de la columna de índice de CIP por su correspondiente índice  $g$ . En este ejemplo, se están visualizando los resultados de los datos sin filtrar, con 3,999 líneas. Además, se generan WIPSS diarios.

Figura 5.26 Mapas CIP, 14/03/2022, *wipss r6*

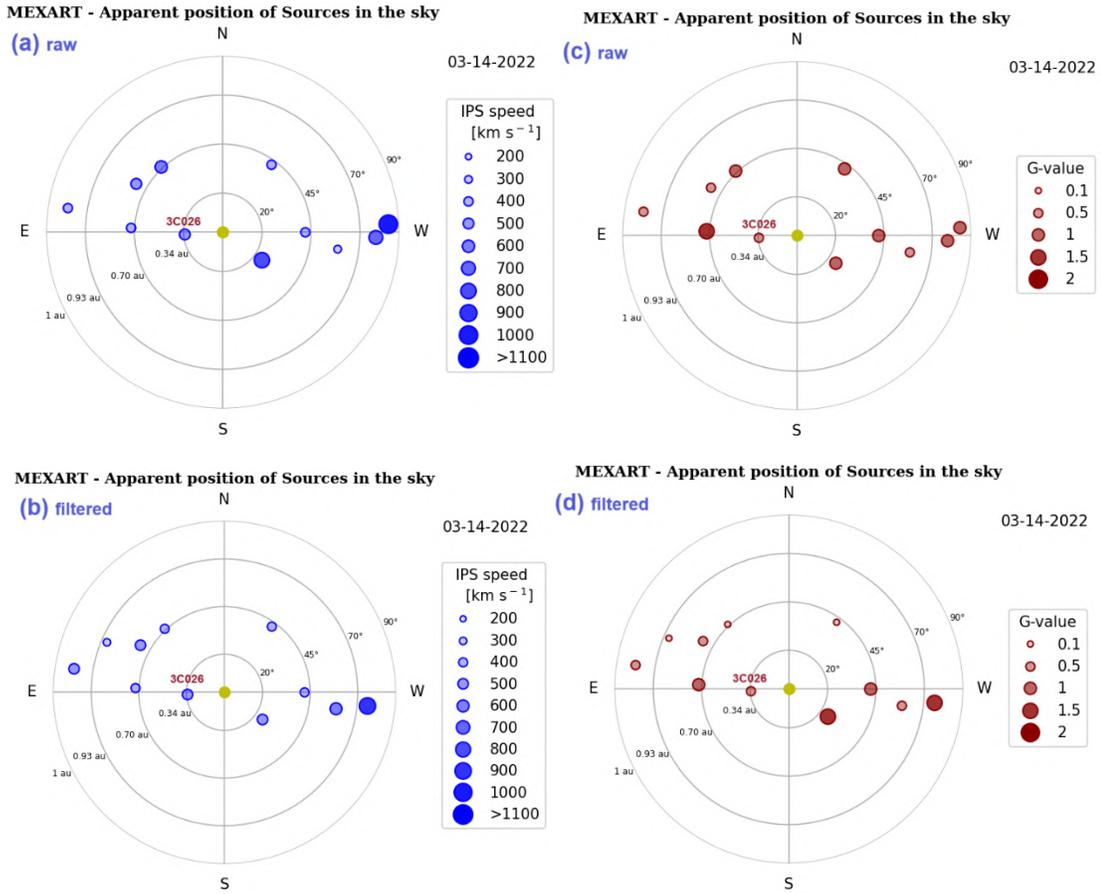


Figura 5.27 Vista parcial del formato WIPSS anual, *wipss r6*, 2022

1	Date	MidObsUT	Dur.	Site	Freq	BW	Source	Size	RA-J2000	Dec-J2000	Limb	Dist.	Lat.	PA
2	20220101	00:11:07	2.0	MXRT	140	12	3C002	0.2	00 06 22	-00 04 24	E	211.47	4.1	82.1
3	20220101	00:58:44	2.0	MXRT	140	12	3C026	0.2	00 54 08	-03 33 55	E	214.98	0.3	89.7
4	20220101	13:14:21	2.0	MXRT	140	12	3C283	0.2	13 11 40	-22 17 04	W	209.57	0.2	270.2
5	20220101	14:21:40	2.0	MXRT	140	12	3C298	0.2	14 19 08	+06 28 34	W	205.30	8.8	281.0

1	Elong	Vel.	V-err	g-value	g-err	Method	Vel.	V-err	g-value	g-err	Method
2	79.6	758.7	-999	1.246	-999	1-St.					
3	89.2	545.8	-999	1.274	-999	1-St.					
4	77.1	430.2	-999	1.688	-999	1-St.					
5	72.7	273.5	-999	1.600	-999	1-St.					

3997	20221229	23:30:19	2.0	MXRT	140	12	3C459	0.2	23 16 35	+04 05 18	E	205.31	8.2	80.9
3998	20221230	13:23:12	2.0	MXRT	140	12	3C283	0.2	13 11 40	-22 17 04	W	208.00	0.2	270.3
3999	20221230	15:31:01	2.0	MXRT	140	12	3C318	0.2	15 20 05	+20 16 05	W	196.33	17.9	299.9
4000	20221230	23:26:22	2.0	MXRT	140	12	3C459	0.2	23 16 35	+04 05 18	E	204.28	8.7	80.4

3997	72.7	560.1	-999	0.254	-999	1-St.					
3998	75.3	190.9	-999	1.325	-999	1-St.					
3999	65.9	292.0	-999	1.169	-999	1-St.					
4000	71.8	852.3	-999	0.717	-999	1-St.					

Una vista parcial del archivo log correspondiente a esta corrida se muestra en la [Figura 5.28](#). Le tomo ~6 min el procesar la información de las 51 radiofuentes observadas en el 2022.

**Figura 5.28** Vista parcial de archivo LOG, *wipss r6*, raw, 2022

```

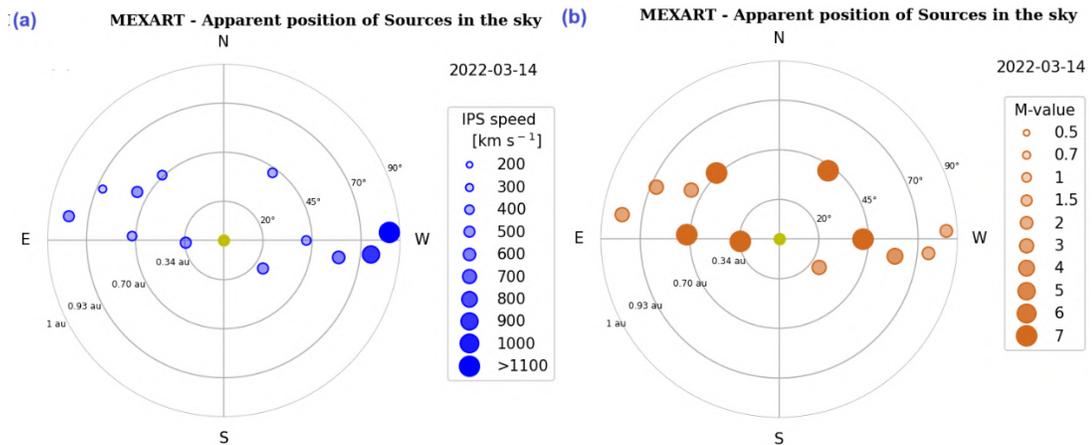
1
2 INDEXES M & INDEX G - M E X A R T
3
4 BEGING at Tue Apr 16 19:10:07 2024
5 Running ... wipss-r6.py to date = 2022
6 1. Loading the information of 301 WIPSS files
7 2. Processing 51 Radio Sources
8 *** #1/51 0403-132 ***
9 (a) Calculating M* index (data fitting)
10 First approximation
11 Second approximation
12 (b) Plotting the M & M* INDEXES
13 (c) Calculating G INDEXES
14 (d) Storing G INDEXES

358 *** #51/51 HYDRA ***
359 (a) Calculating M* index (data fitting)
360 First approximation
361 Second approximation
362 (b) Plotting the M & M* INDEXES
363 (c) Calculating G INDEXES
364 (d) Storing G INDEXES
365
366 283 data will be deleted out of a total of 3999 due to the adjustment
367
368 3. Generating the new DAILY + ANNUAL WIPSS FILE 2022 WIPSS FILEs with G-Index
369 4. Plotting RADIO SOURCES MAP
370
371 ENDING at Tue Apr 16 19:16:27 2024
    
```

### 5.1.4 MapV & MapM (Mapas de centelleo)

En la [Figura 5.29](#), se muestran los mapas generados para el 14 marzo del 2022, el inciso (a) por *mapv* y el inciso (b) por *mapm*.

**Figura 5.29** Mapas CIP, 14/03/2022, *mapv&mapm r2*

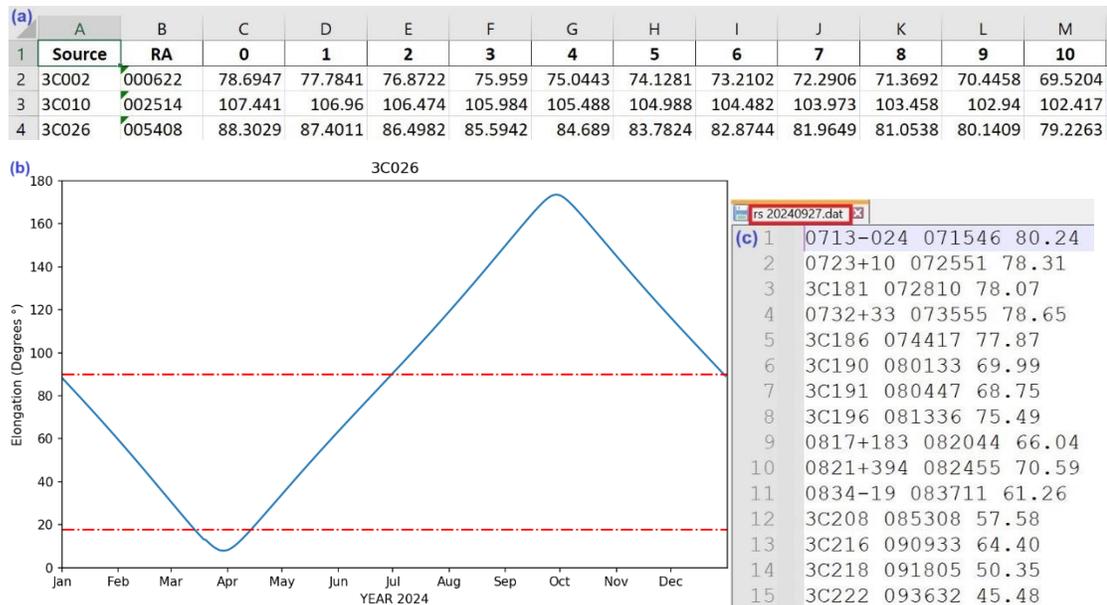


**Figura 5.15** Graficas de potencia, *multiclean r7*, 3C026, 14/03/2022

### 5.1.5 Elong (Programar observaciones)

Como el fin de programar más eficientemente las observaciones se elaboró el programa *elong*. En la [Figura 5.30](#) inciso (a) se muestra las primeras líneas del archivo en Excel, con formato *xlsx*, donde por radiofuente se especifica su ascensión recta y los ángulos de elongación para cada uno de los días del año 2024. En el inciso (b), la gráfica de los ángulos para la fuente 3C026. Y en el inciso (c), la lista de radiofuentes válidas para el día 27 septiembre 2024, donde también se anexa su *RA* y  $\epsilon$ .

**Figura 5.30** Graficas de potencia, *multiclean r7*, 3C026, 14/03/2022



## 5.2 Parker Solar Probe

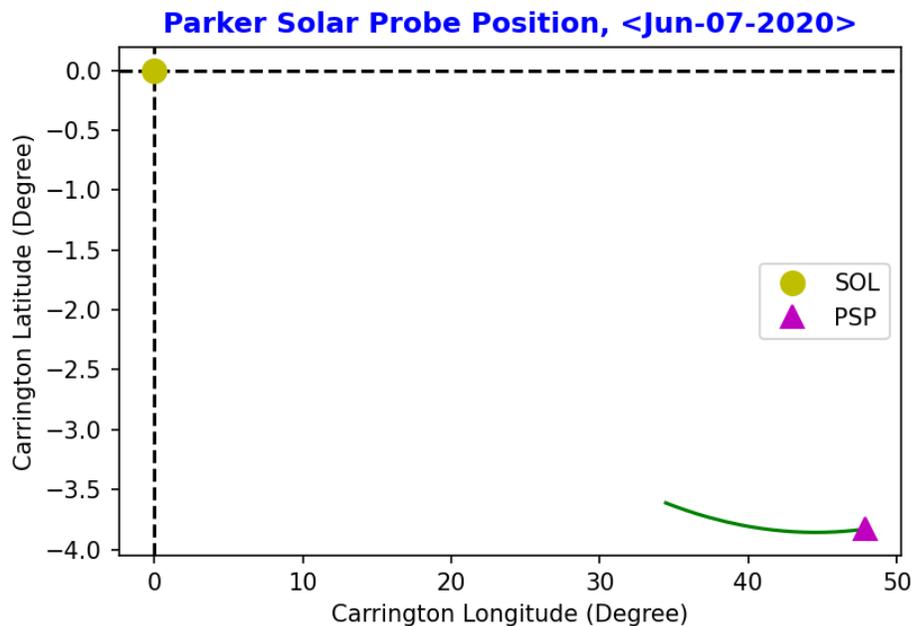
Una descripción de los instrumentos y productos de archivos se presentó en la [sección 3.2.1](#). El programa *sweap* es explicado en la [sección 4.2](#) de Metodología. Para obtener el soporte a los archivos CDF instalé la librería *pycdf* en ambiente *Windows*, pero tuve errores al ejecutar en *Linux*, por lo que usé la librería *cdflib*, que funciona bien en ambas plataformas.

Inicié la programación con el acceso y manejo de los datos a nivel L3 de la SPC. En este nivel, el instrumento proporciona además de la velocidad y la densidad del VS, la ubicación y velocidad de la sonda, la velocidad térmica

y banderas sobre la calidad de los datos. A continuación, en la [Figura 5.29](#) se grafican cada uno de estos parámetros para el 7 junio 2020, en el día de su máxima aproximación al Sol durante su 5° encuentro.

Primeramente, en la [Figura 5.31](#) se muestra la ubicación de la nave alrededor del Sol en coordenadas Carrington, estando el origen en el centro del Sol. La PSP se encuentra entre  $[3.5^\circ, 4^\circ]$  por debajo del ecuador solar y entre  $[33^\circ, 48^\circ]$  con respecto al meridiano central. La posición final de la sonda está indicada con el triángulo.

**Figura 5.31** PSP, 5° Perihelio, Coordenadas Carrington

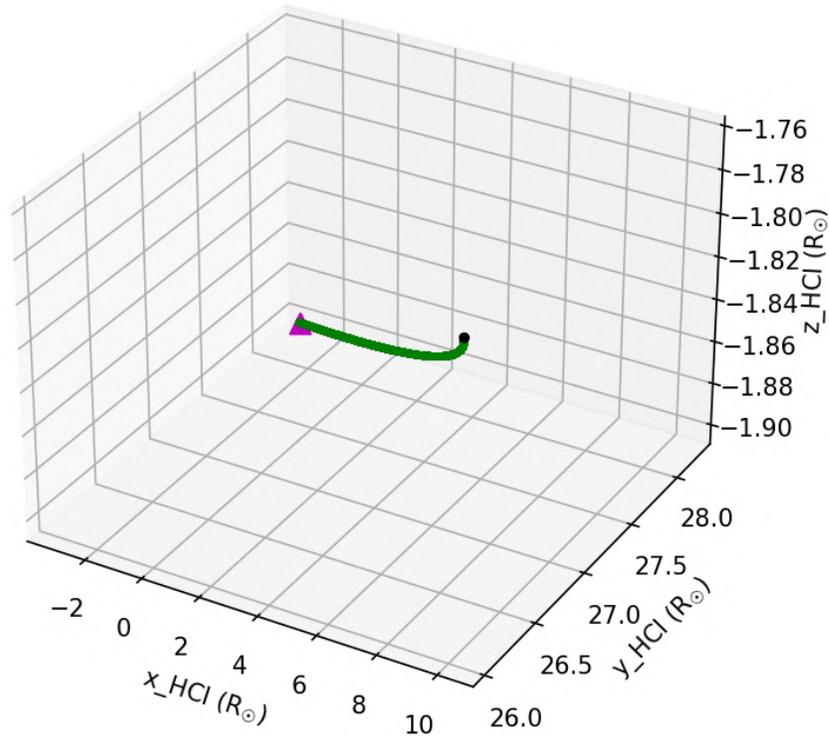


La rotación solar es variable con la latitud, profundidad y tiempo. La rotación Carrington es un sistema de referencia empleado para comparar ubicaciones en el Sol durante un período de tiempo. Carrington midió en 1850 la tasa de rotación de las manchas solares de baja latitud como de 25.38 días en relación a las estrellas (rotación sideral) y de 27.2753 días en referencia al movimiento de la Tierra alrededor del Sol (rotación sinódica). Los ejes están en el ecuador geográfico solar, latitud  $0^\circ$ , y en el meridiano central, línea Sol-Tierra, para la longitud  $0^\circ$ .

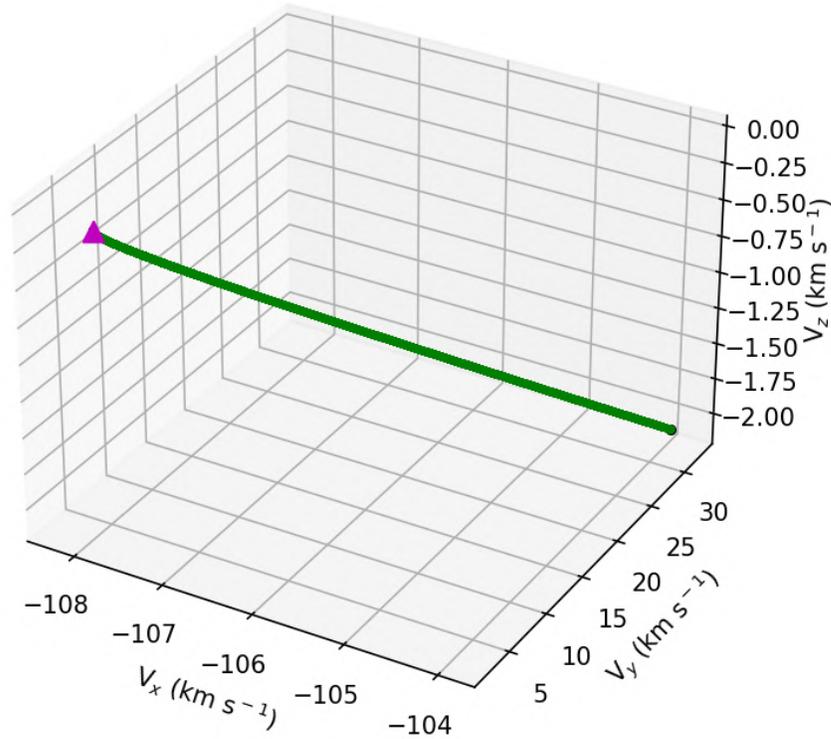
En la [Figura 5.32](#), se muestra la posición de la PSP en radios solares y su velocidad en  $\text{km s}^{-1}$  bajo el sistema inercial heliocéntrico eclíptico J2000 (HCI), donde el punto negro marca la posición inicial y el triángulo magenta la posición final.

**Figura 5.32** PSP, 5° Perihelio, Sistema HCI

**Parker Solar Probe, <Jun-07-2020>  
PSP Spacecraft Position**

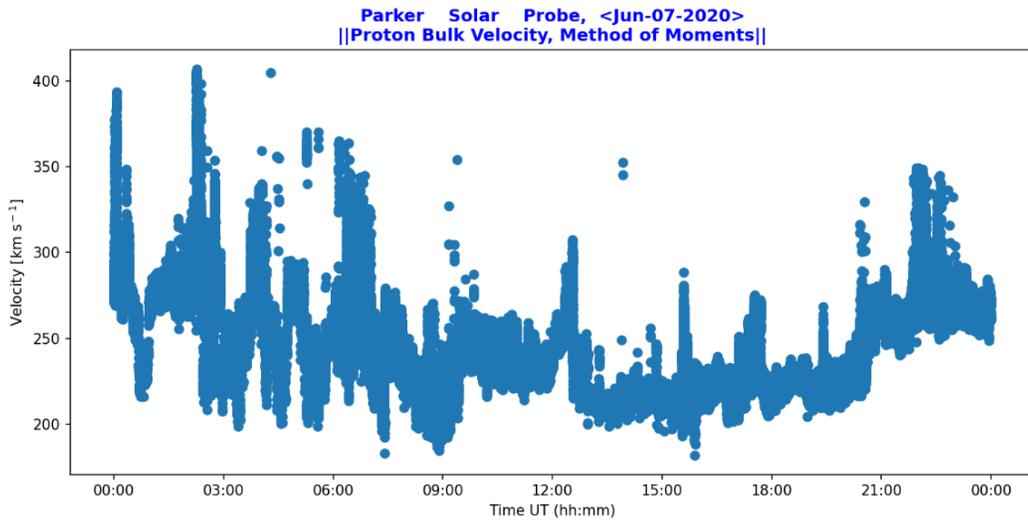


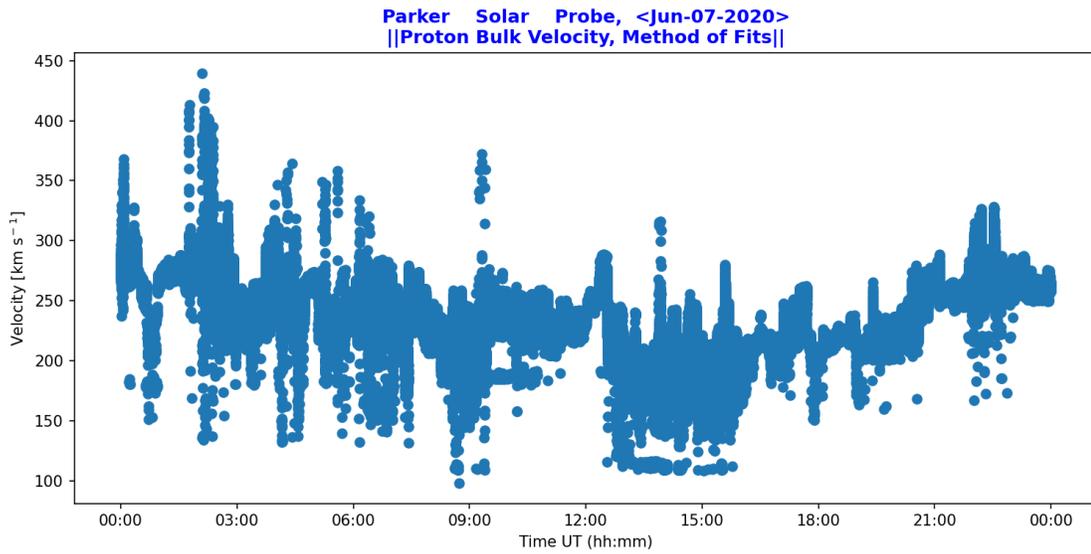
**Parker Solar Probe, <Jun-07-2020>  
PSP Spacecraft Velocity, HCI**



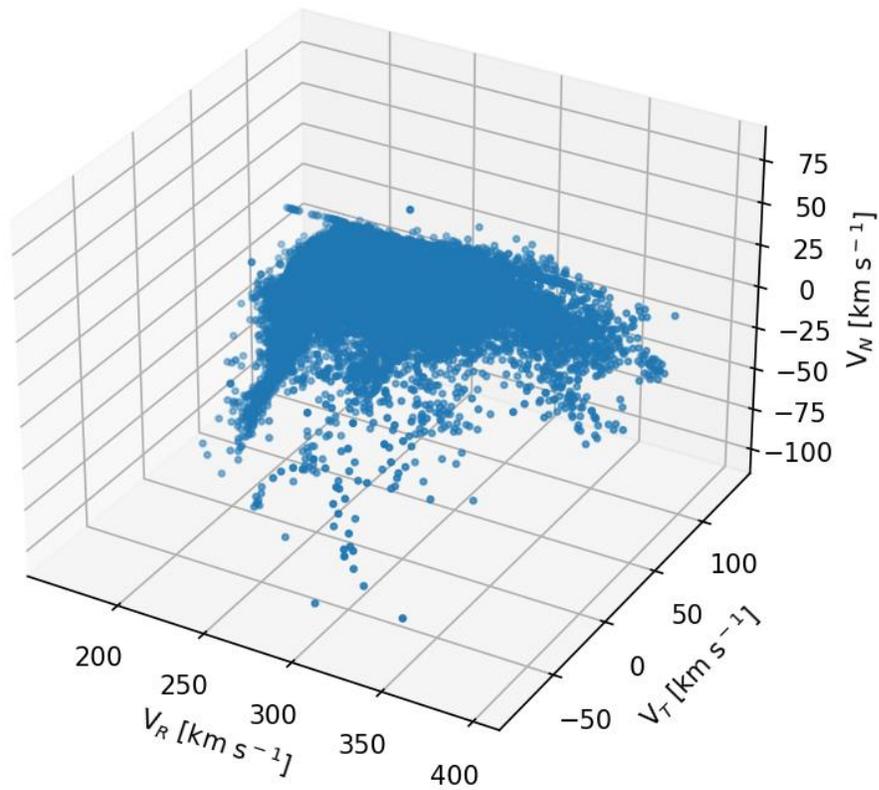
A continuación, se presenta en la [Figura 5.33](#) la rapidez de los protones con el método de momentos y de ajuste, [sección 3.2.1](#), y su velocidad por ambos métodos, empleando el marco de referencia heliocéntrico RTN.

**Figura 5.33** Velocidad de Protones Detectados, PSP, 5°Perihelio

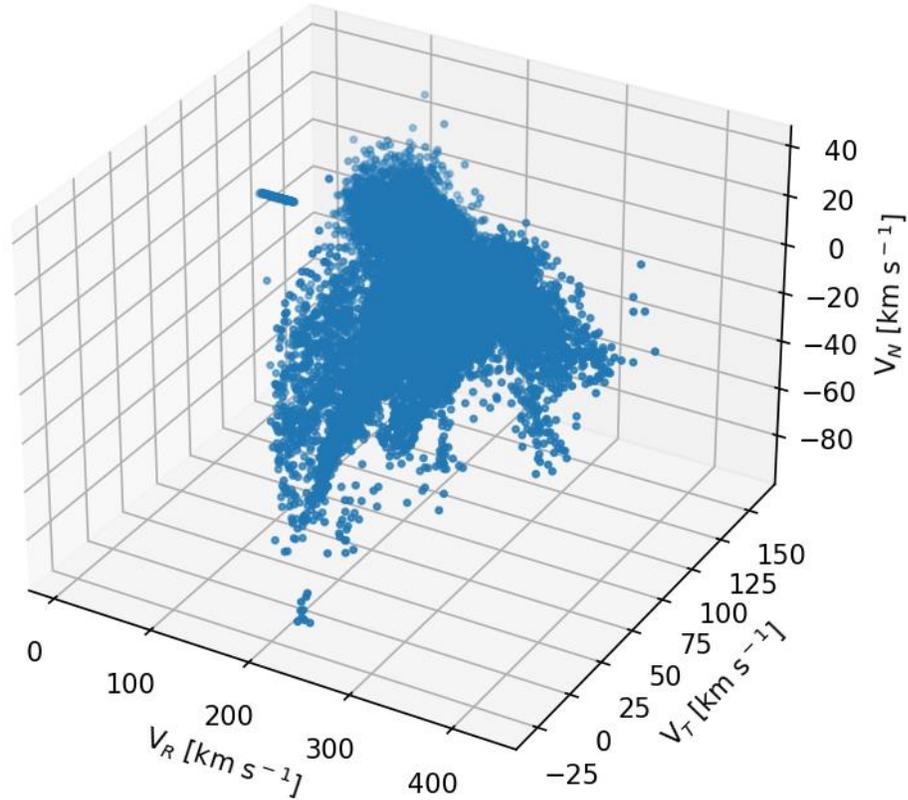




Parker Solar Probe, <Jun-07-2020>  
Proton Bulk Velocity, Method of Moments



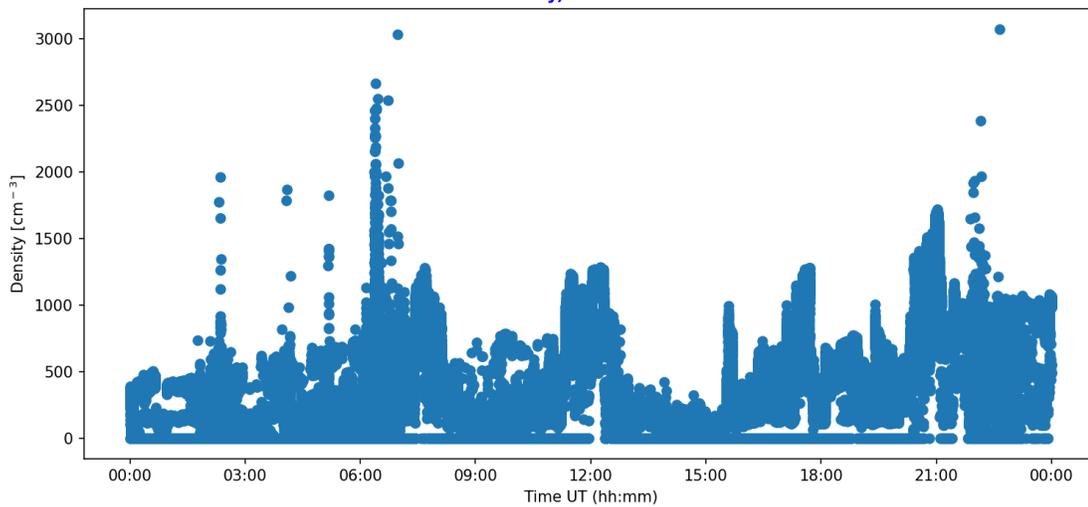
**Parker Solar Probe, <Jun-07-2020>  
Proton Bulk Velocity, Method of Fits**

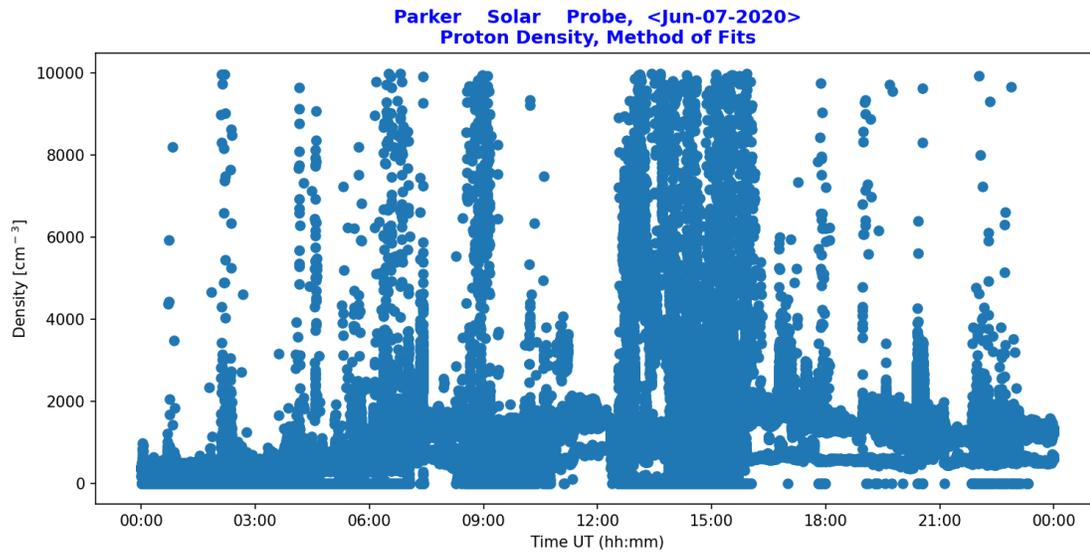


En seguida, [Figura 5.34](#), la densidad de protones por los dos métodos.

**Figura 5.34** Densidad de Protones, PSP, 5° Perihelio

**Parker Solar Probe, <Jun-07-2020>  
Proton Density, Method of Moments**





Adicionalmente, es necesario cotejar las banderas de calidad de los datos. En la [Figura 5.35](#) se encuentra el listado de las *Data Quality Flagnames DQF* del 7 de jun. 2020.

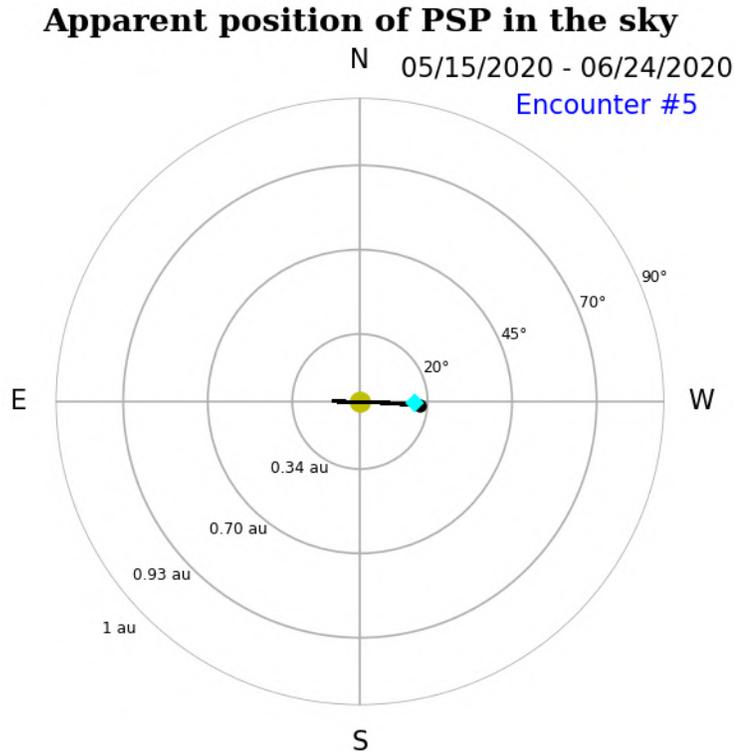
En la [Figura 5.36](#), una tabla parcial con sus valores, para una mejor visualización sólo se listarán hasta la DQF número 24 pues los campos del 24 a la 31 no son usados conforme se especifica en la [Figura 5.35](#).

