



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN GEOCIENCIAS

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

SISTEMA DE DETECCIÓN DE EVENTOS DE
RADIOEMISIÓN SOLAR UTILIZANDO EL
RADIOESPECTRÓGRAFO CALLISTO Y EL
RADIOTELESCOPIO MEXART EN EL
LABORATORIO NACIONAL DE CLIMA
ESPACIAL

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN GEOCIENCIAS

P R E S E N T A

ELIZANDRO HUIPE DOMRATCHEVA

DIRECTOR DE TESIS: DR. VICTOR HUGO DE LA LUZ RODRÍGUEZ

MORELIA, MICHOACÁN

JUNIO, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Agradezco a la Licenciatura en Geociencias de la ENES Unidad Morelia por formarme a lo largo de la carrera. Agradezco el apoyo otorgado de la Beca de tesis de licenciatura del proyecto CONACyT de CIENCIA BÁSICA 220981, 254497 y del CONACyT - REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE CLIMA ESPACIAL 268273. Quiero agradecer especialmente a los integrantes del equipo del MEXART que me brindaron toda su ayuda técnica y su amplia experiencia en el área:

- Dr. Américo Gonzalez-Esparza
- Dr. Julio César Mejía Ambriz
- Ing. Ernesto Andrade Mascote
- MsC. Pablo Villanueva Hernández
- Ing. Adan Rodolfo Espinosa Jiménez

Doy las gracias a los profesores que aceptaron formar parte del comité sinodal:

- Dr. Ernesto Aguilar Rodríguez
- Dr. Mario Rodríguez Martínez
- Dr. Víctor Hugo De la Luz Rodríguez
- Dr. Julio César Mejía Ambriz
- Dr. Alejandro Lara Sánchez

Agradecimientos personales

Primeramente agradezco a mis padres por su apoyo incondicional y extraordinaria paciencia a lo largo de mi vida. Gracias a todos los profesores de la ENES Morelia, integrantes y colaboradores del LANCE que me enseñaron y me dieron su simpatía a lo largo de la carrera. Hago una mención especial al equipo administrativo de control escolar de la ENES Morelia por su apoyo en mi caso. Sin ellos no hubiera podido presentar mi tesis. Gracias a Elizabeth por apoyarme en la edición de imágenes. Agradezco cariñosamente a Chel por ser mi compañera en estos emocionantes 4 años. Felicito y agradezco cordialmente a mi tutor, el Dr. Víctor Hugo De la Luz, por su apoyo, por sus valiosas enseñanzas y sobre todo, su amistad.

Resumen

El Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE) es el organismo que se encarga de informar sobre el estado del Clima Espacial (CE) que puede afectar a territorio nacional. Los estallidos de radio solares son un indicador de eventos eruptivos que ocurren en el Sol, por lo que la monitorización de estos se vuelve una herramienta fundamental para entender el impacto del CE en nuestro país. En este trabajo de tesis se desarrolla un nuevo sistema para el registro sistemático de estallidos de radio solares para el LANCE, usando dos de sus instrumentos: el radioespectrógrafo Callisto y el radiotelescopio de centelleo interplanetario MEXART.

La primera etapa de este trabajo se centró en mostrar que utilizando la instrumentación del LANCE se pueden observar las radio interferencias producidas por estallidos de radio solares. La segunda etapa consistió en validar los registros contra la red de radioespectrógrafos e-Callisto y con otros datos de CE como coronógrafos y flujo de rayos X. La tercera etapa fue generar la infraestructura computacional para el registro sistemático y semi-automático de los datos generados por Callisto y MEXART.

Con este nuevo sistema, desde septiembre de 2015 hasta marzo de 2018 se registraron 104 estallidos de radio solares de los cuales 40 corresponden a eventos detectados por ambos instrumentos. Con los eventos registrados, se construyó una base de datos que contiene la información de cada uno de los eventos.

Este sistema de registro constituye el primer esfuerzo concreto para desarrollar el sistema de alerta temprana para interferencias en radiocomunicaciones por eventos eruptivos solares en el LANCE y sienta las bases para desarrollar un sistema de pronóstico para CE contextualizado a México en esta área.

Abstract

The national space weather laboratory (LANCE by its acronym in Spanish) is the organization in charge of reporting the conditions of space weather which can affect national territory. The solar radio bursts are indicators of eruptive events which occur in the Sun, so the monitoring of these becomes an fundamental tool for understanding the impact of space weather in our country. This work develops a new system for the systematic record of solar radio bursts for LANCE, using two of their instruments: The radiospectrograph Callisto and the radio telescope of interplanetary scintillation MEXART.

The first stage of this work was focused in showing that using the LANCE instrumentation, one can observe radio interference produced by solar radio bursts. The second stage consisted in validating the records against the radiospectrograph network e-Callisto and other space weather data, like coronographs and X ray flux. The third stage was to create the computational infrastructure for the systematic and semiautomatic registry of the data.

With this new system, since September of 2015 to March of 2018, there were registered 104 solar radio bursts, of which, 40 were also detected by MEXART. With the events recorded, a database was built containing the information from each event. This recording system establish the first concrete effort to develop an early alert system for radiocomunications interference for solar eruptive events in the LANCE and lay the foundations to develop a forecasting system for space weather contextualizing Mexico in this area.

Índice general

Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XVII
1. Introducción	1
1.1. Clima espacial	1
1.2. Motivación	4
1.3. Hipótesis	5
1.4. Objetivo	6
1.4.1. Objetivo General	6
1.4.2. Objetivos Particulares	6
1.5. Estructura de la tesis	6
2. Teoría de radio emisión solar	9
2.1. Introducción	9
2.2. Tipos de radio emisión solar	13
2.2.1. Bremsstrahlung	13
2.2.2. Giroemisión	13
2.2.3. Emisión de plasma	14
2.3. Estallidos de radio solares	16
2.3.1. Estallidos tipo I	16
2.3.2. Estallidos tipo II	17
2.3.3. Estallidos tipo III	18
2.3.4. Estallidos tipo IV	18
2.3.5. Estallidos tipo V	19
2.4. Observaciones adicionales sobre los estallidos de radio.	19
2.5. Resumen	20
3. Instrumentación	23
3.1. Introducción	23
3.2. Callisto	24
3.2.1. Procesamiento de la señal radioeléctrica	24
3.2.1.1. Antena y TMA-1	24

ÍNDICE GENERAL

3.2.1.2. Receptor	28
3.2.1.3. Computadora de Callisto-MEXART	29
3.3. MEXART	31
3.3.1. Introducción	31
3.3.2. Direccionalidad Norte-Sur y Matriz de Butler	34
3.3.3. Receptor 0 de MEXART	34
3.4. Resumen	36
4. Observaciones de señales de radio entre 45 y 225 MHz	39
4.1. Introducción	39
4.2. Radiocomunicaciones	40
4.3. Identificación de ruido por fenómenos naturales	40
4.3.1. Firmas de estallidos de radio solares	41
4.3.2. Identificación de ruido artificial y natural en el sitio	41
4.3.3. Observaciones adicionales	46
4.4. Resumen	50
5. Validación de Eventos con Instrumentos Internacionales	53
5.1. Introducción	53
5.2. Validación con otras estaciones de la red e-Callisto	53
5.2.1. Validación de evento tipo III	53
5.2.2. Validación de eventos tipo II	54
5.2.3. Validación de evento tipo I	54
5.2.4. Validación del resto de los eventos con e-Callisto	54
5.3. Validación de eventos detectados en MEXART	58
5.4. Propiedades del MEXART	62
5.4.1. Análisis de directividad	62
5.5. Propiedades de eventos de radio registrados	72
5.6. Análisis de etiquetas de tiempo en el MEXART	75
5.7. Resumen	75
6. Monitorización de Eventos de Radio	79
6.1. Introducción	79
6.2. Procesamiento de datos	79
6.3. Repositorio Institucional de Clima Espacial (RICE)	80
6.4. Automatización y procesamiento de datos de Callisto	80
6.5. Procesamiento de datos del MEXART	81
6.6. Procesamiento adicional	85
6.7. Base de datos de estallidos de radio	85
6.8. Propiedades	87
6.9. Número de eventos registrados	88
6.10. Resumen	93
7. Conclusiones	95

A. Apéndice	99
Referencias	119

Índice de figuras

1.1.	(Izquierda) Fotografía, en luz blanca, de una mancha solar o región activa. Se incluye el tamaño de la Tierra para compararlo con el tamaño de las estructuras en la superficie solar. (Derecha) Fotografía tomada por uno de los instrumentos del satélite <i>Solar and Heliospheric Observatory</i> (SOHO) durante una Eyección de Masa Coronal (EMC). La cámara de este satélite genera un eclipse artificial de tal manera que la luz de una EMC no sea opacada por la luz del disco solar. El tamaño del Sol está representado por el círculo blanco. (Fuente: www.nasa.gov)	2
1.2.	Señal de radio a 139.65 MHz que detecta MEXART apuntando al zenit con un haz fijo en el meridiano local. El flujo está representado en Volts.	3
1.3.	Espectro dinámico de la radio señal recibida por el radioespectrógrafo Callisto en un día sin eventos de radio solares. En colores se muestra la intensidad de la señal medida en miliVolts captada por la antena de Callisto para distintas frecuencias y distintos tiempos.	4
2.1.	Gráfica que muestra el flujo de radiación solar a distintas frecuencias en comparación al espectro de emisión de cuerpo negro correspondiente a una temperatura de 5800 K. Fuente: commons.wikimedia.org	10
2.2.	En este diagrama se representa la altura sobre el nivel del mar a la que la radiación electromagnética puede llegar a penetrar la atmósfera, para diferentes longitudes de onda, bajo condiciones estables de esta. Figura traducida de (Rohlfs y Wilson, 2013).	12
2.3.	Relación que se hace entre las frecuencias en radio emitidas por un estallido tipo II (espectro en figura derecha) y las alturas desde la superficie del Sol a las que se produce la emisión (diagrama izquierdo) tomando en cuenta un modelo de densidades. Figura traducida de Warmuth y Mann (2005).	15
2.4.	Espectro dinámico del radioespectrógrafo Culgoora de Australia, en el se puede observar un estallido de radio tipo I o llamado tormenta de ruido. Los estallidos tipo I son producidos por volúmenes de plasma cercanos a la superficie solar. Figuras modificadas de <i>SWS - Data Display and Download - Spectrograph</i> (2018), Elgaroy (1977).	17

ÍNDICE DE FIGURAS

2.5.	Estallido de radio tipo II seguido de un tipo III observado por el radioespectrógrafo HiRAS de Japón. Imagen obtenida de <i>Hiraiso Radio Spectrograph</i> (2018)	18
2.6.	Ejemplos de un estallido tipo IV (izquierda) y un estallido tipo V, ambos captados en Culgoora. Fuente: <i>SWS - Data Display and Download - Spectrograph</i> (2018)	19
2.7.	Este diagrama resume la forma de los distintos tipos de estallidos de radio, tal y como son detectados en el espectro dinámico. Tomado de <i>Warmuth y Mann</i> (2005).	20
3.1.	Fotografía de la antena LPDA que usa Callisto-MEXART, el TMA-1 que recibe la señal de Callisto se encuentra en la parte inferior en el castillo que sujeta el soporte de la antena.	25
3.2.	El patrón de antena o patrón de ganancia de la antena LPDA, a 110 MHz, nos indica que la ganancia de una señal recibida o transmitida depende de la dirección en que esta viene. Cuando una señal viene en dirección de las puntas de los dipolos (Plano E), se obtiene la menor ganancia. Figura traducida de <i>Create</i> (s.f.).	26
3.3.	Representación del patrón de su proyección en 3 dimensiones, los colores cercanos al rojo indican una mayor ganancia. Obtenido de <i>DVB Antenna Design and Matching with Antenna Magus, Optenni Lab and FEKO</i> (2017).	27
3.4.	Componentes que integran al TMA-1, estos permiten amplificar la señal de la antena y protegen la electrónica de Callisto ante picos en el voltaje, imagen obtenida y traducida de <i>Tower-Mounted Amplifier Assembly</i> (s.f.)	28
3.5.	Diagrama del procesamiento de la señal de Callisto, obtenido y traducido de <i>Hamidi et al.</i> (2012).	29
3.6.	Interfaz gráfica del programa Callisto que se usa para controlar el almacenamiento de datos del radioespectrógrafo.	30
3.7.	En la figura superior se muestra una proyección del arreglo MEXART con su patrón de antena y el tránsito de una radio fuente en 3 dimensiones. El diagrama de abajo simula como se registra una radiofuente en los datos. Suponiendo que la esfera delineada con el círculo azul es la bóveda celeste, en el plano dibujado estaría desplegado el radiotelescopio con su arreglo dipolar, además, se tiene una radio fuente con una declinación tal que pasa por el meridiano local siguiendo una trayectoria circular (círculo verde). La señal de esta radiofuente solo será detectada en el momento que pase por el meridiano local. Imagen modificada de <i>Mejía Ambriz</i> (2012).	32
3.8.	Proyección sobre el cielo del patrón de antena de una línea y la representación de la trayectoria del Sol pasando sobre el firmamento (obtenido de <i>Carrillo</i> (2007)).	33

3.9. Forma teórica de los haces usados por MEXART. Figuras obtenidas de Villanueva Hernández (2009).	35
3.10. Diagrama que muestra la recepción de la señal desde las antenas hasta el receptor. Este diagrama muestra el procesamiento de una sola línea cuando se usa 1/4 de antena. La señal de cada línea entra a cada una de las entradas de la MB. Para 1/2 antena y la antena entera, las señales entre secciones deben acoplarse 2:1 y 4:1, respectivamente. Figura obtenida de Mejía Ambriz (2012).	36
4.1. En este espectro de Callisto es detectado estallido de radio tipo III, entre las 20:23 y las 20:24, en el curso de una tormenta eléctrica. Al generar las curvas de luz correspondientes con Callisto y con MEXART, se puede observar que la tormenta eléctrica satura de ruido las curvas de luz y hace imperceptible el evento de radio. Al espectro se le extrajo el ruido promedio de cada frecuencia para apreciar mejor el estallido.	42
4.2. Primer evento de radio solar detectado por Callisto. Un estallido de radio solar tipo III, registrado entre las 19:22 y las 19:25 en las frecuencias entre 45 y 173 MHz.	43
4.3. Un estallido tipo I detectado con Callisto, se muestra en la figura superior con manchas difusas en frecuencias alrededor de 120 MHz y de 80 MHz. El estallido de tipo II, detectado entre las 23:31 y las 23:38, se ve en el espectro como la mancha diagonal alrededor de 80 MHz. El evento tipo III de la figura inferior se ve como líneas verticales, el evento empieza alrededor de las 20:19 y termina a las 20:25. Se extrajo el ruido promedio de los espectros para apreciar mejor los eventos.	44
4.4. Un estallido de radio solar tipo III ocurrido el 25 de septiembre del 2017 a las 18:38, se produce en el momento en que MEXART está detectando una radiofuente. El tránsito de la radiofuente se observa en los datos de MEXART como un incremento gradual en la señal. Al espectro se le restó el ruido promedio de cada frecuencia para apreciar mejor el evento.	45
4.5. La gráfica superior muestra la cantidad de ruido que se podía detectar con MEXART usando un analizador de espectros en 2015 (obtenido de Carrillo (2007)). En la gráfica inferior se integra la señal de Callisto del día 9 de febrero de 2018 a lo largo del 2 horas y media.	47
4.6. Radiointerferencias en Callisto que se presentaron durante la saturación de la señal debido al cambio de la antena.	48
4.7. Se presentaron radiointerferencias en Callisto con origen desconocido. En el espectro superior se produce un ruido tenue parecido al de las tormentas eléctricas. En el espectro inferior se produce una emisión alrededor de los 70 MHz que cambia de ancho de banda.	49
4.8. Estas radiointerferencias adquieren una morfología similar a los estallidos tipo III. Su carencia de deriva los identifica como emisiones de origen artificial.	51

5.1. Validación del primer evento de radio detectado por Callisto con la estación Roswell. El registro del evento en los dos espectro aparece en los mismos tiempos y en las mismas frecuencias pero con diferentes intensidades.	55
5.2. Comparación de eventos tipo II entre Callisto y Birr Castle. En las dos estaciones se puede observar la deriva del estallido tipo II en los mismos rangos de tiempo y de frecuencias.	56
5.3. Comparación de señales de Callisto y Birr Castle detectando una tormenta de ruido de origen solar.	57
5.4. Esta curva de luz hecha con los datos de MEXART y de Callisto, en su banda de 133.5-142.4 MHz, nos muestra que MEXART también detectó el primer evento detectado por Callisto.	58
5.5. Este estallido de radio tipo III, con emisión máxima a las 18:41, llegó a ser tan intenso que saturó la señal de MEXART y generó radiointerferencias en todas las frecuencias.	60
5.6. Se hizo la comparación de curvas de luz de Callisto y MEXART para el estallido tipo III de las 18:38. La curva de luz de Callisto se hizo a partir del ancho de banda en que observa MEXART. Callisto no detectó este evento en la banda mencionada, pero el evento, efectivamente, fue detectado por otras bandas de Callisto como se observa en la Figura 4.4.	61
5.7. En este caso, se produce un estallido tipo III a 140 MHz. La bitácora de MEXART indica que el instrumento usaba uno de los haces durante la emisión. De acuerdo al personal del MEXART, el receptor no estaba operando en el momento del evento.	63
5.8. En este otro ejemplo, Callisto detecta tres estallidos de radio tipo III a 140 MHz pero MEXART no los detecta.	64
5.9. En esta gráfica, de coordenadas astronómicas horizontales, se muestra la posición de los haces reales usados por MEXART, de acuerdo a la bitácora, para observar radiofuentes. Estos haces siempre se encuentran en la posición del meridiano local.	65
5.10. Esta gráfica polar es una proyección del cielo observado desde el observatorio de MEXART. Se muestra con puntos la posición del Sol en los momentos en que ocurrieron eventos de radio. Se aprecia que estas forman una franja de puntos que atraviesa la gráfica. Esto se debe a la trayectoria del Sol, la cual va cambiando a lo largo del año.	66
5.11. En los 28 eventos detectados por el MEXART, no se observa una relación entre la intensidad y la separación angular del sol y el haz usado de MEXART. En 44 casos, MEXART no detectó estallidos de radio solares. Para estos casos se tomó la RSR como 0.	67

5.12. Al graficar la intensidad de los eventos en RSR detectada por Callisto contra la separación angular de la posición del Sol y el zenit, se muestra una anticorrelación lineal con valor de r . La pendiente se indica por m , la desviación estándar por std y el valor p es la probabilidad de la hipótesis nula. Los valores se encuentran dentro de lo esperado. Esto nos confirma que entre mayor separación angular existe entre la posición del emisor y la dirección con que apunta el instrumento, menor es la intensidad detectada de la emisión.	68
5.13. No se puede apreciar relación entre la separación angular y la intensidad de los eventos detectados con MEXART aún cuando fueron clasificados por su RSR.	70
5.14. No se puede apreciar relación entre la separación angular y la intensidad de los eventos detectados con MEXART aún cuando fueron clasificados por su RSR.	71
5.15. No se puede apreciar relación entre la separación angular y la intensidad de los eventos detectados con MEXART aún cuando fueron clasificados por su RSR.	72
5.16. El estallido tipo II, captado por Callisto, fue generado por un evento eruptivo ocurrido en el Sol. El estallido fue reportado por la SWPC (Center, 2018), el reporte del estallido coincide con la detección de Callisto. El evento también fue asociado con una fulguración. Gráfica de rayos X obtenida de Möller (2018).	73
5.17. Callisto ha permitido relacionar estallidos de radio tipo II con una EMC que se detectó, un par de horas después, con los coronógrafos de SOHO. Imagen obtenida de ESA (2018). Se puede apreciar la EMC expandiéndose por el lado sureste del Sol.	74
5.18. Se graficaron las diferencias de tiempo y el flujo de MEXART correspondiente para el evento de radio de 19 de Septiembre de 2015. La gráfica inferior es una amplificación de la gráfica de en medio que muestra el periodo de muestreo más frecuente pero variante. Este comportamiento nos indica que el periodo de muestro de las etiquetas de tiempo nunca es constante como debería ser.	76
6.1. El proceso de automatización y procesamiento de datos de Callisto es un proceso cíclico sin fin. Inicia desde la computadora de Callisto en Coeneo e itera desde ahí hasta el servidor de RICE. El sistema busca nuevos archivos en la computadora de Callisto, los transfiere a RICE y una vez ahí, se producen las gráficas y se guardan por fecha.	82
6.2. Este es un ejemplo de la creación automática de gráficas con archivos de Callisto en la que se observa un estallido tipo III. La gráfica de curva de luz calculó una RSR mayor a 5, que indica la detección de una señal para estándares de radioastronomía. En esta versión de las gráficas aun no se incluía la conversión de cuentas a mV.	83

ÍNDICE DE FIGURAS

- 6.3. Comparación de señales de Callisto y MEXART en el momento de un estallido tipo III. En Callisto, la relación RSR fue de 9.61 mientras que en MEXART fue de 183.24. Adicionalmente, podemos observar que existe una diferencia significativa entre instrumentos en el registro de tiempo del máximo del evento. 84
- 6.4. En el primer espectro se observa un estallido tipo II. Cuando se resta a cada pixel la intensidad promedio de su respectiva frecuencia, se produce el espectro inferior. Esto se usa solo para reconocer con mayor facilidad los eventos. 86

Índice de tablas

- 5.1. Tabla de grupos de eventos. Cada grupo tiene un rango de RSR de los eventos detectados con Callisto, estos grupos de eventos se usaron como referencia para clasificar los mismos eventos detectados por MEXART. . 69
- 6.1. En esta tabla se presentan todos los eventos registrados por Callisto, desde febrero de 2015 hasta Marzo de 2018. Se incluye la fecha y hora del evento, si el evento fue detectado por MEXART, si fue detectado por Callisto a 140 MHz, el tipo de estallido de radio y la intensidad detectada por los dos instrumentos en RSR. 89

Introducción

1.1. Clima espacial

El Clima Espacial (CE) son las condiciones físicas que presenta la actividad solar y tienen la capacidad de influenciar las condiciones físicas de la Tierra y su entorno cercano (Lilensten, 2007). En estas condiciones físicas pueden ocurrir perturbaciones que tienen distintas escalas de tiempo, por ejemplo: el ciclo solar con duración de 11 años o estallidos de radio solares con duración de 1 segundo o menos.

En términos generales, las perturbaciones de CE afecta a la Tierra y su entorno de tres maneras: Con ondas electromagnéticas, con flujo de partículas de altas energías y flujos de nubes o corrientes de plasmas (Lilensten, 2007). Estas perturbaciones se presentan cuando se cumplen ciertas condiciones en los procesos físicos que ocurren en el sistema Sol-Tierra las cuales se describirán adelante.

Las perturbaciones de CE que ocurren en el sistema Sol-Tierra se encuentran dentro del dominio del viento solar llamado Heliósfera. El viento solar, con origen en la superficie del Sol, es un plasma no colisional compuesto por un 92 % de protones o núcleos de Hidrógeno, un 8 % son núcleos de Helio y el 0.1 % restante son elementos más pesados (Meyer-Vernet, 2007). Un aspecto importante del plasma es que se encuentra en un estado de cuasi-neutralidad, es decir, que hay igual número de partículas con carga positiva (iones) que de negativas (electrones). (Meyer-Vernet, 2007)

El viento solar se encuentra modulado por el campo magnético solar, este campo implica un mecanismo de dínamo que se produce con la rotación diferencial del Sol y la convección turbulenta de sus capas externas (Miralles y Almeida, 2011). La rotación diferencial también estira y tuerce al campo magnético. Estas tensiones producen acumulación de energía magnética en regiones activas que se observan como manchas visibles en la superficie solar. Un ejemplo de esto se puede apreciar en la Figura 1.1.

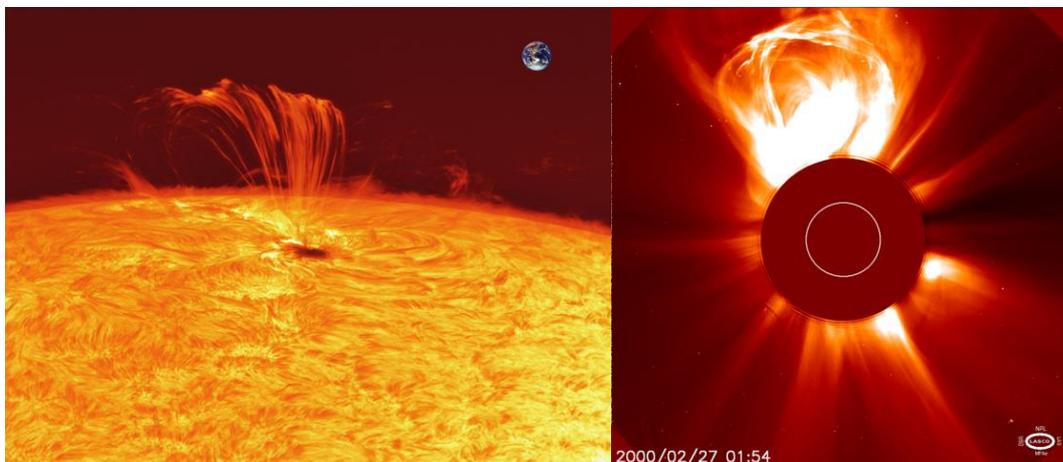


Figura 1.1: (Izquierda) Fotografía, en luz blanca, de una mancha solar o región activa. Se incluye el tamaño de la Tierra para compararlo con el tamaño de las estructuras en la superficie solar. (Derecha) Fotografía tomada por uno de los instrumentos del satélite *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO) durante una Eyección de Masa Coronal (EMC). La cámara de este satélite genera un eclipse artificial de tal manera que la luz de una EMC no sea opacada por la luz del disco solar. El tamaño del Sol está representado por el círculo blanco. (Fuente: www.nasa.gov)

La acumulación de tensión en estos campos magnéticos genera una reconfiguración en la estructura del campo llamada reconexión magnética. La reconexión produce una transición de energía magnética a energía cinética de partículas y radiación electromagnética. Las fulguraciones son una consecuencia de estas reconexiones y se identifican como abrillantamientos repentinos e intensos en todas las longitudes de onda. Las longitudes de onda que se encuentran en estas emisiones incluyen rayos X, extremo ultravioleta(EUV), milimétrico, radio y en los eventos más energéticos incluso rayos gama (Ramaty y Mandzhavidze, 1998; White, 2007; Warmuth y Mann, 2005).

Junto a las fulguraciones también se pueden producir la aceleración de volúmenes de plasma hacia el medio interplanetario o hacia la superficie solar y la aceleración de partículas cargadas a velocidades relativistas o semirelativistas. El fenómeno de la aceleración de partículas se le denomina partículas energéticas solares (SEP por su acrónimo en inglés) y a la expulsión de los volúmenes de plasma al medio interplanetario se les conoce como Eyecciones de Masa Coronal (EMC). Las EMCs pueden producirse sin la ocurrencia de una fulguración y viceversa. Estos fenómenos conforman a los eventos eruptivos (Warmuth y Mann, 2005). La energía emitida en estos fenómenos es del orden de 10^{32} ergs (Reid y Ratcliffe, 2014) lo equivalente a la energía liberada en 40 millones de bombas de hidrógeno tipo Tsar. En los eventos más energéticos, la radiación de las fulguraciones perturba la ionosfera terrestre que produce interrupciones en la transmisión de señales de radiocomunicaciones y en los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS por su acrónimo en ingles) (White, 2007).

Por otro lado, una EMC moviéndose con dirección hacia la Tierra y con una componente magnética orientada hacia el sur produce alteraciones en el campo geomagnético (tormentas geomagnéticas) y tiene la capacidad de inducir corrientes eléctricas en la superficie de la Tierra (GICs por su acrónimo en inglés). Los GICs tienen capacidad de afectar e inutilizar los sistemas de distribución de energía como redes eléctricas, gas o incluso oleoductos (Lanzerotti, 2004).

Los efectos del CE en el entorno terrestre (ser geoeffectivos) hacen necesario el estudio, registro y detección de los eventos eruptivos. La detección en tiempo real de estos fenómenos permite aumentar el nivel de resiliencia en las radiocomunicaciones y en infraestructura tecnológica en general (Warmuth y Mann, 2005)(White, 2007).

Las fulguraciones y EMCs producen emisiones características que son llamadas estallidos de radio solares. Estas emisiones de radio se producen entre frecuencias de kHz hasta los GHz. Una de las maneras más prácticas de identificar la presencia de eventos eruptivos es detectando los estallidos de radio solares. Por otro lado, la manera más sencilla de cuantificar el flujo de radio, proveniente de cualquier fuente, es mediante el uso de radiómetros. Los radiómetros son los sistemas integrados por una antena y un receptor, estos miden continuamente la densidad de flujo de radiación proveniente de una fuente con un ancho de banda angosto. Con la cantidad de flujo detectada se pueden producir gráficas llamadas curvas de luz. Un ejemplo de estos radiómetros es el radiotelescopio MEXART, que observa a una frecuencia central de 139.65 MHz con un ancho de banda de 2MHz. Su curva de luz se muestra en la Figura 1.2.

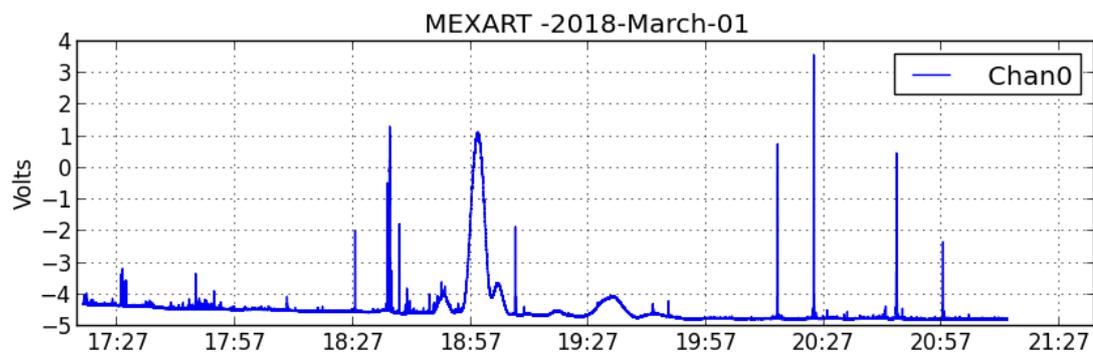


Figura 1.2: Señal de radio a 139.65 MHz que detecta MEXART apuntando al zenit con un haz fijo en el meridiano local. El flujo está representado en Volts.

Aun así, el instrumento más usado para detectar los estallidos de radio solares es el radioespectrógrafo. Este instrumento se conforma de una antena de radio conectado a un receptor que permite detectar anchos de banda de cientos de MHz y descomponer la señal captada en un número predeterminado de canales con frecuencias centrales. Con los datos obtenidos de los radioespectrógrafos se pueden generar gráficas a las que se les llaman espectros dinámicos, ver Figura 1.3. En un espectro dinámico se muestran las emisiones captadas por una antena a distintas frecuencias. Normalmente, la intensidad de las señales en cada frecuencia se muestra con colores, para mayores intensidades

1. INTRODUCCIÓN

se usan colores claros o cercanos al rojo, para señales menos intensas se usan colores cercanos al azul.

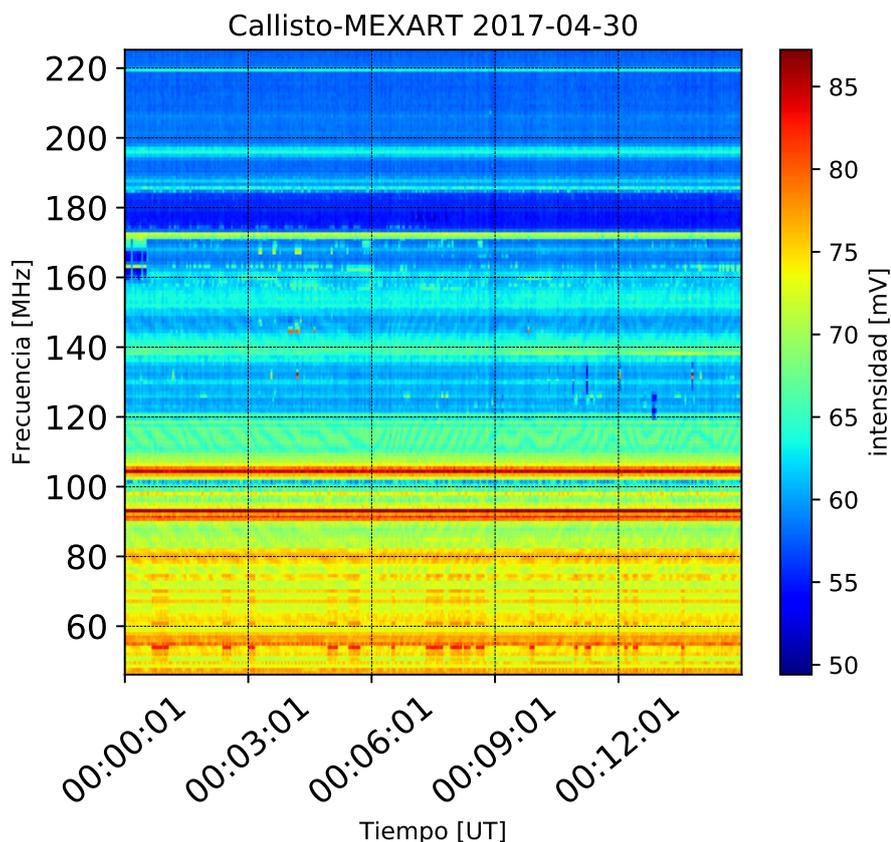


Figura 1.3: Espectro dinámico de la radio señal recibida por el radioespectrógrafo Callisto en un día sin eventos de radio solares. En colores se muestra la intensidad de la señal medida en miliVolts captada por la antena de Callisto para distintas frecuencias y distintos tiempos.

1.2. Motivación

El 3 de Junio de 2014 se modificó la ley general de protección civil donde se incluyeron fenómenos de origen astronómico, como tormentas magnéticas y el impacto de meteoritos. Ese mismo año se crea el Servicio de Clima Espacial México (SCIESMEX) en el Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán de la UNAM para monitorear y dar aviso a la sociedad sobre la ocurrencia y afectaciones de eventos de CE sobre territorio nacional ([Gonzalez-Esparza et al., 2017](#)). Uno de los objetivos del SCIESMEX se

centra en proveer un servicio de avisos de CE a través de la medición en tiempo real de la instrumentación asociada a CE. Los procedimientos de operación se pretenden ejecutar bajo estándares internacionales ya que los resultados servirán para evaluar la vulnerabilidad de los sistemas tecnológicos ante el CE. En el año 2016 se establece el Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE), el cual agrupa y coordina la red nacional de instrumentación para el registro de CE. La estructura de operación del LANCE incluye el SCiESMEX, el Repositorio Institucional de Clima Espacial (RICE) y el Centro de Supercómputo de Clima Espacial (CESCOM) (Robles, 2017).

Uno de los temas prioritarios para el LANCE es registrar y estudiar los estallidos de radio solares. Si se adquiere la capacidad para detectar estos fenómenos naturales entonces se podrán proveer alertas tempranas utilizando instrumentación del LANCE. Las alertas estarán enfocadas en eventos de radio solares que producen interferencias en radiocomunicaciones terrestres. El radioespectrógrafo Callisto-MEXART (para este trabajo solo lo nombraremos como Callisto) y el radiotelescopio de Centelleo Interplanetario MEXART son instrumentos con los que cuenta el LANCE para observar ondas electromagnéticas a longitudes de onda métricas. Ambos instrumentos tienen la capacidad para detectar estallidos de radio solares.

Las primeras observaciones registradas en 2015, mostraron que estallidos de radio solares podían ser registrados por los dos instrumentos de forma simultánea. Sin embargo, era necesario una etapa de validación para corroborar que los eventos detectados efectivamente eran estallidos de radio solares.

Un sistema para validar los estallidos de radio solares nos permitiría implementar una metodología para registrarlos de forma sistemática. Por este motivo se desarrolló un software para poder realizar la monitorización de los datos utilizando el enfoque de programación distribuida.

La capacidad de MEXART para detectar estallidos de radio solares y su validación con Callisto abre la posibilidad de una nueva área de estudio dentro del LANCE. La resolución temporal y sensibilidad de la antena podría permitir un análisis futuro en el flujo de energía de la emisión de radio. Este análisis orientado a estallidos de radio tipo III, producidos por haces de electrones acelerados, podrían develar información sobre el proceso de aceleración en las fulguraciones, como se sugiere en Nindos, Aurass, Klein, y Trotter, 2008. Con la detección de estallidos de radio solares por parte de estos dos instrumentos podremos integrar la primera base de datos de estallidos de radio solares detectados en territorio mexicano.

1.3. Hipótesis

Podemos utilizar a Callisto para identificar estallidos de radio solares validados con la red de radioespectrógrafos e-Callisto. A su vez, usando los canales cercanos a 140 MHz de Callisto como referencia, se podrán identificar estallidos de radio solares sobre la señal registrada con el MEXART.

1.4. Objetivo

1.4.1. Objetivo General

Desarrollar la infraestructura para el registro sistemático de radio interferencias provocadas por estallidos de radio solares usando el radio espectrógrafo Callisto y el radio telescopio MEXART.

1.4.2. Objetivos Particulares

Se requieren desarrollar los siguientes aspectos:

- Estudiar los procesos de radio emisión solar en longitudes de onda métricas.
- Caracterizar los instrumentos Callisto y MEXART.
- Identificar radio interferencias producidas entre 45 y 225 MHz.
- Identificar y validar los eventos de radio emisión solar detectados en ambos instrumentos.
- Caracterizar la capacidad de MEXART de detectar estallidos de radio solares.
- Generar la infraestructura para la generación y visualización de datos de los instrumentos.
- Crear una base de datos de los estallidos de radio solares detectados por ambos instrumentos.

