



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA  
CIENCIAS ATMOSFÉRICAS, ESPACIALES Y PLANETARIAS

**DETERMINACIÓN DE LA REGIÓN DE EMISIÓN DE  
RADIO TIPO II EN FRENTE DE CHOQUES  
INTERPLANETARIOS**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**Maestra en Ciencias de la Tierra**

PRESENTA:  
**Griselda Barón Martínez**

**DIRECTOR DE TESIS:**  
Dr. Ernesto Aguilar Rodríguez  
Instituto de Geofísica Unidad Michoacán

**COMITÉ TUTOR:**  
Dr. Pedro Corona Romero  
SCiESMEX, Instituto de Geofísica Unidad Michoacán  
Dr. Julio César Mejía Ambriz  
SCiESMEX, Instituto de Geofísica Unidad Michoacán

Morelia, Michoacán, noviembre 2020



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.



## CÓDIGO DE ÉTICA

*“Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales”.*



---

Griselda Barón Martínez



# Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Ernesto Aguilar Rodríguez, por aceptar asesorarme cuando cambié mi proyecto de investigación. Su apoyo y confianza en mi trabajo ha sido un aporte invaluable en el desarrollo de esta tesis. Gracias por el tiempo, las ideas y enseñanzas.

También quiero agradecer a mi jurado por sus valiosos comentarios, los cuáles me ayudaron a mejorar mi trabajo. Muchas gracias Dra. Esmeralda Romero, Dr. Julio César Ramírez Vélez, Dr. Pedro Corona Romero y Dr. Mario Rodríguez; por tomarse el tiempo de revisar detalladamente la presente tesis.

Gracias al Dr. Pedro Corona Romero y al Dr. Julio César Mejía Ambriz por formar parte de mi comité de evaluación en mi segundo año de maestría, por las ideas y sugerencias para mi proyecto de investigación.

Gracias al Dr. Luis Xavier González Méndez por la asesoría en el primer año de maestría, por su apoyo en la transición de cambio de proyecto de investigación, por sus consejos y sobretodo por su amistad. Al Dr. José Francisco Valdés Galicia, Dra. Maravilla Meza y Dra. Tatiana Niembro; por su paciencia y dedicación en las clases de Física Espacial.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por todo lo que me ha brindado, por la excelente educación y por la gran calidad de sus profesores. A Conacyt por haber financiado mis estudios de maestría otorgándome una beca.

Gracias a mis amigos y a todas las personas que, ya sea de manera directa o indirecta, han sido partícipes de este proceso. A mis amigos de la maestría, Shaden y Donovan, por los momentos compartidos en el cubo. A mis compañeros del IGUM por hacer los días más divertidos, especialmente a Carlos, Made y Viry por su amistad.

Finalmente, gracias a mis padres, a mis hermanas y hermanos por el apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de mi vida.



# Resumen

Los estallidos de radio Tipo II son considerados la firma característica de ondas de choque que se propagan hacia afuera del Sol, a través de la corona solar y el medio interplanetario. En el espectro dinámico se observan como bandas de emisión de deriva lenta hacia bajas frecuencias. Esta deriva descendente sugiere que la fuente donde se lleva a cabo este tipo de emisión se encuentra en la atmósfera solar baja. Cuando se convierte la razón de cambio de frecuencia a una velocidad vertical, se obtienen valores en un rango de 400 a 2000 km/s, que exceden la velocidad de Alfvén correspondiente a estas alturas. Por lo tanto, se considera que es una onda de choque, generada por una fulguración o una eyección de masa coronal (EMC), la que inicia el estallido de radio Tipo II (Aguilar-Rodríguez, 2006; Nindos et al., 2011). Hay una controversia sobre la región del choque donde es emitido el estallido Tipo II. Algunas teorías postulan que la emisión se origina en la región comprimida, río abajo del choque (Krall and Smith, 1975; Lampe and Papadopoulos, 1977). Mientras que otras teorías consideran que proviene del plasma no perturbado, río arriba del choque (Holman and Pesses, 1983; Krasnoselskikh et al., 1985; Cairns, 1986). La motivación de esta tesis es determinar si el problema de la localización de la región fuente de las emisiones de radio Tipo II se reduce a estos dos escenarios o existe la posibilidad de que ambos escenarios sean válidos pero en distintas condiciones. Para llevar a cabo este trabajo, se seleccionaron eventos con observaciones in situ de las regiones fuente de los estallidos Tipo II, usando datos de *Wind* entre los años 1997 a 2012. Se encontraron siete eventos con actividad de ondas de Langmuir, considerada en Bale et al. (1999) como la región de emisión de este tipo de estallidos. Posteriormente, se determina la localización de la emisión de radio Tipo II comparando densidades de estas regiones con las densidades del viento solar ambiente. Para calcular las densidades en el viento solar ambiente, río arriba de cada choque, se usó un modelo de densidad para extrapolar las densidades del viento solar medidas a 1 UA. Finalmente, se compararon los resultados del modelo de densidad con las observaciones in situ de la región fuente de emisión de los estallidos Tipo II.

# Abstract

Type II radio bursts are considered the characteristic signature of shock waves that propagate outward from the Sun, through the solar corona and the interplanetary medium. In the dynamic spectra is observed as slow drift emission bands towards low frequencies. This downward drift suggests that the source of this type of emission is in the lower solar atmosphere. When the rate of change of frequency is converted to a vertical speed, values in a range of 400 to 2000 *km/s* are obtained, which exceed the Alfvén speed corresponding to these heights. Therefore, it is considered that it is a shock wave, generated by a flare or a coronal mass ejection (CME), that initiates the Type II radio burst (Aguilar-Rodríguez, 2006; Nindos et al., 2011). There is a controversy concerning the region of the shock where the Type II burst is emitted. Some theories postulate that the emission originates in the compressed region, downstream (Krall and Smith, 1975; Lampe and Papadopoulos, 1977). While other theories consider that it comes from the undisturbed plasma, upstream region (Holman and Pesses, 1983; Krasnoselskikh et al., 1985; Cairns, 1986). The motivation of this thesis is to determine if the problem of locating the source region of Type II radio emissions is reduced to these two scenarios or there is the possibility that both scenarios are valid but different conditions. To carry out this work, events with in situ observations of the source regions of Type II bursts were selected, using Wind data between the years 1997 to 2012. Seven events with Langmuir wave activity were found, considered in Bale et al. (1999) as the emission region for Type II bursts. Subsequently, the location of the Type II radio emission is determined by comparing densities in these regions with the densities of the ambient solar wind. To calculate the densities in the ambient solar wind upstream from each shock, a density model was used to extrapolate the measured solar wind densities at 1 AU. Finally, the results of the density model were compared with in situ observations of the emission source region of Type II bursts.

# Índice General

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Hipótesis . . . . .	4
1.2	Motivación . . . . .	4
1.3	Objetivo . . . . .	5
1.4	Estructura de la tesis . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Emisiones de Radio Solares</b>	<b>7</b>
2.1	Emisión Bremsstrahlung (libre-libre) . . . . .	7
2.2	Giroemisión . . . . .	8
2.3	Emisión de plasma . . . . .	9
2.3.1	Ondas de Langmuir . . . . .	9
2.4	Estallidos de radio solares . . . . .	9
2.4.1	Estallidos Tipo I . . . . .	10
2.4.2	Estallidos Tipo III . . . . .	11
2.4.3	Estallidos Tipo IV . . . . .	11
2.4.4	Estallidos Tipo V . . . . .	12
2.4.5	Estallidos Tipo II . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Metodología</b>	<b>15</b>
3.1	Selección de eventos . . . . .	15
3.2	Análisis de los eventos . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Análisis y resultados</b>	<b>27</b>
4.1	Discusión . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>35</b>
<b>A</b>	<b>Resultados de la regresión BW</b>	<b>37</b>
	<b>Referencias</b>	<b>43</b>



# Introducción

En términos astronómicos, el Sol se clasifica como una estrella de tipo espectral G2 y clase de luminosidad V: una estrella "G2V". Es decir, el Sol es una estrella enana amarilla, con temperatura superficial de 5780 K, compuesta esencialmente por Hidrógeno y Helio; que representan el 74.9% y el 23.8% de la masa del Sol en la fotosfera. El resto de la materia está constituido de Oxígeno, Carbono, Hierro, Neón, Nitrógeno, Silicio, Magnesio, Azufre, entre otros elementos (*The Sun's Vital Statistics*).

El Sol no es más que una de miles de millones de estrellas que hay en el Universo, pero para nosotros es la más importante. Mediante la radiación electromagnética, aporta directa o indirectamente toda la energía que mantiene la vida en la Tierra. Nuestra estrella ha sido objeto de curiosidad y estudio para todas las civilizaciones a lo largo de la Historia. En la mitología de muchas culturas el Sol era considerado un dios y le dedicaron monumentos para honrarlo y venerarlo.

El Sol es el objeto más brillante de nuestro cielo. Es evidente que está muy lejos, entonces ¿cómo es que podemos saber algo sobre un objeto que está lejos y es extremadamente caliente? La respuesta es que la información está en la luz. La espectroscopía nos permite analizar la luz solar en detalle y así aprender sobre los elementos que componen el Sol y sus estados físicos (Golub and Pasachoff, 2002). El primer antecedente de esta técnica se dio en el siglo XVII cuando los experimentos de Newton mostraron que la luz blanca del Sol, al pasar por un prisma de vidrio, se dispersa en los colores del arcoiris que constituyen el espectro solar visible. De las mediciones corregidas por la absorción atmosférica de la Tierra, ahora sabemos que aproximadamente el 40% de la salida radiativa del Sol se encuentra en el rango de longitudes de onda visible para el ojo humano, entre aproximadamente 380 nm y 700 nm. La radiación ultravioleta de  $\lambda \leq 380$  nm representa un 7% adicional de la salida, y más de la mitad de la potencia del Sol (medida por encima de la atmósfera de la Tierra) se encuentra en el infrarrojo. Las longitudes de onda de rayos X (por debajo de 100 Å) y las ondas milimétricas y de radio hacen una contribución insignificante (Foukal, 2008).

Aunque Maxwell había descrito el espectro electromagnético a mediados del siglo XIX, el estudio del universo estuvo limitado a la luz visible hasta el siglo XX. La atmósfera terrestre bloquea

gran parte de la radiación que es emitida más allá del ultravioleta y del infrarrojo y, por otro lado, los astrónomos no disponían de la tecnología necesaria para construir detectores en rangos del espectro electromagnético distintos del óptico. Esta situación cambió cuando, en 1931, Karl Jansky descubrió ondas de radio que procedían de la Vía Láctea. Este descubrimiento fue continuado por Grote Reber, quien en 1937 construyó un radiotelescopio parabólico de 9 m de diámetro en el jardín de su casa y produjo un rudimentario mapa del cielo en el que identificó varias fuentes de radio. Gracias a su trabajo, después de la segunda guerra mundial, muchos científicos empezaron a construir antenas más grandes y mejores para estudiar el universo (*El nacimiento de la Radioastronomía, Radio Astronomy Tutorial*). Desde antes de que el campo de la radioastronomía fuera fuertemente impulsado, el Sol fue el primer objeto astronómico que los científicos consideraron como una fuente de ondas de radio; por ser el cuerpo energético más cercano a la Tierra. Sin embargo, muchas de las primeras investigaciones no tuvieron éxito. El primer intento registrado en detectar ondas de radio del Sol fue realizado por Thomas Alva Edison en 1890 (*Historia de la Radio Astronomía*).

La primera observación de emisión de radio del Sol fue realizada en 1942 por James S. Hey. Él estaba trabajando con el Grupo de Investigación Operativa del ejército británico analizando todos los casos de interferencia en la estación de radar. Resultó que la fuerte señal de ruido eran emisiones de ondas de radio del Sol, asociadas con un grupo de manchas solares. Casi simultáneamente, Southworth descubrió de manera independiente la emisión térmica del Sol en longitudes de onda centimétrica. Sin embargo, el primero en publicar la emisión de radio del Sol fue Grote Reber en 1944 (*Radio Astronomy Tutorial*).

Una vez que terminó la guerra, los astrónomos comenzaron a observar más al Sol y empezaron a descubrir muchas propiedades de éste; como los tipos de estallidos de radio, tormentas de ruido e incluso a establecer la relación entre los estallidos de radio y las fulguraciones solares (*El nacimiento de la Radioastronomía; Appleton and Hey, 1946*).

La emisión de radio del Sol tiene tres componentes distintas que se originan del Sol quieto, de regiones brillantes y de perturbaciones como las fulguraciones. La *componente del Sol quieto* es la radiación que se produce en ausencia de fuentes localizadas en el Sol, en el mínimo de manchas solares. Se debe a la emisión térmica que se origina en diferentes alturas de la atmósfera solar dependiendo de la longitud de onda. A longitudes de onda corta la radiación se origina en niveles más profundos (Krüger, 2012).

La componente que se origina en las regiones brillantes es la *componente que varía lentamente* y también se debe a la emisión térmica. Surge en regiones de alta densidad en la corona, existen sobre manchas solares y playas cromosféricas. El fuerte campo magnético de la mancha solar en los niveles más bajos de la atmósfera solar juega un papel importante en la generación

de radiación intensa desde estas regiones a longitudes de onda centimétricas. Aunque esta componente es más prominente en un rango de longitud de onda de 3 a 60 cm (Kundu, 1965).

La tercera componente consiste en los *estallidos de radio*. Estos generalmente se asocian con fulguraciones solares y se originan en todos los niveles de la atmósfera solar, entre la cromósfera inferior (ondas milimétricas y centimétricas) y la corona externa. Alcanzan temperaturas de brillo equivalentes a  $10^{12} K$  y se originan por bremsstrahlung, sincrotrón y emisión de plasma. Los estallidos ocurren en todas las longitudes de onda entre  $4 mm$  y  $40 m$ . Sin embargo, tienen propiedades muy diferentes en distintas longitudes de onda. Con base en sus características espectrales y temporales, los estallidos se han clasificado en varios tipos: Tipo I, II, III, IV y V (Kundu, 1965).

En esta tesis se da una breve introducción sobre la clasificación de los estallidos de radio solares (Capítulo 2). Principalmente se hablará de la emisión Tipo II, ya que el objetivo de este trabajo es estudiar la localización de la región en la que ésta es emitida relativa al choque interplanetario.

La ocurrencia de la emisión Tipo II es esporádica. Si bien, está asociada con fulguraciones y Eyecciones de Masa Coronal (EMCs), no todas las fulguraciones ni todas las EMCs vienen acompañadas de esta emisión. Por lo tanto, debe existir un conjunto de condiciones que favorezca la generación de los estallidos Tipo II. Es importante señalar que, cerca del Sol, se considera que la emisión puede ser producida por la onda explosiva asociada a la fulguración, o bien con la onda de choque impulsada por la EMC (Leblanc et al., 2001). Estudios recientes sugieren que la expansión de arcos magnéticos fuertemente inclinados, después de reconectarse con un flujo magnético cercano, actúa como un pistón para generar una onda de choque que eventualmente produce emisión Tipo II (Su et al., 2015). Otros estudios consideran que los flancos de la onda de choque impulsada por la EMC pueden ser responsables de esta emisión a longitudes de onda métricas (Feng et al., 2015). Por otro lado, a longitudes de onda decamétrica, hectométrica y kilométrica; hay una fuerte evidencia de que la onda de choque, impulsada por la EMC, es la encargada de producir este tipo de emisión (Cane et al., 1987; Reiner et al., 2001; Cliver et al., 2004). Es posible que se deba tomar en cuenta la estructura y características del medio que el frente de choque encuentra mientras se propaga. Esto nos da una idea de la complejidad del fenómeno.

Otro punto que ha sido motivo de controversia desde que la emisión Tipo II se descubrió en el año 1947, es el relacionado con la región del choque en la que ésta es emitida. Por un lado, existen trabajos teóricos que han postulado que la emisión se produce en la región de plasma comprimido, río abajo (downstream) de la onda de choque (Krall and Smith, 1975; Lampe and Papadopoulos, 1977). Por otro lado, están los trabajos que demuestran teóricamente que

la emisión proviene del plasma no perturbado, río arriba (upstream) del frente de choque (Holman and Pesses, 1983; Krasnoselskikh et al., 1985; Cairns, 1986). Posteriormente, con ayuda de las primeras misiones espaciales que llevaban consigo instrumentos de radio, se comenzaron a detectar estallidos de radio Tipo II en el rango de longitudes de onda kilométricas, que corresponden a distancias heliocéntricas alejadas del Sol . Esto permitió que se hicieran estudios observacionales que, con ayuda de modelos de densidad, permitieron inferir la región del choque en la que se consideraba podría provenir la emisión Tipo II. Chertok and Fomichev (1976) analizaron datos de IMP 6 para el estallido Tipo II del 7 de agosto de 1972; ellos concluyeron que la emisión proviene detrás del choque asociado. Más tarde, Grigoreva (1977) estudió ocho estallidos observados por los satélites Prognoz, encontró que la mitad de los estallidos mostraban evidencia de que la emisión proviene río arriba del choque y la otra mitad, de la región río abajo. Después, Lengyel-Frey (1992) estudió 20 estallidos interplanetarios tipo II. Utilizó un modelo de densidad del viento solar, derivado de las observaciones de los satélites Helios, y concluyó que la fuente de la emisión se localiza río abajo del choque. En este sentido, se publicaron trabajos que validaban los estudios teóricos de un escenario río abajo del frente de choque, río arriba de éste y además en ambos lados, incluyendo el choque en sí. Tuvimos que esperar al trabajo de Bale et al. (1999) en el que, por vez primera, se mostraba evidencia observacional, a través de la detección de ondas de Langmuir que aparecieron al mismo tiempo que los electrones acelerados por la onda de choque, río arriba de ésta. Sin embargo, este trabajo reconoce que los haces de electrones también pudieran penetrar la región río abajo del choque y generar la emisión Tipo II a una frecuencia de plasma mayor en esta región comprimida, que fue la conclusión de algunos trabajos observacionales como el de Lengyel-Frey (1992).

## 1.1 Hipótesis

El hecho de que diferentes estudios han mostrado que la región de emisión de los estallidos de radio Tipo II en los frentes de choque se localice río arriba o río abajo de éstos, se debe, posiblemente, a las características de los frentes de choques y las condiciones preexistentes del viento solar ambiente a través del cual se propagan.