Para ubicar a la Parker Solar Probe en el mapa de radiofuentes se utilizaron las [ecuaciones \(2.30\)](#) y [\(2.31\)](#). La [Figura 5.37](#), muestra el desplazamiento de la PSP del 15 de mayo al 24 de junio del 2020, durante su 5<sup>o</sup> acercamiento al Sol. El 15 de mayo inicia su trayectoria, punto negro a una  $\epsilon \sim 18^\circ$  y  $\gamma \sim -1^\circ$ , por debajo de la eclíptica. El ángulo formado entre la línea Sol-Tierra y Tierra-PSP va disminuyendo hasta llegar a una  $\epsilon \sim 0.04^\circ$  y  $\gamma \sim -0.004^\circ$  (3 de junio) pasa por el centro del Sol, y continua su ruta del lado Este del Limbo, trasladándose hasta una  $\epsilon \sim 16^\circ$  y  $\gamma \sim -0.03^\circ$  (24 de junio), representado por el rombo color aqua.

**Figura 5.35** Descripción de las banderas empleadas por la SPC de la PSP**Data Quality FLAGNAMES**

The Names of the Data Quality Array Fields
(0) general flag
(1) primary peak low signal
(2) no primary peak detected
(3) cold primary peak or current spike detected
(4) sensor saturated
(5) primary peak not bound
(6) poor Maxwellian fit to primary peak
(7) flow direction poorly constrained or undetermined
(8) alpha peak low signal/not identified
(9) poor Maxwellian fit to alpha peak
(10) alpha peak not bound
(11) wind speed off scale high
(12) wind speed off scale low
(13) wind speed off scale unknown
(14) likely proton-alpha confusion
(15) unusually high noise levels detected
(16) proton full-scan mode (not peak-tracking)
(17) reduced data quality: anomalous periodic noise type A, (>1 Hz)
(18) reduced data quality: anomalous periodic noise type B (< 1Hz)
(19) temperature/survival heater cycling: potential fluctuations
(20) reduced data quality: broadband or other anomalous noise (type C)
(21) fragmented or incomplete spectrum measured
(22) energy ranging/peak tracking error
(23) spacecraft maneuver
(24) not used/TBD
(25) not used/TBD
(26) not used/TBD
(27) not used/TBD
(28) not used/TBD
(29) not used/TBD
(30) not used/TBD
(31) not used/TBD



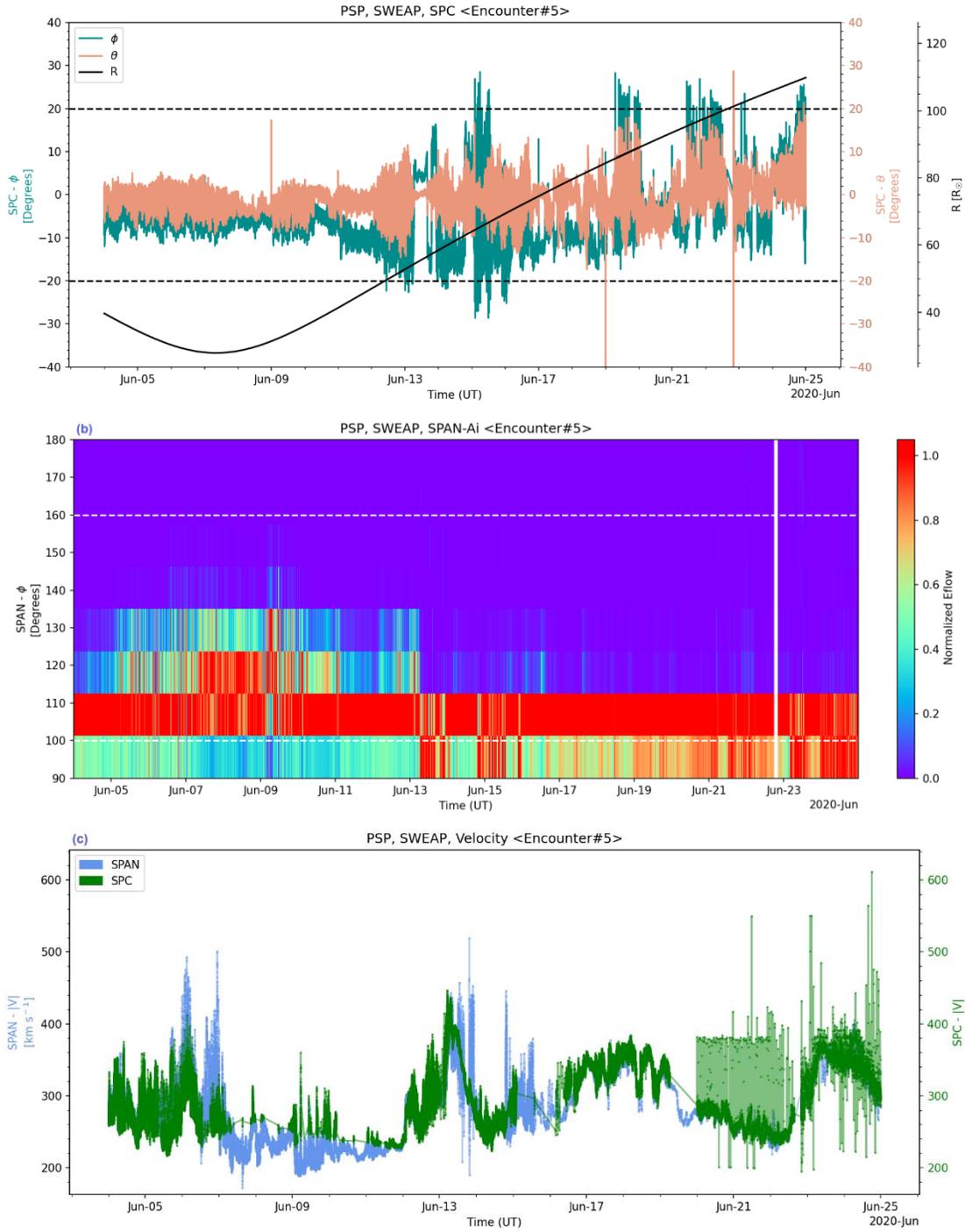
**Figura 5.37** Posición de la PSP en el mapa de CIP, encuentro 5

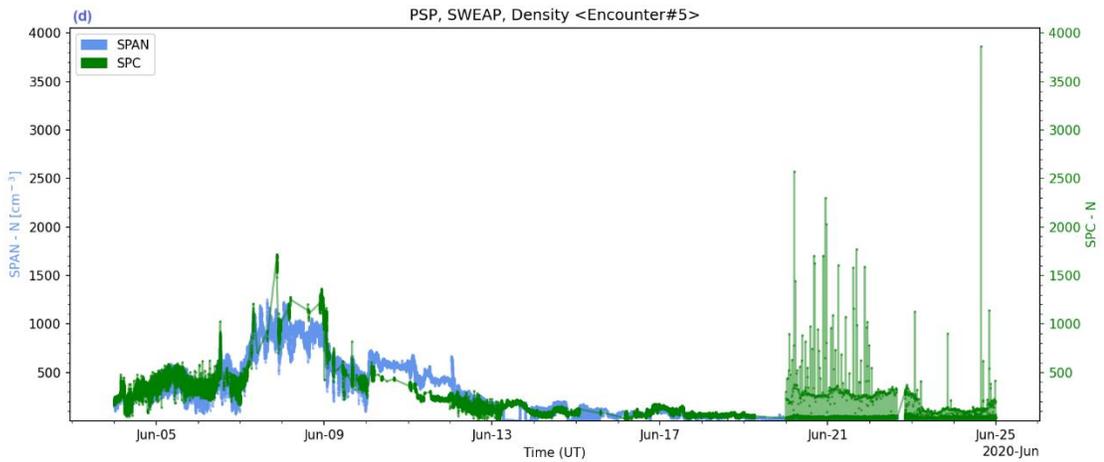
A continuación, en la [Figura 5.38](#), se presentan los valores registrados por ambos instrumentos, SPC y SPAN-Ai, durante los días de campaña del ILT del encuentro 5, que corresponde del 4 al 24 de junio del 2020.

Si los ángulos  $\phi$  y  $\theta$  de la SPC, inciso a, oscilan entre  $-20^\circ$  y  $20^\circ$ , el instrumento se encuentra en buena posición. En el SPAN, inciso b, si  $\phi$  está entre el segundo y el penúltimo nivel especificado por el instrumento, que en este caso corresponden a  $\sim 100^\circ$  y  $\sim 160^\circ$ , es adecuado. Lo ideal sería que del 80% al 90% de la distribución de velocidades se encuentre dentro del rango, pero el FOV fue obstruido y solo logra observar algo más de la mitad de éste.

En los incisos c y d se muestran la velocidad y la densidad del VS registrada en esos días. Por la distancia de la sonda al Sol, se espera que la SPC sense de forma más representativa las partículas del VS, aunque algunas lecturas estuvieron fuera del rango de  $-20^\circ$  a  $20^\circ$  del SPC como las del 15 junio.

Figura 5.38 PSP, SWEAP, SPC & SPAN Ai, 04-24/jun/2020

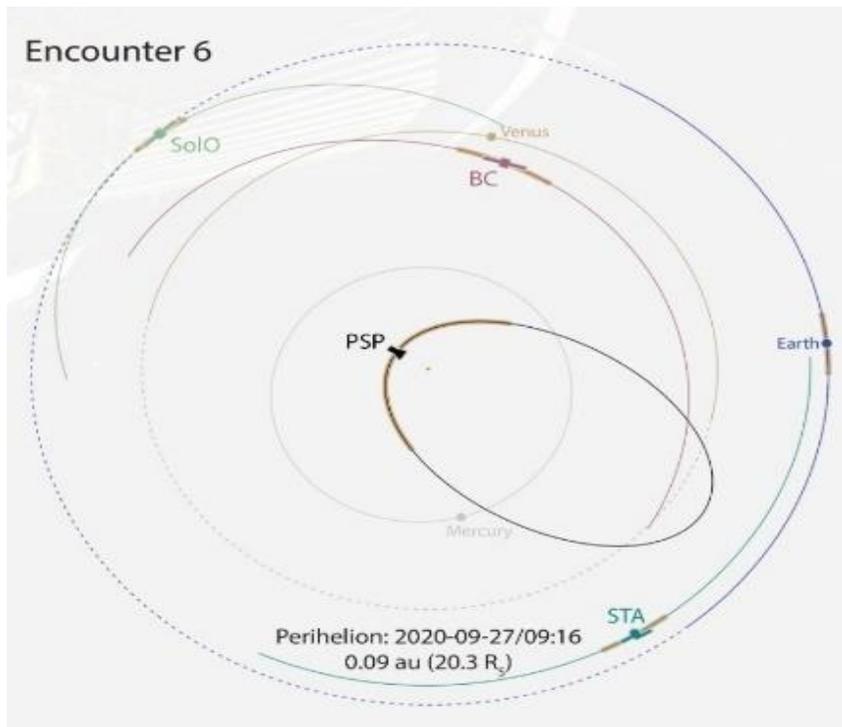


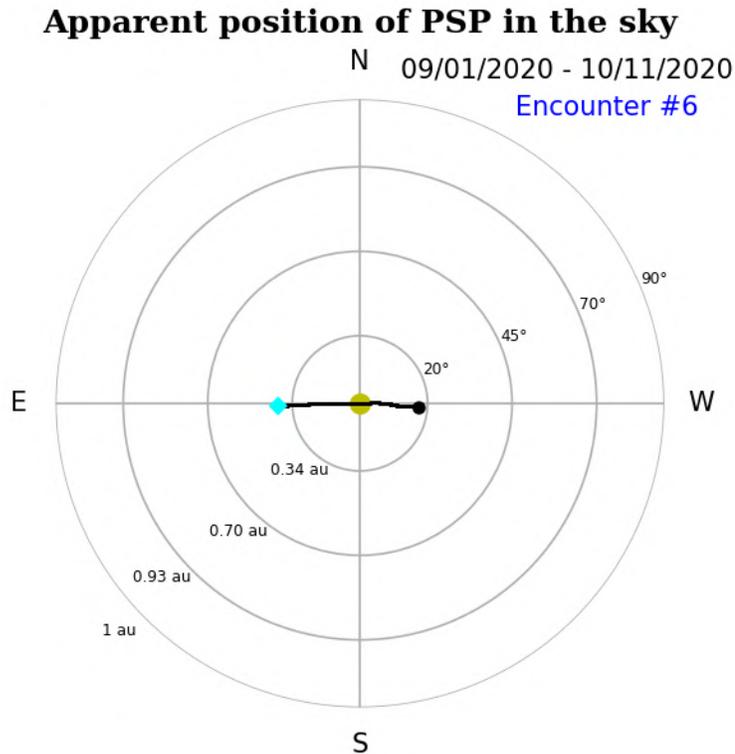


### 5.3 Caso de Estudio. - Encuentro 6

En su 6º perihelio al Sol, el 27 de septiembre de 2020 a las 09:16 UT, la Parker Solar Probe estuvo a una distancia de 0.09 UA y a un ángulo de 143° entre la línea Sol-PSP y Sol-Tierra, + en sentido horario, conforme se muestra en la [Figura 5.39](#), superior. En la imagen inferior, se muestra la posición de la PSP en el mapa de CIP durante el encuentro 6.

**Figura 5.39** Encuentro 6, PSP





Nota. (Sup.) Tomada de <https://psp-gateway.jhuapl.edu/website/SciencePlanning/Encounters/>

### 5.3.1 Condiciones del Clima Espacial

En este encuentro, el Sol estuvo en la fase inicial del ciclo solar número 25; es decir, en sus niveles más bajos de actividad. El número de EMC registradas de forma automatizada por el sistema CACTus durante septiembre de 2020 fueron doce del 4 al 18 de septiembre más otras nueve clasificadas como flujos (*flow*), que son posiblemente EMC de menor intensidad, del 1 al 9 de septiembre del 2020.

Adicionalmente, en el catálogo de EMC de *SOHO/LASCO* ([Brueckner et al., 1995](#)), hay 47 eventos documentados en septiembre del 2020, de los cuales 8 se dieron entre el 24 al 30 de septiembre del 2020, aunque clasificados como eventos de muy baja intensidad (*poor & very poor events*).

### 5.3.2 Datos de CIP (ILT, ISEE, MEXART)

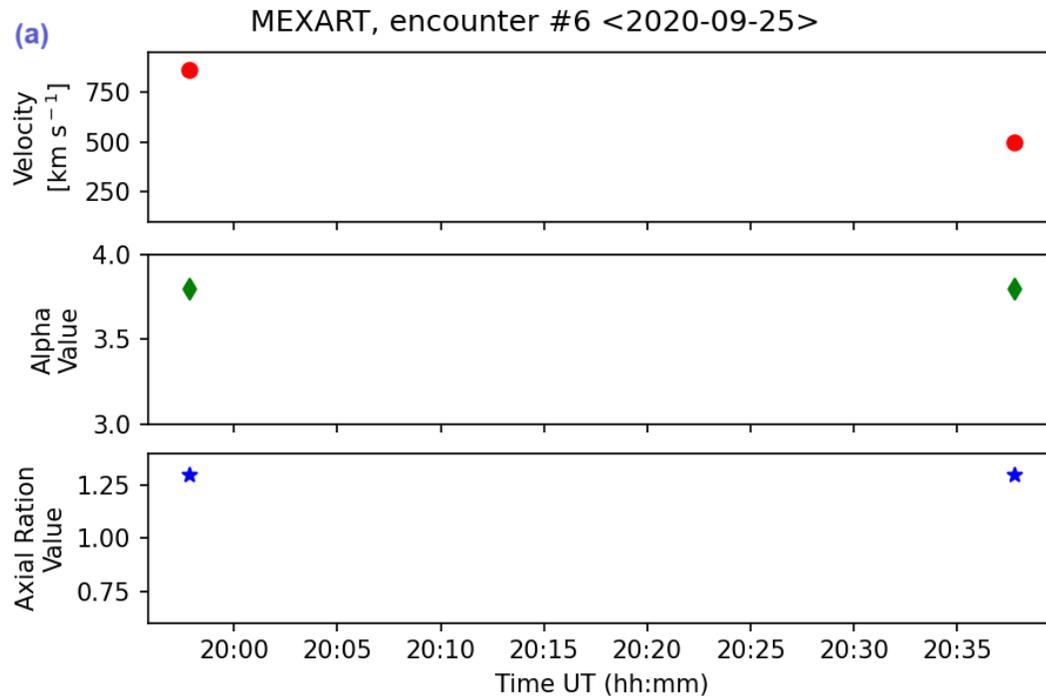
En la campaña de ILT para el encuentro no. 6 se observaron diariamente un total de 7 radiofuentes en 7 días del 24 al 30 de septiembre del

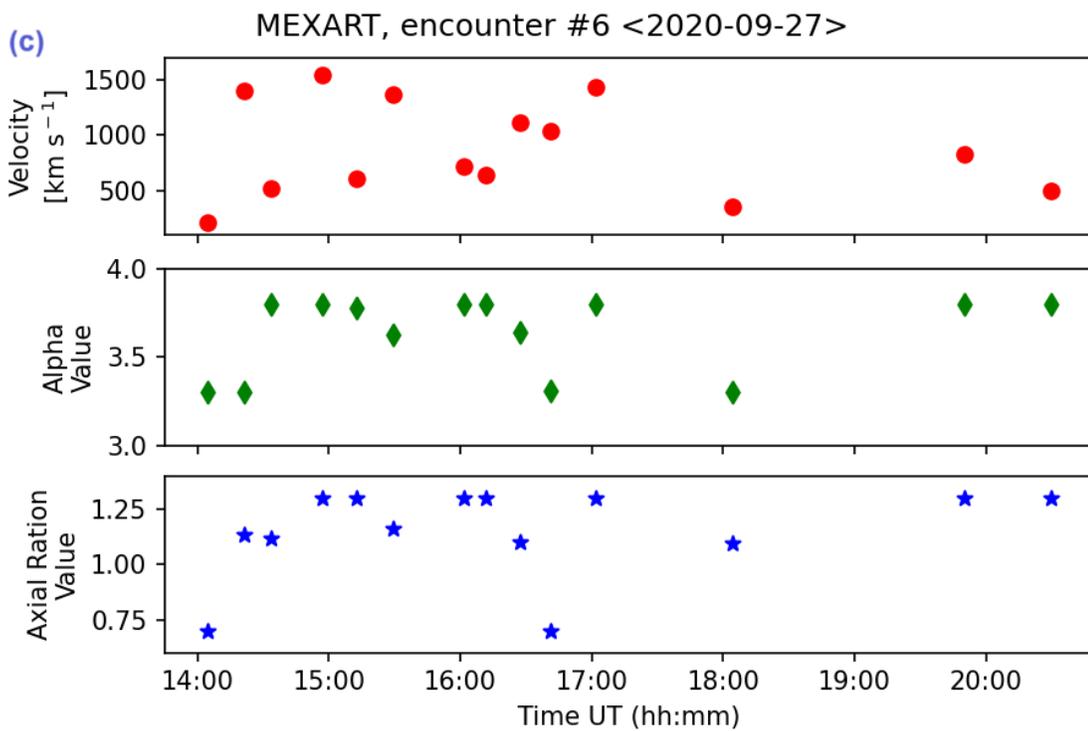
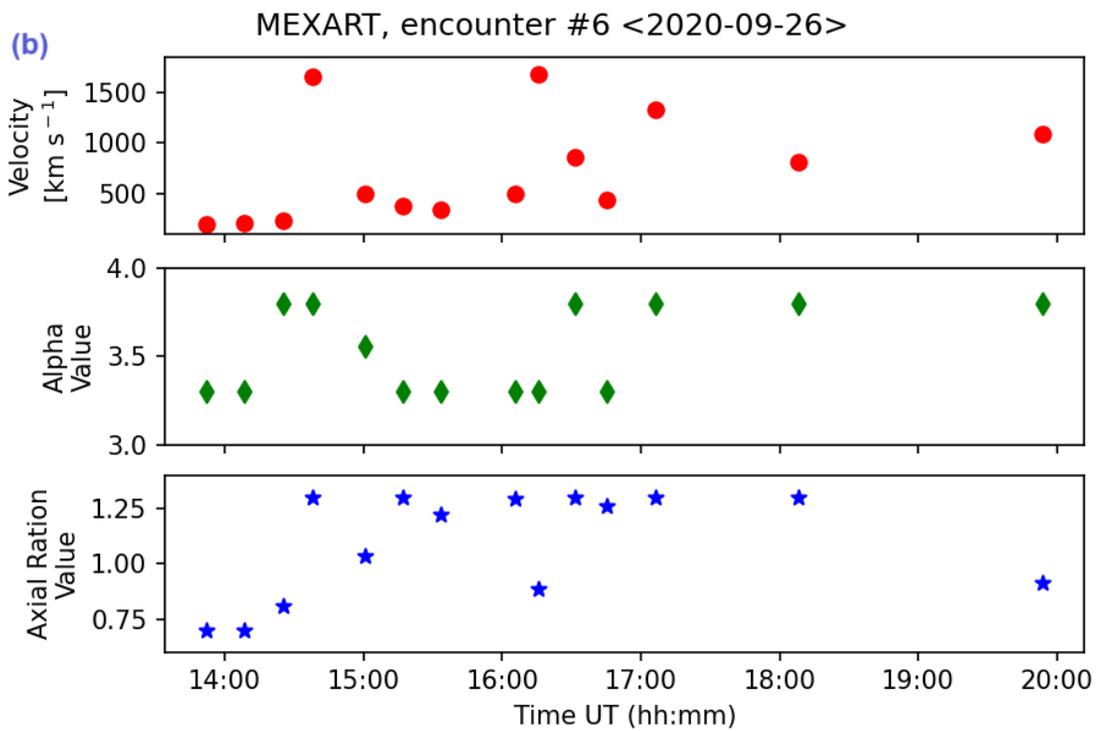
2020. Programadas de las 8:00-16:00 UT, en intervalos de 15 min, en series de 4 (una hora) o de 8 (dos horas). En el ISEE se observa alrededor de 68 fuentes de radio, de 5 a 16 minutos, en un horario de observación de las 0:00-8:00 UT y de las 21:00-24:00 UT.

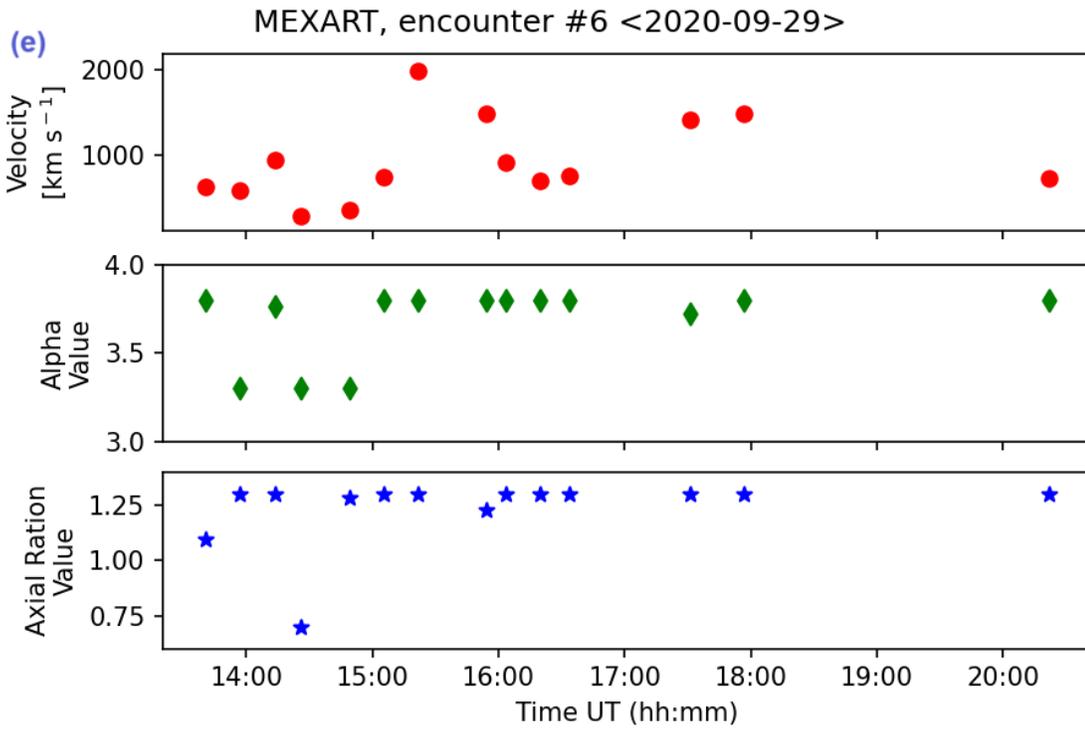
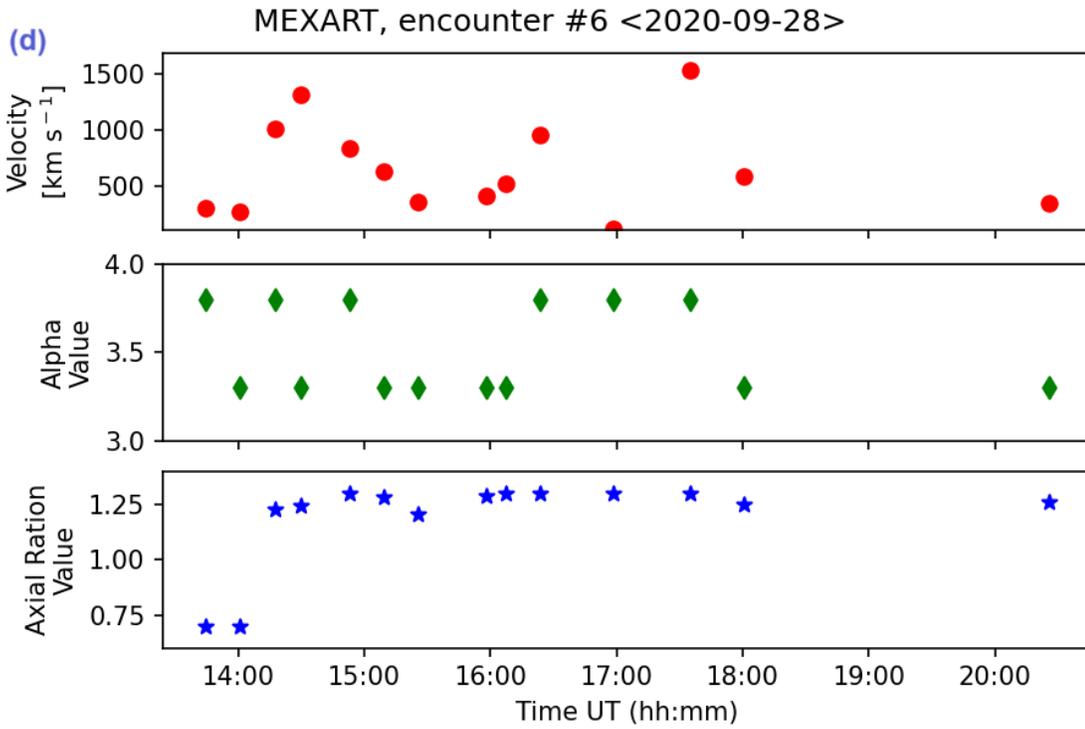
En el MEXART, se cuenta con la actividad del 25 al 30 de septiembre del 2020. En esos 6 días se observaron 35 fuentes de radio durante 4 a 10 min. cada una. El horario de observación fue casi de todo el día, iniciando a las 02:04 UT y concluyendo a las 23:21 UT. De las cuales 16 estuvieron dentro del rango de elongación de  $[18^\circ, 90^\circ]$  y cumplieron con los otros requisitos.

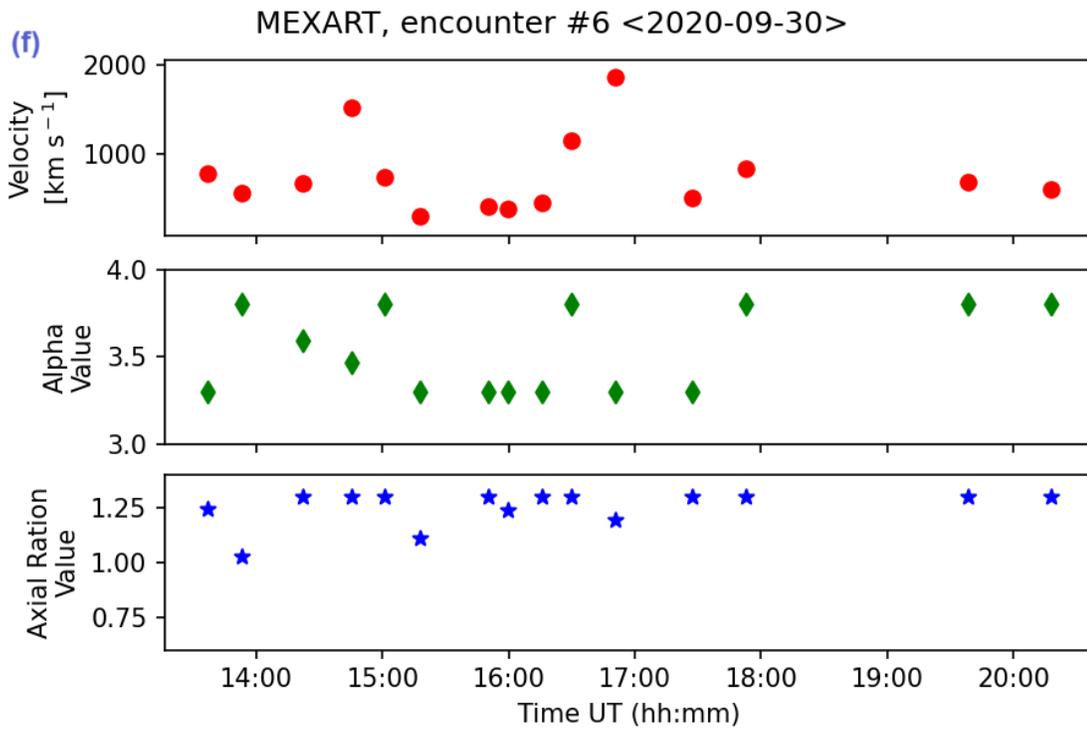
A continuación, en la [Figura 5.40](#), las gráficas de los valores obtenidos por el modelo para la velocidad, el parámetro alfa y la razón axial.

**Figura 5.40** Valores teóricos obtenidos del VS del MEXART, 25-30/sep/2020



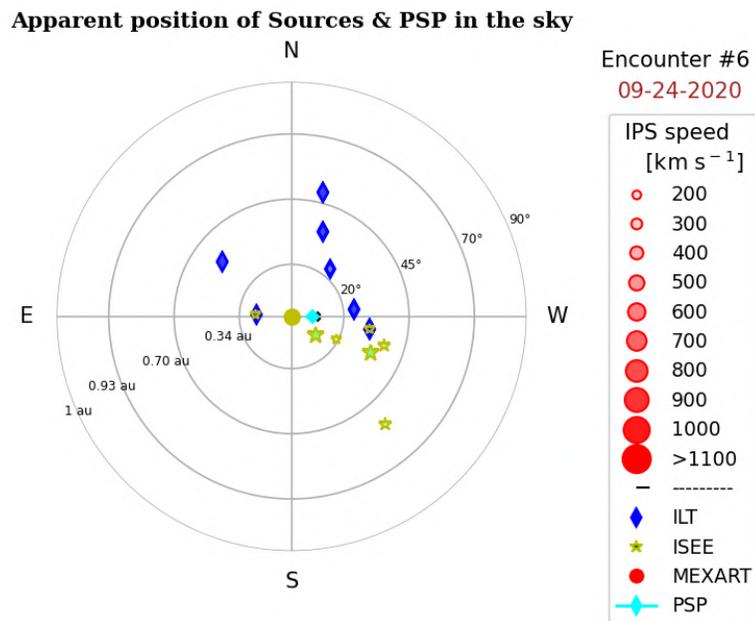




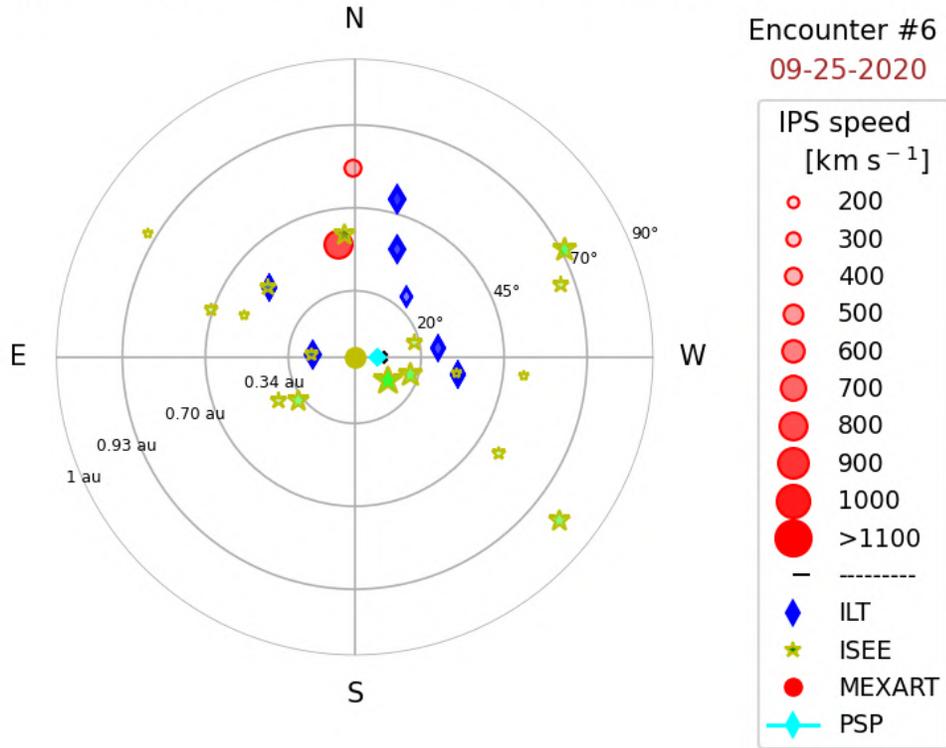


La disposición de las radiofuentes de los tres observatorios más la trayectoria de la PSP se muestra en las [Figuras 5.41](#) y [5.42](#), donde el tamaño y la tonalidad de los puntos está en proporción a los valores de velocidad e índices  $g$ , respectivamente.