1.5. Estructura de la tesis

Este trabajo está dividido en 7 capítulos y un apéndice donde se incluyen las referencias y los códigos usados para desarrollar este trabajo de tesis. En el capítulo 1 se hace una introducción al CE y a los fenómenos eruptivos que producen estallidos de radio solares. En el capítulo 2 se agrega un marco teórico sobre radioemisiones solares donde se discuten los mecanismos físicos que causan los estallidos de radio tipo I, II, III IV y V. En el capítulo 3 se hace una revisión en la operatividad de los sistemas que conforman a MEXART y Callisto así como de los datos producidos por estos.

En el capítulo 4 se hace la identificación de las diferentes emisiones de radio detectados en un ancho de banda de 45 a 225 MHz. En el Capítulo 5 se hace la validación de los estallidos de radio comparando la señal con otras estaciones de la red internacional de radioespectrógrafos e-Callisto. En el capítulo 5 también se hace un reconocimiento de las condiciones que permiten a MEXART detectar estallidos de radio solares.

En el capítulo 6 se describe la infraestructura desarrollada para hacer el monitorización continua de los estallidos de radio solares así como la descripción de la base de datos usada para guardar la información de los estallidos detectados. Finalmente en el capítulo 7 se presentan las conclusiones obtenidas a partir del estudio desarrollado en la tesis.

Teoría de radio emisión solar

2.1. Introducción

Antes de hablar sobre los estallidos de radio solares es necesario comprender el fenómeno de la radiación electromagnética. Este tipo de radiación es una forma de transporte de energía cuyas características inherentes más básicas, al viajar en el espacio vacío, son: su contenido de energía (E), su longitud de onda (λ), su frecuencia (ν) y su velocidad (c). Estas propiedades se relacionan de la siguiente manera:

$$E = h\nu \quad \text{y} \quad c = \lambda\nu \tag{2.1}$$

donde h representa la constante de Planck con valor aproximado de $6.626 \times 10^{32} Js$ y c tiene un valor aproximado de $3 \times 10^8 m/s$.

El mayor emisor de radiación electromagnética en el entorno terrestre es el Sol, una gran esfera sólida con una masa de $2 \times 10^{30} kg$ y un radio de $7 \times 10^8 m$. Se compone de hidrógeno en un 92% y helio en casi 8%, solo un 0.1% está compuesto de elementos más pesados (Meyer-Vernet, 2007). La principal emisión de energía solar es en forma de radiación electromagnética emitida por emisión de cuerpo negro (Rohlfs y Wilson, 2013). En este fenómeno de radiación, el espectro del emisor está relacionado con la temperatura efectiva de este; la temperatura de emisión en la superficie solar es alrededor de $5800 K$. Un cuerpo negro ideal con esta temperatura genera un espectro muy cercano al espectro solar real observado, ver Figura 2.1.

Como se puede observar, la mayor emisión de radiación se produce en el espectro visible, entre los 400 y los 700 nm . El pico de emisión corresponde al color amarillo, lo que determina el color de nuestra estrella. La emisión de radiación de cuerpo negro en longitudes métricas y decamétricas se denomina "Bremsstrahlung térmica", cuando el emisor de esta radiación es plasma, a esta emisión también se le llama *térmica libre-libre*. Esta parte del espectro se puede aproximar con la función de Raleigh-Jeans (Rohlfs y

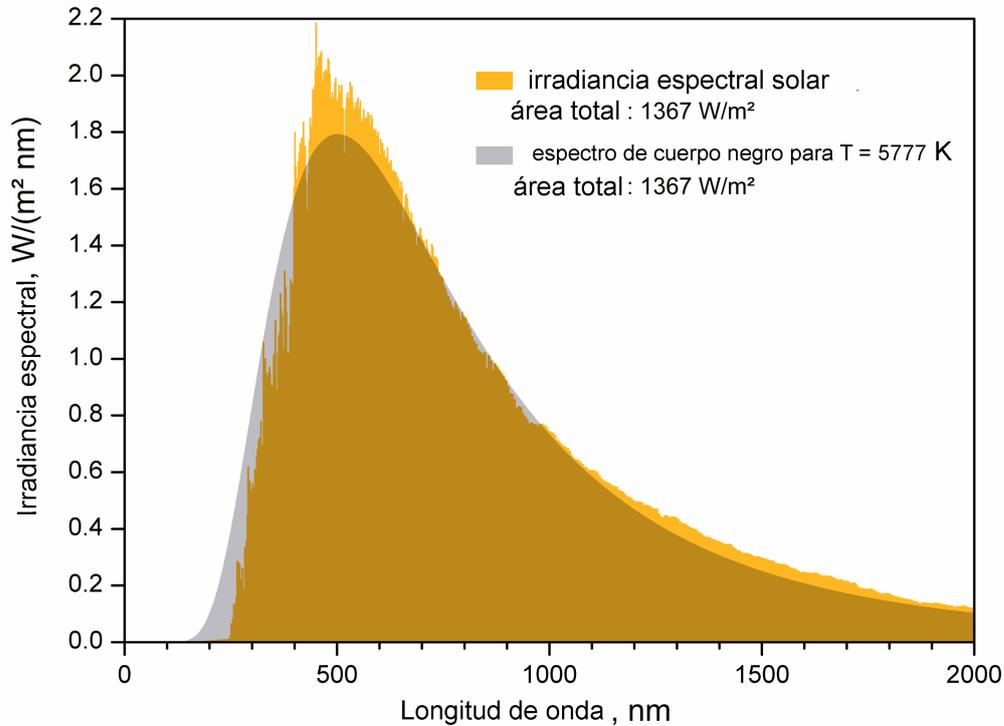


Figura 2.1: Gráfica que muestra el flujo de radiación solar a distintas frecuencias en comparación al espectro de emisión de cuerpo negro correspondiente a una temperatura de 5800 K. Fuente: commons.wikimedia.org

Wilson, 2013) y se expresa como:

$$B_\nu(T) = \frac{2\nu^2 k_B T}{c^2} \quad (2.2)$$

donde ν es la frecuencia de emisión, k_B es la constante de Boltzman y tiene un valor aproximado de $1.38 \times 10^{-23} JK^{-1}$, T es la temperatura del cuerpo emisor y c la velocidad de la luz.

La emisión de radio solar es mucho más baja cuando el Sol se encuentra en su estado quieto. En comparación, cuando ocurre un evento eruptivo en el Sol, y se produce un estallido de radio solar típico, a 40 MHz, se emite 10^4 veces el flujo de lo que normalmente se emite en Sol quieto (Warmuth y Mann, 2005). Los eventos eruptivos que producen estallidos de radio solares tienen diferentes mecanismos de emisión que puede deberse a distintos tipos de eventos o distintas condiciones en que ocurren. Estos incluyen, además de los mencionados, a la giroemisión y a la emisión de plasma.

Aún cuando el Sol emite en todas las frecuencias, no lo hace con igual intensidad. Además, no todas las longitudes de onda atraviesan la atmósfera terrestre ya que encuentran barreras que absorben o rebotan ciertas longitudes de onda. Las principales ventanas atmosféricas que permiten el paso de ondas electromagnéticas son la de radio, que va de 20 MHz a 1.5 THz, y la ventana del óptico, que va de 400 a 700 *nm* (Rohlfs y Wilson, 2013). En la ventana de radio, las ondas con frecuencias menores a la mencionada son rebotadas o desviadas por la parte ionizada de la atmósfera llamada ionósfera, sea la onda incidente proveniente de la Tierra o del espacio exterior. Es por esto que en la Tierra no se usan radioespectrógrafos para observar a frecuencias menores a 20 MHz. En este caso, para monitorizar frecuencias más bajas que provengan del espacio exterior, se tiene que depender de radioespectrógrafos orbitando en el espacio.

Los límites de la ventana atmosférica de radio son fluctuantes. En el límite superior de frecuencias, las señales se atenúan debido a condiciones atmosféricas que dependen de la posición geográfica, del clima, altitud, estado del tiempo, etc. El límite inferior fluctúa dependiendo del grado de ionización de la ionósfera. El grado de ionización se ve afectado por la radiación ultravioleta y de longitudes de onda menores que provienen del Sol. El grado de ionización tiene variaciones diurnas dado que en la noche no incide la radiación solar. Sin embargo, las mayores alteraciones en la ionósfera, que llegan a denominarse tormentas ionosféricas, se deben a variaciones en la magnetósfera que tienen relación con tormentas solares. Estas pueden ser provocadas por el ingreso de SEPs a través de la magnetósfera, corrientes de viento Solar rápido relacionados con EMCs, hoyos coronales e incluso por el movimiento y dinámica de la propia atmósfera terrestre (Lanzerotti, 2001). La alteración de ionósfera generado por un incremento de irradiación del Sol de rayos UV, X y gamma se produce cuando ocurren fulguraciones. La perturbación ionosférica, por estos fenómenos, puede durar horas o hasta un par de días una vez terminado el agente perturbador. Debido a que estos límites de frecuencias son variantes en la ionósfera, las señales de radiocomunicaciones pueden ser afectadas en su propagación, sufrir de atenuación, interferencia y centelleo. Con estos fenómenos se trata de utilizar frecuencias más altas para señales que necesiten atravesar la ionósfera, las cuales se ven menos afectados por perturbaciones de la ionósfera. Así es el caso de las comunicaciones con satélites, pero esto no impide que los satélites se vean afectados por los fenómenos de CE antes mencionados.

2. TEORÍA DE RADIO EMISIÓN SOLAR

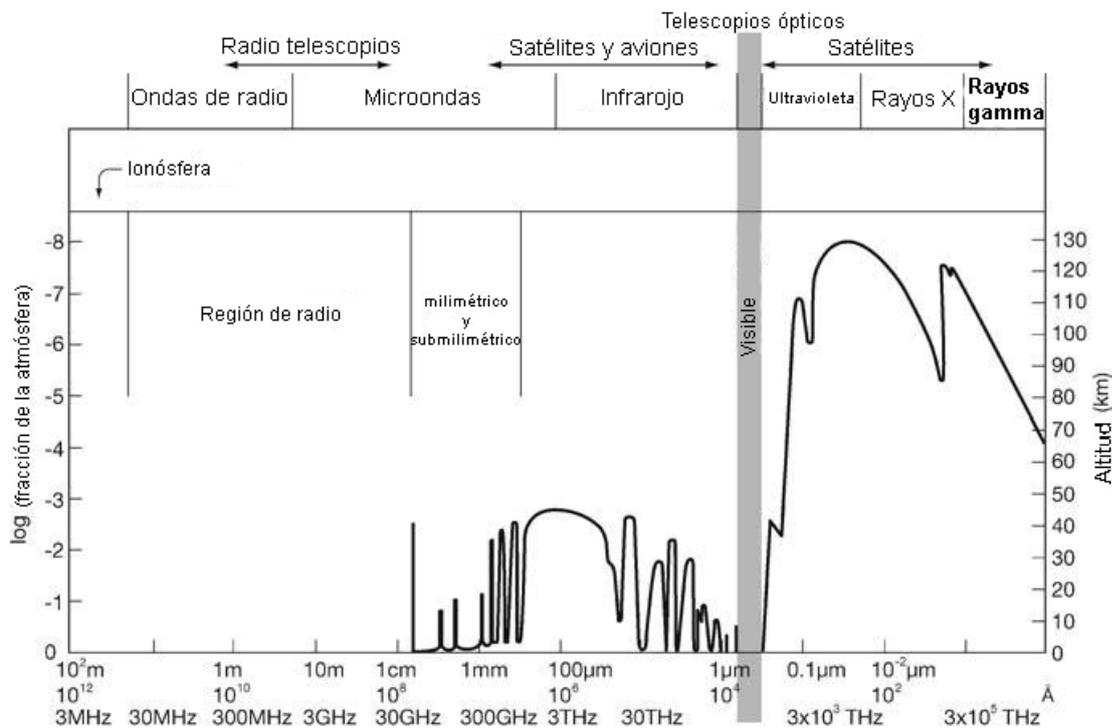


Figura 2.2: En este diagrama se representa la altura sobre el nivel del mar a la que la radiación electromagnética puede llegar a penetrar la atmósfera, para diferentes longitudes de onda, bajo condiciones estables de esta. Figura traducida de (Rohlfs y Wilson, 2013).

En el límite superior de frecuencias de la ventana de radio, las ondas en GHz se van atenúan debido a que son absorbidas por moléculas de H₂O y de CO₂. En las frecuencias altas de esta ventana, las nubes y la lluvia, así como climas húmedos, atenúan más las señales, por eso los radio telescopios que estudian submilimétrico se sitúan en montañas altas y/o ambientes secos. Existen otras ventanas atmosféricas, aunque más pequeñas.

Los estallidos de radio pueden interferir a las radiocomunicaciones si tienen la suficiente potencia en las mismas frecuencias que emiten las radiocomunicaciones. Un ejemplo de tal emisión es el estallido de radio solar ocurrido el 23 de mayo de 1967 en el que se midieron desde la tierra 100,000 unidades de flujo solar (ufs) a 1GHz. Este evento hubiera sobrepasado 13 db el límite de potencia en las señales permitido para no afectar enlaces con satélites según la regulación de la unión internacional de telecomunicaciones(Lanzerotti, 2001).

2.2. Tipos de radio emisión solar

Los distintos tipos de emisión de radio se presentan cuando se cumplen diferentes condiciones en el plasma que tienen que ver con la temperatura, configuración del campo magnético y/o eléctrico, el movimiento del plasma, etc. La emisión que se produce una vez logradas estas condiciones se puede separar en dos categorías: mecanismos de emisión coherente y mecanismos de emisión incoherente. En los mecanismos de emisión coherente, cuando se produce la emisión, el plasma actúa colectivamente o en conjunto. En los mecanismos de emisión incoherente no hay una reacción sobre la distribución de las partículas que componen al plasma, además, el número de fotones producido es proporcional al número de partículas emisoras. En los mecanismos de emisión coherente, la temperatura de brillo puede ser mucho mayor a la energía promedio de las partículas que emiten (Nindos et al., 2008). Es decir, la emisión por mecanismo coherente sería mayor que la emisión por radiación de cuerpo negro, aun si los emisores tienen la misma temperatura.

2.2.1. Bremsstrahlung

La emisión Bremsstrahlung (radiación de frenado en alemán) térmica se produce cuando una partícula cargada es desacelerada por otra carga debido a fuerzas coulombianas. Esto hace que la partícula desacelerada emita un fotón cuya energía equivale a la energía cinética perdida en la desaceleración. Esto ocurre con una gran colección de electrones y iones libres en el plasma por lo que se produce un espectro continuo. Este tipo de emisión es predominante en el Sol quieto, es decir, en regiones no activas sobre el Sol o cuando este se encuentra en su mínimo de actividad (Gary y Keller, 2004).

2.2.2. Giroemisión

Este tipo de emisión, también llamado Bremsstrahlung magnético, se produce cuando electrones en movimiento se encuentran con un campo magnético, en estas condiciones se presenta la fuerza de Lorentz que se describe como:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.3)$$

donde q representa la carga del electrón, \mathbf{E} es el campo eléctrico en el que se encuentra el electrón, \mathbf{v} es el vector velocidad del electrón y \mathbf{B} es el campo magnético en el que se encuentra el electrón. Siguiendo esta ley, el electrón empezará a girar en dirección perpendicular a la dirección del magnético. Este electrón se moverá también en dirección paralela a la del campo magnético con una velocidad constante o acelerada dependiendo de la configuración del campo.

2. TEORÍA DE RADIO EMISIÓN SOLAR

La frecuencia con que gira la carga, también llamada girofrecuencia, está dada por:

$$\omega_{gf} = \frac{eB}{m_e} \quad (2.4)$$

Donde e es la carga del electrón, B es la magnitud del campo magnético y m_e es la masa del electrón. La giro emisión es útil para identificar y cuantificar campos magnéticos en el Sol, ya que estos hacen que las áreas de la corona donde se encuentran estos campos se vuelvan ópticamente gruesas para frecuencias de 1-18 GHz. Este tipo de emisión se puede clasificar en 3 diferentes dependiendo de la velocidad \mathbf{v} del electrón:

- **Ciclotrón** para velocidades no relativistas.
- **Girosincrotrón** para velocidades medianamente relativistas.
- **Sincrotrón** para velocidades relativistas.

De los anteriores, la radiación *girosincrotrón* y *ciclotrón* está presentes en los eventos eruptivos y que se relacionan con los estallidos de radio solar, los cuales se producen en las regiones activas del Sol. Estas regiones activas se caracterizan por tener una mayor intensidad de campo magnético.

2.2.3. Emisión de plasma

La emisión de plasma se produce cuando hay una perturbación en la energía cinética de un conjunto de partículas en un plasma, esta perturbación se puede producir por ondas de choque MHD o un haz de electrones acelerados a grandes velocidades, esta perturbación se puede representar básicamente como una fuerza de tipo eléctrica que mueve a las partículas de la siguiente manera.

$$\mathbf{F} = m_e \ddot{\mathbf{x}} = -e\mathbf{E} \quad (2.5)$$

donde m es la masa de las partículas y e se refiere a las carga de las partículas. Integrando la ley de Gauss para campo eléctrico en el caso particular para una sola dirección (x) se puede escribir y sustituir en la ecuación 2.5 como:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{eN_e}{\epsilon_0} \quad E = \frac{eN_e x}{\epsilon_0} \quad (2.6)$$

$$\ddot{x} + \frac{e^2 N_e x}{m_e} = 0 \quad (2.7)$$

Si los iones y electrones, que constituyen a un plasma, están relativamente estáticos, con distribución homogénea y no hay una componente magnética significativa, entonces

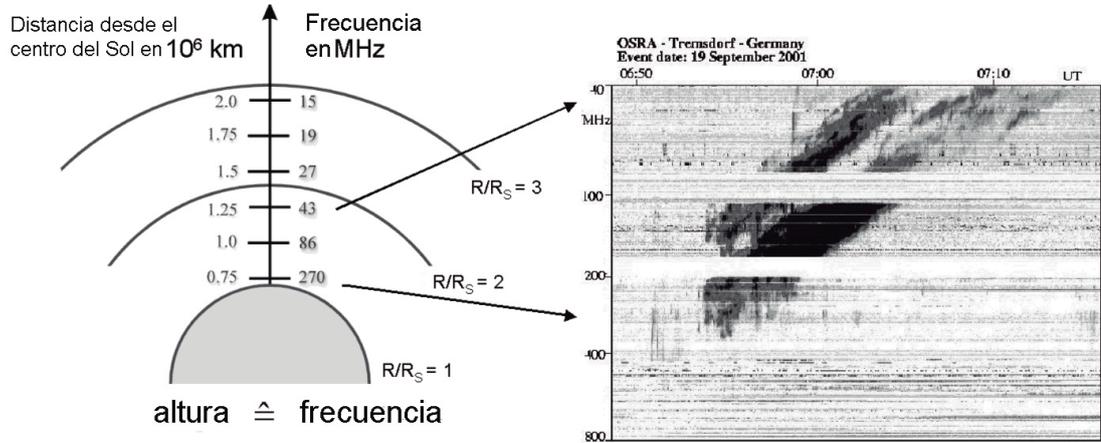


Figura 2.3: Relación que se hace entre las frecuencias en radio emitidas por un estallido tipo II (espectro en figura derecha) y las alturas desde la superficie del Sol a las que se produce la emisión (diagrama izquierdo) tomando en cuenta un modelo de densidades. Figura traducida de [Warmuth y Mann \(2005\)](#).

el movimiento de las partículas ocurre en una sola dirección. Si ocurre una perturbación en este mar de partículas, habrá una oscilación de estas partículas, conjunta o en fase. La frecuencia de esta oscilación denominada *frecuencia de plasma* está relacionada con la densidad del plasma de la siguiente manera:

$$f_p = \frac{ne^2}{\epsilon_0 m 4\pi^2}^{1/2} \approx 9\sqrt{n} \quad (2.8)$$

donde n es la densidad del plasma, ϵ_0 es la permitividad eléctrica del vacío ($8.854 \times 10^{-12} C^2/Nm^2$). Para plasmas como el viento solar se desprecia el aporte de los iones en el movimiento del plasma ya que son más masivos y prácticamente no se mueven en comparación con los electrones.

La frecuencia con que se emite la emisión de plasma en el viento solar equivale a la frecuencia de plasma. Esta relación nos permite ubicar la altura, con respecto a la fotósfera, de donde se emite una señal de radio por emisión de plasma, como es en el caso de los estallidos tipo I, II, III y IV. Para esto se usan modelos de densidades del viento solar .

Se debe tomar en cuenta que los perfiles de densidades pueden cambiar de acuerdo al tipo de región del Sol que se está considerando, sea Sol quieto o Sol activo, y al momento en que se observa dentro del ciclo de actividad solar, como se sugiere en [Newkirk Jr \(1961\)](#).

En los estallidos tipo II, III y IV, que se generan por una perturbación propagándose en el plasma, la densidad del medio por la que pasa este choque va disminuyendo, en consecuencia, la emisión de plasma deriva a frecuencias más bajas, es decir que la

emisión se va produciendo a frecuencias más bajas en el paso del tiempo. Conociendo la deriva se puede calcular la velocidad de esta perturbación usando un modelo de densidades. Sin embargo, se deben tomar en cuenta las limitaciones de proyección que se presentan en estos fenómenos (Gary y Keller, 2004).

Como la emisión de plasma se produce por parte de todos los electrones que son perturbados en fase, el flujo por este tipo de emisión llega a ser mucho mayor al de tipos de emisión coherente como se mencionó antes. Un estallido de radio solar típico llega a emitir 10^5 veces que la unidad de flujo solar (*ufs*) por emisión térmica, esto considerando que una *ufs*, a 40 MHz, equivale a $10^{-22} W m^{-2} Hz^{-1}$ (Warmuth y Mann, 2005). La emisión de plasma es dominante para frecuencias menores a 3 GHz, correspondiente a alturas mayores a $0.2 R_{\odot}$ sobre la fotosfera. (Gary y Keller, 2004).

2.3. Estallidos de radio solares

Los estallidos de radio solares son emisiones de energía electromagnética observadas en frecuencias de radio (entre 3Hz a 300GHz). Estas perturbaciones se relacionan con eventos energéticos que se producen sobre la superficie solar o en las cercanías de este. Algunos eventos se pueden extender hasta las vecindades del planeta Tierra, estos se observan en los estallidos de radio tipo II. Los tipos de estallidos se distinguen por la forma de su emisión en el espectro dinámico generado de la señal detectada por radiospectrógrafos. Las características que permiten diferenciar los distintos tipos son su duración, su ancho de banda y su deriva en frecuencias.

2.3.1. Estallidos tipo I

Los estallidos tipo I, también conocidos como tormentas de ruido, fueron las primeras firmas de radio más intensas provenientes del Sol, detectados durante la segunda guerra mundial, cuando se hacían investigaciones con radar por Southworth en 1945 y Hey en 1946 (Lanzerotti, 2001). Individualmente, los estallidos son emisiones cortas menores a 1 segundo pero que en conjunto pueden tener duraciones de horas y hasta días, su ancho de banda abarca unas decenas de MHz. Un ejemplo de cómo se ve un estallido tipo I se muestra en la Figura 2.4. La emisión ocurre en una región activa del Sol, o en el transcurso de una protuberancia solar (ver Figura 1.1). Aunque son eventos que no se relacionan con fulguraciones, se producen cuando un volumen de plasma se encuentra atrapado en una estructura magnética cerrada. Además de su emisión corta en forma de pulso, los estallidos tienen una componente continua (White, 2007) producida por Bremsstrahlung. A pesar de ser los más comunes son los que menos relevancia tienen para el CE ya que no se relacionan directamente con eventos eruptivos. Algunas tormentas con duración de días empiezan en cierto ancho de banda el cual va derivando lentamente a frecuencias más bajas o altas en el transcurso del día (Elgaroy, 1977).

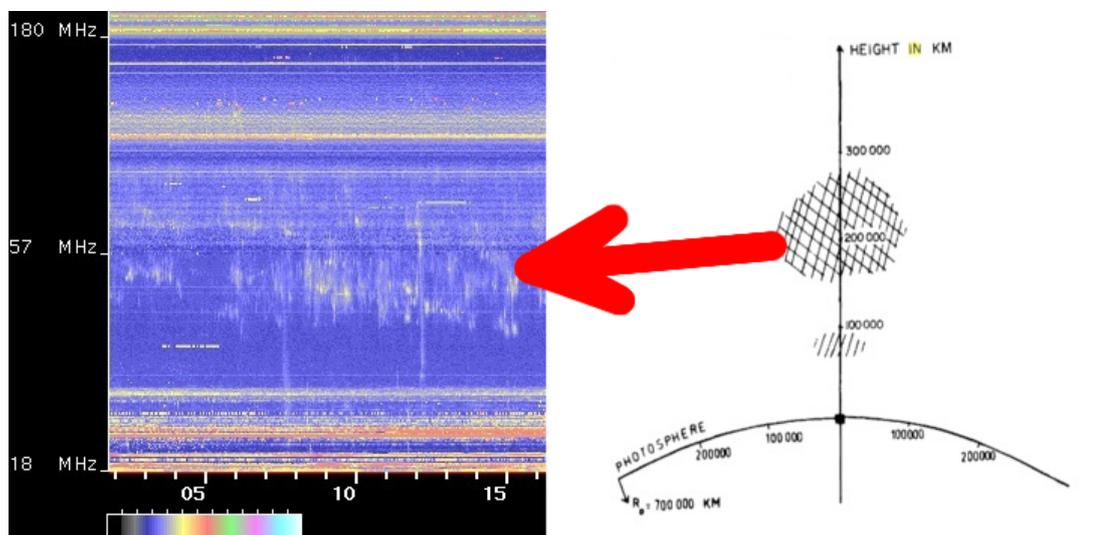


Figura 2.4: Espectro dinámico del radiospectrógrafo Culgoora de Australia, en el se puede observar un estallido de radio tipo I o llamado tormenta de ruido. Los estallidos tipo I son producidos por volúmenes de plasma cercanos a la superficie solar. Figuras modificadas de *SWS - Data Display and Download - Spectrograph* (2018), Elgaroy (1977).

2.3.2. Estallidos tipo II

Los estallidos tipo II se producen por ondas de choque magnetohidrodinámicas (MHD) rápidas que se relacionan con eventos eruptivos en la superficie del Sol. Cuando estas ondas de choque van viajando por el medio cercano al Sol y el medio interplanetario, alteran el plasma del medio, aceleran los electrones del medio y estos producen emisión de plasma. Las EMCs se presentan frecuentemente como conductores de choques rápidos. Estos choques pueden acelerar partículas a tal grado que producen un evento de SEPs (Gary y Keller, 2004). En consecuencia, los estallidos tipo II pueden ser indicadores de eventos de SEP y de EMCs. Como el choque que produce el estallido tipo II va expandiéndose por el medio interplanetario hacia medios menos densos, la emisión de este va derivando hacia frecuencias más bajas conforme avanza el tiempo, esto se puede observar en la Figura 2.5.

En (Corona-Romero et al., 2015), se estudiaron las firmas de radio de estallidos tipo II, con esto se estimaron velocidades iniciales, velocidades de trayecto y tiempos de llegada a la Tierra de choques relacionados con EMCs. En Gopalswamy et al. (2000) se hace un estudio estadístico en donde se relacionan los estallidos de radio tipo II con EMCs con ancho angular mas grandes y velocidades altas. Como se mostró, estudiar los espectros de eventos tipo II se vuelve relevante para el CE y física solar ya que permite producir pronósticos de eventos eruptivos y estudiar las características de estos.

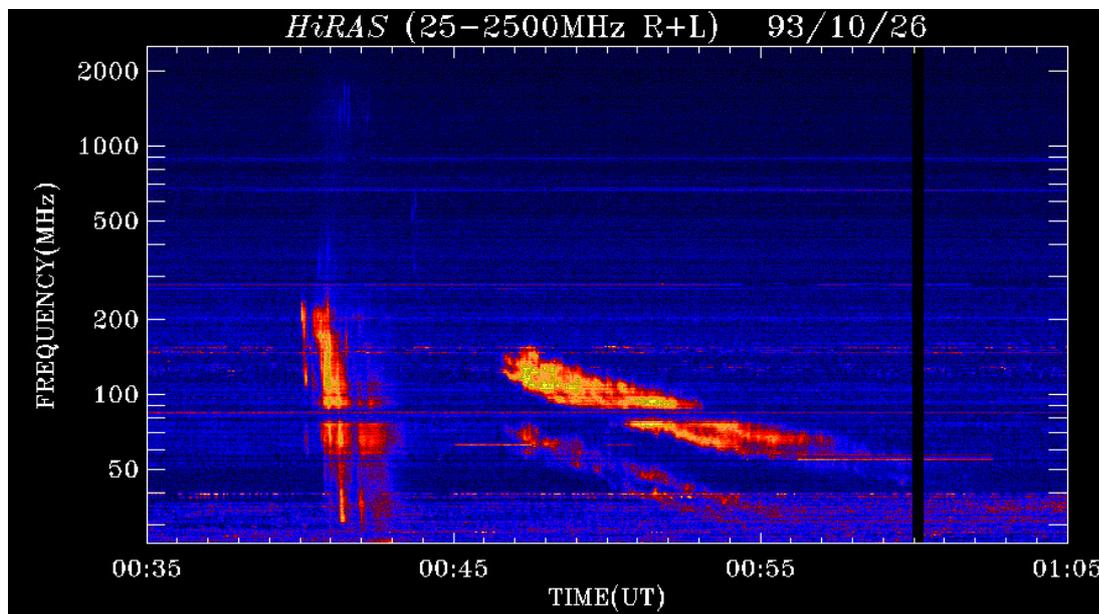


Figura 2.5: Estallido de radio tipo II seguido de un tipo III observado por el radiospectrógrafo HiRAS de Japón. Imagen obtenida de *Hiraizo Radio Spectrograph* (2018) .

2.3.3. Estallidos tipo III

Se considera que los estallidos tipo III se producen por haces de electrones acelerados en una fulguración. Estas velocidades pueden llegar a fracciones de la velocidad de la luz. Los electrones acelerados pueden llegar al medio interplanetario produciendo emisión de plasma desde 1 GHz hasta los 10 kHz alcanzando la región menos densa del plasma posible (Nindos et al., 2008). Como estos estallidos se producen antes o en la etapa temprana de un evento eruptivo, también son buenos indicadores de éstos.

La velocidad de estos haces de electrones produce una deriva de frecuencias prácticamente nula en frecuencias altas (ver Figura 2.5), sin embargo, esta deriva se va incrementando hacia frecuencias más bajas. Esto nos indica que las partículas viajan por medios cada vez menos densos. La emisión de los estallidos es de un par de segundos o menos, pero a veces se emiten en grupos que pueden durar algunos minutos.

2.3.4. Estallidos tipo IV

Este tipo de estallidos se presentan con una emisión continua durante decenas de minutos. Su fuente de emisión se encuentra cercana a la superficie solar, ya que su emisión se produce en frecuencias entre 0.3 y 5 GHz. Se cree que este tipo de estallidos se producen por emisión de plasma o giroemisión. Esto ocurre cuando hay un volumen de plasma confinado en una estructura magnética, sea un arco magnético, una estructura

que va ascendiendo o creciendo sobre la superficie solar o una estructura de plasma ascendiente producida en un evento eruptivo solar (Warmuth y Mann, 2005),(Gary y Keller, 2004).

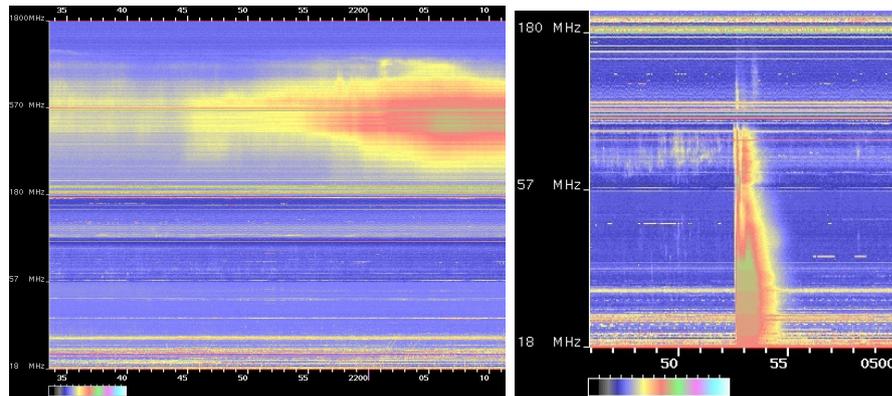


Figura 2.6: Ejemplos de un estallido tipo IV (izquierda) y un estallido tipo V, ambos captados en Culgoora. Fuente: *SWS - Data Display and Download - Spectrograph* (2018)

2.3.5. Estallidos tipo V

Los estallidos tipo V se producen con los estallidos tipo III y se pueden observar en los espectros como las colas en bajas frecuencias de los estallidos tipo III. Se cree que se producen cuando los electrones del haz principal, que está produciendo un estallido tipo III, se escapan del flujo principal por *dispersión del ángulo de inclinación* de los electrones que viajan por una *línea* de campo magnético. Como son un subproducto de los estallidos de radio tipo III, no se consideran relevantes para el CE.

2.4. Observaciones adicionales sobre los estallidos de radio.

Se presenta un diagrama con la forma de los distintos tipos de estallidos en la figura 2.7. Los 5 tipos de emisión son muy diferentes entre si por su origen y por como se detectan en el espectro dinámico. Sin embargo, a pesar de la clasificación realizada anteriormente, muchos eventos se presentan con una con una morfología compleja o difíciles de clasificar. Un ejemplo es el caso de los estallidos de tipo U que son una forma de los estallidos tipo III. Este tipo de estallidos se produce por la aceleración de electrones que siguen una estructura de campo magnético. Al ser enganchados por estructuras como arcos magnéticos, pueden ascender por la corona pero posteriormente desviarse y regresar hacia regiones más densas. La trayectoria de estas partículas produce en el

espectro dinámico una emisión en forma de U que va de frecuencias altas a bajas y luego de regreso a frecuencias altas (Warmuth y Mann, 2005) (ver figura 1.1).

Otro ejemplo son de estallidos tipo IV que pueden presentar estructuras como pulsaciones, patrones de zebra, deriva de su emisión en frecuencias o incluso convertirse en estallidos tipo I. En otras ocasiones, se presentan estallidos de radio simultáneamente o de manera subsecuente. En algunos casos los eventos de distintos tipos están relacionados, como lo es el caso de los estallidos tipo III, producido por una fulguración que es seguido por un estallido tipo II, provocado por una onda de choque asociado a la fulguración (ver figura 2.5).

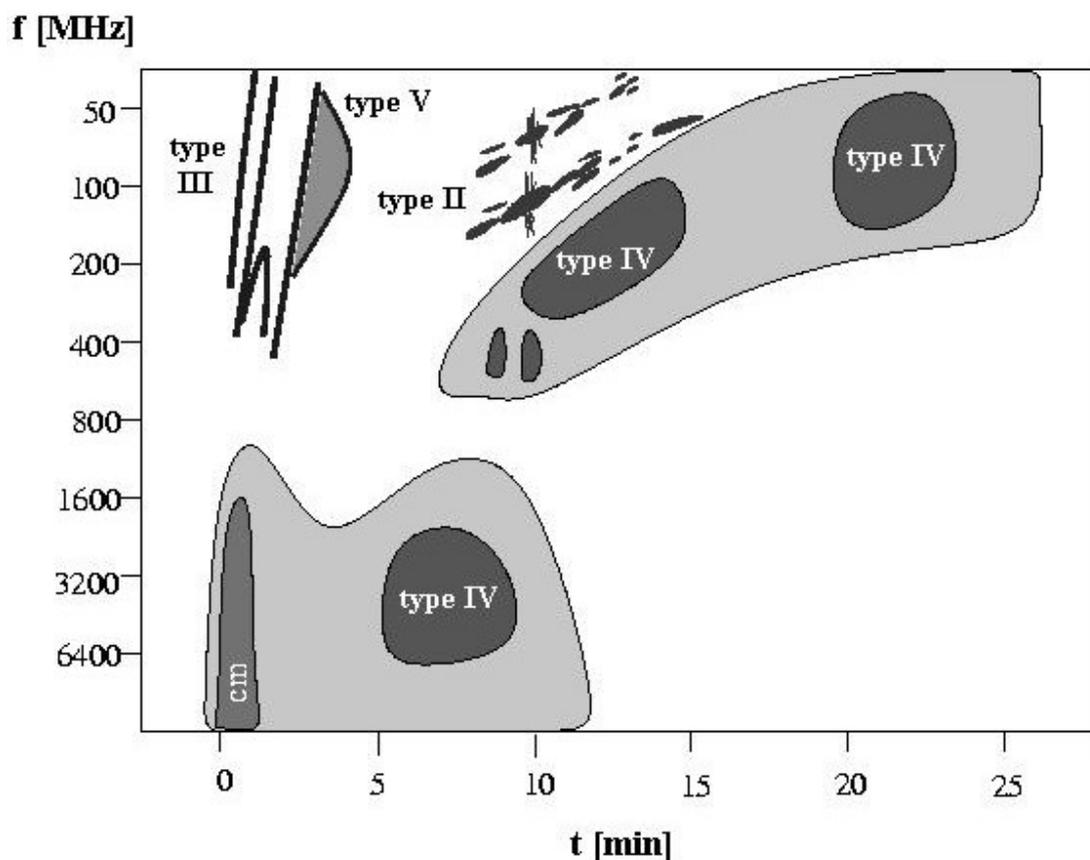


Figura 2.7: Este diagrama resume la forma de los distintos tipos de estallidos de radio, tal y como son detectados en el espectro dinámico. Tomado de Warmuth y Mann (2005).

2.5. Resumen

En este capítulo se presentaron los procesos de radio emisión y las diferentes características que tienen los estallidos de radio solares. Un diagrama que resume la forma

que toman los diferentes tipos de estallidos en el espectro, se muestra en la Figura 2.7. A continuación se hará la caracterización de la instrumentación utilizada en este trabajo, la cual nos permitirá registrar los diferentes fenómenos de radio emisión solar presentados en este capítulo.