## 1.2 Motivación

El propósito de este proyecto es determinar si realmente el problema de la localización de la región fuente de las emisiones de radio Tipo II se reduce a dos escenarios, región río arriba o región río abajo del frente de choque, o bien existe la posibilidad de que ambos escenarios sean válidos pero se presentan en diferentes condiciones. Esto permitiría tener un mejor

entendimiento del problema y aportaría información relevante en el estudio de las emisiones de radio Tipo II.

### 1.3 Objetivo

Determinar, mediante el análisis de observaciones de estallidos de radio Tipo II, plasma y campo magnético, así como también el uso de modelos de densidad del viento solar, qué factores son los que condicionan que la región fuente de la emisión de radio Tipo II se localice río arriba, río abajo y/o dentro de los frentes de choques.

### 1.4 Estructura de la tesis

La estructura de este trabajo tiene el siguiente orden

En el Capítulo 2 se explica brevemente los estallidos de radio solares, su clasificación, características principales y mecanismos de emisión. En el Capítulo 3 se presenta de manera detallada la metodología del proyecto, se muestran los eventos seleccionados para llevar a cabo el estudio planteado anteriormente, así como el modelo de densidad del viento solar y las técnicas aplicadas para inferir la región de emisión de radio Tipo II. En el Capítulo 4 se exponen análisis y resultados obtenidos en cada evento. Finalmente, en el Capítulo 5, se presentan las conclusiones del trabajo.



# Emisiones de Radio Solares

Después del descubrimiento de la emisión de radio solar en 1942, la radioastronomía solar impulsó la construcción de antenas de radio y espectrómetros en Europa, Estados Unidos, Japón, Rusia y Australia. Los espectrómetros de radio ampliaron su frecuencia desde longitudes de onda métricas a decimétricas, de microondas y milimétricas. Estos espectrómetros de radio son instrumentos que no son de imagen, pero proporcionan *espectros dinámicos* muy útiles. Un *espectro dinámico* es un gráfico de la intensidad de radio observada en función de la frecuencia y el tiempo.

Las observaciones de radio van desde la emisión en *Sol quieto* hasta fulguraciones, EMCs, y partículas interplanetarias. La emisión de radio se produce por distribuciones térmicas de partículas (emisión libre-libre), por partículas ligeramente relativistas (emisión de girosincrotrón), también por distribuciones de partículas anisotrópicas inestables, tales como haces de electrones (que producen emisión de plasma).

La emisión de radio se puede clasificar en *mecanismos de emisión coherente* y *mecanismos de emisión incoherente*. La emisión incoherente es el resultado de procesos continuos, como las distribuciones térmicas de partículas que se producen a través de *emisión libre-libre* en microondas y longitudes de onda mm. La *emisión coherente*, en contraste, ocurre por inestabilidades cinéticas de distribuciones de partículas inestables. Cuando una función de distribución de partículas  $f(v_{\parallel}, v_{\perp})$  evoluciona con una pendiente positiva ( $\partial f / \partial v_{\parallel} > 0$ ) en la dirección paralela al campo magnético, se le llama "*beam distribution*", y la protuberancia en dirección paralela impulsa la llamada *inestabilidad "bump-in-tail"* que produce *emisión de plasma* (Aschwanden, 2006).

## 2.1 Emisión Bremsstrahlung (libre-libre)

La emisión de radio de un plasma no perturbado es generado por *bremstrahlung* (emisión free-free), resultado de la interacción coulombiana de los electrones del plasma con iones, y por emisión giroresonancia de los electrones en presencia de un campo magnético. Este tipo de

emisión es predominante en regiones de Sol quieto, hoyos coronales y protuberancias (Gary and Keller, 2004).

## 2.2 Giroemisión

Como el parámetro  $\beta$  del plasma es  $< 1$  en la mayoría de las regiones coronales, obliga a los electrones a girar alrededor de las líneas del campo magnético. La fuerza ejercida por el campo magnético es la fuerza de Lorentz, que viene dada por:

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

donde  $q$  representa la carga del electrón,  $\mathbf{v}$  es la velocidad,  $\mathbf{E}$  es el vector intensidad de campo eléctrico y  $\mathbf{B}$  es el vector inducción magnética.

La frecuencia con que gira la carga (girofrecuencia) está dada por:

$$\omega_g = \frac{eB}{m_e},$$

donde  $e$  es la carga del electrón,  $B$  es la magnitud del campo magnético y  $m_e$  es la masa del electrón. Por lo tanto, dependiendo de la velocidad  $\mathbf{v}$  del electrón, en lugar de una emisión free-free tenemos:

- **Emisión Ciclotrón** para partículas no relativistas (con un factor de Lorentz  $\gamma \gtrsim 1$ ).
- **Emisión Girosincrotrón** en el caso de partículas medianamente relativistas.
- **Emisión Sincrotrón** para partículas relativistas ( $\gamma \gg 1$ )

Como no hay una reacción sobre la distribución de las partículas que componen al plasma, la salida de radiación es proporcional al número de partículas producidas, por lo tanto se llama *mecanismo de emisión incoherente*. La Giroemisión, es más eficiente en campo magnéticos intensos, por lo que se espera que dominen las emisiones de radio en las manchas solares (Aschwanden, 2006).

## 2.3 Emisión de plasma

La emisión de plasma es la generación de radiación que se escapa cerca de la frecuencia de plasma local o sus armónicos. La mayoría de los estallidos de radio solares, de longitudes de onda métricas, se interpretan en términos de emisión de plasma en el fundamental (F) o el segundo armónico (H). La emisión de plasma también se observa antes del choque de proa de la Tierra y de otros choques interplanetarios. Este tipo de emisión es un proceso que consiste de las siguiente etapas: (i) se produce una condición de inestabilidad debido a la propagación de un agente excitante a través de la corona que resulta en la generación de ondas de plasma a la frecuencia local del plasma ( $f_p$ ), (ii) estas ondas de plasma (ondas de Langmuir) se dispersan dando como resultado ondas electromagnéticas de aproximadamente la misma frecuencia a la que se propagan hacia el observador y se detectan como emisión fundamental (F). Dos ondas de plasma también pueden interactuar dando como resultado una onda electromagnética a la frecuencia  $2f_p$  que se observa como el componente armónico (H). La condición de inestabilidad se mantiene durante el tiempo que el agente pasa a través de una capa de plasma dada. Una vez que el agente abandona la capa, no hay más energía libre disponible, por lo que las ondas de plasma decaen al nivel térmico y termina la generación de radiación electromagnética (Mann and Classen, 1995; Gopalswamy, 2013).

### 2.3.1 Ondas de Langmuir

Las ondas de Langmuir, también conocidas como oscilaciones de la densidad de electrones en un plasma, corresponden a un modo fundamental de oscilación electrostática en un plasma. Pueden describirse cualitativamente considerando un plasma neutro en un volumen fijo y examinando la respuesta si todos los electrones se desplazan una pequeña distancia de su posición original. Surge una fuerza restauradora en forma de campo eléctrico generado por la separación de carga, y la oscilación resultante tiene la frecuencia característica  $f_p \sim 9000\sqrt{n}$  Hz (Pulupa, 2010).

## 2.4 Estallidos de radio solares

Los estallidos de radio son la tercera componente de las emisiones de radio del Sol. Estas perturbaciones se relacionan con eventos energéticos que se producen en todos los niveles de la atmósfera solar y alcanzan temperaturas de brillo de hasta  $10^{12}$  K. Se originan por bremsstrahlung, sincrotrón y radiación de plasma. Se clasifican en varios tipos de acuerdo a sus características espectrales y temporales, y tienen distintas características a diferentes longitudes de onda. Los estallidos en longitudes de onda centimétricas son los más simples, se manifiestan

por un rápido aumento de densidad, usualmente seguidos por una lenta declinación y son de naturaleza continua. Presentan polarización circular parcial, con temperatura de  $10^6$  a  $10^9$  K y densidad de flujo que incrementa conforme aumenta la frecuencia. Los estallidos en ondas decimétricas son más complejos. Muestran una gran variedad de fluctuaciones; los estallidos derivan a una tasa muy rápida hacia bajas frecuencias (Kundu, 1965).

Los estallidos de radio observados a distancias interplanetarias se conocen como estallidos decamétricos, hectométricos o kilométricos, dependiendo de la frecuencia observada. Los estallidos en longitudes de onda métricas o decamétricas se caracterizan por una gran variedad y complejidad. De acuerdo a sus características espectrales se clasifican en Tipo I, II, III, IV y V.

Son particularmente importantes los estallidos producidos por haces de electrones que se propagan a lo largo del campo magnético; estos estallidos contienen muchas piezas de información de la aceleración de electrones y mecanismos de propagación, de las características del haz y del medio ambiente. Aunque hay muchos tipos de estallidos, nuestro interés está en los estallidos Tipo II, ya que éstos son detectados a frecuencias interplanetarias.

### 2.4.1 Estallidos Tipo I

Los estallidos Tipo I, también conocidos como tormentas de radiación, son prominentes manifestaciones de actividad solar en longitudes de onda métricas; con frecuencias de 80 MHz hasta 400 MHz (Krucker et al., 1995). Son producidos por emisión de plasma y consisten de grandes series de estallidos, algunas veces acompañados de radiación continua. Durante los periodos de actividad intensa, pueden ocurrir cientos de tormentas cada hora, y la tormenta puede continuar durante varios días. La radiación tiene una polarización circular predominante y está asociada con manchas solares en regiones activas, pero no todas las manchas solares producen tormentas de ruido (Kundu, 1965). En la Figura 2.1 se muestra un ejemplo del espectro dinámico de un estallido Tipo I.

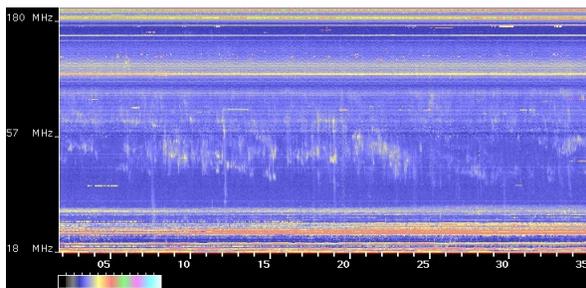
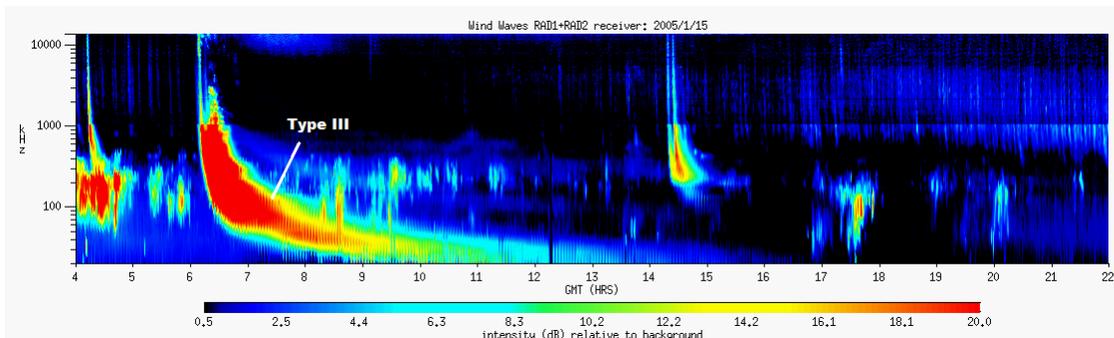


Fig. 2.1.: Tormenta Tipo I observado por el espectrógrafo de Culgoora.

## 2.4.2 Estallidos Tipo III

Los estallidos Tipo III se descubrieron por primera vez en el rango de frecuencia de 10 a 500 MHz y luego a frecuencias más bajas utilizando instrumentos de radio en el espacio (Wild and McCready, 1950). Los espectros de estos estallidos son muy variables, tanto en densidad de flujo como en rango de frecuencia. Muchos ocurren en una banda limitada de frecuencias, por ejemplo, algunos sólo ocurren en longitudes de onda decamétricas o más cortas, y otros sólo en longitudes de onda hectométricas o más largas. Se deben a haces de electrones que se propagan a lo largo de estructuras de campo magnético abiertas y excitan ondas de Langmuir a cada nivel de la corona y el medio interplanetario. A lo largo de su trayectoria generan emisión de radio a la frecuencia del plasma  $f = f_p$ , el segundo armónico ( $f = 2f_p$ ) o ambos (Dulk, 2000). Hay tres variantes de baja frecuencia de los estallidos Tipo III que se originan en el medio interplanetario (IP) (Gopalswamy, 2004a): (i) estallidos Tipo III aislados que se producen de las fulguraciones y liberaciones de energía a pequeña escala, (ii) estallidos Tipo III complejos que surgen durante EMCs, y (iii) tormentas Tipo III.

Los estallidos Tipo III tienen un espectro dinámico que se caracteriza por una frecuencia que deriva rápidamente con el tiempo. En contraste con los estallidos Tipo II que derivan lentamente hacia bajas frecuencias. En la Figura 2.2 se muestra un ejemplo de cómo se ve el estallido Tipo III en el espectro dinámico.



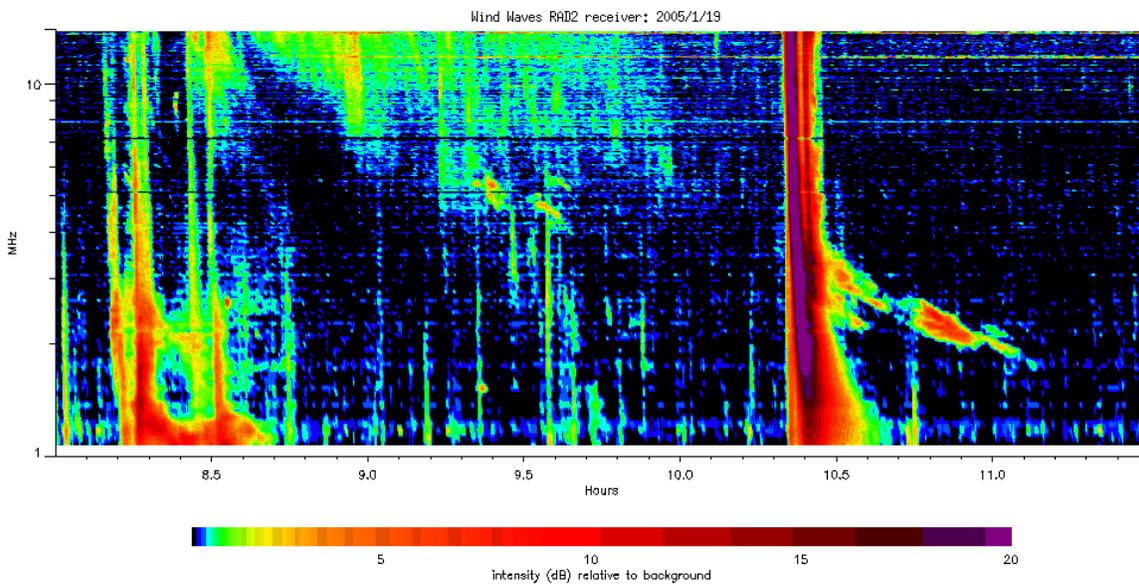
**Fig. 2.2.:** Espectro dinámico de un estallido Tipo III registrado por el instrumento de radio Wind/WAVES.

## 2.4.3 Estallidos Tipo IV

El estallido Tipo IV es una emisión continua, parcialmente polarizada y suave, que ocurre en un rango muy amplio de frecuencias, por debajo de 2 GHz, que van desde longitudes de onda centimétricas hasta hectométricas. Presenta tiempos de duración que van desde unos 10 minutos hasta unas cuantas horas. Las amplias diferencias en las características de este tipo

de eventos en diferentes longitudes de onda sugieren que se originan de diferentes fuentes. La fuente de Tipo IV en ondas métricas generalmente tiene un gran tamaño angular y una velocidad transversal inicial de unos pocos miles de km/s (Kundu, 1965).

Los estallidos Tipo IV de baja frecuencia no se han estudiado ampliamente porque la ventana de frecuencia en la que ocurren estuvo disponible después de la misión Wind en 1994. Gopalswamy (2004b) estudió un conjunto de 12 estallidos Tipo IV, en longitudes de onda decamétricas- hectométricas (DH), observados por Wind/WAVES durante 1997 a 2002. Descubrió que este tipo de estallidos son extensiones del continuo métrico, con una duración típica de  $\sim 2$  horas a 14 MHz y con la frecuencia más baja de  $\sim 7.7$  MHz. Este tipo de emisiones están asociadas con EMCs muy energéticas (velocidad promedio  $\sim 1200$  km/s) (Gopalswamy, 2004b).



**Fig. 2.3.:** Espectro dinámico de un estallido Tipo IV observado por Wind/WAVES el 19 de enero de 2005. La emisión comienza a las 08:45 TU, con una frecuencia inicial de 14000 kHz, y termina a las 09:55 TU, con una frecuencia final de 4500 kHz.

#### 2.4.4 Estallidos Tipo V

El estallido de radio Tipo V es una radiación continua de banda ancha después de un estallido Tipo III, ya sea como una prolongación difusa o como una gota desprendida a frecuencias no superiores a 200 MHz. Nunca ocurre de forma aislada (Krüger, 2012). Este fenómeno fue descrito por primera vez en Wild et al. (1959). La mayoría de sus propiedades son similares a los de Tipo III, excepto en la duración, la posición de la fuente y la falta de evidencia de la presencia de armónicos (Krüger, 2012).

