

USO DE LA TRANSFORMADA DE WAVELET PARA EL ANÁLISIS DE OSCILACIONES EN FILAMENTOS QUIETOS DEL SOL

USE OF THE WAVELET TRANSFORM FOR THE ANALYSIS OF OSCILLATIONS OF THE QUIESCENT SOLAR FILAMENTS

MIGUEL ROJAS-QUESADA* LELA TALIASHVILI[†]
HEIDY GUTIÉRREZ[‡]

*Received: 16/Nov/2020; Revised: 5/Apr/2021;
Accepted: 12/Apr/2021*

Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones is licensed under a Creative Commons
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



*Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Física, Cartago, Costa Rica.
E-Mail: miguel.rojas@tec.ac.cr

[†]Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Espaciales (CINESPA) y Escuela de Física, San José, Costa Rica. E-Mail: lela.taliashvili@ucr.ac.cr

[‡]Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Espaciales (CINESPA) y Escuela de Física, San José, Costa Rica. E-Mail: heidy.gutierrez@ucr.ac.cr

Resumen

Hemos analizado la evolución (temporal y según la altura) de las oscilaciones de largo período de dos filamentos quietos, relacionados con los procesos iniciales de sus inestabilidades termales y/o dinámicas y su correlación con las respuestas coronales asociadas, principalmente con las Eyecciones de Masa Coronal (CMEs). El estudio de oscilaciones se realizó durante las Rotaciones de Carrington CR 2151 y CR 2152, que coinciden con el máximo del ciclo solar 24, con base en las imágenes de múltiples longitudes de onda, tomadas por SDO y GONG. Se llevó a cabo una rutina en SolarSoft, utilizando la transformada de wavelet, que permite obtener el espectro de frecuencias de las oscilaciones de largo período y su evolución temporal para los filamentos. Los resultados de este estudio muestran que estas oscilaciones son asociadas a movimientos longitudinales de pequeña amplitud mayoritariamente, y su origen se relaciona con las inestabilidades termales de filamentos, que provocan flujos bidireccionales en los filamentos. Además, se detectó claramente una oscilación adicional con un período de 6 h en los espectros de ondículas y periodogramas, aunque no fue posible identificar oscilaciones longitudinales que coincidieran con este período. Asimismo, hemos identificado indicios de que en los eventos estudiados el proceso de reconexión magnética también ocurren en capas por debajo de la corona, ya que las perturbaciones de la intensidad observadas son más prominentes en los filtros correspondientes a la cromósfera, zona de transición y la corona baja mientras que éstas decaen en los filtros asociados a la corona.

Palabras clave: transformada de Wavelet; SolarSoft; oscilaciones; filamentos solares.

Abstract

We have analyzed the time and height evolution of the long-period oscillations of two quiescent filaments, related to the initial processes of their thermal and/or dynamic instabilities and their correlation with the associated coronal responses, mainly with Coronal Mass Ejections (CMEs). The study of oscillations was carried out during the Carrington Rotations CR 2151 and CR 2152, which coincide with the maximum of solar cycle 24, based on the images of multiple wavelengths, taken by SDO and GONG. A routine was carried out in SolarSoft, using the wavelet transform, which allows obtaining the frequency spectrum of long-period oscillations and their temporal evolution for the filaments. The results of this study show that these oscillations are mainly associated with small amplitude longitudinal movements and their origin is related to the thermal instabilities of filaments, which cause bidirectional fluxes in the filaments. Furthermore, an additional oscillation with a period of 6 h was clearly detected in the wavelet and periodogram spectra, although it was

not possible to identify longitudinal oscillations that coincided with this period. As well we have identified indications that in the studied events the magnetic reconnection process also occurs in layers below the corona, since the intensity disturbances observed are more prominent in the filters corresponding to the chromosphere, transition zone and the low corona, while they decay in the filters associated with the corona.

Keywords: Wavelet transform; SolarSoft; oscillations; solar filaments.

Mathematics Subject Classification: 85-08, 65T60.

1 Introducción

Las oscilaciones de pequeña amplitud de los filamentos solares exhiben variaciones periódicas con una velocidad en el rango de 0.1 a 3 km s^{-1} . Dichas oscilaciones no son provocadas por las llamaradas solares (flares) y suelen ocurrir en una región limitada del filamento [1]. Aunque no se ha podido identificar el mecanismo preciso de estas oscilaciones, se considera que están asociadas a los movimientos periódicos del campo magnético, causados por las oscilaciones fotosféricas o cromosféricas. Estas oscilaciones pueden tener periodos en un amplio rango de valores desde los minutos y hasta algunas horas. En algunos estudios se han reportado periodicidades de menos de 90 min, y han sido satisfactoriamente identificadas como ondas MHD, en las cuales, la fuerza restauradora es la presión magnética [6]. La clasificación de acuerdo al periodo de oscilaciones no está bien establecida, pero clásicamente se consideran las oscilaciones de corto periodo (< 10 min) y de largo periodo (> 40 min) [1].

Los movimientos oscilatorios detectados en EUV en un filamento aparentemente inactivo, muestran un aumento de los periodos de oscilación antes de su erupción, esto sugiere que las oscilaciones de periodos largos en los filamentos en EUV pueden relacionarse con la misma, pues se consideran que las oscilaciones podrían inducir al filamento a un estado inestable [15], pero las características (rango de frecuencia, amplitud, duración) de las oscilaciones que pueden desencadenar una erupción y la forma en que se producen e inducen dichas oscilaciones aún no están claras.

Los filamentos solares quietos (FQs) se encuentran lejos de las regiones activas (RAs) y han sido ampliamente estudiados en la línea $H\alpha$ (HI), pero también observaciones en EUV indican la presencia de oscilaciones con periodos ultra largos de hasta 12 h. Estas oscilaciones han sido interpretadas como modos MHD (especialmente, como ondas magnetoacústicas y de Alfvén) y se ha propuesto el modelo respectivo [11] para calcular el periodo más largo en función

de la longitud del filamento. Asimismo, se han identificado oscilaciones con periodos de 5 – 6 h como efecto del modo *kink* lento [15], asumiendo que la estructura fina del filamento consiste en tubos cilíndricos de plasma, este modo corresponde a oscilaciones transversales asimétricas respecto al eje del tubo [16].

En $H\alpha$ los filamentos se observan en absorción (material oscuro y frío), sin embargo, durante su evolución pueden presentar un aumento en la temperatura, que implica una disminución de su intensidad observada en $H\alpha$ y la aparición consecutiva en líneas más calientes. Este proceso es considerado como una desaparición brusca de origen termal (DBt). Por otro lado, se considera que la desaparición brusca del filamento es dinámica (DBd), cuando en los eventos se da una explosión clásica del filamento/prominencia, esto es, cuando el material del filamento es expulsado hacia las capas superiores de la atmósfera solar debido principalmente a la reconexión magnética [17].

La transformada de Wavelet permite identificar el periodo y la variación temporal de las oscilaciones que componen una señal construida a partir de las variaciones de intensidad de una región de interés. Al aplicar esta técnica, identificamos los periodos (y su evolución) en dos FQs, lo que permitió estudiar estas oscilaciones en relación con las inestabilidades termales o dinámicas de cada filamento.

La estructura de este artículo incluye una descripción de la metodología utilizada para el estudio de los dos FQs seleccionados, una caracterización de cada filamento, su evolución termal y dinámica, y las oscilaciones asociadas, finalizando con las conclusiones.

2 Metodología y selección de eventos

Para este estudio seleccionamos dos FQs durante las Rotaciones de Carrington CR 2151 y CR 2152, que coinciden con el máximo del ciclo solar 24, además se consideraron aquellos filamentos con la mínima distancia desde el meridiano central (para disminuir errores de proyección):

- El filamento 1 (F1), se orienta de forma casi vertical cerca de una RA y durante el periodo de estudio su explosión no genera una CME.
- El filamento 2 (F2), se orienta de forma horizontal, lejos de RAs y al explotar genera una importante CME.