Instrumentación

3.1. Introducción

El Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE) es un organismo donde participa la Universidad Nacional Autónoma de México, la Universidad Autónoma de Nuevo León y la Universidad Autónoma de la Ciudad de México. Está conformado por el Servicio de Clima Espacial México (SCiESMEX), el Repositorio Institucional de Clima Espacial (RICE) y el Centro de Supercómputo de Clima Espacial (CESCOM) y la red de instrumentación de CE de la UNAM y de la UANL (Robles, 2017). Este organismo se encarga de recopilar información, monitorizar y estudiar el medio y los procesos que constituyen al sistema Sol-Tierra, los cuales tienen inferencia en la infraestructura humana, haciendo énfasis en el territorio mexicano.

La ubicación de los principales instrumentos utilizados por LANCE está cerca del poblado de Coeneo Michoacán con coordenadas $19^{\circ}48'49''$ norte y $101^{\circ}41'39''$ oeste, con una altura de 1964 metros sobre el nivel del mar. Se decidió usar esta ubicación para construir el MEXART debido al poco ruido en radio presente que sería necesario para realizar observaciones con el radiotelescopio (Carrillo, 2007). A lo largo de los años se han ido integrando otros instrumentos en el observatorio, como Callisto, una cámara ionosférica, una estación meteorológica entre otros. En el futuro, se tienen planes para integrar otros instrumentos como estaciones de GNSS, una ionosonda y detectores de campo magnético.

Los instrumentos utilizados en este trabajo son MEXART (Mexican Array Radio Telescope) y Callisto (Compound Astronomical Low cost Low frequency Instrument for Spectroscopy and Transportable Observatory) ambos, instrumentos del LANCE. Los dos radiotelescopios operan en el rango de VHF (Very High Frequency 30-300 MHz). El principal uso de MEXART es identificar y estudiar directamente fuentes de radio como estrellas, galaxias, y nebulosas. Callisto se usa para escanear el medio radioeléctrico para detectar emisiones repentinas generadas por eventos eruptivos.

MEXART monitoriza el flujo de fuentes de radio bien conocidas, estas pueden ser estrellas, galaxias o nebulosas. Cuando estas pasan por el meridiano local, MEXART

3. INSTRUMENTACIÓN

puede detectar alteraciones en su flujo de radio. Estas alteraciones son provocadas por cambios en el flujo del viento solar que atraviesa la línea de visión a la radiofuente. Callisto en cambio, escanea el medio radioeléctrico con el propósito de detectar emisiones generadas por eventos eruptivos solares. Estos dos instrumentos tienen características y fines distintos pero, debido a que monitorizan un mismo ancho de banda del espectro radioeléctrico, los dos pueden registrar señales provenientes del Sol como se mostrará en los siguientes capítulos.

3.2. Callisto

Callisto es un radioespectrógrafo que forma parte de la red internacional de radioespectrógrafos e-Callisto. Esta red se encarga de monitorizar al Sol las 24 hrs con 144 instrumentos globalmente (Monstein, 2018). Este programa de radioespectrógrafos, creado por Christian Moinstein de la Escuela Politécnica Federal de Zurich, tiene la intención de detectar estallidos de radio solares, estudiar radiointerferencias y otros propósitos educativos y científicos. Este programa se desarrolló debido a la necesidad de vigilar la actividad solar, en particular EMCs y fulguraciones, a través de las emisiones de radio que producen éstas en el VHF. Este proyecto se logró concretar debido a la reducción en precios de los sintetizadores de frecuencias que pueden usarse ahora en este rango del espectro. Los radioespectrógrafos que conforman la red tienen características heterogéneas: observan diferentes bandas, sus antenas incluyen arreglos de yaguis, de LPDAs o incluso antenas de plato, también se hacen modificaciones en sus receptores con distinta ganancia, diferente número de canales, etc. Esto hace que los datos puedan ser distintos, pero en su mayoría, los instrumentos observan el espectro en la banda VHF y en menor proporción en HF (3-30 MHz) y UHF (300-3000 MHz).

3.2.1. Procesamiento de la señal radioeléctrica

3.2.1.1. Antena y TMA-1

Callisto está conectado a una antena receptora de radiofrecuencias, se usa una antena tipo LPDA (log-periodic dipole array, ver figura 3.1) que permite la detección de anchos de banda amplios, la antena está hecha de 21 dipolos. Esta antena es capaz de percibir señales entre 50 y 1300 MHz con una ganancia de entre 10 y 12 dBi (ganancia de antena en dB por encima de un radiador isotrópico). El patrón de radiación bidimensional se obtiene de la hoja de datos de la antena (ver Figura 3.2). Una proyección de cómo se vería en 3 dimensiones se muestra en la figura 3.3. Debido a que esta antena está fija y apuntando hacia el zenit, las señales de las cuales obtienen mayor ganancia son de aquellas radiofuentes que se posicionan en el zenit. La directividad de la antena está determinada por el patrón de antena o patrón de ganancia. Después del zenit, las señales que obtienen mayor ganancia son las que llegan a la antena por el plano horizontal (Plano H). Este plano es perpendicular a la dirección de los dipolos. Se

obtiene menor ganancia con señales que inciden a la antena en el plano de elevación (Plano E). Este plano es perpendicular a la dirección de los dipolos. Se dice que una antena está orientado en dirección de su mayor ganancia. En el caso de la antena de Callisto, esta antena está orientada hacia el zenit y en el plano Este-Oeste.



Figura 3.1: Fotografía de la antena LPDA que usa Callisto-MEXART, el TMA-1 que recibe la señal de Callisto se encuentra en la parte inferior en el castillo que sujeta el soporte de la antena.

La señal recogida con la antena es dirigida mediante un cable coaxial a un amplificador de bajo ruido (TMA-1) el cual le da una amplificación promedio de 20 dB (ver figura 3.4). Además, el TMA-1 tiene un supresor de rayos para evitar dañar el equipo en caso de una descarga eléctrica sobre la antena o elementos cercanos. También tiene un supresor de picos que evita que incrementos momentáneos de voltaje, generados por señales intensas, puedan dañar el amplificador. La señal que sale del amplificador se dirige mediante un cable coaxial al cuarto de control y se conecta al radiospectrógrafo Callisto. La señal dentro del dispositivo Callisto se procesa como se muestra en la Figura 3.5.

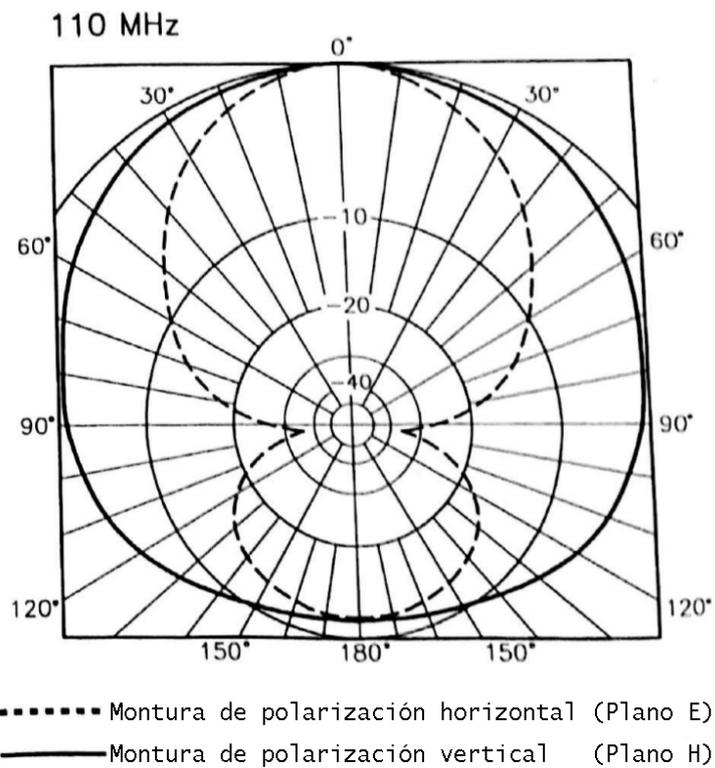


Figura 3.2: El patrón de antena o patrón de ganancia de la antena LPDA, a 110 MHz, nos indica que la ganancia de una señal recibida o transmitida depende de la dirección en que esta viene. Cuando una señal viene en dirección de las puntas de los dipolos (Plano E), se obtiene la menor ganancia. Figura traducida de [Create \(s.f.\)](#).

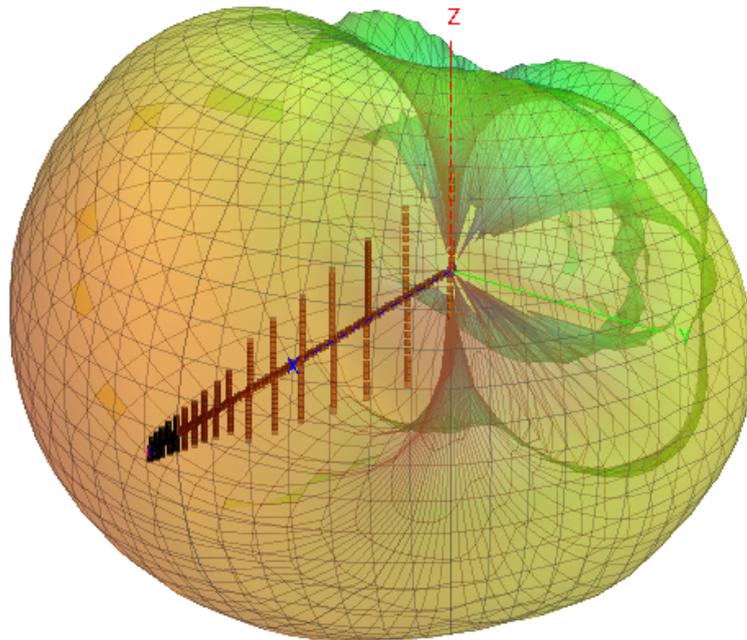


Figura 3.3: Representación del patrón de su proyección en 3 dimensiones, los colores cercanos al rojo indican una mayor ganancia. Obtenido de *DVB Antenna Design and Matching with Antenna Magus, Optenni Lab and FEKO* (2017).

3. INSTRUMENTACIÓN

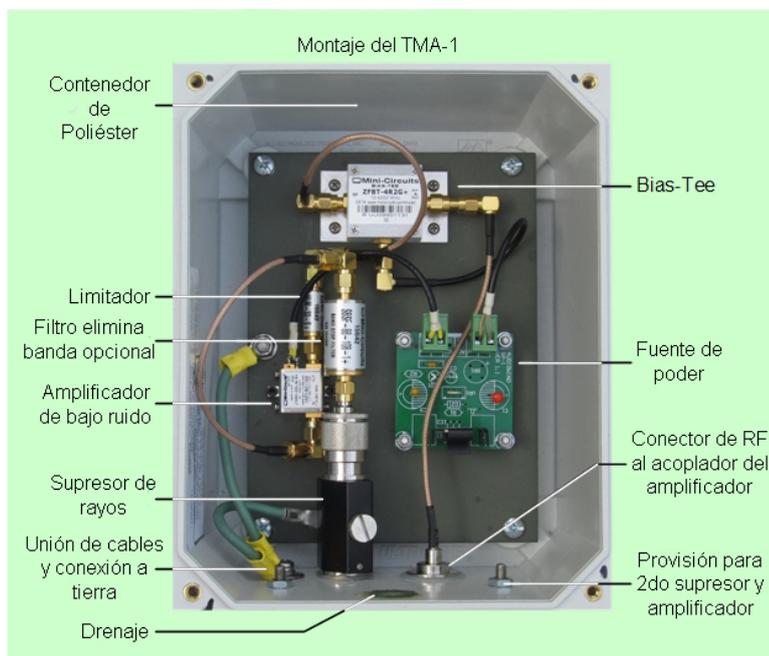


Figura 3.4: Componentes que integran al TMA-1, estos permiten amplificar la señal de la antena y protegen la electrónica de Callisto ante picos en el voltaje, imagen obtenida y traducida de *Tower-Mounted Amplifier Assembly* (s.f.) .

3.2.1.2. Receptor

La señal, amplificada por el TMA-1, entra al receptor Callisto (ver Figura 3.5) donde se pasa a un elemento sintetizador de frecuencias controlado por un circuito interintegrado (I^2C por sus siglas en inglés). La señal que entra es una suma de las señales con distintas frecuencias y al salir del sintetizador, la señal pasa al dominio de las frecuencias y se segmenta en los distintos canales de Callisto. Esto está determinado por el I^2C que se comunica con los controladores del receptor. Las señales segmentadas pasan por un convertidor reductor donde se mezclan con una señal senoidal llamada señal intermedia, proporcionada por un oscilador local. Así, a partir de la señal original, se generan dos nuevas con la misma información, pero una con una frecuencia más baja y la otra más alta, como se muestra en la siguiente relación:

$$F(A) * F(B) = F(A - B) + F(A + B), \quad (3.1)$$

con $F(A)$ siendo la transformada de Fourier de la señal original con frecuencia central A y $F(B)$ el de la señal intermedia con frecuencia B .

Se pretende usar la señal resultante de más baja frecuencia que hace más fácil el procesamiento y amplificación de la señal en elementos posteriores. En la siguiente etapa, un amplificador logarítmico aumenta el nivel de la señal en cada frecuencia. La

siguiente etapa, que es filtro pasabajas que integra la señal de baja frecuencia generada en el convertidor reductor. Se suma la señal correspondiente a cada frecuencias en un intervalo de 0.25 segundos. El valor obtenido se asigna con la unidad adquisidora de datos convirtiéndose en una señal digital. Finalmente, esta información se guarda en un buffer y se transfiere por controladores que se comunican con la computadora que termina de procesar la señal y la almacena. La primera y la última fase de Callisto se comunican entre si con el I^2C para manejar el flujo de la señal.

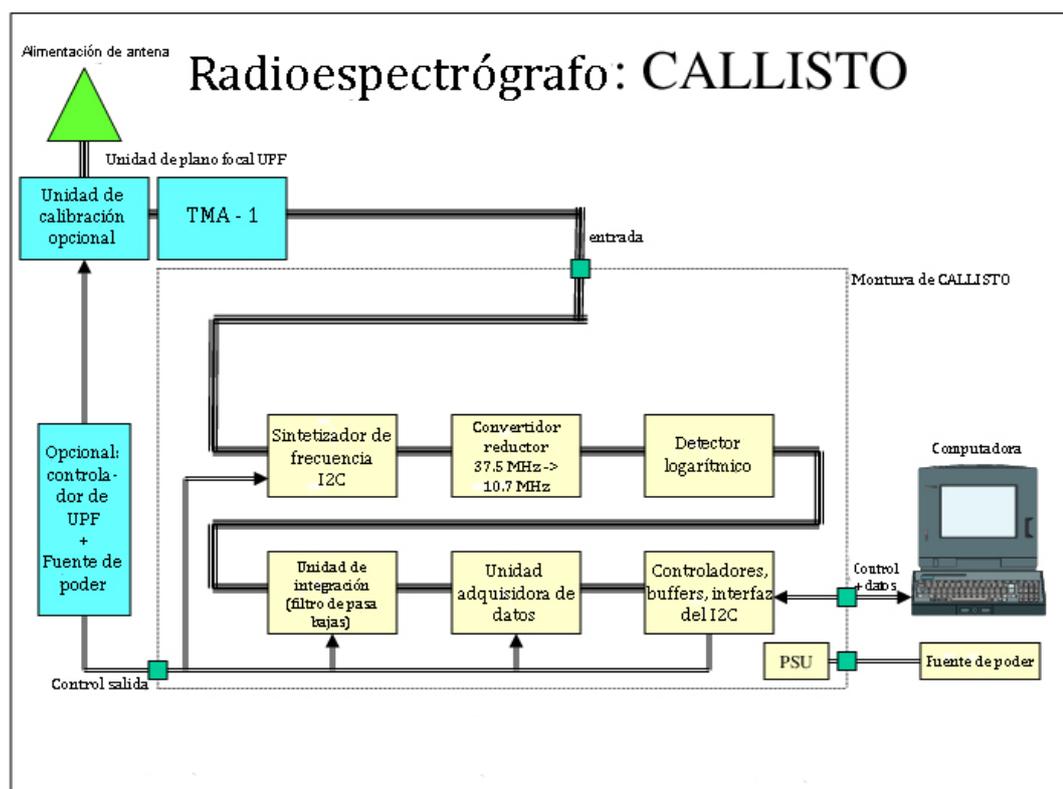


Figura 3.5: Diagrama del procesamiento de la señal de Callisto, obtenido y traducido de Hamidi et al. (2012).

3.2.1.3. Computadora de Callisto-MEXART

Callisto se controla con una computadora conectada con un cable R232. La computadora usa el S.O. Windows y se comunica con el receptor mediante un software que proporciona la red e-Callisto. La interfaz del software se muestra en la Figura 3.6. En la ventana izquierda se encuentran las distintas funciones disponibles. En el lado derecha se muestra la curva de luz de una sola frecuencia. El espectro dinámico, que se muestra en la parte media inferior, se actualiza en tiempo real. El espectro de cada instante se muestra en la ventana media superior. Con el software de Callisto se escoge la banda

3. INSTRUMENTACIÓN

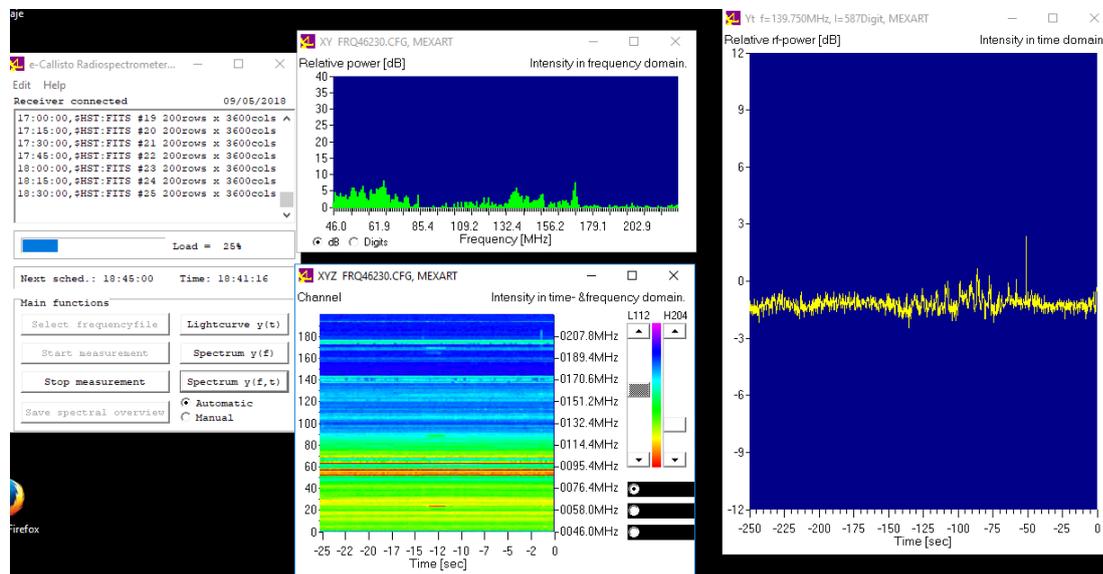


Figura 3.6: Interfaz gráfica del programa Callisto que se usa para controlar el almacenamiento de datos del radiospectrógrafo.

de frecuencia de la que se almacenan los datos, se inicia o pausa el almacenamiento de datos, entre otras funciones. La ventana de funciones también incluye una bitácora de los eventos de control de software, sea el inicio o finalización en la adquisición de datos o el llenado de datos para un solo archivo.

Callisto solo permite sintonizar anchos de banda entre 45 y 870 MHz. En un inicio, cuando empezó a operar en febrero de 2015, esta banda fue establecida de 45 a 345 MHz. Posteriormente, en el mes de febrero del 2016, se cambió el ancho de banda a 45-225 MHz para obtener una mayor resolución espectral. Con los programas que controlan a Callisto se proporciona un organizador de tareas que se encarga de indicar los periodos de tiempo en los que Callisto graba datos. Con este radiospectrógrafo se graban datos desde las 13:15 UTC hasta las 00:30 UTC, del día siguiente. Este periodo de tiempo corresponde al tiempo en que el Sol se encuentra sobre el horizonte, en la ubicación del observatorio de Coeneo. Estas horas cambian respecto a la época del año.

En un ciclo de observación, el software almacena la intensidad de la señal de las frecuencias en un bufer. Cuando se cumplen 15 minutos de observación, los datos se guardan en un archivo tipo fits (Flexible Image Transport System). Este tipo de archivos almacenan imágenes o datos digitales en matrices de N dimensiones y se usan generalmente para propósitos de astronomía. Este tipo de archivos llevan cabeceras con los metadatos del archivo en caracteres ASCII, lo que facilita su lectura al usuario.

Los datos producidos por Callisto se graban en una matriz de 200 por 3600, correspondiente a 200 canales de frecuencia y los 15 minutos de tiempo segmentados en 3600 espacios. Cada casilla de la matriz contiene la intensidad de la señal integrada en 0.25 s. La intensidad obtenida en cada casilla corresponde a un número de cuentas

registradas por el receptor referente a los milivolts generados en la antena, cuando una señal radio incide en ella. El cálculo de cuentas a milivolts se realiza con la siguiente fórmula:

$$mV = \frac{x}{255.0} \times 2500.0, \quad (3.2)$$

donde x es la intensidad en número de cuentas para cada casilla de la matriz. En este trabajo se utilizó la intensidad de la señal obtenida por Callisto en miliVolts. Finalmente, estos datos se guardan en la computadora en una ubicación designada por el software de Callisto.

3.3. MEXART

3.3.1. Introducción

MEXART es un radiotelescopio que se compone de 4096 dipolos distribuidos en 64 líneas paralelas con dirección Este-Oeste, cada una con 64 dipolos. El arreglo cubre 140 m de Este a Oeste y 70 m de Norte a Sur con un total de 9600 m^2 . El ancho de banda que MEXART tiene asignado para operar es de 138.9 a 140.4 MHz. Esta banda está protegida y asignada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), gracias a las gestiones realizadas por los miembros encargados del proyecto para poder desarrollar investigaciones de carácter científico y así proteger la banda ante otras emisiones de radio provenientes de la industria de las radiocomunicaciones. El acuerdo aparece de manera oficial en el Diario Oficial del 11 de enero de 1999, en donde la Comisión Federal de Telecomunicaciones publicó el cuadro nacional para atribuciones de frecuencias (Carrillo, 2007).

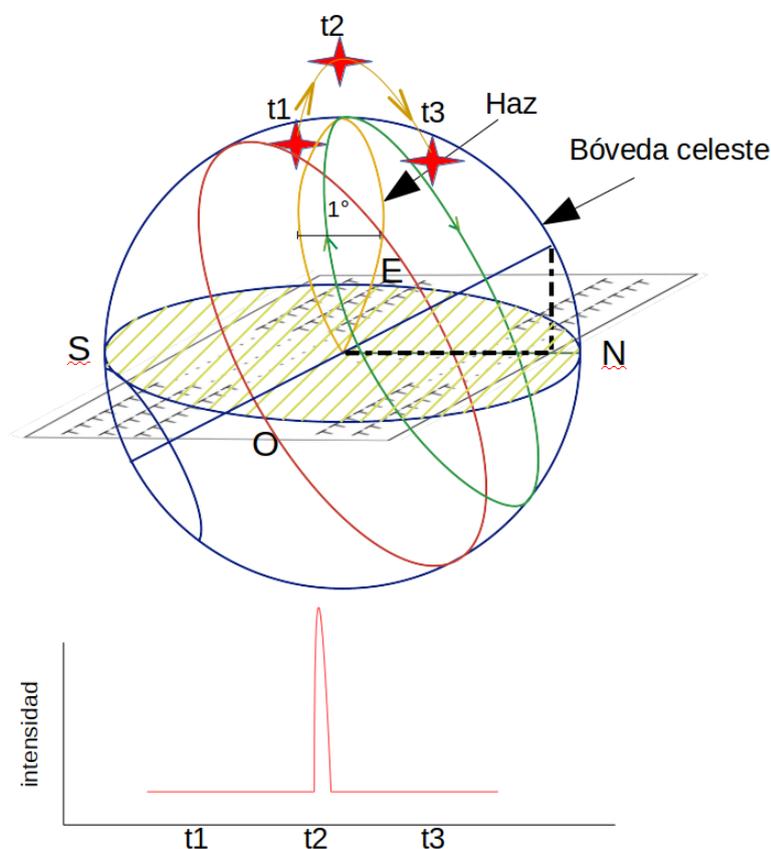


Figura 3.7: En la figura superior se muestra una proyección del arreglo MEXART con su patrón de antena y el tránsito de una radiofuente en 3 dimensiones. El diagrama de abajo simula como se registra una radiofuente en los datos. Suponiendo que la esfera delineada con el círculo azul es la bóveda celeste, en el plano dibujado estaría desplegado el radiotelescopio con su arreglo dipolar, además, se tiene una radiofuente con una declinación tal que pasa por el meridiano local siguiendo una trayectoria circular (círculo verde). La señal de esta radiofuente solo será detectada en el momento que pase por el meridiano local. Imagen modificada de [Mejía Ambriz \(2012\)](#).

El radiotelescopio fue desarrollado para medir indirectamente la velocidad del viento solar mediante observaciones y análisis de Centelleo Interplanetario (CIP). Siendo una antena fija, sin partes móviles, MEXART es un radiotelescopio de tránsito. En cada instante puede detectar la señal de los objetos emisores que se encuentran en el meridiano local. Debido a la rotación de la Tierra, el haz de la antena puede barrer el cielo mientras la bóveda celeste va rotando (ver Figura 3.7). Cuando se usa una sola línea cuyos dipolos se encuentran conectados entre sí, se obtiene un patrón de radiación parecido al de la Figura 3.8. Cuando se conectan más dipolos o líneas, este haz se va haciendo angosto y adquiere mayor ganancia. Al ser una antena fija, la directividad de

la antena solo puede aprovechar la rotación de la Tierra para detectar radiofuentes del espacio. Incrementando el número de líneas o antenas de este tipo no reducirá el ancho en la dirección Norte-Sur, para obtener directividad en esta dirección se usa un método que se menciona más adelante.

Cada línea de MEXART está conformada por 4 unidades. Cada unidad de la antena tiene 16 dipolos. Las señales de estos se acoplan en un solo cable coaxial mediante un balun. Posteriormente, la señal pasa por un filtro pasaaltas con frecuencia de corte de 67 MHz. Se amplifica la señal de la unidad en 20 dB y se combina con la señal proveniente de otra unidad en un combinador de potencia. Esta etapa de amplificación-combinación-filtrado se realiza una vez más con otra unidad pero en el segundo paso el filtro es un pasa-banda con frecuencia central de 139.65 MHz y ancho de banda de 15 MHz (Villanueva Hernández, 2007, 2009). Con esto, de una sola línea, se integran las 4 unidades en una sola señal. Así se obtiene una sola señal de cada línea de MEXART.

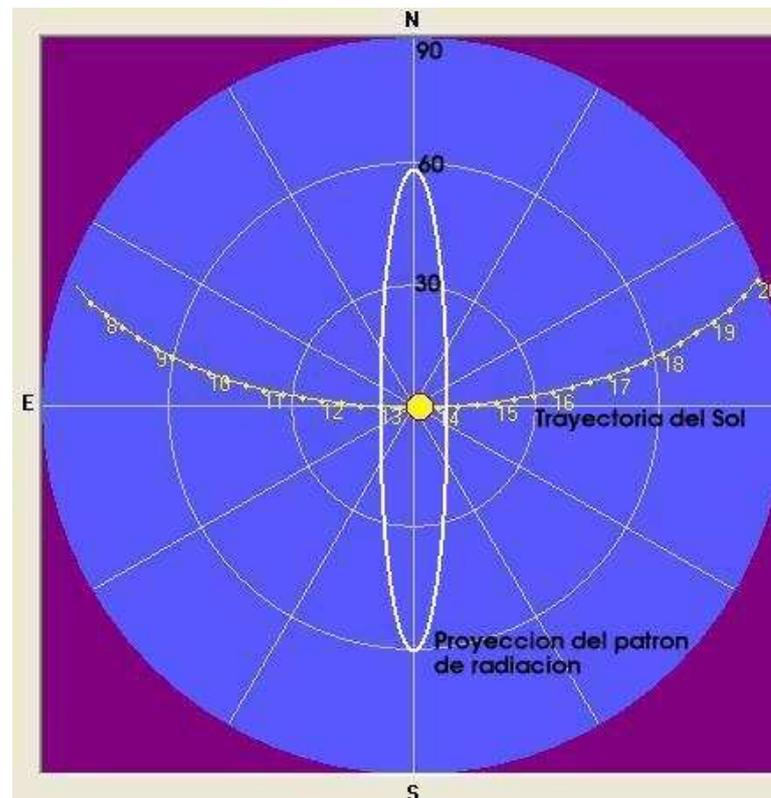


Figura 3.8: Proyección sobre el cielo del patrón de antena de una línea y la representación de la trayectoria del Sol pasando sobre el firmamento (obtenido de Carrillo (2007)).

En un inicio (2007-2009) MEXART empezó a operar con 1/4 de antena obteniendo 16 líneas. A partir de noviembre de 2010 se empezó a operar con media antena, es decir con 36 líneas. Las nuevas 16 señales se combinan con las otras 16 para seguir teniendo

16 señales en total (Chang Martínez, 2017). A la fecha, el instrumento ha operado alternando distintos grupos de 16 (1/4 arreglo) y 32 líneas (1/2 arreglo).

3.3.2. Direccionalidad Norte-Sur y Matriz de Butler

Se tienen 16 señales separadas de MEXART para que estas se puedan conectar a la matriz de Butler (MB) e implementar un método de direccionamiento en la dirección Norte-Sur.

La Matriz de Butler es un sistema con 16 entradas y 16 salidas que permite desfasar la señal de 16 líneas señales entrantes (ver figura 3.10). Este desfase entre líneas permite cambiar el patrón de radiación de la antena en diferentes haces con distintas direcciones en la dirección Norte-Sur. Cada uno de estos haces es proporcionado por cada una de las salidas de la MB. El telescopio se diseñó con la intención de obtener un patrón de antena simétrico con 16 haces distintos que van de norte a sur. Las declinaciones de estos haces son de 4, 11, 18, 26, 34, 43, 53, 68, -4, -11, -18, -26, -34, -43, -53 y -68 grados, con respecto al zenit. El patrón teórico de los haces se presenta en la Figura 3.9 (Villanueva Hernández, 2009).

Usando la matriz de Butler, se obtuvieron haces que no se acercan a los haces teóricos calculados en Carrillo (2007). Se tuvo este mismo problema al operar con un cuarto de antena y con la antena completa. Para resolver este problema se han implementado dos metodologías en Mejía Ambríz (2012) y en Chang Martínez (2017). En estos métodos, se escanea constantemente el cielo usando los distintos haces en el momento en que pasa una radio fuente para determinar el haz que obtiene mayor ganancia en el tránsito de una radiofuente. Con esta metodología implementada, se registra en una bitácora, que da seguimiento de las observaciones de MEXART, el periodo de tiempo que se usa un haz. En la bitácora también se indica el nombre de la radiofuente que se ha observado con dicho haz, acompañado de sus coordenadas en el sistema ecuatorial.

3.3.3. Receptor 0 de MEXART

MEXART tiene dos receptores para medir la señal en voltaje detectada por la antena: 0 y 1. Para este trabajo se usaron los datos generados por el receptor 0. Este es un receptor superheterodino con un oscilador de 129 MHz. Este receptor actúa como un filtro pasa-banda y obtiene la señal de la banda con una frecuencia central de 139.65 MHz y un ancho de banda de 2 MHz. En este receptor el voltaje de la señal es medido y, posteriormente, el dato se pasa a una adquisidora análogo-digital que manda la información recabada a una computadora (ver Figura 3.10). Los datos tienen una tasa de muestreo de un dato cada 20 milisegundos. La computadora despliega en tiempo real los datos de la antena obtenidos por el receptor 0 y 1. Los datos se guardan en un servidor local y en el repositorio RICE. Un archivo de datos se transfiere cuando se completan 24 hrs de observación. Cuando se generan estos archivos de datos también

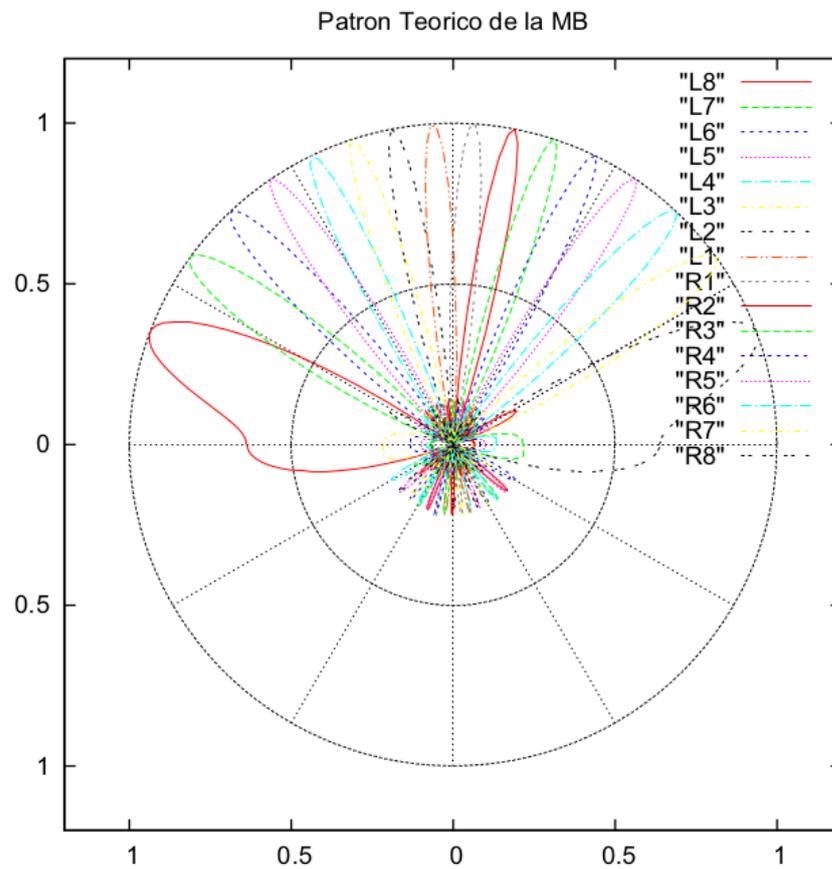


Figura 3.9: Forma teórica de los haces usados por MEXART. Figuras obtenidas de Villanueva Hernández (2009).

3. INSTRUMENTACIÓN

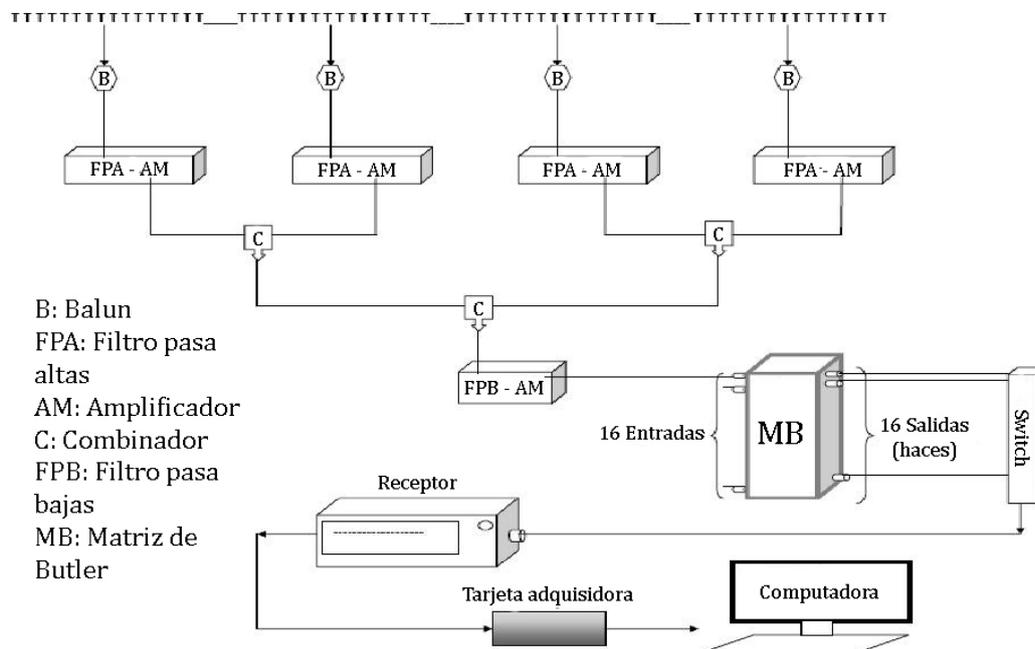


Figura 3.10: Diagrama que muestra la recepción de la señal desde las antenas hasta el receptor. Este diagrama muestra el procesamiento de una sola línea cuando se usa 1/4 de antena. La señal de cada línea entra a cada una de las entradas de la MB. Para 1/2 antena y la antena entera, las señales entre secciones deben acoplarse 2:1 y 4:1, respectivamente. Figura obtenida de [Mejía Ambriz \(2012\)](#).

se genera la bitácora donde se anotan los tiempos en que se usó el haz generado por la MB.

3.4. Resumen

Se realizó una revisión del funcionamiento de los dos radiotelescopios. En principio, tienen un funcionamiento similar pero se diferencian principalmente en el arreglo de antenas que cada uno tiene. MEXART, con su arreglo de 4096 dipolos obtiene mucha mayor ganancia que Callisto. Callisto por otra parte, obtiene un gran ancho de banda con su arreglo LPDA. Otro gran aspecto en que se diferencian estos radiotelescopios es su ritmo de muestreo. Callisto tiene un ritmo de integración de 4 HZ y MEXART de 50 Hz que lo vuelve en un potente radiotelescopio debido a su ganancia y resolución temporal. Además, MEXART tiene la capacidad de direccionar su patrón de antena usando el método de desfase de señales con la MB.