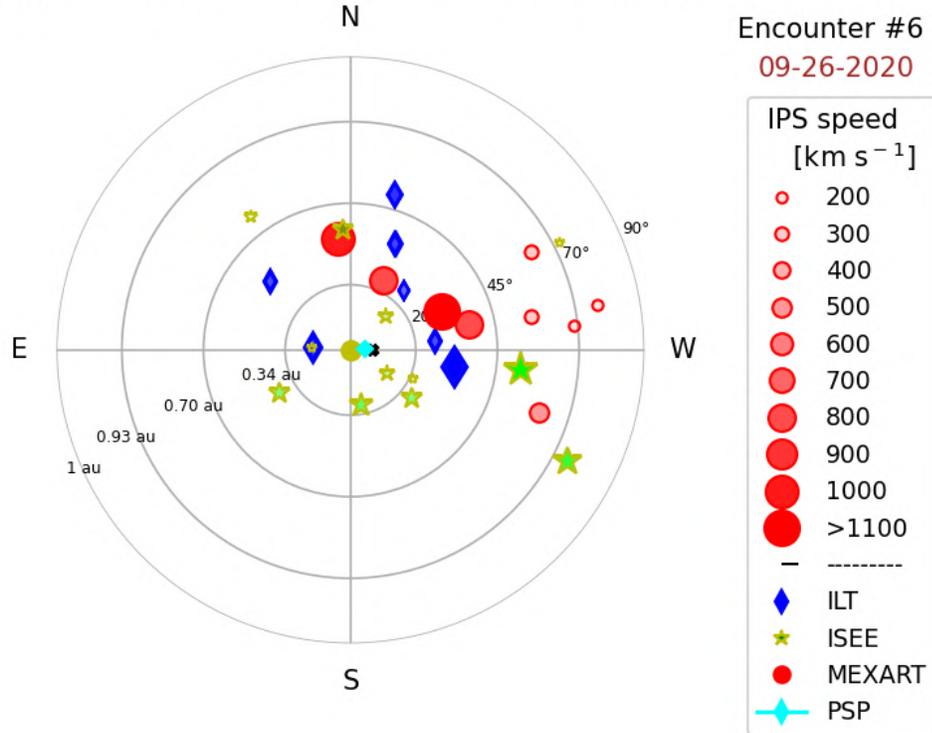
**Figura 5.41** Mapas de Velocidades MEXART, ILT & ISEE, 24-30/sep/2020



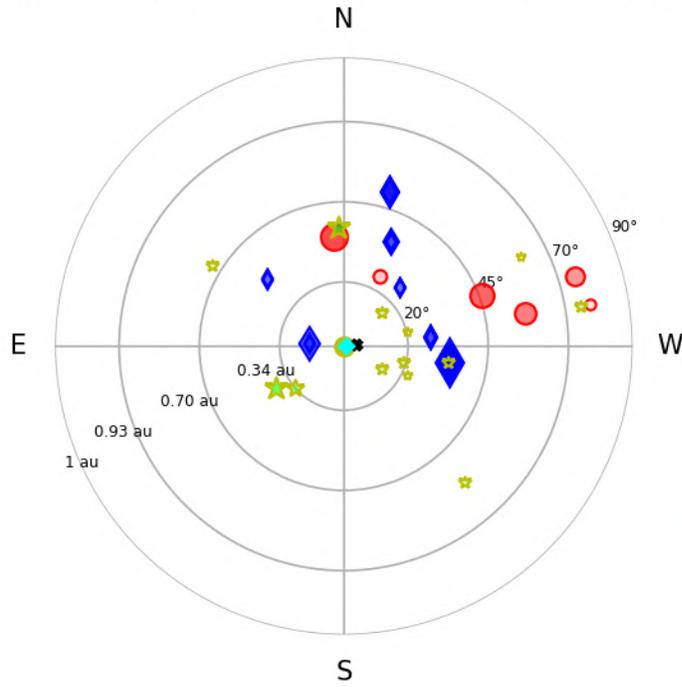
**Apparent position of Sources & PSP in the sky**



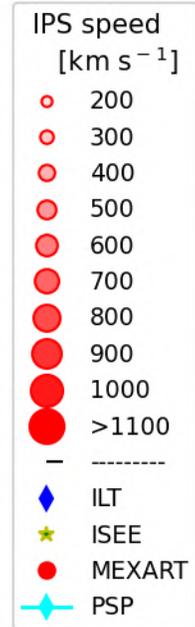
**Apparent position of Sources & PSP in the sky**



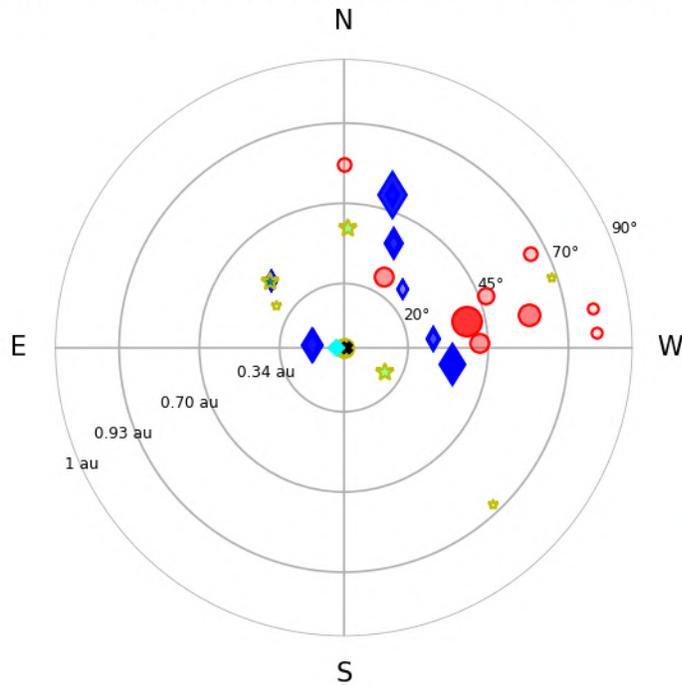
**Apparent position of Sources & PSP in the sky**



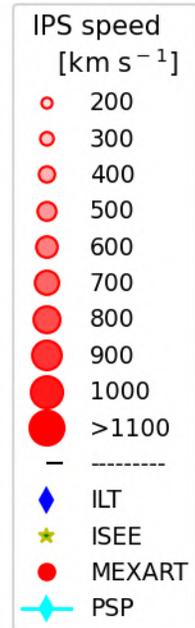
Encounter #6  
09-27-2020



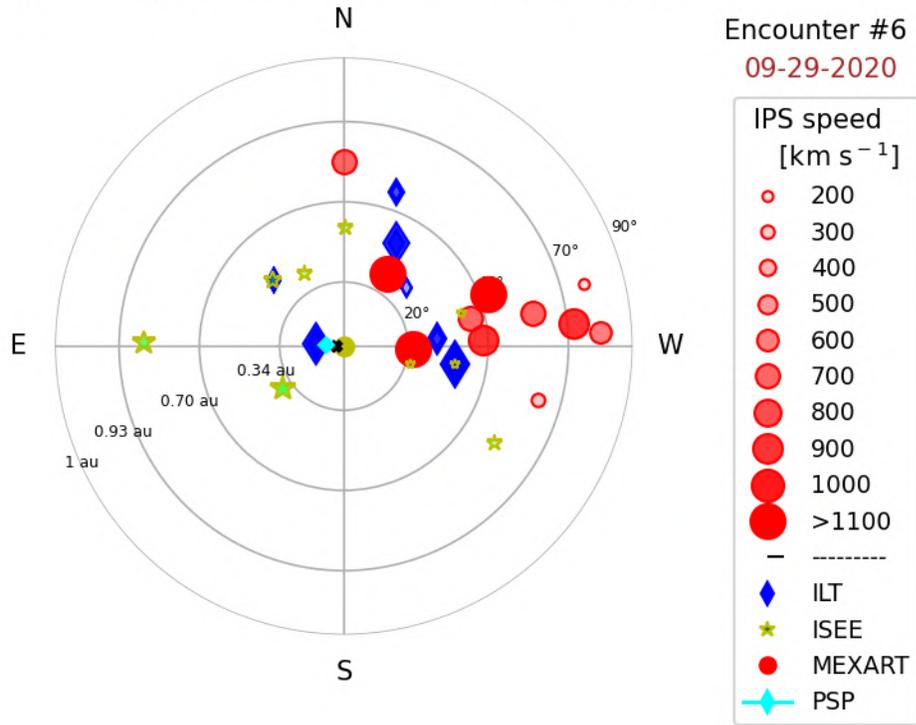
**Apparent position of Sources & PSP in the sky**



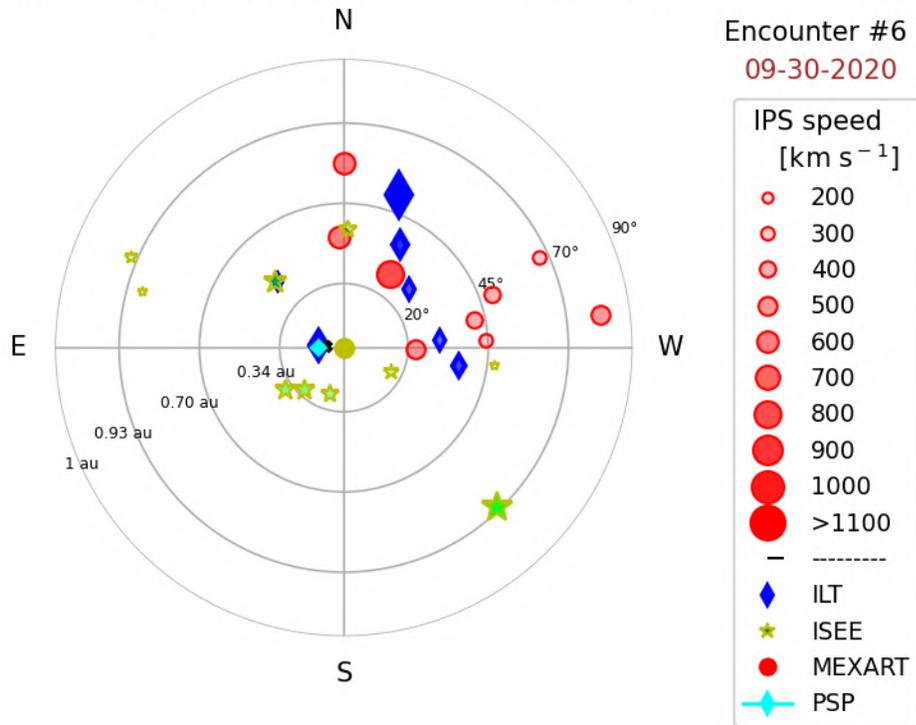
Encounter #6  
09-28-2020



**Apparent position of Sources & PSP in the sky**

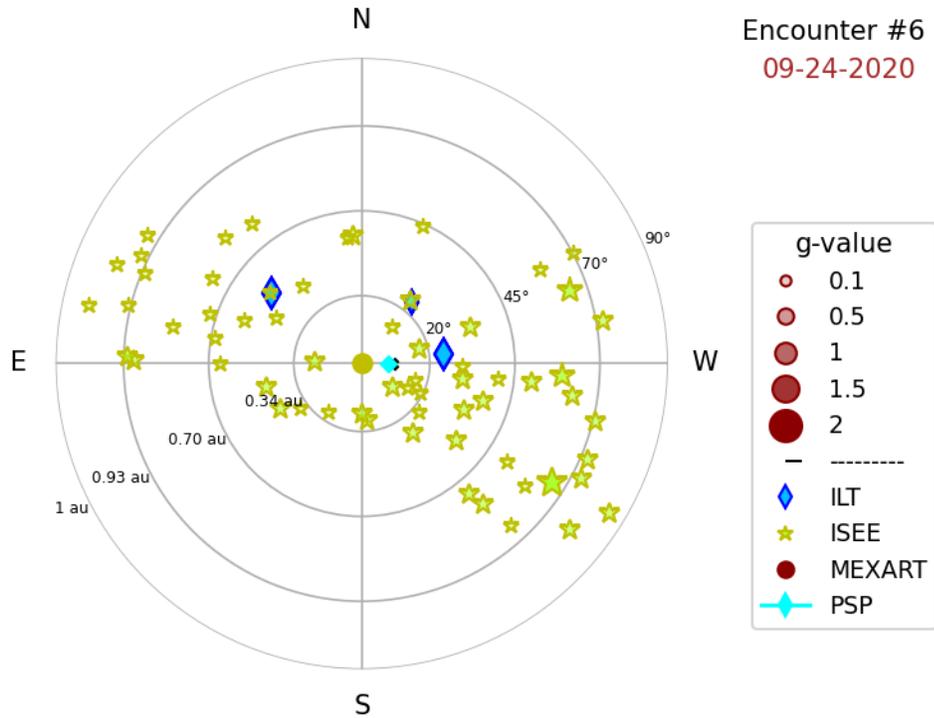


**Apparent position of Sources & PSP in the sky**

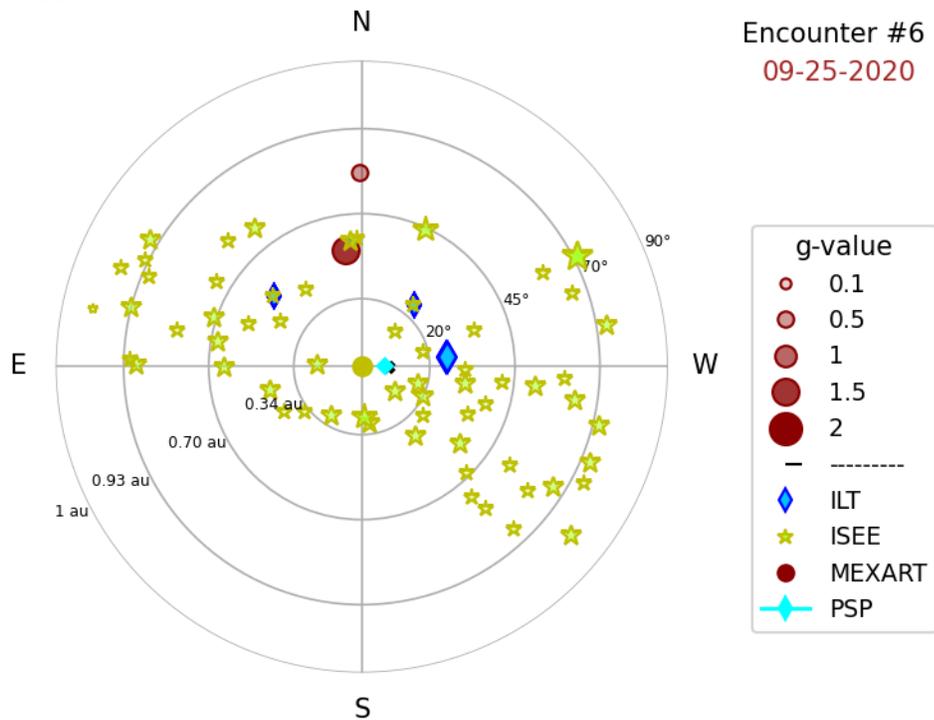


**Figura 5.42** Mapas de Índices g, MEXART, ILT & ISEE, 24-30/sep/2020

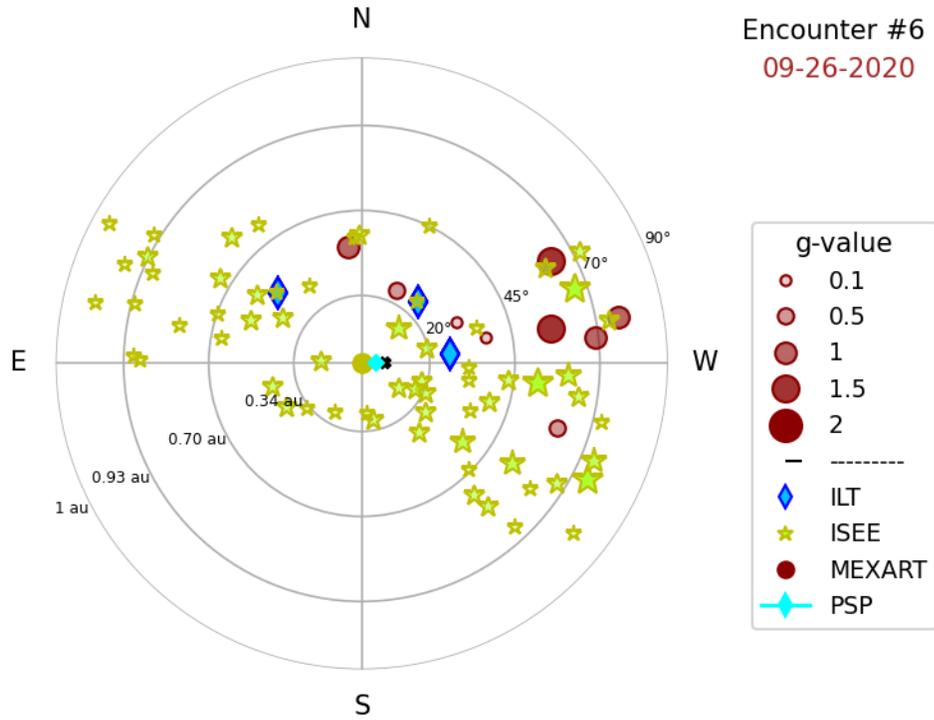
**Apparent position of Sources & PSP in the sky**



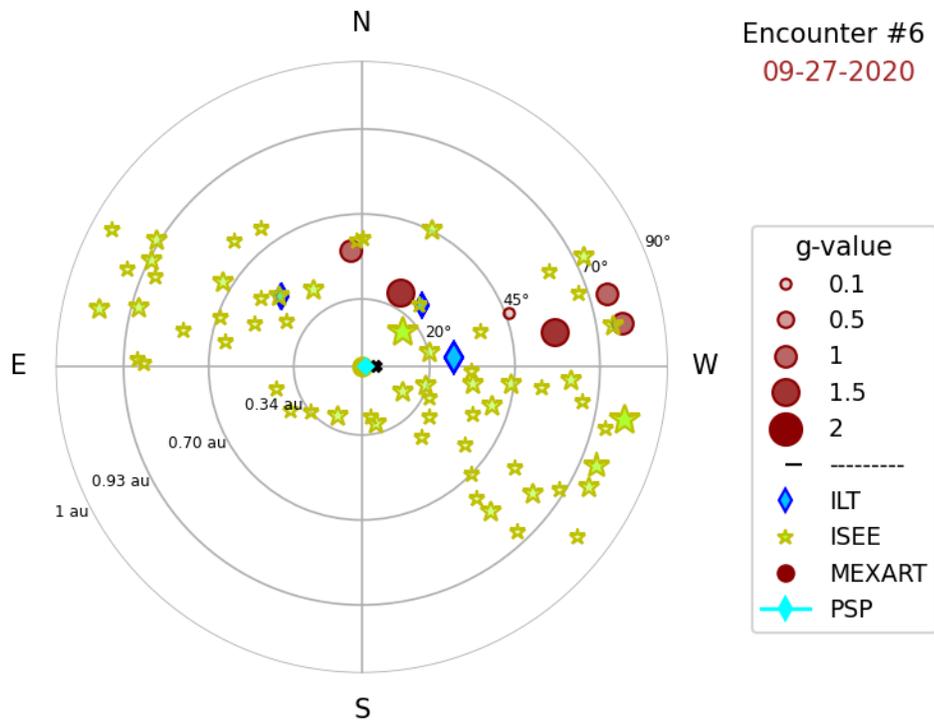
**Apparent position of Sources & PSP in the sky**



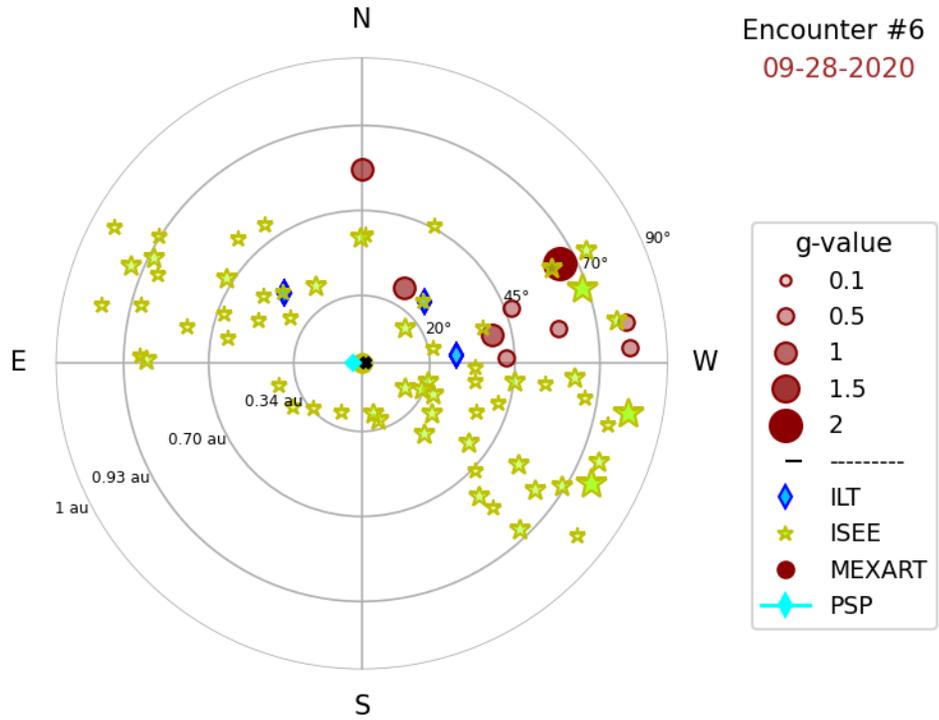
**Apparent position of Sources & PSP in the sky**



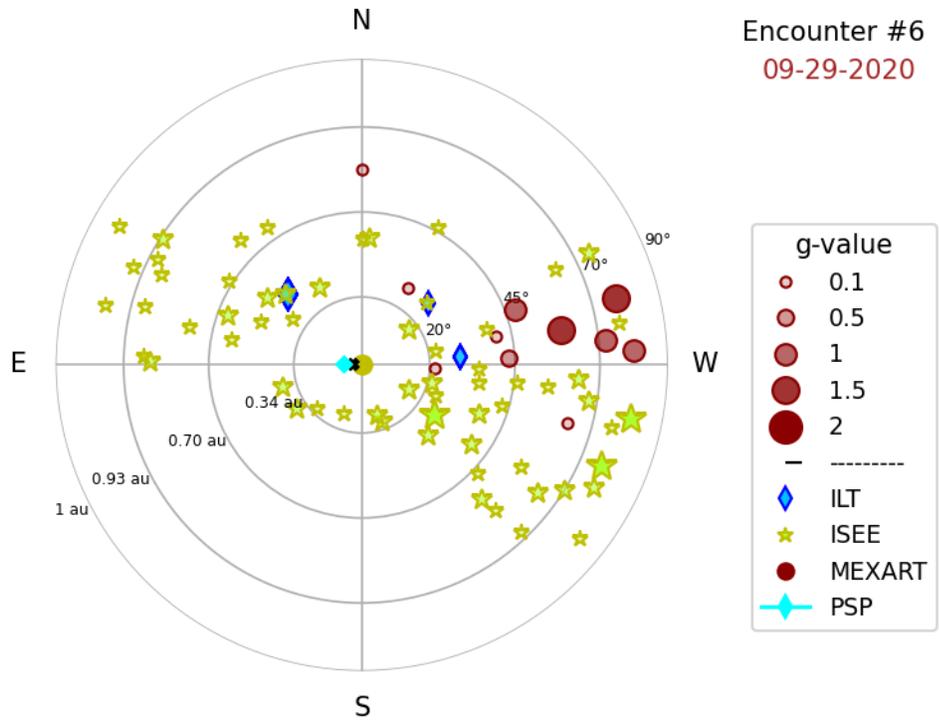
**Apparent position of Sources & PSP in the sky**



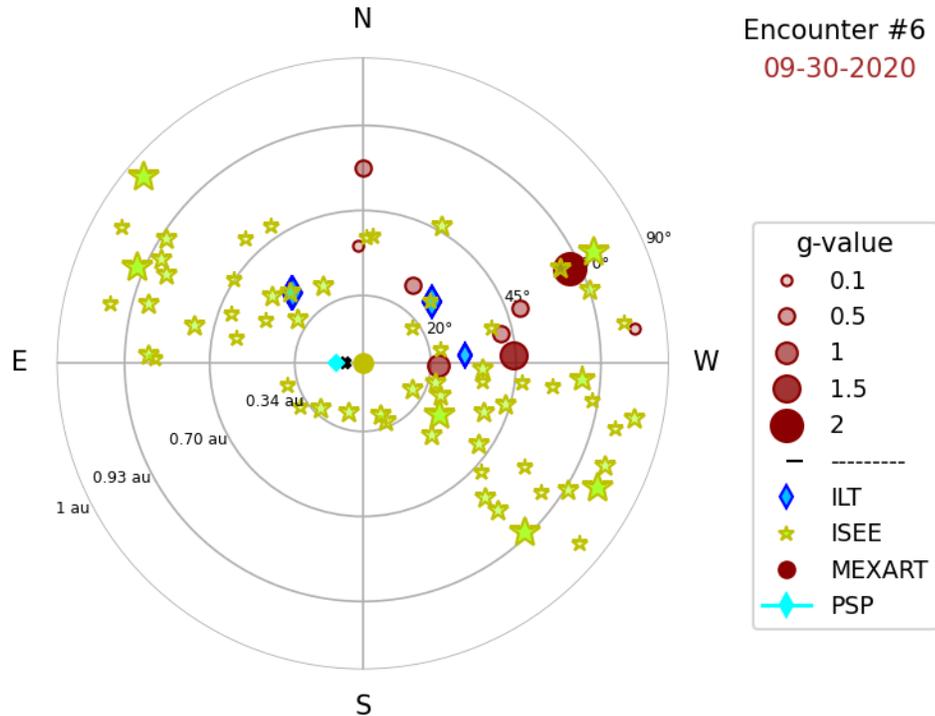
**Apparent position of Sources & PSP in the sky**



**Apparent position of Sources & PSP in the sky**



### Apparent position of Sources & PSP in the sky



Hay 2 de 7 radiofuentes en común entre ILT y MEXART, que son las fuentes **3C237** y **3C245**. Entre ISEE y MEXART hay en común 10 de 68 y son **0834-19**, **3C190**, **3C196**, **3C208**, **3C216**, **3C230**, **3C237**, **3C241**, **3C255**, **3C286**. Entre ILT y ISEE, se observan en común 4 de 68 fuentes y son **3C237**, **3C263.1**, **3C279** y **3C298**. Sólo la fuente de radio **3C237** es observada en las tres entidades.

Los WIPSS para la **3C237** se concentran en la [Tabla 5.4](#). Se omitieron algunos campos y se sombreó en amarillo los -999 & N/A. En particular, en los días 27 y 29 resaltados en rojo, hay estimaciones de la velocidad del VS en los tres sitios. En los días 26, 28 y 30, no se cuenta con alguna estimación de la velocidad en ISEE, pero en ILT sí. No hay estimaciones de los índices  $g$  en ILT, por lo que asumo que quedaron fuera del doble ajuste al realizar el cálculo de los índices. En MEXART, no hay datos disponibles para los días 24 y 25.

**Tabla 5.4** Registros del formato WIPSS para la radiogalaxia 3C237

Date	MidObsUT	Site	source	Limb	Dist	PA	Elonga	velocity MS	gvalue MS	velocity SE	gvalue SS
20200926	16:31:29	MXRT	3C237	W	132.97	282.1	38.2	N/A	N/A	857.5	0.408
20200927	16:27:33	MXRT	3C237	W	136.04	282.2	39.3	N/A	N/A	1119	0.269
20200928	16:23:36	MXRT	3C237	W	139.07	282.2	40.3	N/A	N/A	959.2	1.286
20200929	16:19:40	MXRT	3C237	W	142.05	282.2	41.4	N/A	N/A	697.8	0.33
20200930	16:15:46	MXRT	3C237	W	144.99	282.2	42.4	N/A	N/A	460.2	0.745
20200924	00:46:18	STEL	3C237	W	108.02	260.7	30.1	355	1.306	-999	1.678
20200925	00:42:22	STEL	3C237	W	111.13	260.8	31	291	1.014	-999	0.872
20200926	00:38:26	STEL	3C237	W	114.2	260.8	32	-999	0.933	-999	1.048
20200927	00:34:30	STEL	3C237	W	117.25	260.9	33	398	1.223	-999	1.135
20200928	00:30:35	STEL	3C237	W	120.26	260.9	33.9	-999	0.952	-999	0.746
20200929	00:26:39	STEL	3C237	W	123.24	261	34.9	234	0.787	-999	0.898
20200930	00:22:43	STEL	3C237	W	126.19	261	35.9	-999	0.976	-999	0.667
20200924	08:00:00	LOFA	3C237	W	108.94	260.6	30.4	265	-999	441	-999
20200924	08:15:00	LOFA	3C237	W	108.97	260.6	30.4	277	-999	442	-999
20200924	08:30:00	LOFA	3C237	W	109.01	260.6	30.4	273	-999	444	-999
20200924	08:45:00	LOFA	3C237	W	109.04	260.6	30.4	276	-999	431	-999
20200924	09:00:00	LOFA	3C237	W	109.07	260.6	30.4	279	-999	275	-999
20200924	09:15:00	LOFA	3C237	W	109.1	260.6	30.4	269	-999	476	-999
20200924	09:30:00	LOFA	3C237	W	109.14	260.6	30.4	277	-999	431	-999
20200924	09:45:00	LOFA	3C237	W	109.17	260.6	30.4	279	-999	430	-999
20200925	08:00:00	LOFA	3C237	W	112.05	260.7	31.3	342	-999	420	-999
20200925	08:15:00	LOFA	3C237	W	112.08	260.7	31.3	308	-999	368	-999
20200925	08:30:00	LOFA	3C237	W	112.11	260.7	31.3	306	-999	360	-999
20200925	08:45:00	LOFA	3C237	W	112.15	260.7	31.4	329	-999	420	-999
20200925	09:00:00	LOFA	3C237	W	112.18	260.7	31.4	288	-999	367	-999
20200925	09:15:00	LOFA	3C237	W	112.21	260.7	31.4	433	-999	431	-999
20200925	09:30:00	LOFA	3C237	W	112.24	260.7	31.4	296	-999	366	-999
20200925	09:45:00	LOFA	3C237	W	112.27	260.7	31.4	300	-999	420	-999
20200926	08:00:00	LOFA	3C237	W	115.13	260.8	32.3	340	-999	899	-999
20200926	08:15:00	LOFA	3C237	W	115.16	260.8	32.3	330	-999	317	-999
20200926	08:30:00	LOFA	3C237	W	115.19	260.8	32.3	332	-999	318	-999
20200926	08:45:00	LOFA	3C237	W	115.22	260.8	32.3	337	-999	416	-999
20200926	09:00:00	LOFA	3C237	W	115.25	260.8	32.3	323	-999	970	-999
20200926	09:15:00	LOFA	3C237	W	115.29	260.8	32.3	323	-999	421	-999
20200926	09:30:00	LOFA	3C237	W	115.32	260.8	32.4	319	-999	317	-999
20200926	09:45:00	LOFA	3C237	W	115.35	260.8	32.4	331	-999	370	-999

Date	MidObsUT	Site	source	Limb	Dist	PA	Elonga	velocity MS	gvalue MS	velocity SE	gvalue SS
20200927	08:00:00	LOFA	3C237	W	118.17	260.8	33.3	312	-999	394	-999
20200927	08:15:00	LOFA	3C237	W	118.2	260.8	33.3	319	-999	387	-999
20200927	08:30:00	LOFA	3C237	W	118.23	260.8	33.3	315	-999	393	-999
20200927	08:45:00	LOFA	3C237	W	118.27	260.8	33.3	324	-999	394	-999
20200927	09:00:00	LOFA	3C237	W	118.3	260.8	33.3	321	-999	1417	-999
20200927	09:15:00	LOFA	3C237	W	118.33	260.8	33.3	325	-999	386	-999
20200927	09:30:00	LOFA	3C237	W	118.36	260.8	33.3	330	-999	390	-999
20200927	09:45:00	LOFA	3C237	W	118.39	260.8	33.3	340	-999	393	-999
20200928	08:00:00	LOFA	3C237	W	121.18	260.9	34.2	370	-999	701	-999
20200928	08:15:00	LOFA	3C237	W	121.21	260.9	34.3	373	-999	956	-999
20200928	08:30:00	LOFA	3C237	W	121.24	260.9	34.3	369	-999	631	-999
20200928	08:45:00	LOFA	3C237	W	121.28	260.9	34.3	361	-999	730	-999
20200929	08:00:00	LOFA	3C237	W	124.16	260.9	35.2	360	-999	1046	-999
20200929	08:15:00	LOFA	3C237	W	124.19	260.9	35.2	372	-999	795	-999
20200929	08:30:00	LOFA	3C237	W	124.22	260.9	35.2	398	-999	960	-999
20200929	08:45:00	LOFA	3C237	W	124.25	260.9	35.2	390	-999	344	-999
20200930	08:00:00	LOFA	3C237	W	127.1	261	36.2	433	-999	365	-999
20200930	08:15:00	LOFA	3C237	W	127.13	261	36.2	430	-999	518	-999
20200930	08:30:00	LOFA	3C237	W	127.16	261	36.2	433	-999	468	-999
20200930	08:45:00	LOFA	3C237	W	127.19	261	36.2	431	-999	356	-999

Las mediciones fueron hechas a ángulos y distancias similares, algo más allá de la mitad de distancia entre el Sol y la Tierra, es decir, en la heliosfera interna. La distancia está medida en radios solares y tomando como referencia que estamos  $\sim 215 R_{\odot}$ , la medición más cercana fue a 0.502 UA y la más distante a 0.674 UA, el ángulo de elongación más chico fue de  $30.1^{\circ}$  y el mayor a  $42.4^{\circ}$ . Todas del lado Oeste del limbo, en un ángulo al punto P de  $260.6^{\circ}$  a  $282.2^{\circ}$ ; es decir,  $9.4^{\circ}$  debajo de la eclíptica a  $12.2^{\circ}$  sobre la eclíptica.

