

Caracterización de la emisión en luz blanca y en rayos-X de la fulguración GOES M6.6 del 18 de Febrero de 2011 usando SDO y RHESSI.

J.S. CASTELLANOS-DURÁN, J.D. ALVARADO-GÓMEZ Y B. CALVO-MOZO

RESUMEN

Las fulguraciones solares o *solar flares* son fenómenos de liberación súbita de energía que ocurren en capas altas de la atmósfera solar (corona), influenciando tanto las demás capas de la estructura del Sol, como todo el entorno interplanetario del sistema Solar. En este trabajo se presenta una caracterización del evento de clase GOES M6.6 (SOL2011-02-18T10:11) que ocurrió en la región activa NOAA 11158, usando los datos de los instrumentos satelitales SDO/HMI y RHESSI. De esta manera, analiza la emisión de intensidad en el continuo y su correlación con las fuentes de rayos-X blandos y duros, para obtener la razón de densidades electrónicas que colisionan contra la superficie solar y las que quedan confinadas en el bucle *post-flare*. Se estimó que el número de partículas que se precipitan contra la fotosfera, durante la fulguración, fue 1.55 veces las que son confinadas en el bucle.

Palabras Clave- Fulguraciones (*flares*), Emisión en luz blanca, Rayos-X blandos y duros.

I. INTRODUCCIÓN

Desde su descubrimiento el primero de Septiembre de 1859 por R.C Carrington y R. Hodgson [1], las llamaradas solares o *solar flares* se han convertido en un campo de investigación amplio de la astrofísica solar, no solo por el desarrollo creciente de técnicas para su observación que han permitido una comprensión física cada vez mejor de estos eventos, sino también por las implicaciones que tienen sobre el clima espacial, entendido como la interacción entre el Sol y la tierra y los posibles alcances negativos en tecnologías como satélites y redes eléctricas; siendo las auroras uno de sus efectos más notorios. Las fulguraciones son una liberación espontánea de energía almacenada en los campos magnéticos

solares y en ciertas ocasiones conllevan a movimientos del plasma hacia el espacio interplanetario, que son conocidos como eyecciones coronales de masa (*CMEs*, por sus siglas en inglés). El fenómeno de las fulguraciones es detectado en un amplio espectro de longitudes de onda y se cree que es debido a un proceso de reconexión del campo magnético coronal. La energía almacenada en el campo es liberada súbitamente y luego es transportada por procesos de radiación, conducción eléctrica, aceleración de partículas a altas energías, y burbujas en el plasma [2].

Se ha observado en una clase particular de flares (del tipo fuentes en H α y algunos eventos de alta energía) que el núcleo de la emisión (*kernel*) emite rayos-X duros, y su ubicación espacial está correlacionada con los sitios de alta emisión en luz blanca (continuo) [4]. Durante la fulguración, parte de la energía liberada es utilizada en acelerar las partículas del plasma coronal, las cuales son conducidas hacia capas solares inferiores a lo largo de las líneas de campo magnético. Varios procesos físicos tienen lugar allí. A continuación destacamos tres de ellos debido a su importancia es esta fenomenología.

• Emisión en rayos-X duros.

El mecanismo físico responsable de esta emisión se conoce como *Bremsstrahlung* o radiación de frenado. Esta radiación la podemos concebir como un proceso que se lleva a cabo en dos pasos. En el primero de ellos, los electrones son acelerados por un campo eléctrico del tipo Coulomb, es decir, debido a una distribución de cargas apropiada. Luego, los electrones son dispersados por la presencia de otra partícula cargada de modo quasi-elásticamente mediante dispersión de Rutherford. Este mecanismo propuesto implica una pérdida de energía durante el proceso *Bremsstrahlung*, la cual es de unos cinco órdenes de magnitud menor que la perdida mediante colisiones. Así, la intensidad emitida por el proceso de *Bremsstrahlung* es

Primer Autor: jscastellanosd@unal.edu. Estudiante en ciencias físicas – Física, Universidad Nacional de Colombia.

Segundo Autor: jdalvaradog@unal.edu.co, estudiante de Maestría en Astronomía, Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia

Tercer Autor: bcalvom@unal.edu.co, Profesor, Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia

$$I(\varepsilon) = \frac{dN_{\text{fotones}}}{dt \Delta\varepsilon 4\pi R^2}$$

$$= \frac{1}{4\pi R^2} \int \chi(\varepsilon, E) v(K) \left[\int n_p n(K) dV \right] dK \quad (1)$$

donde ε es la energía del fotón emitido, K es la energía cinética, $v(K)$ la velocidad de las partículas, $n(K)$ y n_p son la densidad numérica de electrones y protones respectivamente. $\chi(\varepsilon, E)$ es la sección eficaz de la radiación del hidrógeno, dada por

$$\chi(\varepsilon, E) = \frac{8}{3} \frac{r_0^2}{137} \frac{m_e c^2}{\varepsilon K} \log \frac{1 + \sqrt{1 - \varepsilon/K}}{1 - \sqrt{1 - \varepsilon/K}} \quad (2)$$

En el caso del Sol, se asocia esta emisión en el intervalo de energías ($\varepsilon \approx 10 \text{ keV} - 1 \text{ MeV}$) al frenado de electrones no térmicos, con energías cinéticas del orden de los 20 keV o mayores por el plasma cromosférico y fotosférico [5].