Callisto, teniendo una antena fija, no tiene la directividad que tiene MEXART, pero para otros propósitos es muy útil, debido a su patrón de antena que es más isométrica,

para detectar e identificar radiointerferencias. Estas radiointerferencias pueden afectar las observaciones de MEXART como se verá en el siguiente capítulo. Por el ancho de banda y el espectro que produce, Callisto permite identificar el tipo de señal que se está detectando. Esto permite inferir el origen o la fuente de diversas señales de radio por su forma y duración en el espectro dinámico, como se mostrará en el siguiente capítulo. Esto no es posible usando solo la serie de datos de MEXART.

En el siguiente capítulo mostraremos las observaciones detectadas por ambos instrumentos entre 45 y 225 MHz.

Observaciones de señales de radio entre 45 y 225 MHz

4.1. Introducción

Después de registrar la radiación electromagnética con la instrumentación, es necesario identificar y caracterizar cada señal radioeléctrica sea esta de origen artificial o causada por un fenómeno natural. Para esto hay que tomar en cuenta las características de los dos radiotelescopios. MEXART, como se ha mencionado, se caracteriza por detectar un ancho de banda estrecho pero con una gran sensibilidad. Esto nos permite identificar fácilmente radiofuentes como radiogalaxias, nebulosas, el centro de la Vía Láctea, etc. MEXART detecta las señales de radio cuando estos cuerpos están en la dirección del haz principal del patrón producido por la matriz de Butler. La detección de una señal se realiza cuando la emisión de radio cae en la dirección de uno de los haces principales usado por la antena en ese momento o si la emisión tiene la suficiente potencia para ser detectada por uno de sus lóbulos secundarios.

Callisto, por otro lado, detecta señales de manera casi omnidireccional (ver Figura 3.2), de esta manera, el radiospectrógrafo detecta todo tipo de emisiones locales generadas por radiocomunicaciones, fuentes como rayos o radiointerferencias generadas por componentes electrónicos externos a la antena e infraestructura eléctrica. La ventaja de Callisto es que observa un ancho de banda amplio que permite detectar señales e identificarlas fácilmente solo por su forma y duración en el espectro dinámico (ver Figura 4.1). Cuando una señal es identificada se pueden discriminar aquellas que son de interés para un estudio astronómico. Las que no son de interés para el estudio que se está realizando se consideran generalmente como ruido ya que pueden alterar la información que se desea analizar.

4.2. Radiocomunicaciones

Una de las principales emisiones que afectan investigaciones astronómicas son las telecomunicaciones. Para identificar el origen de las telecomunicaciones en territorio mexicano es necesario revisar los registros del IFT (Instituto Federal de Comunicaciones), que es el organismo que regula el uso de telecomunicaciones a organismos civiles, de gobierno, privados, etc. De esta manera, el IFT asigna bandas a través de diarios oficiales y concesiones. De acuerdo al *Cuadro nacional de atribución de frecuencias (2017)*, las principales emisiones de radiocomunicaciones que puede observar Callisto en la banda de 45-225 MHz son:

- Radioaficionados(transmisión - recepción de señal (Tx-Rx))
- Radioastronomía(Rx)
- Radionavegación-Móvil para la aeronáutica(Tx-Rx)
- Radiodifusión (Tx)
- Investigación espacial (satélites, meteorología, radiolocalización) (Tx-Rx)
- Socorro y llamadas de emergencia (Tx-Rx)
- Uso privado (Tx-Rx)
- Televisión y radio comerciales (Tx-Rx)

Las diferentes emisiones mencionadas se distribuyen en el espectro de Callisto y se observan como bandas horizontales continuas o en forma de impulsos (ver Figura 1.3). Las transmisiones que no cumplen con estos diarios oficiales se consideran infractores de la ley y pueden llegar a ser sancionados (*Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión, 2014*).

En el espectro observado por Callisto (Figura 1.3), las radiotransmisiones ocupan bandas estrechas de unos 2 MHz o menos, se pueden observar entre 125 y 172 MHz. La principal banda de transmisiones comerciales se observa entre 90 y 110 MHz. En esta banda se localizan las señales de televisión y radio comerciales. Las señales que se presentan entre 185-220 MHz probablemente sean el 1er armónico de la señal proveniente de la banda de televisión y radio, debido al parecido de estas dos emisiones. Este fenómeno se ha reportado en monstein2015catalog

4.3. Identificación de ruido por fenómenos naturales

Las primeras emisiones detectadas en Callisto de origen natural fueron atribuidas a tormentas eléctricas, ver Figura 4.1. Estas emisiones se distinguen por ser pulsos muy

intensos que tienen duración de 1 s o menos y abarcan anchos de banda desde algunas decenas de MHz o incluso ocupando toda la banda de Callisto. Las emisiones de las tormentas eléctricas tienen diferentes duraciones e intensidades dependiendo de la duración y la lejanía de éstas. Para este estudio, las tormentas eléctricas se presentan como radiointerferencia ya que vuelven ininteligibles las señales de interés. Un ejemplo de esto es el evento del 17 de Agosto del 2017 que llenó de ruido las señales de MEXART y de Callisto como se presenta en la Figura 4.1.

4.3.1. Firmas de estallidos de radio solares

Desde febrero de 2015 y por varios meses subsecuentes no se detectó ningún evento debido a que el instrumento estaba en etapa de calibración. Fue hasta el 29 de septiembre que se identificó el primer estallido de radio solar. Por su morfología en el espectro, se consideró que se trata de un estallido de radio tipo III. Se puede observar que esta emisión se produce en las mismas frecuencias que en las que se emiten las señales comerciales (Figura 4.2).

En el transcurso de los meses posteriores, Callisto ha ido detectando este mismo tipo de emisiones intensas, presumiblemente de origen solar. Estas se han identificado, por su morfología en el espectro dinámico, como estallidos de radio tipo I, tipo II y tipo III, siendo estos últimos más frecuentes y además, más fáciles de detectar debido a que estos emiten en casi todas las frecuencias y con mayor intensidad (ver Figura 4.3). Los estallidos tipo II detectados presentan la notable deriva en frecuencias y en ocasiones el 1er armónico ver Figuras 4.3 y 6.4.

Estos eventos pueden ser una fuente de ruido para las observaciones de MEXART para detectar centelleo interplanetario ya que la emisión del evento puede presentarse en el transcurso de una radio fuente como se observa en la figura 4.4

4.3.2. Identificación de ruido artificial y natural en el sitio

Hay emisiones esporádicas que producen ruido o interferencia para el análisis de fenómenos astronómicos. Estas son producidas por aparatos electrónicos o redes de transmisión eléctricas, fallos en los componentes de la antena, fenómenos meteorológicos, etc. Para identificar el ruido del sitio con los datos de Callisto, se puede producir un espectro que se genera a partir de la intensidad de la señal integrada a lo largo del tiempo para cada frecuencia. Éste se muestra en la Figura 4.5. En Carrillo (2007) se realizó una gráfica similar y se observa que los dos espectros son similares para el ancho de banda que comparten que es de 90 a 190 MHz.

En las frecuencias cercanas a 100 MHz se emiten las señales de radio-televisión, se presenta un valle en las frecuencias de 120 MHz y se vuelven a mostrar señales en 180 MHz. En el caso de Callisto hay señales intermedias pero hay que considerar que los espectros tienen 13 años de diferencia por lo que el espectro radioeléctrico ha cambiado.

Hay un fenómeno recurrente, que aún no se ha podido explicar, que es el incremento en la intensidad de señales a frecuencias debajo de los 90 MHz. Este incremento en la

4. OBSERVACIONES DE SEÑALES DE RADIO ENTRE 45 Y 225 MHz

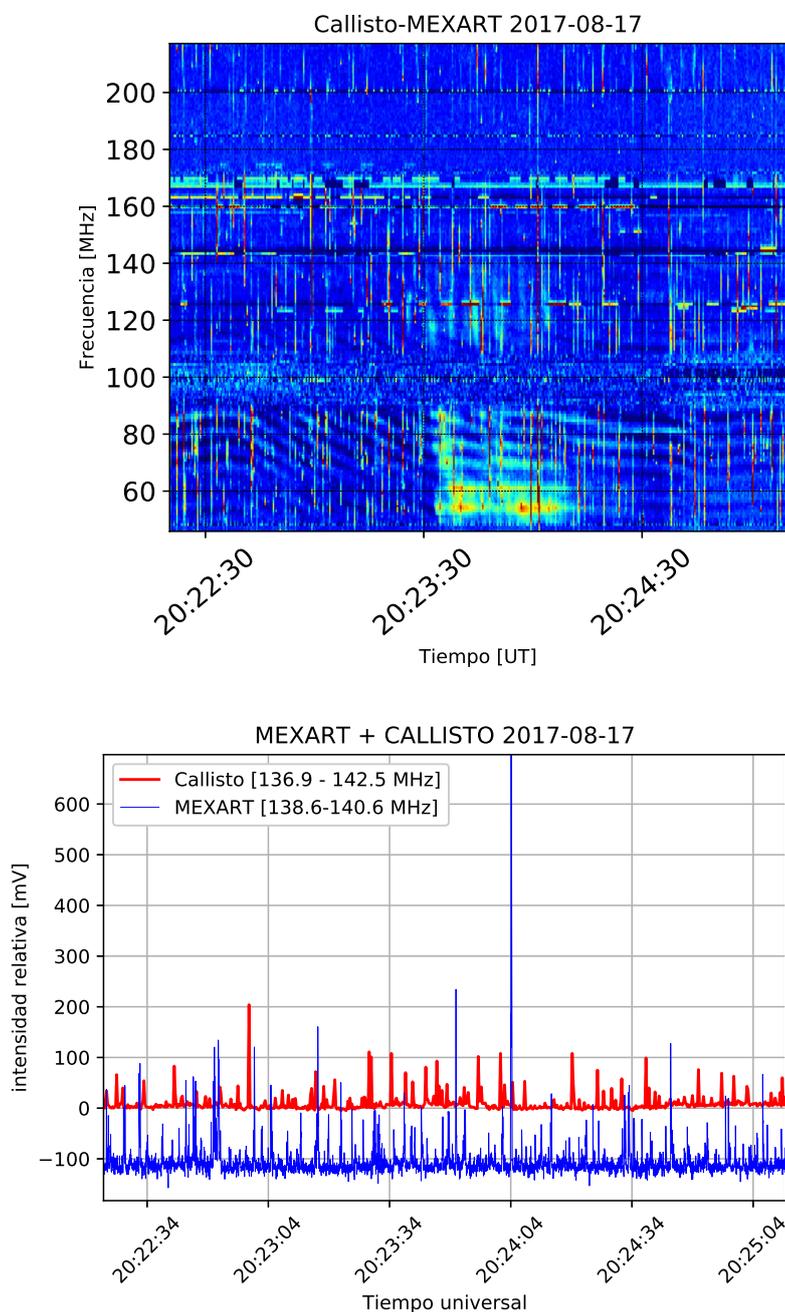


Figura 4.1: En este espectro de Callisto es detectado estallido de radio tipo III, entre las 20:23 y las 20:24, en el curso de una tormenta eléctrica. Al generar las curvas de luz correspondientes con Callisto y con MEXART, se puede observar que la tormenta eléctrica satura de ruido las curvas de luz y hace imperceptible el evento de radio. Al espectro se le extrajo el ruido promedio de cada frecuencia para apreciar mejor el estallido.

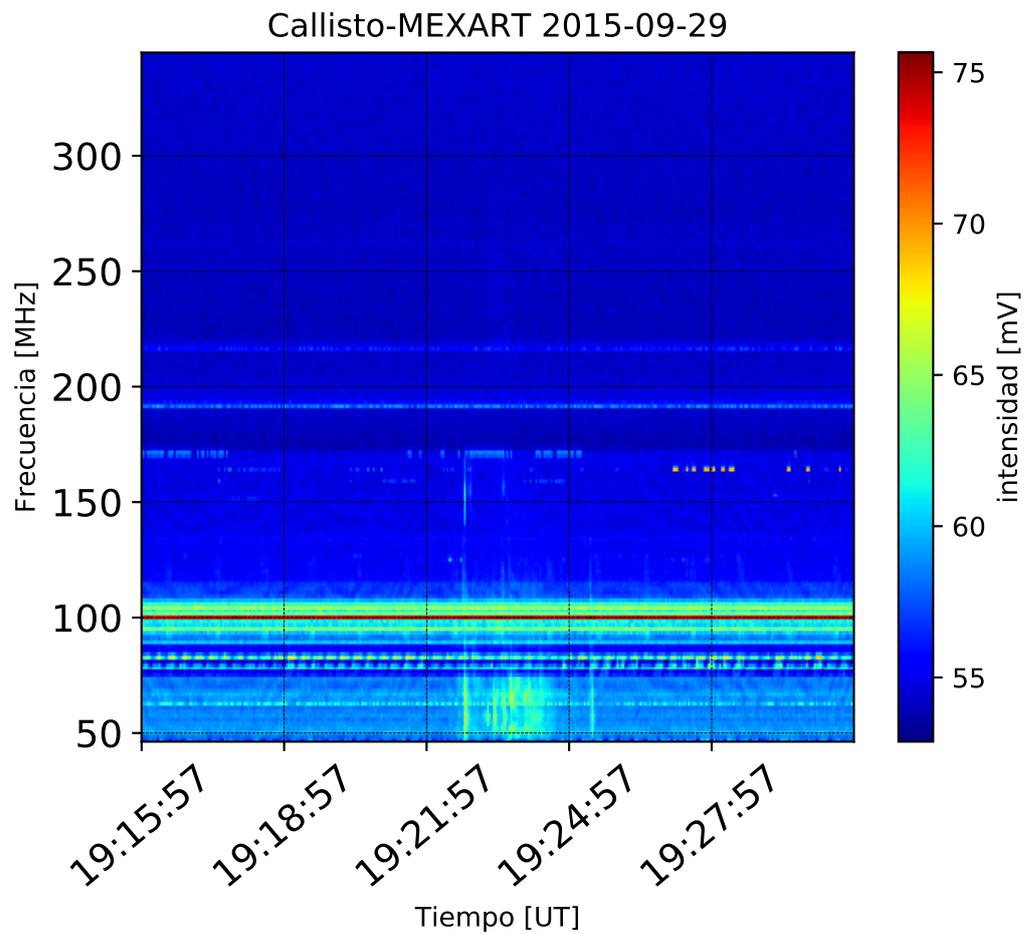


Figura 4.2: Primer evento de radio solar detectado por Callisto. Un estallido de radio solar tipo III, registrado entre las 19:22 y las 19:25 en las frecuencias entre 45 y 173 MHz.

4. OBSERVACIONES DE SEÑALES DE RADIO ENTRE 45 Y 225 MHz

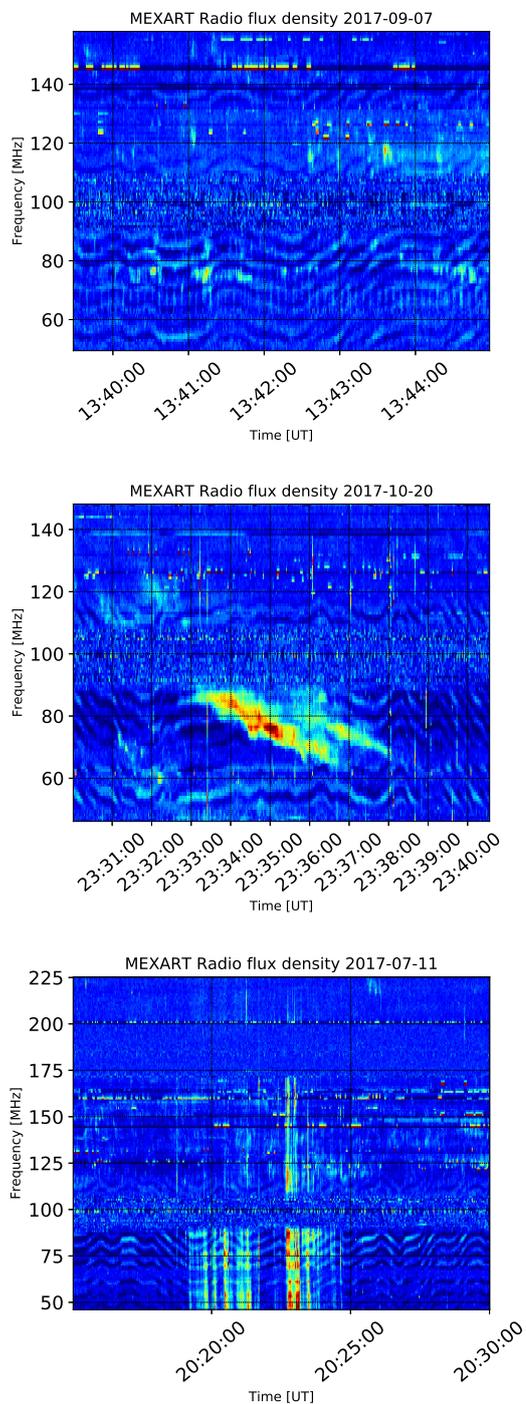


Figura 4.3: Un estallido tipo I detectado con Callisto, se muestra en la figura superior con manchas difusas en frecuencias alrededor de 120 MHz y de 80 MHz. El estallido de tipo II, detectado entre las 23:31 y las 23:38, se ve en el espectro como la mancha diagonal alrededor de 80 MHz. El evento tipo III de la figura inferior se ve como líneas verticales, el evento empieza alrededor de las 20:19 y termina a las 20:25. Se extrajo el ruido promedio de los espectros para apreciar mejor los eventos.

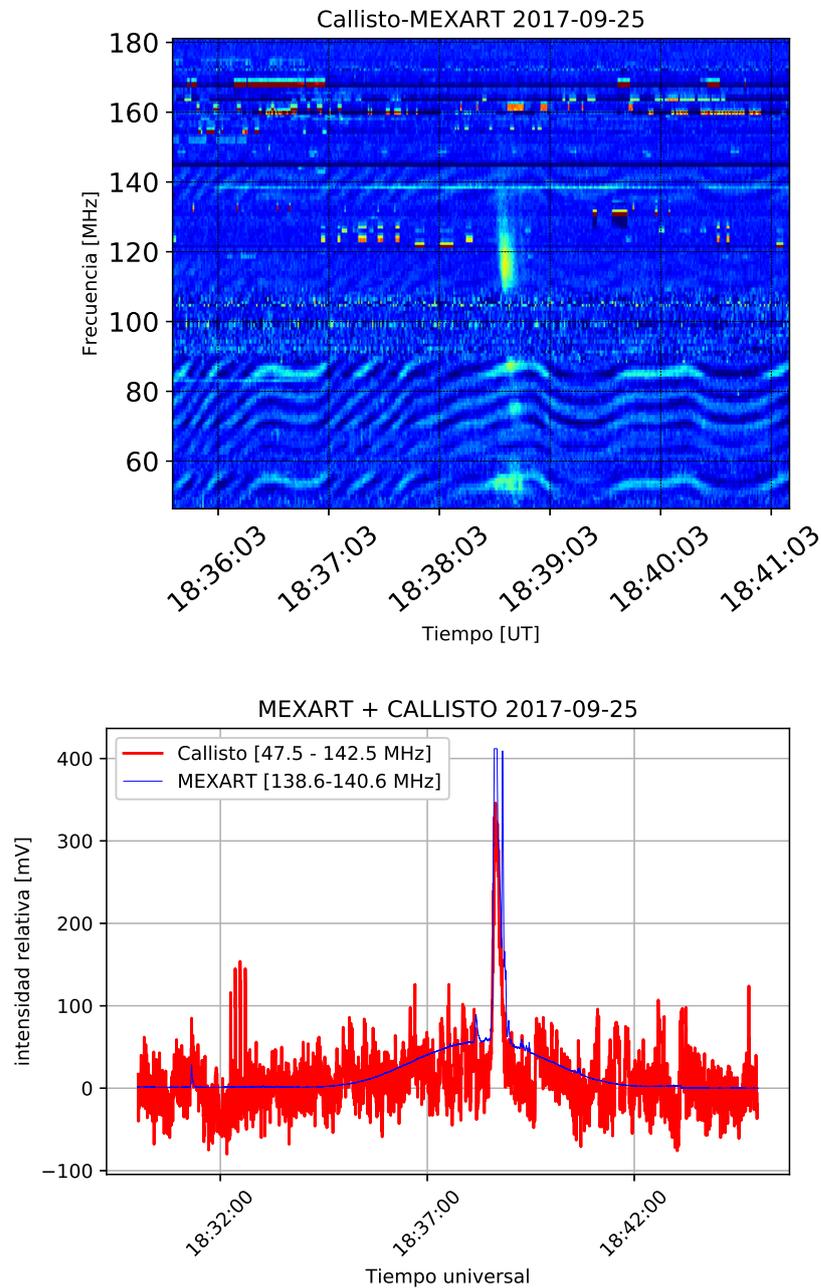


Figura 4.4: Un estallido de radio solar tipo III ocurrido el 25 de septiembre del 2017 a las 18:38, se produce en el momento en que MEXART está detectando una radiofuente. El tránsito de la radiofuente se observa en los datos de MEXART como un incremento gradual en la señal. Al espectro se le restó el ruido promedio de cada frecuencia para apreciar mejor el evento.

señal se observa en casi todos los espectros dinámicos de Callisto pero con distintas intensidades.

Otra emisión de ruido que imposibilita el análisis son las tormentas eléctricas. Estas se identifican como líneas verticales en el espectro dinámico, pueden tener duración de menos de un segundo, pero al estar repartidos en todo el espacio de frecuencia y tiempo, saturan el espectro, ver figura ???. Como se verá más adelante, este tipo de fenómenos imposibilita el análisis de señales de estallidos de radio solares.

Una fuente de radio que se presenta casi continuamente es el ruido tipo zebra, este tipo de emisión (ver en las figuras ??, 4.6, 4.7 y 4.8) se observa en el rango de 90-45 MHz. La emisión tipo zebra se identifica en el espectro dinámico como una serie de bandas paralelas y angostas de unos 3 MHz, pueden ocupar todas las frecuencias pero generalmente se encuentran en frecuencias menores a 90 MHz. Estas bandas oscilan continuamente hacia frecuencias altas y bajas con distintos ritmos a lo largo del tiempo y cambiando su intensidad. Forman un patrón referente a su nombre. Este tipo de señales son producidas por circuitos de iluminación cercanos a las instalaciones del observatorio y concuerdan con las emisiones observados en el catálogo de espectros dinámicos realizado por [Monstein \(2015\)](#). Junto a estas, también se encuentran emisiones que se han identificado como emisiones generadas por televisores o instalaciones de iluminación cercanos al receptor Callisto. Hasta el día de hoy, estas interferencias han sido reducidas o eliminadas a excepción del ruido tipo zebra.

4.3.3. Observaciones adicionales

En la tabla se muestran algunos espectros dinámicos de Callisto donde hay señales representativas cuyos orígenes no están bien identificados. Estas señales también afectan la identificación de estallidos de radio solares. Algunos de estos ejemplos se presentan en las figuras 4.6, 4.7 y 4.8.

Los primeros dos espectros (figura 4.6) resaltan de los demás por presentar mayor intensidad en el espectro. La saturación en la señal se debe a que, en el periodo de agosto-septiembre, se cambió la antena de Callisto. En lugar de la antena LPDA se conectó una línea del MEXART para observar el tránsito del Sol mientras ocurría el eclipse del 21 de agosto. Como una línea de MEXART tiene mayor ganancia que la antena LPDA usada por Callisto, se incrementa la intensidad de la señal y se produce un espectro más saturado.

Lo peculiar de estos espectros son las señales que contienen. En el primer espectro se observan discontinuidades en la intensidad de la señal entre 150 y 140 MHz. Dicha señal podría deberse a una saturación del receptor. Este fenómeno también se presenta en señales de MEXART en donde se alcanza la saturación y en consecuencia, se registran valores menores a los de la saturación como se ve en la Figura 5.5. Otra señal no identificada son las curvas de emisión con deriva en frecuencias que se presenta en los primeros dos espectros. Este tipo de emisión ha sido comparado con diversas señales incluyendo estallidos de radio solares pero no presentan relación alguna.

En el segundo espectro de la Figura 4.7 se presenta un ensanchamiento de una banda

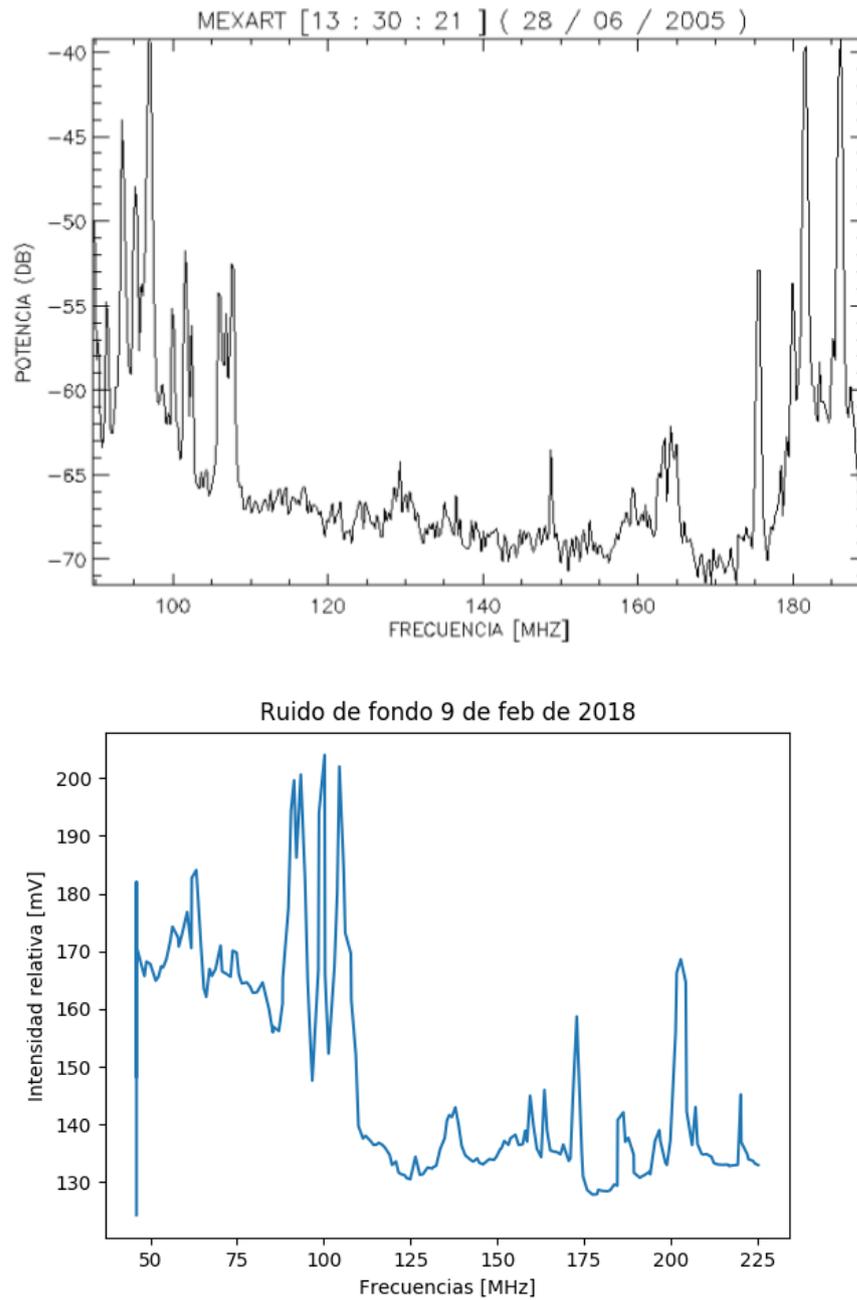


Figura 4.5: La gráfica superior muestra la cantidad de ruido que se podía detectar con MEXART usando un analizador de espectros en 2015 (obtenido de Carrillo (2007)). En la gráfica inferior se integra la señal de Callisto del día 9 de febrero de 2018 a lo largo del 2 horas y media.

4. OBSERVACIONES DE SEÑALES DE RADIO ENTRE 45 Y 225 MHz

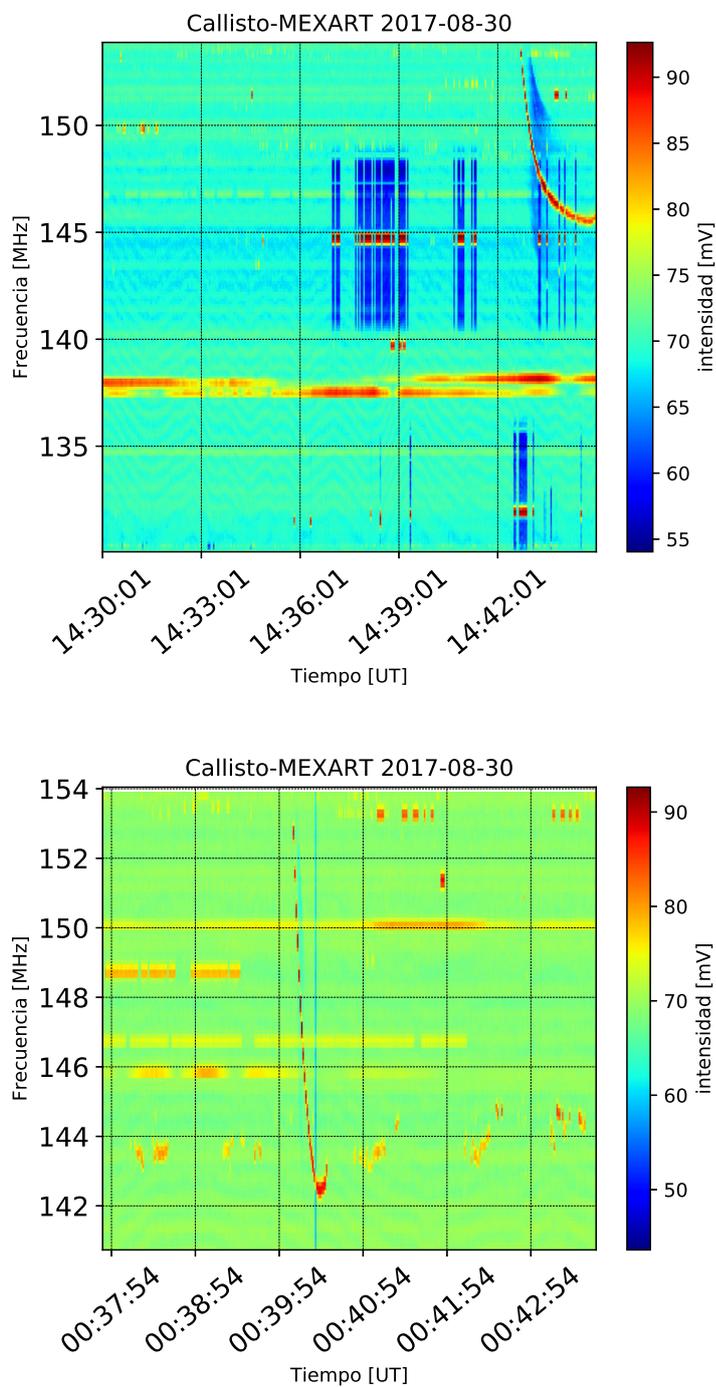


Figura 4.6: Radiointerferencias en Callisto que se presentaron durante la saturación de la señal debido al cambio de la antena.

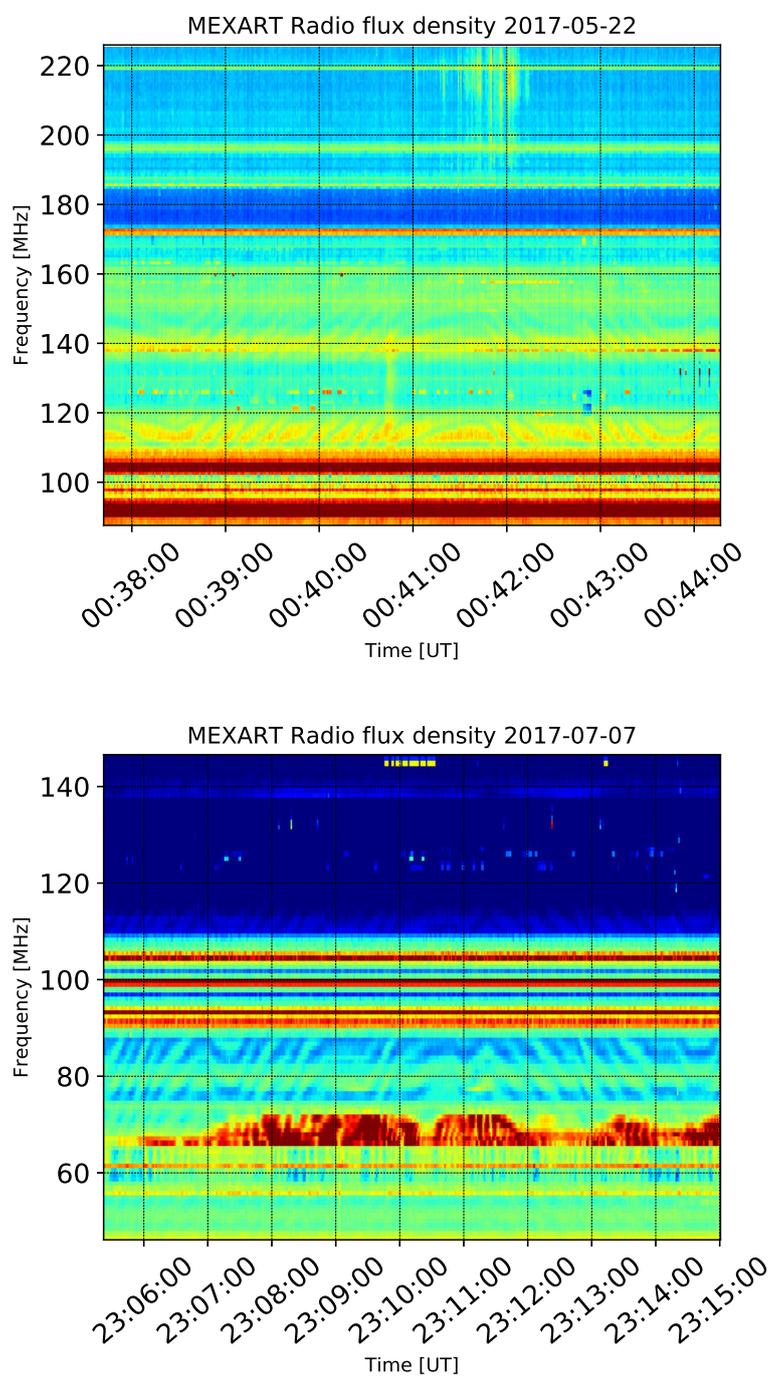


Figura 4.7: Se presentaron radiointerferencias en Callisto con origen desconocido. En el espectro superior se produce un ruido tenue parecido al de las tormentas eléctricas. En el espectro inferior se produce una emisión alrededor de los 70 MHz que cambia de ancho de banda.

de emisión de 3-9 MHz. Al estar cerca de las emisiones de radio-televisión podría indicar un mal funcionamiento de la antena emisora. En el primer espectro de la misma figura se observan estrías finas orientadas verticalmente y esparcidas por todo el espectro. Esto afecta al análisis del evento detectado en el mismo espectro metiendo ruido a la señal ya que generan un ruido similar al de las tormentas eléctricas.

En los últimos dos espectros (Figura 4.8) se presentan pulsaciones con una periodicidad de 1 minuto y abarcan todas las frecuencias. Esta emisión se producía con una balastra de lámparas led usadas cerca del receptor de Callisto. Este tipo de emisión coincide con el catálogo de emisiones detectadas por Monstein (Monstein, 2015). Para finalizar, frecuentemente se detectan emisiones similares a estallidos de radio tipo III. Se descartó que fueran estallidos de radio debido a que otras estaciones de la red e-Callisto no detectaron las firmas de radio. Por otro lado, en los estallidos tipo III hay una ligera deriva a pesar de que la emisión parece totalmente vertical. Usando las herramientas graficadoras para visualizar los espectros, no se encontró una deriva en estas emisiones verticales. Comparando con el catálogo de Monstein, se identifica esta emisión con el chispazo causado por un tren eléctrico. En este caso, la emisión podría ser producida por una maquina soldadora o una descarga eléctrica generada en algún sistema de transmisión de corriente cercano a la antena.

4.4. Resumen

En este capítulo se identificaron las diferentes radio emisiones que se observan con Callisto: Radiocomunicaciones, emisiones de televisión y radio comerciales, emisiones generados por sistemas de corrientes eléctricas, dispositivos electrónicos, variaciones de la señal por configuraciones en la antena y algunas emisiones de origen desconocido. Adicionalmente se identificaron estallidos de radio solares tipo I, II y III. Se descartaron las emisiones similares pero que no concuerdan con las características de un estallido. Se identificó el ruido provocado por tormentas eléctricas y la interferencia que generan éstas en las señales de Callisto y MEXART.

Para mostrar que las emisiones detectadas son estallidos de radio solares, se puede hacer una correlación de las señales con otros instrumentos de radio que tengan una gran separación geográfica de MEXART y Callisto. Un estallido de radio solar tiene la capacidad de emitir su señal sobre toda la superficie terrestre del lado día. De esta manera, identificar estos eventos en otros espectros, con la morfología de un estallido, en las mismos tiempos y a las mismas frecuencias, demostraría que la emisión proviene de un estallido de radio solar. La validación de los eventos con los criterios mencionados se realizará en el siguiente capítulo.