La velocidad de  $1119 \text{ km s}^{-1}_{SS}$ , del 27 de septiembre, obtenida al realizar el ajuste mediante la [ecuación \(2.29\)](#) con los datos del MEXART está muy alejado del obtenido por ISEE de  $398_{MS}$  y de los calculados por el ILT de  $(312_{MS}, 386_{SS})_{\text{mín.}}$  a  $(340_{MS}, 394/1417_{SS})_{\text{máx.}}$ . Aunque, el estimado de 1,417 está muy dispar a los otros 7 valores proporcionados por el ILT. Mientras que, en el índice  $g$ , el MEXART reporta un valor de  $0.269_{SS}$ ; es decir, un decremento

significativo en la densidad del VS. En cambio, ISEE reporta lo contrario, un incremento en su densidad, mediante los valores de  $1.223_{MS}$  y  $1.135_{SS}$ .

En el 29 de septiembre, el MEXART obtuvo un estimado de  $697.8 \text{ km s}^{-1}_{SS}$  versus  $234_{MS}$  del ISEE y valores en el rango de  $(360, 390)_{MS}$  y  $(344, 1046)_{SS}$  del ILT. En esta ocasión, el índice  $g$  en el MEXART fue de  $0.33_{SS}$  versus  $0.898_{SS}$  y de  $0.787_{MS}$  del ISEE, ambos reportando una disminución en la densidad del VS aunque no tan marcado en el ISEE como en el MEXART.

### 5.3.3 Parker Solar Probe

La PSP durante este encuentro pasó a  $\sim 20.3 R_{\odot}$  en su perihelio, el 27 de septiembre de 2020 a las 09:16 UT. Como el período de observación del ILT fue del 24 al 30, los datos presentados en las Figuras 5.41 y 5.42 corresponden al mismo período.

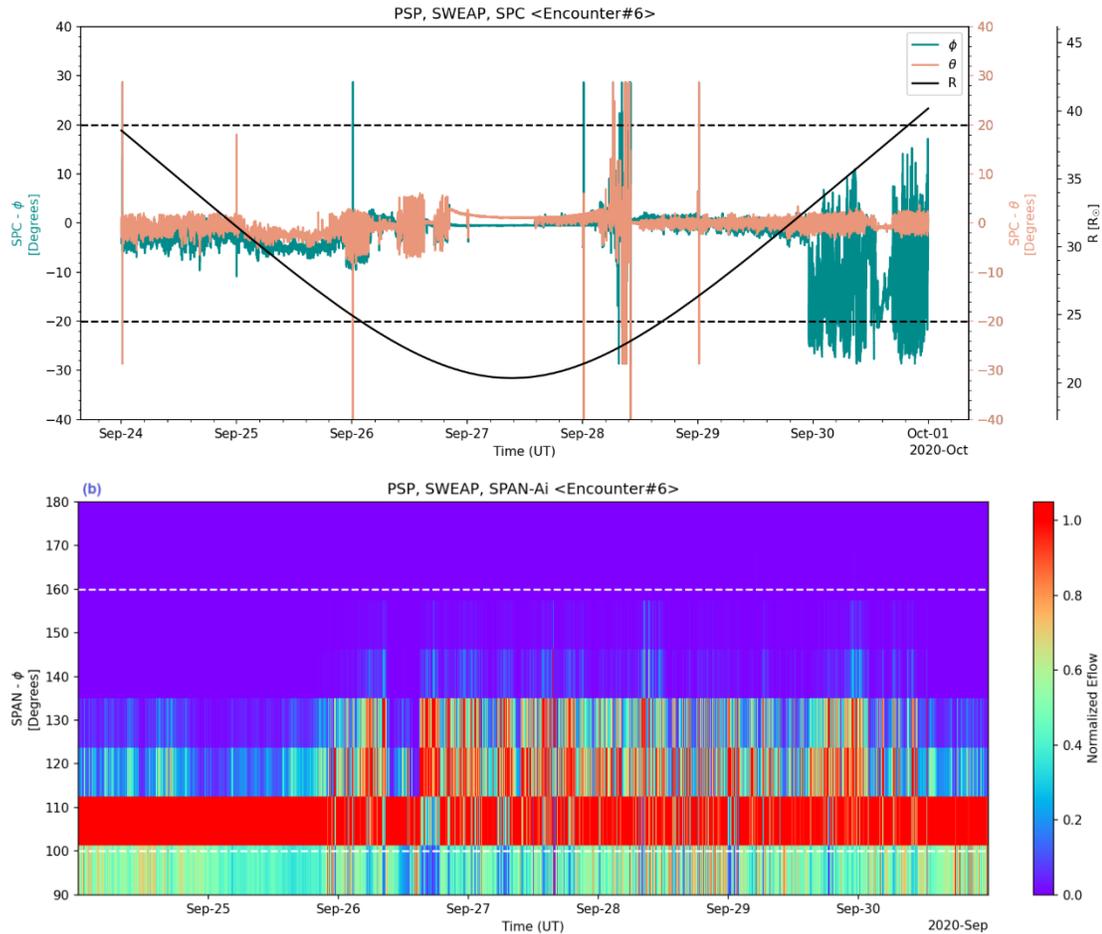
En el inciso a de la [Figura 5.43](#), se muestra la distancia de la PSP al Sol, que se mantuvo aproximadamente entre  $[20,40] R_{\odot}$ ; el ángulo de acimut y de elevación principalmente dentro del rango demarcado por las líneas punteadas, aunque hubo muy escasas mediciones fuera del rango de  $\pm 20^{\circ}$  antes del 28 de septiembre, algunas horas durante el día 28, un poco antes del día 30 y durante ese día. Por lo que preferentemente, se deben de considerar los valores registrados por SPAN-Ai para esas mediciones fuera de rango.

En el inciso b, se muestra la distribución de las mediciones del ángulo de acimut versus el flujo para el SPAN-Ai, que se mantuvo dentro del rango, acotado por las líneas punteadas de  $[100^{\circ}, 160^{\circ}]$ . Note que conforme el SPAN se aproxima y se aleja del Sol alcanza a detectar partículas a ángulos mayores.

En los incisos a y b de la [Figura 5.44](#), se presenta las mediciones de la velocidad y densidad registradas por la SPC en verde, y por el SPAN-Ai en azul respectivamente. Note que hay mucha variabilidad en las mediciones y que en promedio se registraron valores del VS lento entre  $[300,400] \text{ km s}^{-1}$  y densidades de  $\sim 200 \text{ partículas cm}^{-3}$  el 24 sep., tres días antes del perihelio, y

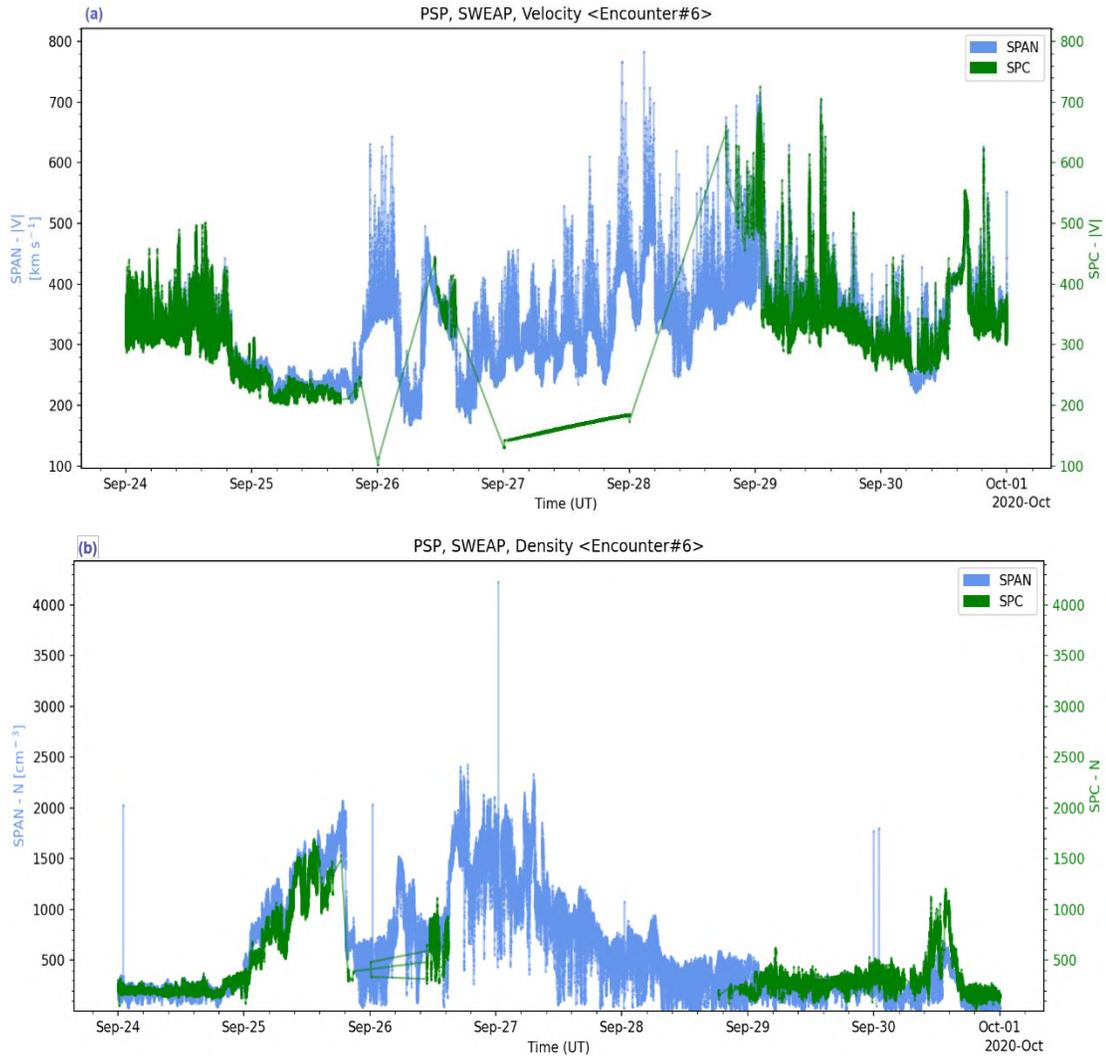
el 29 sep., dos días después. Para finalizar el día 26 y en adelante, se aprecia fluctuaciones de velocidad y densidad con períodos de  $\sim 4$ h. El valor más elevado de velocidad fue de  $\sim 780 \text{ km s}^{-1}$  y de densidad de  $\sim 2500 \text{ cm}^{-3}$ .

**Figura 5.43** Ubicación y Ángulos, SWEAP, 24-30/sep/2020



El día 27 de septiembre del 2020, horas antes de que ocurriera el perihelio, el instrumento SPC fue apagado para evitar su daño a causa de las altas temperaturas; pero, con las lecturas del SPAN-Ai se puede ver en la [Figura 5.44 \(a\)](#) que la sonda registra una tendencia al alza en la velocidad del VS variando de  $\sim 220$  a  $700 \text{ km s}^{-1}$  y una densidad con tendencia a la baja, [Figura 5.44 \(b\)](#), oscilando también, y pasando de  $\sim 2000$  a menos de  $100 \text{ partículas cm}^{-3}$ .

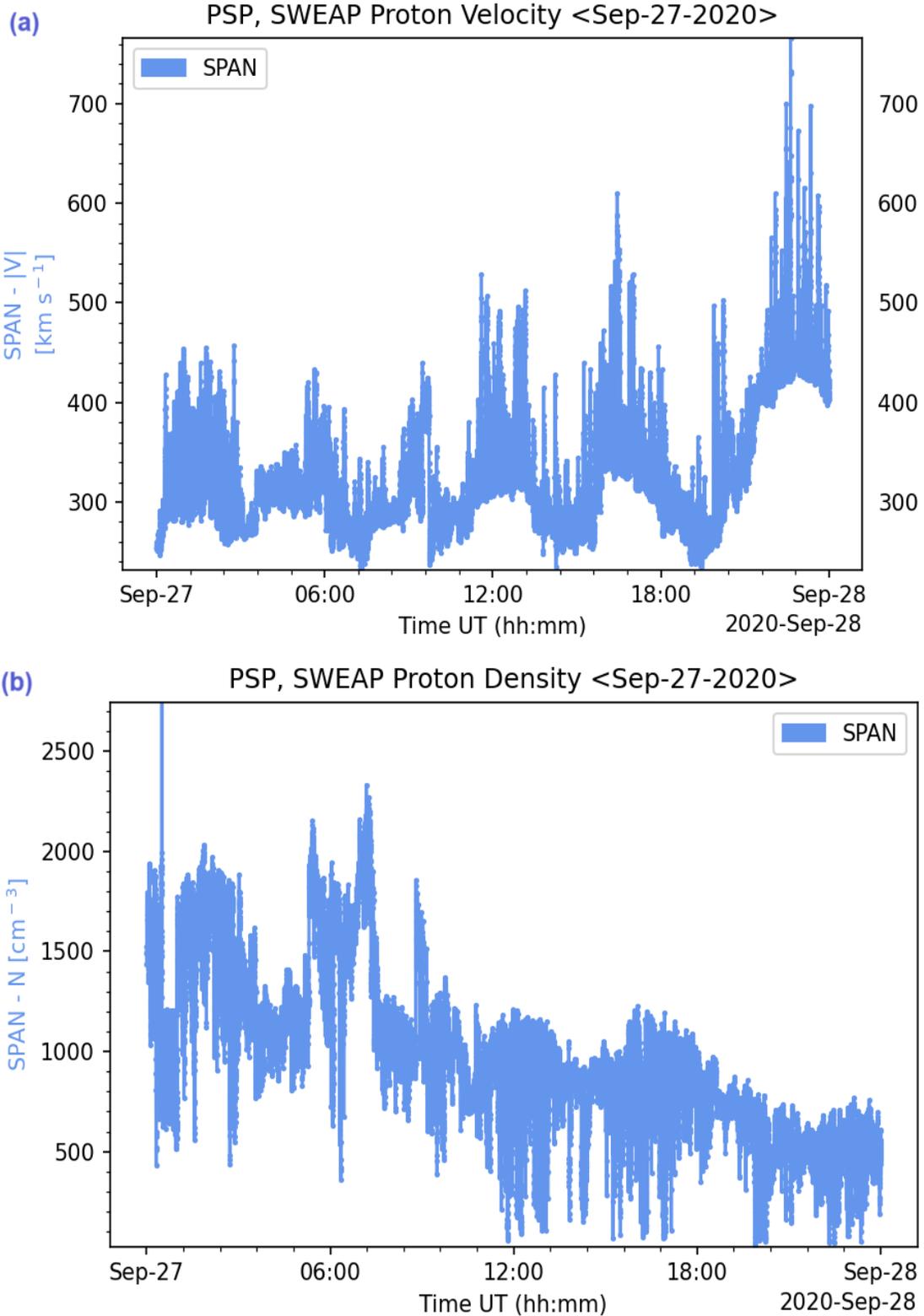
**Figura 5.44** Velocidad y Densidad del VS, SWEAP, 24-30/sep/2020



Una imagen ampliada del comportamiento de la velocidad y densidad para el 27 de septiembre se encuentra en la [Figura 5.45](#). Las gráficas diarias se encuentran en el [Anexo A](#).

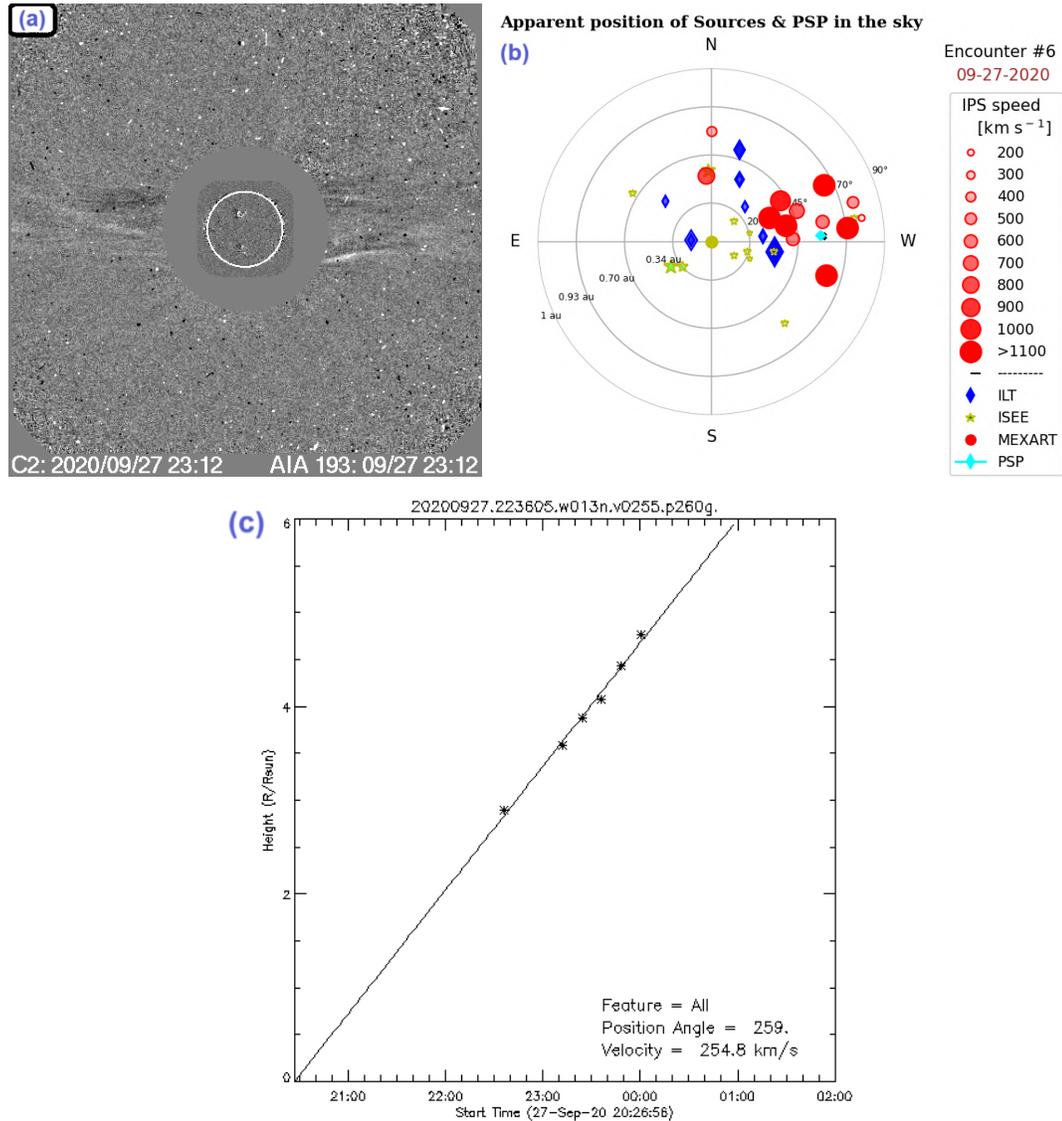
Para finalizar el día 27 a las 22:36:05 UT se registró por SOHO, mediante el cronógrafo C2, la EMC mostrada en la [Figura 5.46 \(a\)](#). En el inciso b, de la misma figura, se grafica la posición de las radiofuentes observadas por ILT, ISEE y MEXART más la ubicación de la PSP. Además, se incluye las gráficas de la velocidad de la eyecta estimada, mediante un ajuste lineal, inciso c, y con un ajuste cuadrático, inciso d.

**Figura 5.45** Velocidad y Densidad del VS, SWEAP, 27/sep/2020



La EMC fue observada del lado en el lado Oeste del limbo, a un ángulo de posición<sup>26</sup> de  $249^\circ$ , con un ancho de  $13^\circ$  y a una velocidad estimada de  $255 \text{ km s}^{-1}$ , mediante un ajuste lineal.

**Figura 5.46** Eyección de Masa Coronal, 27/sep/2020



Nota. Tomadas de [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/UNIVERSAL\\_ver1/2020\\_09/univ2020\\_09.html](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL_ver1/2020_09/univ2020_09.html)

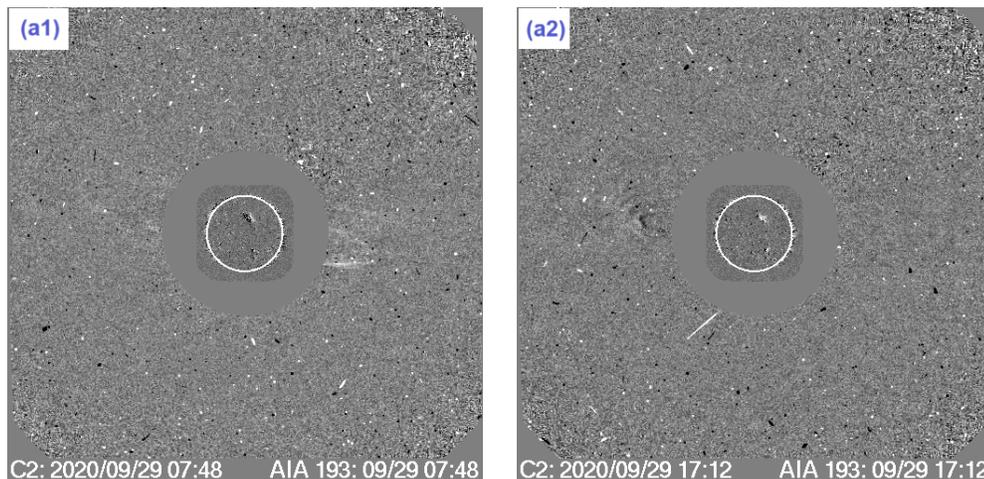
<sup>26</sup> Ángulo de Posición en el catálogo de LASCO, que es equivalente al Ángulo Principal en CACTus e igual a PA en el formato WIPSS.

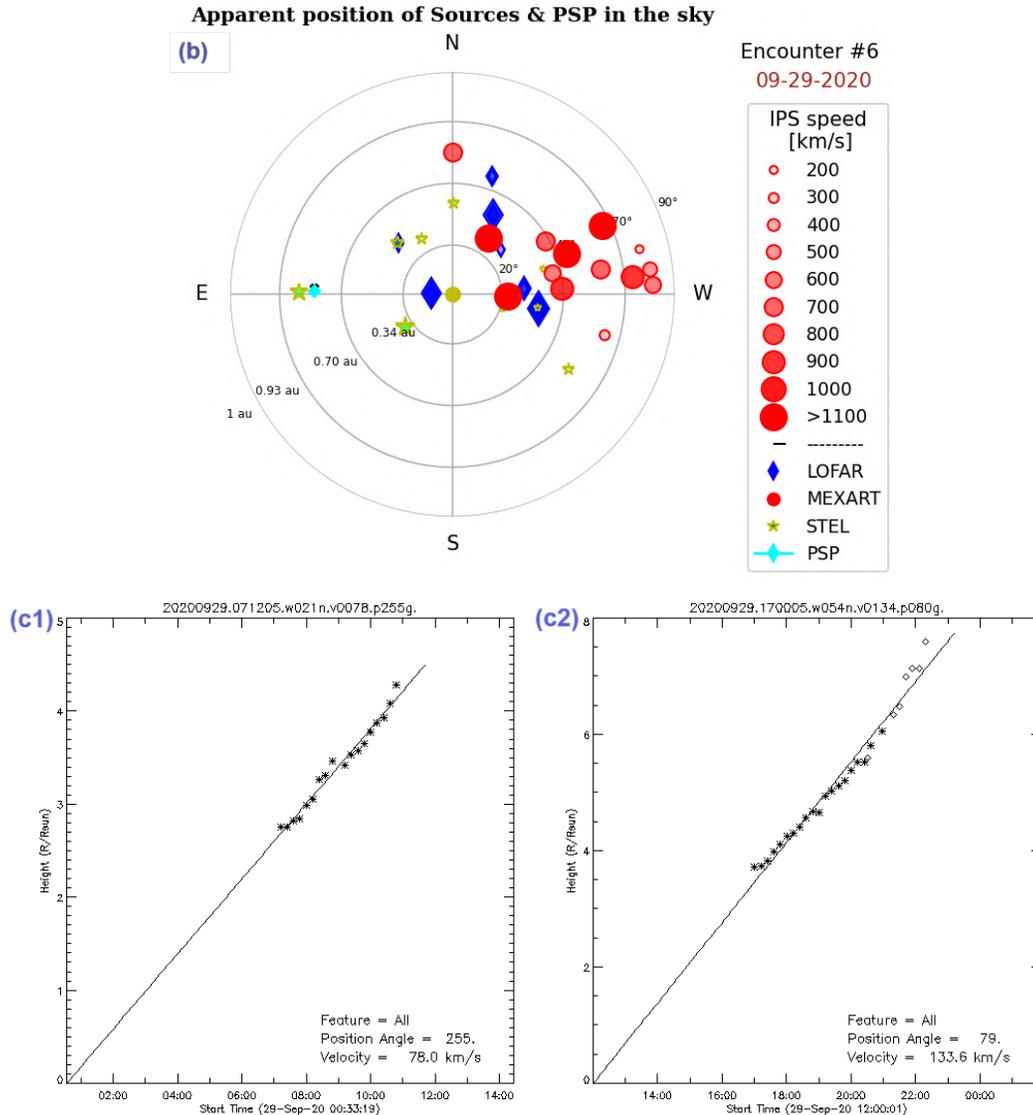
Para estimar si alguna EMC pasó por la línea de visión de las radiofuentes observadas, podríamos calcular su arribo a la posición aparente de las fuentes en el plano de visión de mapas de CIP ([Figura 5.46 b](#)), en base a su velocidad estimada en el plano cronográfico, cuya extensión abarca el mapa de CIP. Las fuentes de CIP están a más de  $20^\circ$  de elongación ( $80 R_\odot$ ); es decir, que pasarán varias horas o días para llegar a las radiofuentes.

Los puntos P, el día 27, para el MEXART se encuentra a  $136.04R_\odot$ , para el ISEE a  $117.25R_\odot$ , la medición más cercana del ILT es a  $118.17R_\odot$  y tomando como base la velocidad lineal de  $255 \text{ km s}^{-1}$ , la eyecta alcanzaría esos puntos P después de 3.7 días para el ISEE, a los 3.73 días el ILT y a los 4.3 días para el MEXART. Sin embargo, las líneas LOS se mueven  $\sim 3R_\odot$  por día por lo que quedarían a 3.8 días para el ISEE, a 3.83 días para el ILT y a 4.39 días para el MEXART. Por lo que esta EMC, pudo haber sido detectada por el ISEE e ILT el 1º de Octubre del 2020 y por el MEXART al día siguiente.

El 29 de sep. 2020 hubo dos EMC, ver [Figura 5.47](#). La primera del lado Oeste, [inciso a1](#), a las 07:12 UT con un ángulo central y de medición de  $252^\circ$  y  $255^\circ$  con un ancho de  $21^\circ$ , a una velocidad<sub>lineal</sub> =  $78 \text{ km s}^{-1}$ , [inciso c1](#). La segunda eyecta fue hacia el Este a las 17:00 con ángulos de  $78^\circ$  y  $80^\circ$ , velocidad<sub>lineal</sub> =  $134 \text{ km s}^{-1}$ , [inciso c2](#).

**Figura 5.47** Eyecciones de Masa Coronal, 29/sep/2020

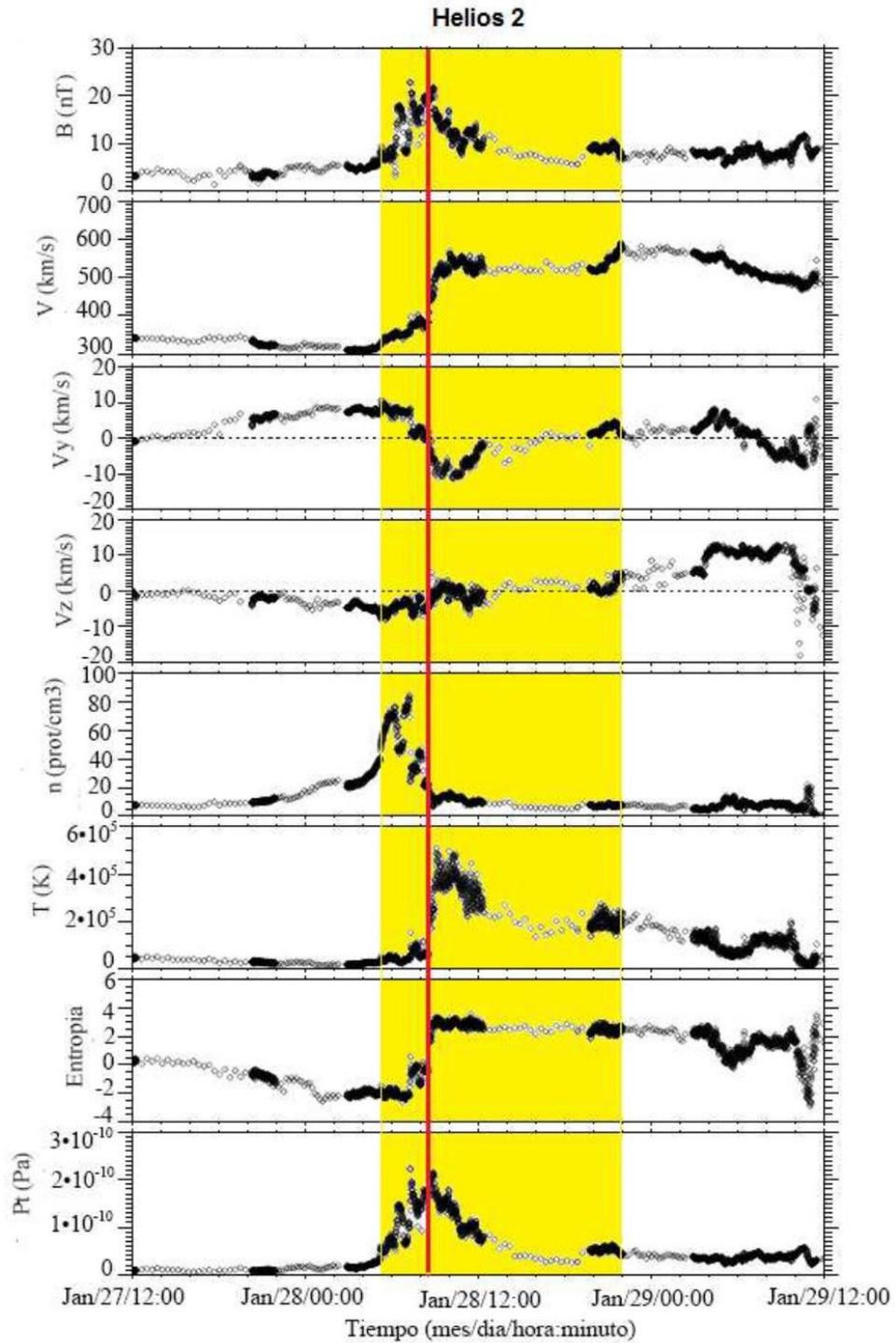




Nota. [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/UNIVERSAL\\_ver1/2020\\_09/univ2020\\_09.html](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL_ver1/2020_09/univ2020_09.html).

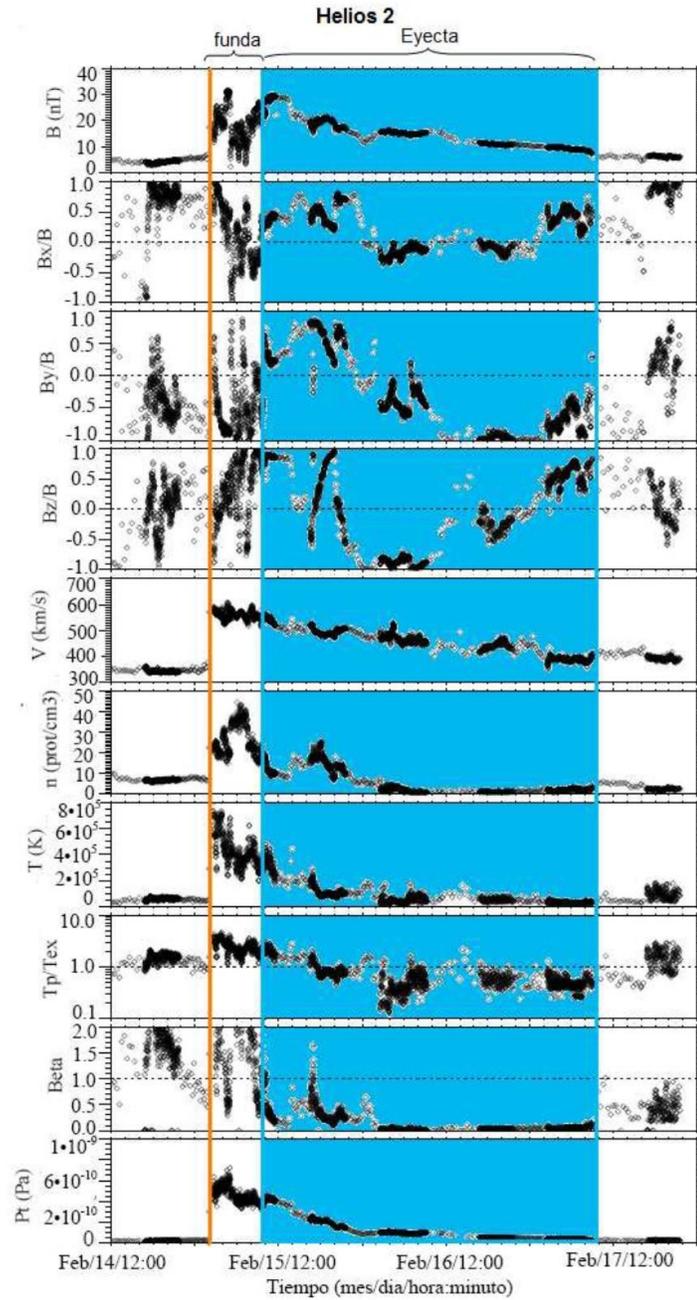
Adicionalmente de contar con la velocidad y densidad del VS, para la detección de eventos a gran escala es necesario, como EMCIs y RICs, como explica [Romero \(2015\)](#) en el capítulo 2, de la temperatura, campo magnético, presión total, entropía, componentes de la velocidad en  $y$  y  $z$  y la beta del plasma que podría obtener de la PSP, más queda como un trabajo a futuro.