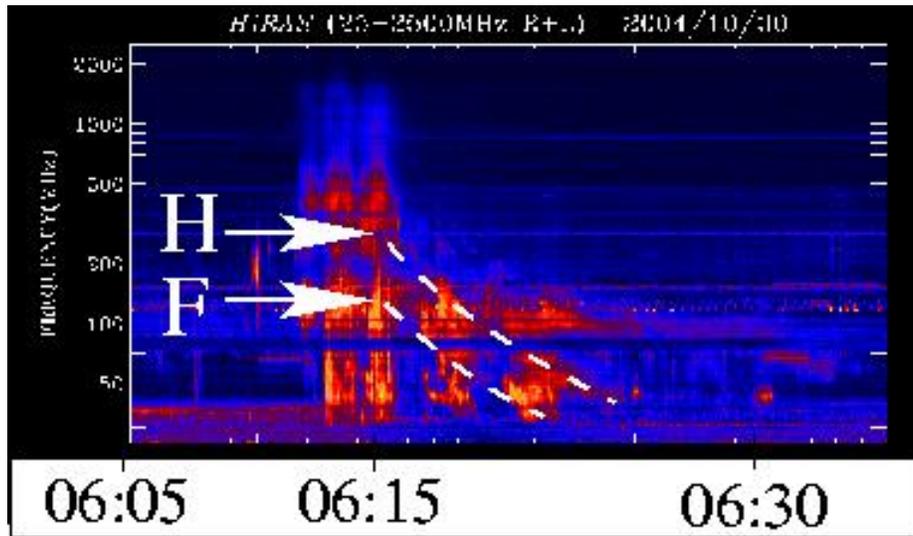
## 2.4.5 Estallidos Tipo II

Los estallidos de radio Tipo II son considerados la firma característica de ondas de choque que se propagan a través de la corona solar y el medio interplanetario. Se definen como un ancho de emisión electromagnética que presenta una deriva hacia bajas frecuencias mientras transcurre el tiempo (como se observa en la Figura 2.4). La radiación Tipo II se observa a frecuencias de radio más bajas a medida que el agente que la produce, en este caso la onda de choque, se aleja del Sol. Es generalmente aceptado que la frecuencia de emisión es aproximadamente igual a la frecuencia local del plasma ( $f_p$ ) o su armónico, la cual está relacionada con la densidad de electrones del plasma ambiente ( $n$ ) de la siguiente forma  $f[kHz] = 9\sqrt{n} [cm^{-3}]$ . La deriva de frecuencia, que resulta de la disminución de la densidad media del plasma interplanetario con el aumento de la distancia heliocéntrica, nos permite utilizar estas emisiones de radio para rastrear el sistema EMC/choque a través del medio interplanetario. Dependiendo del régimen de longitud de onda de la observación de emisiones Tipo II se agrupan en métricos (m), decamétricos/hectométricos (DH) y kilométricos (km). Las frecuencias iniciales a las que estos estallidos se observan están en el régimen de longitudes de onda métricas, alrededor de unos 150 MHz. Sin embargo, se han observado estallidos con frecuencias iniciales del orden de 500 MHz (Vršnak et al., 1995).

La primera identificación de los estallidos Tipo II fue realizada en 1947 por Payne-Scott et al. (1947) y luego Wild and McCready (1950) los clasificaron como estallidos Tipo II para diferenciarlos de los estallidos Tipo III, que tienen deriva rápida. En el medio interplanetario, la primera observación de la emisión Tipo II fue realizada por las sondas espaciales *Interplanetary Monitoring Platform IMP-6* y *Voyager*. Algunos estallidos Tipo II son observados por la nave espacial ISEE3 en el rango de frecuencia de 2 MHz a 30 kHz (Lengyel-Frey and Stone, 1989). Los datos sobre estallidos Tipo II en longitudes de onda DH provienen del experimento de ondas de radio y plasma (WAVES) a bordo de la nave espacial *Wind*, lanzada en 1994. El instrumento WAVES cuenta con varios receptores que cubren un rango de frecuencias entre 4.0876 kHz a 13.825 MHz. En este trabajo se usan datos de los instrumentos: *Thermal Noise Receiver* (TNR), el cual cubre el rango de frecuencias entre 4 kHz a 256 kHz; *Radio Receiver Band 1* (RAD1) de 20 kHz a 1040 kHz y el *Radio Receiver Band 2* (RAD2) de 1.075 MHz a 13.825 MHz (Bougeret et al., 1995). El rango de frecuencia en el dominio de la longitud de onda DH corresponde a las alturas de 2-10  $R_\odot$  y une la brecha entre los estallidos métricos Tipo II observados en tierra y los estallidos kilométricos Tipo II observados por instrumentos de radio en el espacio.

Ahora, está bien aceptado que las emisiones Tipo II en el rango de longitud de onda DH y km son causadas por choques impulsados por EMCs, mientras que el origen de los choques coronales todavía está en debate. Lara et al. (2003) estudiaron las EMC asociadas con el rango

de longitud de onda en el dominio métrico y encontraron que las EMCs asociadas sólo con estallidos Tipo II métricos son más energéticas que las EMCs regulares pero menos energéticas que las EMCs asociadas con los estallidos Tipo II DH. Por otro lado, los estallidos Tipo II en el dominio DH se asocian con EMCs anchas y de gran energía, además su detección puede ser útil para identificar la población de EMCs geoeffectivas (Gopalswamy et al., 2001).



**Fig. 2.4.:** Espectro dinámico de un estallido de radio Tipo II con estructura fundamental (F) y armónica (H), visto por el Observatorio Solar Hiraiso, Japón (HiRAS) el 30 de octubre de 2004.

# Metodología

En las últimas décadas, un problema abierto en el campo de la física espacial ha sido determinar la región del choque en la que los estallidos de radio Tipo II son producidos. Trabajos teóricos y observacionales han situado a esta región en el viento solar no comprimido (Holman and Pesses, 1983; Cairns, 1986), que corresponde a la región río arriba del choque, mientras que otros, consideran el lugar de la emisión en el plasma comprimido que está dentro o detrás del frente de choque (Krall and Smith, 1975; Lampe and Papadopoulos, 1977). Por lo tanto, resulta importante realizar un estudio que permita validar ambos escenarios mediante el uso de observaciones y técnicas de análisis de emisiones de radio Tipo II, si realmente el problema se reduce a dos escenarios o bien ambos escenarios son factibles pero se presentan en diferentes circunstancias. En este capítulo se detalla la metodología empleada para llevar a cabo este estudio.

## 3.1 Selección de eventos

Para identificar los eventos de interés se consideraron estallidos Tipo II observados por el instrumento Wind/WAVES, aprovechando el rango de frecuencias que ofrece el TNR: 4 kHz - 256 kHz, entre los años 1997 a 2012. Se tomaron en cuenta los eventos, reportados en la literatura (Bale et al., 1999; Pulupa and Bale, 2008), en los que se observó la firma de ondas de Langmuir reportada en Bale et al. (1999) como la región fuente de esta emisión. Además, se buscaron en la base de datos de los instrumentos de radio Wind/WAVES y STEREO/SWAVES, otros posibles casos donde esta firma apareció. Se encontraron 7 eventos (incluyendo los tres eventos publicados en Pulupa and Bale (2008)) que en la inspección visual contenían una posible actividad de ondas de Langmuir, por la intensa radiación a la frecuencia de plasma antes o después de la llegada del choque. En la Tabla 3.1 se muestran los eventos seleccionados, así como los datos de la fulguración y la eyección de masa coronal asociada. En la primera columna se muestra el número de evento usado en este trabajo. En la segunda y tercera columna se encuentran la fecha-hora del inicio y fin del estallido Tipo II, respectivamente; mientras que en la cuarta se muestra el rango de frecuencias en que éste fue observado. En la quinta y sexta columna se muestran la localización de la fuente de la fulguración en coordenadas heliográficas y la clase de acuerdo a la importancia de emisión de rayos X suaves (*What are solar flares?*). Por

último, en la séptima y octava columna se encuentran la fecha-hora en que se observó la EMC asociada y su velocidad.

Evento #	Estallido tipo II			Flare		EMC	
	Inicio yyymmdd hhmm	Fin [mm/dd][TU]	Rango de Frec. [kHz]	Loc <sup>1</sup>	Clase <sup>2</sup>	Fecha y Hora [mm/dd hhmm]	$v_0$ [km/s]
1	19970512 05:15	05/14 16:00	12000-80	N21W08	C1.3	05/12 05:30	464
2	19980824 22:05	08/26 06:20	14000-30	N35E09	X1.0	NA	NA
3	20000211 08:45	02/11 23:35	50-23	N31E04	C7.3	02/10 02:30	944
4	20020522 04:10	05/23 10:40	500-30	S25W64	C9.7	05/22 00:06	1246
5	20050909 19:45	09/10 22:00	10000-50	S12E67	X6.2	09/09 19:48	2257
6	20110604 22:00	06/07 01:30	16000-25	W90b	—	06/04 22:05	2425
7	20110804 04:15	08/05 17:00	13000-60	N19W36	M9.3	08/04 04:12	1315

**Tab. 3.1.:** Estallidos Tipo II observados por el instrumento de radio Wind/WAVES (<https://solar-radio.gsfc.nasa.gov/wind/index.html>) y EMC asociadas, tomadas del catálogo de EMCs identificadas por LASCO/SOHO ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/) y [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/radio/waves\\_type2.html](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/radio/waves_type2.html)).

#	Fecha y hora [yyymmdd hh:mm:ss]	$B^{down}/B^{up}$	$V^{up}$ [km/s]	$V^{down}$ [km/s]	$N_p^{up}$ [ $cm^{-3}$ ]	$N_p^{down}$ [ $cm^{-3}$ ]	$\theta_{Bn}$ [°]	$V_{sh}$ [km/s]
1	1997-05-15 01:15:21	2.49	318.11	393.75	18.98	42.95	85.73	438.40
2	1998-08-26 06:40:30	2.82	467.21	642.41	6.00	13.28	83.51	766.26
3	2000-02-11 23:33:54	3.33	436.57	597.82	5.38	18.45	88.21	639.68
4	2002-05-23 10:44:51	2.25	449.13	575.29	9.79	22.25	84.16	634.55
5	2005-09-11 00:57:00*	2.15	786.99	1057.6	2.7	10.2	81.8	1146.6
6	2011-06-07 09:14:00*	1.33	388.6	405.93	2.4	3.6	52.5	435.5
7	2011-08-05 18:40:45	1.27	511.72	588.52	20.15	27.68	72.92	789.15

**Tab. 3.2.:** Choques interplanetarios observados *in situ* en las regiones de estallidos tipo II. Datos tomados de Heliospheric Shock Database (<https://ipshocks.fi/>). \* Parámetros tomados de [https://www.cfa.harvard.edu/shocks/wi\\_data/wi\\_2005.html](https://www.cfa.harvard.edu/shocks/wi_data/wi_2005.html)

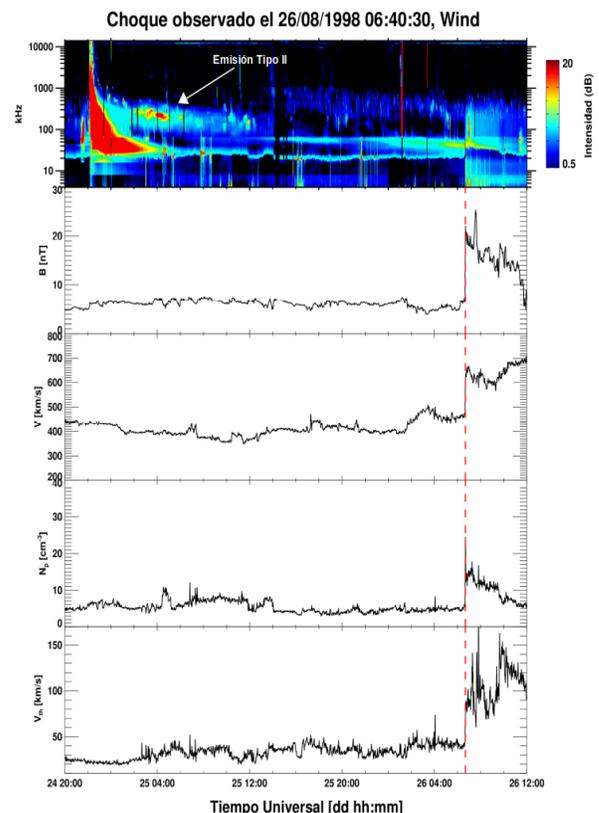
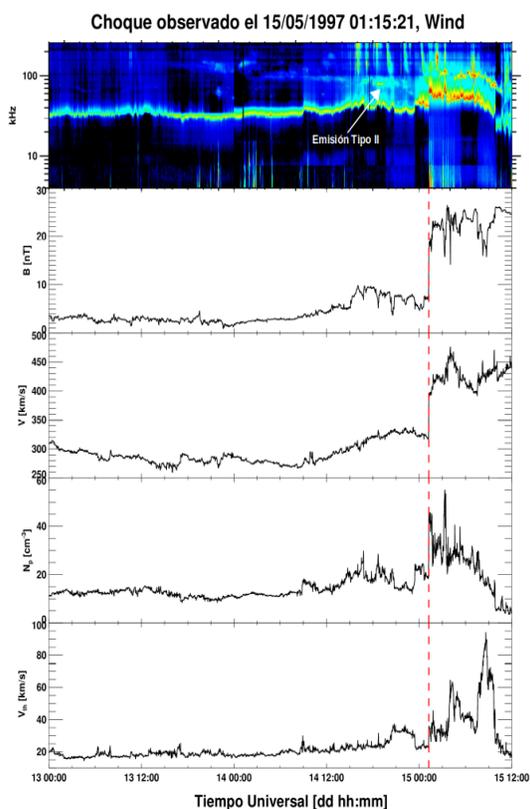
En la Tabla 3.2 se muestran los parámetros del choque asociado a cada evento. En la primera columna se muestra el número de evento, en la segunda se encuentra la fecha y hora en que se observó el choque, luego se muestra la razón entre la magnitud del campo magnético en

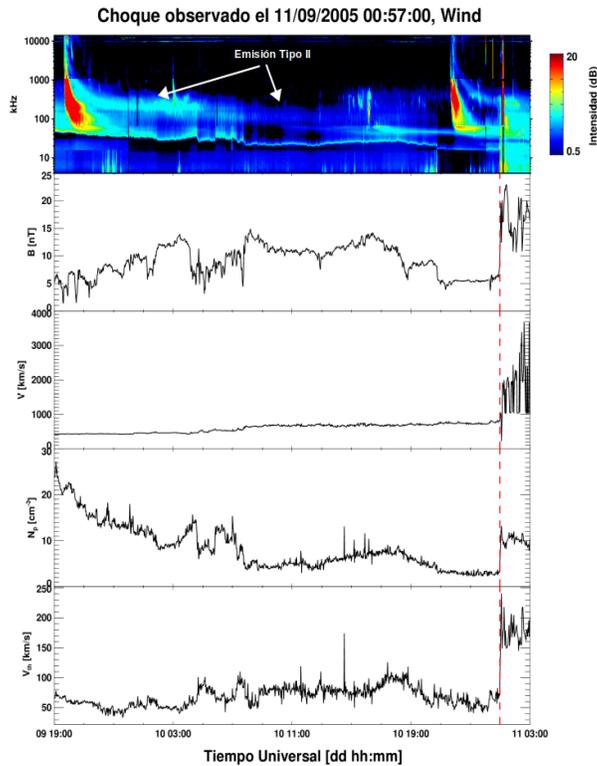
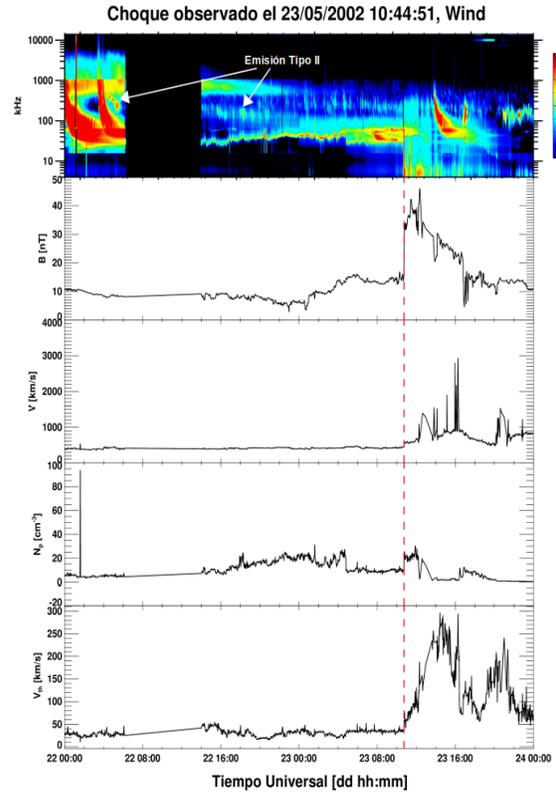
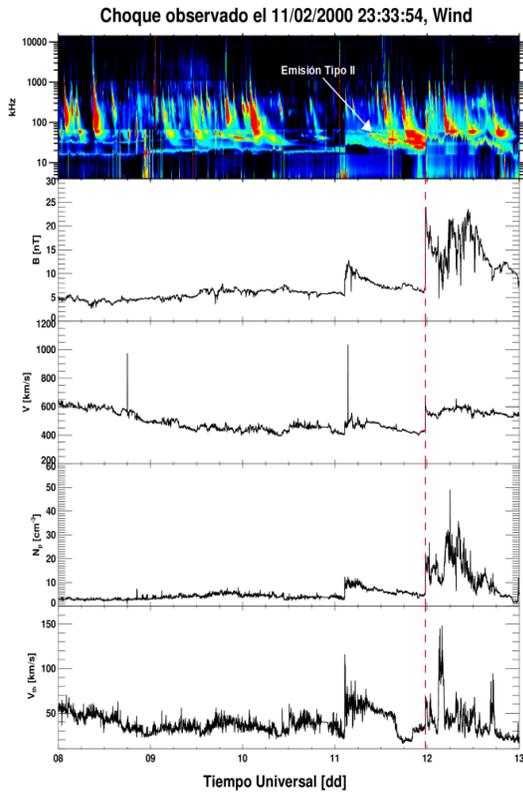
<sup>2</sup>Coordenadas heliográficas. N21W08 significa que la latitud es 21 grados norte y 8 grados oeste. S indica latitud sur y E indica longitud este. Si la entrada tiene un subíndice b, significa que la fuente está detrás del limbo.