Para cada uno de los eventos de FQs seleccionados, se estudió la variación temporal de la intensidad y su evolución, considerando las DBt/DBd de FQs, y consecuencias corales o CMEs asociadas, con base en el análisis de imágenes

Tabla 1: Longitud de onda observada, iones primarios, temperatura y región en la cual se obtiene la máxima capacidad de respuesta en cada uno de los canales de SDO/AIA. Adaptada de [2].

Nombre del canal	Iones primarios	Log(T)	Región
1600 Å	CIV+ cont.	5.0	Fotósfera
304 Å	HeII	4.7	Cromósfera y zona de transición
171 Å	FeIX	5.8	Zona de transición alta y corona baja
193 Å	FeXII, XXIV	6.2,7.3	Corona
211 Å	FeXIV	6.3	Corona

tomadas por los telescopios terrestres y espaciales en bandas de diferentes longitudes de onda. Las inestabilidades (DBt/DBd de FQs) se identificaron analizando su evolución continua en $H\alpha$ y EUV combinadas. Para el estudio de la evolución de los filamentos en EUV, hemos analizado las imágenes proporcionadas por la *Atmospheric Imaging Assembly* a bordo del *Solar Dynamics Observatory* (SDO/AIA) [2], específicamente se consideraron los filtros 304, 171, 193 y 211 Å (ver tabla 1), la resolución espacial de las imágenes es de 0.6 segundos de arco-píxel, con una cadencia de 5 min. La evolución de los filamentos en $H\alpha$ se basa en las imágenes tomadas por la red *Global Oscillation Network Group* del *National Solar Observatory* (NSO/GONG). Adicionalmente, estudiamos las RAs y flares cercanas a los FQs con base en datos Heliophysics Events Knowledgebase [10] y las CMEs asociadas con base en el catálogo SOHO/LASCO-C2 CME [8].

Para detectar las oscilaciones de largo periodo (más de 40 min) y estudiar su evolución, se utilizó una metodología similar a la desarrollada por [6] y [5]. Primero, para cada filamento se elaboraron y analizaron vídeos de la evolución temporal (en $H\alpha$) durante un periodo de estudio que fue definido de manera que el mismo cruzara el meridiano central dentro del lapso establecido. Se aseguró además, que cada uno se encontrara alejado del limbo solar en todo momento, esto con el fin de evitar errores debidos a la iluminación del limbo solar. Basado en estos vídeos, se seleccionó una región de interés (ROI) de $10'' \times 10''$ del cuerpo del filamento observado por SDO/AIA, dónde se identificaron a simple vista movimientos oscilatorios del material.

Con el fin de considerar únicamente la evolución asociada a la intensidad de la ROI en las imágenes obtenidas por SDO/AIA, es preciso determinar el centroide de cada imagen y realizar un seguimiento de la posición central de la ROI, conforme el filamento evoluciona en el periodo de estudio, considerando la

rotación diferencial del Sol.

2.1 Determinación del centroide de cada imagen

Para determinar el centroide, se calculó primero el negativo de cada una de las imágenes utilizadas, para lograr que el filamento (región de baja intensidad en cada imagen) parezca ahora como una región brillante respecto a un fondo oscuro. Posteriormente se utilizó el método de *Image Thresholding*, el cual es una forma simple de segmentación de imagen y su objetivo es crear una imagen binaria. Este procesamiento de la imagen se realiza normalmente para separar los píxeles del objeto o primer plano, de los píxeles de fondo.

La función `IMAGE_THRESHOLD` del lenguaje de programación IDL se utilizó para calcular automáticamente los valores de umbral para cada una de las imágenes y filtrar aquellos píxeles de la región que no corresponden al cuerpo del filamento, esta función devuelve una máscara binaria $I(x, y)$ que representa si un píxel determinado en una posición (x, y) estaba por debajo (0) o por encima (1) del valor umbral calculado. Para la determinación del umbral la función utiliza el método desarrollado por N. Otsu [14], que asume un histograma de imagen bimodal e iluminación uniforme y se basa en encontrar un umbral que minimice la varianza dentro de la clase ponderada.

Al contar con de la imagen binaria se procedió a calcular el área (también conocida como momento cero) y centroide. Los momentos de una imagen se puede calcular mediante la siguiente fórmula general:

$$M_{ij} = \sum_x \sum_y x^i y^j I(x, y), \quad (1)$$

donde la función bidimensional $I(x, y)$ es el resultado de la aplicación de la función `IMAGE_THRESHOLD`. El momento cero corresponde al valor de M_{00} , en este caso la fórmula (1) se convierte simplemente en la suma de todos los píxeles con valor igual a 1.

Finalmente, para la determinación de centroide es necesario el cálculo de los valores M_{10} y M_{01} , para luego dividir entre el área:

$$\bar{x} = \sum_x \sum_y x I(x, y) / M_{00}, \quad (2)$$

$$\bar{y} = \sum_x \sum_y y I(x, y) / M_{00}. \quad (3)$$

Este proceso, que da como resultado las coordenadas $(\bar{x}, \bar{y})$ del centro de la ROI, se ejecutó para todas las imágenes de la serie de datos correspondientes a los eventos seleccionados.

2.2 Determinación de la intensidad relativa

Una vez determinada la posición del centro de la ROI en cada imagen, se calculó la intensidad promedio de cada filamento I_0 en la ROI de $10'' \times 10''$ en cada filtro, con base en los datos de intensidad contenidos en los archivos de imágenes FITS Nivel 1 de procesamiento (disponibles en la plataforma del *Joint Science Operations Center* (JSOC) [12]). Este proceso generó resultados sobre la evolución temporal y por la altura de la intensidad en cada una de las dos ROI seleccionadas (un total de 8 series de datos).

Para examinar la evolución de las variaciones de intensidad, se aplicó un filtro de suavizado Savitzky-Golay (SAVGOL, obtenido de la rutina IDL_SAVGOL) usando una ventana de horas determinada para cada filamento. A partir de este valor de intensidad media I_0 es posible calcular las variaciones relativas $I/I_0 - 1$.

El resultado es una señal que corresponde a la suma de diferentes oscilaciones superpuestas, por lo que es necesario obtener un espectro de potencia de ondas de Morlet (mediante la transformada de wavelet u ondícula), el cual permite descomponer una serie temporal en un espacio de tiempo-frecuencia, de donde se pueden determinar los modos dominantes de oscilación y cómo estos evolucionan en el tiempo.

2.3 Cálculo de la transformada de wavelet

La transformada de Wavelet se utiliza justamente para analizar series de tiempo que contienen potencias no estacionarias en diferentes frecuencias, es decir, la señal está compuesta por varias oscilaciones superpuestas de periodos diferentes, las cuales evolucionan en el tiempo (se intensifican, se amortiguan o cambian de periodo). Este proceso se realiza mediante la ejecución del software para IDL, *WAVELET.PRO* proporcionado por C. Torrence y G. Compo. Según lo describe [18], para calcular esta transformada se asume una serie temporal x_n , con igual espacio de tiempo entre los datos δt , y $n = 0, \dots, N - 1$. Se considera también una función wavelet, $\psi_0(\eta)$, que depende de un parámetro temporal adimensional η , esta función además tiene media cero y está localizada tanto el tiempo como el espacio de frecuencias, en este estudio, la función considerada es la onda de Morlet, la consiste en una onda plana modulada por una gaussiana:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2}. \quad (4)$$

La transformada de wavelet corresponde a una convolución de la señal x_n con una versión escalada y trasladada de $\psi_0(\eta)$, esto es:

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \psi^* \left[\frac{(n' - n) \delta t}{s} \right], \quad (5)$$

donde el (*) indica el conjugado complejo. Entonces variando la escala de wavelet s (relacionado con el periodo de la onda) y trasladando la función a lo largo del índice de tiempo n , se puede construir una imagen que muestra tanto la amplitud de cualquier característica frente a la escala y cómo esta amplitud varía con el tiempo. $W_n(s)$ es un número complejo, por lo que para mayor simplicidad se puede calcular el espectro de potencia wavelet $|W_n(s)|^2$.