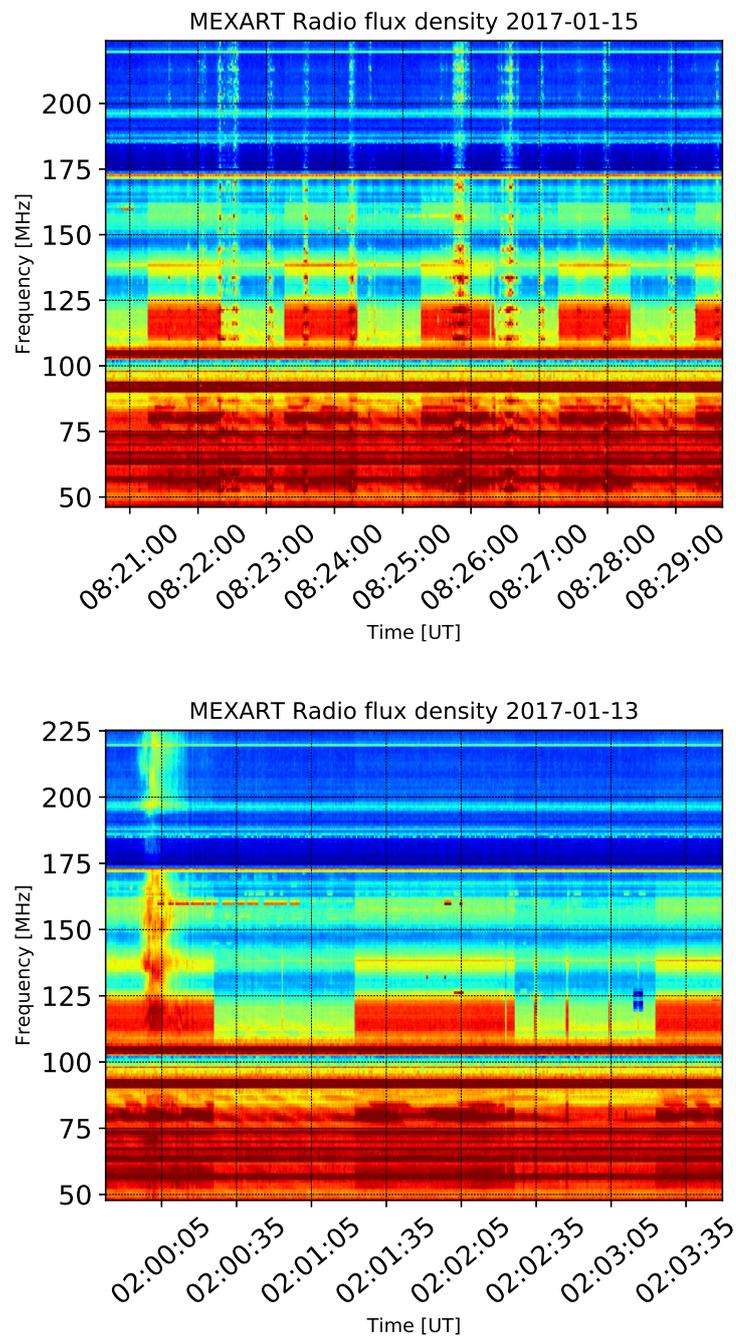


Figura 4.8: Estas radiointerferencias adquieren una morfología similar a los estallidos tipo III. Su carencia de deriva los identifica como emisiones de origen artificial.

Validación de Eventos con Instrumentos Internacionales

5.1. Introducción

Cuando se detecta por primera vez la presunta radioemisión de un cuerpo astronómico con un instrumento nuevo, es necesario verificar el evento usando otros medios. Esto puede ser usando otras técnicas de observación, una corroboración en los datos o comparando la señal con otros instrumentos en donde se tiene verificada la señal. Para validar los eventos de Callisto se puede usar la detección de MEXART, esto al menos, para corroborar que la señal proviene de una emisión externa y no del mal funcionamiento de Callisto. Los datos también pueden corroborarse con los datos de la red e-Callisto. Con la señal corroborada con la red e-Callisto ahora podrían revisarse otros instrumentos del LANCE para poder asumir que estas emisiones provienen de eventos eruptivos ocurridos en el Sol.

5.2. Validación con otras estaciones de la red e-Callisto

Para hacer la correlación de los eventos es necesario identificar la emisión exactamente a la misma hora y en el mismo intervalo de frecuencias. Este criterio simplifica la revisión de datos en las estaciones Callisto ya que no todos los radiospectrógrafos operan en las mismas bandas y los eventos solo se detectan cuando la estación se encuentra de lado día.

5.2.1. Validación de evento tipo III

Se compararon las señales del primer evento registrado, del 29 de septiembre de 2015 y se encontró la misma señal en el espectro generado por dos estaciones estadounidense,

la de Alaska y la de Roswell con mayor intensidad (Figura 5.1). El radioespectrógrafo de Roswell tiene un ancho de banda de 20-90 MHz, esto le permite detectar el evento a menores frecuencias que Callisto, pero como se puede apreciar, la emisión coincide en las frecuencias y tiempos correspondientes.

5.2.2. Validación de eventos tipo II

En la detección de estallidos tipo II se usa el mismo método, la emisión tiene que corresponder en los mismos tiempos y en el mismo rango de frecuencias. En este caso, la emisión detectada por Callisto coincidió con otras 10 estaciones y se escogió la de Birr Castle de Irlanda (figura 5.2). Una vez más, esta estación opera con un radioespectrógrafo a frecuencias más bajas y con mayor intensidad en este ancho de banda. Sin embargo, las emisiones son prácticamente idénticas.

5.2.3. Validación de evento tipo I

En el periodo de tiempo que ha operado Callisto, solo se ha identificado un estallido de radio tipo I. Este tipo de eventos son más difíciles de identificar porque tienen una señal menos intensa, el que se detectó fue el 7 de septiembre de 2017, ver figura 5.3. Este evento tuvo una duración de casi 10 horas, estuvo acompañado de varios estallidos tipo III, al menos 15 de ellos fueron detectados por Callisto. La tormenta de ruido fue detectada por otras 14 estaciones de la red e-Callisto pero la estación alterna usada para validar este evento fue una vez más Birr Castle.

5.2.4. Validación del resto de los eventos con e-Callisto

Ahora que se sabe que se pueden identificar los mismos eventos con la red e-Callisto, se han ido revisando todos los espectros de Callisto semanalmente. Cuando se identifica un supuesto estallido de radio solar, este se compara con la red e-Callisto. Se siguen estrictamente los criterios mencionados para validar los eventos con nuestro radioespectrógrafo:

- Se necesita identificar la morfología de un estallido en el espectro de Callisto.
- Se debe detectar la deriva para estallidos, sobre todo en los estallidos tipo III, donde es menos evidente.
- Se debe hacer la correlación del evento al menos con una estación alterna de la red e-Callisto.

Si no se cumple con el criterio de correlación con la red e-Callisto, identificar la morfología de un estallido de radio solar se considera suficiente para este trabajo. De no cumplir con ninguno de los criterios, el supuesto evento se descarta como tal.

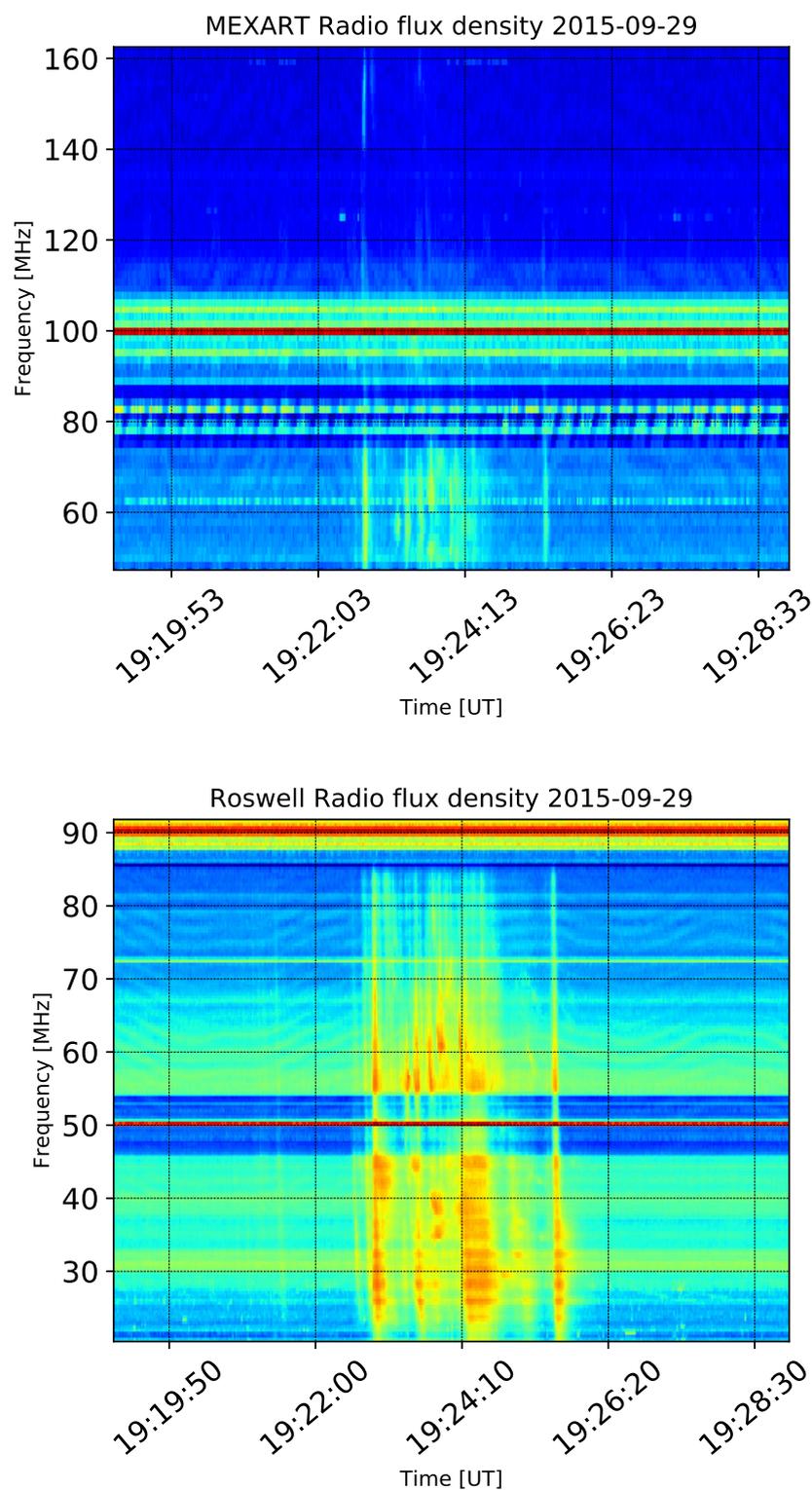


Figura 5.1: Validación del primer evento de radio detectado por Callisto con la estación Roswell. El registro del evento en los dos espectro aparece en los mismos tiempos y en las mismas frecuencias pero con diferentes intensidades.

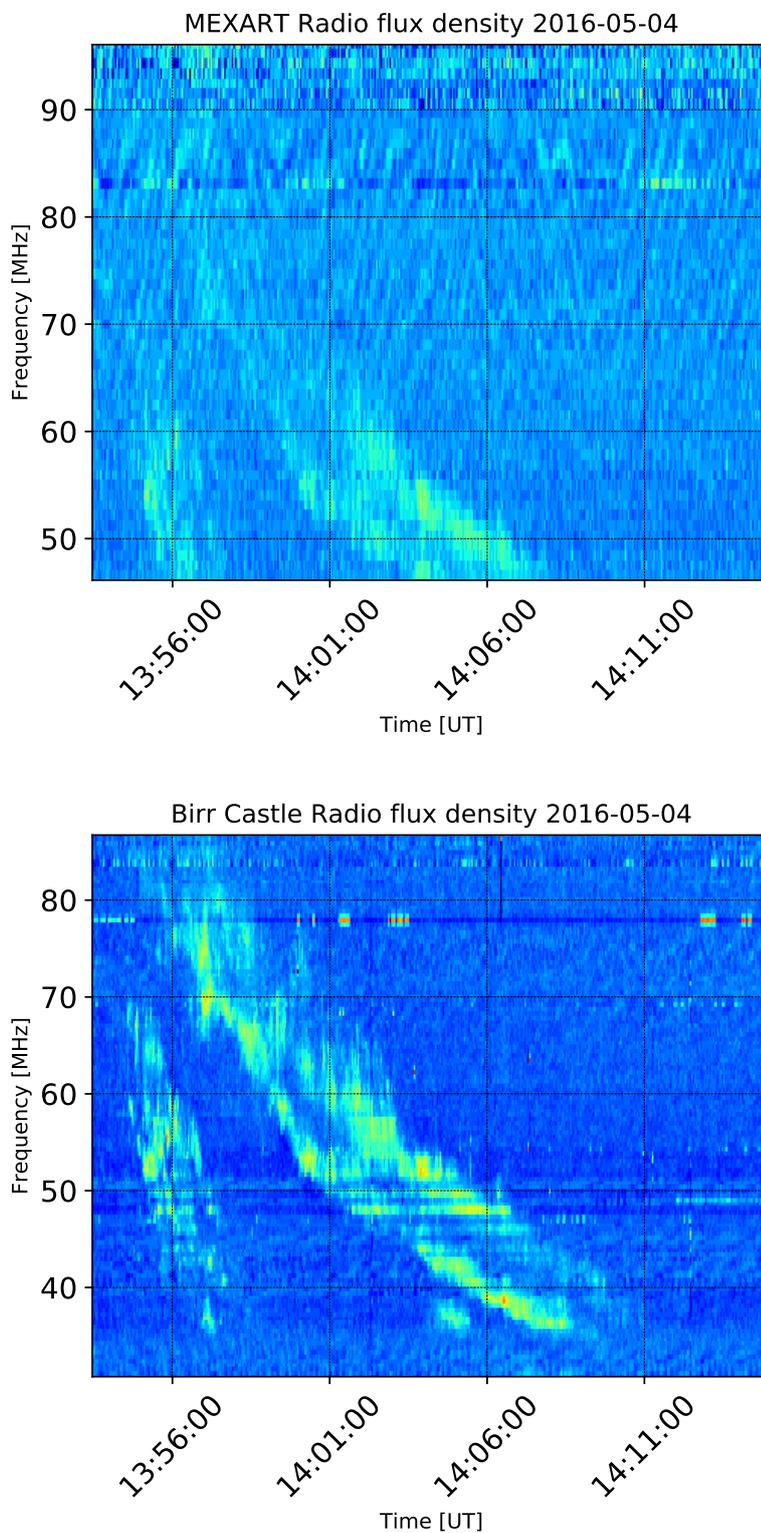


Figura 5.2: Comparación de eventos tipo II entre Callisto y Birr Castle. En las dos estaciones se puede observar la deriva del estallido tipo II en los mismos rangos de tiempo y de frecuencias.

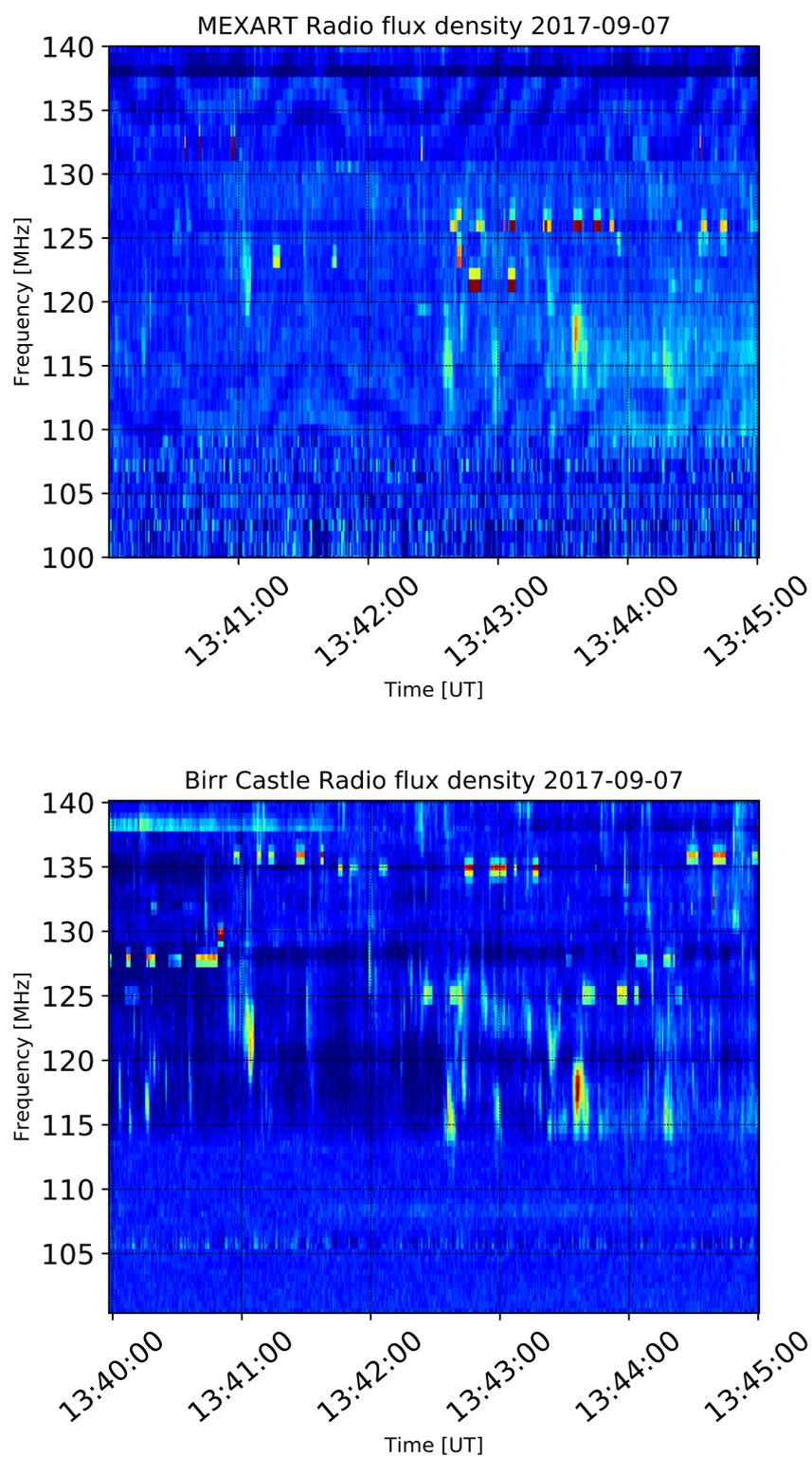


Figura 5.3: Comparación de señales de Callisto y Birr Castle detectando una tormenta de ruido de origen solar.

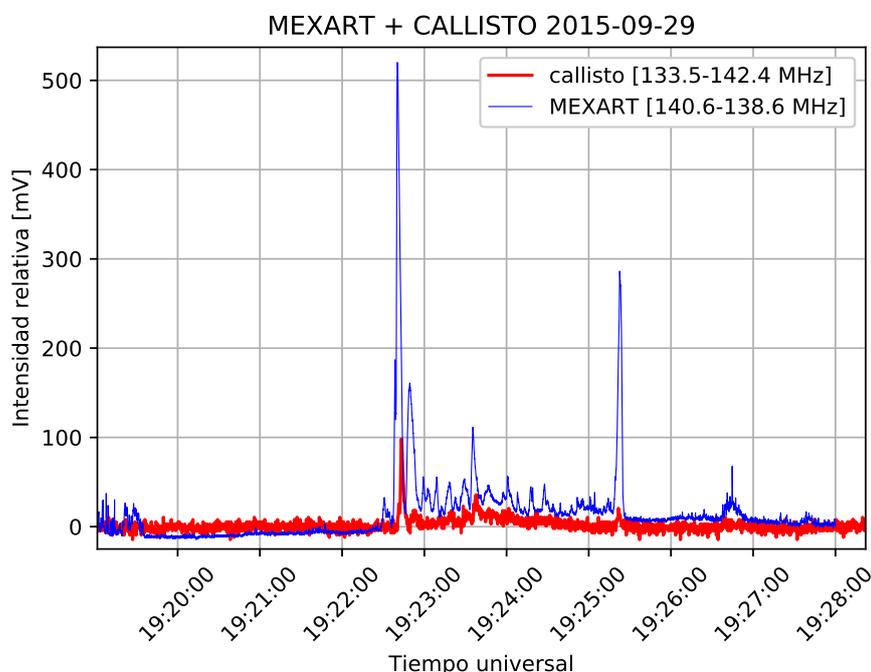


Figura 5.4: Esta curva de luz hecha con los datos de MEXART y de Callisto, en su banda de 133.5-142.4 MHz, nos muestra que MEXART también detectó el primer evento detectado por Callisto.

5.3. Validación de eventos detectados en MEXART

Con la primera validación hecha, ahora se pueden identificar los eventos y validarlos con los datos de MEXART. La primera identificación realizada fue del primer evento detectado por Callisto por lo que se graficaron los datos de los dos instrumentos. Para esta tarea se usó, inicialmente, el ancho de banda de Callisto correspondiente a la que detecta MEXART (138.65-140.65 MHz). La menor ganancia y menor resolución en tiempo de Callisto hacen que la curva de luz de esta banda correspondiente al estallido de radio se vea con poca resolución. Por otro lado, como se ve en el espectro de Callisto de la Figura 5.1), la emisión del estallido es muy leve en la banda que se desea observar en comparación a la banda de 45-80MHz. Para resolver esto, se integraron un par de canales más, la banda óptima de comparación fue de 133.5-142.4 MHz. Se hizo la gráfica de las curvas de luz de los dos instrumentos y se encontró una correlación en el tiempo de inicio y final del evento así como en la correspondencia de los picos del evento (ver Figura 5.4).

Como se observa en las curvas de luz, MEXART tiene mayor sensibilidad para detectar emisiones de radio, esto es más contrastante cuando se compara el ruido de la

señal y las Relaciones Señal a Ruido (RSR) de ambas curvas de luz. La RSR de una señal se obtiene con la razón entre el valor máximo correspondiente a una señal y el valor cuadrático medio o desviación estándar de la siguiente manera:

$$RSR = \frac{max}{\sigma} \quad (5.1)$$

donde max representa el valor máximo de la señal y σ es la desviación estándar. A su vez σ se calcula como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (5.2)$$

donde x_i corresponde a los valores de las curvas de luz donde se considera que la señal es puro ruido, por esto, a σ también se le llama simplemente *ruido*. N corresponde al número de valores tomados para calcular el valor de σ . Para calcular σ se necesitan tomar valores que vienen antes o después de la señal que se desea analizar. Con este periodo de *ruido* se considera que la señal de interés se suma a la del ruido y es RSR veces más fuerte que σ .

Para el evento del 29 de septiembre del 2015 se calcularon estos valores con los datos de MEXART, el ruido para esta observación fue de 0.02 y con una RSR de 629.08. El periodo de los datos usados para calcular σ fue de las horas 19:20 y 19:22. Como se puede observar en la Figura 5.4, este periodo, anterior al evento de radio, donde se detecta solamente el ruido de fondo por la antena. En el caso de Callisto, su ruido fue de 2.68 y una RSR de 14.56. De esta manera, mostramos que MEXART tiene mayor ganancia para detectar el mismo evento. Se fueron comparando curvas de luz de los dos instrumentos y se calcularon las RSR para cada caso en los datos de Callisto y en los de MEXART.

Un ejemplo destacable en la detección de los dos instrumentos es el evento del 7 de septiembre del 2017 a las 18:41 UTC, donde se produjo un evento tan intenso que llegó a saturar la señal de MEXART como se ve en la Figura 5.5

El siguiente evento analizado fue el del evento del 25 de septiembre del 2017 (ver espectro de Figura 4.4), pero se encontró que Callisto no detectó el evento en la banda inicialmente propuesta (ver Figura 5.6)

Para poder verificar eventos detectados con MEXART, se hizo una curva de luz del espectro de Callisto. Se tomaron las frecuencias que sí fueron detectadas en el espectrógrafo. Para este caso, se integraron las bandas de 45-142 MHz como se observa en la Figura 4.4. Con este cambio de banda, se puede observar el pico en la señal de Callisto que coincide con la emisión detectada por MEXART. Esto valida el evento en MEXART.

Con estos criterios se buscó la detección de eventos en los datos de MEXART. Se encontraron eventos con Callisto que no fueron detectados por MEXART. Un ejemplo de esto es el evento del 2 de Abril del 2017. En este evento se produjo un estallido de radio tipo III, el evento fue verificado con la red e-Callisto. Como se puede observar,

5. VALIDACIÓN DE EVENTOS CON INSTRUMENTOS INTERNACIONALES

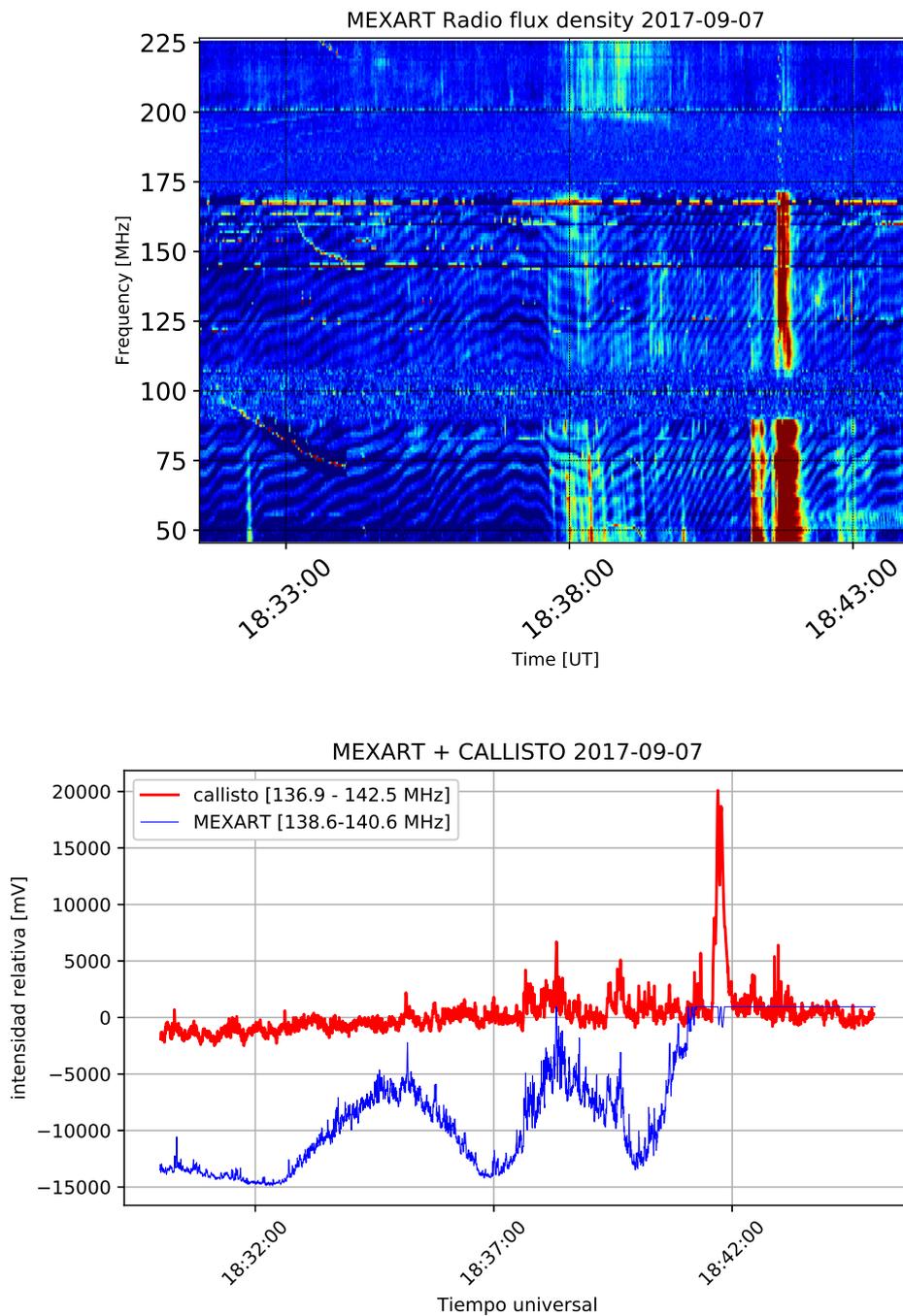


Figura 5.5: Este estallido de radio tipo III, con emisión máxima a las 18:41, llegó a ser tan intenso que saturó la señal de MEXART y generó radiointerferencias en todas las frecuencias.

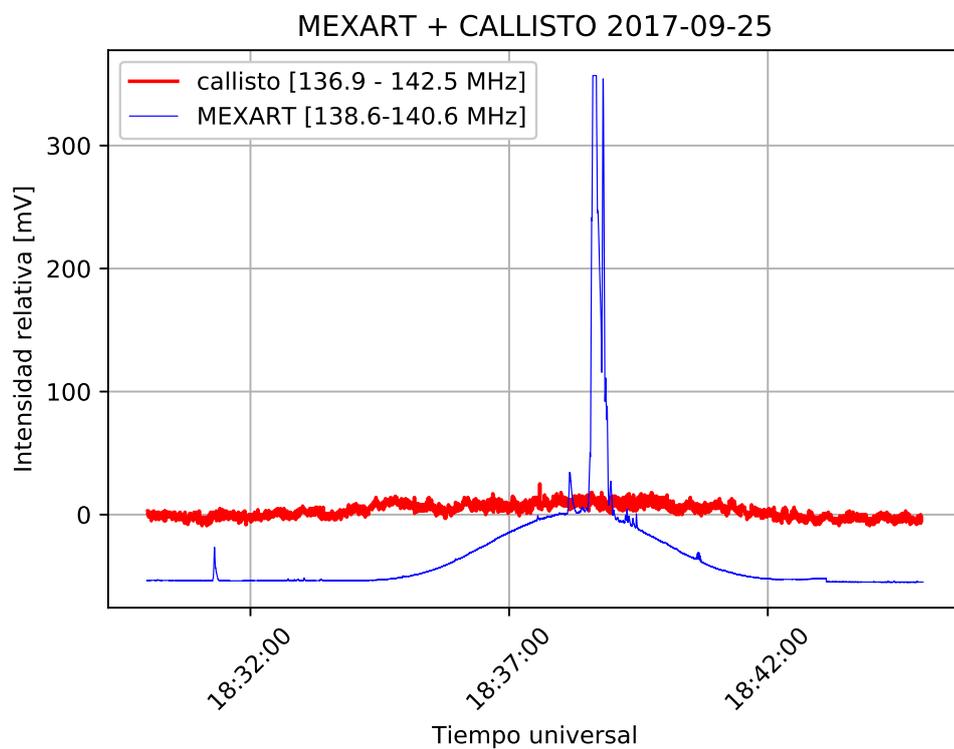


Figura 5.6: Se hizo la comparación de curvas de luz de Callisto y MEXART para el estallido tipo III de las 18:38. La curva de luz de Callisto se hizo a partir del ancho de banda en que observa MEXART. Callisto no detectó este evento en la banda mencionada, pero el evento, efectivamente, fue detectado por otras bandas de Callisto como se observa en la Figura 4.4.

la emisión también se produce en el espectro de Callisto a 140 MHz, que es la banda correspondiente a MEXART. Sin embargo no hay señal del evento en los datos de MEXART (ver Figura 5.7). Posteriormente se constató con uno de los encargados del instrumento que el radiotelescopio no se encontraba observando en las horas en que ocurrió el evento.

Otro ejemplo de un evento detectado por Callisto pero que no es detectado por MEXART, pero en el que este si estaba operando, es el del 17 de agosto de 2017 (Figura 5.8). Este emisión corresponde a un estallido de tipo III, la emisión es detectada con Callisto y en su espectro se identifica la emisión a 140 MHz. Sin embargo, MEXART no lo detectó, en su lugar, solo se observa una señal ruidosa.

Para poder conocer la capacidad de MEXART para la detección de estallidos de radio solares, se necesitan estudiar las características de observación del radiotelescopio en el momento en que ocurren los estallidos de radio, usando como referencia a Callisto. Con este propósito, en la siguiente sección se estudiará la configuración del MEXART en el momento de detectar eventos de radio.

5.4. Propiedades del MEXART

5.4.1. Análisis de directividad

La primera hipótesis planteada fue que la detección de estallidos por parte de MEXART depende solamente de la directividad del instrumento. Es decir, MEXART solo detectaría los estallidos solo si el instrumento apunta con su haz principal o uno de sus haces secundarios en dirección del Sol o una dirección cercana a éste. Para esta tarea se revisaron las bitácoras del MEXART, donde se obtuvieron las direcciones que estaba apuntando el haz del MEXART en los momentos en que se presentaron estallidos de radio solares. Se muestra en la Figura 5.9 una gráfica de una proyección del cielo, en coordenadas horizontales, mostrando las posiciones de los haces en los momentos de los eventos.

Además se calculó la posición del Sol en el cielo del observatorio de MEXART en el momento en que ocurrieron los eventos de radio. Se tomaron en cuenta todos los eventos detectados por Callisto, sin importar si fueron detectados por MEXART o no. Se hizo una gráfica usando el sistema de coordenadas horizontales.

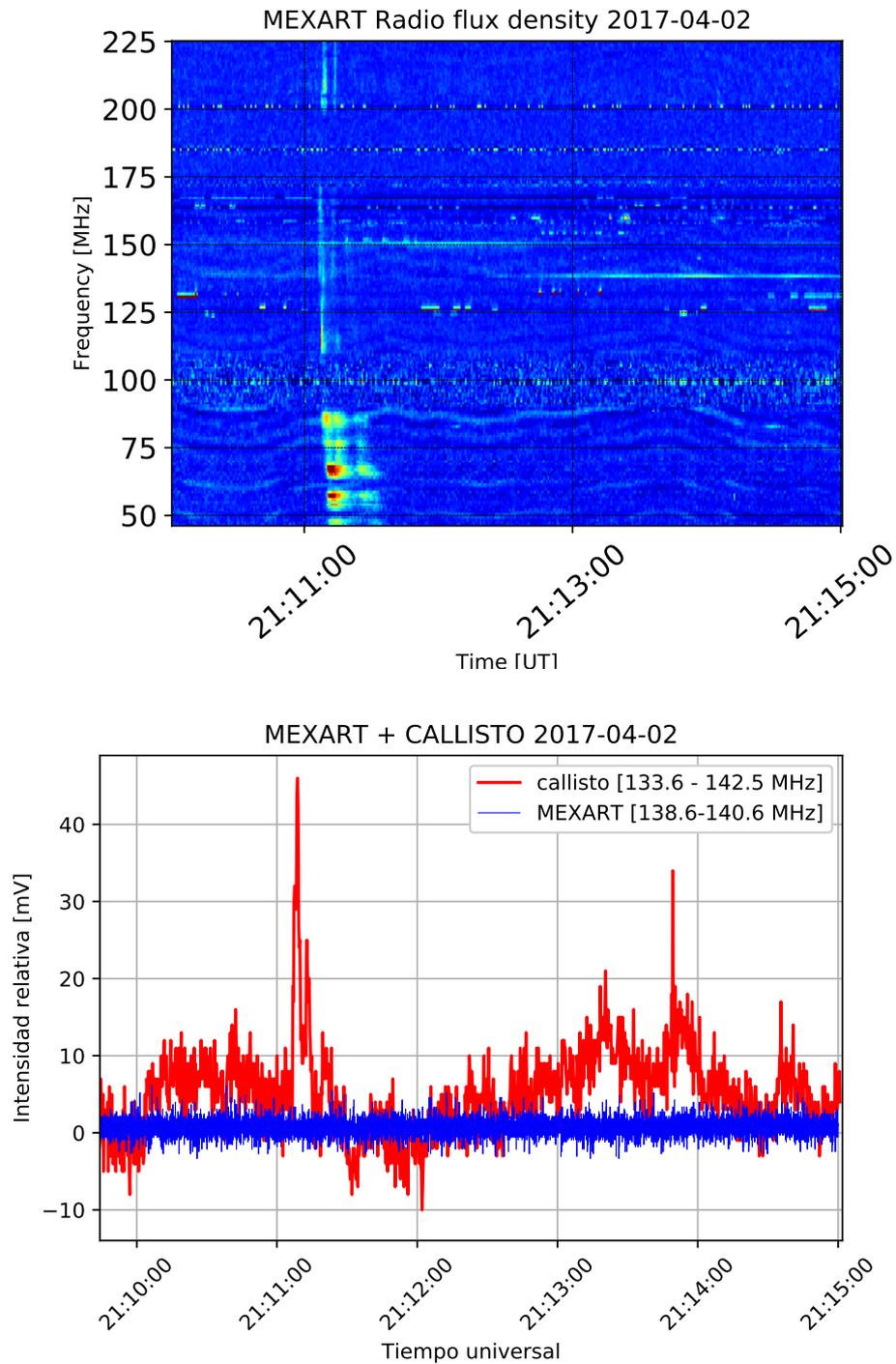


Figura 5.7: En este caso, se produce un estallido tipo III a 140 MHz. La bitácora de MEXART indica que el instrumento usaba uno de los haces durante la emisión. De acuerdo al personal del MEXART, el receptor no estaba operando en el momento del evento.