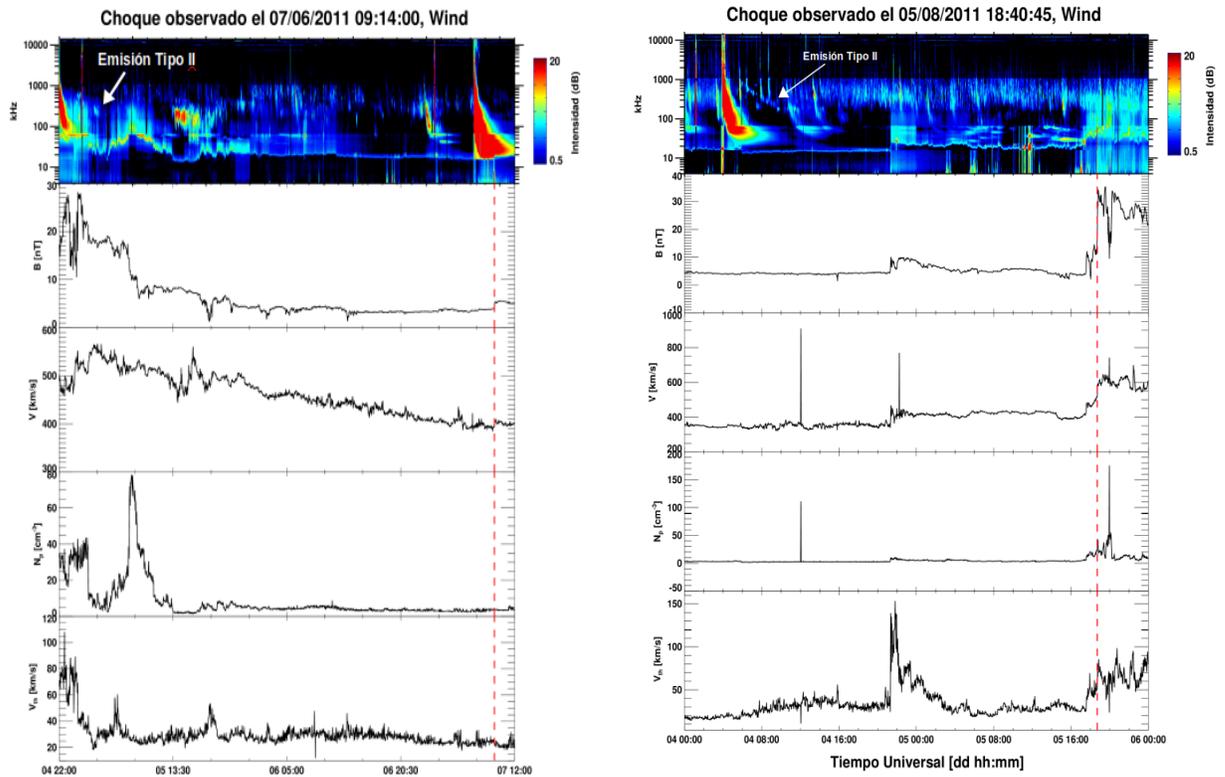
<sup>2</sup>La entrada "—" significa que la información del flujo de rayos X suaves no está disponible.

la región downstream y la región upstream. En la cuarta y quinta columna se muestran la velocidad del viento solar, también en ambas regiones. Después se presentan la densidad numérica de protones en las regiones mencionadas anteriormente, mientras que en la octava columna se encuentra  $\theta_{Bn}$ ; el ángulo entre el vector normal del choque y las líneas de campo magnético. Finalmente, en la novena columna se muestra la velocidad del choque en el marco de referencia de la nave.

En las siguientes figuras se muestran los eventos seleccionados. En el primer panel se tiene el espectro dinámico, donde se indica el estallido Tipo II observado por Wind/WAVES. En el segundo panel se muestra la intensidad del campo magnético registrado por el instrumento *Magnetic Fields Investigation* a bordo de Wind (Wind/MFI) (Lepping et al., 1995). Del tercer al quinto panel se muestran parámetros del plasma; velocidad, densidad numérica de protones y la velocidad térmica, registrados por el instrumento *Solar Wind Experiment* (Wind/SWE) (Ogilvie et al., 1995). La línea roja punteada indica la hora del choque.

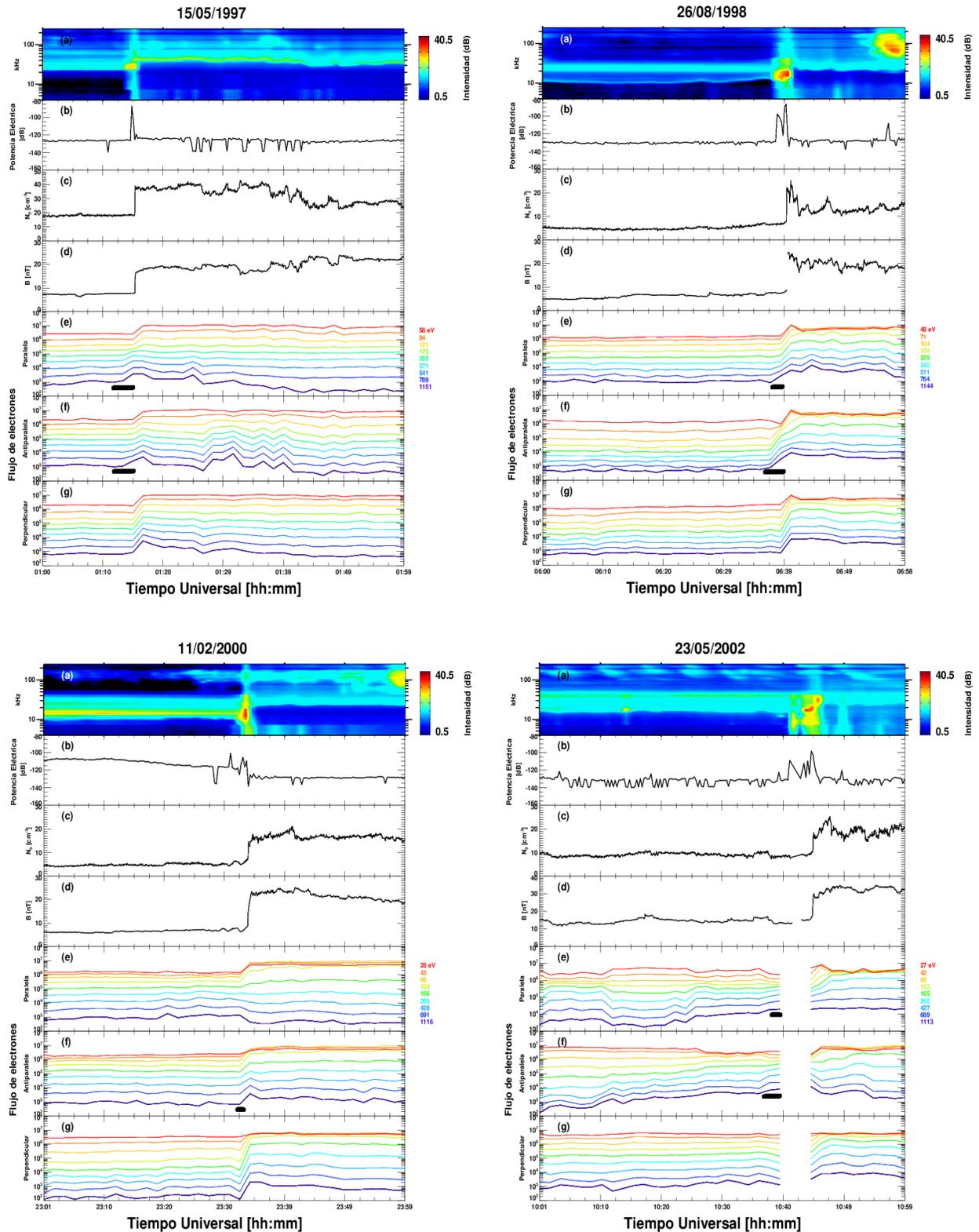






**Fig. 3.1.:** Espectro dinámico, campo magnético, velocidad del viento solar, densidad numérica de protones y velocidad térmica observado por la nave Wind. La emisión Tipo II se ve como una deriva lenta hacia bajas frecuencias en el espectro dinámico. Mientras que la llegada del choque se muestra como un salto abrupto en la frecuencia local del plasma, en el campo magnético, en la densidad numérica de protones y en la velocidad térmica.

Las Figuras 3.2 y 3.3 muestran datos de ondas de plasma, distribución de energía de electrones y condiciones del plasma ambiente en la llegada de cada choque. En los paneles (a)-(b), el espectro dinámico de WAVES/TNR y la potencia del campo eléctrico en unidades de  $dB$ , muestran una intensa actividad de ondas de Langmuir en la región frente al choque (foreshock). Los paneles (c) y (d) son mediciones de densidad y campo magnético interplanetario de los instrumentos *Three-Dimensional Plasma Analyzer* (3DP) (Lin et al., 1995) y MFI, respectivamente; ambos muestran un salto en la llegada del choque. Los paneles (e), (f) y (g) muestran la distribución de energía del flujo de electrones del detector *Electron Electrostatic Analyzers* (EESA-L/3DP), en las direcciones paralela, antiparalela y perpendicular al campo magnético local, respectivamente.



**Fig. 3.2.:** Las tres primeras gráficas muestran los eventos publicados en Pulupa and Bale (2008). Las ondas de Langmuir en estas figuras están asociadas con el incremento en el flujo de electrones en las direcciones paralela y antiparalela, excepto para el choque del 11 de febrero de 2000; en el cual se observa el incremento sólo en la dirección antiparalela. En el evento del 23 de mayo de 2002 hay un "gap" de datos en el flujo de electrones.

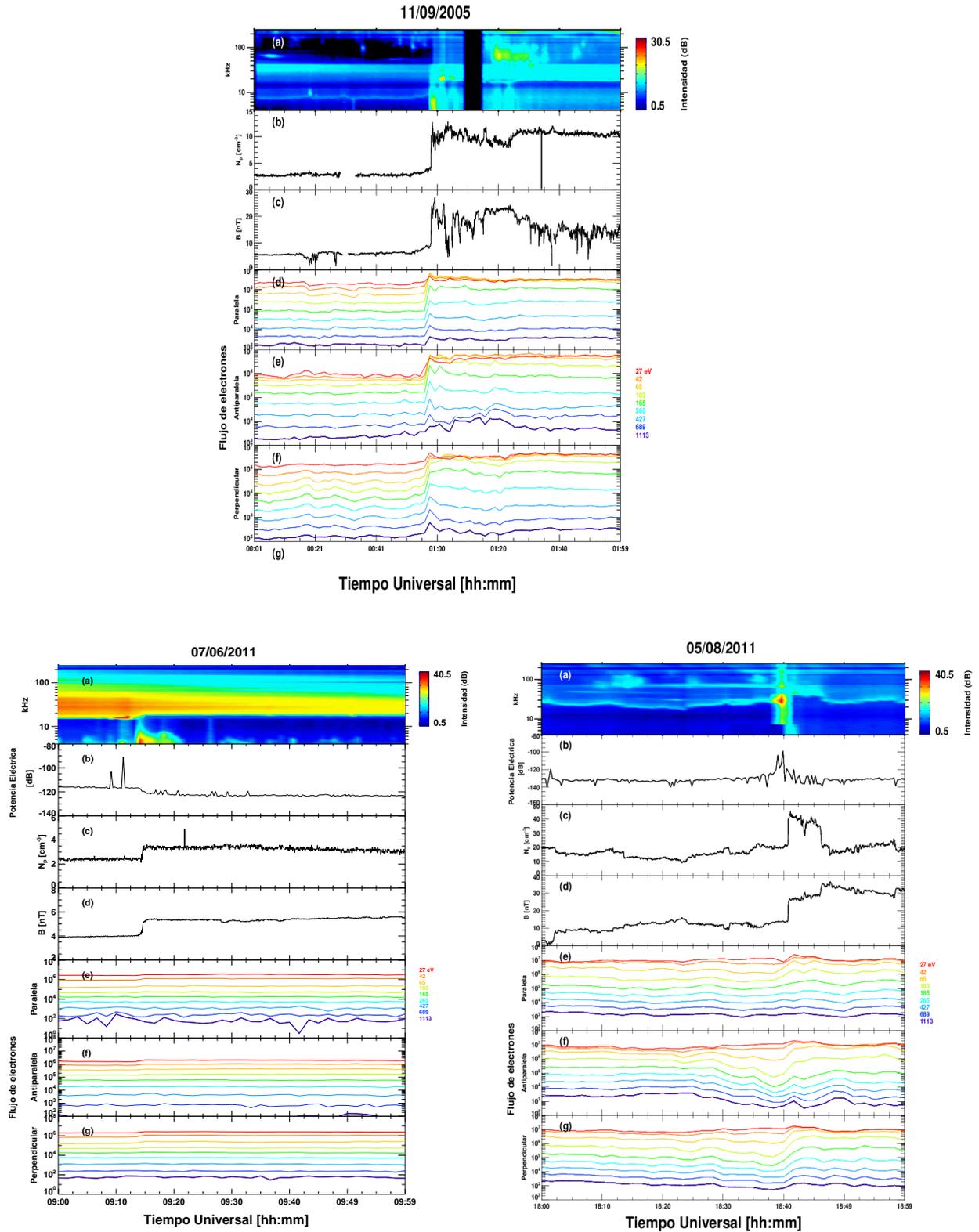


Fig. 3.3.: El espectro dinámico y la potencia del campo eléctrico muestran actividad de ondas de Langmuir en la región frente al choque (foreshock) para los eventos del 2011. Por otro lado, en el evento del 2005 esta actividad se muestra sólo en el espectro dinámico, en la región detrás del choque, ya que no hay datos de la potencia del campo eléctrico. La resolución de la distribución de energía del flujo de electrones es de 90 segundos.

## 3.2 Análisis de los eventos

En esta sección se presenta la metodología para determinar la localización de la región fuente de los estallidos Tipo II, relativo al choque, en los eventos seleccionados. Para ello se comparan densidades en las regiones Tipo II, calculadas a partir de las frecuencias observadas en la emisión, con las densidades del viento solar ambiente. La técnica usada para comparar estas densidades es la siguiente:

Si las densidades de la región fuente son similares a las densidades del viento solar, entonces la emisión se produce en el viento solar ambiente, río arriba del choque. Sin embargo, si las densidades de la fuente son significativamente mayores que las densidades del viento solar entonces la emisión ocurre en el plasma comprimido, detrás del choque. Las densidades en la región fuente, que produce el estallido Tipo II, se derivan directamente de las frecuencias observadas que ocurren a la frecuencia fundamental del plasma  $f_p$  o su armónico  $2f_p$ , ya que la densidad  $n = f_p^2/81$  ( $n$  en  $cm^{-3}$ ,  $f_p$  en kilohertz). Para cada espectro observado, durante un estallido Tipo II, se determina la frecuencia central al pico de la emisión usando la técnica de Aguilar-Rodriguez et al. (2005) (ver Figura 3.4). Esta frecuencia se asume que representa un promedio sobre todas las frecuencias emitidas en la región fuente; mientras que el rango de frecuencias espectrales alrededor del pico se debe a la variación de la densidad en dicha región.

Por otro lado, para una región fuente dada, para la cual se observa la frecuencia de emisión Tipo II a tiempo  $t$ ,  $f_{II}(t)$ , se calcula la densidad del viento solar esperada inmediatamente río arriba del choque a ese tiempo  $t$ . Estas densidades se estimaron a partir de las densidades del viento solar medidas a 1 UA. Se usó el modelo de densidad aplicado en Lengyel-Frey (1992), donde se supone que la densidad del viento solar a una distancia heliocéntrica  $R$ ,  $n(R)$ , está relacionada con la densidad observada a 1 UA,  $n(1 UA)$ , de la siguiente manera:

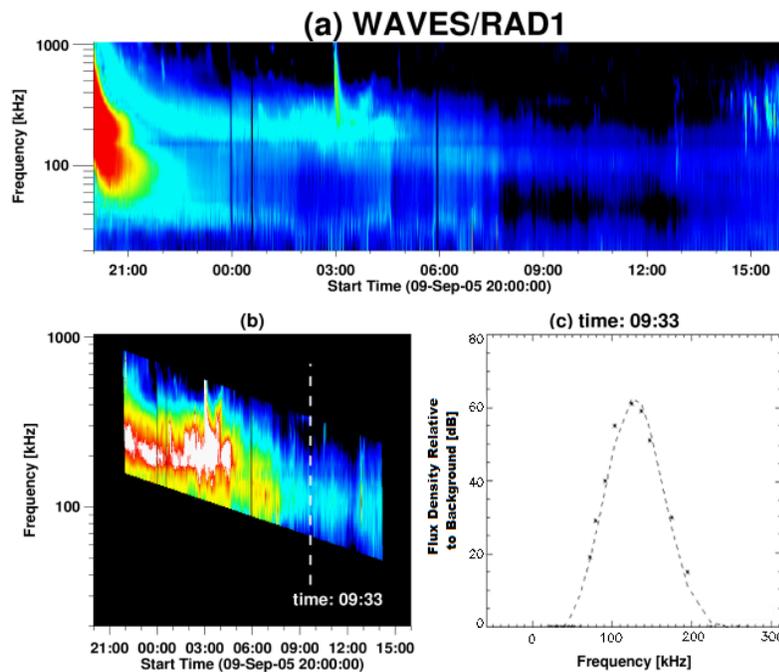
$$n(R) = n(1 UA)R^b, \quad (3.1)$$

donde el exponente  $b$  está dado por el modelo de densidad del viento solar de Helios (Bougeret et al., 1984). Este modelo de densidad está dado por  $n(R) = 6.14R^{-2.1 \pm 0.04}$ ; el cual se determinó usando mediciones *in-situ* del viento solar durante los años 1974-1980 con las naves espaciales Helios 1 y Helios 2, es válido en el rango 0.3 - 1 UA.

El modelo se aplicó usando las estructuras de densidad observadas alrededor de 8 a 24 horas antes del arribo del choque, que se supone son las estructuras con las que se encuentra la región Tipo II. Luego se calcula una densidad promedio  $\bar{n}(R)$  y finalmente una frecuencia de plasma promedio  $\bar{f}_p(R)$ .

Para determinar la frecuencia de plasma del viento solar correspondiente a un intervalo de tiempo  $t$ , se debe conocer la distancia heliocéntrica  $R(t)$  de la región fuente al tiempo de la observación de la emisión Tipo II. Se asume que la fuente Tipo II es cercana al frente de choque y que la distancia heliocéntrica de la fuente es la misma que la del choque. Para calcular  $R(t)$  se obtuvo la trayectoria del choque usando la emisión Tipo II, técnica implementada en Corona-Romero et al. (2015), que se resume en los siguientes pasos:

1. Utilizando las observaciones de la emisión Tipo II se obtuvieron las frecuencias de emisión central y su ancho de banda asociado.
2. Se aplicó una técnica de regresión de onda explosiva a la propagación del choque utilizando las observaciones de la emisión Tipo II.