Un ejemplo del tránsito de una RIC y de una EMCI con información in situ de la sonda Helios2 se muestran en las [Figuras 5.48](#) y [5.49](#).

**Figura 5.48** Tránsito de una RIC con datos in situ de Helios2

Nota. La línea roja es la interfase de corrientes y el recuadro amarillo delimita la RIC [Romero \(2015, p.46\)](#).

**Figura 5.49** Tránsito de una EMCI con datos in situ de Helios2



*Nota.* La línea naranja indica la onda de choque y el recuadro azul delimita el cruce de la EMCI [Romero \(2015, p. 74\)](#).

### 5.3.4 Pruebas de Filtrado

En las primeras pruebas de campo del auto-mexart r1, se abordó el tema de qué hacer con los NaNs introducidos en la rutina de filtrado asignándoles la media.

Tiempo después, en la segunda revisión de los formatos WIPSS por miembros de la comunidad de CIP donde nos indicaron cotejar el filtrado, se estimaba que el problema radicaba en la cantidad de NaNs, pero efectuando pruebas tanto en IDL como en Python en archivos filtrados sin ningún NaN, se obtuvieron valores altos de la velocidad del VS.

Una segunda prueba realizada fue el procesar archivos HDF5 sin sustituir los Outlierst, [sección 4.1.1](#), en el método de filtrado, se obtuvieron estimados de velocidad algo *más* bajos, pero no lo suficiente para estar en un rango comparativo con los registrados por ILT para el encuentro 6.

Una tercera prueba realizada fue procesar algunos espectros omitiendo el filtrado, obteniendo mejores resultados, velocidades del VS más bajos.

Una cuarta prueba fue, de los archivos usados en la 3ª prueba elegí el que obtenía el estimado más alto de velocidad y *procesé canal por canal, sin cambios*, para hacer el ajuste y obtener los estimados del VS y graficar sus espectros. Al revisar los espectros encontré que en la mayoría de ellos el nivel de ruido rebasaba a la señal, pero *el resto si estaban alrededor del valor reportado por ILT*.

Como resultado de estas pruebas preliminares *modifiqué* el **multiclean r5** para guardar información sobre el número de cambios hechos durante la rutina de filtrado por los diferentes criterios de validación, las medianas y promedios. Volviendo a procesar los datos con **multiclean r6**.

Empleando los resultados del análisis del encuentro 6, sabemos que la única radiofuente en común, analizada por los tres observatorios, es **3C237**, y en la [Tabla 5.4](#) se tienen las velocidades estimadas; ahora, en la [Tabla 5.5](#) se presentan los valores obtenidos sin filtrar del MEXART.

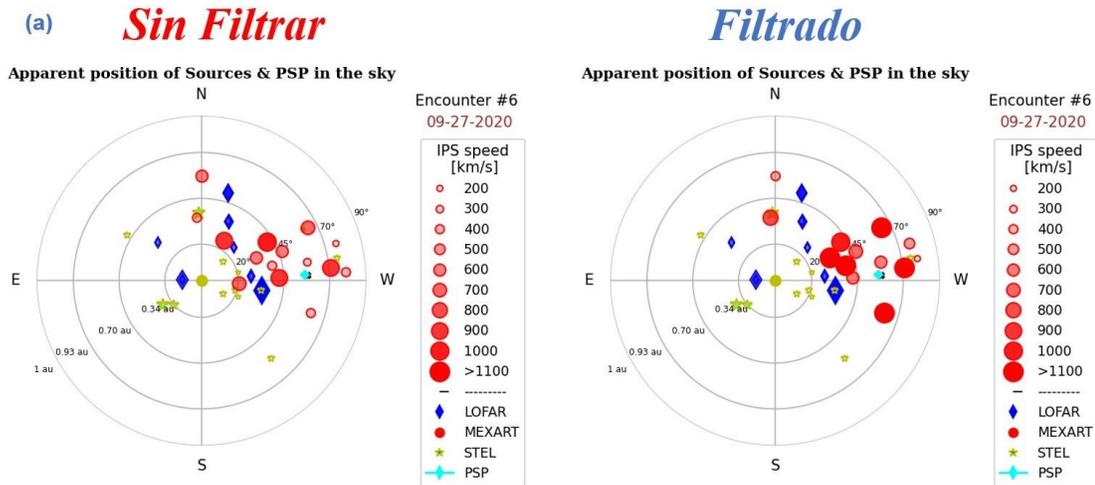
**Tabla 5.5** Registros del MEXART para la radiogalaxia 3C237

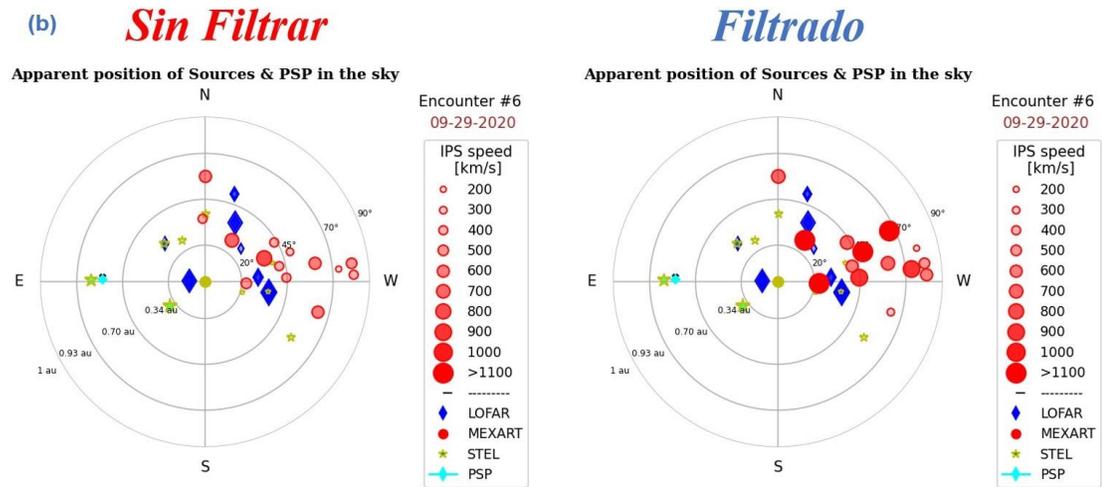
Date	MidObsUT	Site	Source	Limb	Dist.	PA	Elonga	Filtrados		Sin Filtrar	
								Velocity	G-value	Velocity	G-value
20200926	16:31:29	MXRT	3C237	W	132.97	282.1	38.2	857.5	0.408	834.7	0.844
20200927	16:27:33	MXRT	3C237	W	136.04	282.2	39.3	1119	0.269	461.9	1.57
20200928	16:23:36	MXRT	3C237	W	139.07	282.2	40.3	959.2	1.286	346	0.867
20200929	16:19:40	MXRT	3C237	W	142.05	282.2	41.4	697.8	0.33	412	0.941
20200930	16:15:46	MXRT	3C237	W	144.99	282.2	42.4	460.2	0.745	424	1.538

NOTA. El espectro del 27 de septiembre es descartado por el programa *wipss r 6*, pero empleando el *wipss r1*, se obtuvo un *g-value* de 1.57.

Graficando los mapas de CIP para los días 27, inciso a, y 29, inciso b, de la velocidad, [Figura 5.50](#), note que la mayoría de los puntos rojos, en los mapas de la izquierda, están reducidos en tamaño. Estas velocidades fueron obtenidas pasando directamente el espectro de potencia total proveniente del *back-end* a la rutina de *auto-mexart*. El número de fuentes representadas podría variar por el proceso de obtención de los índices *g*.

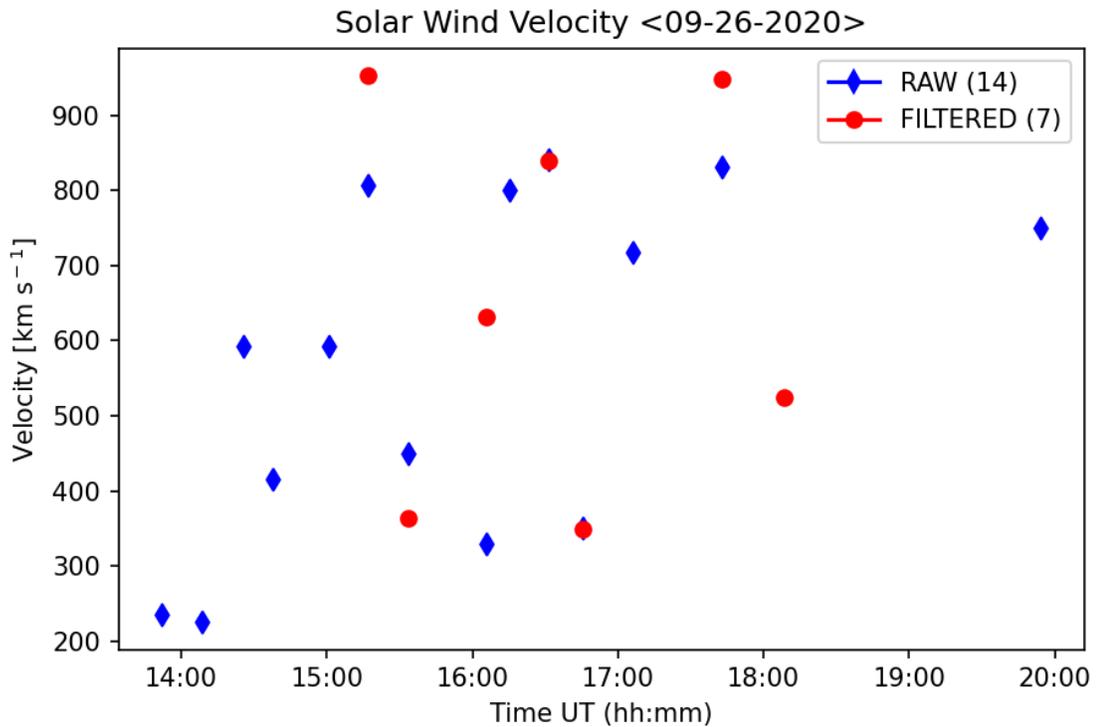
**Figura 5.50** Mapas de velocidad, 27, 29/sep/2020

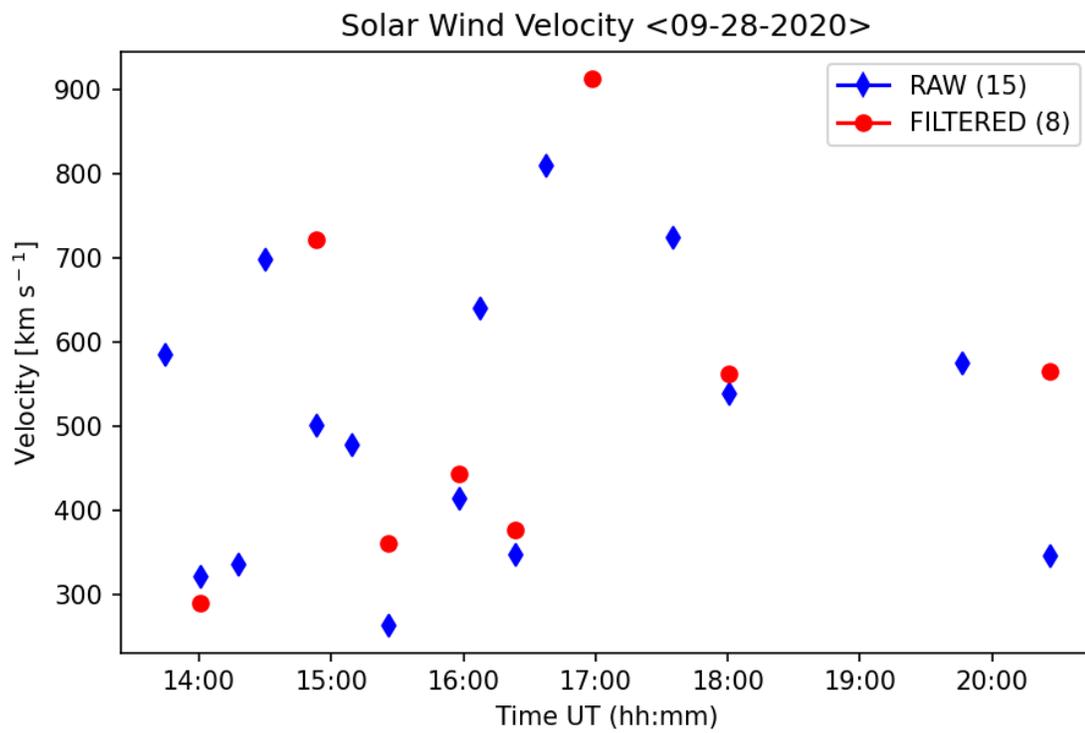
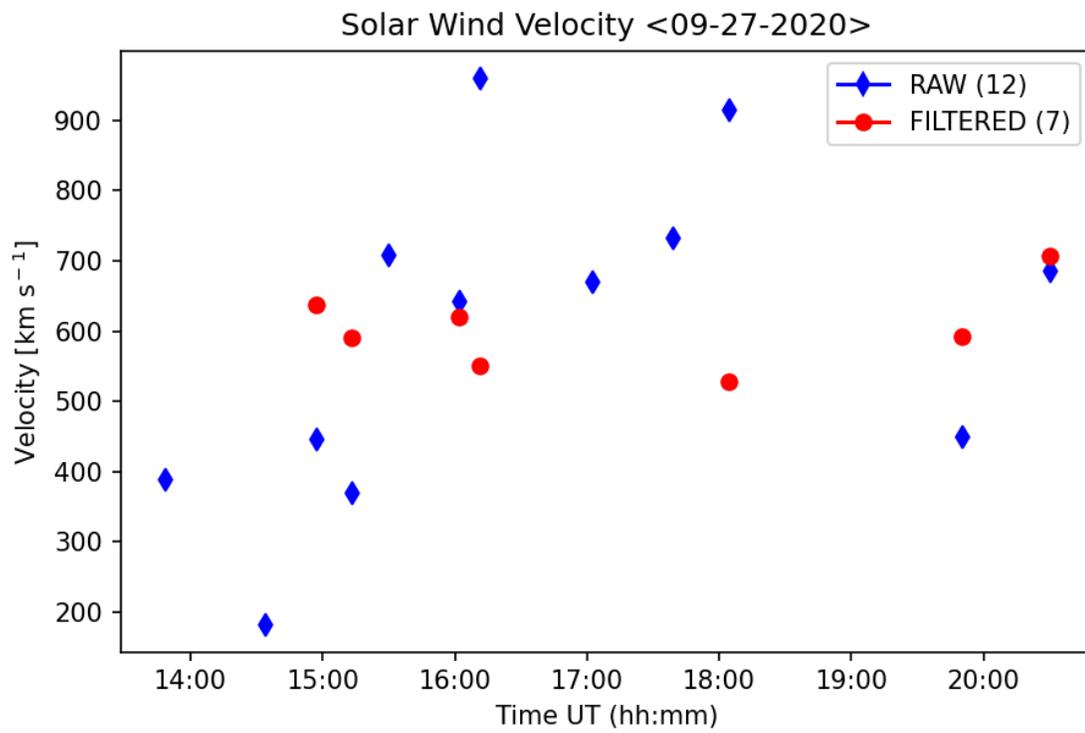


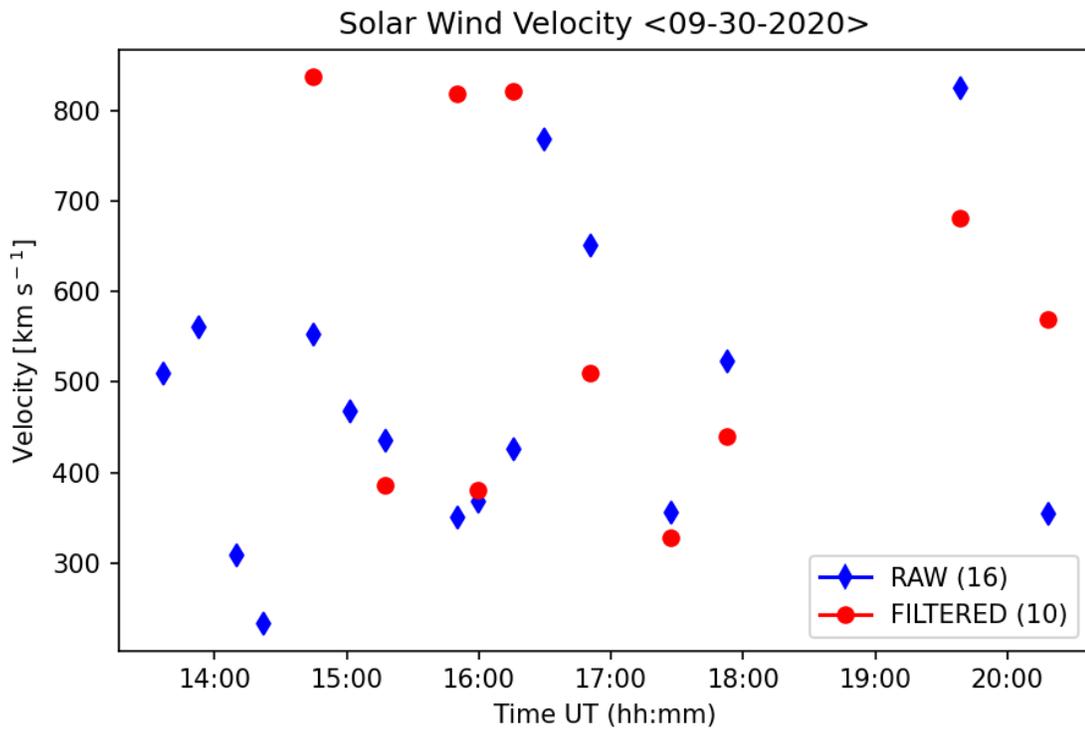
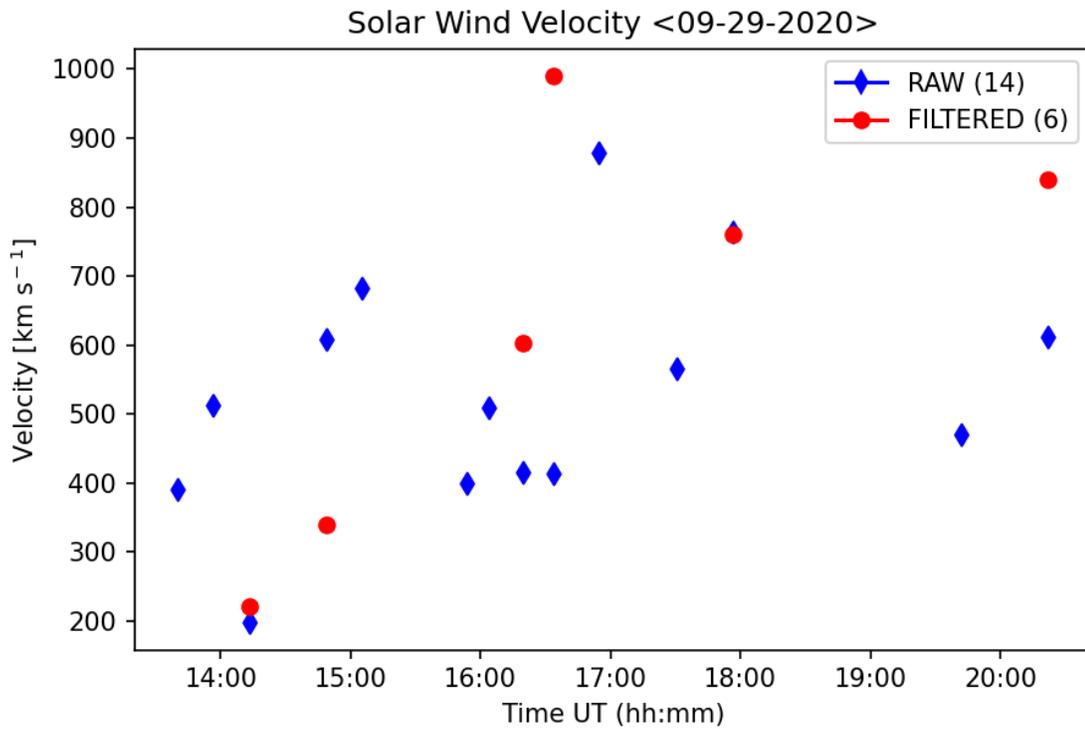


Procesé el resto de días del encuentro. En la [Figura 5.51](#) se presentan las gráficas de velocidad versus tiempo de los espectros sin filtrar & filtrados del MEXART. De los datos en crudo, se obtuvieron velocidades por debajo, muy similares y por arriba de los estimados con el filtraje.

**Figura 5.51** Velocidad del VS, MEXART, 26-30/sep/2020







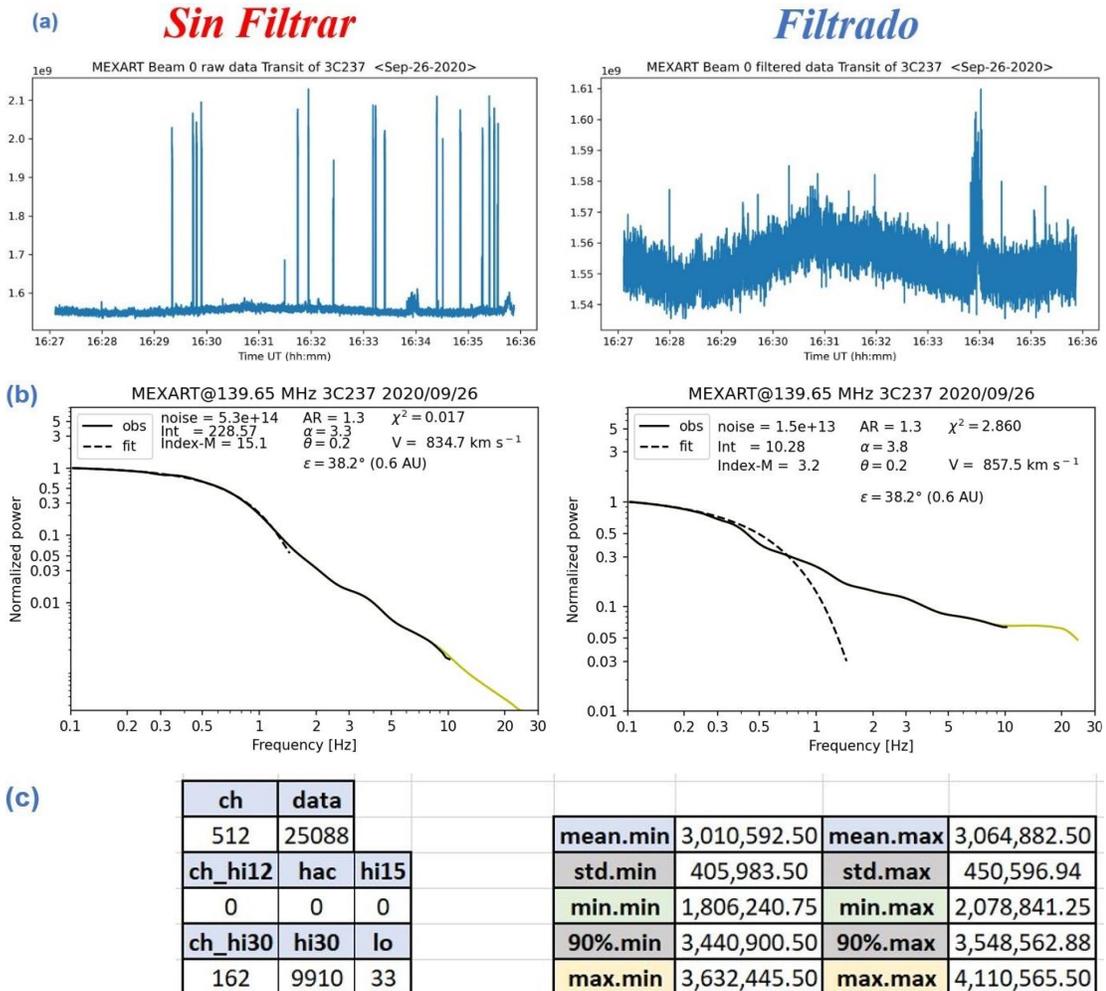
Para tener una idea más clara de lo que estaba pasando, añadí al programa que salvara información adicional en el *log* y en un archivo *CSV* en el *multiclean r7*. Empleando *dataframes* de *Pandas*, obtengo por canal la

siguiente información: media, desviación estándar, mínimo, máximo, percentiles del 25%, 50%, 75% y 90%.

Encontré dos puntos interesantes, cómo establecer si el espectro viene con poca o mucha potencia y revalorar los criterios para descartar o modificar los que están arriba del percentil 90%.

Analizando los espectros y las modificaciones realizadas en el filtraje, [Anexo B](#), parecería que la cantidad de cambios hechos es insignificante, como en la [Figura 5.52](#) del día 26 septiembre 2020; sin embargo, al procesar los espectros el valor obtenido de la velocidad es mayor en el espectro filtrado que sin filtrar.

**Figura 5.52** Espectros de potencias para la galaxia 3C237, 26/sep/2020



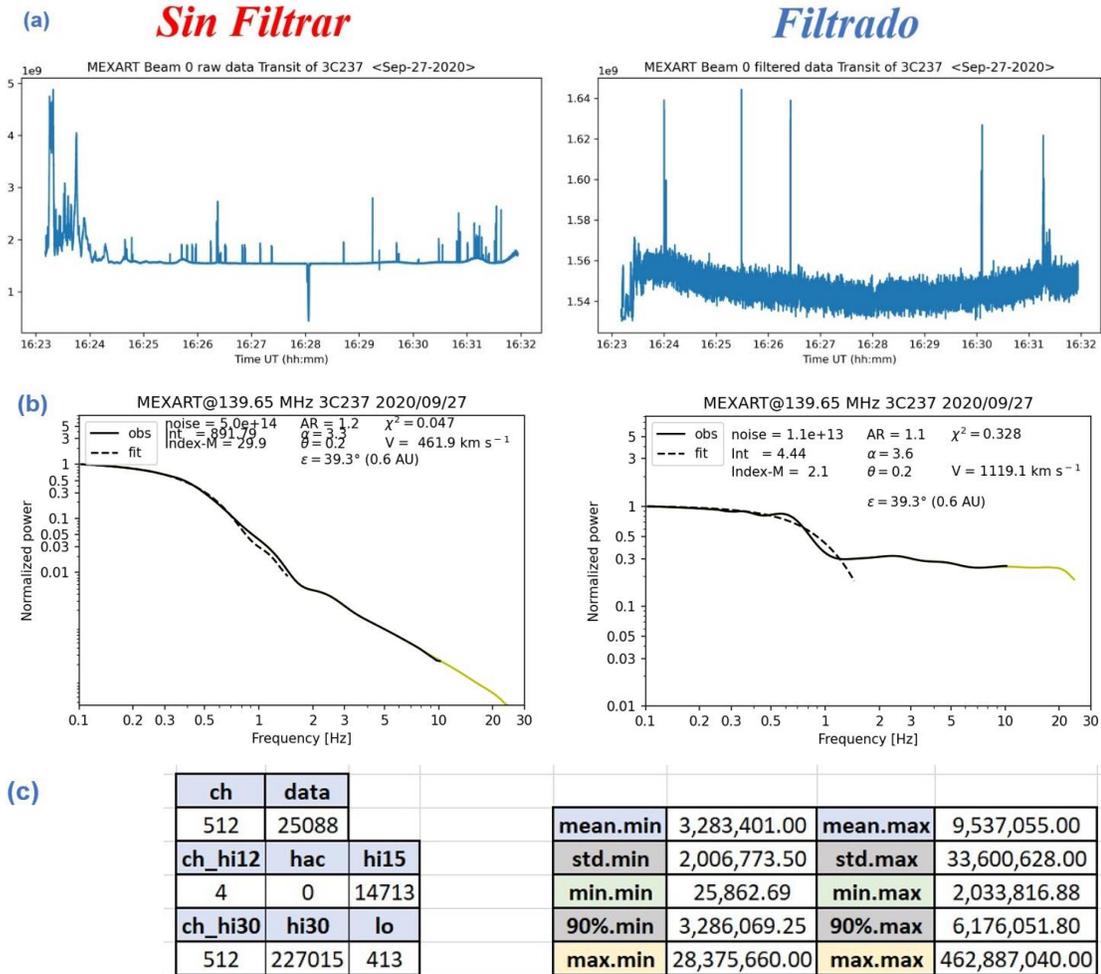
En la [Figura 5.52](#) (a) se muestran el espectro total de los 512 canales, sin filtrar del lado izquierdo y a la derecha el filtrado. En el inciso (b), se muestra la gráfica de la rodilla de Fresnel para la señal sin procesar del lado izquierdo y la filtrada del lado derecho.

En el apartado (c), se presenta la información recopilada sobre los canales y datos. En este archivo en particular se tienen 25,088 datos por canal, es decir un total de 12,845,056 puntos, los cuales son revisados por canal para detectar los valores muy altos y altos. En la primera y segunda validación, hay 0 canales sin problemas. En la tercera, encuentra 162 canales fuera del criterio y efectúa un total de 9,910 cambios; es decir que hubo 9,910 puntos a los que se les asignó la mediana. Posteriormente, se suman todos los espectros para obtener el espectro total. En el total, se efectúa una cuarta validación para encontrar los que están por debajo del criterio, y en esta ocasión sólo efectúa 33 cambios para asignar NaN.

El número total de cambios efectuados fue de un 0.0774%; sin embargo, la velocidad pasó de  $834.7 \text{ km s}^{-1}$  a  $857.5 \text{ km s}^{-1}$  sufriendo un incremento en 1.027%, pero se logró definir un poco mejor la rodilla de Fresnel, reducir el nivel de ruido, aunque  $\alpha$  paso de extremo a extremo de  $3.3_{\text{mín}}$  a  $3.8_{\text{máx}}$  y AR permaneció en  $1.3_{\text{máx}}$ . Los parámetros alfa y razón axial nos indican el nivel de turbulencia y que tan anisotrópico se encuentra el viento solar. El que llegue al mínimo o máximo de algún parámetro en la rutina de ajuste nos indica que no logró obtener uno mejor. En la tabla inferior de la derecha se incluyen los valores mínimos y máximos, de los 512 canales, para la media, la desviación estándar, los mínimos, el percentil al 90% y los máximos. Para este día, la diferencia parece ser aceptable.

En el 27 sep 2020, se obtuvieron los resultados de la [Figura 5.53](#). En el inciso (a) se muestra el espectro total sin filtrar (izq.) y filtrado (der.). El ajuste al par de espectros en el inciso (b), e información sobre los datos en el (c).

Figura 5.53 Espectros de potencias de la galaxia 3C237, 27/sep/2020



En esta ocasión, cuatro canales estuvieron por arriba del percentil 90 y dentro de estos 14,713 puntos estuvieron arriba del 2º criterio. En la 3ª validación, en todos los canales hubo algún valor que fue remplazado por la mediana efectuándose un total de 227,015 cambios. Se suman los espectros y en éste se efectúa la última validación, en los valores inferiores, donde solo se remplazaron 413 valores por NaNs, que en el programa de *auto-mexart* son remplazados por la media. Por lo que, hubo un total de 242,141 cambios, que representa sólo un 1.885% de modificaciones; sin embargo, la velocidad sufrió un incremento del 242%, pasando de 461.9 km s<sup>-1</sup> a 1,119 km s<sup>-1</sup>, aunque, el nivel de ruido mejoró, en la misma proporción que el día anterior, y la rodilla de Fresnel quedó mejor definida.

Mediante el archivo log, ver [Figura 5.54](#), se sabe que los 4 canales con mediciones superiores al percentil 90%, son los canales 159, 162, 178 y 185.

#### Figura 5.54 LOG con datos de la radiogalaxia 3C237, 27/sep/2020

```
Processing the file #2/5 => ./mexart/3C237\3C237_beam_obs_27_09_2020\beam_20200927_162329.hdf5
Source = 3C237
(1) Getting the RIGHT ASCENSION & DECLINATION
R.A. = 10:08:00, Dec = +07:30:16
(2) Generating TIME & FREQUENCY VECTOR
(3) Getting FULL POWER of Beam0
(4) Cleaning the DATA
outliers1# 4; median=          159          162          178          185
50% 3052080.125 3022638.875 2911319.875 2841543.625
=> inrange1 = 3430474.575
OUTLIERS1
159 52404858.80
162 4642236.05
178 52895332.40
185 29779524.00
Name: 0.9, dtype: float64
```

Los valores de los outliers1; es decir, los valores fuera del 1er criterio, son para: (a) el Canal # 159, de 52,404,858.80, (b) el Canal # 162, de 4,642,236.05, (c) el Canal # 178, de 52,895,332.40 y (d) el Canal # 185, de 29,779,524.00. Además, la mediana de los valores que están dentro del rango es de 3,430,474.575, o sea del intervalo de 0-90%. Por el valor de la mediana, se podría discriminar los canales 159, 178 y 185 pues están muy por arriba de este valor y podría no ser representativos.