- **Emisión en el continuo.**

El plasma de la cromosfera y fotosfera comienza a calentarse generando un aumento de la presión lo que conlleva a: (i) El plasma es conducido hacia la corona en contra de la fuerza gravitacional, lo que es conocido como *evaporación cromosférica*. (ii) Un aumento en la temperatura ambiental lo que genera emisión en luz blanca, es decir, radiación de cuerpo negro, donde la intensidad sigue la Ley de Planck [2]

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} \quad (3)$$

- **Emisión en rayos-X blandos y en el Extremo Ultravioleta (EUV).**

La imagen ampliamente aceptada de las fulguraciones solares, conlleva a una geometría parecida a un dipolo con dos (o mas) extremos o pies del bucle (*footpoints*). El campo magnético es muy fuerte en las extremidades del bucle, al contrario del presente en los segmentos internos del bucle a las alturas de la corona. Este gradiente en el campo coronal forma una trampa magnética, donde las partículas que son confinadas a moverse en el interior del bucle emitiendo en rayos-X blandos y EUV. Si se toma el límite donde las partículas no colisionan y no hay pérdidas durante el movimiento; el momento magnético sobre el bucle se conserva. Es decir,

$$\mu = \frac{\frac{1}{2} m_e v_{\perp}^2(s)}{B(s)} = \frac{\frac{1}{2} m_e v^2 \sin^2 \alpha(s)}{B(s)} = cte \quad (4)$$

en donde $\alpha(s)$ es el ángulo de cabeceo (*pitch angle*), el cual es función del campo magnético y por tanto varía punto a punto en la estructura del bucle. Este ángulo es cero en la parte superior del bucle donde el campo magnético se denota $B_0 = B(s=0)$, y $\alpha(s) = 90^\circ$ donde las partículas se devuelven como resultado de la trampa magnética. Este proceso se conoce como el efecto de espejo magnético y

ocurre siempre y cuando el ángulo de cabeceo de las partículas no supere un valor crítico dado por

$$\alpha_0 = \sin^{-1} \sqrt{\frac{1}{R}} \quad (5)$$

donde R es el radio magnético de espejo, que depende directamente del gradiente del campo magnético. De esta manera, las partículas que quedan confinadas en el bucle, debido al efecto de espejo magnético [6].

En este trabajo se realiza una caracterización de la emisión en luz blanca del evento ocurrido el 18 de febrero de 2011, con clasificación GOES M6.6, utilizando la emisión en rayos-X y la evolución temporal de la emisión en el continuo de la región activa que albergó la fulguración, buscando una correlación entre estos dos observables y la densidad de partículas (confinadas y precipitadas) durante la fulguración.

II. OBSERVACIONES Y ANÁLISIS

El 18 de Febrero de 2011 en la región activa NOAA AR11158 (Ver fig. 1), la cual albergó la primera fulguración de clase X2.2 del veinticuatroavo ciclo solar [7] [8], tuvo lugar una llamarada (SOL2011-02-18T10:11 M6.6) la cual inició a las 10:06:44UT, tuvo su máximo a las 10:11:22UT y terminó a las 10:16:36UT, según lo reportado por el satélite RHESSI. Para analizar este evento, fueron utilizados datos provenientes del satélite *Solar Dynamics Observatory (SDO)* con su instrumento *Helioseismic and Magnetic Imager (HMI)*, los cuales consisten en imágenes, a la altura de la fotosfera del disco solar completo, en la línea del hierro (Fe I 6173 Å) para los observables físicos¹ de la intensidad continuo (I_c) y la componente sobre la línea de observación del campo magnético (B_{los}), tomadas con una cadencia de 45 segundos [9]. El conjunto de datos es complementado con datos del *Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI)* en las bandas de 12-25, 25-50, y 30-80 keV, con una resolución espacial de un 1 arcseg, las cuales son usadas para caracterizar la emisión en rayos X durante el *flare*. [10].