**Fig. 3.4.:** Método aplicado para obtener la frecuencia de emisión central y ancho de banda asociado para el evento 5. (a) espectro dinámico del evento Tipo II del instrumento de radio WAVES/RAD1. (b) Emisión Tipo II aislada. (c) Densidad de flujo vs. frecuencia para un tiempo del espectro dinámico de RAD1, a las 9:33 TU.

Para obtener las frecuencias de emisión central y el ancho de banda asociado de la emisión Tipo II, se aplicó la técnica introducida por Aguilar-Rodriguez et al. (2005). En la Figura 3.4 se muestra un estudio de caso para ilustrar esta técnica. La Figura 3.4(a) muestra el espectro dinámico del evento 5 (ver Tabla 3.1) detectado por el receptor Radio Receiver Band 1 (RAD1). La frecuencia de emisión se observa el 9 de septiembre de 2005 19:45 TU a 10000 kHz, derivando lentamente a 50 kHz el 10 de septiembre 22:00 TU. En la Figura 3.4(b) se aísla la emisión Tipo II del espectro dinámico, haciendo cero cualquier emisión fuera de esta región; la línea vertical discontinua indica, como ejemplo, un corte al tiempo 09:33 TU del evento Tipo II. La Figura 3.4(c) muestra la densidad de flujo vs. las frecuencias observadas de la emisión Tipo II al tiempo en que se hizo el corte (en asteriscos). También presenta el ajuste gaussiano (línea discontinua) de la distribución de la densidad de flujo. Este ajuste calcula los valores para  $\langle f \rangle_i$  y  $\Delta f_i/2$  a un tiempo dado  $[t_i]$ .

Una vez calculados los valores de  $\langle f \rangle_i$  y  $\Delta f_i/2$  se usó la técnica de regresión *blast-wave*. Con esta técnica se reconstruyó la trayectoria del frente de choque combinando datos de frecuencia de la emisión Tipo II con las ecuaciones cinemáticas de una *blast wave*. Una *blast-wave* es una onda de choque que tiene una cantidad finita de energía, el choque transfiere energía al medio, decayendo continuamente conforme se propaga.

La velocidad de una onda explosiva IP se puede aproximar por

$$v = (v_0 - w_{sw}) \left[ \frac{t}{\tau} \right]^{-1/3} + w_{sw}, \quad (3.2)$$

donde  $v_0$  es la velocidad inicial del choque, en  $t = \tau$ , y  $w_{sw}$  es la velocidad del viento solar. Integrando la Ecuación 3.2 sobre el tiempo se puede expresar la posición delantera de la onda explosiva como:

$$r = w_{sw}t + \frac{3}{2}\tau^{1/3}(v_0 - w_{sw})t^{2/3} - \frac{1}{2}(v_0 - w_{sw})\tau + r_0. \quad (3.3)$$

Luego, de la relación entre la frecuencia de plasma, la densidad del viento solar, y la distancia heliocéntrica se puede definir la posición de la región fuente como:

$$r_i = r(t_i) = QN\sqrt{n_{1UA}}\frac{1}{f_i}, \quad (3.4)$$

donde  $n_{1UA}$  es la densidad del viento solar a 1 UA y  $Q = \sqrt{e^2(1UA)^2/4\pi^2\epsilon_0 m_e}$ , con  $e$ ,  $\epsilon_0$  y  $m_e$  la carga fundamental, constante eléctrica, y la masa del electrón respectivamente. N indica la

frecuencia fundamental (=1) o el armónico (=2), y  $\underline{f}_i = \langle f \rangle_i - \Delta f_i/2$  es el borde de abajo de la banda de emisión. Suponiendo que la localización de la región fuente Tipo II se encuentra cerca del frente de choque, se combinan las ecuaciones 3.3 y 3.4, despejando se obtiene

$$\frac{1}{\underline{f}_i} = a_3 t_i + a_2 t_i^{2/3} + a_0. \quad (3.5)$$

La Ecuación 3.5 es una relación de dispersión entre frecuencias y tiempos que reconstruyen la evolución cinemática de los choques interplanetarios. Las constantes  $a_0$ ,  $a_2$  y  $a_3$  están relacionados con las ecuaciones *blast-wave* por

$$w_{sw} = a_3 \sqrt{n_{1UA}} QN, \quad (3.6)$$

$$\tau = \left[ \frac{a_3 r_0 - a_0 w_{sw}}{a_2 w_{sw}} \right]^{3/2}, \quad (3.7)$$

$$v_0 = w_{sw} \left( 1 + \frac{2a_2}{3a_3} \tau^{-1/3} \right). \quad (3.8)$$

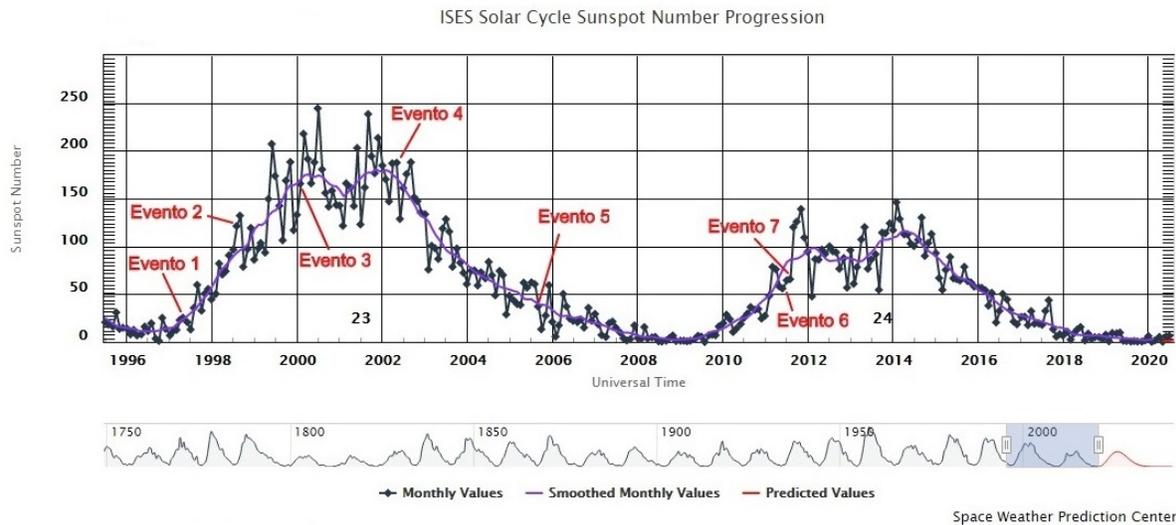
En la Tabla 3.3 se muestran los valores iniciales para cada evento y los resultados obtenidos con el método BWR. En la primera columna se muestra el número que identifica al evento en las tablas anteriores. En la segunda y tercera columna se encuentran los valores iniciales de la densidad y velocidad del viento solar, respectivamente. De la cuarta a la séptima columna se muestran los resultados obtenidos después de la regresión. Finalmente, en la octava columna se comparan, en el lado derecho, la velocidad del choque a 1 UA obtenida con la técnica BWR y, en el lado izquierdo, la velocidad del choque obtenida de las observaciones de Wind (ver Tabla 3.2). En el Apéndice se muestran gráficamente estos resultados.

Los eventos 3 y 6 fueron descartados por el ruido de fondo que presentan en el espectro dinámico, ya que esto ocasionaba un mal ajuste. Los valores iniciales  $n_{1UA}$  y  $w_{1UA}$  se tomaron de mediciones in-situ 8-12 horas antes del arribo del choque;  $\tau = 5r_0/v_{emc}$  y el tiempo de detección de cada evento se usó como  $t = 0$ . En el caso del evento 2, aunque la sonda espacial *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO) no estaba disponible para confirmar la EMC, el choque IP observado fue seguido por una estructura magnética similar a una nube; generalmente asociada con choques impulsados por EMCs (Bale et al., 1999). Por lo tanto, para llevar a cabo la regresión, la velocidad y tiempo inicial fueron estimados usando información del tiempo de observación de la fulguración y el tiempo de observación de la tormenta geomagnética en la Tierra. Como se puede notar, en los eventos 2 y 4, el resultado de la velocidad del choque a

1 UA obtenida con el método BWR difiere mucho de las observaciones *in-situ*. En el evento 2 puede deberse a la estimación de los valores iniciales de  $v_0$  y  $t$  para llevar a cabo la regresión. Por otro lado, el evento 4 ocurrió durante actividad solar alta, por lo que la EMC se propagó en un viento solar más perturbado. En la Figura 3.5 se ubica cada evento de esta tesis en la progresión del ciclo solar 23 y 24.

Evento #	Valores iniciales		Resultados BWR				$v_1$ UA
	$n_{1UA}$ [ $cm^{-3}$ ]	$w_{1UA}$ [ $km s^{-1}$ ]	$\tau$ [h]	$r_\tau$ [ $R_\odot$ ]	$w_{sw}$ [ $km s^{-1}$ ]	$v_0$ [ $km s^{-1}$ ]	$v_{BWR}/v_{in-situ}$ [ $km s^{-1}$ ]
1	14.2	302.2	5.19	24.6	302	691	461/438
2	4.1	414.2	3.36	35.6	414.2	1700	1019/766
4	11.9	406.7	4.31	35.3	407	1313	837/635
5	6.6	683.6	0.71	15.5	683	2598	1254/1147
7	3.4	427.8	1.92	17	427	1111	709/789

**Tab. 3.3.:** Resultados del método BWR. Los valores iniciales  $n_{1UA}$  y  $w_{1UA}$  se tomaron de un promedio de mediciones *in-situ* 8-12 horas antes del arribo del choque. El valor inicial de  $v_0$  es la velocidad inicial de la EMC (ver Tabla 3.1.). Para el evento 2, la velocidad inicial fue estimada usando información del tiempo de observación de la fulguración y el tiempo de observación de la tormenta geomagnética en la Tierra.



**Fig. 3.5.:** Progresión del ciclo solar durante los eventos seleccionados en este trabajo. Imagen adaptada de <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>.

En el siguiente capítulo se muestran los análisis y resultados obtenidos al comparar las densidades de la región fuente Tipo II con las densidades obtenidas del viento solar ambiente.

## Análisis y resultados

En este capítulo se exponen los análisis realizados y los resultados obtenidos para los eventos 1, 2, 4 y 5; tomando en cuenta dos posibilidades: i) que la emisión observada en el espectro dinámico corresponda a la emisión fundamental (F) y ii) que la emisión corresponda al segundo armónico (H). Se comparan las densidades de la región fuente Tipo II con las densidades del viento solar que se encuentran entre 0.3 a 1 UA. Si la densidad de la región fuente es similar a la densidad estimada del viento solar, entonces la emisión proviene río arriba del choque. Sin embargo, si la densidad de la fuente es considerablemente mayor a la densidad del viento solar entonces la región de emisión del estallido Tipo II se encuentra río abajo del choque. Debido al ruido de fondo y la complejidad que presentan algunos estallidos Tipo II en el espectro dinámico, los eventos 3 y 6 fueron excluidos del análisis al no poder aplicar el método expuesto en Aguilar-Rodriguez et al. (2005). También se excluyó el evento 7, ya que después de aplicar la regresión *BW*, las observaciones de la emisión Tipo II resultaron estar a menos de 0.3 UA; por lo que no se pudo aplicar el modelo de densidad.

### Evento 1

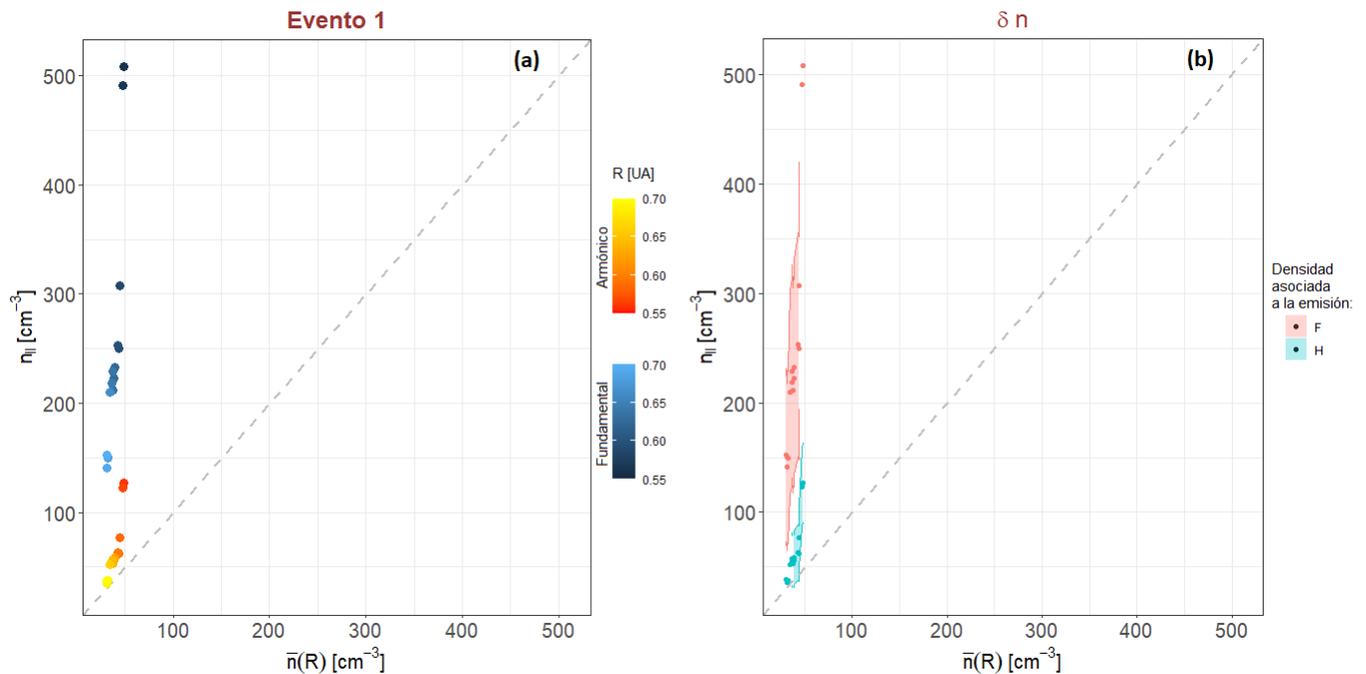
Este evento consiste en un débil estallido Tipo II que inició el 12 de mayo de 1997, a las 05:15 TU y con una frecuencia inicial de 12000 kHz. El choque asociado fue observado el 15 de mayo de 1997 y fue conducido por una EMC, asociada con una fulguración de clase C1.3 que ocurrió el 12 de mayo de 1997 04:55 TU (ver Tabla 3.1).

Antes de la llegada del choque, se observaron ondas de Langmuir asociadas con el incremento en el flujo de electrones en las direcciones paralela y antiparalela al campo magnético local. Esta correlación entre los electrones en el frente de choque y la actividad de las ondas de Langmuir indica fuertemente que esta región es la fuente de la emisión Tipo II (Pulupa and Bale, 2008). Por lo tanto, de acuerdo con las observaciones, la localización de la región de emisión Tipo II se encuentra en la región río arriba del choque.

Por otro lado, cuando se aplicó el modelo de densidad, en el caso de la emisión fundamental, las densidades de la región fuente Tipo II resultaron ser mayores que las densidades promedio

del viento solar justo río arriba del choque; como se muestra en la Figura 4.1 (a). Mientras que en el caso del segundo armónico, después de 0.6 UA, las densidades de la fuente Tipo II son similares a las densidades calculadas del viento solar. Estos resultados se discuten más adelante. También, como la densidad es proporcional a la frecuencia de plasma, se observa una clara correlación entre las frecuencias de plasma del viento solar y las frecuencias de la emisión Tipo II. Esto se espera, ya que ambas frecuencias decrecen con la distancia heliocéntrica  $R$ .

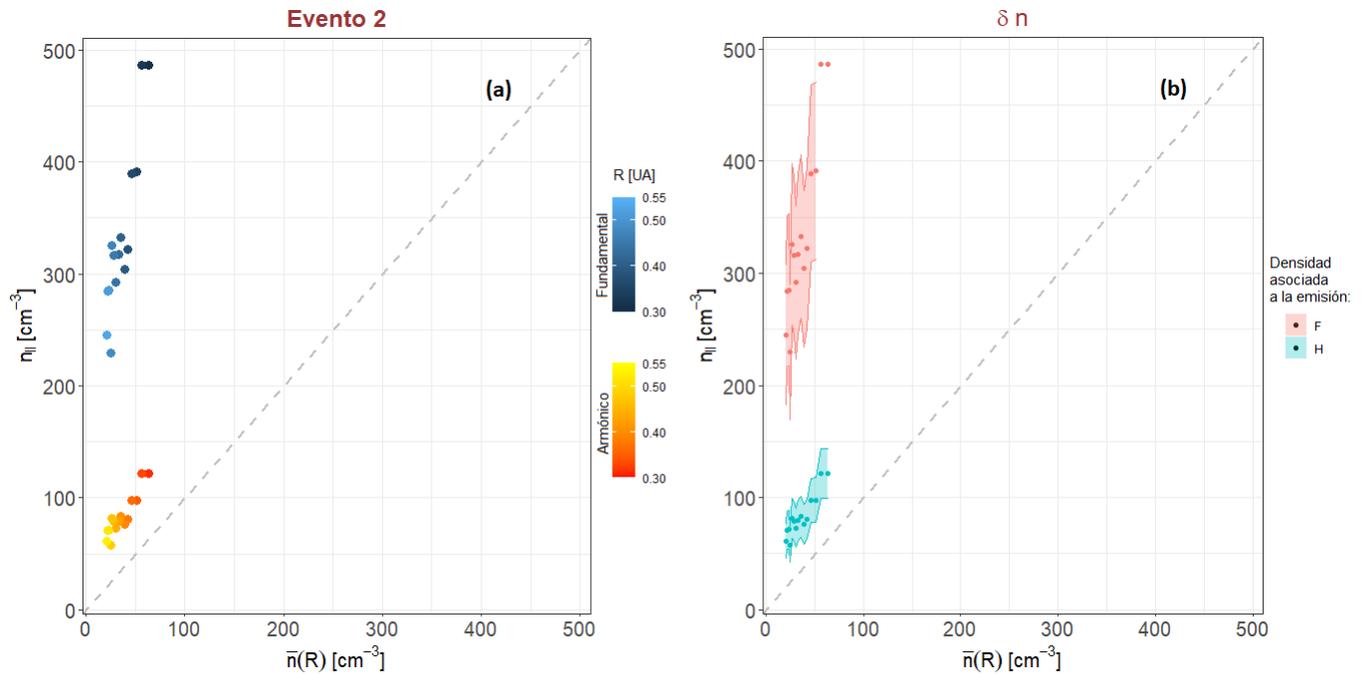
En la Figura 4.1 (b) se presenta la incertidumbre de la densidad en la región fuente Tipo II ( $\delta n$ ) asociada al ancho de emisión del estallido. En color rojo se muestra la incertidumbre asociada a la emisión fundamental, mientras que en color azul la incertidumbre asociada al segundo armónico. Se puede ver que a bajas frecuencias, en el caso de la emisión fundamental, la región de incertidumbre es cercanana a la identidad (línea gris punteada), mientras que la incertidumbre correspondiente al segundo armónico se intersecta con la identidad.