Adicionalmente, es importante considerar, que debido a que se trata de series de tiempo de longitud finita, se producen errores en el espectro de potencia wavelet al inicio y al final de la serie. El error es mayor entre más grande sea el valor de s , es decir, entre mayor sea el periodo, puesto que esto implica considerar ondas Morlet de mayor periodo dentro de una serie de datos temporales limitados. Esto da lugar al cono de influencia, el cual delimita la región del espectro wavelet en la que los efectos de borde se vuelven más importantes, fuera de este cono los resultados de la transformada no son concluyentes, pues se encuentran muy cerca del borde de la serie de datos para un periodo determinado.

Para la determinación de estos gráficos, se supone además que la serie temporal tiene un espectro de potencia medio. Si un pico en el espectro de potencia de wavelet está significativamente por encima de este espectro de fondo, entonces se puede suponer que es una característica verdadera con un cierto porcentaje de confianza. En este estudio se ha considerado un nivel de confianza de 95% respecto al nivel de fondo [18].

Siguiendo el método propuesto en [9], se obtuvo también el periodograma correspondiente a la señal $I/I_0 - 1$ en cada uno de los eventos estudiados. Este resultado permite verificar y precisar los periodos detectados por el espectro de potencias wavelet, sin embargo, no es posible hacer conclusiones sobre la evolución temporal de estas oscilaciones con base en esta técnica únicamente. La ecuación (6) muestra el valor de potencia P_X para una frecuencia ω , que se obtiene a partir de una serie discreta de N_0 datos temporales X_j :

$$P_X(\omega) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\left[\sum_{j=1}^{N_0} X(t_j) \cos \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^{N_0} \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{\left[\sum_{j=1}^{N_0} X(t_j) \sin \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^{N_0} \sin^2 \omega(t_j - \tau)} \right\} \quad (6)$$

donde τ está definido por:

$$\tan(2\omega\tau) = \left(\sum_{j=1}^{N_0} \sin 2\omega t_j \right) / \left(\sum_{j=1}^{N_0} \cos 2\omega t_j \right). \quad (7)$$

El proceso descrito permite deducir cuales son las frecuencias para las oscilaciones de intensidad dominantes y su evolución temporal en cada serie de datos. Una vez obtenidos los datos de variación de las oscilaciones se procedió con su análisis para determinar la correlación entre la evolución de estas oscilaciones y la evolución de los filamentos.

2.4 Identificación de oscilaciones longitudinales

Para analizar las variaciones de $I/I_0 - 1$ encontradas mediante la transformada de wavelet e identificar si corresponden a oscilaciones longitudinales, se ha considerando un corte o rejilla inclinada de $10'' \times 90''$ (Figura 1), cuyo centro coincide con el centroide calculado en cada imagen y su orientación es a lo largo del eje del filamento.

Se elabora una gráfica que corresponde a la evolución temporal del corte elegido (cadencia de 5 min) en función de su longitud (en arcseg). El análisis correspondiente permite identificar los movimientos del plasma a lo largo del eje del filamento, de manera que se pueden comparar con los periodos detectados en la transformada de wavelet e identificar si están asociados a movimientos longitudinales (por ej., ver Figura 4).

3 Descripción de eventos

3.1 Filamento 1

El centro de F1 tiene coordenadas absolutas S16°, 341.3 de la rotación CR 2152, es un extenso filamento que alcanza aproximadamente 36° de largo, orientado casi de forma vertical desde la latitud N10° y hasta S30°. En este filamento son distinguibles cuatro secciones (Figura 1).

La sección norte de F1 se encuentra cercana (en $\approx 5^\circ$ de distancia) a la RA 12096 (coordenadas absolutas N6.6°, 392); se forma a partir de las 16:09 UT del 28/06/2014, sin embargo, a partir de las 09:10 UT del 30/06/2014 F1 presenta una DBt, especialmente en su sección norte y sur. Posteriormente, a las 12:30 UT inicia la DBd de las secciones norte y sur de F1, que perdura hasta las $\approx 13 : 00$ UT.

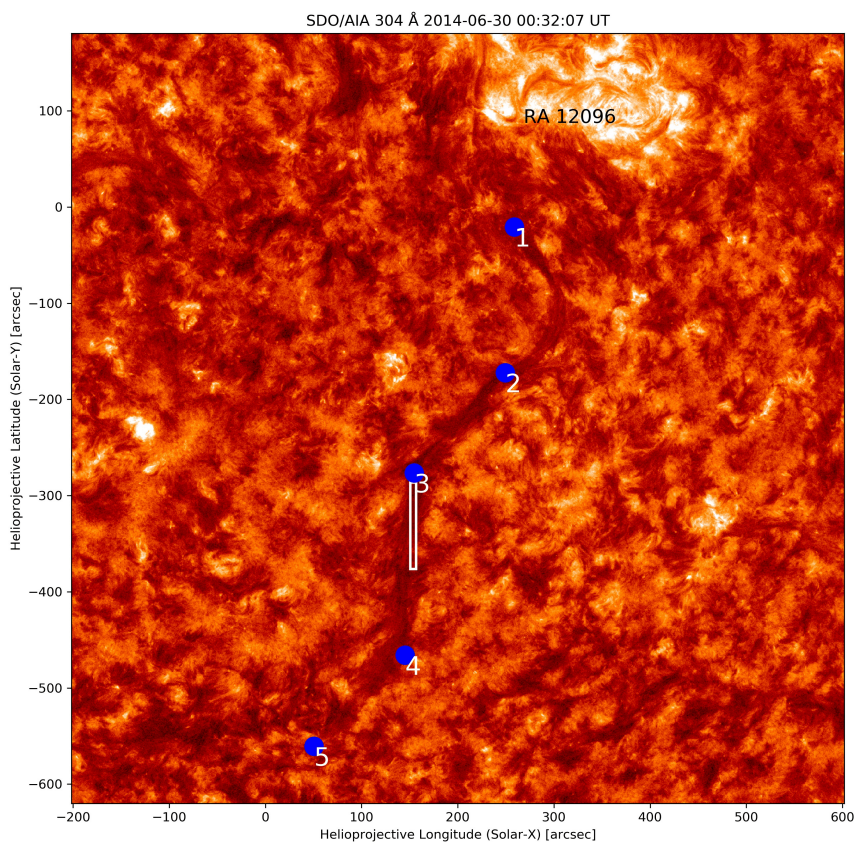


Figura 1: Observación en SDO/AIA 304 Å del F1 completo a las 00:32 UT del 30/06/2014, la sección norte de 8.5° de largo se comprende entre los puntos 1-2, la sección central de 10.6° entre 2-3, la sección sur de 16.8° entre 3-4 y el extremo sur con una extensión de 10° entre 4-5 (visible únicamente en EUV, debido a su inestabilidad termal). El recuadro blanco corresponde a una rejilla vertical de $10'' \times 90''$ utilizada para generar la Figura 4.

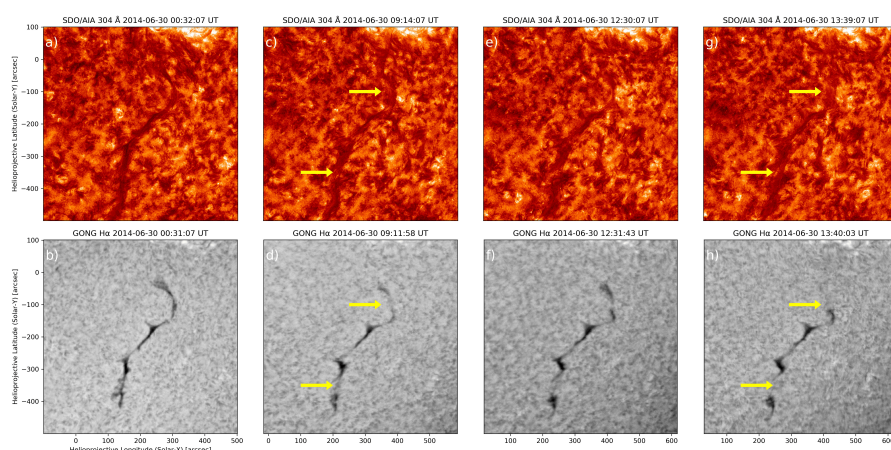


Figura 2: Evolución temporal de F1 observada por GONG $H\alpha$ y SDO/AIA 304 Å el 30/06/2014. (a y b) Muestran el filamento completo a las 00:31 UT. (c y d) Las secciones norte y sur, indicadas por una flecha, inician su inestabilidad termal a las 09:10 UT. (e y f) El material del filamento se dirige súbitamente hacia la RA 12096 a las 12:30 UT. (g y h) Las secciones (indicadas con flecha) desaparecen por completo de las imágenes de $H\alpha$ después de las 13:39 UT.