5. VALIDACIÓN DE EVENTOS CON INSTRUMENTOS INTERNACIONALES

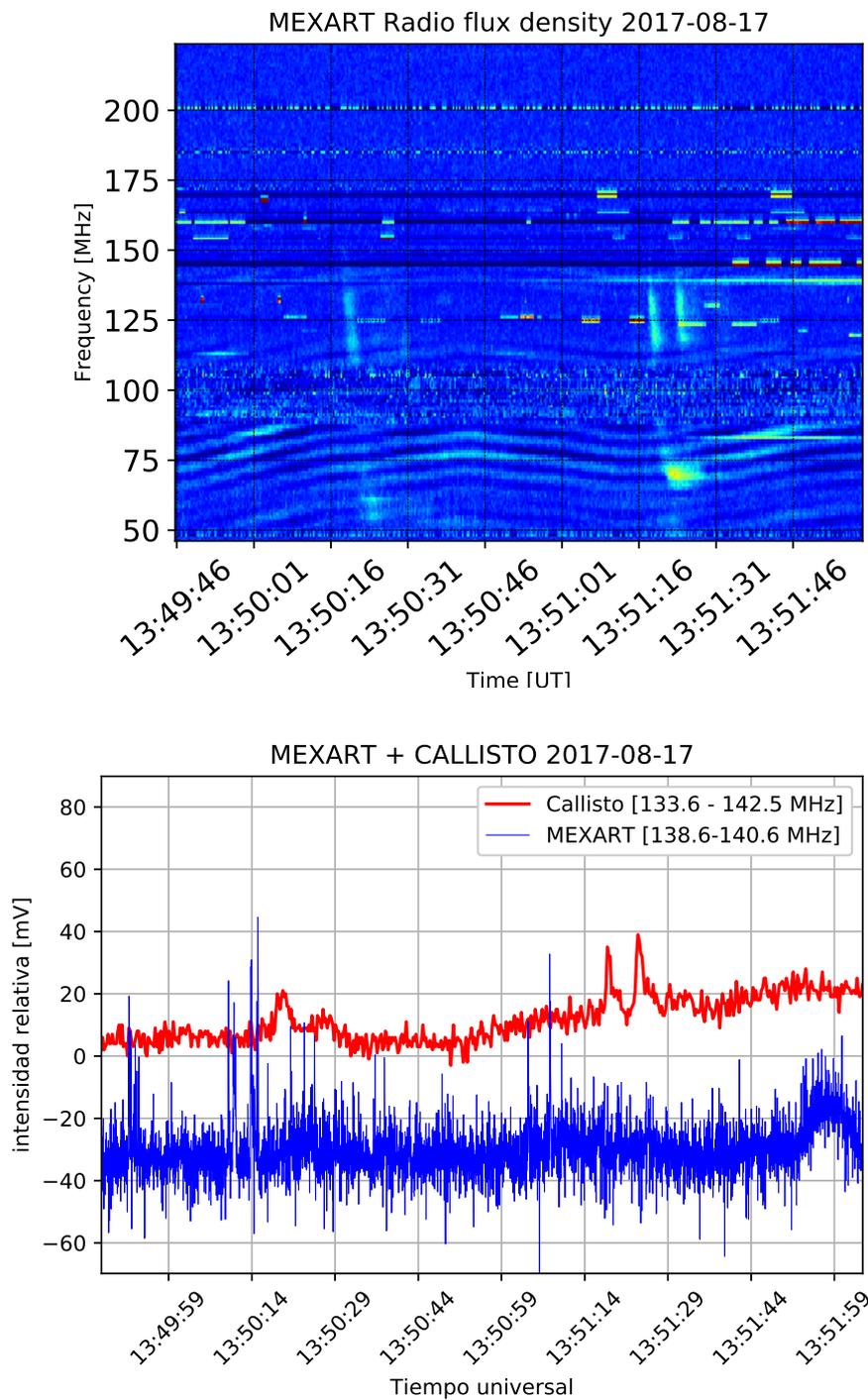


Figura 5.8: En este otro ejemplo, Callisto detecta tres estallidos de radio tipo III a 140 MHz pero MEXART no los detecta.

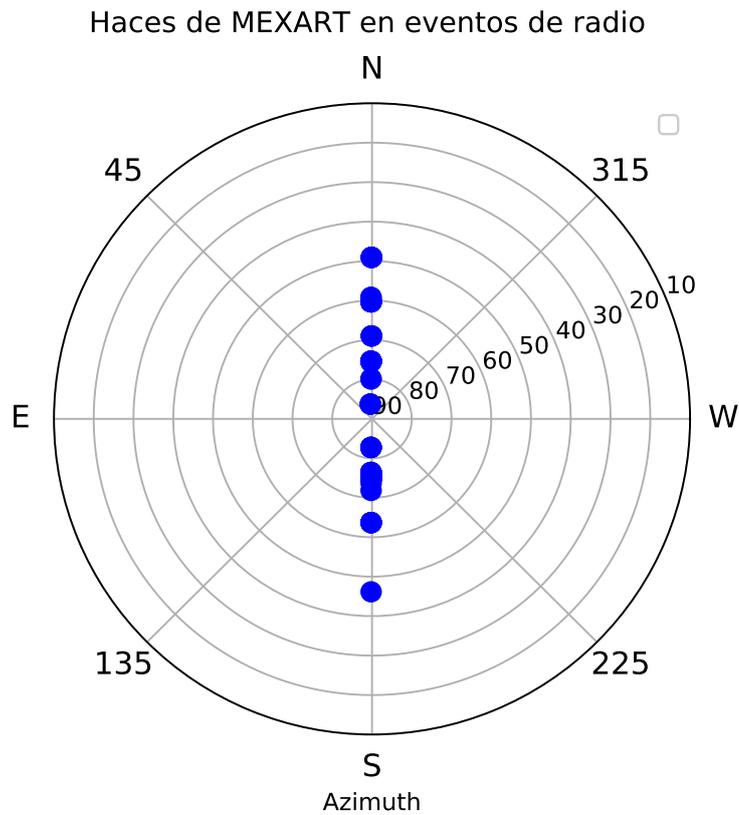


Figura 5.9: En esta gráfica, de coordenadas astronómicas horizontales, se muestra la posición de los haces reales usados por MEXART, de acuerdo a la bitácora, para observar radiofuentes. Estos haces siempre se encuentran en la posición del meridiano local.

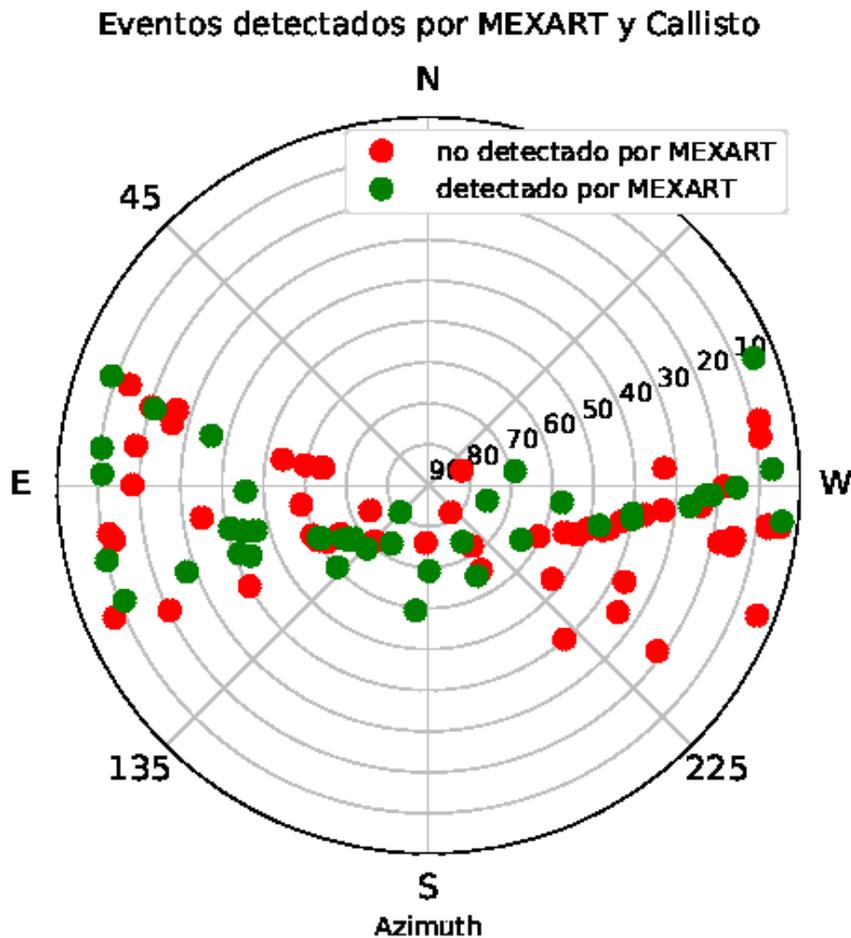


Figura 5.10: Esta gráfica polar es una proyección del cielo observado desde el observatorio de MEXART. Se muestra con puntos la posición del Sol en los momentos en que ocurrieron eventos de radio. Se aprecia que estas forman una franja de puntos que atraviesa la gráfica. Esto se debe a la trayectoria del Sol, la cual va cambiando a lo largo del año.

Desde un inicio se esperaba que MEXART solo detectara eventos cuando el Sol se encontrara cerca del meridiano local. Sin embargo, se observa que la capacidad de detección no depende de la hora del día. Contrario a lo esperado, MEXART detecta algunos eventos cuando éstos están cerca del horizonte y, en contraste, no detecta otros cuando éstos están cerca del zenit.

Una posible explicación de este comportamiento es la separación angular entre la posición del Sol y la posición del haz en la que está apuntando la antena. Esto determinaría la intensidad detectada, la relación entre intensidad y separación angular se presenta en la Figura 5.11. Para realizar este análisis se tomaron en cuenta los estallidos tipo III detectados por Callisto. No se tomaron en cuenta estallidos tipo II porque, en

algunos casos, la deriva en frecuencias de la emisión que se presenta en estos eventos no permite que se produzca emisión a 140 MHz. Además, en los casos en que si se presenta, la señal no es tan distinguible del ruido de fondo. Se discriminaron los casos en donde no se pudieron obtener la directividad de MEXART. No se puede determinar la directividad de MEXART en el caso en que la bitácora no indica la dirección o se usa un haz con una dirección no establecida. Esto último ocurre debido al problema de directividad que tiene la antena, discutido en la Sección 3.3.2.

La gráfica de la Figura 5.11 nos enseña que, al parecer, la intensidad del evento no está determinada por la separación angular entre la posición del Sol y la dirección del haz, de acuerdo a la bitácora, de MEXART. En esta misma gráfica se indicaron los eventos no detectados por MEXART con el valor de 0. Se esperaba que los eventos con intensidad 0 tuvieran una separación angular muy amplia, indicando que el Sol se encontraba muy apartado de la dirección del haz imposibilitando su detección. Sin embargo, los eventos con intensidad 0 se ven esparcidos y sin tendencia sobre la separación angular.

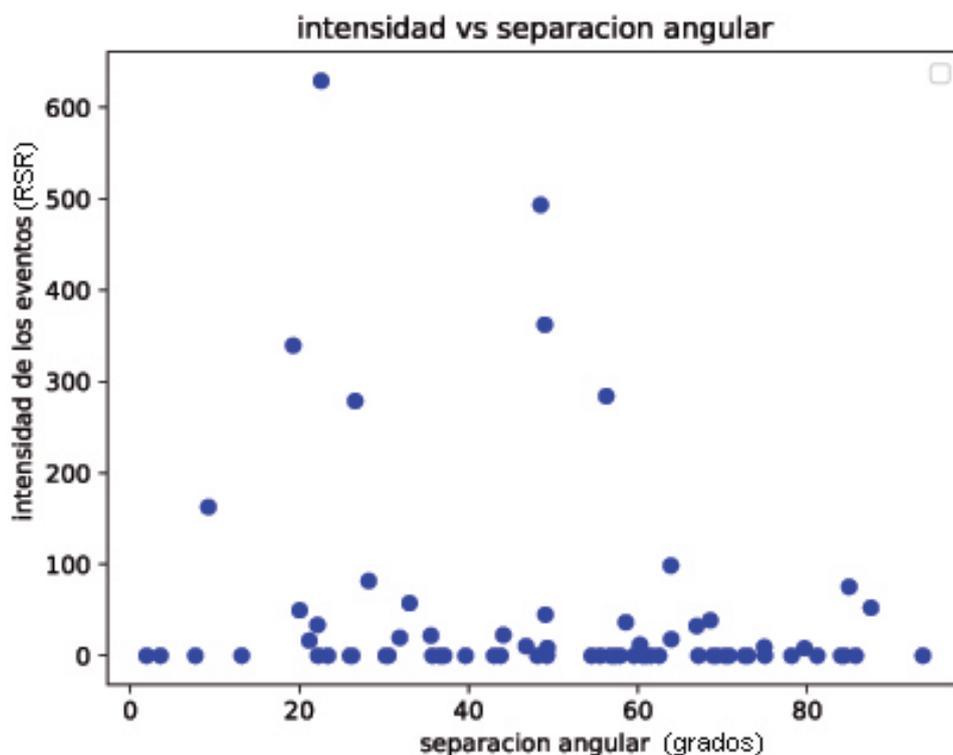


Figura 5.11: En los 28 eventos detectados por el MEXART, no se observa una relación entre la intensidad y la separación angular del sol y el haz usado de MEXART. En 44 casos, MEXART no detectó estallidos de radio solares. Para estos casos se tomó la RSR como 0.

5. VALIDACIÓN DE EVENTOS CON INSTRUMENTOS INTERNACIONALES

Podemos usar los datos de Callisto como referencia para la gráfica discutida anteriormente si tomamos en cuenta que el patrón de antena de radiospectrógrafo es omnidireccional en comparación a MEXART y también considerando que Callisto nunca cambia su patrón de antena ni cambia su configuración. Por lo tanto, se hizo el mismo tipo de gráfica que la anterior pero ahora con los datos de Callisto. En este caso, se gráfica la separación angular entre la posición del Sol y el zenit, que es la dirección del máximo de la ganancia del patrón de antena de Callisto. Además, se tomaron los valores de RSR registradas por Callisto a 140 MHz. La gráfica generada presenta una tendencia lineal que se acerca a lo esperado.

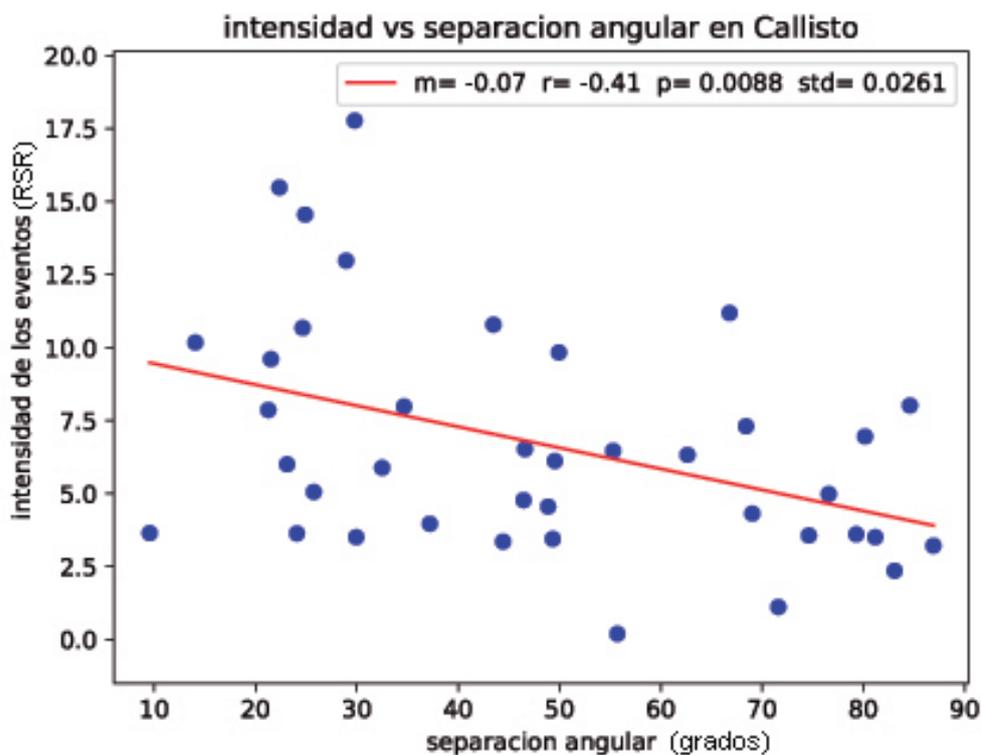


Figura 5.12: Al graficar la intensidad de los eventos en RSR detectada por Callisto contra la separación angular de la posición del Sol y el zenit, se muestra una anticorrelación lineal con valor de r . La pendiente se indica por m , la desviación estándar por std y el valor p es la probabilidad de la hipótesis nula. Los valores se encuentran dentro de lo esperado. Esto nos confirma que entre mayor separación angular existe entre la posición del emisor y la dirección con que apunta el instrumento, menor es la intensidad detectada de la emisión.

Para completar este análisis, lo ideal sería poder detectar eventos que emiten el mismo flujo de radio pero con el Sol en distintas posiciones en el cielo. Midiendo la

RSR, en estos casos, se podría determinar claramente la relación entre la emisión de los eventos y la posición del Sol en el momento del evento. Dado que no se pueden tener eventos idénticos, con el Sol en distintas posiciones del cielo, se usó una aproximación de la siguiente manera:

Suponiendo que en Callisto sí influye la separación angular para determinar la RSR detectada, se separaron en grupos las RSR de los eventos detectadas por Callisto. En cada grupo se pusieron los eventos con RSR parecidas, de esta manera, asumimos que en cada grupo, la RSR del evento es casi la misma. La nueva hipótesis es que en los eventos de cada grupo sí hay una tendencia entre la separación angular y la RSR de los mismos eventos, detectados por MEXART. La clasificación de los grupos se hizo de manera arbitraria de acuerdo a la Tabla 5.1.

Grupo	RSR en Callisto
Grupo1	12 <
Grupo2	12-9
Grupo3	9-7
Grupo4	7-5
Grupo5	< 5

Tabla 5.1: Tabla de grupos de eventos. Cada grupo tiene un rango de RSR de los eventos detectados con Callisto, estos grupos de eventos se usaron como referencia para clasificar los mismos eventos detectados por MEXART.

A partir de cada grupo se hizo la misma comparación que antes, se relacionó la separación angular entre la posición del sol y la dirección en que apuntaba MEXART. Los resultados se muestran en las siguientes gráficas. Sin embargo, una vez más, no se encuentra una correlación entre la separación angular y la RSR de los eventos.

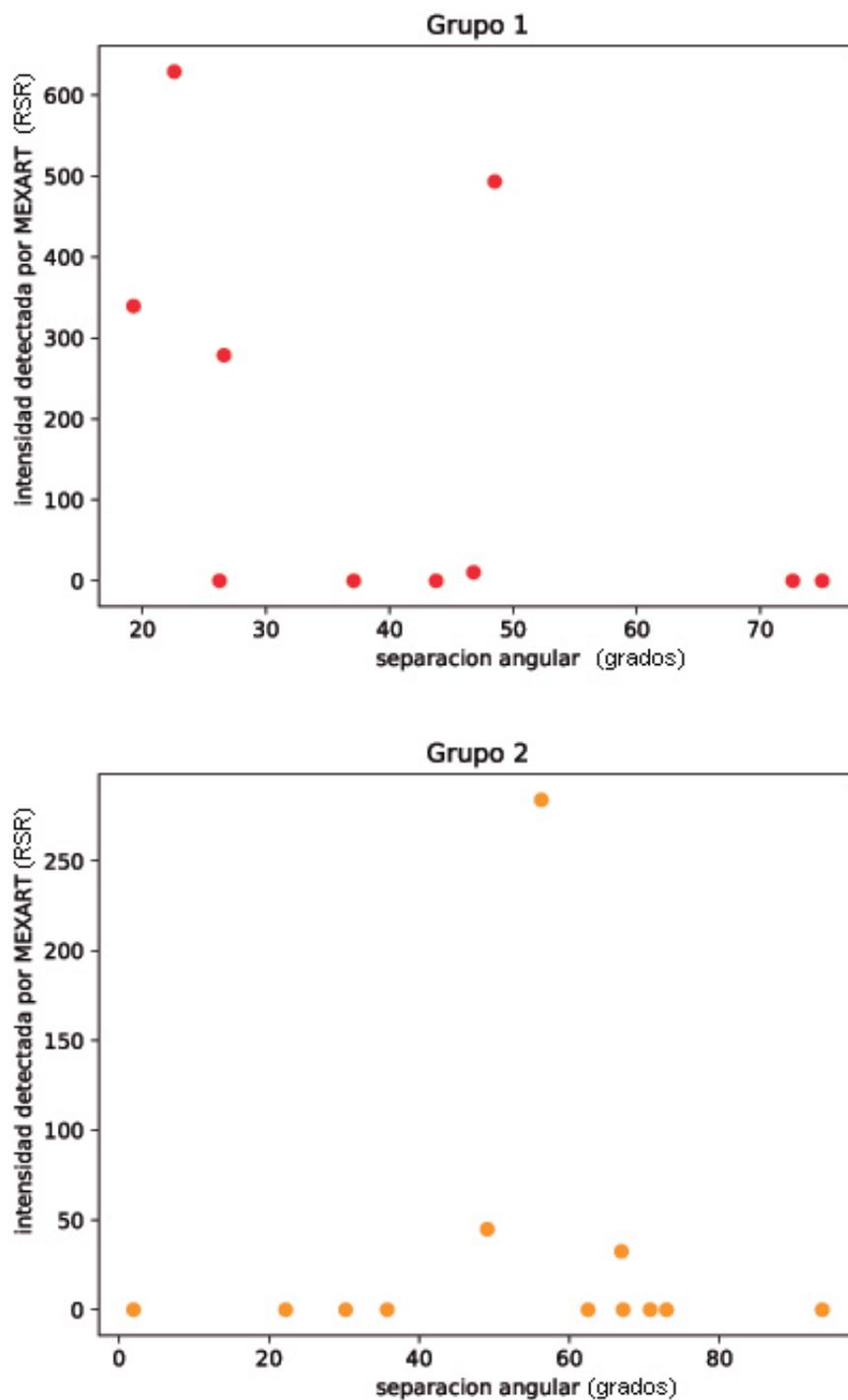


Figura 5.13: No se puede apreciar relación entre la separación angular y la intensidad de los eventos detectados con MEXART aún cuando fueron clasificados por su RSR.

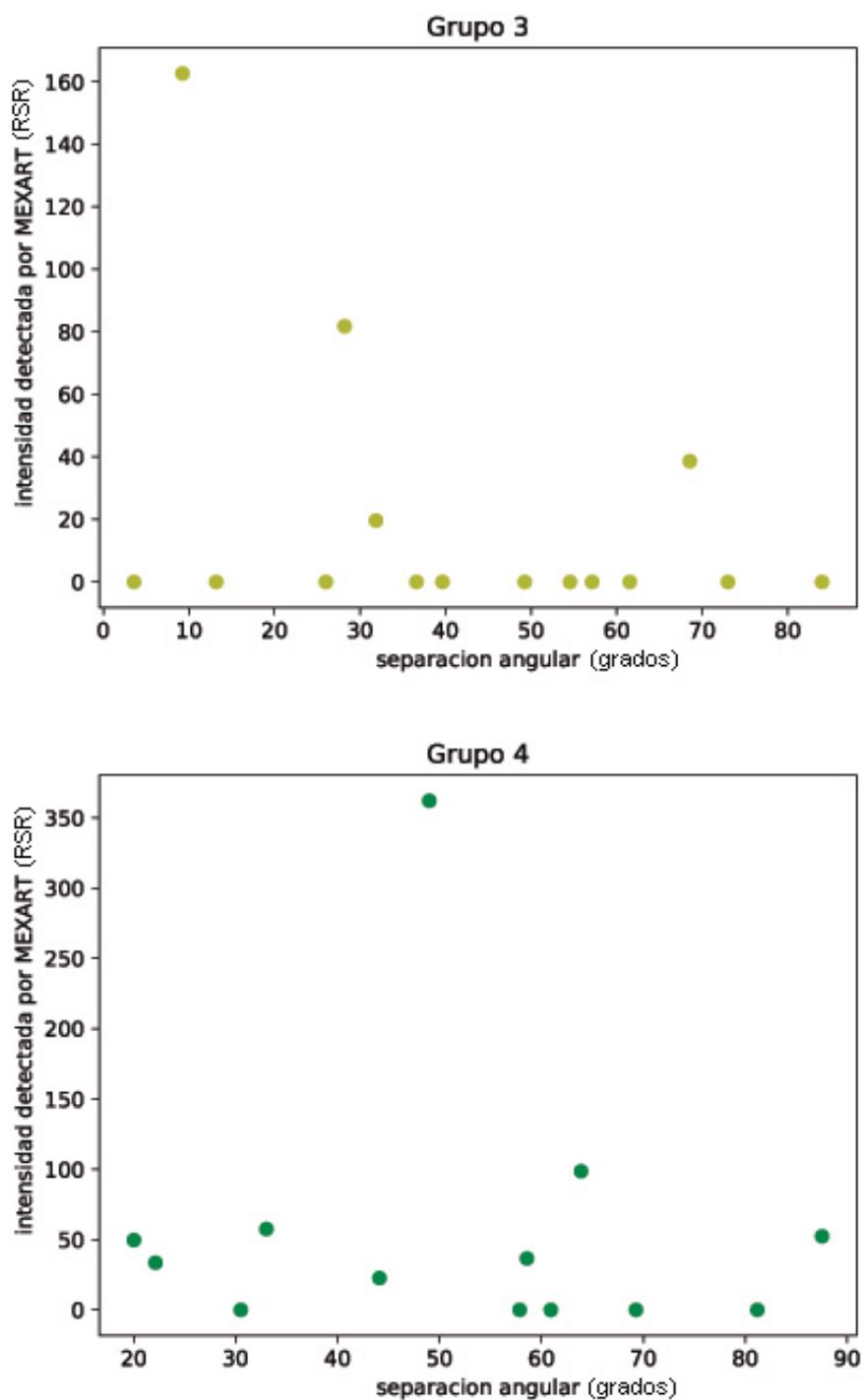


Figura 5.14: No se puede apreciar relación entre la separación angular y la intensidad de los eventos detectados con MEXART aún cuando fueron clasificados por su RSR.

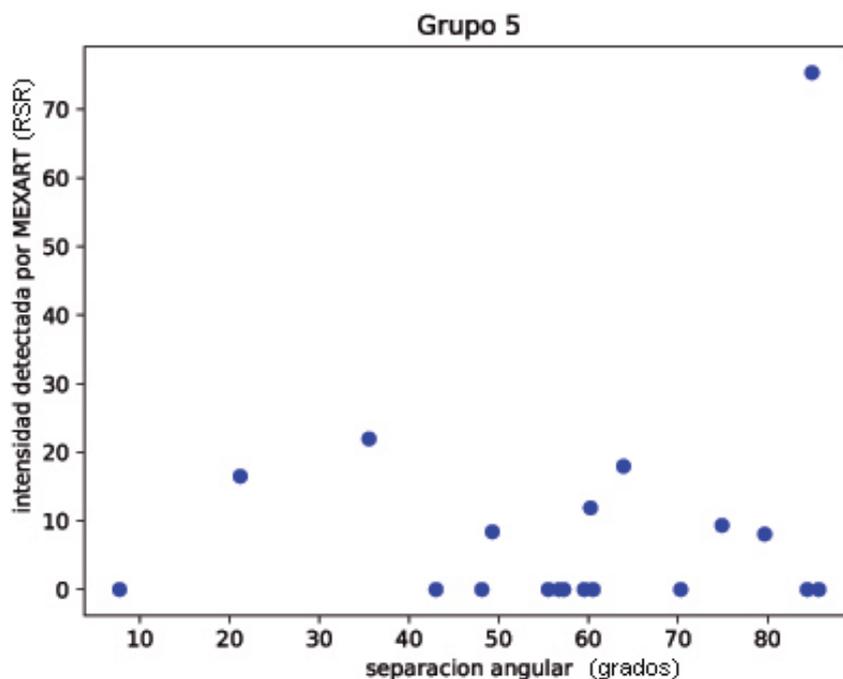
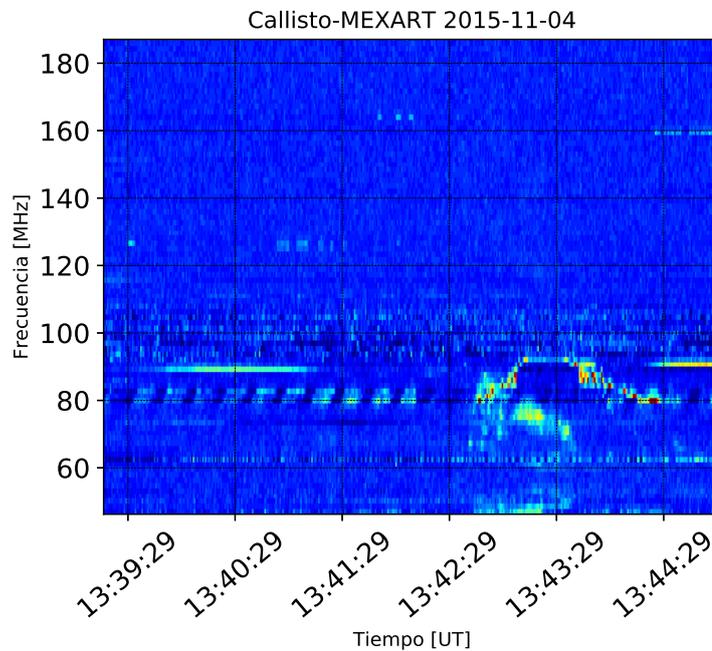


Figura 5.15: No se puede apreciar relación entre la separación angular y la intensidad de los eventos detectados con MEXART aún cuando fueron clasificados por su RSR.

5.5. Propiedades de eventos de radio registrados

Los eventos detectados con Callisto también se han podido corroborar con los eventos eruptivos captados por satélites que se usan como monitoreo del CE demostrando que Callisto es un indicador de eventos eruptivos. Algunos ejemplos de estos satélites son SDO, SOHO y GOES. Un evento corroborado es el del 4 de noviembre del 2015, que fue un estallido de radio tipo II detectado por Callisto. La SWPC (Space Weather Prediction Center) emitió una alerta del evento (Center, 2018). Además, el evento fue asociado a un evento eruptivo ocurrido en el Sol, del cual se detectó una fulguración de clase M con el satélite GOES (Möller, 2018) (ver Figura 5.16).

Otro caso donde Callisto ha servido para detectar eventos de CE es el del 20 de octubre de 2017. En este día se produjo un estallido de radio tipo II. El evento corroborado con las alertas de la SWPC fue relacionado con una EMC. La EMC fue captada con el instrumento LASCO C2 del satélite SOHO, un par de horas después de haber sido detectado por Callisto (Figura 5.17). En el coronógrafo se aprecia la EMC expandiéndose por el lado sureste del Sol.



Space Weather Message Code: ALTPP2
 Serial Number: 1031
 Issue Time: 2015 Nov 04 1410 UTC

ALERT: Type II Radio Emission
 Begin Time: 2015 Nov 04 1343 UTC
 Estimated Velocity: 955 km/s
www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation
 Description: Type II emissions occur in association

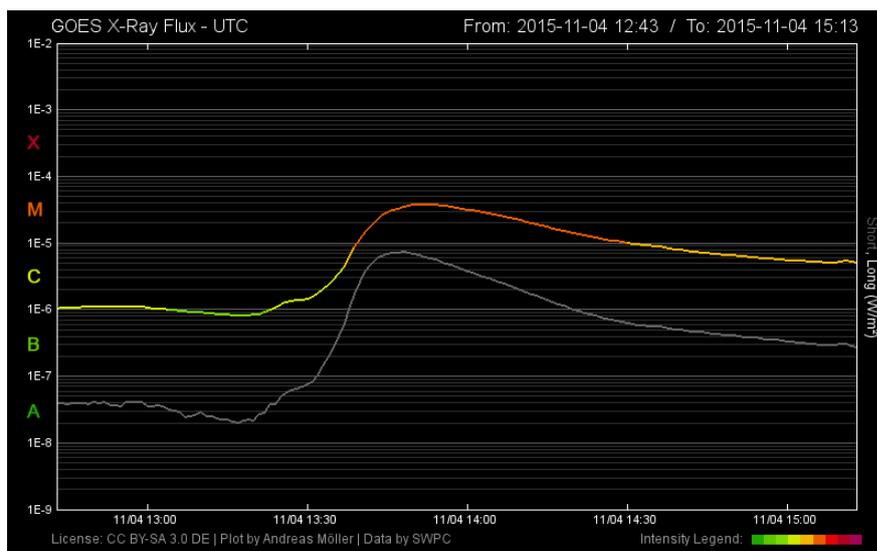


Figura 5.16: El estallido tipo II, captado por Callisto, fue generado por un evento eruptivo ocurrido en el Sol. El estallido fue reportado por la SWPC (Center, 2018), el reporte del estallido coincide con la detección de Callisto. El evento también fue asociado con una fulguración. Gráfica de rayos X obtenida de Möller (2018).

5. VALIDACIÓN DE EVENTOS CON INSTRUMENTOS INTERNACIONALES

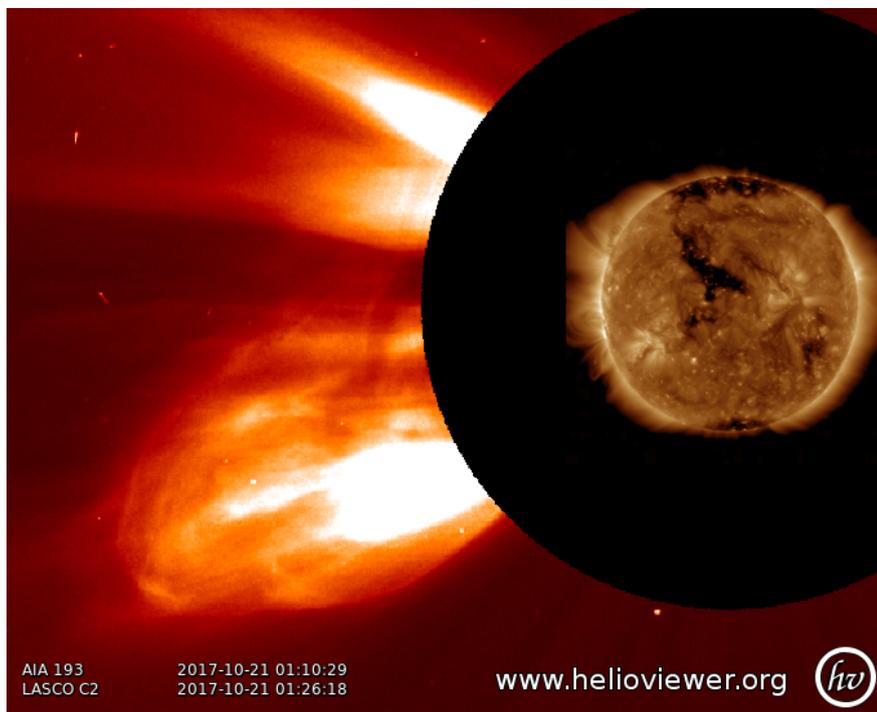
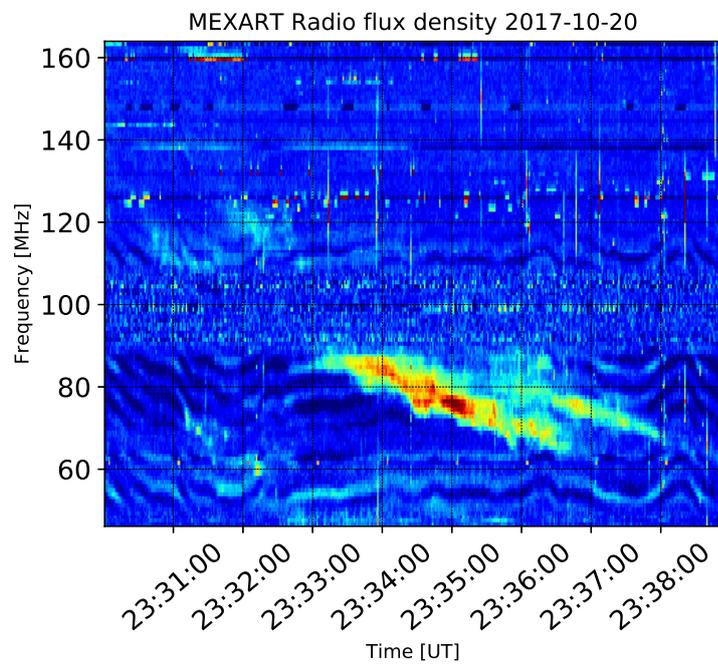


Figura 5.17: Callisto ha permitido relacionar estallidos de radio tipo II con una EMC que se detectó, un par de horas después, con los coronógrafos de SOHO. Imagen obtenida de [ESA \(2018\)](#). Se puede apreciar la EMC expandiéndose por el lado sureste del Sol.

5.6. Análisis de etiquetas de tiempo en el MEXART

Al usar y analizar las series de tiempo se detectó una anomalía en las etiquetas de tiempo generadas por MEXART. Se encontró que el periodo de muestreo no es de 20 milisegundos como se había reportado anteriormente. En la realidad, las etiquetas de tiempo tienen diferentes periodos. Esto genera problemas si se realizan análisis en periodos o frecuencias con datos del MEXART.

Se identificó esta anomalía haciendo una resta entre datos consecutivos de tiempo para obtener los periodos de muestreo de MEXART. Usando la expresión, $t_{i+1} - t_i$, donde t_i es el valor de tiempo sobre el que se itera, t_{i+1} es el siguiente valor. Esta operación se realizó para todos los valores del vector de tiempo de MEXART. El resultado esperado era una línea horizontal indicando que el periodo de muestreo siempre es de 20 milisegundos.

Se hizo el análisis, en los datos de MEXART para el evento detectado el 19 de Septiembre de 2015. Contrario a lo esperado, se presentaron distintos periodos de muestreo. En algunos casos, el periodo llega a 44 milisegundos. Se encontró que el periodo de muestreo más frecuente oscila entre los 18 y 19 milisegundos. Las diferencias de tiempo se graficaron en comparación al flujo que recibe el MEXART para los tiempos correspondientes. Esto se hizo para mostrar como varía la diferencia de tiempo entre cada etiqueta de tiempo con respecto a la señal registrada por MEXART (figura 5.18). Esta variación en el tiempo de muestreo se presenta, no solo a lo largo de toda la serie de tiempo para este evento, sino también en registros de otros días.

Este análisis se realizó para un día de cada año del periodo 2010-2017 y esta anomalía en los datos se encontró en cada uno de ellos. Hay que tomar estas consideraciones al hacer análisis de los datos donde se toma en cuenta el periodo de muestreo del instrumento. Por ejemplo, una transformada de Fourier realizada con los datos de MEXART podría no ser válida, ya que al hacer una transformada de Fourier, un tiempo de muestreo en los datos es crucial para el análisis. Para solucionar este problema primero es necesario revisar si el tiempo de muestreo indicado corresponde al tiempo de muestreo real o si solo es una anomalía en el etiquetado de datos de MEXART. Posteriormente, dependiendo de lo anterior, será necesario revisar las etapas de adquisición de datos y la computadora de MEXART.

5.7. Resumen

Se hizo una validación de estallidos de radio solares detectados por Callisto con los instrumentos disponibles, del lado día, de la red e-Callisto. Esta validación nos permite, en una segunda instancia, la identificación de estallidos de radio solar en los datos del MEXART. Se encontró que no todos los eventos son registrados por MEXART y se trató de encontrar la razón por la que no se detectaron.