**Fig. 4.1.:** El panel (a) muestra la densidad promedio río arriba del choque vs. densidad en la región fuente Tipo II. La escala de color representa la distancia heliocéntrica de la observación, en azul si la emisión corresponde a la fundamental (F) y en color naranja si la emisión corresponde al segundo armónico (H). Se puede notar que en el caso de la emisión fundamental, en la mayor parte de la duración del evento, las densidades en la fuente Tipo II son significativamente mayores a las densidades río arriba del choque. En el panel (b) se muestra la incertidumbre de la densidad en la región fuente Tipo II asociada al ancho de emisión del estallido. En color rojo se muestra la incertidumbre asociada a la emisión fundamental, mientras que en color azul la incertidumbre asociada al segundo armónico.

## Evento 2

Este evento se ha descrito en Bale et al. (1999). Consiste en un intenso estallido Tipo II que inició el 24 de agosto de 1998, a las 22:05 TU y con una frecuencia inicial de 14000 kHz. El choque para este evento fue observado el 26 de agosto de 1998; conducido por una EMC que estuvo asociada con una fulguración de clase X1.0, que ocurrió el 24 de agosto de 1998, a las 22:09 TU (ver Tabla 3.1).



**Fig. 4.2.:** El panel (a) muestra la densidad promedio río arriba del choque vs. densidad en la región fuente Tipo II. La escala de color representa la distancia heliocéntrica de la observación, en azul si la emisión corresponde a la fundamental (F) y en color naranja si la emisión corresponde al segundo armónico (H). Las frecuencias de emisión Tipo II son considerablemente mayores a las frecuencias de plasma del viento solar. Esto indica que la emisión proviene río abajo del choque. En el panel (b) se presenta la incertidumbre de la densidad en la región fuente Tipo II asociada al ancho de emisión del estallido. En color rojo se muestra la incertidumbre asociada a la emisión fundamental, mientras que en color azul la incertidumbre asociada al segundo armónico.

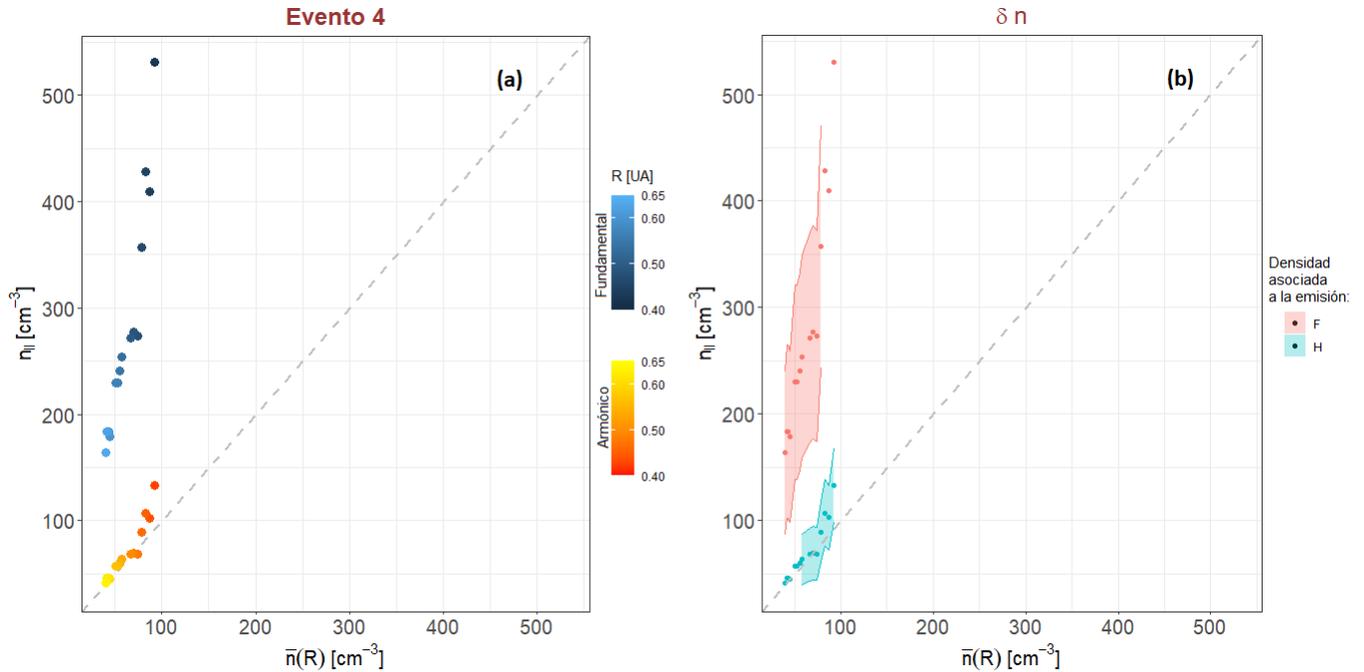
Antes del arribo del choque, se observaron ondas de Langmuir asociadas con el incremento en el flujo de electrones en las direcciones paralela y antiparalela al campo magnético local (ver Figura 3.2). Por lo que, de acuerdo con las observaciones, la localización de la región de emisión Tipo II se encuentra en la región río arriba del choque. Sin embargo, cuando se aplicó el modelo de densidad, las densidades de la fuente Tipo II, correspondientes a la emisión fundamental, resultaron ser significativamente mayores a las densidades calculadas del viento

solar justo río arriba del choque; como se muestra en la Figura 4.2 (a) en las observaciones de color azul. Las observaciones en color naranja corresponden al segundo armónico. En la Figura 4.2 (b) se presenta la incertidumbre de la densidad en la región fuente Tipo II ( $\delta n$ ) asociada al ancho de emisión del estallido. En color rojo se muestra la incertidumbre asociada a la emisión fundamental, mientras que en color azul la incertidumbre asociada al segundo armónico. Aunque las densidades asociadas al segundo armónico son cercanas a la identidad, las regiones de incertidumbre, tanto para la densidad asociada a la emisión fundamental, quedan por arriba de la identidad. Por lo tanto, de acuerdo con la metodología de este trabajo, la región de emisión se localiza río abajo del choque durante el trayecto de 0.3 a 0.55 UA.

## Evento 4

Este evento consiste en un rápido estallido Tipo II que inició el 22 de mayo de 2002, a las 04:10 TU y con una frecuencia inicial de 500 kHz. El choque para este evento fue observado el 23 de mayo de 2002; conducido por una EMC asociada con una fulguración de clase C9.7 que ocurrió el 22 de mayo de 2002, a las 00:06 TU (ver Tabla 3.1).

Antes y después del arribo del choque, se observaron ondas de Langmuir asociadas con el incremento en el flujo de electrones en las direcciones paralela y antiparalela al campo magnético local (ver Figura 3.2); aunque este incremento en el flujo de electrones no llega a verse claramente debido a la ausencia de datos minutos antes de la llegada del choque. De acuerdo con las observaciones, la localización de la región de emisión Tipo II se encuentra en ambas regiones del choque; río abajo y río arriba. Por otro lado, de los resultados de la aplicación del modelo (ver Figura 4.3 (a)), las densidades de la fuente Tipo II, correspondientes a la emisión fundamental, son significativamente mayores a las densidades del viento solar inmediatamente río arriba del choque hasta su trayecto a 0.65 UA. Mientras que las densidades correspondientes a la emisión del segundo armónico coinciden con la identidad (línea gris punteada). En la Figura ?? (b) se presenta la incertidumbre de la densidad en la región fuente Tipo II ( $\delta n$ ) asociada al ancho de emisión del estallido. En color rojo se muestra la incertidumbre de la densidad asociada a la emisión fundamental, mientras que en color azul la incertidumbre asociada al segundo armónico. La región en color rojo queda por encima de la identidad, mientras que la región azul queda sobre ésta.



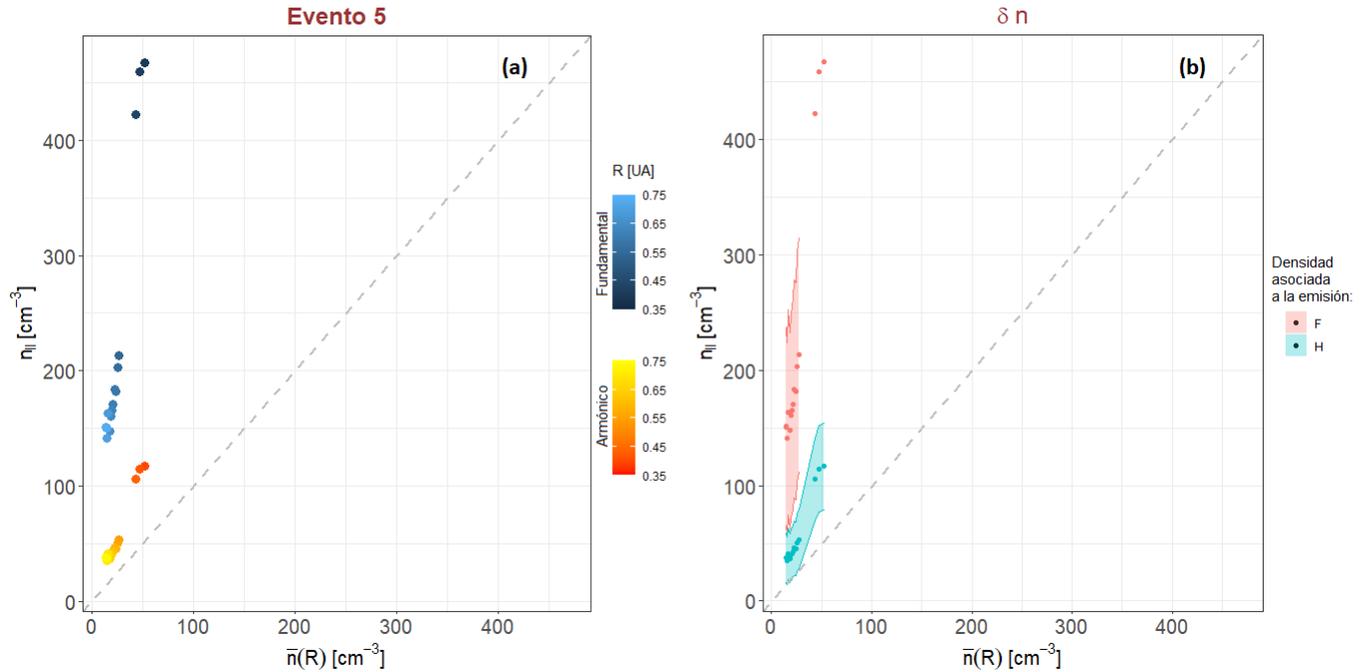
**Fig. 4.3.:** El panel (a) muestra la densidad promedio río arriba del choque vs. densidad en la región fuente Tipo II. La escala de color representa la distancia heliocéntrica de la observación, en azul si la emisión corresponde a la fundamental (F) y en color naranja si la emisión corresponde al segundo armónico (H) Como se puede ver, las frecuencias de la emisión Tipo II son mayores a la frecuencia de plasma del viento solar. Este resultado nos está diciendo que la emisión proviene río abajo del choque. En el panel (b) se muestra la incertidumbre de la densidad en la región fuente Tipo II ( $n_{II}(t)$ ) asociada al ancho de emisión del estallido. En color rojo se muestra la incertidumbre asociada a la emisión fundamental, mientras que en color azul la incertidumbre asociada al segundo armónico.

## Evento 5

En este evento el estallido Tipo II inició el 09 de septiembre de 2005, a las 19:45 TU y con una frecuencia inicial de 10000 kHz. El choque fue observado el 11 de septiembre de 2005; conducido por una EMC asociada con una fulguración de clase X6.2 que ocurrió el 09 de septiembre de 2005, a las 19:48 TU (ver Tabla 3.1).

Después del arribo del choque se observaron ondas de Langmuir. Sin embargo, debido a la resolución de los datos, no se muestra claramente un aumento en el flujo de electrones asociados con estas ondas. De los resultados de la aplicación del modelo (ver Figura 4.4 (a)), las densidades de la emisión Tipo II, correspondientes a la emisión fundamental, son mayores a las densidades estimadas del viento solar. En el caso de las densidades asociadas al segundo armónico, a frecuencias bajas, éstas son similares a las densidades del viento solar río arriba

del choque. En la Figura 4.4 (b) se presenta la incertidumbre de la densidad en la región fuente Tipo II ( $\delta n$ ) asociada al ancho de emisión del estallido. En color rojo se muestra la incertidumbre de la densidad asociada a la emisión fundamental, mientras que en color azul la incertidumbre asociada al segundo armónico. La región en color rojo queda por encima de la identidad, mientras que la región azul tiene una pequeña intersección con la identidad.



**Fig. 4.4.:** El panel (a) muestra la densidad promedio río arriba del choque vs. densidad en la región fuente Tipo II. La escala de color representa la distancia heliocéntrica de la observación, en azul si la emisión corresponde a la fundamental (F) y en color naranja si la emisión corresponde al segundo armónico (H) En este evento, las frecuencias de la emisión Tipo II son considerablemente mayores a la frecuencia de plasma del viento solar. En el panel (b) se presenta la incertidumbre de la densidad en la región fuente Tipo II ( $n_{II}(t)$ ) asociada al ancho de emisión del estallido. En color rojo se muestra la incertidumbre asociada a la emisión fundamental, mientras que en color azul la incertidumbre asociada al segundo armónico.

## 4.1 Discusión

Como se vio anteriormente, en todos los eventos que se analizaron, la región de emisión del estallido Tipo II se encuentra río abajo del choque si la emisión observada en el espectro dinámico corresponde a la fundamental. Este resultado concuerda con las observaciones *in-situ* para el caso del evento 4 y 5. Por otro lado, si la emisión observada corresponde al segundo armónico, en el evento 1 la región de emisión se encuentra río arriba del choque después de 0.6 UA, en el evento 2 se encuentra río abajo, en el evento 4 la emisión proviene de la región

río arriba del choque; mientras que en el evento 5, la emisión se considera que proviene de la región río abajo al menos hasta 0.75 UA, ya que la incertidumbre de la densidad asociada al ancho de emisión Tipo II interseca ligeramente a la identidad. En este caso, los resultados concuerdan con las observaciones *in-situ* de los eventos 1 y 4, también con el evento 5 si la región de incertidumbre se mantiene por arriba de la identidad. Respecto al evento 2, la región de emisión se mantiene río abajo del choque hasta su trayecto a 0.55 UA en ambos casos. Pudiera suceder que al llegar a 1 UA las frecuencias sean comparables. Aunque la diferencia en dichas frecuencias, en el caso de emisión fundamental, disminuye lentamente; mientras que en el caso de emisión armónica la región de incertidumbre parece tener una tendencia paralela a la identidad. Esto puede deberse a las limitaciones de las técnicas implementadas y/o por la estimación de la velocidad inicial en el cálculo de la trayectoria del choque.

El resultado de esta investigación es que de los 4 eventos que se pudieron analizar, en tres de ellos el uso del modelo concuerda con las observaciones si se da el caso de la emisión armónica. En caso de que la observación en el espectro dinámico corresponda a la emisión fundamental, entonces concuerda con dos eventos. Ahora la pregunta es si estos dos eventos tienen algo en particular para que se haya obtenido un buen resultado. La respuesta es que: sí. Estos dos eventos tienen un ancho de emisión bien definido en el espectro dinámico; lo que da mejores resultados al usar la técnica de Aguilar-Rodriguez et al. (2005), por consiguiente, un mejor ajuste en la regresión *BW*. En ambos casos, el problema con el evento evento 2, es que la velocidad de la EMC fue estimada usando el tiempo de observación de la fulguración y la observación de la tormenta geomagnética en la Tierra. Por otro lado, respecto a los parámetros del choque no se observó algo en particular para inferir algún resultado; sería necesario estudiar más eventos para llegar a una conclusión más confiable. En el siguiente capítulo se muestran las conclusiones a las que se llegaron con este proyecto de investigación.



## Conclusiones

El objetivo de este trabajo fue determinar en qué casos la región de emisión de los estallidos Tipo II se localiza río arriba o río abajo del choque. O si existe la posibilidad de que ambos escenarios sean válidos y qué condiciones deben cumplirse. Esto con el fin de tener un mejor entendimiento del problema. Se encontraron 7 eventos (incluyendo los eventos publicados en Pulupa and Bale (2008)) que contenían una posible actividad de ondas de Langmuir; de los cuáles se analizaron los eventos 1, 2, 4 y 5 (ver Tabla 3.1). Después del análisis expuesto en el capítulo anterior, se presentan las siguientes conclusiones:

1. De acuerdo con el modelo de densidad, si la emisión Tipo II observada en el espectro dinámico corresponde a la fundamental, la región de emisión en el evento 4 y 5 se encuentra río abajo del choque hasta 0.65 y 0.75 UA, respectivamente. Pudiera suceder que a 1 UA se den las condiciones para que la emisión también se dé río arriba del choque en el caso del evento 4.
2. Si la emisión Tipo II observada en el espectro dinámico corresponde al segundo armónico, entonces la localización de la región de emisión, relativo al choque interplanetario, en los eventos 1,4 y 5 concuerda con las observaciones *in-situ*. Este resultado sugiere que la emisión observada corresponde al segundo armónico, sin embargo, esto es cuestionable, se necesita más estadística para obtener resultados con mayor certeza.
3. De acuerdo con los resultados del modelo de densidad, en el Evento 2 la región de emisión se localiza río abajo del choque, mientras que de las observaciones se sabe que dicha región se encuentra río arriba. Este resultado puede deberse a distintas fuentes de errores, como la estimación de la velocidad inicial y el tiempo en que fue observada la EMC para calcular la trayectoria del choque. Otra fuente de error son las estructuras de densidad que se supone el choque encuentra a su paso. Estos errores influyen en la regresión  $BW$  y en el modelo de densidad. Lo que puede causar que los valores calculados de la frecuencia de plasma río arriba del choque sean más bajos o más altos que las frecuencias observadas de la emisión Tipo II.