La DBd ocurrida en F1 puede estar ligada a una reconfiguración magnética en la región norte, que se manifiesta en una serie de explosiones de los filamentos cercanos, anticipada por un flare (clase A) que inicia alrededor de las 09:38 UT en la RA 12096. En $H\alpha$ es apreciable el material inflamado de la RA hasta 10:06 UT.

Analizando las imágenes de SDO/AIA en 193 Å es posible notar también el inicio de la DBd de las secciones norte y sur de F1 a las 12:30 UT (ver Figura 2) y se observa que la mayoría del material eyectado se dirige hacia la RA 12096. En el filtro de 171 Å se aprecia un aumento en la emisión (material caliente) y se observa el material siguiendo la trayectoria de un arco coronal extendido desde la sección norte de F1 y hasta la región activa. El material entonces queda confinado parcialmente dentro de la corona.

Adicionalmente, el análisis de observaciones en 314 Å muestra que, el material que cae sobre la RA 12096 (posterior a DBd) no proviene únicamente de la sección norte de F1, sino que se relaciona con un levantamiento de algunos hilos del filamento. Cabe destacar que mientras en $H\alpha$ es posible observar que se mantiene el punto de base de esta sección sur, el material no parece condensarse en esta parte en los días subsiguientes a su DBd, lo que sugiere que la explosión de F1 ha sido total, pero la estructura de su campo magnético se mantuvo estable.

3.1.1 Oscilaciones de la sección sur de F1

Para el estudio de las oscilaciones de la sección sur se consideraron 2.5 días previos a la DBd de la misma. La Figura 3 muestra la variación de la intensidad en una ROI de dimensiones $6'' \times 6''$, que se encuentra en el centro de la rejilla mostrada en la Figura 1, respecto a un valor medio I_0 , donde I_0 se estima como el promedio de una ventana centrada de 7.5 h. La serie de datos obtenida denota un aumento significativo de las variaciones de intensidad detectadas en SDO/AIA 304 Å y 171 Å; la perturbación también se observa en los demás filtros (SDO/AIA 193 Å, 211 Å), pero con menor intensidad. Este aumento ocurre 2.5 días antes de la DBd, por lo que es probable que no exista una relación directa entre este aumento y la subsecuente evolución de F1.

Las variaciones de intensidad coinciden con una oscilación de 2.25 h que es amortiguada rápidamente. Estas variaciones no parecen corresponder a movimientos de gran amplitud sino que en su lugar se observan oscilaciones longitudinales de pequeña amplitud y periodo corto (ver Figura 4), sin que se presente un patrón de oscilación coherente.

Los resultados del análisis de evolución temporal de la variación relativa de la intensidad y los periodos de oscilación que la componen se muestran en la Figura 5, en la que se puede observar una oscilación de ≈ 2.25 h durante el DBt sólo en la cromósfera, zona de transición y corona baja (SDO/AIA 304 Å, 171 Å), no se detecta en las capas coronales superiores estudiadas (193 Å, 211 Å). El periodo de ≈ 2.5 h es también notorio en el periodograma obtenido.

En conclusión, para la sección sur de F1 no se encuentran oscilaciones de gran amplitud sino que más bien se detectan únicamente oscilaciones longitudinales de pequeña amplitud, que se asocian a variaciones en la intensidad con un periodo de ≈ 2.25 h en las capas inferiores durante su DBt.

3.2 Filamento 2

F2 tiene una extensión de $\approx 41^\circ$, las coordenadas absolutas de sus extremos son N32.9°, 63.8 hasta N10.9°, 106.3 (CR 2151).

El 20/06/2014, a partir de las 20:00 UT inicia su DBt desde el extremo de su sección este (Figura 7) y a partir de las 22:30 UT abarca sección oeste. Durante este periodo F2 es prácticamente indetectable en $H\alpha$, mientras que se aprecia claramente en varios filtros correspondientes a más altas temperaturas como AIA 304 Å (Figura 7, b y c). Asimismo, es posible apreciar el rápido movimiento en todo el cuerpo del filamento durante el DBt, mucho más caótico que antes de DBt, especialmente en su región central. El 21/06/2014, desde las 03:00 UT

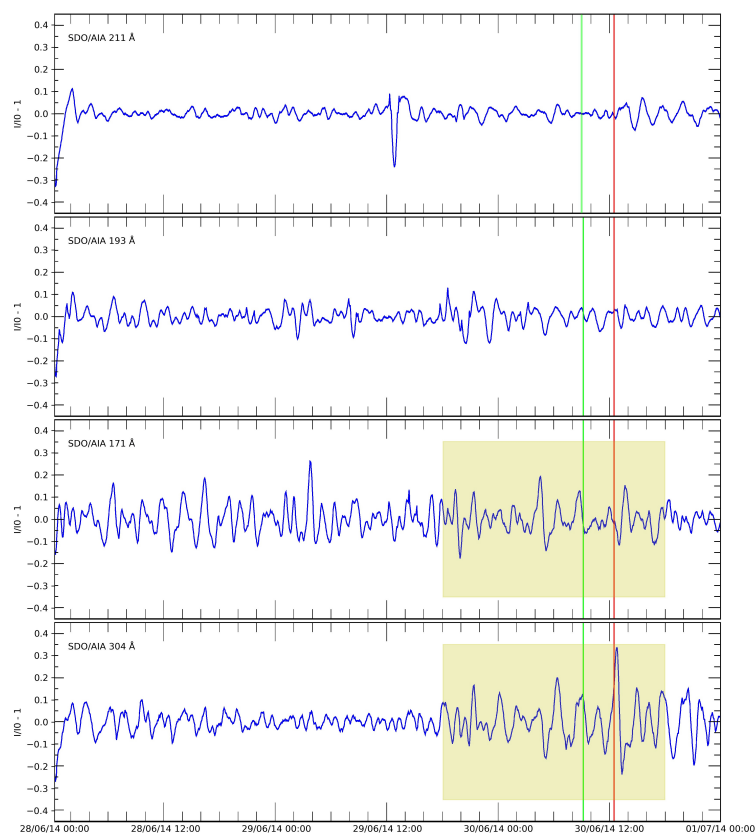


Figura 3: Variación temporal de la intensidad I en una ROI de F1 en la sección sur respecto a I_0 , donde I_0 es estimada como el promedio de una ventana centrada de 7.5 h, observada por SDO/AIA 304, 171, 193, 211 Å entre 00:00 UT del 28/06/2014 - 00:00 UT del 01/07/2014; las líneas denotan el inicio de la DBt y DBd, respectivamente. Las oscilaciones son más intensas en los filtros correspondientes a la cromósfera, zona de transición y corona baja (304 Å y 171 Å) y crecen previo a la DBt (recuadros).