De la tabla inferior a la derecha, de la [Figura 5.53\(c\)](#), se puede encontrar que entre la media mínima y la máxima hay un factor de  $\sim 3$ . La desviación en los datos es elevada versus el ejemplo anterior, y todos los demás parámetros. Entre el mínimo y máximo de la desviación hay un factor de  $\sim 16$ . Entre los mínimos, hay un factor de  $\sim 79$ , pero entre el percentil del 90% mínimo y máximo sólo hay un factor de 2. Y entre los máximos hay un factor de  $\sim 16$ . Esos valores son recopilados exactamente antes de ser filtrada la señal.

Claramente podemos saber que, en la población del 10% de los datos elevados, hay valores muy altos, tanto que, entre el máximo al 90% y de la población total hay un factor  $\sim 75$ ; es decir, que es 750% más alto, y sin embargo, ningún canal es descartado, efectuándose algo más de 242,000 cambios por medianas.

### 5.3.5 Soluciones Alternativas para el Método de Filtrado

Propongo la realización de las siguientes actividades:

#### *multiclean*

1. Eliminar los canales con desviaciones superiores a la media en 2.
2. Evaluar el cambio de  $r_t$  máximo de 5 a un valor inferior. Este valor sirve como referencia para descartar todo el canal.
3. Evaluar el cambio de los factores de 1.3 y 1.5, usados para obtener el rango intercuartílico; es decir entre los cuartiles del 25% y 75%.
4. Reemplazar los NaNs por la mediana o media.
5. Generar dos grupos de archivos DAT, filtrados y sin filtrar.

#### *auto-mexart*

- 1 Dejar libre el ancho angular de las fuentes  $\Theta$ , permitiéndole variar entre [0.1,0.5].
- 2 Procesar los dos grupos de archivos DAT para generar las gráficas de espectros y formatos WIPSS con índices  $m$ .

#### *wipss*

- 1 Procesar los formatos WIPSS de datos filtrados y sin filtrar para generar los formatos WIPSS anuales.

#### *Validación externa*

- 1 Compartir a miembros de CIP de la UCSD los formatos WIPSS anual generados a partir de los datos filtrados y sin filtrar para su uso y evaluación.

## Conclusiones

---

Resumiendo, se desarrolló un sistema en Python para el procesamiento y análisis de los datos de CIP generados por el back-end digital del MEXART, el cual incluye: la lectura de los formatos WIPSS del ILT e ISEE; la obtención de la velocidad y densidad de protones en el VS mediante la PSP; la inclusión de los resultados de ILT e ISEE, y ubicación de la PSP en los mapas de velocidad de CIP. Se presentaron los resultados del encuentro 6 y un análisis preliminar al problema de filtrado.

Durante este proceso se logró:

1. Revisar, depurar y mejorar las rutinas anteriores del MEXART.
2. El renombramiento de las entradas y salidas.
3. La reorganización de directorios.
4. La inclusión de: el procesamiento de uno a muchos archivos en una corrida, la generación de formatos WIPSS diarios, reportes al usuario, el soporte de años bisiestos y los criterios de validación para descartar espectros.
5. Además, se encontraron discrepancias y radiofuentes faltantes entre los dos catálogos empleados, por lo que se unificó y se validó la información, incluyendo una bandera para distinguir las fuentes válidas para análisis de CIP versus las de referencia como Cygnus.
6. Se incluyeron nuevas rutinas.
7. Se puso en marcha el sistema en el MEXART, efectuándose correcciones al código por discrepancias en las versiones de Python, problemas en la integridad de archivos HDF5 e información registrada en los archivos filtrados previos.
8. Se generaron los formatos WIPSS anuales de los años 2020 al 2023. Validando el formato del 2020 con miembros de la comunidad internacional

de CIP. Indicándonos problemas de espaciado, número de caracteres, ordenación y de filtrado.

9. Se incluyó el análisis de los datos en crudo por el auto-mexart y guardar información sobre el proceso de filtrado en el multiclean.
10. Mejorar la programación de las observaciones.
11. Se avanzó en la identificación de eventos del clima espacial al producir mapas de la distribución del VS con la información de los tres radiotelescopios más la PSP. Además, en la identificación de otros parámetros por leer de la sonda, y en la estimación de la llegada de las EMC al punto P.

Aunque la optimización de las rutinas de filtrado está fuera del alcance de la tesis, utilicé la información de los formatos WIPSS del ILT e ISEE del encuentro 6 como punto de comparación y realicé un diagnóstico inicial sobre el problema del filtrado, modificando para ello el programa *multiclean*, para salvar información sobre los cambios hechos a los espectros durante el filtrado. Además, ajustando los espectros sin filtrar, para obtener los estimados de la velocidad y parámetros de turbulencia bajo esas condiciones.

Se analizaron dos casos concretos, los espectros de la radiofuente **3C237** para los días 26 y 27 de septiembre 2020. Y se encontró que efectivamente la velocidad del VS en los espectros filtrados suele ser mayor a la obtenida con los espectros no filtrados. Se propone una validación inicial en base a las medias y desviaciones estándar, el ajuste de los límites en las diferentes validaciones y cambiar los NaNs por las medianas o medias.

## 6.1 Alcances

Los valores obtenidos para la velocidad del viento solar e índices de centelleo interplanetario con datos del MEXART están limitados al método de una estación por no contar el LANCE y en el país con otros radiotelescopios que operen a una frecuencia adecuada para realizar estudios de CIP y poderse implementar, además, el método de múltiples estaciones.

El proceso de filtrado previo de la señal se encuentra aún en fase de mejora. Los resultados preliminares usando la técnica propuesta por [Barón \(2023\)](#) compartidos a un investigador de la UCSD no son del todo satisfactorios y su recomendación es revisar el proceso de filtrado.

El limitarme a la lectura de los sensores SPC & SPAN-Ai para obtener la velocidad y densidad de protones. Quedando pendiente, el obtener los datos relacionados a los tres grupos de poblaciones de electrones (core, halo y strahl) medidos por el SPAN-Ae y el SPAN-B.

Otros factores que dificultaron la realización del presente trabajo fueron: el acceso y uso de los datos y servidores, el manejo de un gran volumen de datos, el uso de dos lenguajes de programación (IDL, Python) y sistemas operativos (Linux y Windows), en la depuración y puesta en marcha de los programas, en la asesoría externa por parte del LANCE, MEXART, UCSD, SAO y RAL.

## 6.2 Trabajo a futuro

Algunos de los trabajos a futuro en los que podría colaborar se resumen en la [Figura 6.1](#).

**Figura 6.1** Posibles Trabajos a Futuro



### A CORTO PLAZO:

- Revisar y mejora el proceso y criterios de filtrado.

- b) Realizar mejoras en la programación, como, por ejemplo: unificar multiclean y auto-mexart en un solo programa.
- c) Revisar la programación de las observaciones de CIP versus ángulos de elongación.
- d) Poner en marcha las últimas versiones de los programas en el MEXART.

**A MEDIANO PLAZO:**

- a) Reunirme con el personal del LANCE y estudiantes involucrados en sus dos sedes Morelia y Monterrey para el uso y comprensión de los programas.
- b) Colaborar con el LANCE para la implementar del cálculo del índice  $g$  diario.
- c) Atender los nuevos requerimientos de cambios o mejoras a los programas, como, por ejemplo: obtener la densidad mediante CIP, optimizar los programas, la elaboración de una interface gráfica, reprocesar los datos del *back-end* analógico para pasar la información a archivos con formato HDF5, traducir otras rutinas en IDL o Fortran a Python empleadas por los investigadores del LANCE.
- d) Continuar con la capacitación sobre la PSP y la Solar Orbiter para manejar los parámetros adicionales requeridos para la identificación de los eventos a gran escala, como EMCIs y RICs, y hacerlos accesibles a los investigadores del LANCE.

**A LARGO PLAZO:**

- a) Familiarizarme con la teoría de múltiples estaciones
- b) Participar en proyectos de trabajo en conjunto con otros observatorios como en el Radio Observatorio de Jicamarca, Perú o los datos de Arecibo, P.R. para aplicar ambas metodologías.

# Anexo A

## Encuentro 6, PSP

Figura A.1 Datos de los instrumentos SPC, SPAN-Ai, 24/sep/2020

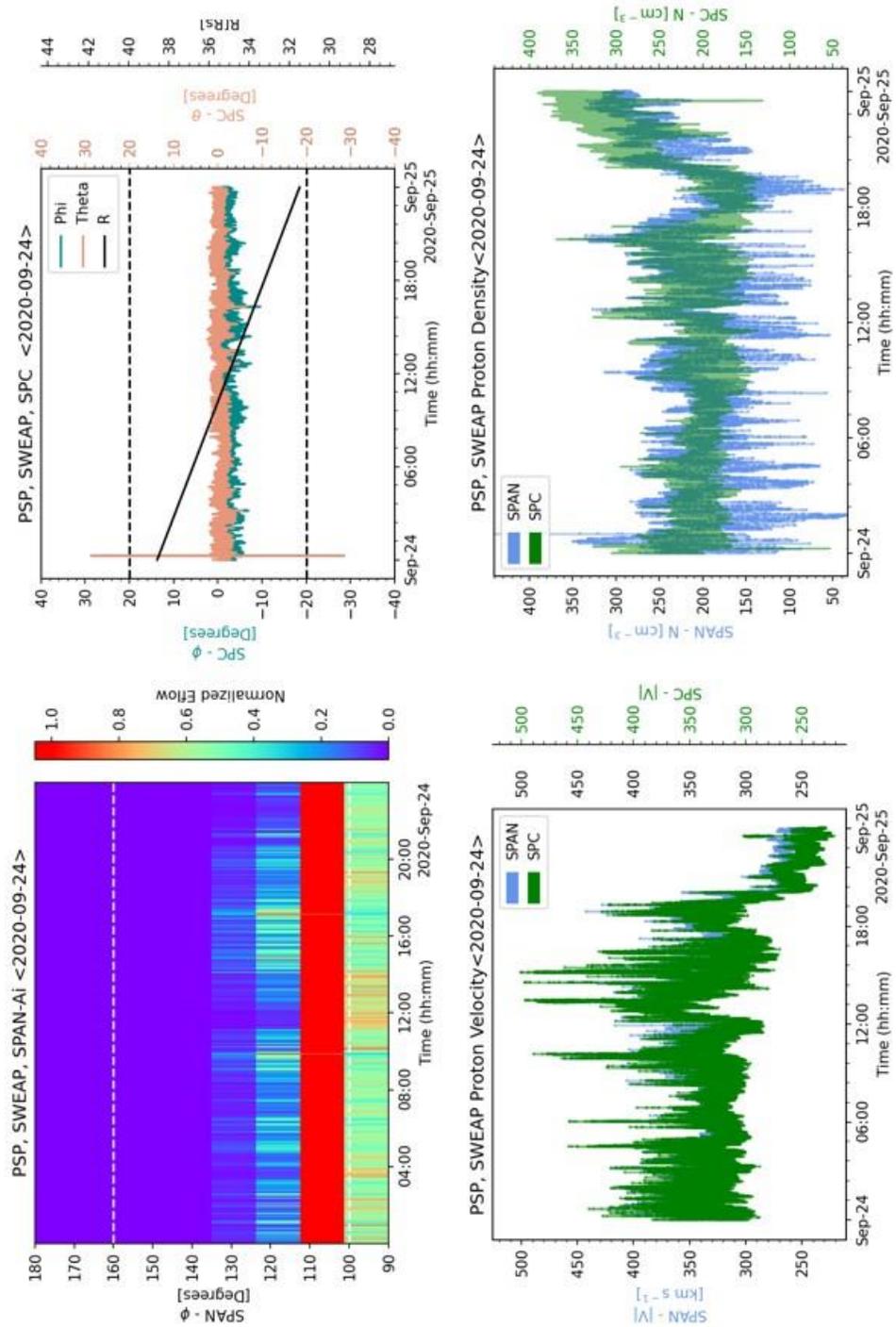


Figura A.2 Datos de los instrumentos SPC, SPAN-Ai, 25/sep/2020

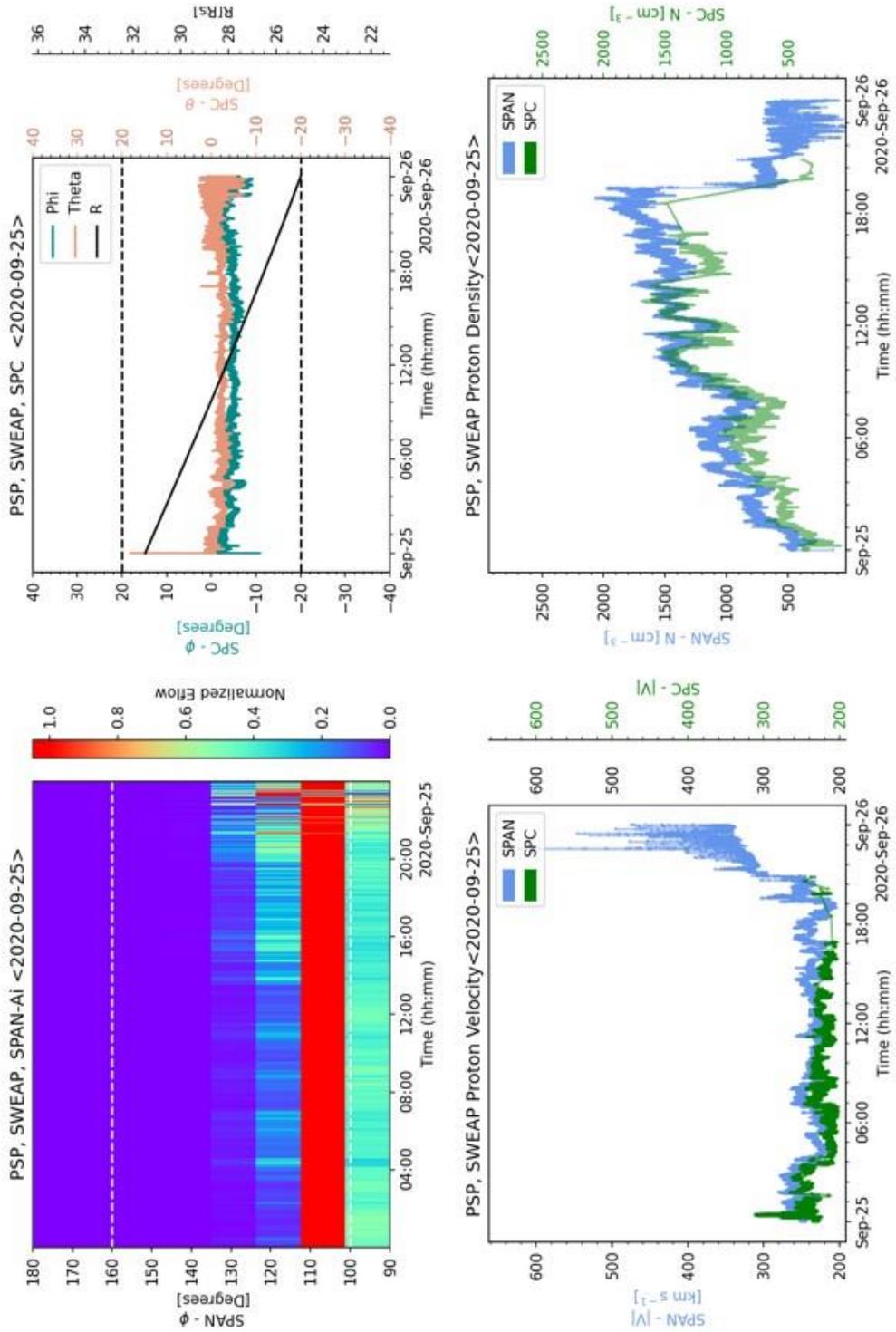


Figura A.3 Datos de los instrumentos SPC, SPAN-Ai, 26/sep/2020

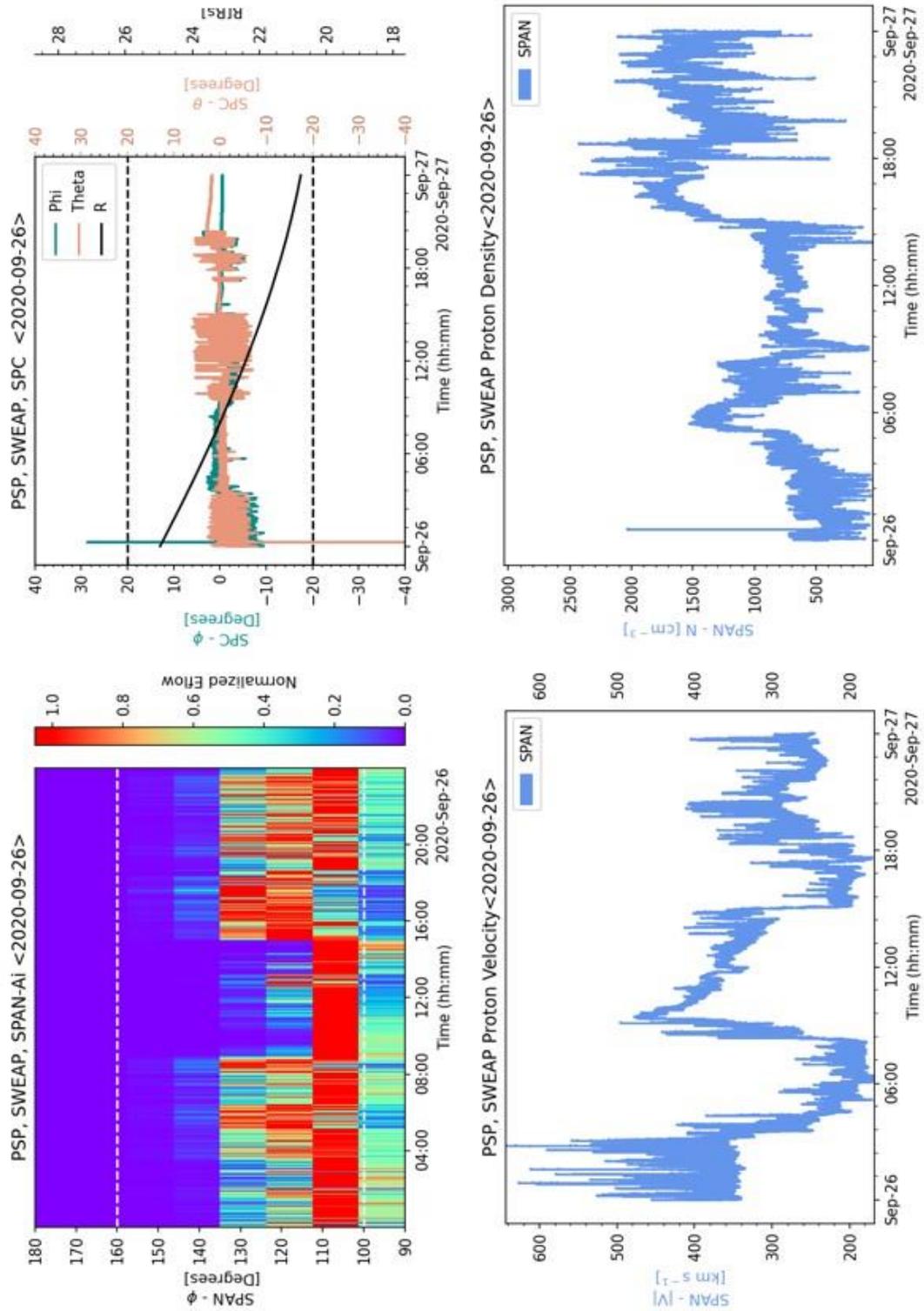


Figura A.4 Datos de los instrumentos SPC, SPAN-Ai, 27/sep/2020

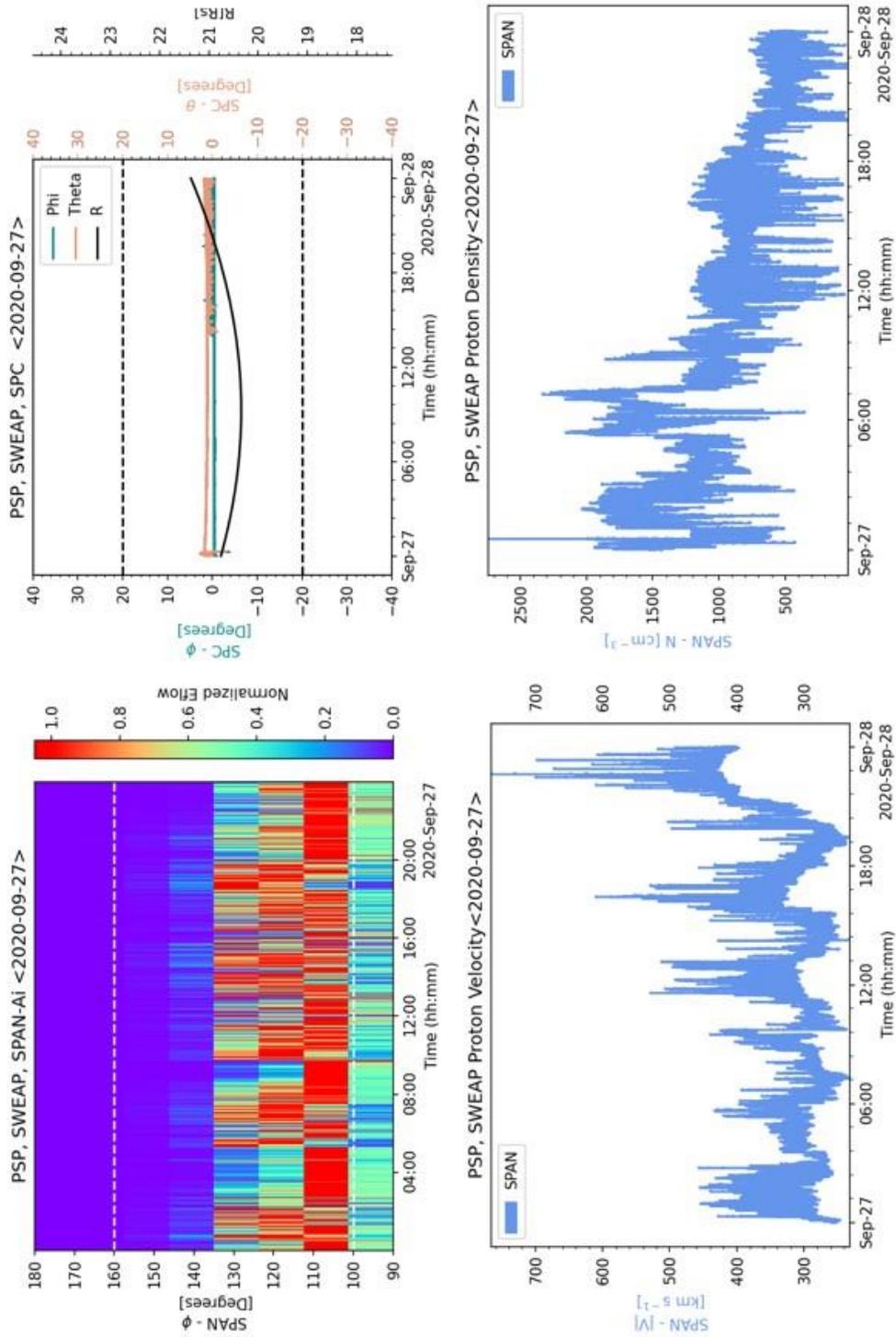


Figura A.5 Datos de los instrumentos SPC, SPAN-Ai, 28/sep/2020

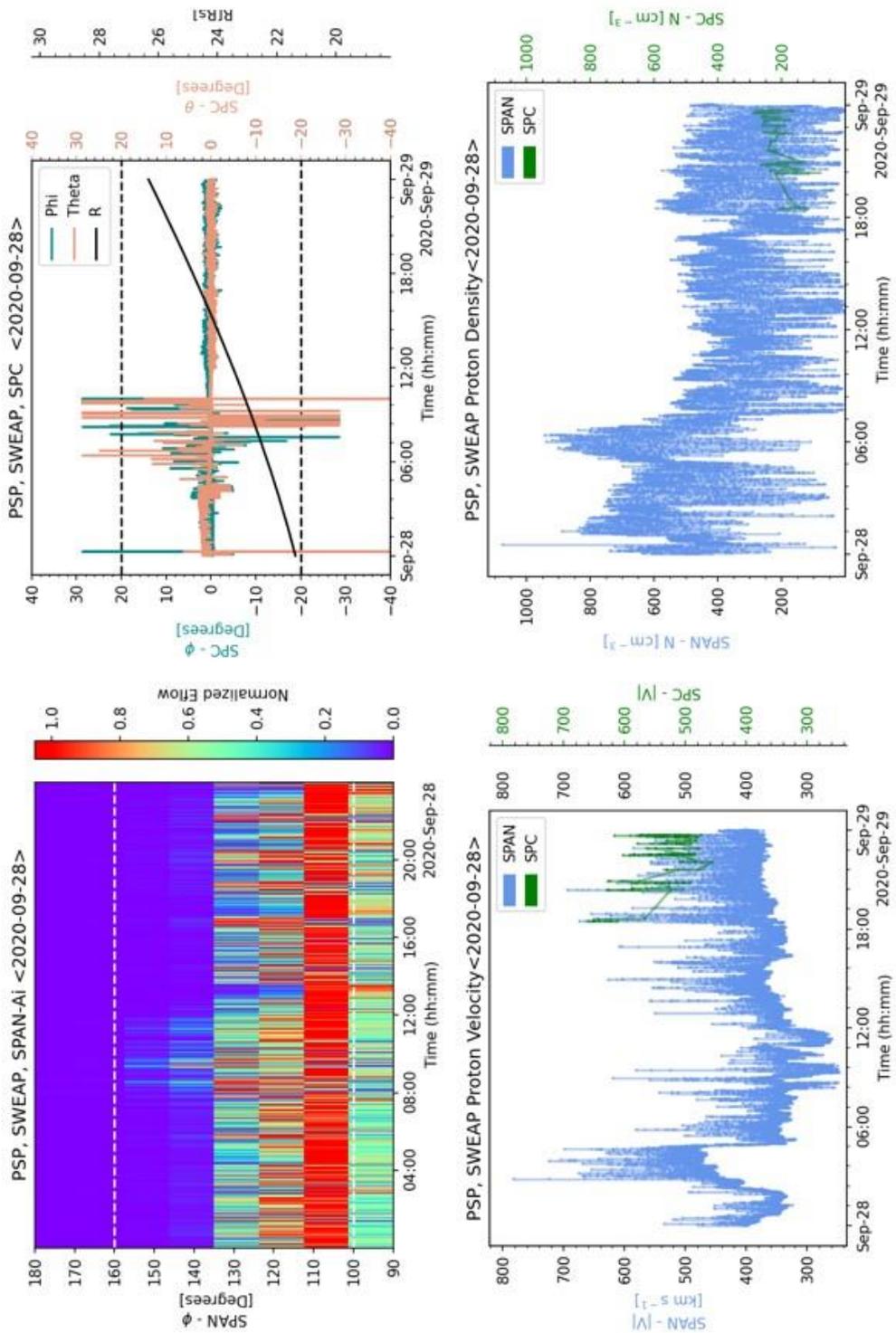


Figura A.6 Datos de los instrumentos SPC, SPAN-Ai, 29/sep/2020

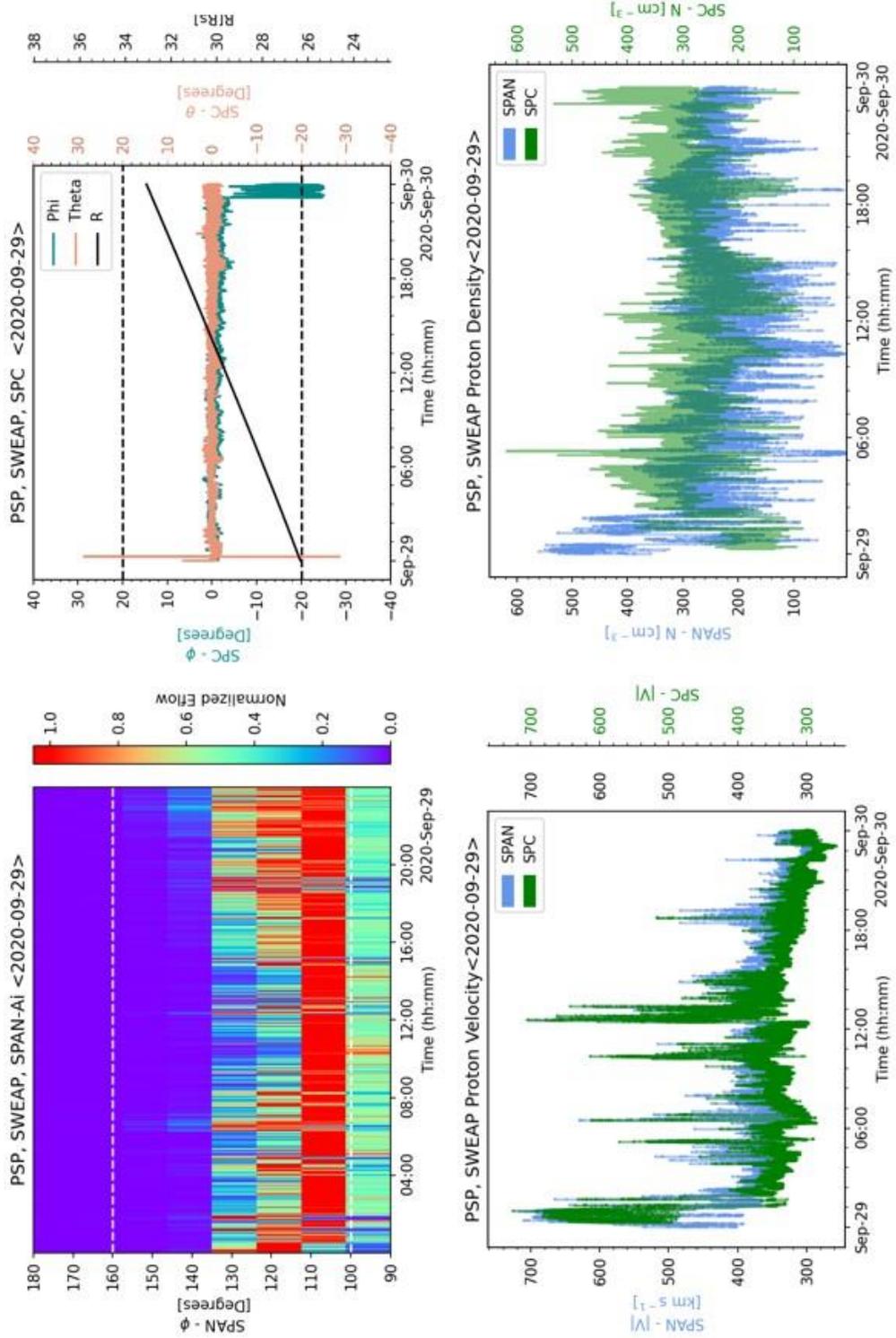
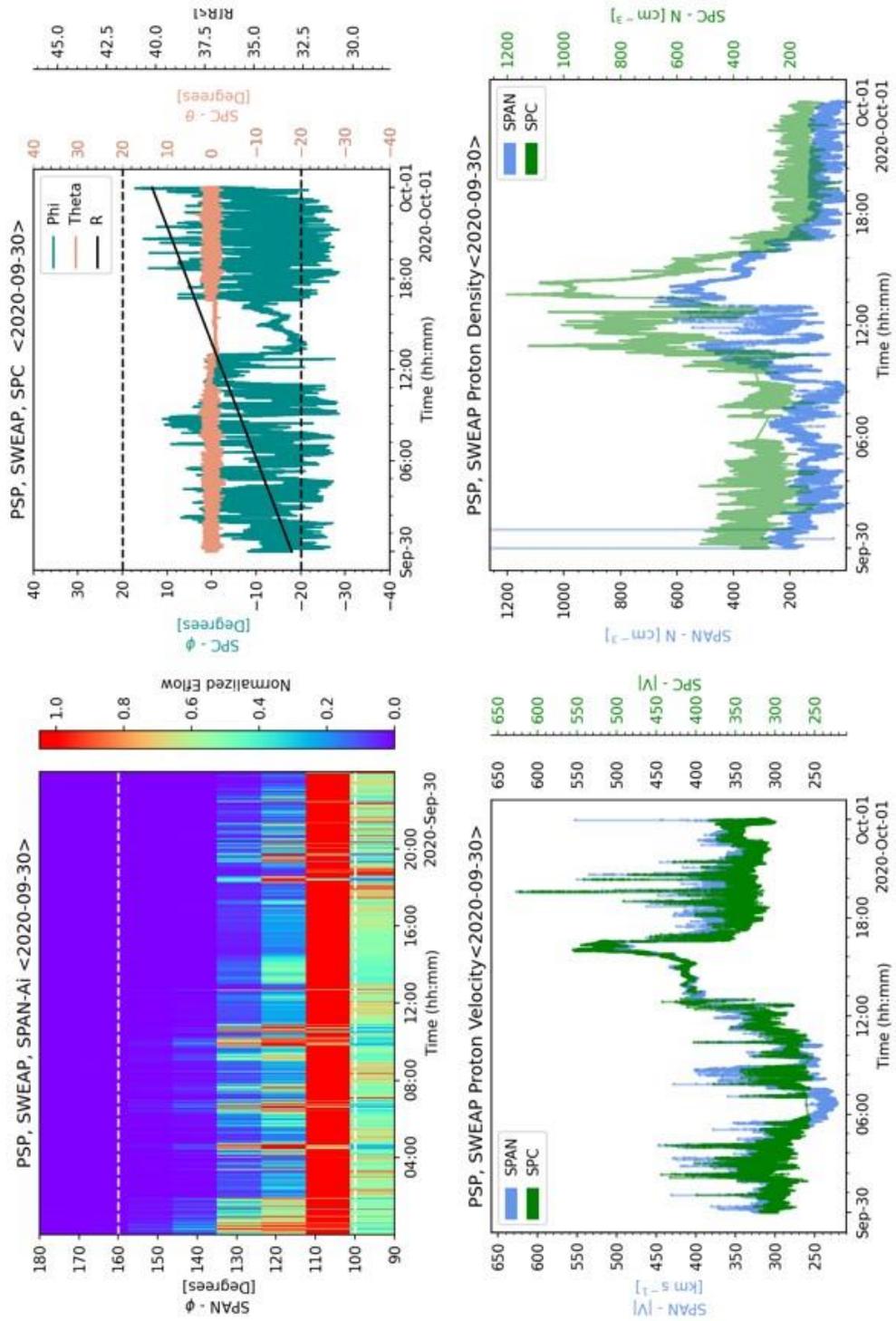