Se partió de la hipótesis de que solo se detectan los eventos cuando el Sol se encuentra cerca del zenit. Sin embargo, encontramos que MEXART detectó eventos de

5. VALIDACIÓN DE EVENTOS CON INSTRUMENTOS INTERNACIONALES

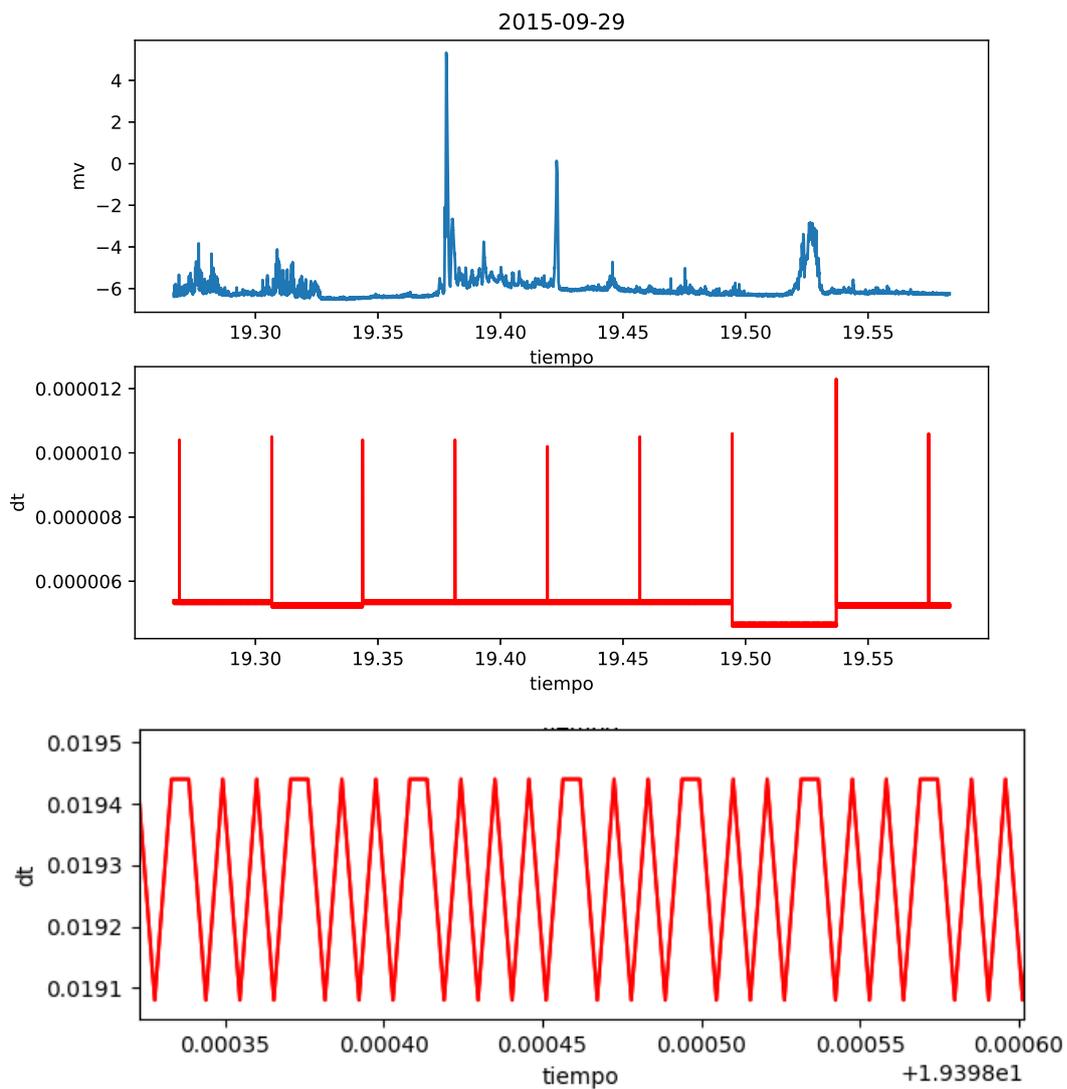


Figura 5.18: Se graficaron las diferencias de tiempo y el flujo de MEXART correspondiente para el evento de radio de 19 de Septiembre de 2015. La gráfica inferior es una ampliación de la gráfica de en medio que muestra el periodo de muestreo más frecuente pero variante. Este comportamiento nos indica que el periodo de muestro de las etiquetas de tiempo nunca es constante como debería ser.

forma homogénea. Además la posición del haz principal, en la dirección Norte-Sur, no presenta correlación con la posición del Sol.

Posteriormente, tomando en cuenta los distintos haces del MEXART con sus diferentes declinaciones Norte-Sur, se encontró que no hay una relación entre la separación angular de los haces con el Sol y la intensidad del evento detectado por MEXART lo que nos indica que MEXART se comporta como una antena isotrópica para los estallidos de radio solar.

Por otro lado, se encontró una anomalía en las etiquetas de tiempo de MEXART. Esto significaría que hay una variación en el periodo de muestreo de MEXART.

A continuación se describe la metodología que se desarrolló para el monitoreo de eventos de radio solar.

Monitorización de Eventos de Radio

6.1. Introducción

La identificación de estallidos de radio solares con Callisto, validados con la red e-Callisto, nos permite seguir con la siguiente etapa de este trabajo, la cual se centra en aplicar una metodología para registrar los eventos sistemáticamente. Cada semana se revisan los espectros de radio generados por Callisto. Cuando se detecta un posible estallido de radio, se identifica si la firma tiene deriva. Además se revisan los datos en las estaciones de la red e-Callisto usando como referencia la hora y el ancho de banda identificados en el espectro de Callisto. Cuando se valida que el evento es solar, entonces se revisa si MEXART detectó el evento. Esto se ha hecho constantemente para desarrollar una base de datos de estallidos de radio solares.

6.2. Procesamiento de datos

Para procesar y analizar datos relacionados con fenómenos de CE, se usa la infraestructura del LANCE. En el caso de Callisto no se tenían las herramientas para guardar y procesar los datos. Se desarrolló la infraestructura computacional para este propósito.

Antes de identificar los distintos eventos, con los dos instrumentos, se desarrolló una serie de herramientas que facilitan el acceso a los datos y el análisis de los estallidos de radio. Primero se tuvo que desarrollar la accesibilidad de los datos de Callisto debido a la ubicación física de estos datos. Estos se encontraban en servidores del MEXART, localizados en Coeneo, lo que dificultaba su acceso. También era necesaria la organización de los datos para su fácil acceso, dado que Callisto genera archivos de datos cada 15 minutos. De esta manera, en un día, se generan 46 archivos por día. Otro aspecto que se necesitó manejar para la identificación de eventos es la visualización de datos ya que Callisto produce datos en formato FIT, sin gráficas del espectro dinámico. Con el propósito de almacenar y dar accesibilidad a los datos de estos y otros instrumentos del LANCE, se desarrolló el RICE.

6.3. Repositorio Institucional de Clima Espacial (RICE)

El RICE fue creado por miembros del LANCE para almacenar datos de monitorización de CE. Estos incluyen datos provenientes del International Space Environment Service (ISES) y de la red de instrumentos asociados a LANCE. Estos datos provienen de Callisto, MEXART, redes de GPS, del servicio Magnético, del Observatorio de neutrones de Sierra Negra del Observatorio de rayos cósmicos entre otros (Gonzalez-Esparza et al., 2017). Estos datos se respaldan en 4 servidores distintos que conforman al RICE. Uno es el que se encuentra en el Instituto de Geofísica Unidad Michoacán (IGUM), otro en las instalaciones del MEXART en Coeneo, Michoacán, otro en la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, y el último en el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Los datos almacenados se procesan a través del CESCO (Centro de Supercomputo de Clima Espacial) y los productos son almacenados una vez más en el RICE.

6.4. Automatización y procesamiento de datos de Callisto

Antes de la creación del RICE, los datos no eran accesibles más que físicamente en la computadora que produce y guarda los datos de Callisto, en el observatorio del MEXART. Se migraron los datos al servidor del RICE en el IGUM. Para este propósito, se aprovechó el software que ya subía los datos de Callisto a un servidor de la red e-Callisto con ubicación en Zurich Suiza. Este programa, escrito en lenguaje Perl, es un TSR (*Terminate and Stay Resident* Termina y permanente residente), el análogo de *daemon* para sistemas UNIX. Este tipo de programas trabajan en segundo plano haciendo procesos continuamente mientras esté encendida la computadora. En este caso se ejecuta un iterador que revisa la creación de archivos nuevos de Callisto en la computadora, cuando se detecta uno, se realiza una copia de respaldo en la computadora y además se hace una transferencia del archivo mediante el protocolo FTP (*Fast Transfer Protocol*, protocolo de transferencia rápida). La ventaja de este protocolo es la velocidad en la transferencia pero con la desventaja de que esta transferencia se realiza con la información en texto plano ASCII. Esto implica que no se tiene protección en la privacidad de los datos al ser transferidos por la red. Se configuró este software para que haga transferencias de los archivos de Callisto al servidor de RICE en el IGUM. El código final se presenta en el Apéndice A.3.

Implementado este código, se hace la transferencia de los archivos creados al servidor de RICE. La primera transferencia de archivos fue de los datos ya existentes desde el 2015 hasta el 2016. Para realizar una organización de los archivos, y que puedan seleccionarse por fecha y hora, se generó otro demonio. Este nuevo programa, ahora operando sobre el RICE y usando el lenguaje Python, identifica la presencia de nuevos archivos en la carpeta raíz del servidor de RICE. Al detectarlo, se genera un árbol de carpetas con subramas jerarquizadas por año, luego mes y finalmente día. Posteriormente, se realiza la transferencia del archivo a su carpeta correspondiente, en caso de

existir el árbol o subrama de carpetas necesario, el programa solo hace la transferencia del archivo a su carpeta. El script, llamado *cp-callisto*, se encuentra en el Apéndice A.4.

A veces ocurren fallas en la transferencia de archivos debido a cuestiones de conectividad de red o problemas en el S.O. de la computadora de Callisto. Esto suspende el flujo de archivos y estos se van acumulando en la computadora. Cuando se recupera el flujo de archivos, se transfieren todos los archivos rezagados en una sola transferencia. Para evitar conflictos en la ejecución de este último programa, se le quitó su carácter de daemon y se hizo otro programa, ahora en lenguaje shale, el cual monitoriza la ejecución del programa de organización de archivos en RICE (Apéndice A.7).

Para realizar una monitorización constante de los espectros, se realizaron dos programas en Python usando la paquetería de procesamiento de datos de tipo solar *Sunpy*. El primer programa genera espectros a partir de los datos de Callisto, el segundo programa produce la curva de luz, a partir de los espectros, haciendo una suma de las señales de las frecuencias correspondiente a cada tiempo. *cp-callisto* se encarga de generar estas gráficas en el momento en que el archivo FIT está disponible y las transfiere a la misma ubicación que el archivo FIT. Un ejemplo de estas dos gráficas se muestran en la Figura 6.2. En la obtención de curvas de luz se implementó el cálculo de la desviación estándar, como ruido de la señal, y además, el máximo para hacer una estimación de RSR. Cuando este valor alcanza un valor mayor a 5 se envía un correo al autor avisando de un posible evento de radio detectado. Debido a las radio interferencias explicadas en el capítulo 4, el programa detector se ejecuta excesivamente por cualquier cambio en la intensidad de la señal. Por este motivo, el sistema de correo no funcionó como detector de eventos. Aún así, se han ido revisando semanalmente los espectros generados para así, ir contando los eventos producidos desde 2015.

Se puede seguir el proceso de automatización descrito anteriormente con el diagrama de flujo que viene en la Figura 6.1

Con la infraestructura desarrollada, es posible identificar los eventos usando cualquier dispositivo con acceso a internet ya que los datos son públicos y se acceden a partir de la dirección electrónica www.rice.unam.mx/callisto.

6.5. Procesamiento de datos del MEXART

Teniendo detectado un evento en los datos de Callisto, se obtiene la fecha y hora del evento, así como el rango de frecuencias para inferir si MEXART detectó el evento. Para comparar las señales de estos dos instrumentos se usó un programa escrito en Python (ver Apéndice A.1) que gráfica la señal de Callisto tomando en cuenta solo el canal correspondiente al ancho de banda de MEXART.

La principal dificultad de realizar esta tarea es el emparejamiento de datos de los dos instrumentos. Por un lado, los datos de los dos instrumentos tienen resolución temporal distinta; MEXART alrededor de 20 ms y Callisto de 0.25 s. Además, los dos

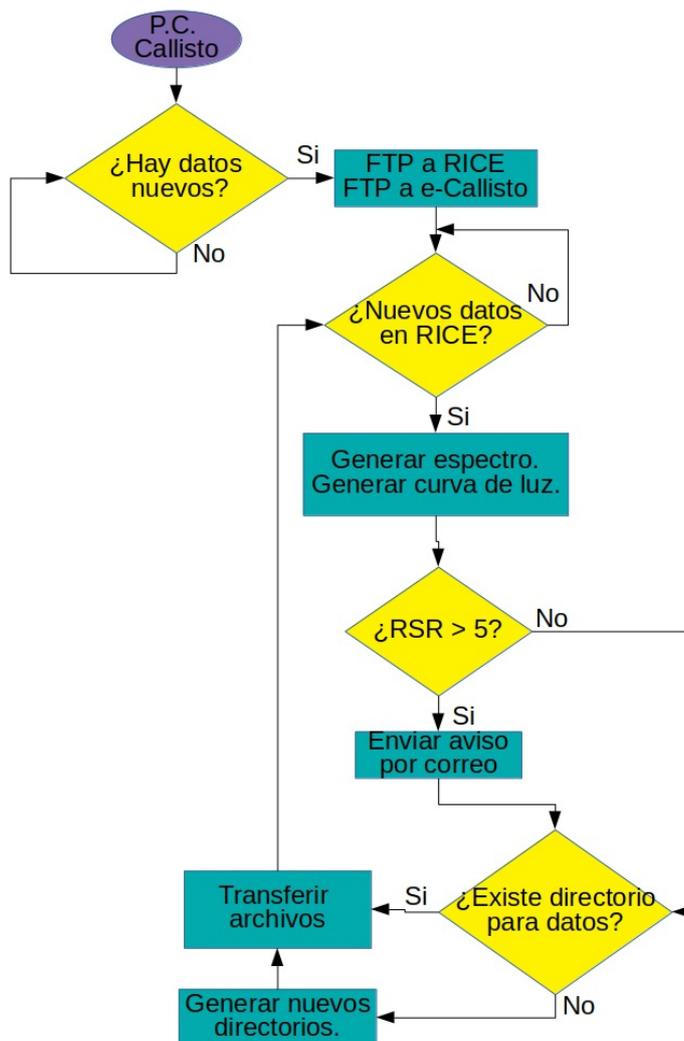


Figura 6.1: El proceso de automatización y procesamiento de datos de Callisto es un proceso cíclico sin fin. Inicia desde la computadora de Callisto en Coeneo e itera desde ahí hasta el servidor de RICE. El sistema busca nuevos archivos en la computadora de Callisto, los transfiere a RICE y una vez ahí, se producen las gráficas y se guardan por fecha.

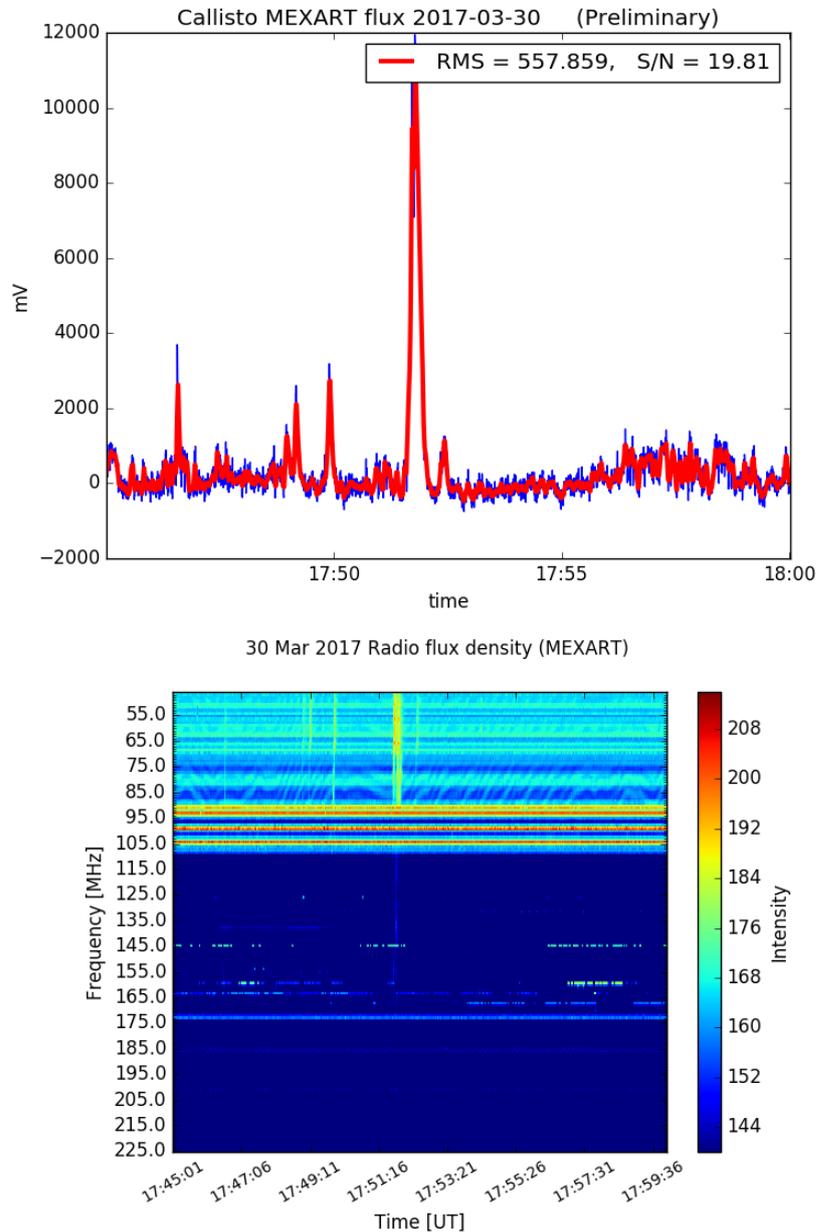


Figura 6.2: Este es un ejemplo de la creación automática de gráficas con archivos de Callisto en la que se observa un estallido tipo III. La gráfica de curva de luz calculó una RSR mayor a 5, que indica la detección de una señal para estándares de radioastronomía. En esta versión de las gráficas aun no se incluía la conversión de cuentas a mV.

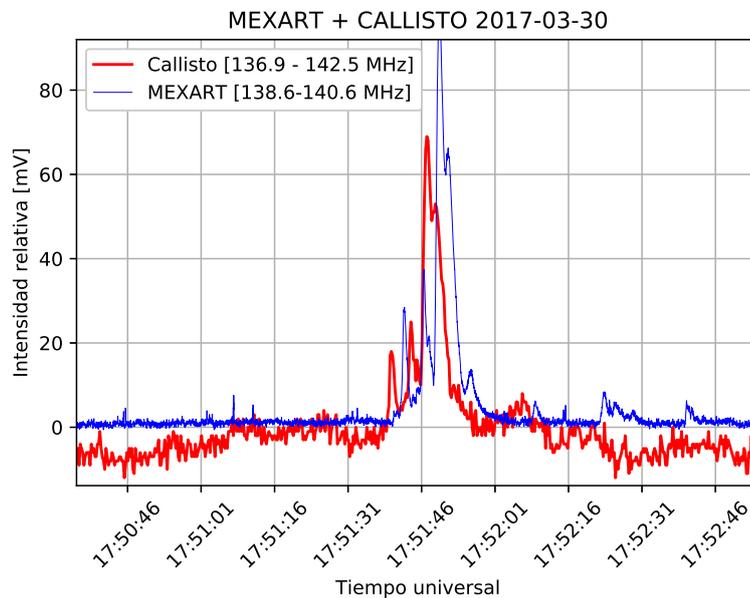


Figura 6.3: Comparación de señales de Callisto y MEXART en el momento de un estallido tipo III. En Callisto, la relación RSR fue de 9.61 mientras que en MEXART fue de 183.24. Adicionalmente, podemos observar que existe una diferencia significativa entre instrumentos en el registro de tiempo del máximo del evento.

archivos presentan formatos de tiempo distinto. MEXART registra su tiempo en horas con decimales y Callisto en contraste lleva la serie de tiempo de segundos.

Para ahorrar almacenamiento en las cabeceras del archivo FIT, se incluye el tiempo inicial al cual se suman los segundos de la serie de tiempo de Callisto. Estos dos formatos distintos de tiempo se convirtieron a un formato común incluyendo fecha y hora con resolución de microsegundos.

Con este formato de tiempo, la graficadora de Python puede emparejar las señales de acuerdo a su tiempo (ver Figura 6.3). Otra dificultad para comparar las señales de los dos instrumentos fue emparejar las amplitudes de las señales. Para esto, se escalaron las señales de las dos antenas, se debe tomar en cuenta que las intensidades de los dos instrumentos se maneja en mV pero son relativas entre sí.

Un último obstáculo para la comparación de señales fue la densidad de datos de MEXART. Cada archivo de MEXART pesa alrededor de 95 MB, en cambio, un archivo de Callisto pesa 760 kB. Esto vuelve difícil el procesamiento de la señal para la computadora. Para resolver este problema se usó un tiempo inicial y final con los que el programa de Python solo escoge el segmento de datos necesario de MEXART.

De la gráfica se observa que el ruido de los datos de Callisto es mucho mayor que en los datos de MEXART, por otro lado la sensibilidad de MEXART hace que la señal detectada sea mucho mayor con respecto al ruido de fondo. Aún así, la forma del evento

es la misma en las dos señales, lo que nos asegura que la señal captada en MEXART, efectivamente, corresponde al estallido de radio.

6.6. Procesamiento adicional

Otro programa desarrollado fue un nuevo graficador de espectros, distinto al usado en el proceso de automatización de Callisto (ver Apéndice A.8). El nuevo graficador se hizo para lograr una mayor facilidad en la identificación de estructuras o eventos. Con tal propósito, fue necesario cambiar la intensidad de colores en los espectros. Para esto, se restó a cada pixel el valor de ruido promedio de cada canal. la operación resalta las señales que no son constantes en el tiempo y permiten contrastar los eventos de radio (compárese figuras 6.4). Con esta operación cada canal de frecuencia obtiene una escala de voltaje particular por lo que ya no se agrega la escala de colores para la gráfica en general. Los espectros que aparecen en este trabajo sin escala de colores indican que se les hizo esta resta de la intensidad promedio. Este cambio en la intensidad de los canales solo se usa para la identificación de eventos. Para el cálculo de RSR y otros propósitos se utilizan los datos originales. Adicionalmente se cambió el formato en el que se presentan las frecuencias, esto para seguir el formato de los espectros de radiospectrógrafos como WAVES y ACE.

La ventaja de usar la graficadora de Python es que el lector de archivos puede aceptar direcciones de la ubicación local del archivo pero también puede aceptar direcciones electrónicas de internet que, con el formato correcto, pueden ser leídos. Esto facilita el análisis de datos de MEXART para el usuario ya que no necesita almacenar los archivos en su computadora sino que solo requiere conocer la página de internet contenedora de los datos.

6.7. Base de datos de estallidos de radio

Para la monitorización del CE o cualquier acumulación de datos se llevan registros de los eventos identificados en bases de datos que son fáciles de usar para reconocimientos o estudios históricos. Tal es el caso de organismos como la NASA, la NOAA o incluso la red e-Callisto. La acumulación de eventos y parámetros de los eventos empezó a hacerse complicada para cuando se contaban unos 30 eventos. Con tal situación se decidió registrar los parámetros de una base de datos SQL (*Structured Query Language* en español lenguaje de consulta estructurada). SQL permite hacer consultas en bases de datos a través de relaciones, condiciones y operaciones. Se escogió SQL debido a que tiene un sistema de consultas de datos, lo que facilita el análisis histórico de datos aún en bases de datos enormes. También se puede enlazar bases de datos de SQL con lenguajes de programación como python, C++, o java, que pueden hacer consultas y extraer información para así realizar tareas o análisis con los datos extraídos. Considerando que, actualmente, el Sol se encuentra en una fase de mínima actividad, los eventos

6. MONITORIZACIÓN DE EVENTOS DE RADIO

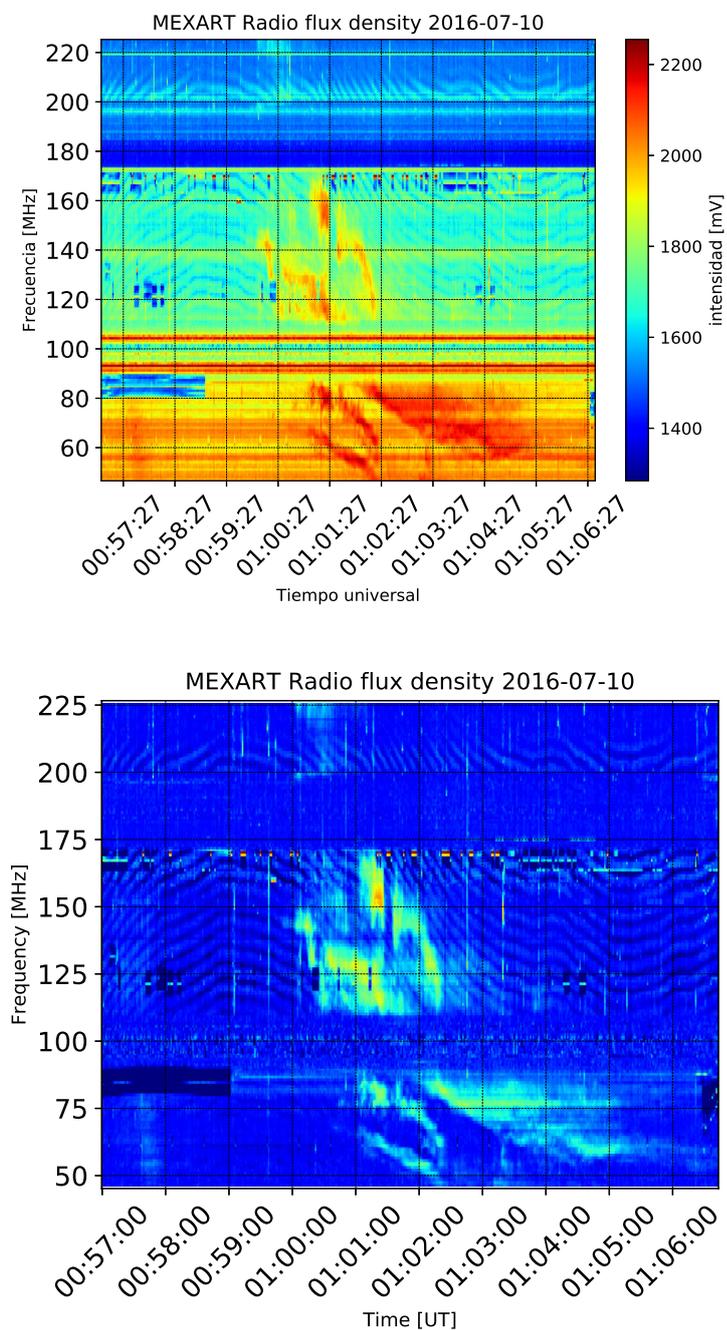


Figura 6.4: En el primer espectro se observa un estallido tipo II. Cuando se resta a cada pixel la intensidad promedio de su respectiva frecuencia, se produce el espectro inferior. Esto se usa solo para reconocer con mayor facilidad los eventos.

que podrían registrarse en el máximo solar podrían aumentar en número por un orden de magnitud. Por esto, usar una base de datos SQL puede llegar a ser conveniente y práctico.

6.8. Propiedades

En esta base de datos se registró cada uno de los eventos identificados con Callisto y MEXART, y los parámetros que se obtuvieron del análisis realizado a cada evento. Para cada evento se registraron los siguientes campos de información:

- Identificador: Para nombrar cada evento con un nombre único, se usó un número de 12 dígitos con el formato YYYYMMDDhhmm, así indicando su fecha y el tiempo de ocurrencia.
- Fecha: Separados en tres campos de año, mes y día.
- Tiempo de inicio y tiempo de fin del evento.
- Tipo de evento (I,II,III, IV etc).
- Rango de frecuencias del evento: especialmente para estallidos tipo II.
- Comentario sobre naturaleza o complejidad del evento.
- Dirección de la gráfica del espectro de Callisto correspondiente.
- Dirección electrónica del archivo FIT correspondiente al evento.
- Identificación de evento en datos de MEXART: Con valores 'si', 'no' o 'no datos'. Para este caso se hizo una comparación cualitativa con los datos de Callisto.
- Identificación de evento en el canal de Callisto correspondiente a la banda de MEXART con valores 'si', 'no'. En este caso se usó el criterio de 5 sigmas para la RSR del evento y una evaluación cualitativa de la señal correspondiente al evento.
- Desviación estándar y RSR calculada en Callisto: Correspondiente a la banda de MEXART.
- Desviación estándar y RSR calculada en MEXART.
- Posición del Sol: en el momento del evento y dividido en cuatro campos siendo estos dos para coordenadas horizontales y otras dos para coordenadas ecuatoriales.
- Dirección del patrón de antena de MEXART: En el momento del evento, usando coordenadas ecuatoriales.

6. MONITORIZACIÓN DE EVENTOS DE RADIO

Adicionalmente se agregaron dos campos más que son la imagen proveniente de SDO, para identificar alguna fulguración o EMC con las fotos del satélite. En el otro campo se incluyó la gráfica en el flujo de rayos X obtenida de los satélites GOES para identificar una fulguración. El análisis de estos dos últimos campos no se completó para todos los eventos.

Usando estos datos y las consultas de SQL se pudieron realizar las gráficas de los capítulos anteriores. Se tuvieron que usar discriminaciones en los eventos usando estas consultas. Por diversas razones, algunos eventos no cumplían con los criterios necesarios que eran: que los dos instrumentos detectaran el evento, que Callisto lo haya detectado a 140 MHz y que no hubiera el suficiente ruido para comparar las señales.

La información de esta base de datos puede ser consultada, bajo demanda, al siguiente correo electrónico:

`hdomeli@gmail.com`

`vdelaluz@igeofisica.unam.mx`

6.9. Número de eventos registrados

Con Callisto se contabilizaron, desde Febrero de 2015 hasta Marzo de 2018, 104 estallidos de radio solares de los cuales 7 son estallidos de radio tipo II, 1 fue un estallido tipo I y 97 eventos fueron estallidos tipo III. En la Tabla 6.1 se muestra la fechas y hora de los eventos, si fueron detectados por MEXART o Callisto a 140 MHz y la intensidad detectada por cada instrumento en RSR.

Tabla 6.1: En esta tabla se presentan todos los eventos registrados por Callisto, desde febrero de 2015 hasta Marzo de 2018. Se incluye la fecha y hora del evento, si el evento fue detectado por MEXART, si fue detectado por Callisto a 140 MHz, el tipo de estallido de radio y la intensidad detectada por los dos instrumentos en RSR.

Fecha y hora	Detección en MEXART	Detección en Callisto (140 MHz)	Tipo	RSR MEXART	RSR Callisto (140 MHz)
2015/09/29 19:22	si	si	III	629.08	14.56
2015/10/16 13:28	si	si	II	52.352257932	6.96
2015/10/21 18:19	si	no	III	-	7.75
2015/11/04 13:43	si	no	II	19.95	5.45
2016/02/06 14:56	no hay datos	no	III	no datos	7.29
2016/02/11 21:59	no	si	III	no	6.47
2016/04/14 13:17	si	no	III	no	7.72
2016/04/18 00:24	no	no	III	0.0	4.87
2016/05/02 19:42	si	no	III	40.88	13.76
2016/05/04 14:03	no	no	II	0.0	0.0
2016/05/25 12:52	si	si	III	9.35	3.51
2016/05/26 13:42	no	no	III	0.0	12.99
2016/05/26 13:46	si	si	III	17.96	4.32
2016/07/10 01:01	si	si	II	25.57	8.02
2017/03/30 23:15	no	no	III	0.0	10.88
2017/03/30 17:51	si	si	III	183.24	9.61
2017/04/01 15:10	no	no	III	0.0	5.91
2017/04/01 17:03	no	no	III	0.0	5.51
2017/04/01 17:12	no	no	III	0.0	3.84
2017/04/01 19:31	no	no	III	0.0	8.89
2017/04/01 21:14	no	no	III	0.0	14.05
2017/04/01 21:38	no	no	III	0.0	4.88
2017/04/01 21:44	no	no	III	0.0	8.33
2017/04/01 23:01	si	si	III y II	98.58	6.33

2017/04/01 23:52	si	si	III	-	3.57
2017/04/02 21:11	no	si	III	0.0	3.97
2017/04/02 00:28	si	si	III	75.34	2.36
2017/04/04 16:57	no	no	III	0.0	8.47
2017/04/04 19:22	si	no	III	81.8	8.33
2017/04/04 21:34	si	no	III	10.44	14.42
2017/04/04 22:19	no	no	III	0.0	4.81
2017/04/04 23:39	no	no	III	-	8.47
2017/04/05 13:58	no	no	III	0.0	10.51
2017/04/27 22:43	no	no	III	0.0	10.05
2017/05/23 14:08	no	no	III	0.0	7.63
2017/06/23 19:24	no	no	III	0.0	6.72
2017/06/24 14:13	no	no	III	0.0	3.5
2017/07/11 13:20	no	no	III	0.0	13.39
2017/07/11 16:18	no	no	III	0.0	10.31
2017/07/11 16:59	no	no	III	0.0	13.43
2017/07/11 17:00	no	no	III	0.0	7.2
2017/07/12 15:00	si	no	III	-	11.46
2017/07/12 16:42	no	no	III	0.0	9.73
2017/08/17 00:34	no	no	III	0.0	2.85
2017/08/17 13:51	no	si	III	0.0	1.12
2017/08/17 17:52	no	no	III	0.0	12.6
2017/08/17 18:22	si	si	III	21.96	3.65
2017/08/17 19:12	no	no	III	0.0	2.31
2017/08/17 20:23	no	si	III	0.0	-
2017/08/18 15:47	si	si	III	8.41	3.36
2017/08/18 21:03	si	si	III	57.49	5.89
2017/08/19 16:43	no	no	III	0.0	7.33
2017/09/04 17:19	no	si	III	0.0	10.68
2017/09/04 22:03	si	si	III	362.23	6.12

6. MONITORIZACIÓN DE EVENTOS DE RADIO

2017/09/06 17:32	si	si	III	339.43	15.49
2017/09/07 13:30	ruidoso	ruidoso	I	-	-
2017/09/07 17:24	si	si	III	16.5	3.64
2017/09/07 17:29	si	si	III	49.66	6.01
2017/09/07 17:52	no	no	III	0.0	7.03
2017/09/07 18:32	no	no	III	0.0	8.26
2017/09/07 18:41	no	si	III	0.0	10.18
2017/09/07 20:30	ruidoso	no	III	-	9.57
2017/09/07 20:55	ruidoso	si	III	-	7.99
2017/09/07 21:19	ruidoso	no	III	-	7.27
2017/09/07 21:51	ruidoso	no	III	-	7.18
2017/09/07 22:02	si	si	III	44.85	9.84
2017/09/07 22:33	no	no	III	0.0	3.99
2017/09/07 23:14	si	si	III	32.47	11.19
2017/09/08 13:22	si	si	III	8.07	3.61
2017/09/08 16:57	si	si	III	493.25	17.78
2017/09/08 17:01	si	si	III	278.67	12.98
2017/09/08 18:08	si	debil	III	162.67	7.8
2017/09/08 20:12	si	si	III	33.51	5.06
2017/09/08 23:20	si	si	III	38.62	7.31
2017/09/10 15:56	si	si	III	283.96	10.79
2017/09/12 15:31	si	si	III	11.9	3.45
2017/09/12 15:43	si	si	III	36.53	6.53
2017/09/25 15:38	si	si	III	51.84	4.56
2017/09/25 15:49	si	si	III	44.28	4.78
2017/09/25 17:11	si	si	III	8.96	3.51
2017/09/25 18:38	si	no	III	257.37	8.5
2017/09/25 19:27	no	si	III	-	6.63
2017/10/02 23:11	no	no	III	0.0	6.65
2017/10/02 23:17	no	no	III	0.0	9.54

2017/10/02 23:26	no	no	III	0.0	8.48
2017/10/02 23:59	no	no	III	0.0	5.38
2017/10/03 13:31	no	no	III	0.0	0.0
2017/10/03 23:58	no hay datos	no	III	-	0.0
2017/10/04 00:13	si	si	III	7.38	3.22
2017/10/04 20:31	ruidoso	no	III	-	6.45
2017/10/05 13:35	no	no	III	-	7.86
2017/10/05 23:21	si	si	III	22.38	4.99
2017/10/06 00:09	no	no	III	0.0	7.02
2017/10/11 14:50	si	si	III	12.22	0.2
2017/10/20 23:30	no	no	II	0.0	0.0
2017/11/16 13:32	no	no	III	0.0	0.0
2017/11/16 20:40	no	no	III	0.0	8.58
2017/11/16 23:44	no	no	III	0.0	11.53
2017/12/28 22:27	no	no	III	0.0	10.38
2018/02/28 16:10	si	no	III	22.6274052278	6.65
2018/03/01 22:03	no	no	III	0.0	2.65
2017/07/11 20:23	si	si	III	19.64	7.87
2017/07/11 16:52	ruidoso	no	III	-	9.16
2017/09/12 19:14	ruidoso	ruidoso	II	-	-

6. MONITORIZACIÓN DE EVENTOS DE RADIO

De los 104 eventos, solo 40 pudieron ser detectados por MEXART, y de estos 40, en 9 eventos Callisto no detectó una señal en la banda de 140 MHz, como en la Figura 5.6. Para comparar la señal con MEXART, en estos casos se usaron otras bandas en las que se emitieron los estallidos. Por ejemplo, en la Figura 4.4. En dos de los eventos, MEXART no obtuvo datos para dicho día. Uno de los eventos ocurrió en una tormenta eléctrica tan intensa que el ruido generado no permitió el análisis de las señales (ver Figura 4.1).