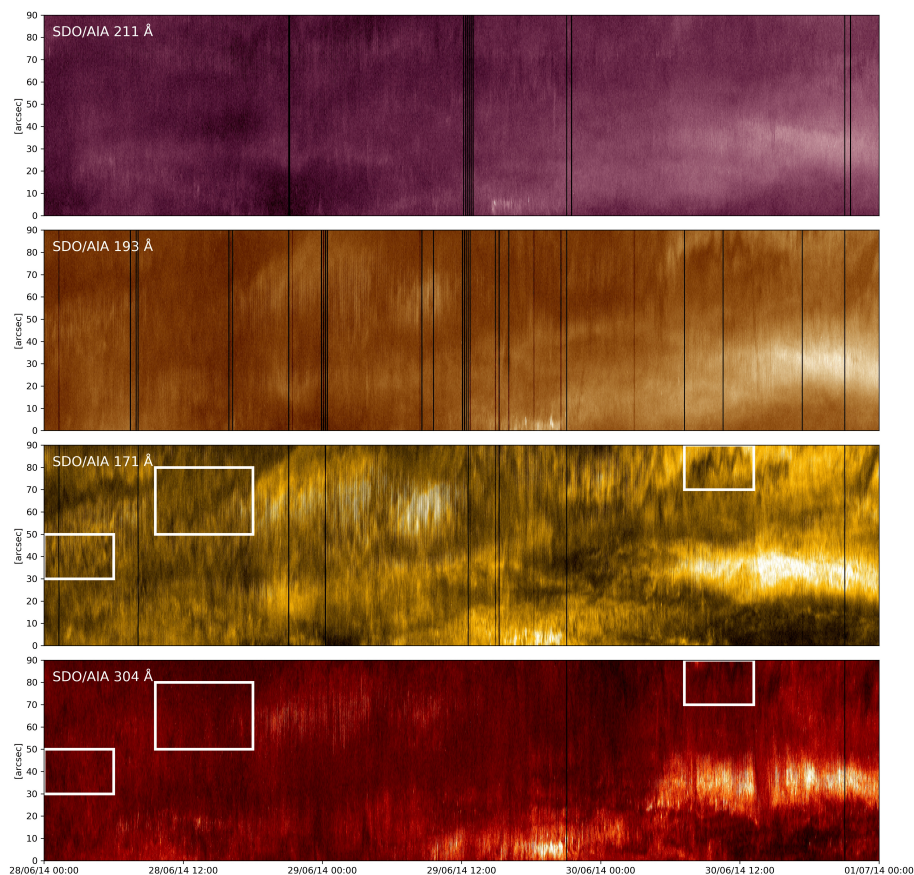


Figura 4: Oscilaciones longitudinales de F1 en la sección sur observadas entre las 00:00 UT, 28/07/2014 y las 00:00 UT, 01/07/2014, mediante una rejilla de $10'' \times 90''$ colocada según se muestra en Figura 1, utilizando imágenes de SDO/AIA 304, 171, 193, 211 Å. Oscilaciones longitudinales de pequeña amplitud y periodo corto se observan en los filtros asociados a la cromósfera, zona de transición y corona baja, durante todo el periodo de estudio, particularmente en SDO/AIA 171 Å (recuadros blancos), estos movimientos se atenúan rápidamente (en < 6 h). Se observa un aumento del brillo de F1 a las 12:00 UT del 30/06/2014 que corresponde a la DBd parcial de F1.

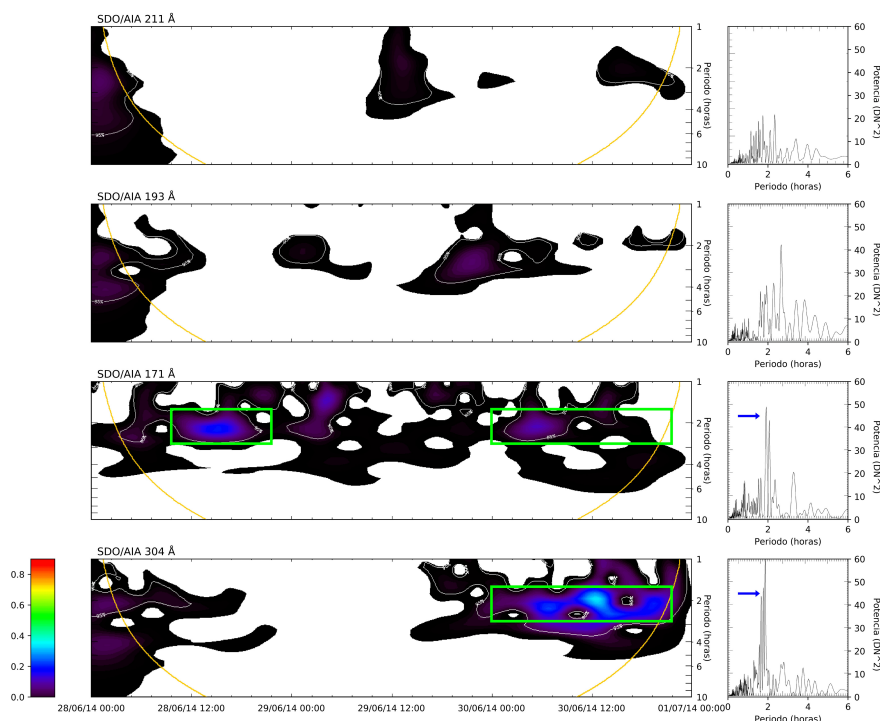


Figura 5: Espectro de potencias wavelet (izquierda) y periodograma (derecha) para la señal $I/I_0 - 1$ de F1 en una ROI al sur, desde las 00:00 UT del 28/06/2014 a las 00:00 UT del 01/07/2014 (SDO/AIA 304, 171, 193, 211 Å). La oscilación de ≈ 2.25 h se encuentra presente previo y durante la DBt (ver recuadros) sólo en la cormósfera, zona de transición y corona baja (SDO/AIA 304 Å, 171 Å). El periodo de oscilación dominante de ≈ 2.25 h (indicados con flecha) se detecta también en los respectivos periodogramas.

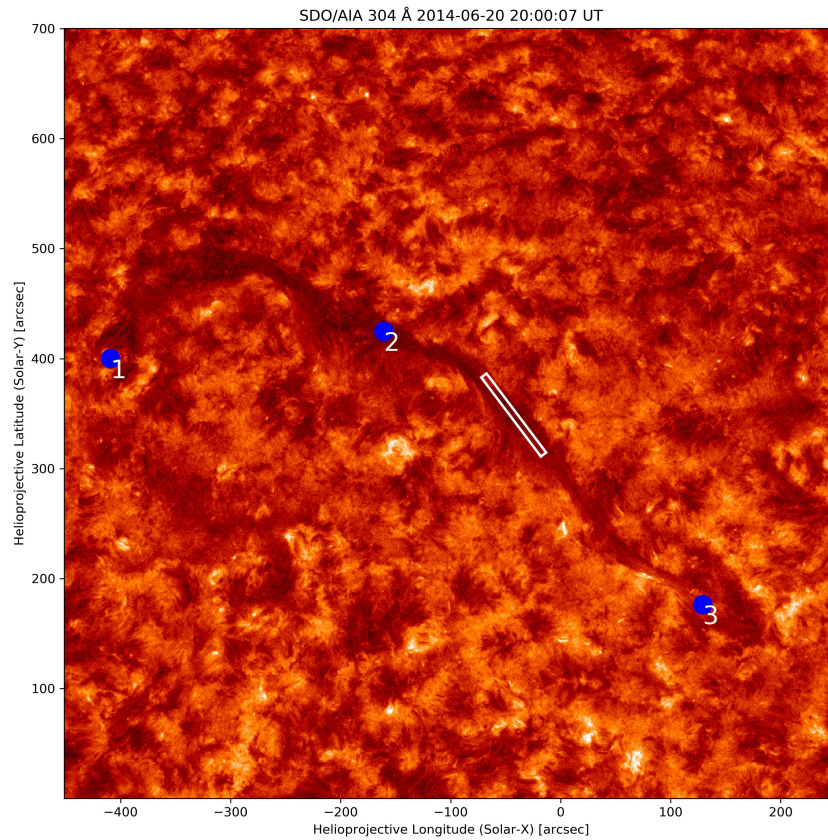


Figura 6: Observación en SDO/AIA 304 Å del F2 completo a las 20:00 UT, 20/06/2014, la sección oeste de 20° de largo se comprende entre los puntos 1-2; mientras que la sección este de 21° de largo entre 2-3, se muestra además la rejilla de $10'' \times 90''$, inclinada por un ángulo de 30° en sentido horario respecto al norte, usada para obtener la Figura 9.