Por lo tanto, la localización de la región de emisión Tipo II, relativo al choque interplanetario, se puede estimar usando modelos de densidad. Para ello es necesario calcular la trayectoria del choque, sin embargo, este problema tiene cierta complejidad, ya que cada uno de los métodos tiene sus limitaciones y la velocidad del viento solar cambia la densidad y las condiciones del medio en el que se propaga el choque asociado. También las características del frente de choque pudieran influir, como la presencia de una región frente al choque donde se puedan acelerar electrones. Es necesario un número mayor de eventos para obtener conclusiones más confiables acerca de si los parámetros del choque también influyen para determinar la localización de la región de emisión.

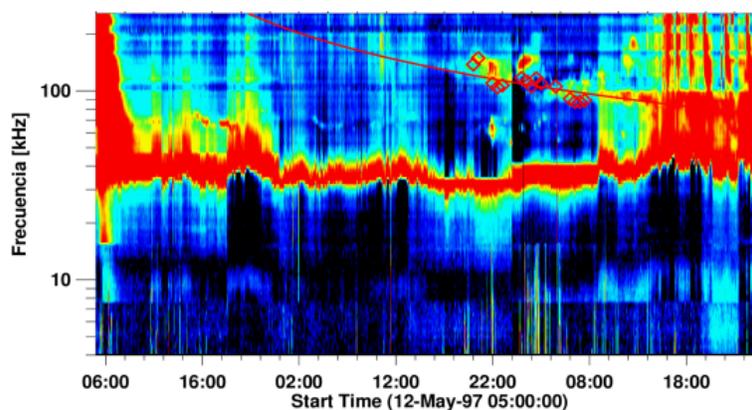
Como un trabajo a futuro se podrían emplear otros métodos, ya sea numéricos o analíticos, para calcular la trayectoria del choque; comparar los resultados con otros modelos de densidad y estudiar eventos donde no se tengan observaciones *in situ* de la región donde proviene la emisión.

## Resultados de la regresión BW

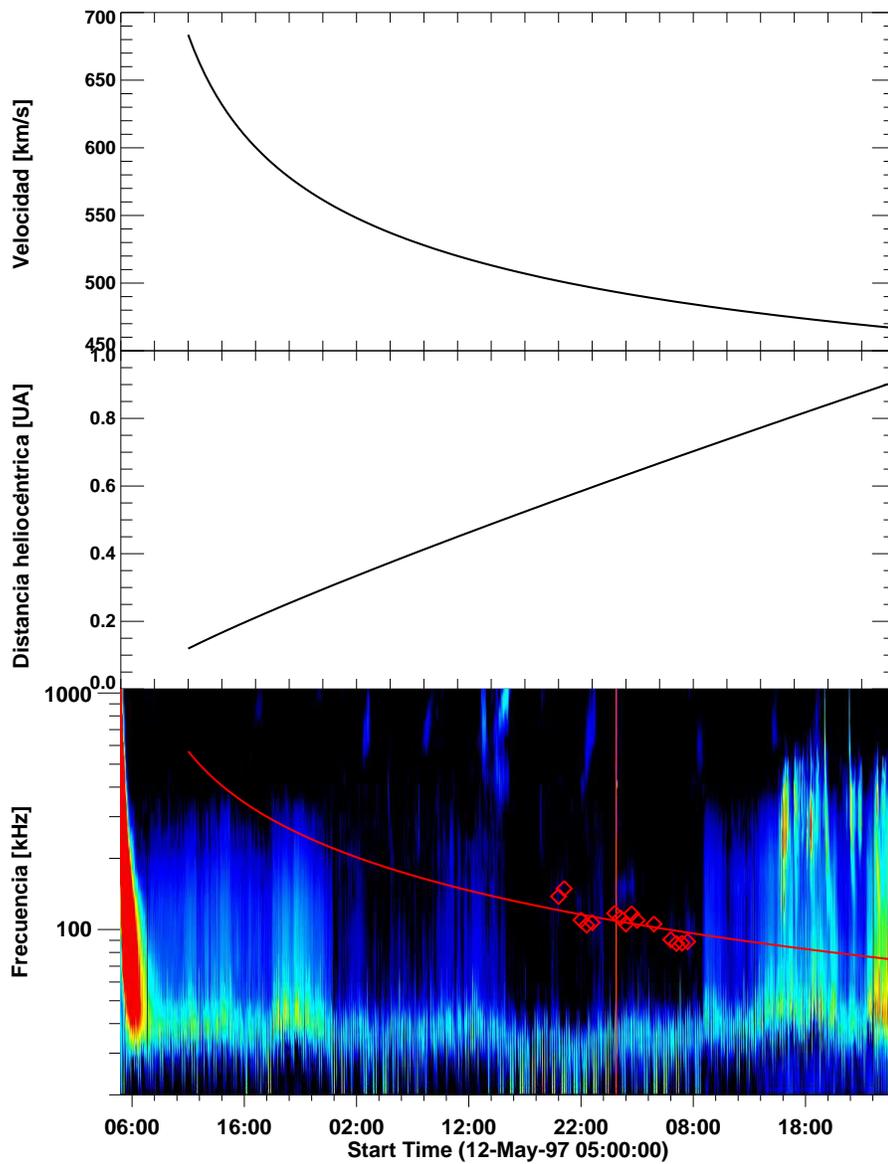
En este apartado se muestran gráficamente los resultados obtenidos en la regresión BW. Los valores iniciales se encuentran en la Tabla 3.3. En las Figuras A.2-A.5 se muestran: en el primer panel, de arriba hacia abajo, la velocidad del choque durante el evento. En el segundo panel la distancia heliocéntrica del choque en el tiempo que duró este evento. Finalmente, en el tercer panel se muestra el espectro dinámico del estallido Tipo II. Las observaciones en cuadritos son las frecuencias obtenidas con el método usado en Aguilar-Rodriguez et al. (2005), mientras que la línea sólida de color rojo son las frecuencias del borde de abajo de la banda de emisión, obtenidas con la regresión *BW*.

### Evento 1

Este evento consiste en un débil estallido Tipo II que inició el 12 de mayo de 1997, a las 05:15 TU. Por otro lado, el choque asociado fue observado a 1 UA el 15 de mayo de 1997, a las 01:15 TU. Sin embargo, en los resultados de la regresión, como se muestra en la Figura A.2, el choque llega a 1 UA varias horas después. En la Figura A.1 se muestra el mismo resultado pero a frecuencias del TNR.



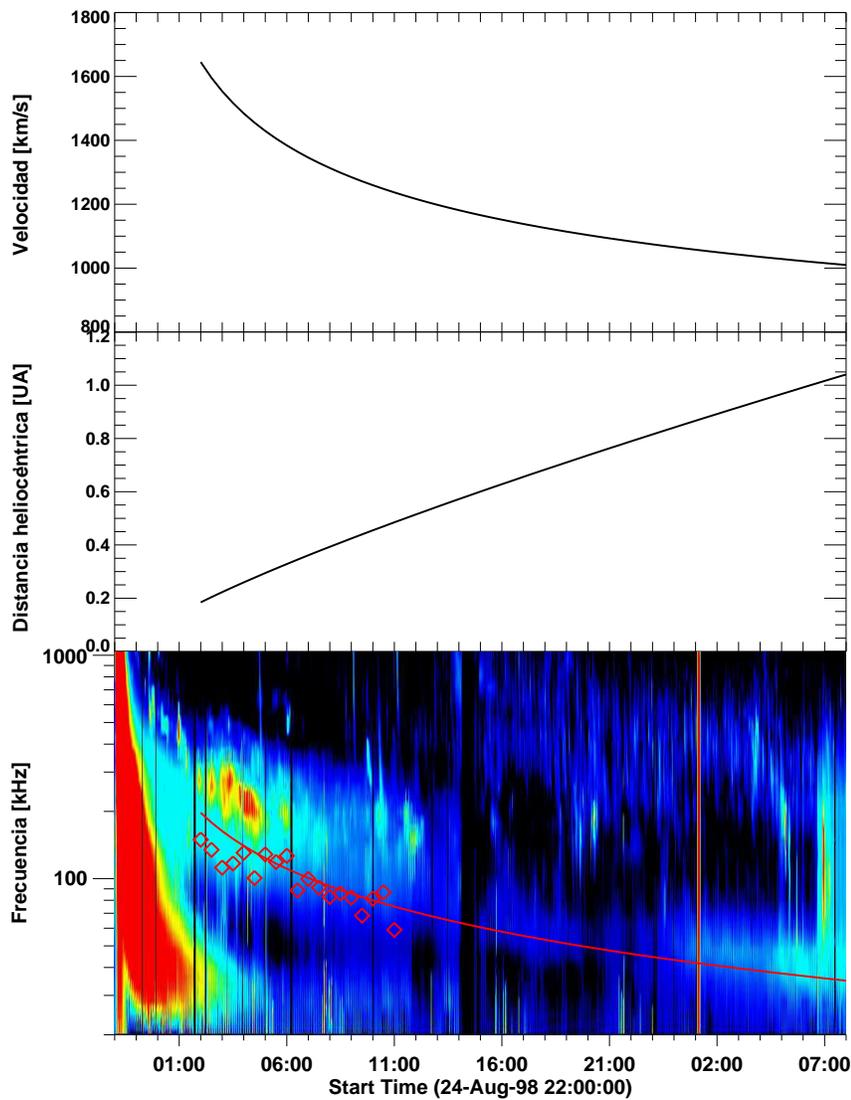
**Fig. A.1.:** Espectro dinámico y resultado de la regresión BW a frecuencias del TNR.



**Fig. A.2.:** Resultados de la regresión BW. De arriba hacia abajo se muestran la velocidad del frente de choque, la distancia heliocéntrica de éste y finalmente el espectro dinámico del estallido Tipo II.

## Evento 2

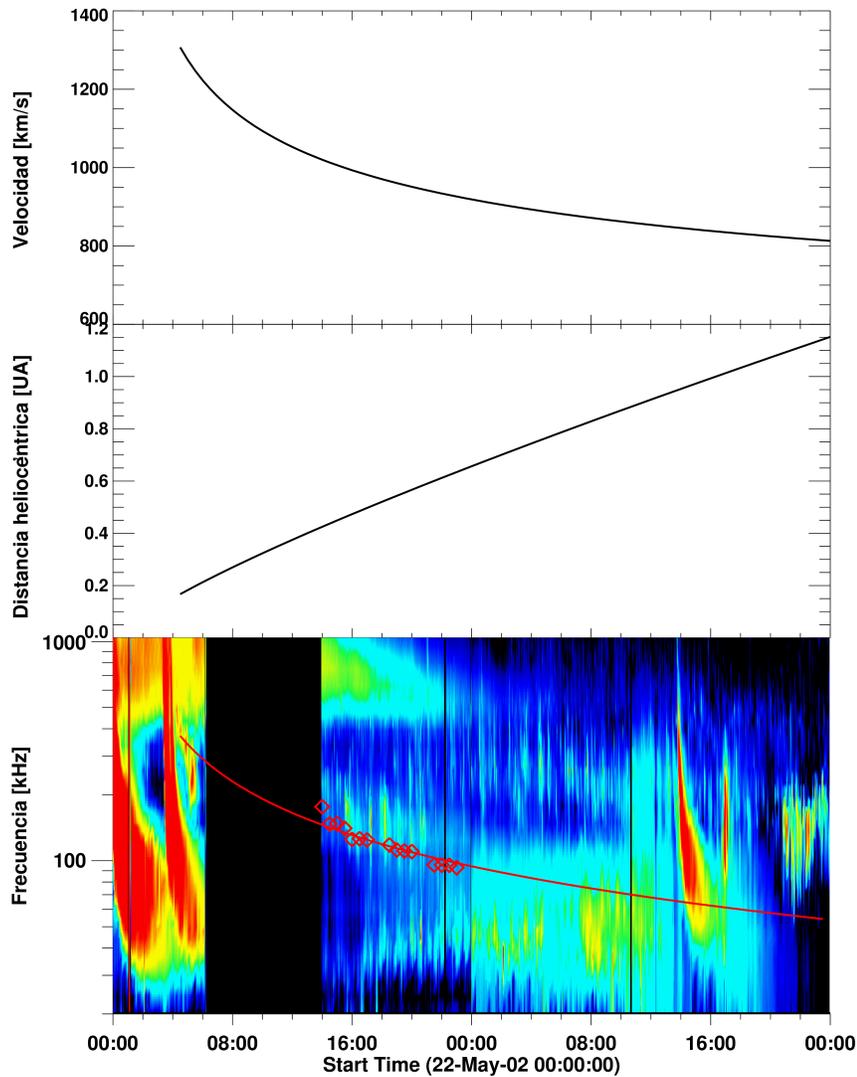
Este evento consiste en un intenso estallido Tipo II que inició el 24 de agosto de 1998, a las 22:05 TU. El choque asociado fue observado el 26 de agosto de 1998, a las 06:40 TU; mientras que de los resultados de la regresión el choque llegó a 1 UA alrededor de 5 horas antes.



**Fig. A.3.:** Resultados de la regresión BW. De arriba hacia abajo se muestran la velocidad del frente de choque, la distancia heliocéntrica de éste y finalmente el espectro dinámico del estallido Tipo II. En este evento se estimó la velocidad inicial de la EMC para efectuar la regresión BW.

## Evento 4

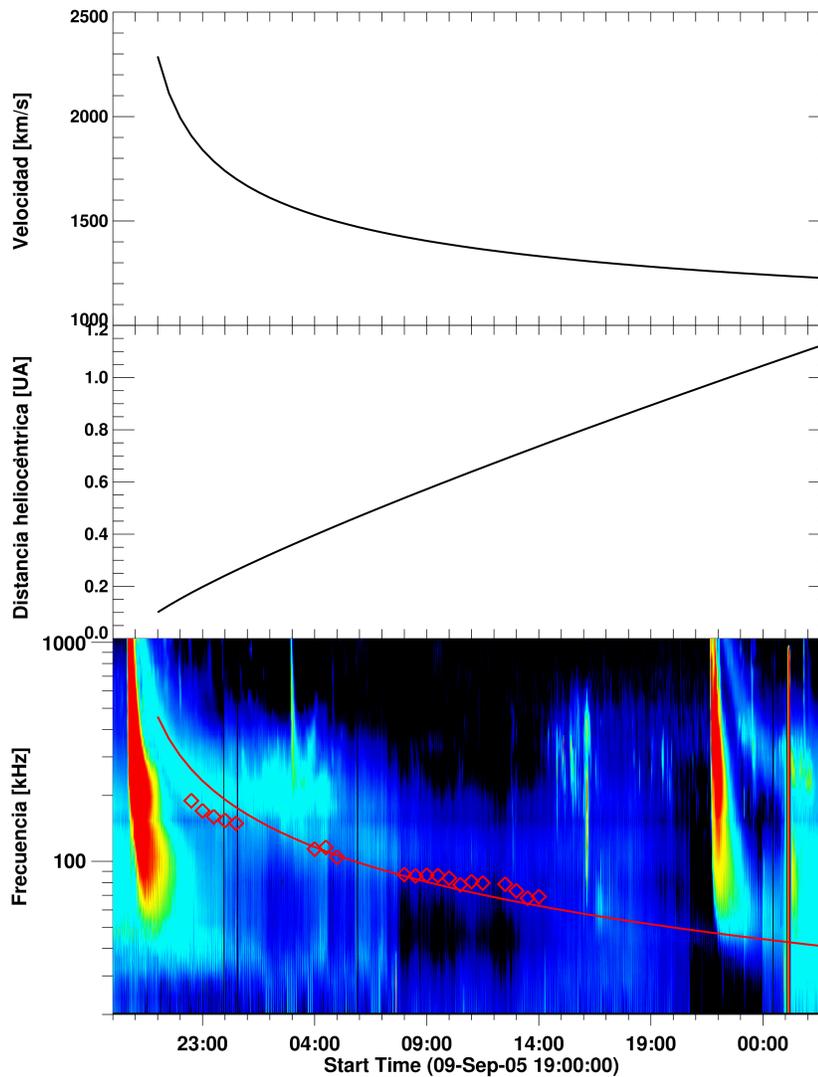
Este evento consiste en un rápido estallido Tipo II que inició el 22 de mayo de 2002, a las 04:10 TU. Por otro lado, el choque asociado fue observado el 23 de mayo de 2002, a las 10:44 TU; mientras que de los resultados de la regresión, el choque llegó a 1 UA aproximadamente 5 horas después.



**Fig. A.4.:** De arriba hacia abajo se muestran la velocidad del frente de choque, la distancia heliocéntrica de éste y finalmente el espectro dinámico del estallido Tipo II.

## Evento 5

En este evento el estallido Tipo II inició el 09 de septiembre de 2005, a las 19:45 TU. Por otro lado, el choque asociado fue observado el 11 de septiembre de 2005, a las 00:57 TU; mientras que en el resultado de la regresión *BW* el choque llegó alrededor de 2 horas antes.



**Fig. A.5.:** De arriba hacia abajo se muestran la velocidad del frente de choque, la distancia heliocéntrica de éste y finalmente el espectro dinámico del estallido Tipo II.