Figura A.7 Datos de los instrumentos SPC, SPAN-Ai, 30/sep/2020



# Anexo B

## Filtrado

Figura B.1 Espectros de Potencias de 3C237, MEXART, 26/sep/2020

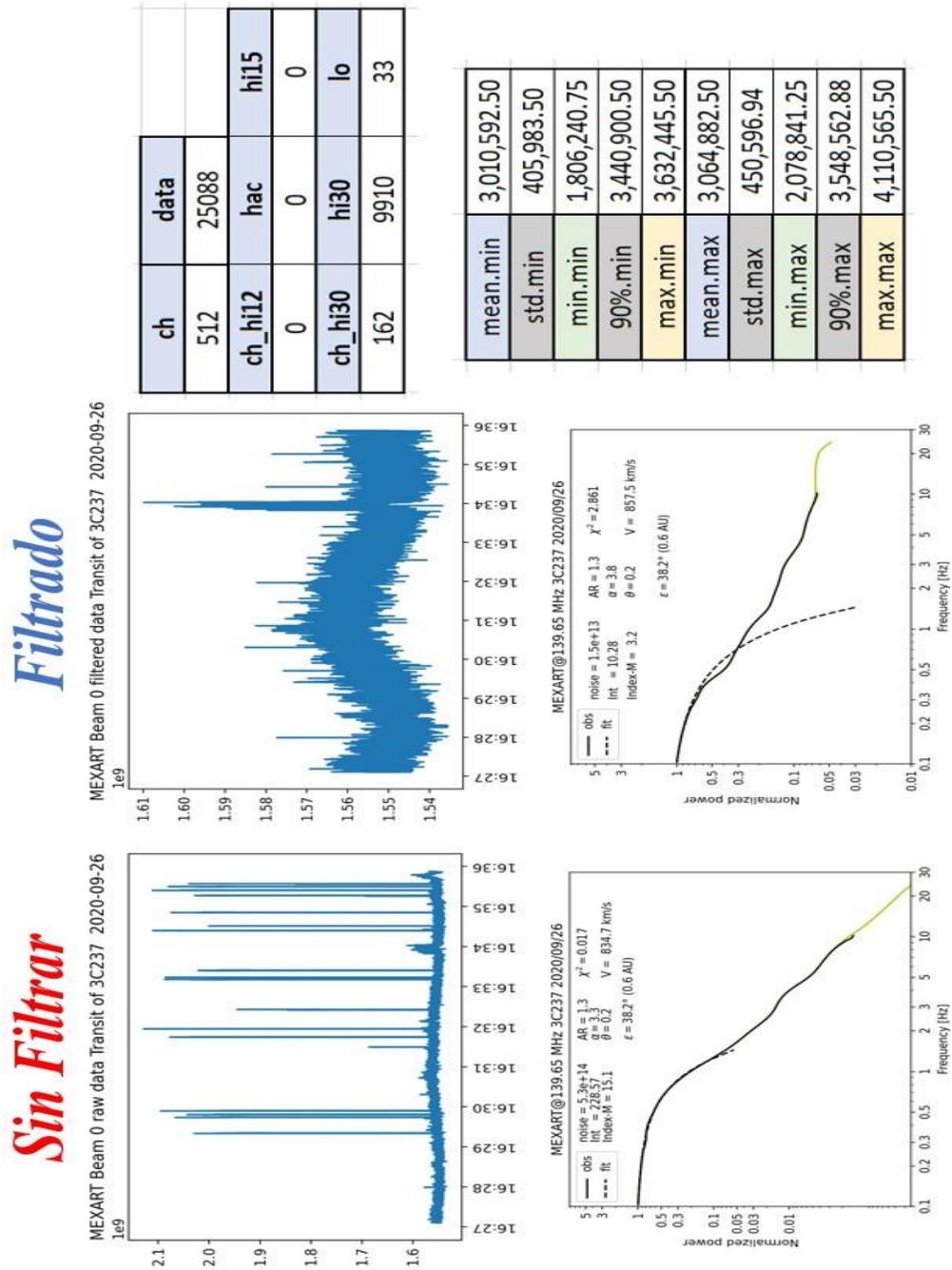


Figura B.2 Espectros de Potencias de 3C237, MEXART, 27/sep/2020

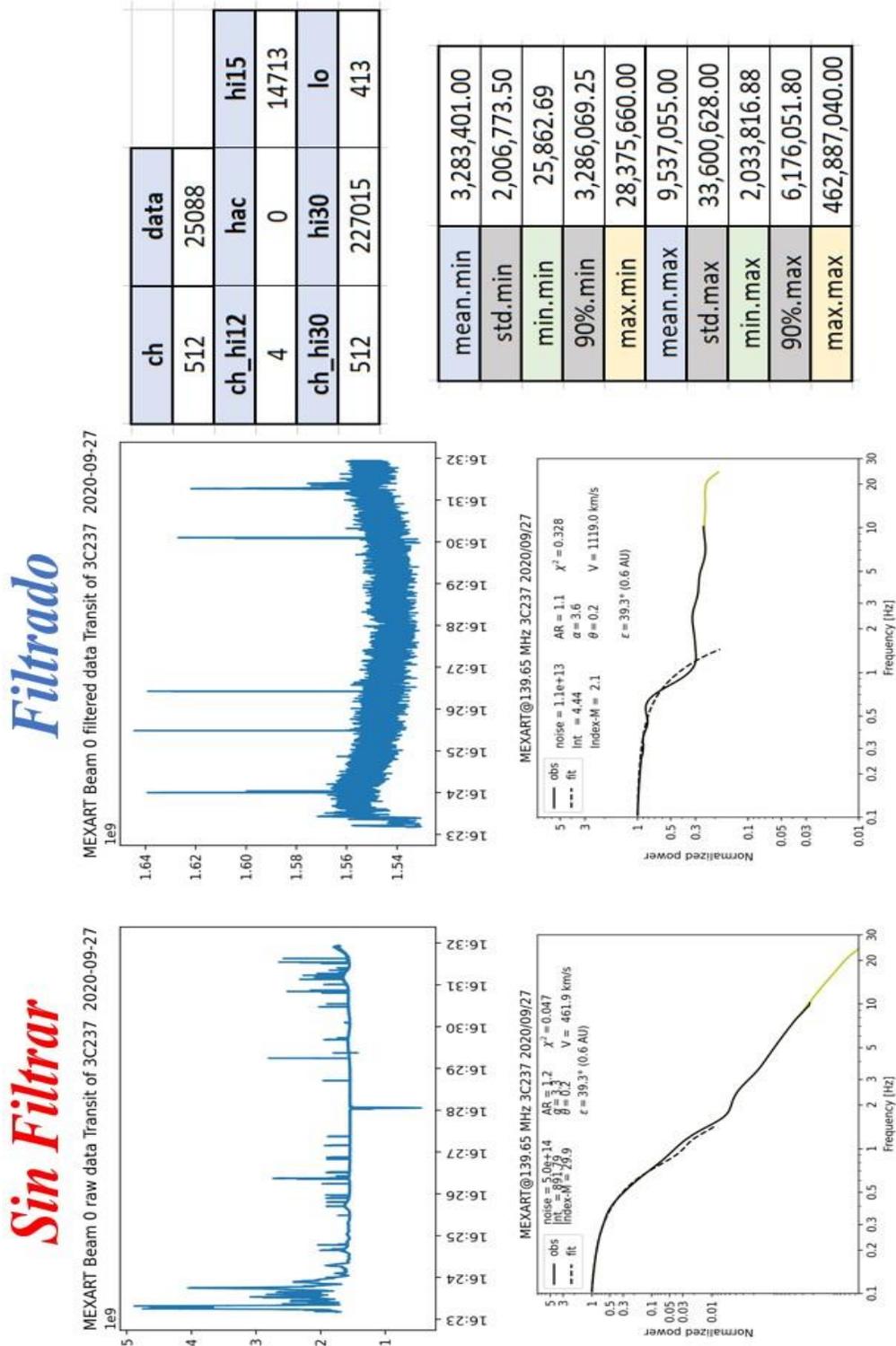


Figura B.3 Espectros de Potencias de 3C237, MEXART, 28/sep/2020

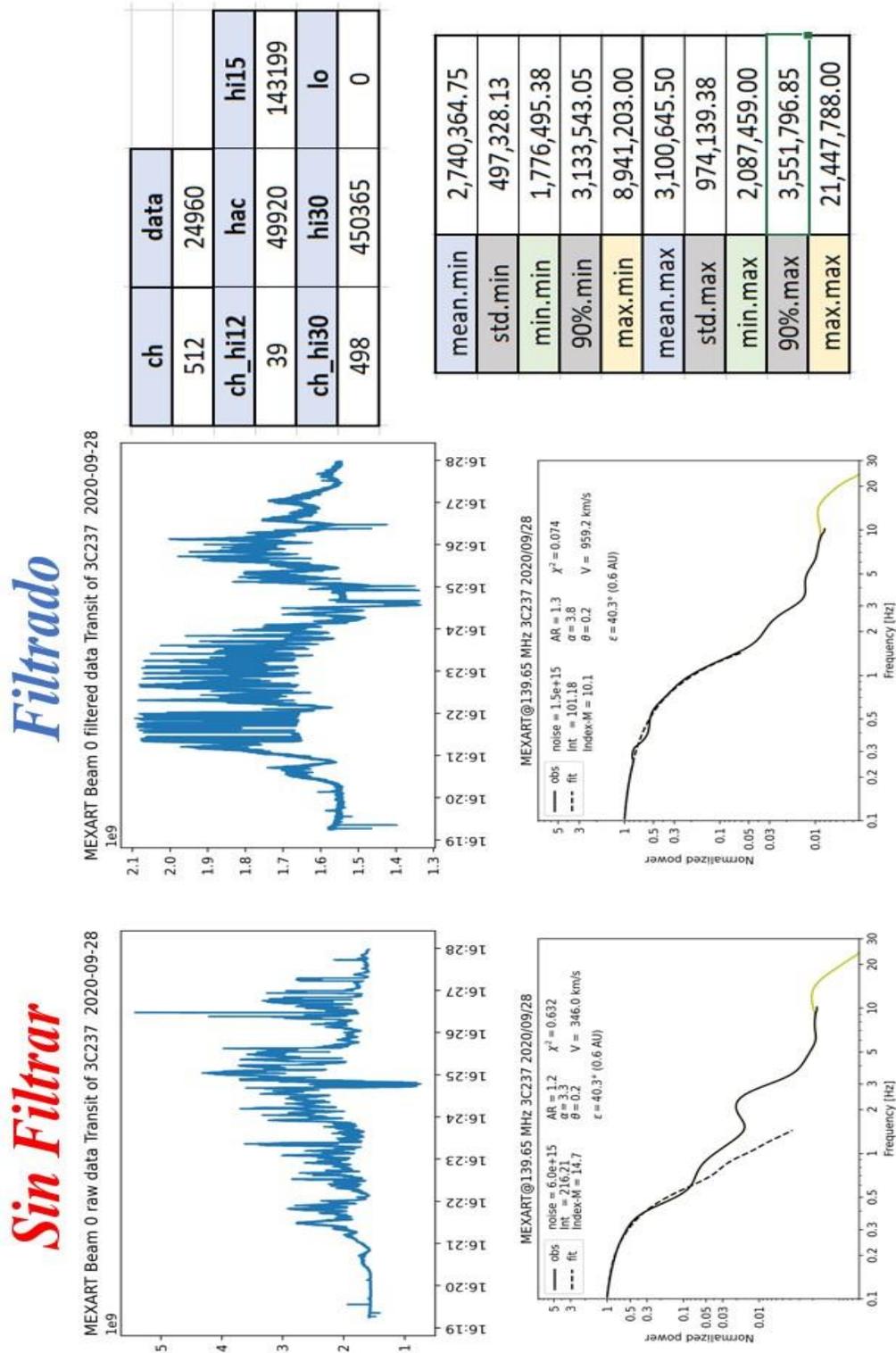


Figura B.4 Espectros de Potencias de 3C237, MEXART, 29/sep/2020

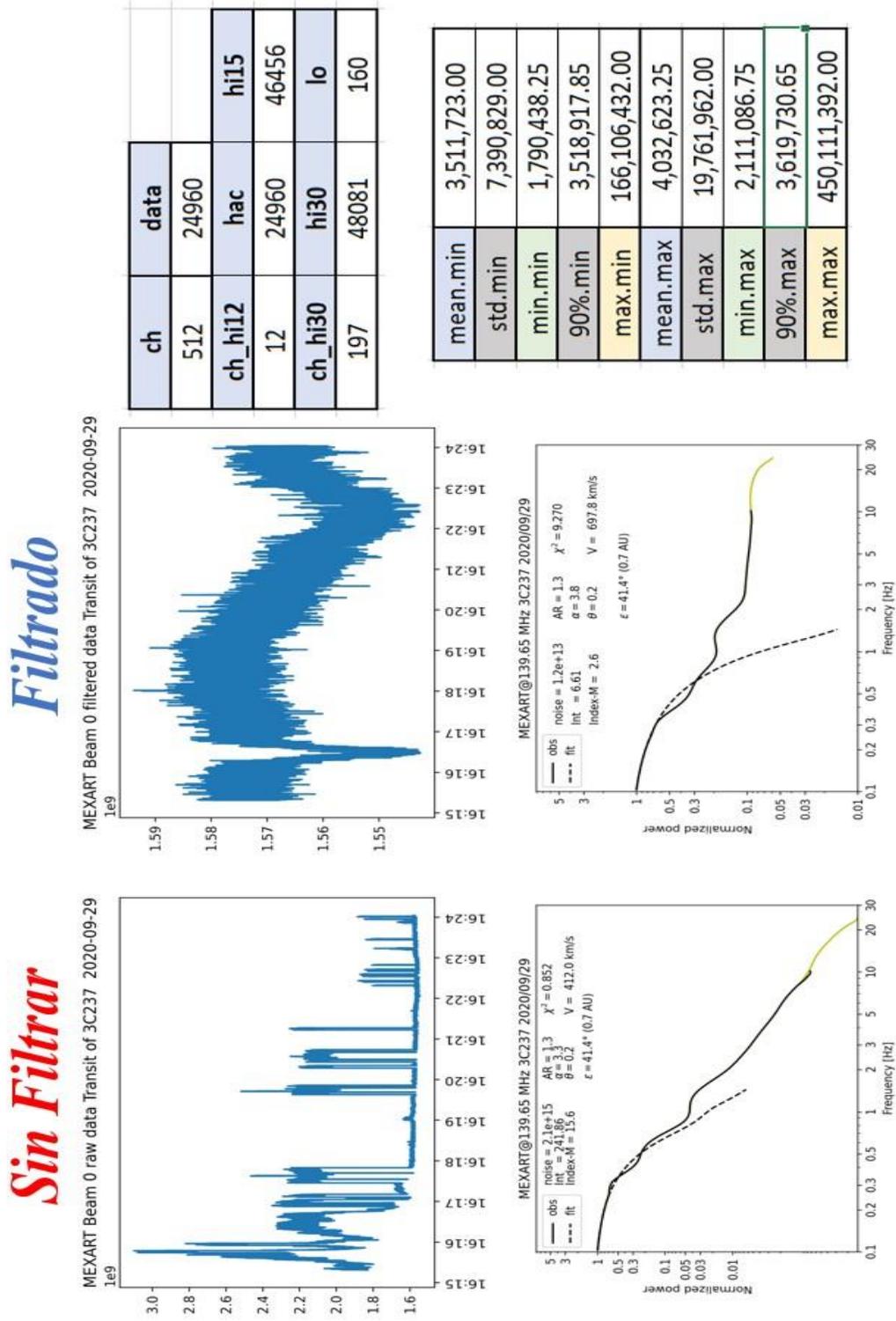
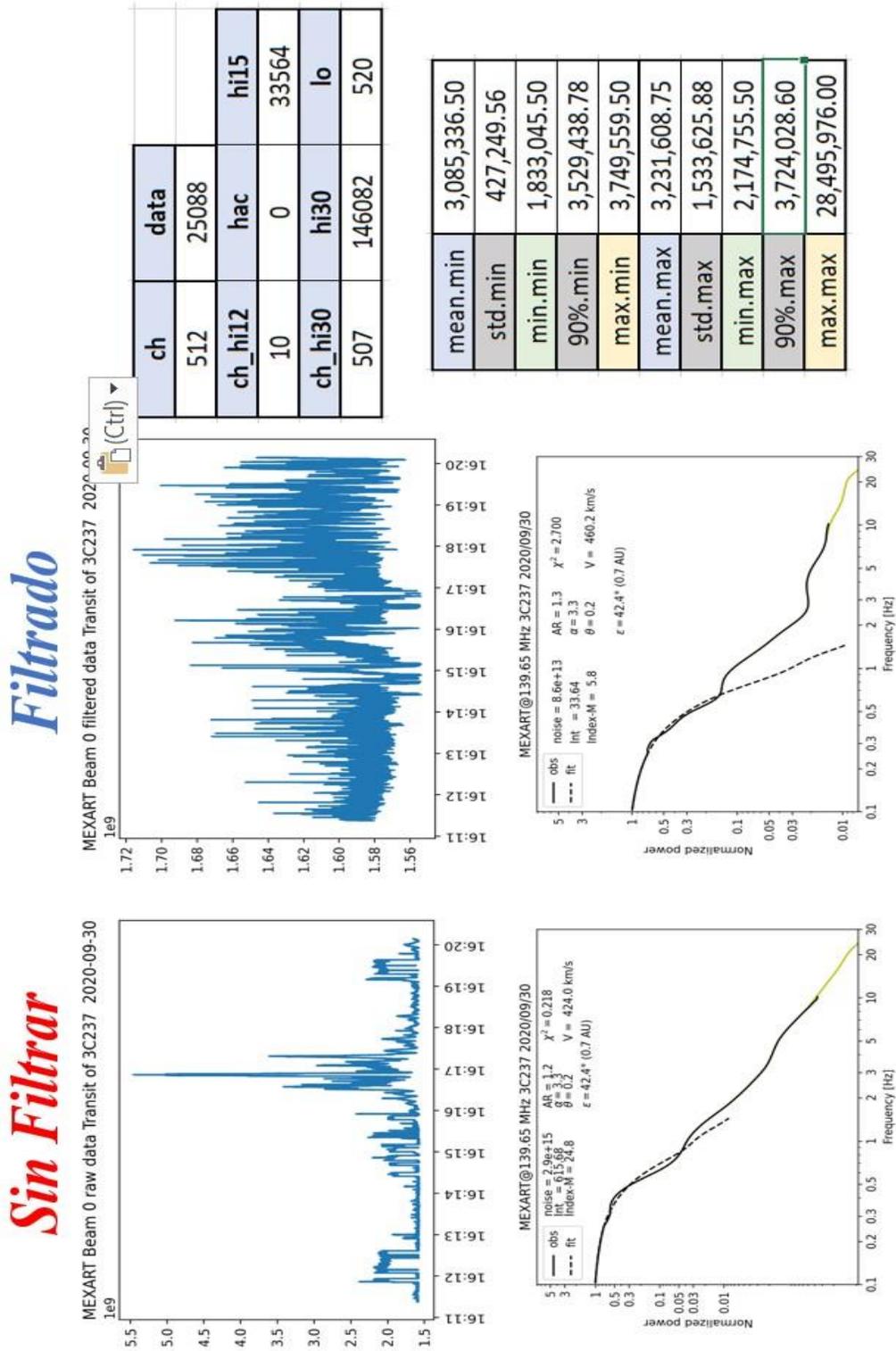


Figura B.5 Espectros de Potencias de 3C237, MEXART, 30/sep/2020



# Índice de Figuras

---

<b>Figura 1.1</b>	Efectos del clima espacial.....	5
<b>Figura 1.3</b>	Infraestructura del Laboratorio Nacional de Clima Espacial.....	8
<b>Figura 1.4</b>	Centros regionales de alertas del ISES (2016) .....	8
<b>Figura 1.5</b>	Evolución del uso de diferentes lenguajes de programación .....	11
<b>Figura 1.6</b>	Número de usuarios por país de la librería Astropy .....	11
<b>Figura 2.1</b>	Estructura del Sol.....	16
<b>Figura 2.2</b>	Observaciones del VS por la misión Ulises del 1992 al 2003 .....	21
<b>Figura 2.3</b>	Espiral de Parker .....	22
<b>Figura 2.4</b>	Bandas del espectro electromagnético .....	28
<b>Figura 2.5</b>	Atenuación de las ondas EM por la atmósfera terrestre .....	29
<b>Figura 2.6</b>	Radiotelescopio de disco .....	31
<b>Figura 2.7</b>	Patrón de radiación de un reflector parabólico.....	34
<b>Figura 2.8</b>	Geometría para el cálculo de la potencia de antena.....	35
<b>Figura 2.9</b>	Sistema de coordenadas ecuatorial .....	36
<b>Figura 2.10</b>	Índices de centelleo normalizado para seis radiofuentes.....	39
<b>Figura 2.11</b>	Índice de centelleo m vs elongación para la radiofuente 3C29840	
<b>Figura 2.12</b>	Geometría de las observaciones de CIP.....	43
<b>Figura 2.13</b>	Sistema de referencia para cálculo del ángulo de elongación ..	44
<b>Figura 2.14</b>	Sistema de referencia para cálculo la latitud heliocéntrica.....	45
<b>Figura 2.15</b>	Tres representaciones del filtro de Fresnel .....	53
<b>Figura 2.16</b>	Mapas del cielo con valores G y velocidad, ISEE, 15/jul/2000..	61
<b>Figura 2.17</b>	Mapas de CIP, MEXART, 15/ago/2023.....	62
<b>Figura 2.18</b>	<i>Geometría para la ubicación de la PSP en mapas de CIP.....</i>	63
<b>Figura 3.1</b>	Vista área del observatorio y del terreno en Coeneo, Mich.....	66
<b>Figura 3.3</b>	Diagrama de bloque del nuevo back-end digital del MEXART....	67
<b>Figura 3.4</b>	Vista trasera y lateral del back-end digital del MEXART .....	68
<b>Figura 3.5</b>	Vista frontal del rack con el back-end del MEXART.....	69

<b>Figura 3.6</b> <i>Distancia Sol - PSP</i> .....	70
<b>Figura 3.7</b> Trayectorias planeadas para la Parker Solar Probe.....	71
<b>Figura 3.8</b> Vistas laterales de la Parker Solar Probe.....	72
<b>Figura 3.9</b> Instrumentos por área de investigación de la Parker Solar Probe .....	73
<b>Figura 3.10</b> Sensores de plasma de la Parker Solar Probe .....	77
<b>Figura 3.11</b> Vista desde el Sol de la PSP .....	78
<b>Figura 3.13</b> Vista lateral y de frente del instrumento Solar Probe Cup.....	81
<b>Figura 3.14</b> Diagrama de los componentes electrónicos de la SPC .....	82
<b>Figura 3.15</b> Funciones de distribución de iones, SPC, 7/Nov/2028 08:55:47 .....	83
<b>Figura 3.16</b> Sensores electrostáticos .....	85
<b>Figura 3.17</b> Vista transversal del SPAN-Ai.....	86
<b>Figura 3.18</b> Tarjeta de ánodos del SPAN-Ae y SPAN-B.....	87
<b>Figura 3.19</b> Vista SPAN-A y FOV del SPAN-Ai.....	88
<b>Figura 3.20</b> Productos de datos de la PSP, SWEAP .....	89
<b>Figura 3.21</b> <i>Red de estaciones que conforman el ILT</i> .....	93
<b>Figura 3.22</b> Vista aérea del núcleo central LOFAR .....	94
<b>Figura 3.23</b> Radiotelescopios de UHF del ISEE y ubicación.....	95
<b>Figura 4.1</b> Diagrama del proceso de desarrollo de software del MEXART ..	97
<b>Figura 4.2</b> Diagrama del proceso de desarrollo de software de la PSP .....	98
<b>Figura 4.3</b> Diagrama de proceso para el ILT e ISEE.....	99
<b>Figura 4.4</b> Componentes del sistema para el MEXART .....	100
<b>Figura 4.5</b> Componentes del sistema para <b>multiclean</b> .....	101
<b>Figura 4.6</b> Vista parcial del catálogo de radiofuentes.....	102
<b>Figura 4.7</b> Acceso y metadatos de un archivo HDF5 .....	103
<b>Figura 4.8</b> Lista de atributos y valores de un metadato en HDF5 .....	104
<b>Figura 4.9</b> Accediendo a las mediciones del back-end .....	104
<b>Figura 4.10</b> Diagrama de flujo del programa <b>multiclean</b> .....	106
<b>Figura 4.11</b> Componentes del sistema para <b>auto-mexart</b> .....	107

---

<b>Figura 4.12</b> Resolución tiempo-frecuencia para la transformada Wavelet ...	109
<b>Figura 4.13</b> Wavelet Morlet .....	110
<b>Figura 4.14</b> Espectro de potencia ideal .....	112
<b>Figura 4.15</b> Resultados del cuásar 3C48, 8/Abr/2021 .....	113
<b>Figura 4.16</b> Diagrama de flujo del programa <b>auto-mexart</b> .....	116
<b>Figura 4.17</b> Componentes del sistema para <b>wipss</b> .....	117
<b>Figura 4.18</b> Diagrama de flujo del programa <b>wipss</b> .....	119
<b>Figura 4.19</b> Componentes del sistema para <b>mapv &amp; mapm</b> .....	120
<b>Figura 4.20</b> Diagrama de flujo de los programas <b>mapv &amp; mapm</b> .....	120
<b>Figura 4.21</b> Componentes del sistema para <b>elong</b> .....	121
<b>Figura 4.22</b> Diagrama de flujo del programa <b>elong</b> .....	122
<b>Figura 4.23</b> Componentes del sistema para <b>rt_plots</b> .....	123
<b>Figura 4.24</b> Diagrama de flujo del programa <b>rt_plots</b> .....	124
<b>Figura 4.26</b> Diagrama de flujo del programa <b>sweep</b> .....	129
<b>Figura 4.27</b> Componentes del sistema para <b>rt_maps</b> .....	130
<b>Figura 4.28</b> Diagrama de flujo del programa <b>rt_maps</b> .....	131
<b>Figura 5.1</b> Días en operación en modo CIP con el MEXART, 2020-2023..	132
<b>Figura 5.2</b> Observaciones en modo CIP, MEXART, 2020-2023 .....	132
<b>Figura 5.3</b> Ubicación de los HDF5s .....	133
<b>Figura 5.4</b> Radiofuentes observadas, MEXART, 2020-2023 .....	133
<b>Figura 5.5</b> Espectros de potencia analizados por <b>auto-mexart</b> , 2020-2023 .....	134
<b>Figura 5.10</b> Resultados generados por el sistema, 2020-2023 .....	135
<b>Figura 5.11</b> Problemas corregidos por la nueva implementación en Python .....	136
<b>Figura 5.12</b> Características añadidas por la nueva implementación en Python .....	137
<b>Figura 5.13</b> Versiones de los componentes del sistema para el MEXART	140
<b>Figura 5.14</b> Publicación del LANCE sobre las primeras pruebas en sitio ..	140
<b>Figura 5.15</b> Graficas de potencia, <b>multiclean r7</b> , 3C026, 14/03/2022 .....	141

<b>Figura 5.16</b> Vista parcial de archivos DAT, <i>multiclean r7</i> , 3C026, 14/03/2022 .....	143
<b>Figura 5.17</b> Vista parcial de archivo CSV, <i>multiclean r7</i> , 3C026, 14/03/2022 .....	143
<b>Figura 5.18</b> Vista parcial de archivo CSV, <i>multiclean r7</i> , 14/03/2022.....	144
<b>Figura 5.19</b> Vista parcial de archivo LOG, <i>multiclean r7</i> , 03/2022.....	144
<b>Figura 5.20</b> Espectro de potencia, <i>auto-mexart r20</i> , 3C026, 14/03/2022 .	145
<b>Figura 5.21</b> Formatos WIPSS, <i>auto-mexart r20</i> , 14/03/2022.....	147
<b>Figura 5.22</b> Valores del espectro de potencia, <i>3C026</i> , 14/03/2022.....	148
<b>Figura 5.23</b> Vista parcial de archivo LOG, <i>auto-mexart r20</i> , filtered, 03/2022 .....	151
<b>Figura 5.24</b> Vista parcial de listas de archivos con problemas, <i>auto-mexart r20</i> , filtered, 03/2022.....	151
<b>Figura 5.25</b> Ajuste anual de índices m, 3C026, 2022, <i>wipss r6</i> .....	152
<b>Figura 5.26</b> Mapas CIP, 14/03/2022, <i>wipss r6</i> .....	154
<b>Figura 5.27</b> Vista parcial del formato WIPSS anual, <i>wipss r6</i> , 2022.....	154
<b>Figura 5.28</b> Vista parcial de archivo LOG, <i>wipss r6</i> , raw, 2022.....	155
<b>Figura 5.15</b> Graficas de potencia, <i>multiclean r7</i> , 3C026, 14/03/2022.....	155
<b>Figura 5.30</b> Graficas de potencia, <i>multiclean r7</i> , 3C026, 14/03/2022.....	156
<b>Figura 5.31</b> PSP, 5° Perihelio, Coordenadas Carrington .....	157
<b>Figura 5.32</b> PSP, 5° Perihelio, Sistema HCI .....	158
<b>Figura 5.33</b> Velocidad de Protones Detectados, PSP, 5°Perihelio .....	159
<b>Figura 5.34</b> Densidad de Protones, PSP, 5° Perihelio .....	161
<b>Figura 5.35</b> Descripción de las banderas empleadas por la SPC de la PSP .....	163
<b>Figura 5.36</b> Data Quality Flags de la PSP en su 5° Perihelio.....	164
<b>Figura 5.37</b> Posición de la PSP en el mapa de CIP, encuentro 5 .....	165
<b>Figura 5.38</b> PSP, SWEAP, SPC & SPAN Ai, 04-24/jun/2020 .....	166
<b>Figura 5.39</b> Encuentro 6, PSP.....	167

<b>Figura 5.40</b> Valores teóricos obtenidos del VS del MEXART, 25-30/sep/2020 .....	169
<b>Figura 5.41</b> Mapas de Velocidades MEXART, ILT & ISEE, 24-30/sep/2020 .....	172
<b>Figura 5.42</b> Mapas de Índices g, MEXART, ILT & ISEE, 24-30/sep/2020..	176
<b>Figura 5.43</b> Ubicación y Ángulos, SWEAP, 24-30/sep/2020 .....	183
<b>Figura 5.44</b> Velocidad y Densidad del VS, SWEAP, 24-30/sep/2020 .....	184
<b>Figura 5.46</b> Eyección de Masa Coronal, 27/sep/2020.....	186
<b>Figura 5.47</b> Eyecciones de Masa Coronal, 29/sep/2020 .....	187
<b>Figura 5.48</b> Tránsito de una RIC con datos in situ de Helios2 .....	189
<b>Figura 5.49</b> Tránsito de una EMCI con datos in situ de Helios2.....	190
<b>Figura 5.50</b> Mapas de velocidad, 27, 29/sep/2020.....	192
<b>Figura 5.52</b> Espectros de potencias para la radiogalaxia 3C237, 26/sep/2020 .....	196
<b>Figura 5.53</b> Espectros de potencias de la radiogalaxia 3C237, 27/sep/2020 .....	198
<b>Figura 5.54</b> LOG con datos de la radiogalaxia 3C237, 27/sep/2020 .....	199
<b>Figura 6.1</b> Posibles Trabajos a Futuro .....	203
<b>Figura A.1</b> Datos de los instrumentos SPC, SPAN-Ai, 24/sep/2020 .....	205
<b>Figura A.2</b> Datos de los instrumentos SPC, SPAN-Ai, 25/sep/2020 .....	206
<b>Figura A.3</b> Datos de los instrumentos SPC, SPAN-Ai, 26/sep/2020 .....	207
<b>Figura A.4</b> Datos de los instrumentos SPC, SPAN-Ai, 27/sep/2020 .....	208
<b>Figura A.5</b> Datos de los instrumentos SPC, SPAN-Ai, 28/sep/2020 .....	209
<b>Figura A.6</b> Datos de los instrumentos SPC, SPAN-Ai, 29/sep/2020 .....	210
<b>Figura B.1</b> Espectros de Potencias de 3C237, MEXART, 26/sep/2020.....	212
<b>Figura B.2</b> Espectros de Potencias de 3C237, MEXART, 27/sep/2020.....	213
<b>Figura B.3</b> Espectros de Potencias de 3C237, MEXART, 28/sep/2020.....	214
<b>Figura B.4</b> Espectros de Potencias de 3C237, MEXART, 29/sep/2020.....	215
<b>Figura B.5</b> Espectros de Potencias de 3C237, MEXART, 30/sep/2020.....	216

# Índice de Tablas

---

<b>Tabla 2.1</b> Propiedades del viento solar .....	20
<b>Tabla 2.2</b> Límites de dispersión débil a diferentes frecuencias de observación .....	41
<b>Tabla 2.3</b> Lista de parámetros del formato estándar WIPSS.....	60
<b>Tabla 3.1</b> Áreas de Investigación de la PSP y organismos involucrados .....	75
<b>Tabla 3.2</b> Niveles de productos de datos de la misión PSP .....	76
<b>Tabla 3.3</b> Instrumentos del SWEAP .....	80
<b>Tabla 4.1</b> Fuentes de Información sobre la PSP .....	125
<b>Tabla 4.2</b> Lista de encuentros y asistencias gravitacionales para la PSP ..	126
<b>Tabla 5.1</b> Tabla comparativa, WIPSS 14/03/2022.....	148
<b>Tabla 5.2</b> Dataframe con variables del Sistema, raw, 14/03/2022.....	149
<b>Tabla 5.3</b> Dataframe de los espectros de potencia, filtered, 3C026, 14/03/2022 .....	150
<b>Tabla 5.4</b> Registros del formato WIPSS para la radiogalaxia 3C237 .....	180
<b>Tabla 5.5</b> Registros del MEXART para la radiogalaxia 3C237 .....	192

# Lista de Acrónimos

---

AEM	Agencia Espacial Mexicana
AGN	Active Galactic Nucleus
ASTRON	The Netherlands Institute for Radio Astronomy
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CESCOM	Centro de Supercómputo de Clima Espacial
CIP	Centelleo Interplanetario
CONAHCYT	Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, antes Consejo Nacional de Ciencias y Tecnologías (CONACYT).
EMC	Eyecciones de Masa Coronal
FCFM	Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
FOV	Field of View
IAU	International Astronomical Union
IDL	Interactive Data Language
IPS	Interplanetary Scintillation
ISEE	Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Japan
ISES	International Space Environment Service
ITL	International LOFAR Telescope
LANCE	Laboratorio Nacional del Clima Espacial
LOFAR	Low Frequency Array
MB	Matriz de Butler
MEXART	Mexican Array Radio Telescope
MRAO	Mullard Radio Astronomy Observatory
PSP	Parker Solar Probe
RAL	Rutherford Appleton Laboratory
RIC	Regiones de Interacción entre Corrientes
RICE	Repositorio Institucional de Clima Espacial

RWC	Regional Warning Center
SAO	Smithsonian Astrophysical Observatory
SCiESMEX	Servicio de Clima Espacial México
SPC	Solar Probe Cup
SPAN	Solar Probe Analyzer
STEL	Solar Terrestrial Environment Laboratory, ISEE, Japan
SWEAP	Solar Wind Electrons Alphas and Protons
UANL	Universidad Autónoma de Nuevo León
UCSD	University of California, San Diego
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
UNOOSA	United Nations Office for Outer Space Affairs
VS	Viento Solar
WIPSS	Worldwide Interplanetary Scintillation Stations
WIPSS Network	Worldwide Interplanetary Scintillation Stations Network
WSP	World Meteorological Organization Space Program

# Bibliografía

---

- Aguilar-Rodriguez, E., Rodriguez-Martinez, M., Romero-Hernandez, E., Mejia-Ambriz, J. C., Gonzalez-Esparza, J. A., Tokumaru, M. (2014). The wavelet transform function to analyze interplanetary scintillation observations. *Geophysical Research Letters*, 41(10), 3331-3335.  
<https://doi.org/10.1002/2014GL060047>
- Alexander, D. (2009). *The Sun: Greenwood Guides to the Universe*. Greenwood Press/ABC-CLIO.
- Altunin, V. I., Dement'ev, A. F., Lipatov, B. N., Nechaeva, M. B., Okmyanskiy, V. A., Snegirev, S. D., & Tikhomirov, Y. V. (2000). VLBI studies of the solar-wind plasma irregularities at 18 and 92 CM wavelengths in 1994–1996. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 43(3), 178–186.  
<https://doi.org/10.1007/bf02677181>
- Anderson, A., Solid Angle, 12 septiembre 2021. *Wikipedia*.  
[https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Solid\\_Angle,\\_1\\_Steradian.svg&oldid=590792153](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Solid_Angle,_1_Steradian.svg&oldid=590792153)
- Anti-Ram Facing View & Ram Facing View. (s.f.). *Parker Solar Probe NASA*. Recuperado el 1 de marzo de 2024 de  
<http://parkersolarprobe.jhuapl.edu/Spacecraft/index.php>
- Armstrong, J. W. y Coles, W. A. (1978, 15 de febrero). Interplanetary scintillations of PSR 0531+21 at 74MHz. *The Astrophysical Journal*, 220, 346-352.  
<https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1978ApJ...220..346A>
- Asai, K., Ishida, Y., Kojima, M., Maruyama, K., Misawa, H., and Yoshimi, N. (1995). Multi-station system for solar wind observations using the interplanetary scintillation method. *J. Geomag. Geoelectr.*, 47,1107-1112,19. <https://doi.org/10.5636/jgg.47.1107>
- Asai, K., Kojima, M., Misawa, H., Ishida, Y., Maruyama, K., Yoshimi, N., ... Karakida, M. (1996). Design of an asymmetric parabolic cylinder

antenna with high aperture efficiency. *Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications)*, 79(2), 11–21.