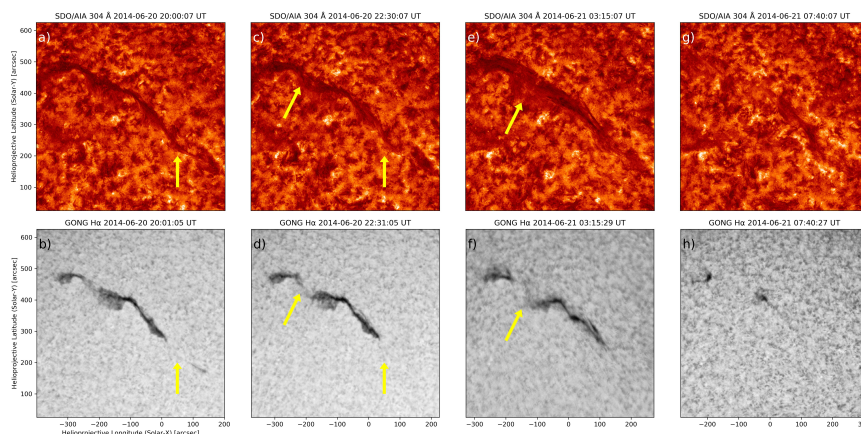


Figura 7: Evolución temporal de F2 observada por GONG $H\alpha$ y SDO/AIA 304 Å. El 20/06/2014, a las 20:00 UT la sección este de F2 no se observa en $H\alpha$, mientras que si se observa en SDO/AIA 304 Å (a y b). La sección oeste también inicia su DBt a las 22:30 UT de este día (c y d), luego, el material de F2 explota súbitamente (DBd), iniciando desde su centro el 21/06/2014 a las 03:15 UT (e y f). La mayor parte del material escapa de la gravedad solar, algunos remanentes de F2 se observan posterior a la DBd el 21/06/2014 a las 07:40 UT (g y h).

hasta las 07:40 UT, el material de F2 se levanta súbitamente y explota (DBd total) iniciando desde su centro (Figura 7), el material eyectado de F2 logra escapar de la gravedad solar, originando una CME, que registró SOHO/LASCO-C2 a las 05:12 UT en un ángulo de posición $PA \sim 352^\circ$, con un ancho angular $W \sim 78^\circ$ y con una velocidad media $V \sim 276 \text{ km/h}$.

3.2.1 Oscilaciones de la sección central

Los movimientos del material dentro del F2 son más evidentes en la sección central del F2 y es justamente en esta sección donde inicia su DBd, por lo que para medir las variaciones de intensidad asociadas a este movimiento pre-DBd, se consideró un periodo de estudio desde el 19/06/2014 a las 00:00 UT hasta las 04:00 UT del 21/06/2014 (52 horas de estudio). Se detectaron las variaciones en la intensidad en una pequeña ROI ($6'' \times 6''$) que sigue la rotación diferencial del Sol y que se encuentra en el centro de la rejilla mostrada en la Figura 6 (los resultados de este proceso se muestra en la Figura 8).

Además, para analizar la evolución temporal de los movimientos longitudinales de F2 en la sección central, se utilizó una rejilla de $10'' \times 90''$, inclinada por un ángulo de 30° en sentido horario respecto al norte (ver Figura 6).

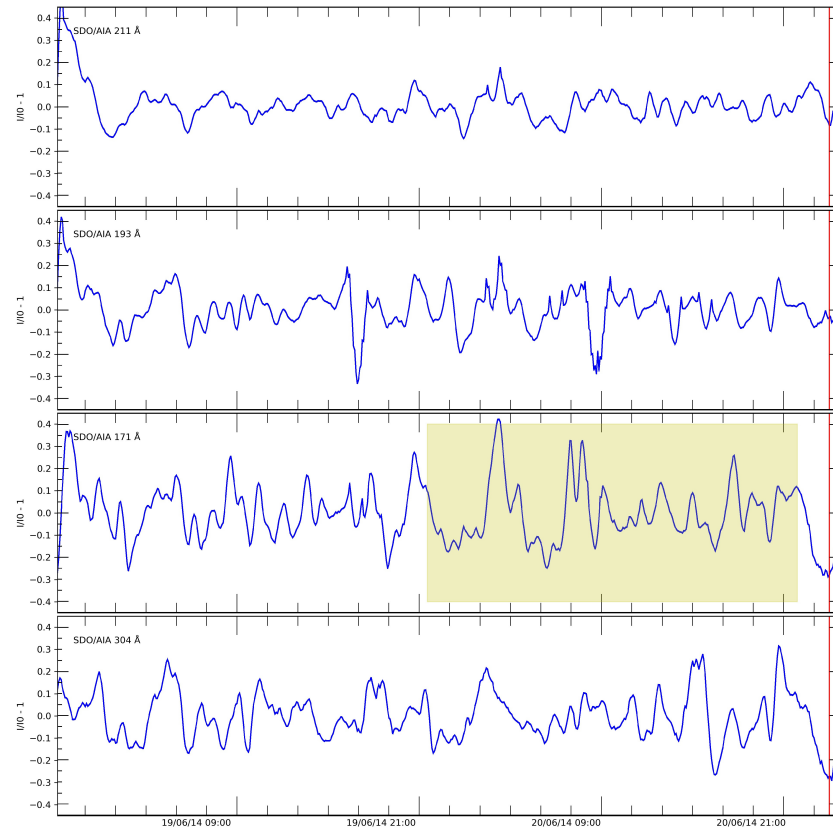


Figura 8: Variación temporal de la intensidad I en una ROI de F2 en la sección central respecto a I_0 , donde I_0 es estimada como el promedio de una ventana centrada de 7.5 h, observada en SDO/AIA 304, 171, 193, 211 Å entre las 00:00 UT, 19/06/2014 - 04:00 UT, 21/06/2014.

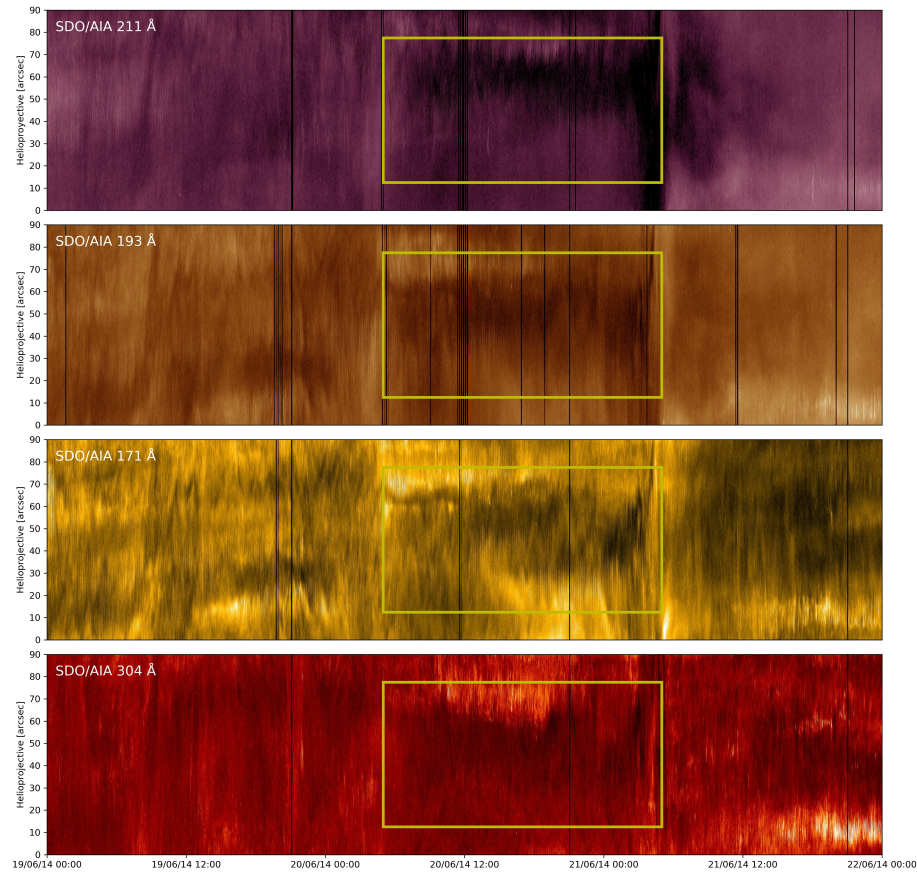


Figura 9: Oscilaciones longitudinales de F2 en la sección central desde el 19/06/2014 a las 00:00 UT hasta el 22/06/2014 a las 00:00 UT. No se detectaron las oscilaciones de gran amplitud, sin embargo algunas oscilaciones longitudinales con un periodo de ≈ 2.25 h se observan en las 12 h previas al DBd, sin algún patrón específico de evolución temporal.