# Referencias

- Aguilar-Rodríguez, Ernesto (2006). “Características y evolución de las eyecciones de masa coronal”. PhD thesis. Universidad Nacional Autónoma de México (cit. on pp. vii, viii).
- Aguilar-Rodríguez, E, N Gopalswamy, R MacDowall, S Yashiro, and ML Kaiser (2005). “A universal characteristic of type II radio bursts”. In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 110.A12 (cit. on pp. 22, 24, 27, 33, 37).
- Appleton, Edward and JS Hey (1946). “XII. Solar radio noise.—I”. In: *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 37.265, pp. 73–84 (cit. on p. 2).
- Aschwanden, Markus (2006). *Physics of the solar corona: an introduction with problems and solutions*. Springer Science & Business Media (cit. on pp. 7, 8).
- Bale, SD, MJ Reiner, J-L Bougeret, et al. (1999). “The source region of an interplanetary type II radio burst”. In: *Geophysical research letters* 26.11, pp. 1573–1576 (cit. on pp. vii, viii, 4, 15, 25, 29).
- Bougeret, J-L, JH King, and R Schwenn (1984). “Solar radio burst and in situ determination of interplanetary electron density”. In: *Solar physics* 90.2, pp. 401–412 (cit. on p. 22).
- Bougeret, J-L, M L Kaiser, Paul J Kellogg, et al. (1995). “Waves: The radio and plasma wave investigation on the Wind spacecraft”. In: *Space Science Reviews* 71.1-4, pp. 231–263 (cit. on p. 13).
- Cairns, Iver H (1986). “The source of free energy for type II solar radio bursts”. In: *Publications of the Astronomical Society of Australia* 6.4, pp. 444–446 (cit. on pp. vii, viii, 4, 15).
- Cane, HV, NR Sheeley, and RA Howard (1987). “Energetic interplanetary shocks, radio emission, and coronal mass ejections”. In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 92.A9, pp. 9869–9874 (cit. on p. 3).
- Chertok, IM and VV Fomichev (1976). “Propagation of interplanetary shock waves by observations of type II solar radio bursts on IMP-6”. In: *Planetary and Space Science* 24.5, pp. 459–464 (cit. on p. 4).
- Cliiver, EW, NV Nitta, BJ Thompson, and J Zhang (2004). “Coronal shocks of November 1997 revisited: The CME–type II timing problem”. In: *Solar Physics* 225.1, pp. 105–139 (cit. on p. 3).
- Corona-Romero, P, JA Gonzalez-Esparza, E Aguilar-Rodríguez, V De-la Luz, and JC Mejia-Ambriz (2015). “Kinematics of ICMEs/shocks: blast wave reconstruction using type-II emissions”. In: *Solar Physics* 290.9, pp. 2439–2454 (cit. on p. 23).

- Dulk, George A (2000). “Type III solar radio bursts at long wavelengths”. In: *Radio Astronomy at Long Wavelengths* 119, pp. 115–122 (cit. on p. 11).
- Feng, SW, GH Du, Y Chen, et al. (2015). “Simultaneous radio and EUV imaging of a multi-lane coronal type II radio burst”. In: *Solar Physics* 290.4, pp. 1195–1205 (cit. on p. 3).
- Foukal, Peter V (2008). *Solar astrophysics*. John Wiley & Sons (cit. on p. 1).
- Gary, Dale E and Christoph U Keller (2004). *Solar and space weather radiophysics: current status and future developments*. Vol. 314. Springer Science & Business Media (cit. on p. 8).
- Golub, Leon and Jay M Pasachoff (2002). *Nearest star: the surprising science of our sun*. Harvard University Press (cit. on p. 1).
- Gopalswamy, N (2004a). “Interplanetary radio bursts”. In: *Solar and Space Weather Radiophysics*. Springer, pp. 305–333 (cit. on p. 11).
- (2004b). “Recent advances in the long-wavelength radio physics of the Sun”. In: *Planetary and Space Science* 52.15, pp. 1399–1413 (cit. on p. 12).
- Gopalswamy, N. (2013). “Type II Solar Radio Bursts”. In: *Radio Astronomy at Long Wavelengths*. American Geophysical Union (AGU), pp. 123–135. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/GM119p0123> (cit. on p. 9).
- Gopalswamy, N, S Yashiro, ML Kaiser, RA Howard, and J-L Bougeret (2001). “Characteristics of coronal mass ejections associated with long-wavelength type II radio bursts”. In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 106.A12, pp. 29219–29229 (cit. on p. 14).
- Grigoreva, VP (1977). “Observations of type-II solar bursts at low radio frequencies”. In: *CosRe* 15.1, pp. 117–124 (cit. on p. 4).
- Holman, GORDON D and ME Pesses (1983). “Solar type II radio emission and the shock drift acceleration of electrons”. In: *The Astrophysical Journal* 267, pp. 837–843 (cit. on pp. vii, viii, 4, 15).
- Krall, NA and DF Smith (1975). “Radiation phenomena in type II solar radio bursts and laboratory shock-wave experiments”. In: *The Astrophysical Journal* 199, pp. 500–503 (cit. on pp. vii, viii, 3, 15).
- Krasnoselskikh, VV, EN Kruchina, AS Volokitin, and G Thejappa (1985). “Fast electron generation in quasiperpendicular shocks and type II solar radiobursts”. In: (cit. on pp. vii, viii, 4).
- Krucker, S, AO Benz, MJ Aschwanden, and TS Bastian (1995). “Location of type I radio continuum and bursts on Yohkoh soft X-ray maps”. In: *Solar Physics* 160.1, pp. 151–169 (cit. on p. 10).
- Krüger, Albrecht (2012). *Introduction to solar radio astronomy and radio physics*. Vol. 16. Springer Science & Business Media (cit. on pp. 2, 12).
- Kundu, M. R. (1965). *Solar Radio Astronomy*. Interscience, New York (cit. on pp. 3, 10, 12).
- Lampe, M and K Papadopoulos (1977). “Formation of fast electron tails in type II solar bursts”. In: *The Astrophysical Journal* 212, pp. 886–890 (cit. on pp. vii, viii, 3, 15).
- Lara, A, N Gopalswamy, S Nunes, G Munoz, and S Yashiro (2003). “A statistical study of CMEs associated with metric type II bursts”. In: *Geophysical Research Letters* 30.12 (cit. on p. 13).

- Leblanc, Yolande, George A Dulk, Angelos Vourlidas, and Jean-Louis Bougeret (2001). “Tracing shock waves from the corona to 1 AU: Type II radio emission and relationship with CMEs”. In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 106.A11, pp. 25301–25312 (cit. on p. 3).
- Lengyel-Frey, D (1992). “Location of the radio emitting regions of interplanetary shocks”. In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 97.A2, pp. 1609–1617 (cit. on pp. 4, 22).
- Lengyel-Frey, D and RG Stone (1989). “Characteristics of interplanetary type II radio emission and the relationship to shock and plasma properties”. In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 94.A1, pp. 159–167 (cit. on p. 13).
- Lepping, RP, MH Acuña, LF Burlaga, et al. (1995). “The WIND magnetic field investigation”. In: *Space Science Reviews* 71.1-4, pp. 207–229 (cit. on p. 17).
- Lin, RP, KA Anderson, S Ashford, et al. (1995). “A three-dimensional plasma and energetic particle investigation for the Wind spacecraft”. In: *Space Science Reviews* 71.1-4, pp. 125–153 (cit. on p. 19).
- Mann, G and T Classen (1995). “Shock waves in the solar corona and their radio emission”. In: *Advances in Space Research* 15.8-9, pp. 365–370 (cit. on p. 9).
- Nindos, A, CE Alissandrakis, A Hillaris, and P Preka-Papadema (2011). “On the relationship of shock waves to flares and coronal mass ejections”. In: *Astronomy & Astrophysics* 531, A31 (cit. on pp. vii, viii).
- Ogilvie, KW, DJ Chornay, RJ Fritzenreiter, et al. (1995). “SWE, a comprehensive plasma instrument for the Wind spacecraft”. In: *Space Science Reviews* 71.1-4, pp. 55–77 (cit. on p. 17).
- Payne-Scott, Ruby, DE Yabsley, and JG Bolton (1947). “Relative times of arrival of bursts of solar noise on different radio frequencies”. In: *Nature* 160.4060, pp. 256–257 (cit. on p. 13).
- Pulupa, M and SD Bale (2008). “Structure on interplanetary shock fronts: Type II radio burst source regions”. In: *The Astrophysical Journal* 676.2, p. 1330 (cit. on pp. 15, 20, 27, 35).
- Pulupa, Marc Peter (2010). “Langmuir waves and electron acceleration at heliospheric shocks”. PhD thesis. UC Berkeley (cit. on p. 9).
- Reiner, MJ, ML Kaiser, and J-L Bougeret (2001). “Radio signatures of the origin and propagation of coronal mass ejections through the solar corona and interplanetary medium”. In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 106.A12, pp. 29989–30000 (cit. on p. 3).
- Su, W, X Cheng, MD Ding, PF Chen, and JQ Sun (2015). “A type II radio burst without a coronal mass ejection”. In: *The Astrophysical Journal* 804.2, p. 88 (cit. on p. 3).
- Vršnak, Bojan, Vladimir Ruždjak, P Zlobec, and H Aurass (1995). “Ignition of MHD shocks associated with solar flares”. In: *Solar Physics* 158.2, pp. 331–351 (cit. on p. 13).
- Wild, JP and LL McCready (1950). “Observations of the Spectrum of High-Intensity Solar Radiation at Metre Wavelengths. I. The Apparatus and Spectral Types of Solar Burst Observed”. In: *Australian Journal of Chemistry* 3.3, pp. 387–398 (cit. on pp. 11, 13).

## Web site

Agency, European Space. *What are solar flares?* URL: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/What\\_are\\_solar\\_flares](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/What_are_solar_flares) (cit. on p. 15).

Bachiller, Rafael. *El nacimiento de la Radioastronomía*. URL: <https://www.elmundo.es/elmundo/2009/10/07/ciencia/1254911450.html> (visited on Nov. 13, 2019) (cit. on p. 2).

Center, Stanford Solar. *The Sun's Vital Statistics*. URL: <http://solar-center.stanford.edu/vitalstats.html> (visited on Nov. 10, 2019) (cit. on p. 1).

Observatory, MIT Haystack. *Radio Astronomy Tutorial*. URL: <https://www.haystack.mit.edu/edu/undergrad/materials/tut4.html> (visited on Nov. 13, 2019) (cit. on p. 2).

Radioastronomía, Observatorio Nacional de. *Historia de la Radio Astronomía*. URL: [https://www.nrao.edu/whatisra/hist\\_prehist-s.shtml](https://www.nrao.edu/whatisra/hist_prehist-s.shtml) (visited on Nov. 13, 2019) (cit. on p. 2).

# Lista de Figuras

2.1	Tormenta Tipo I observado por el espectrógrafo de Culgoora. . . . .	10
2.2	Espectro dinámico de un estallido Tipo III registrado por el instrumento de radio Wind/WAVES. . . . .	11
2.3	Espectro dinámico de un estallido Tipo IV observado por Wind/WAVES el 19 de enero de 2005. La emisión comienza a las 08:45 TU, con un frecuencia inicial de 14000 kHz, y termina a las 09:55 TU, con una frecuencia final de 4500 kHz. . . .	12
2.4	Espectro dinámico de un estallido de radio Tipo II con estructura fundamental (F) y armónica (H), visto por el Observatorio Solar Hiraíso, Japón (HiRAS) el 30 de octubre de 2004. . . . .	14
3.1	Espectro dinámico, campo magnético, velocidad del viento solar, densidad numérica de protones y velocidad térmica observado por la nave Wind. La emisión Tipo II se ve como una deriva lenta hacia bajas frecuencias en el espectro dinámico. Mientras que la llegada del choque se muestra como un salto abrupto en la frecuencia local del plasma, en el campo magnético, en la densidad numérica de protones y en la velocidad térmica. . . . .	19
3.2	Las tres primeras gráficas muestran los eventos publicados en Pulupa and Bale (2008). Las ondas de Langmuir en estas figuras están asociadas con el incremento en el flujo de electrones en las direcciones paralela y antiparalela, excepto para el choque del 11 de febrero de 2000; en el cual se observa el incremento sólo en la dirección antiparalela. En el evento del 23 de mayo de 2002 hay un "gap" de datos en el flujo de electrones. . . . .	20
3.3	El espectro dinámico y la potencia del campo eléctrico muestran actividad de ondas de Langmuir en la región frente al choque (foreshock) para los eventos del 2011. Por otro lado, en el evento del 2005 esta actividad se muestra sólo en el espectro dinámico, en la región detrás del choque, ya que no hay datos de la potencia del campo eléctrico. La resolución de la distribución de energía del flujo de electrones es de 90 segundos. . . . .	21

3.4	Método aplicado para obtener la frecuencia de emisión central y ancho de banda asociado para el evento 5. (a) espectro dinámico del evento Tipo II del instrumento de radio WAVES/RAD1. (b) Emisión Tipo II aislada. (c) Densidad de flujo vs. frecuencia para un tiempo del espectro dinámico de RAD1, a las 9:33 TU. . . . .	23
3.5	Progresión del ciclo solar durante los eventos seleccionados en este trabajo. Imagen adaptada de <a href="https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression">https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression</a> . 26	26
4.1	El panel (a) muestra la densidad promedio río arriba del choque vs. densidad en la región fuente Tipo II. La escala de color representa la distancia heliocéntrica de la observación, en azul si la emisión corresponde a la fundamental (F) y en color naranja si la emisión corresponde al segundo armónico (H). Se puede notar que en el caso de la emisión fundamental, en la mayor parte de la duración del evento, las densidades en la fuente Tipo II son significativamente mayores a las densidades río arriba del choque. En el panel (b) se muestra la incertidumbre de la densidad en la región fuente Tipo II asociada al ancho de emisión del estallido. En color rojo se muestra la incertidumbre asociada a la emisión fundamental, mientras que en color azul la incertidumbre asociada al segundo armónico. . . . .	28
4.2	El panel (a) muestra la densidad promedio río arriba del choque vs. densidad en la región fuente Tipo II. La escala de color representa la distancia heliocéntrica de la observación, en azul si la emisión corresponde a la fundamental (F) y en color naranja si la emisión corresponde al segundo armónico (H). Las frecuencias de emisión Tipo II son considerablemente mayores a las frecuencias de plasma del viento solar. Esto indica que la emisión proviene río abajo del choque. En el panel (b) se presenta la incertidumbre de la densidad en la región fuente Tipo II asociada al ancho de emisión del estallido. En color rojo se muestra la incertidumbre asociada a la emisión fundamental, mientras que en color azul la incertidumbre asociada al segundo armónico. . . . .	29
4.3	El panel (a) muestra la densidad promedio río arriba del choque vs. densidad en la región fuente Tipo II. La escala de color representa la distancia heliocéntrica de la observación, en azul si la emisión corresponde a la fundamental (F) y en color naranja si la emisión corresponde al segundo armónico (H) Como se puede ver, las frecuencias de la emisión Tipo II son mayores a la frecuencia de plasma del viento solar. Este resultado nos está diciendo que la emisión proviene río abajo del choque. En el panel (b) se muestra la incertidumbre de la densidad en la región fuente Tipo II ( $n_{II}(t)$ ) asociada al ancho de emisión del estallido. En color rojo se muestra la incertidumbre asociada a la emisión fundamental, mientras que en color azul la incertidumbre asociada al segundo armónico. . . . .	31

4.4	El panel (a) muestra la densidad promedio río arriba del choque vs. densidad en la región fuente Tipo II. La escala de color representa la distancia heliocéntrica de la observación, en azul si la emisión corresponde a la fundamental (F) y en color naranja si la emisión corresponde al segundo armónico (H) En este evento, las frecuencias de la emisión Tipo II son considerablemente mayores a la frecuencia de plasma del viento solar. En el panel (b) se presenta la incertidumbre de la densidad en la región fuente Tipo II ( $n_{II}(t)$ ) asociada al ancho de emisión del estallido. En color rojo se muestra la incertidumbre asociada a la emisión fundamental, mientras que en color azul la incertidumbre asociada al segundo armónico. . . . .	32
A.1	Espectro dinámico y resultado de la regresión BW a frecuencias del TNR. . . . .	37
A.2	Resultados de la regresión BW. De arriba hacia abajo se muestran la velocidad del frente de choque, la distancia heliocéntrica de éste y finalmente el espectro dinámico del estallido Tipo II. . . . .	38
A.3	Resultados de la regresión BW. De arriba hacia abajo se muestran la velocidad del frente de choque, la distancia heliocéntrica de éste y finalmente el espectro dinámico del estallido Tipo II. En este evento se estimó la velocidad inicial de la EMC para efectuar la regresión BW. . . . .	39
A.4	De arriba hacia abajo se muestran la velocidad del frente de choque, la distancia heliocéntrica de éste y finalmente el espectro dinámico del estallido Tipo II. . . . .	40
A.5	De arriba hacia abajo se muestran la velocidad del frente de choque, la distancia heliocéntrica de éste y finalmente el espectro dinámico del estallido Tipo II. . . . .	41



# Lista de Tablas

3.1	Estallidos Tipo II observados por el instrumento de radio Wind/WAVES ( <a href="https://solar-radio.gsfc.nasa.gov/wind/index.html">https://solar-radio.gsfc.nasa.gov/wind/index.html</a> ) y EMC asociadas, tomadas del catálogo de EMCs identificadas por LASCO/SOHO ( <a href="https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/">https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/</a> y <a href="https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/radio/waves_type2.html">https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/radio/waves_type2.html</a> ). . . . .	16
3.2	Choques interplanetarios observados <i>in situ</i> en las regiones de estallidos tipo II. Datos tomados de Heliospheric Shock Database ( <a href="https://ipshocks.fi/">https://ipshocks.fi/</a> ). * Parámetros tomados de <a href="https://www.cfa.harvard.edu/shocks/wi_data/wi_2005.html">https://www.cfa.harvard.edu/shocks/wi_data/wi_2005.html</a> . . . . .	16
3.3	Resultados del método BWR. Los valores iniciales $n_{1UA}$ y $w_{1UA}$ se tomaron de un promedio de mediciones in-situ 8-12 horas antes del arribo del choque. El valor inicial de $v_0$ es la velocidad inicial de la EMC (ver Tabla 3.1.). Para el evento 2, la velocidad inicial fue estimada usando información del tiempo de observación de la fulguración y el tiempo de observación de la tormenta geomagnética en la Tierra. . . . .	26