6.10. Resumen

En este capítulo se explicó el desarrollo del sistema de transferencia automática de datos de Callisto al RICE así como la graficación de los archivos en espectros y curvas de luz además de su almacenamiento y organización, también automática. Esta infraestructura completa el sistema de monitorización semiautomático para identificar estallidos de radio solares en el LANCE. También se ha logrado la disponibilidad para todo público a través de la página de RICE. Se desarrollaron programas para un mejor y eficiente procesamiento y graficación de los datos para poder identificar los eventos en datos de MEXART. Todo lo anterior ha permitido construir una base de datos hecha en SQL, la base de datos permitirá desarrollar análisis estadísticos con estallidos de radio solares detectados en México.

Para terminar, en el siguiente capítulo, mostraremos nuestras conclusiones generales.

Conclusiones

En este trabajo realizamos una revisión bibliográfica de los procesos de emisión a longitudes de onda de radio enfocados en los eventos eruptivos solares. Caracterizamos el funcionamiento de dos radiotelescopios en el contexto del registro de radioemisión solar: la estación Callisto y el Radiotelescopio de CIP MEXART.

Caracterizamos las distintas señales que son capaces de detectar Callisto y MEXART así como su naturaleza. Identificamos la radio emisión por radiocomunicaciones, componentes y sistemas electrónicos, tormentas eléctricas y estallidos de radio solares. Con la identificación de las firmas registradas en Callisto, pudimos determinar cuáles tienen origen solar.

Los estallidos de radio solares identificados con nuestra estación se validaron con los instrumentos cercanos de la red e-Callisto. Mostramos que estallidos intensos interrumpen las bandas de radiocomunicaciones entre 55 y 85 MHz en la región de Coeneno, Michoacán, donde se encuentra instalado el radioespectrógrafo. Por primera vez se relacionaron estallidos de radio con eventos eruptivos provenientes del Sol en territorio nacional.

Sin embargo, se requiere un estudio más amplio para validar el impacto de los estallidos de radio solares sobre las radio comunicaciones en todo el territorio mexicano. El flujo de los eventos de radio solares tienen un alcance global, es decir, su efecto es prácticamente homogéneo en el territorio nacional. Sin embargo, las interrupciones en las radio comunicaciones terrestres no solo dependen de la intensidad del evento solar, también van a depender de la potencia, la frecuencia y la distancia a la que se encuentra el emisor con respecto al observador. Hay que recordar que la señal del emisor decae como el cuadrado de la distancia (Rohlfis y Wilson, 2013). Esto implica que existe un límite alrededor de las emisoras (radio máximo) donde las comunicaciones pueden verse interrumpidas por un evento de radio solar y que este radio va a depender de la intensidad del evento solar.

Automatizamos la transferencia de archivos de Callisto al RICE así como la generación de gráficas y su organización para su fácil acceso. Esto ha permitido realizar un registro sistemático de los espectros dinámicos. Hemos identificado 104 estallidos de radio solar, todos ellos verificados con la red e-Callisto. De los 104 eventos identificados

7. CONCLUSIONES

se detectó un estallido tipo I, 7 estallidos tipo II y 97 estallidos tipo III, de los cuales, 40 fueron registrados simultáneamente por MEXART.

Mostramos que MEXART no detecta todos los estallidos de radio solares que se registran con Callisto. Buscamos la falta de consistencia en la detección de los eventos con el MEXART estudiando la separación angular entre la posición del Sol y el haz principal de MEXART al momento del evento, así como la intensidad de los eventos medida en RSR. Los resultados mostraron que MEXART no tiene directividad para detectar estallidos de radio por lo que la consideramos un detector isotrópico.

Se encontró una anomalía en las series de tiempo de MEXART, concretamente en el periodo de muestreo y en algunos casos un desfase en las etiquetas de tiempo. Estas anomalías deben tomarse en cuenta al momento de hacer un análisis detallado en la señal detectada por MEXART.

Con base a los resultados de este trabajo, podemos sugerir monitorizar otras bandas para detectar estallidos de radio tipo II a más bajas frecuencias (entre 20 y 45 MHz, como es el caso de la estación e-callisto de Roswell) y tipo III a altas frecuencias (entre 225 y 870 MHz para aprovechar el ancho total de callisto). Para maximizar la sensibilidad tendríamos que utilizar distintas antenas optimizadas a estas longitudes de onda y sería necesario conectar superheterodinos que cambien las frecuencias extremas a una señal con frecuencias procesables por los radiospectrógrafos de tipo Callisto. Usando otro receptor de tipo Callisto y una antena colocada perpendicularmente a la nuestra, se podría iniciar el registro de la señal con dos polaridades lineales (Monstein, 2018).

Un proyecto importante que se debería desarrollar con Callisto antes del siguiente ciclo solar, consiste en implementar un sistema de alerta que identifique estallidos de radio intensos en tiempo real sin necesidad de supervisión humana. El sistema de alertas estaría orientado a detectar estallidos de radio solares de tipo III similar a lo planteado en Lobzin, Cairns, Robinson, Steward, y Patterson (2009).

Instalar una red de Callistos a lo largo del país ayudaría a identificar las radio interferencias locales y nos permitiría estudiar el impacto de las radio emisiones solares en la región geográfica de cada estación, lo cual nos acercaría a determinar los radios máximos de interferencias alrededor de emisoras importantes. Implementar una red de radiospectrógrafos en el país ayudaría a desarrollar un sistema de alertas mas confiable pues tendríamos datos redundantes que nos permitirían identificar falsos positivos en la señal.

Mostramos que las observaciones de Callisto y de MEXART se pueden complementar para corroborar eventos de radio solares, así como identificar alguna deficiencia en la operación de alguno de ellos. El MEXART está en etapa de actualización y se planea cambiar a un ancho de banda mayor. Con esta actualización se resolverán los problemas operativos encontrados en MEXART. La combinación de observaciones de ambos instrumentos permitirá dar mayor cobertura a los estallidos de radio solares desde el LANCE.

Finalmente podemos decir que se ha logrado implementar un sistema de monitorización de radio interferencias por estallidos de radio solares en LANCE. La infraestructura

y la metodología desarrollada en este trabajo de tesis nos permitirá aumentar de forma confiable los registros de estallidos de radio solares en México. Estos datos serán fundamentales para: el análisis de riesgos por CE, el desarrollo de un sistema de alerta temprana ante eventos eruptivos solares y finalmente para aumentar la resiliencia en México ante este tipo de eventos de CE.

Apéndice A

Apéndice

Código A.1: Script que genera la curva de luz con los datos de Callisto y de MEXART

```
1  #!/usr/bin/env python
2
3  import os
4  from readcol import fgetcols
5  import numpy as np
6  from math import fmod
7  from math import exp
8  import matplotlib as mpl
9  import matplotlib.pyplot as plt
10 from matplotlib import dates
11 from astropy.io import fits
12 from sunpy.time import parse_time
13 import pylab as plb
14 from scipy.optimize import curve_fit
15 from scipy import ararray as ar,exp
16 import datetime as dt
17 from dec_to_time import dec_to_time as dtt
18 from read_cut import read_cut
19 from datetime import timedelta
20 from math import floor
21 from scipy.stats import mode
22
23 mpl.rcParams["savefig.directory"] = './'
24 def _parse_header_time(date, time):
25         """ Return datetime object from date and time fields of header.
26         """
27         if time is not None:
28                 date = date + 'T' + time
29         return parse_time(date)
30
31 def movingaverage(interval, window_size):
32         window = np.ones(int(window_size))/float(window_size)
33         return np.convolve(interval, window, 'same')
34 #####
```

```

34  ##parte de MEXART
35  #####
36  #####
37  ##obtencion de la fecha a partir del nombre del archivo
38  #####
39  path = './'
40  files = []
41
42  readMEX=raw_input('para_mexcut_escribe_y_si_ya_esta_mexcut_escribe_n')
43  if readMEX == 'y':
44      inicio = raw_input('escribe_tiempo_de_inicio_formato_hh:mm')
45      fin = raw_input('escribe_tiempo_de_fin_formato_hh:mm')
46      read_cut(inicio , fin)
47
48  for file in os.listdir('./'):
49      if file.endswith("mexcut.dat"):      #chechar que canal se esta usando
50          files.append(file)
51  #print 'number of mexart files'+str(len(files))
52  files= sorted(files) #se ordenan los archivos
53
54  stream_time = []
55  stream_v = []
56  splits = files[0].split('-')
57  yyyy = (splits[0])
58  m = (splits[1])
59  d = (splits[2])
60  #####
61  ##Abrir archivo recortado para graficarlo
62  #####
63
64  for file in os.listdir(path):
65      if file.endswith("mexcut.dat"):      #chechar que canal se esta usando
66          mexartf=file
67  with open(path+mexartf, "rb") as f:
68      content = f.readlines()
69  mex_time=[]

```

```
70 mex_v=[]
71 for line in content:
72     str_time, str_v = line.split()
73     mex_time.append(float(str_time))
74     mex_v.append(float(str_v))#escalamiento para comparar con callisto
75
76 first_time=dt.datetime.strptime(mex_time[0], '%Y-%m-%d %H:%M:%S.%f')
77 datetime = []
78 ftsplit=first_time.split(':')
79 hh,mm,ss,ms=int(ftsplitsplit[0]),int(ftsplitsplit[1]),int(ftsplitsplit[2][0:2]),int(
    ftsplitsplit[2][3:])
80 start_object = dt.datetime(year = int(yyyy), month=int(m), day=int(d), hour=
    hh, minute=mm, second=ss, microsecond=ms)
81 datetime.append(start_object)
82 for i in range(len(mex_time)):
83     if i==len(mex_time)-1:
84         break
85     else:
86         delta = dt.timedelta(microseconds=(mex_time[i+1]-mex_time[
    i])*3600*1000000)
87         datetime.append(datetime[i]+delta)
88 #####
89 #Parte de Callisto
90 #####
91 file_path=[]
92 for file in os.listdir('./'):
93     if file.endswith(".fit"):
94         file_path.append(file)
95
96 callisto=[]
97 t_callisto=[]
98 findex0=89
99 findex1=98
100 for f in file_path:
101     fl = fits.open(f)
102     data = fl[0].data
```

```

103     axes = fl[1]
104     header = fl[0].header
105     time= axes.data['time'][0]
106     frequencies = axes.data['frequency'][0]
107     start = _parse_header_time( header['DATE-OBS'], header.get('TIME-
OBS',header.get('TIME$OBS')))
108     end = _parse_header_time(header['DATE-END'], header.get('TIME-END'
, header.get('TIME$END')))
109     start_time = header.get('TIME-OBS',header.get('TIME$OBS'))
110     start_object = dt.datetime(year = int(yyyy),month=int(m),day=int(d
),hour=int(start_time[0:2]),minute=int(start_time[3:5]),second=int(
start_time[6:8]),microsecond=1000*int(start_time[-3:]))#chechar tiempo
de inicio
111
112     x_time=[]
113     delta = dt.timedelta(microseconds=((time[1]-time[0])*1000000))
114     x_time.append(start_object+delta)
115     for i in range(len(time)):
116         if i==len(time)-1:
117             break
118         else:
119             delta = dt.timedelta(microseconds=(time[i+1]-time[
i])*1000000)
120             x_time.append(x_time[i]+delta)
121     light_curve=[]
122     exclude=[]
123
124     for index in range(len(data[0])):
125         suma=0.0
126         for j in range(findex0, findex1):#131,133 #(126,138)para
ver frecuencias de puschino
127             suma = suma + data[j][index]
128             callisto.append((suma)) # se resta para poner la senal
de ruido de Callisto a 0
129             t_callisto.append(x_time[index])
130

```

```
131
132 call=[]
133 mexart=[]
134 fcall=[]
135 fmex=[]
136
137 for i in mex_v:
138     fmex.append(floor(i))
139 for i in callisto:
140     fcall.append(floor(i))
141 bgmex=int(mode(fmex)[0])
142 bgcall=int(mode(fcall)[0])
143 for i in mex_v:
144     mexart.append((i-bgmex)) #
145     #####
146 for i in callisto:
147     call.append((i-bgcall)) #
148     #####
149
150 labelchain='callisto_['+'%.1f' % frequencies[findex1]+'_-'+'%.1f' %
151     frequencies[findex0]+'_MHz]'
152 fig = plt.figure()
153 ax = fig.add_subplot(1,1,1)
154 plt.plot(t_callisto, call, 'r', label=labelchain, linewidth=1.5)
155 plt.plot(datetime, mexart, 'b', label='MEXART_[138.6-140.6_MHz]', linewidth
156     =0.5)
157 ax.xaxis.set_major_formatter(dates.DateFormatter('%H:%M:%S'))
158 plt.xticks(rotation=45)
159 plt.legend()
160 plt.title('MEXART+_CALLISTO_'+yyyy+'-'+'mm+'-'+'d)
161 plt.xlabel('UTC_time')
162 plt.ylabel('intensity')
163 plt.subplots_adjust(bottom=.2)
164 plt.grid()
165 plt.show()
```

Código A.2: Este script calcula el ruido de fondo de una curva de luz.

```
1 #!/usr/bin/env python
2 import os
3 from readcol import fgetcols
4 import numpy as np
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 from astropy.io import fits
7 import matplotlib.pyplot as plt
8 import sunpy.spectra
9 from sunpy.spectra.sources.callisto import CallistoSpectrogram
10
11 path = [ 'MEXART_20160504_134500_59.fit ', 'MEXART_20160504_140000_59.fit ' ]
12 c0 = CallistoSpectrogram.read(path[0])
13 c1 = CallistoSpectrogram.read(path[1])
14 d = CallistoSpectrogram.join_many([c0,c1],maxgap = 5)
15
16 plt.figure()
17 bg = d.auto_const_bg() ##### Calculo de ruido
18 plt.plot(nobg.freq_axis, bg)
19 plt.xlabel("Frecuencias [MHz]")
20 plt.ylabel("Intensidad")
21 plt.title('Ruido de fondo del 04/05/2017')
22 plt.show()
```

Código A.3: Código en Perl para la transferencia de archivos de la computadora de Callisto al RICE.

```
1 #!/usr/bin/perl
2 use strict;
3 use warnings;
4 use File::Path;
5 use File::Copy;
6 use Net::FTP;
7
8 for( ; ; )
9 {
10 my @tnow = localtime(time());
```

```
11 my $today = sprintf("%04i %02i %02i", $tnow[5]+1900, $tnow[4]+1, $tnow[3])
12 ;
13 my $SourcePath = "C:/callisto/data"; # data source directory (FIT-
14 files)
15 my $DestinationPath = "C:/callisto/backup"; # data destination
16 directory (backup)
17 my $timedelay = 60; # seconds for checking files
18
19 opendir(ID, $SourcePath) || die("Couldn't find directory");
20 my @listing = readdir(ID);
21 closedir(ID);
22
23 foreach my $listing(sort @listing)
24 {
25     my $filename = $listing;
26     if ($filename =~ /^MEXART_(\d\d\d\d)(\d\d)(\d\d)_.*\.\.fit?$/)
27     {
28         my ($year, $mon, $day) = ($1, $2, $3);
29         if (! -d "$DestinationPath/$year/$mon/$day")
30         {
31             mkpath("$DestinationPath/$year/$mon/$day");
32         }
33         my $old = "$SourcePath/$listing";
34         print "\nSource: ", $old, " -> FTP-server copied... ",
35
36         my $new = "$DestinationPath/$year/$mon/$day";
37
38         #segmento que copia los archivos generados por Callisto a servidor
39         de Suiza
40         my $ftp = Net::FTP->new("ftpxchange.cs.technik.fhnw.ch", Timeout
=> 500, Passive => 1, Debug => 0);
41         $ftp->login("*****", "*****") or die "Cannot login", $ftp->
42 message;
43         $ftp->binary();
44         $ftp->put($old);
45         $ftp->quit;
```

```

41
42     #segmento que copia los archivos al servidor de geofisica
43     my $ftpveso = Net::FTP->new("www.veso.unam.mx", Timeout => 500,
Passive => 1, Debug => 0);
44     $ftpveso->login("*****","*****") or die "Cannot_login",
$ftpveso->message;
45     $ftpveso->binary();
46     $ftpveso->put($old);
47     $ftpveso->quit;
48
49
50     move($old,$new); # backup
51 }
52 }
53
54 sleep($timedelay);
55 }

```

Código A.4: Este programa que se ejecuta en el RICE ejecuta los programas auto_spectrum.py y auto_lightcurve.py, también mueve todos los archivos a sus respectivas carpetas. Si no existen las carpetas necesarias, estas son generadas.

```

1  #!/usr/bin/python
2
3  from os import listdir,walk
4  import os
5  import glob
6  import sys
7  from shutil import move,copyfile
8  import auto_spectrum_v01          #####modulo de espectro
9  import auto_lightcurve_v01       #####modulo de curva de luz
10
11  first_path="/vol0/MEXART_*.fit"
12  archives_path="/vol0/callisto/"
13  fileslist=sorted(glob.glob(first_path))
14  file_len=len(fileslist)
15

```

```
16 for i in range(file_len):
17     print fileslist[i]
18     s = fileslist[i].split('_',3)[1]
19     year= s[:4]
20     month=s[4:6]
21     day=s[6:]
22     subpath= year+"/"+month+"/"+day
23     path = archives_path + subpath
24     if not os.path.isdir(path):
25         os.makedirs(path)
26
27     spectrum=auto_spectrum_v01.spectrum(fileslist[i])
28     lightcurve=auto_lightcurve_v01.callisto_analysis(fileslist[i])
29
30     #intentar mover la curva de luz
31     try:
32         lightcurve_file = lightcurve.graph_data()
33         if (i == file_len -1):
34             copyfile(lightcurve_file , archives_path+'/lastest-callisto-
35 lightcurve.png')
36             move(lightcurve_file ,path)
37             print 'lightcurve_of_'+fileslist[i]+'copied'
38     except: #atrapar *todas* las excepciones
39         e= sys.exc_info() [0]
40         print e
41     #intentar mover el espectro
42     try:
43         spectrum_file=spectrum.make_spectrum()
44         if (i == file_len -1):
45             copyfile(spectrum_file , archives_path+'/lastest-callisto-
46 spectrum.png')
47             move(spectrum_file ,path)
48     except: #atrapar *todas* las excepciones
49         e= sys.exc_info() [0]
50         print e
51     #Intentar mover el archivo FIT
```

```

50     try:
51         move(fileslist[i], path)
52         print fileslist[i]+'copied'
53     except:
54         e= sys.exc_info() [0]
55         print e

```

Código A.5: Este script produce una imagen PNG con la gráfica del espectro de Callisto.

```

1  import matplotlib
2  matplotlib.use('Agg')
3  import os
4  from readcol import fgetcols
5  import numpy as np
6  from math import fmod
7  from math import exp
8  import matplotlib.pyplot as plt
9
10 from astropy.io import fits
11
12 import matplotlib.pyplot as plt
13 import sunpy.spectra
14
15 from sunpy.spectra.sources.callisto import CallistoSpectrogram
16 class spectrum:
17     def __init__(self, path):
18         self.path = path
19         print "hay_datos"
20
21     def make_spectrum(self):
22
23         path=self.path
24         save_path=path[:-29]
25         s = path[-22:-7]
26         #print s
27         year= s[:4]

```

A. APÉNDICE

```
28     month=s [4:6]
29     day=s [6:8]
30     hour=s [-6:]
31     date=year+month+day+'_'+hour
32     fig=plt.figure()
33     c0 = CallistoSpectrogram.read(self.path)
34
35     d = CallistoSpectrogram.join_many([c0])
36     d.plot(vmin=140)
37     plt.savefig(save_path+"spectrum"+date+'.png',format='png')
38     return save_path+"spectrum"+date+'.png'
```

Código A.6: Este script produce una imagen PNG con la gráfica de la curva de luz de Callisto.

```
1 #MODIFICATIONS LOG
2 #2016/10/11 @elizandro modification in legend text.
3 #2017/04/27 @elizandro callisto alert implemented
4 #
5 #
6 import matplotlib
7 matplotlib.use('Agg')
8 from Pysolar.solar import *
9 from astropy.io import fits
10 import numpy as np
11 from sunpy.time import parse_time
12 import datetime as dt
13 from datetime import time, date, datetime
14 import matplotlib.pyplot as plt
15 from matplotlib import dates
16 import simplejson as sj
17 from scipy import stats
18 from matplotlib.font_manager import FontProperties
19 from callistoalert import callistoalert
20
21
22 class callisto_analysis:
```

```

23     def __init__(self, path):
24         self.path=path
25
26         self.fl = fits.open(self.path)#chechar que evento se esta
analizando
27         self.file_name=self.path[-29:]
28         axes = self.fl[1]
29         self.time= axes.data['time'][0]
30         self.bandwith=self.fl[0].data
31         self.cuota=100
32         self.tolerance=0.1
33         self.header = self.fl[0].header
34         self.n_sigma = 5.0
35         self.integral=[]
36         print 'callisto_analysis'
37
38     def signal_integration(self):
39         bandmeans=[]
40         spec_matrix=self.bandwith
41         band_range=range(len(spec_matrix))
42         time_range=range(len(self.time))
43         medios 2
44
45         for i in band_range:
46             new_band=spec_matrix[i]//1
47             band_mode=stats.mode(new_band)
48             mean_feeders=[]
49
50             for j in time_range:
51                 if new_band[j]==float(band_mode[0]):
52                     mean_feeders.append(spec_matrix[i
53 ] [j])
54
55                     bandmeans.append(np.mean(mean_feeders))
56
57         spectrum=[]
58         axes = self.fl[1]

```

```
57         frequencies = axes.data['frequency'][0]
58         #for i in range(len(frequencies)):
59         #     print '%i %f'%(i,frequencies[i])
60
61         band_exclude_clean=[]
62         for i in range(190,200):
63             band_exclude_clean.append(frequencies[i])
64         dirty_canals
65         =[20,19,56,75,61,62,66,67,68,70,99,100,102,106,107,109,111,124,125,126,127,128,
66         129,130,131,132,133,134,135,136,137,138,139,140,141,142,143,144,145,146,147
67         ,148,149,150,151,156,152,160,161,169,175,181]
68         for i in dirty_canals:
69             band_exclude_clean.append(frequencies[i])
70
71         light_curve=[]
72
73         for i in range(len(self.bandwith[0])):
74             suma=0.0
75             for j in range(200):#131,133
76                 if frequencies[j] not in
77                 band_exclude_clean:
78                     suma = suma + self.bandwith[j][i]
79             - bandmeans[j]
80
81             light_curve.append(suma)
82         return light_curve
83
84     def window_rms(self,integral, window_size=100):
85
86         integral2 = np.power(integral,2)
87         window = np.ones(window_size)/float(window_size)
88         rmslist= np.sqrt(np.convolve(integral2, window, 'valid'))
```

```

88
89         return np.mean(rmslist)
90
91     def cero(self, integral):
92         corte=[i//10 for i in integral]
93         xarr=[]
94         for i in range(len(corte)):
95             if corte[i]==stats.mode(corte)[0]:
96                 xarr.append(integral[i])
97             else:
98                 pass
99         cero=np.mean(xarr)
100        return cero
101
102
103     def movingaverage(self, interval, window_size):
104         window = np.ones(int(window_size))/float(window_size)
105         return np.convolve(interval, window, 'same')
106
107     def graph_data(self):
108         start_time = self.header.get('TIME-OBS',self.header.get('
109         TIMES_OBS'))
110         start_object = datetime.strptime(self.file_name[7:15]+'_' +
111         str(start_time)+'000', '%Y%m%d_%H:%M:%S.%f')#chechar tiempo de inicio
112         x_time=[]
113         delta = dt.timedelta(microseconds=((self.time[1]-self.time
114         [0])*1000000))
115         x_time.append(start_object+delta)
116         for i in range(len(self.time)):
117             if i==len(self.time)-1:
118                 break
119             else:
120                 delta = dt.timedelta(microseconds=(self.
121         time[i+1]-self.time[i])*1000000)
122                 x_time.append(x_time[i]+delta)

```

```

120         integral=self.signal_integration()
121
122         #####calculando piso de la senal
123         cero=self.cero(integral)
124
125         fig = plt.figure()
126         ax = fig.add_subplot(1,1,1)
127         #####Conversion a voltaje y calculo de
rms y senal suavizada
128         V = [((x-cero)/255.0 * 2500.0) for x in integral]
        ##se hace una resta para trasladar la base de la grafica a Y=0
129         I_avg=self.movingaverage(V,10)
130         rms=self.window_rms(I_avg)
131         I_avg = I_avg.tolist()
132
133         ##### Calculo de senal/ruido
134         maximo = max(I_avg)
135         maxindex = I_avg.index(maximo)
136         tmax = str(x_time[maxindex])[10:-7]
137         print tmax, type(tmax)
138         StoN = maximo/rms
139         legend_text="RMS=_" + str(rms)[:7] + ", S/N=_" + str(
StoN)[:5]
140         #print legend_text
141
142
143         plt.plot(x_time,V)#(x_time, I, linewidth=2)#x_time
144         plt.plot(x_time, I_avg, color='red', linewidth=3, label=
legend_text)#cambiar S/N
145         plt.legend(loc='upper_right')
146         #ax.xaxis.set_major_locator(dates.MinuteLocator(interval
=1))
147         ax.xaxis.set_major_formatter(dates.DateFormatter('%E%M'))
        #'%S'))
148
149         path=self.path

```

```

150         save_path=path[: -29]
151         s = path[-22:-7]
152         year= s[:4]
153         month=s[4:6]
154         day=s[6:8]
155         hour=s[-6:]
156         #print save_path
157         date=year+month+day+'_' +hour
158
159         plt.title('Callisto_MEXART_flux_'+str(start_object)[:10]+'
160         .....(Preliminary)')
161         plt.xlabel('time')
162         plt.ylabel('mV')
163         plt.savefig(save_path+"lightcurve"+date+'.png',format='png
164     ')
165
166     return save_path+"lightcurve"+date+'.png'

```

Código A.7: Con este script se ejecuta cp-callisto_v04.py y controla el flujo de ejecución del mismo.

```

1  #!/bin/bash
2  # este programa ejecutara cp-callisto no sin
3  #antes revizar que se ha terminado de ejecutar el proceso anterior
4  #en tal caso, lo termina
5
6  for pid in $(pidof -x runcheck.sh); do
7      if [ $pid != $$ ]; then
8          echo "it_is_already_running"
9          exit 1
10         date -u
11     fi
12 done
13 /vol0/virtualenvs/callisto/bin/python /vol0/software/elizandrohd/cp-
14 callisto_v04.py > /vol0/cp-callisto-log.txt 2>&1
15 # la linea de arriba ejecuta el script cp-callisto_v04.py, los resultados
16 en texto de esa ejecucion se guardan en cp-callisto-log.txt

```

Código A.8: Este script grafica espectros de Callisto puede contrastar los eventos de radio quitando el ruido promedio a cada frecuencia.

```
1  #!/usr/bin/env python
2  #sistema de deteccion de estallidos de radio del lance SIDESTRAL (o del
    sciesmex sidestras)
3  import os
4  from readcol import fgetcols
5  import numpy as np
6  from math import fmod
7  from math import exp
8  import matplotlib as mpl
9  import matplotlib.pyplot as plt
10 from astropy.io import fits
11 import datetime as dt
12 from datetime import time, date, datetime
13 from matplotlib import dates as mdates
14 import matplotlib.ticker as ticker
15 from matplotlib.dates import AutoDateLocator
16
17 mpl.rcParams["savefig.directory"] = './'
18 #####
19 #parametros del archivo
20 #####
21 files =raw_input('escribe la url del espectro Callisto...')
22 xtime=[]
23 specs=[]
24 fl = fits.open(files)
25 file_name=files[-29:]
26 axes = fl[1]
27 time= axes.data['time'][0]
28 spectrum=fl[0].data
29 header = fl[0].header
30 freqs = axes.data['frequency'][0]
31 start_time = header.get('TIME-OBS',header.get('TIMES-OBS'))
32 start_object = datetime.strptime(file_name[7:15]+'_'+str(start_time)+'000'
    , '%Y%m%d_%H:%M:%S.%f')#chechar tiempo de inicio
```

```

33 delta = dt.timedelta(microseconds=((time[1] - time[0]) * 1000000))
34 xtime.append(start_object+delta)
35 for i in range(len(time)):
36     if i==len(time)-1:
37         break
38     else:
39         delta = dt.timedelta(microseconds=(time[i+1]-time[i])
40                               *1000000)
41         xtime.append(xtime[i]+delta)
42
43 print type(spectrum)
44 #####
45 #transformacion del espectro
46 #####
47 nobgdata = spectrum - spectrum.mean(axis=1, keepdims=True) + 4
48 nobgdata = nobgdata.clip(-5,120) # limit peak values
49 data = spectrum.clip(130,200)
50 nobgdata = nobgdata * 2500.0/255.0/25.4 # digit ->dB
51 data = data * 2500.0/255.0/25.4
52
53 fig = plt.figure()
54 ax = fig.add_subplot(111)
55 x_lims = mdates.date2num(xtime)
56 plt.imshow(nobgdata[:, :192], extent=[x_lims[0], x_lims[-1], round(freqs
57     [-9], 2), round(freqs[0], 2)], aspect='auto', cmap='jet', vmin=0, vmax=10)
58 ax.xaxis_date()
59 date_format = mdates.DateFormatter('%H:%M:%S')
60 ax.xaxis.set_major_formatter(date_format)
61 plt.xlabel('Time [UT]')
62 plt.ylabel('Frequency [MHz]')
63 ax.tick_params(axis='x', labelsize=14)
64 ax.tick_params(axis='y', labelsize=14)
65 plt.xticks(rotation=40)
66 plt.subplots_adjust(bottom=.2)
67 plt.subplots_adjust(left = .2)
68 plt.title('MEXART_Radio_flux_density_' + str(start_object)[:10])

```

A. APÉNDICE

```
67 plt.grid (linewidth=0.3, linestyle='--', color='black')
68 plt.show()
```

Referencias

- Carrillo, A. (2007). *Construcción y calibración del radiotelescopio de centelleo interplanetario, mexart* (Tesis Doctoral no publicada). Tesis Doctoral, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México. [XII](#), [XII](#), [XII](#), [XIII](#), [XIII](#), [XIII](#), [23](#), [31](#), [33](#), [34](#), [41](#), [47](#)
- Center, S. W. P. (2018, Mayo). *Alerts, watches and warnings*. <https://www.swpc.noaa.gov/products/alerts-watches-and-warnings>. (Accesado el 2018-05-28) [XV](#), [XV](#), [XV](#), [72](#), [73](#)
- Chang Martínez, T. O. (2017). *Estudio de estructuras en el viento solar utilizando observaciones de centelleo interplanetario* (Tesis Doctoral no publicada). Tesis Doctoral, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México. [34](#)
- Corona-Romero, P., Gonzalez-Esparza, J., Aguilar-Rodriguez, E., De-la Luz, V., y Mejia-Ambriz, J. (2015). Kinematics of icmes/shocks: blast wave reconstruction using type-ii emissions. *Solar Physics*, *290*(9), 2439–2454. [17](#)
- Create, C. (s.f.). Instruction manual clp 5130-1 [Manual de software informático]. [XII](#), [XII](#), [XII](#), [26](#)
- Cuadro nacional de atribución de frecuencias*. (2017, Mar). Descargado de <http://ucsweb.ift.org.mx/tarifasrpc/upload/files/cuadronacional/17068.170419210931.3003.pdf> (Accesado el 2018-03-30) [40](#)
- Dvb antenna design and matching with antenna magus, optenni lab and feko*. (2017, Dec). Descargado de <https://insider.altairhyperworks.com/dvb-antenna-design-matching-antenna-magus-optenni-lab-feko/> [XII](#), [XII](#), [XII](#), [27](#)
- Elgaroy, E. (1977). *Solar noise storms*(book). *Oxford and New York, Pergamon Press(International Series in Natural Philosophy., 90*. [XI](#), [XI](#), [XI](#), [16](#), [17](#)
- ESA, N. (2018, Mayo). *Heliviewer.org*. <https://heliviewer.org/>. (Accesado el 2018-05-28) [XV](#), [XV](#), [XV](#), [74](#)
- Gary, D. E., y Keller, C. U. (2004). *Solar and space weather radiophysics: current*

- status and future developments* (Vol. 314). Springer Science & Business Media. [13](#), [16](#), [17](#), [19](#)
- Gonzalez-Esparza, J., De la Luz, V., Corona-Romero, P., Mejia-Ambriz, J., Gonzalez, L., Sergeeva, M., . . . Aguilar-Rodriguez, E. (2017). Mexican space weather service (sciesmex). *Space Weather*, *15*(1), 3–11. [4](#), [80](#)
- Gopalswamy, N., Kaiser, M., Thompson, B., Burlaga, L., Szabo, A., Lara, A., . . . Bougeret, J.-L. (2000). Radio-rich solar eruptive events. *Geophysical research letters*, *27*(10), 1427–1430. [17](#)
- Hamidi, Z., Abidin, Z., Ibrahim, Z., Monstein, C., Shariff, N., y Sabaghi, M. (2012). The beginning impulsive of solar burst type iv radio emission detection associated with m type solar flare. *International Journal of Fundamental Physical Sciences*, *2*(2), 29–31. [XII](#), [XII](#), [XII](#), [29](#)
- Hiraiso radio spectrograph*. (2018). Descargado de www.sunbase.nict.go.jp/solar/denpa/index.html (Accesado el 2017-11-28) [XII](#), [XII](#), [XII](#), [18](#)
- Lanzerotti, L. J. (2001). Space weather effects on technologies. *Space Weather*, 11–22. [11](#), [12](#), [16](#)
- Lanzerotti, L. J. (2004). Solar and solar radio effects on technologies. En *Solar and space weather radiophysics* (pp. 1–16). Springer. [3](#)
- Ley federal de telecomunicaciones y radiodifusión*. (2014, Junio). Descargado de [https://www.ucol.mx/content/cms/13/file/federal/LEY_FED_DE TELECOMUNICACIONES.pdf](https://www.ucol.mx/content/cms/13/file/federal/LEY_FED_DE_TELECOMUNICACIONES.pdf) (Accesado el 2018-03-30) [40](#)
- Lilensten, J. (2007). *Space weather: research towards applications in europe* (Vol. 344). Springer Science & Business Media. [1](#)
- Lobzin, V. V., Cairns, I. H., Robinson, P. A., Steward, G., y Patterson, G. (2009). Automatic recognition of type iii solar radio bursts: automated radio burst identification system method and first observations. *Space Weather*, *7*(4). [96](#)
- Mejía Ambriz, J. C. (2012). *Análisis de observaciones del mexart: bases para estudios de centelleo interplanetario* (Tesis Doctoral no publicada). Tesis Doctoral, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México. [XII](#), [XII](#),

XII, XIII, XIII, XIII, 32, 34, 36

- Meyer-Vernet, N. (2007). *Basics of the solar wind*. Cambridge University Press. 1, 9
- Miralles, M. P., y Almeida, J. S. (2011). The sun, the solar wind, and the heliosphere. En *The sun, the solar wind, and the heliosphere* (pp. 3–8). Springer. 1
- Monstein, C. (2015). Catalog of dynamic electromagnetic spectra. *Physics, Astron. Electron. Work Bench*, 1–16. 46, 50
- Monstein, C. (2018, Mayo). *e-callisto international network of solar radio spectrometers*. <http://www.e-callisto.org/>. (Accesado el 2018-05-28) 24, 96
- Möller, A. (2018, Mayo). *Goes x-ray flux archive*. http://www.polarlicht-vorhersage.de/goes_archive. (Accesado el 2018-05-28) xv, xv, xv, 72, 73
- Newkirk Jr, G. (1961). The solar corona in active regions and the thermal origin of the slowly varying component of solar radio radiation. *The Astrophysical Journal*, 133, 983. 15
- Nindos, A., Aurass, H., Klein, K.-L., y Trottet, G. (2008). Radio emission of flares and coronal mass ejections. *Solar Physics*, 253(1-2), 3. 5, 13, 18
- Ramaty, R., y Mandzhavidze, N. (1998). Solar flares: Gamma rays. *arXiv preprint astro-ph/9810089*. 2
- Reid, H. A. S., y Ratcliffe, H. (2014). A review of solar type iii radio bursts. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 14(7), 773. 2
- Robles, T. (2017, Octubre). *Clima espacial al servicio de la población*. <http://conacytprensa.mx/index.php/ciencia/universo/16669-clima-espacial-servicio-poblacion>. (Accesado el 2018-05-02) 5, 23
- Rohlfs, K., y Wilson, T. (2013). *Tools of radio astronomy*. Springer Science & Business Media. xi, xi, xi, 9, 10, 11, 12, 95
- Sws - data display and download - spectrograph*. (2018). Descargado de www.sws.bom.gov.au/World_Data_Centre/1/9/9 (Accesado el 2017-11-28) xi, xi, xi, xii, xii, xii, 17, 19
- Tower-mounted amplifier assembly*. (s.f.). reeve. Descargado de <http://www.reeve.com/Solar/e-CALLISTO/e-callistoTMA-1.htm> (Accesado el 2018-02-20) xii,

[XII](#), [XII](#), [28](#)

Villanueva Hernández, P. (2007). *Estudio de radiofuentes e interferencias captados por el mexart (tesis de licenciatura)* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Nacional Autónoma de México. [33](#)

Villanueva Hernández, P. (2009). *Observaciones de fuentes de radio detectadas en el mexart con una matriz de butler de 16 x 16 (tesis de maestría)* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Nacional Autónoma de México. [XIII](#), [XIII](#), [XIII](#), [33](#), [34](#), [35](#)

Warmuth, A., y Mann, G. (2005). The application of radio diagnostics to the study of the solar drivers of space weather. *Space Weather*, 413–433. [XI](#), [XI](#), [XI](#), [XII](#), [XII](#), [XII](#), [2](#), [3](#), [10](#), [15](#), [16](#), [19](#), [20](#)

White, S. M. (2007). Solar radio bursts and space weather. *Asian Journal of Physics*, 16, 189–207. [2](#), [3](#), [16](#)