En las oscilaciones presentes en F2 durante el proceso pre-DBd, no se detectan oscilaciones de gran amplitud, aunque si se observan movimientos periódicos longitudinales de pequeña amplitud del material durante al menos 24 h antes de la DBd, con un periodo de ≈ 2.25 h. El movimiento del material de F2 parece no ser tan organizado y no se observa un patrón claro de oscilación amortiguada, aunque es posible notar pequeñas oscilaciones sinusoidales, con una amplitud mucho menor, que se encuentran presentes en casi todo el periodo pre-DBd, y que son atenuadas al cabo de una oscilación completa.

Adicionalmente, los periodogramas y el espectro de potencias wavelet (Figura 10) permiten detectar una variación mucho más lenta de la intensidad relativa $I/I_0 - 1$, que corresponde a una oscilación con un periodo de ≈ 6.5 h, la oscilación de ≈ 2.25 h se detecta levemente en los periodogramas, pero no de manera significativa en el espectro de potencia wavelet.

La oscilación de ≈ 6.5 h es particularmente importante en el periodo previo a la DBd en las imágenes de SDO/AIA 171 Å y es amortiguada en las capas superiores. Utilizando el método descrito en la sección 2.4 y la rejilla mostrada en la Figura 6, no es posible encontrar movimientos longitudinales del material que se asocien con el periodo de ≈ 6.5 h encontrado en la transformada de wavelet (ver Figura 9). Esta oscilación podría estar relacionada más bien con movimientos verticales del material, el periodo de oscilación coincide con el encontrado mediante el análisis de Fourier de las velocidades Doppler en un filamento realizado por [15], quien también detectó oscilaciones en un amplio rango y, en particular, oscilaciones de muy lentas de 5 – 6 h.

Existen pocos trabajos en los que se han observado los filamentos durante periodos extensos [1]. Sin embargo, se han encontrado oscilaciones de periodos muy largos (en el rango de horas). En [6] se reporta la primera detección de variaciones de intensidad oscilatoria de largo periodo (8 – 27 h) en un filamento observado en la corona y se concluye, que las oscilaciones de período ultralargo pueden interpretarse en términos de modos MHD lentos, o pueden estar relacionadas con la estabilidad termal asociada con peculiaridades de la función de enfriamiento/calentamiento.

Las observaciones de filamentos en la línea 584.33 Å reportadas en [15], considerando todo el rango de periodicidades teóricamente predichas y el análisis de Fourier de las velocidades Doppler en el filamento, les facilitó detectar oscilaciones en un amplio rango de periodos. Estos resultados coinciden con el modelo Joarder & Roberts de prominencias [11], quienes tratan la prominencia como un bloque de plasma suspendido en el campo magnético. Particularmente, se encontraron periodos de 5 – 6 h [15], que no se habían detectado previamente y que son similares a los encontrados en F2 de nuestro trabajo.

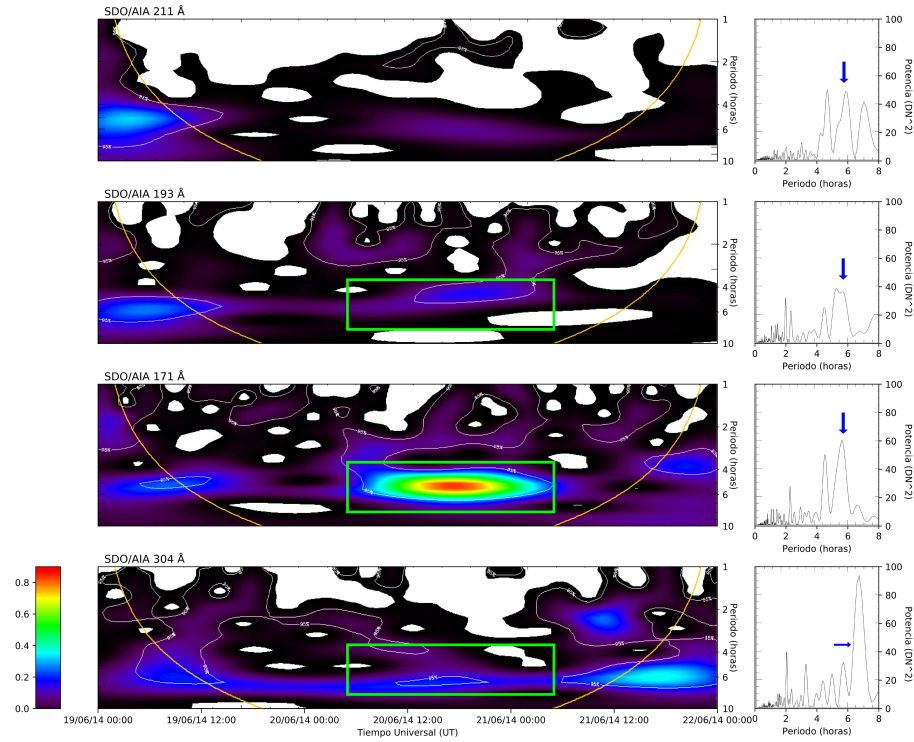


Figura 10: Espectro de potencias wavelet y periodograma para la variación $I/I_0 - 1$ de F2 en la sección central desde las 00:00 UT, 19/06/2014 y hasta las 00:00 UT, 22/06/2014 (SDO/AIA 304, 171, 193, 211 Å), una oscilación con un periodo de ≈ 6.5 h se observa en el periodo previo a la DBd, aunque no se observa un movimiento longitudinal asociado (ver Figura 9), que corresponda con este periodo detectado. La oscilación sin embargo, se observa casi en todas las capas estudiadas, en especial en 171 Å, que abarca la zona de transición y corona baja.

4 Conclusiones

Los resultados de este estudio multiespectral de oscilaciones de dos filamentos quietos (F1 y F2) muestran que, las oscilaciones de la sección sur de F1 se componen mayoritariamente de un periodo largo de 2.25 h, se detecta un aumento en las variaciones principalmente en la cromósfera, zona de transición y corona baja (SDO/AIA 304 Å, 171 Å), 18 h antes de la DBd parcial y durante el DBt, que abarca un periodo corto de 3 h de las secciones involucradas en la DBd posterior. Se observan pequeñas oscilaciones amortiguadas que decaen al cabo de poco más de un periodo completo. Estas variaciones no son notorias en las capas coronales superiores (SDO/AIA 193 Å, 211 Å), donde no parece existir ninguna oscilación significativa de largo periodo.

Las oscilaciones de largo periodo observadas en F2, también ocurren en el periodo que abarca la DBt de sus secciones este y oeste. Se observan oscilaciones longitudinales de pequeña amplitud con un periodo similar a las de F1 (alrededor de 2.25 h), que decaen rápidamente y se concentran especialmente en periodo previo a la DBd. Estas oscilaciones se detectan particularmente en el filtro SDO/AIA 171 Å, que corresponden a la zona de transición y corona baja. Adicionalmente, el espectro de potencias wavelet y los periodogramas muestran una oscilación adicional de ≈ 6 h, que se desarrolla desde 1 d previo a la DBd del F2, aunque no se observa un movimiento longitudinal asociado a esta oscilación (ver Figura 9). Al final de estas oscilaciones ocurre una importante CME, por lo que F2 constituye un ejemplo de eventos, en el que no se registran oscilaciones longitudinales de gran amplitud como precursores de la CME subsecuente [3].