<https://doi.org/10.1002/ecja.4410790202>

ASTRON. (12 de junio de 2020). 10 Years of LOFAR highlights. ASTRON.

<https://www.astron.nl/wp-content/uploads/2020/12/10yearslofar.pdf>

Barón-Martínez, G. (2024). An updated catalog of IPS radio sources observed by MXEART at 140 MHz for Space Weather Studies. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 257, 2024, 106208.

<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106208>.

Baruffati, A. (18 de Agosto de 2023). *Lenguajes de programación: La lista definitiva de estadísticas y tendencias para 2023*. Gitnux Blog.

<https://blog.gitnux.com/es/estadisticas-de-lenguajes-de-programacion/>

Bassam, N. A., Ramachandran, V., Parameswaran, S. E. (2021). Wavelet theory and application in communication and signal processing, en S. Mohammady (ed.), *Wavelet Theory* (ch. 3), IntechOpen.

<https://doi.org/10.5772/intechopen.87895>

Bastian, T. S. (2000). Propagation of radio waves in the corona and solar wind. *Radio Astronomy at Long Wavelengths, Geophysical Monograph Series*, 119, 85. <https://doi.org/10.1029/GM119p0085>

Bisoi, S. K., Janardhan, P., Ingale, M., Subramanian, P., Ananthkrishnan, S., Tokumaru, M., Fujiki, K. (2014). A study of density modulation index in the inner heliospheric solar wind during solar cycle 23. *The Astrophysical Journal*, 795(1), 69. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/795/1/69>

Blanco, G. (14 de octubre 2022). *Astropy: astronomía en la era Python*. KosmosLogos Blog.

<https://www.noticiasdelcosmos.com/2022/10/astropy-astronomia-en-la-era-python.html>

- Blanco-González, F. J. (27 octubre 2020). *Coordenadas ecuatoriales*. En *Wikipedia*.  
[https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Coordenadas\\_e cuatoriales.png&oldid=504153143](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Coordenadas_e cuatoriales.png&oldid=504153143)
- Bridge, H. S., Belcher, J. W., Butler, R. J., Lazarus, A. J., Mavretic, A. M., Sullivan, J. D., ... Vasyliunas, V. M. (1977). The plasma experiment on the 1977 Voyager Mission. *Space Science Reviews*, 21(3), 259-287.  
<https://doi.org/0.1007/bf00211542>
- Brueckner, G.E., Howard, R.A., Koomen, M.J. et al. (1995). The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO). *Solar Physics*, 162 (1-2), 357–402. <https://doi.org/10.1007/bf00733434>
- Burt, J., y Smith, B. (2012, 5 de marzo). *Deep Space Climate Observatory: The DSCOVR mission*. 2012 IEEE Aerospace Conference, Montana, EU, . <https://doi.org10.1109/aero.2012.6187025>
- Carlson, C. W., Curtis, D. W., Paschmann, G., & Michel, W. (1982). An instrument for rapidly measuring plasma distribution functions with high resolution. *Advances in Space Research*, 2(7), 67–70.  
[https://10.1016/0273-1177\(82\)90151-x](https://10.1016/0273-1177(82)90151-x)
- Carlson, C. W., Pfaff, R. F., & Watzin, J. G. (1998). The Fast Auroral SnapshoT (FAST) Mission. *Geophysical Research Letters*, 25(12), 2013–2016. <https://doi.org/10.1029/98gl01592>
- Carrillo-Vargas, A. (1998). *Estudio del viento solar por medio del centelleo interplanetario y el arreglo de gran superficie en México*. [tesis de maestría, UNAM]. Repositorio Institucional UNAM.  
<http://132.248.9.195/pdbis/258125/Index.html>
- Carrillo-Vargas, A. (2007). *Construcción y calibración del radiotelescopio de centelleo interplanetario MEXART* [tesis de doctorado, UNAM]. Repositorio Institucional UNAM.  
<http://132.248.9.195/pd2008/0626991/Index.html>

- Case, A. W., Kasper, J. C., Daigneau, P. S., Caldwell, D., Freeman, M., Gauron, T., ... Wright Jr., K. H. (2013, 13 de junio). Designing a sun-pointing Faraday cup for Solar Probe Plus. *AIP Conference Proceedings*, 1539 (1), 458-461. <https://doi.org/10.1063/1.4811083>
- Case, A. W., Kasper, J. C., Stevens, M. L., Korreck, K. E., Paulson, K., Daigneau, P., ... Martinović, M. M. (2020). The Solar Probe Cup on the Parker Solar Probe. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 246(2), 43. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab5a7b>
- Chang, O., Gonzalez-Esparza, J. A., Mejia-Ambriz, J. (2016). IPS observations at 140 MHz to study solar wind speeds and density fluctuations by MEXART. *Advances in Space Research*, 57(6), 1307-1313. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.12.023>
- Chang-Martínez, T. O. (2017). *Estudio de estructuras en el viento solar utilizando observaciones de centelleo interplanetario* [tesis de doctorado, UNAM]. Repositorio Institucional UNAM. <http://132.248.9.195/ptd2017/agosto/0764112/Index.html>
- Chase, S. C., F. Schwarz. (1963). Mariner 2 instrumentation: What will it see on Venus?, *Electronics*, 35, 42-45.
- Chase, S. C., Kaplan, L. D., & Neugebauer, G. (1963). The Mariner 2 Infrared Radiometer Experiment. *Journal of Geophysical Research*, 68(22), 6157–6169. <http://doi.org/10.1029/jz068i022p06157>
- Chen, S. y Zhu, H. Y. (2007). Wavelet Transform for Processing Power Quality Disturbances. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 47695. <https://doi.org/10.1155/2007/47695>
- Domingo, V., Fleck, B. & Poland, A.I. (1995). The SOHO mission: An overview. *Solar Physics*, 162 (1-2), 1–37. <https://doi.org/10.1007/bf00733425>
- Fox, N. J., Velli, M. C., Bale, S. D., Decker, R., Driesman, A., Howard, R. A., ... Szabo, A. (2016). The Solar Probe Plus Mission: Humanity's first

- visit to our star. *Space Science Reviews*, 204(1-4), 7–48.  
<https://doi.org/10.1007/s11214-015-0211-6>
- Gapper, G. R., Hewish, A., Purvis, A., and Duffet-Smith, P. J. (1982). Observing interplanetary disturbances from the ground. *Nature*, 296, 633–636. <https://doi.org/10.1038/296633a0>
- González-Esparza, J. A., Carrillo, A., Andrade, E., Pérez-Enríquez, R., Kurtz, S., Blanco-Cano, X. (2004). Calibration test of the MEXART antenna. An interplanetary scintillation array in Mexico. *35<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly*, ed. J.-P. Paillé, vol. 35 of *COSPAR Meeting*, p. 1295.
- Gonzalez-Esparza, A., Andrade, E., Carrillo, A., Jeyakumar, S., Ananthakrishnan, S., Praveenkumar, A., Sankarasubramanian, G., Sureshkumar, S., Sierra, P., Vazquez, S., Perez-Enriquez, R., Kurtz, S. (2005a). Mexart Measurements of Radio Sources. *Proceedings of the Solar Wind 11 / SOHO 16, Connecting Sun and Heliosphere Conference (ESA SP-592)*. p. 667-669.
- González-Esparza, J. A. y Ramón, V. (ed.). (2005b). Inauguran el Observatorio de Centelleo Interplanetario. *Gaceta UNAM*.  
<https://www.sciesmex.unam.mx/blog/inauguran-el-observatorio-de-centelleo-interplanetario-gaceta-unam-2005-12-08/>
- Gonzalez-Esparza, A., Carrillo, A., Andrade, E., Jeyakumar, S., Perez-Enriquez, R.; Kurtz, S. (2006a). MEXART. Interplanetary Scintillation Array in Mexico in the IHY2007. *36<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly*, vol. 36 of COSPAR Meeting.
- González-Esparza, J. A., Carrillo, A., Andrade, E., Sierra, P., Vazquez, S., Rodríguez, C., Pérez-Enríquez, R., Kurtz, S., Blanco-Cano, X. (2006b). Calibration and testing of the MEXART antenna using solar transits. *Advances in Space Research*, 38(8), 1824–1827.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.09.032>
- Gonzalez-Esparza, J. A. (2010). Análisis del Espectro de Potencias de las Fluctuaciones en Intensidad. *Memorias del 1er Coloquio Silvia Bravo*,

MEXART, Instituto de Geofísica, UNAM.

[https://www.academia.edu/4459602/An%C3%A1lisis\\_del\\_Espectro\\_de\\_Potencias\\_de\\_las\\_Fluctuaciones\\_en\\_Intensidad](https://www.academia.edu/4459602/An%C3%A1lisis_del_Espectro_de_Potencias_de_las_Fluctuaciones_en_Intensidad)

Gonzalez-Esparza, A., Romero Hernandez, E., Aguilar-Rodriguez, E., Ontiveros-Hernandez, V., Rodriguez-Martinez, M. R., Mejia-Ambriz, J. C. (2014). Sensing CMEs Propagating in the Interplanetary Medium. MEXART IPS Observations. *AGU Fall Meeting Abstracts*.

Gonzalez-Esparza, J. A., De la Luz, V., Corona-Romero, P., Mejia-Ambriz, J. C., Gonzalez, L. X., Sergeeva, M. A., ... Aguilar-Rodriguez, E. (2017). Mexican Space Weather Service (SCiESMEX). *Space Weather*, 15(1), 3–11. <https://doi.org/10.1002/2016sw001496>

Gonzalez-Esparza, J. A., Mejia-Ambriz, J. C., Aguilar-Rodriguez, E., Villanueva, P., Andrade, E., Magro, A., Chiello, R., Cutajar, D., Borg, J., Zarb-Adami, K. (2022a). First observations of the new MEXART's digital system. *Radio Science*, 57, e2021RS007317. <https://doi.org/10.1029/2021RS007317>

González-Esparza, J. A. (2022b). *La tormenta solar perfecta: Meteorología del espacio y sus aplicaciones*. UNAM. <https://www.librosoa.unam.mx/handle/123456789/3607>

Gurnett, D. A. y Kurth, W. S. (2019). Plasma densities near and beyond the heliopause from the Voyager 1 and 2 plasma wave instruments. *Nature Astronomy*. <https://doi.org/10.1038/s41550-019-0918-5>

Hewish, A., Scott, P. F., & Wills, D. (1964). Interplanetary Scintillation of Small Diameter Radio Sources. *Nature*, 203(4951), 1214–1217. <https://doi.org/10.1038/2031214a0>

Hick, P., Jackson, B. V., Altrock, R., Woan, G., Salter, G. (1996). IPS observations of heliospheric density structures associated with active regions. *Advances in Space Research*, 17(4-5), 311-314. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00591-2](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00591-2)

- IDL (programming language). (4 de agosto de 2023). En *Wikipedia*.  
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=IDL\\_\(programming\\_language\)&oldid=1168679025](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=IDL_(programming_language)&oldid=1168679025)
- Intriligator, D. S. y Wolfe, J. H. (1970, diciembre). Preliminary power spectra of the interplanetary plasma. *The Astrophysical Journal*, 162, p.L187-L190. <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1970ApJ...162L.187I>
- Jackson, B. V., Hick, P. L., Kojima, M., & Yokobe, A. (1998). Heliospheric tomography using interplanetary scintillation observations: 1. Combined Nagoya and Cambridge data. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 103(A6), 12049–12067.  
<https://doi.org/10.1029/97ja02528>
- Jackson, B. V., Tokumaru, M. R.A. Fallows, *et al.* (2023). Interplanetary scintillation (IPS) analyses during LOFAR campaign mode periods that include the first three Parker Solar Probe close passes of the Sun. *Advances in Space Research*, Volume 72, Issue 12, p. 5341-5360.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.06.029>
- Jakosky, B.M., Lin, R.P., Grebowsky, J.M. et al. (2015). The Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) Mission. *Space Sci Rev* 195, 3–48. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0139-x>
- Kaiser, M.L., Kucera, T.A., Davila, J.M. et al. (2008). The STEREO Mission: An Introduction. *Space Science Reviews*, 136 (1-4), 5–16.  
<https://doi.org/10.1007/s11214-007-9277-0>
- Kasper, J. C., Abiad, R., Austin, G., Balat-Pichelin, M., Bale, S. D., Belcher, J. W., ... Bookbinder, J. (2016). Solar Wind Electrons Alphas and Protons (SWEAP) Investigation: Design of the Solar Wind and Coronal Plasma Instrument Suite for Solar Probe Plus. *Space Science Reviews*, 204(1-4), 131–186. <https://10.1007/s11214-015-0206-3>
- Kumar, N. (17 de junio 2023). *What are the Benefits of Learning Python Programming Language?* Analytics Insight.

<https://www.analyticsinsight.net/what-are-the-benefits-of-learning-python-programming-language/>

Lee, L. C. y Jokipii, J. R. (1975). Strong scintillations in astrophysics. I. The Markov approximation, its validity and application to angular broadening. *Astrophysical Journal*, 196-1, 695-707.

[https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/1975ApJ...196..695L/doi:10.1086/153458](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1975ApJ...196..695L/doi:10.1086/153458)

List of solar telescopes. (3 de octubre de 2023). En *Wikipedia*.

[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List\\_of\\_solar\\_telescopes&oldid=1178457507](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List_of_solar_telescopes&oldid=1178457507)

Livi, R., Larson, D. E., Kasper, J. C, Abiad, R., Case, A.W., Klein, K. G., Curtis, ... Rahmati, A. (2022). The Solar Probe ANalyzer -Ions on Parker Solar Probe. *The Astrophysical Journal*, 938(2), 138 (15pp).

<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac93f5>

Magro, A., Borg, J., Chiello, R., Cutajar, D., Zarb-Adami, K., Gonzalez-Esparza, J. A., Andrade, E., Aguilar-Rodriguez, E., Mejia-Ambriz, J. C., Villanueva, P. (2021). Digitizing MEXART – System Overview and Verification. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 10(4).

<https://doi.org/10.1142/S2251171721500173>

Magro, A., Chiello, R., Cutajar, D., Borg, J., Zarb-Adami, K., Gonzalez-Esparza, J. A., Mejia-Ambriz, J. C., Aguilar-Rodriguez, E., Espinoza-Jimenez, A., Godoy-Hernandez, J. L., Andrade-Mascote, E., Villanueva, P. (2019). A new digital backend for the Mexican Array Radio Telescope. *2019 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, pp. 0185-0189.

<https://doi.org/10.1109/ICEAA.2019.8878959>

Manoharan, P. K. y Ananthkrishnan, S. (1990, 15 de junio). Determination of solar-wind velocities using single-station measurements of interplanetary scintillation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical*

- Society*, 244, 691-695.  
<https://adsabs.harvard.edu/full/1990MNRAS.244..691M>
- Manoharan, P. K. (1991). *Study of Solar Wind using single-station Interplanetary Scintillation* [tesis de doctorado, Tata Institute of Fundamental Research]. Repositorio Institucional
- Marr, J. M., Snell, R. L., Kurtz, S. E. (2016). *Fundamentals of Radio Astronomy: Observational Methods (Series in Astronomy and Astrophysics)*. Taylor & Francis Group, LLC.
- McComas, D. J., Elliott, H. A., Schwadron, N. A., *et al.* (2003). The three-dimensional solar wind around solar maximum. *Geophysical Research Letters*, 30(10), 1517. <https://doi.org/10.1029/2003GL017136>
- McComas, D. J., Bame, S. J., Barker, P., Feldman, W. C., Phillips, J. L., Riley, P., & Griffee, J. W. (1998). Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor (SWEPAM) for the Advanced Composition Explorer. *Space Science Reviews*, 86(1/4), 563–612.  
<https://doi.org/10.1023/a:1005040232597>
- Mejía-Ambriz, J. C. (2012). *Análisis de observaciones del MEXART: bases para estudios de centelleo interplanetario* [tesis de doctorado, UNAM]. Repositorio Institucional UNAM.  
<http://132.248.9.195/ptd2013/abril/0692911/Index.html>
- Mejía-Ambriz, J. C., Gonzalez-Esparza, A., Carrillo-Vargas, A., Villanueva-Hernandez, P., Aguilar-Rodriguez, E., Andrade-Mascote, E., Vazquez-Hernandez, S., Sierra-Figueroa, P., Ananthakrishnan, S., Manoharan, P. (2008). First IPS radio sources detected by MEXART. *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- Mejía-Ambriz, J. C., Gonzalez-Esparza, A., Romero Hernandez, E. (2012). Remote sensing of solar wind velocity applying IPS technique using MEXART. *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- Mejía-Ambriz, J. C., Jackson, B. V., Gonzalez-Esparza, A., Tokumaru, M., Yu, H., Buffington, A., Hick, P. (2013). Remote sensing of solar wind

velocities using Interplanetary Scintillation with MEXART and STELab Stations. *AGU Spring Meeting Abstracts*.

- Mejia-Ambriz, J. C., Villanueva-Hernandez, P., Gonzalez-Esparza, A., Aguilar-Rodriguez, E., Andrade-Mascote, E., Carrillo-Vargas, A. (2009). Interplanetary scintillation radio sources detected with the Mexican Array RadioTelescope (MEXART). *AGU Fall Meeting Abstracts*, id.SH41A-1625.
- Mejia-Ambriz, J. C., Villanueva-Hernandez, P., Gonzalez-Esparza, A., Aguilar-Rodriguez, E., Mendoza-Torrez, J. E., Carrillo-Vargas, A., Andrade-Mascote, E. (2010a). Observations of IPS radio sources at 140 MHz with the Mexican Array RadioTelescope (MEXART). *38<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly, vol. 38 of COSPAR Meeting*, p. 8. <https://www.cospar-assembly.org/abstractcd/OLD/COSPAR-10/abstracts/data/pdf/abstracts/PCB1-0013-10.pdf>
- Mejia-Ambriz, J. C., Villanueva-Hernandez, P., Gonzalez-Esparza, J. A., Aguilar-Rodriguez, E., & Jeyakumar, S. (2010b). Observations of Interplanetary Scintillation (IPS) Using the Mexican Array Radio Telescope (MEXART). *Solar Physics*, 265(1-2), 309–320. <https://doi.org/10.1007/s11207-010-9562-z>
- Mendoza-Ortega, B. E. (2013). *Introducción a la Física Espacial*. UNAM. [https://www.geofisica.unam.mx/assets/librointroduccion\\_fisicaespacial\\_2.pdf](https://www.geofisica.unam.mx/assets/librointroduccion_fisicaespacial_2.pdf)
- Müller, D., St. Cyr, O. C., Zouganelis, I., Gilbert, H. R., Marsden, R., Nieves-Chinchilla, T., ... Williams, D. (2020). The Solar Orbiter mission. *Astronomy & Astrophysics*, 642, A1. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038467>
- National Research Council. (2008). *Severe Space Weather Events: Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/12507>.

- Oberoi, D. (2000). *Tomography of the solar wind using interplanetary scintillation* [tesis de doctorado, Indian Institute of Science].  
Repositorio de la National Centre for Radio Astrophysics, Tata Institute of Fundamental Research.  
<http://www.ncra.tifr.res.in:8081/~div/Research/DivyaOberoi-Thesis.pdf>
- Observatorio de Centelleo Interplanetario de Coeneo, Michoacán (MEXART). (2005).  
[http://www.mexart.unam.mx/OLD/documentos/carpeta\\_mexart2005.pdf](http://www.mexart.unam.mx/OLD/documentos/carpeta_mexart2005.pdf)
- Ogilvie, K. W., Chornay, D. J., Fritzenreiter, R. J., Hunsaker, F., Keller, J., Lobell, J., ... Gergin, E. (1995). SWE, a comprehensive plasma instrument for the WIND spacecraft. *Space Science Reviews*, 71(1-4), 55–77. <https://10.1007/bf00751326>
- Onsager, T., Stockman, M., Steenburgh, R. (2017). *NOAA Space Weather Products & Services* [webinar].  
<https://training.weather.gov/nwstc/spacewx/wmo/index.html>
- Porsche, H. (1981). HELIOS mission: Mission objectives, mission verification, selected results. *ESA The Solar System and its Exploration*, 43-50.
- PSP Instruments. (s.f.). *SWEAP Investigation*. Recuperado el 1 de marzo de 2024 de [http://sweap.cfa.harvard.edu/PSP\\_Spacecraft.html](http://sweap.cfa.harvard.edu/PSP_Spacecraft.html)
- Radiancia. (23 de octubre de 2023). En *Wikipedia*.  
<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Radiancia&oldid=154798554>
- Rao, A. P., Bhandari, S. M., Ananthakrishnan, S. (1974). Observations of Interplanetary Scintillations at 327 MHz. *Australian Journal of Physics*, 27, 105-120. <https://doi.org/10.1071/PH740105>
- Raouafi, N. E. y Kusterer, M. B. (2021). *Parker Solar Probe (PSP) Science Data Management Plan Released No. 7434-9101 B*. Johns Hopkins Applied Physics Laboratory.  
[https://sppgway.jhuapl.edu/docs/data/Released\\_7434-9101\\_Rev\\_B.pdf](https://sppgway.jhuapl.edu/docs/data/Released_7434-9101_Rev_B.pdf)

- Raulin, J.-P. y Pacini, A. A. (2005). Solar radio emission. *Advances in Space Research*, 35(5), 739-754. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.138>
- Readhead, A. C. S. (1971). Interplanetary Scintillation of Radio Sources at Metre Wavelengths--II: Theory. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 155(2), 185–197. <https://doi.org/10.1093/mnras/155.2.185>
- Robbrecht, E., & Berghmans, D. (2004). Automated recognition of coronal mass ejections (CMEs) in near-real-time data. *Astronomy & Astrophysics*, 425(3), 1097–1106. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041302>
- Romero-Hernández, E. (2015a). *Estudios de perturbaciones en el viento solar : 1) análisis de observaciones in situ multi-naves; 2) análisis de observaciones de centelleo interplanetario usando datos del MEXART* [tesis de doctorado, UNAM]. Repositorio Institucional UNAM. <http://132.248.9.195/ptd2015/junio/0730788/Index.html>
- Romero-Hernandez, E., Gonzalez-Esparza, J. A., Aguilar-Rodriguez, E., Ontiveros-Hernandez, V., Villanueva-Hernandez, P. (2015b). Detection of solar wind disturbances: Mexican Array Radio Telescope IPS observations at 140 MHz. *Solar Physics*, 290(9), 2553-2566. <https://doi.org/10.1007/s11207-015-0690-3>
- Schaepman-Strub, G., Schaepman, M., Martonchik, J., Painter, T., Dangel, S. (2009). Radiometry and reflectance: from terminology concepts to measured quantities. En Warner, T. A., Nellis, M. D., Foody, G. M. *The SAGE Handbook of Remote Sensing*. Sage Publications, 215-228. <https://doi.org/10.5167/uzh-26245>
- Scott, S. L., Coles, W. A., Burgois, G. (1983). Solar wind observations near the sun using interplanetary scintillation. *Astronomy and Astrophysics*, 123-2, 207-215. <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1983A%26A...123..207S>

- Serway, R. A., Jewett, Jr. J. W. (2009). *Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna* (Vol. 2, 7ª Edición, V. Campos-Olguín, trad.). Cengage Learning
- Snyder, C.W., Neugebauer, M. (1965). Interplanetary Solar-Wind Measurements by Mariner II. In: Chang, C.C., Huang, S.S. (eds) *Proceedings of the Plasma Space Science Symposium. Astrophysics and Space Science Library*, vol 3. Springer, Dordrecht.  
[https://doi.org/10.1007/978-94-011-7542-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-94-011-7542-5_7)
- Solar Wind Electrons Alphas & Protons. (s.f.). *SWEAP Investigation*.  
Recuperado el 1 de marzo de 2024 de <http://sweap.cfa.harvard.edu/>
- Stone, E. C., Frandsen, A. M., Mewaldt, R. A., Christian, E. R., Margolies, D., Ormes, J. F., & Snow, F. (1998). The Advanced Composition Explorer. *Space Science Reviews*, 86(1/4), 1–22.  
<https://doi.org/10.1023/a:1005082526237>
- SWEAP science team. (2020, 28 de enero). *User Guide for Parker Solar Probe SWEAP Investigation Data Products*. SWEAP science team.  
[http://sweap.cfa.harvard.edu/sweap\\_data\\_user\\_guide.pdf](http://sweap.cfa.harvard.edu/sweap_data_user_guide.pdf)
- Sweetser, T. H., Broschart, S. B., Angelopoulos, V., Whiffen, G. J., Folta, D. C., Chung, M.-K., ... Woodard, M. A. (2011). ARTEMIS Mission Design. *Space Science Reviews*, 165(1-4), 27–57.  
<https://doi.org/10.1007/s11214-012-9869-1>
- Tatarskii, V. I. (1971). The effects of the turbulent atmosphere on wave propagation. *Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations*.  
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1971etaw.book....T/abstract>
- The Astropy Collaboration, Price-Whelan, A. M., Lim, P. L., Earl, N., Starkman, N., Bradley, L., Shupe, D. L., Patil, A. A., Corrales, L., Bresseur, C. E., *et al.* (2022, 20 de agosto). The Astropy Project: Sustaining and Growing a Community-oriented Open-source Project and the Latest Major Release (v5.0) of the Core Package. *The*

*Astrophysical Journal*, 935:167. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac7c74>

Tokumaru, M., Kojima, M., Fujiki, K., Yokobe, A. (2000), Three-dimensional propagation of interplanetary disturbances detected with radio scintillation measurements at 327 MHz. *J. Geophys. Res.*, 105(A5), 10435–10453. <https://doi.org/10.1029/2000JA900001>

Tokumaru, M., Kojima, M., Fujiki, K., Yamashita, M., & Yokobe, A. (2003). Toroidal-shaped interplanetary disturbance associated with the halo coronal mass ejection event on 14 July 2000. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 108(A5). <https://doi.org/10.1029/2002ja009574>

Tokumaru, M., Kojima, M., Fujiki, K., Maruyama, K., Maruyama, Y., Ito, H., & Iju, T. (2011). A newly developed UHF radiotelescope for interplanetary scintillation observations: Solar Wind Imaging Facility. *Radio Science*, 46(5), n/a–n/a. <https://doi.org/10.1029/2011rs004694>

Tomasi, W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas* (4ª Ed.). Pearson Educación de México.

Unti, T. W. J., Neugebauer, M., Goldstein, B. E. (1973, 1 de marzo). Direct measurements of solar-wind fluctuations between 0.0048 and 13.3 Hz. *The Astrophysical Journal*, 180, 591-598. <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1973ApJ...180..591U>

Van Haarlem, M. P., Wise, M. W., Gunst, A. W., Heald, G., McKean, J. P., Hessels, J. W. T., ... Fallows, R. (2013). LOFAR: The LOw-Frequency ARray. *Astronomy & Astrophysics*, 556, A2. doi:10.1051/0004-6361/201220873, M. P., Wise, M. W., Gunst, A. W., Heald, G., McKean, J. P., Hessels, J. W. T., ... Fallows, R. (2013). LOFAR: The LOw-Frequency ARray. *Astronomy & Astrophysics*, 556, A2. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220873>

Villanueva Hernandez, P., Gonzalez Esparza, J. A., Carrillo, A., Andrade, E., Jeyacumar, S., Kurtz, S. (2007). Study of radio sources and

- interferences detected by Mexart. *AGU Spring Meeting Abstracts*, id.SH23A-08.
- Villanueva, P., Andrade, E., Aguilar, E., Gonzalez-Esparza, J. A., Mejia-Ambriz, J. C. (2021, 19 de agosto). *Operación del backend digital del MEXART: Primeras observaciones* [Seminario de Heliofísica y Clima Espacial]. Facebook.  
<https://www.facebook.com/watch/?v=364182758509134>
- Vourlidas, A., Howard, R. A., Plunkett, S. P., Korendyke, C. M., Thernisien, A. F. R., Wang, D., ... Rodmann, J. (2015). The Wide-Field Imager for Solar Probe Plus (WISPR). *Space Science Reviews*, 204(1-4), 83–130. <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0114-y>
- Voyager Fact Sheet. (s.f.). Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, NASA. Recuperado el 1 de marzo de 2024 de <https://voyager.jpl.nasa.gov/frequently-asked-questions/fact-sheet/>
- Wenzel, K.-P., Marsden, R. G., Page, D. E., & Smith, E. J. (1989). Ulysses: The first high-latitude heliospheric mission. *Advances in Space Research*, 9(4), 25–29. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(89\)90089-6](https://doi.org/10.1016/0273-1177(89)90089-6)
- Whittlesey, P. L., Larson, D. E., Kasper, J. C., Halekas, J., Abatcha, M., Abiad, R., ... Verniero, J. L. (2020). The Solar Probe ANalyzers—Electrons on the Parker Solar Probe. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 246(2), 74. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab7370>
- Wilson, T. L., Rohlfs, K., Hüttemeister, S. (2009). *Tools of Radio Astronomy* (5a edición). Springer.
- Woo, R. y Armstrong, J. W. (1979). Spacecraft radio scattering observations of the power spectrum of electron density fluctuations in the solar wind. *Journal of Geophysical Research*, 84(A12), 7288. <https://doi.org/10.1029/ja084ia12p07288>
- Yakovlev, O.I., Efimov, A.I., Razmanov, V.M., Shtyrkov, V.K. (1980). Radio wave propagation in the turbulent solar plasma using three satellites.

*Acta Astronautica*, 7(2), 235–242. [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(80\)90063-6](https://doi.org/10.1016/0094-5765(80)90063-6)

Zastenker, G. N., Safrankova, J., Nemecek, Z., Prech, L., Cermak, I., Vaverka, I., ... Yurasov, A. S. (2013). Fast measurements of parameters of the Solar Wind using the BMSW instrument. *Cosmic Research*, 51(2), 78–89. <https://10.1134/s0010952513020081>