Consideramos que las oscilaciones identificadas pueden estar relacionadas a flujos bidireccionales del material de F1 y F2, que generan las variaciones de intensidad observadas en las ROI. Las oscilaciones de ambos filamentos se relacionan con movimientos longitudinales desfasados de diferentes fibras de los cuerpos de filamentos y como uno de sus orígenes puede considerarse el calentamiento asimétrico o turbulento cerca de puntos de base de los filamentos [13, 19, 4]. Aunque estos flujos bidireccionales pueden ocurrir independientemente de la fase evolutiva (pre-DBt, DBt, pre-DBd), este resultado es importante porque apoya la idea de que, cambios en los flujos bidireccionales son indicios de la desestabilización del filamento, que puede llevar a una inestabilidad termal y/o explosión subsecuente, incluso pueden mantenerse durante la DBt y DBd.

Adicionalmente hemos observado que la magnitud de las perturbaciones es más intensa en los filtros asociados a la cromósfera, zona de transición y corona baja, mientras decae en los filtros asociados a las capas superiores de la corona. Estas observaciones indican, que la presión magnética y la respuesta dinámica del plasma surgen y se propagan desde la fotosfera-cromósfera hacia la corona.

Considerando que el proceso de reconexión magnética es el principal responsable de las DBd (acompañadas o no por CME), nuestro resultado sobre las oscilaciones detectados para F2 antes de su DBd (acompañada por CME), sugiere que el proceso de reconexión tiene su origen en capas atmosféricas inferiores a la corona.

Más estudios son requeridos para determinar con mayor precisión en qué eventos las oscilaciones son precursoras de una CME, adicionalmente se requieren simulaciones computacionales para determinar si las correlaciones encontradas en este trabajo se pueden replicar según los modelos físicos actuales, que son objetivos de nuestros futuros trabajos.

Agradecimientos

Agradecemos al SOHO, SDO y GONG por el acceso abierto a sus bases de datos. SDO es una misión del programa Living With a Star (LWS) de la NASA. LASCO es parte de SOHO, SOHO es un proyecto de cooperación internacional entre la ESA y la NASA. El catálogo LASCO CME es generado y mantenido en el Centro de Datos CDAW por la NASA y la Universidad Católica de América en cooperación con el Laboratorio de Investigación Naval. Agradecemos también por el software wavelet que fue proporcionado por C. Torrence y G. Compo, y está disponible en URL: <http://atoc.colorado.edu/research/wavelets/>. Finalmente, agradecemos la Vicerrectoría de Investigación del Instituto Tecnológico de Costa Rica por la aprobación del proyecto de investigación 5402-1450-1601, relacionado con este trabajo. Nuestro agradecimiento especial a los revisores del artículo por sus valiosas recomendaciones. Este estudio se realizó como requisito parcial para la Maestría en Astrofísica del Sistema de Estudio de Posgrado de la Universidad de Costa Rica.

Financiamiento

La licencia del software SolarSoft, necesaria para este trabajo, fue adquirida por el Centro de Investigaciones Espaciales (CINESPA) de la Universidad de Costa Rica. El trabajo contó con el apoyo de la Vicerrectoría de Investigación del Instituto Tecnológico de Costa Rica mediante la aprobación del proyecto de investigación 5402-1450-1601 y se desarrolló por los autores en su tiempo libre.

Referencias

- [1] I. Arregui, R. Oliver, J.L. Ballester, *Prominence oscillations*, Living Reviews in Solar Physics **9**(2012), no. 2, 47–70. Doi: 10.12942/lrsp-2012-2
- [2] P. Chamberlin, W.D. Pesnell, B. Thompson, *The Solar Dynamics Observatory*, Springer, New York NY, 2012. Doi: 10.1007/978-1-4614-3673-7
- [3] P.F. Chen, D.E. Innes, S.K. Solanki, *SOHO/SUMER observations of prominence oscillation before eruption*, Astronomy & Astrophysics **484**(2008), no. 2, 487–493. Doi: 10.1051/0004-6361:200809544
- [4] P.F. Chen, *Prominence formation and oscillations*, International Symposium on Solar Terrestrial Physics, ASI Conference Series **10**(2013), 1–10. arxiv.org/abs/1407.1413
- [5] V.I. Efremov, L.D. Parfinenko, A.A. Soloviev *Ultra low-frequency oscillations of a solar filament observed by the GONG network*, Solar Physics **291**(2016), 3357–3367. Doi: 10.1007/s11207-016-1021-z
- [6] C. Foullon, E. Verwichte, V.M. Nakariakov, *Detection of ultra-long-period oscillations in an EUV filament*, Astronomy & Astrophysics **427**(2004), no. 1, L5–L8. Doi: 10.1051/0004-6361:200400083
- [7] C. Foullon, E. Verwichte, V.M. Nakariakov, *Ultra-long-period oscillations in EUV filaments near to eruption: Two-wavelength correlation and seismology*, The Astrophysical Journal **700**(2009), no. 2, 1658–1665. Doi: 10.1088/0004-637X/700/2/1658
- [8] N. Gopalswamy, S. Yashiro, G. Michalek, G. Stenborg, A. Vourlidas, S. Freeland, R. Howard, *The SOHO/LASCO CME catalog*, Earth, Moon and Planets **104**(2009), 295–313. Doi: 10.1007/s11038-008-9282-7
- [9] J.H. Horne, S.L. Baliunas, *A prescription for period analysis of unevenly sampled time series*, Astrophysical Journal **302**(1986), 757–763. Doi: 10.1086/164037
- [10] N. Hurlburt, M. Cheung, C. Schrijver, L. Chang, S. Freeland, S. Green,..., R. Timmons, *Heliophysics Event Knowledgebase for the Solar Dynamics Observatory (SDO) and beyond*, Solar Physics **275**(2012), 67–78. Doi: 10.1007/s11207-010-9624-2

- [11] P. Joarder, B. Roberts, *The modes of oscillation of a prominence II. The slab with transverse magnetic field*, Astronomy & Astrophysics **261**(1992), no. 2, 625–632.
- [12] J.R. Lemen, A.M. Title, D.J. Akin, P.F. Boerner, C. Chou, J.F. Drake,..., N. Waltham, *The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO)*, Solar Physics **275**(2012), 17–40. Doi: 10.1007/s11207-011-9776-8
- [13] M. Luna, J. Karpen, *Large-amplitude longitudinal oscillations in a solar filament*, The Astrophysical Journal Letters **750**(2012). Doi: 10.1088/2041-8205/750/1/L1
- [14] N. Otsu, *A threshold selection method from gray-level histograms*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics **9**(1979), no. 1, 62–66. Doi: 10.1109/TSMC.1979.4310076
- [15] G. Pouget, K. Bocchialini, J. Solomon, *Oscillations in a solar filament: First observation of long periods in the HeI 584.33 Å line, modelling and diagnostic*, Astronomy & Astrophysics **450**(2006), no. 3, 1189–1198. Doi: 10.1051/0004-6361:20053886
- [16] R. Soler, I. Arregui, R. Oliver, J.L. Ballester, *Seismology of standing kink oscillations of solar prominence fine structures*, The Astrophysical Journal **722** (2010), 1778–1792. Doi: 10.1088/0004-637X/722/2/1778
- [17] L. Taliashvili, Z. Mouradian, J. Páez, *Dynamic and thermal disappearance of prominences and their geoeffectiveness*, Solar Physics **258**(2009), 277–295. Doi: 10.1007/s11207-009-9414-x
- [18] C. Torrence, G.P. Compo, *A practical guide to wavelet analysis*, Bulletin of the American Meteorological Society **79**(1998), no. 1, 61–78. Doi: 10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2
- [19] Y.H. Zhou, P.F. Chen, J. Hong, C. Fang, *Simulations of solar filament fine structures and their counterstreaming flows*, Nature Astronomy **4**(2020), 994–1000. Doi: 10.1038/s41550-020-1094-3