2.1 ANÁLISIS DE LA INTENSIDAD EN EL CONTINUO

Para encontrar el lugar y la magnitud de la emisión de la fulguración en luz blanca, se obtiene el mapa de diferencias en intensidad, utilizando imágenes consecutivas de la región activa, cubriendo un intervalo de tiempo de dos horas antes y después del máximo de la llamarada reportado por GOES. Este procedimiento es realizado teniendo en cuenta la rotación diferencial del Sol, es decir, cada imagen es co-rotada en el ángulo que giró el Sol durante el intervalo de tiempo asociado a la cadencia de SDO/HMI, ya que este desplazamiento empieza a ser considerable para rangos de tiempo del orden de horas. De igual manera, cada imagen es alineada con respecto

¹ Dentro de los observables de HMI se encuentra también la velocidad en la superficie (Dopplergramas), los cuales fueron suprimidos en el presente estudio debido al nivel de ruido presente en dicha medición para este evento en particular.

a la imagen temporalmente más cercana al máximo de emisión en rayos-X suaves reportado por GOES.

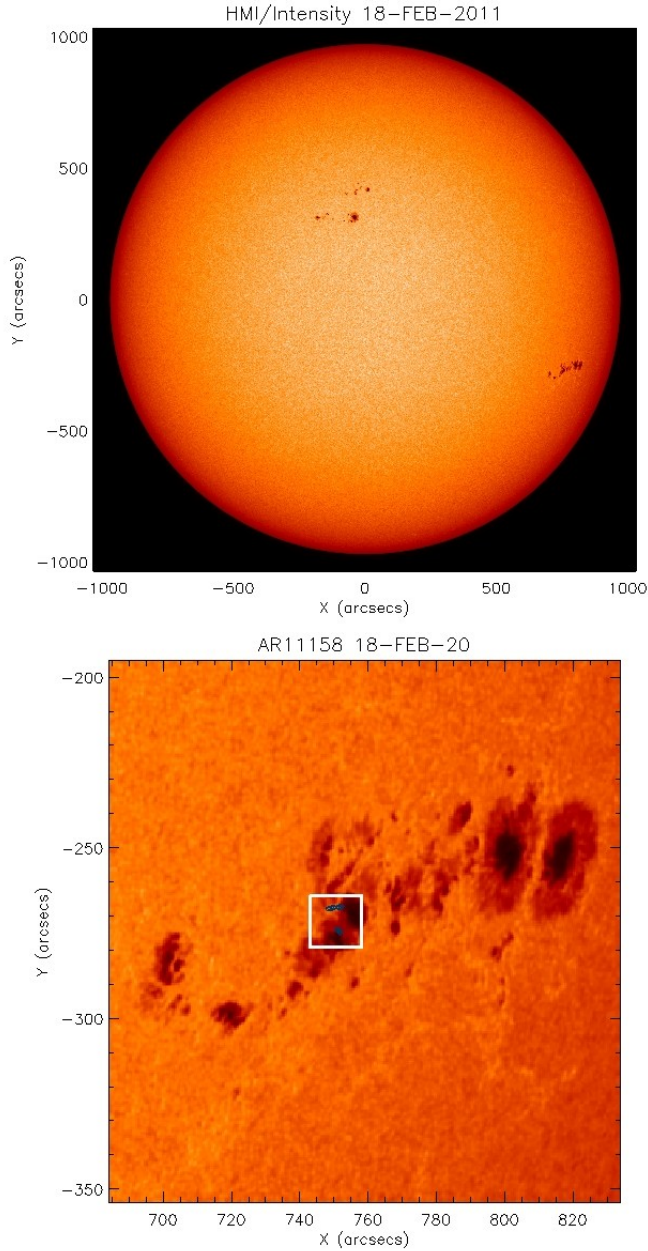


Fig. 1. (Arriba) Disco solar el 18 de Febrero 2011 como fue observado por SDO/HMI. (Abajo) Región activa (AR11158) en donde ocurrió la fulguración M6.6. El recuadro blanco se encuentra sobre la región donde ocurrió la fulguración. Los contornos azules son los niveles 60, 70, 80 y 90% de las fuentes de emisión en luz blanca.

Los mapas de diferencias que se encuentran en la fig. 2, muestran un cambio súbito transitorio en la emisión en luz blanca, durante el intervalo de tiempo indicado en la parte superior de cada imagen. Las flechas de color blanco están señalando las fuentes de emisión. Así, en los mapas (a) y (f) corresponden a las imágenes anterior y posterior a la emisión. Las dos fuentes (norte y sur), que se observan en el mapa (b), tienen un tamaño de $\sim 2.12 \text{ Mm}^2$ y $\sim 0.90 \text{ Mm}^2$. Comparando esto con el área total de la región activa AR11158, la cual es del orden de $\sim 2.83 \text{ Gm}^2$, el área de la región que presenta un incremento significativo en la emisión en luz blanca es del

orden del $\sim 0.1\%$. Sin embargo, el incremento en la emisión es de hasta un 25% con respecto al brillo de fondo.

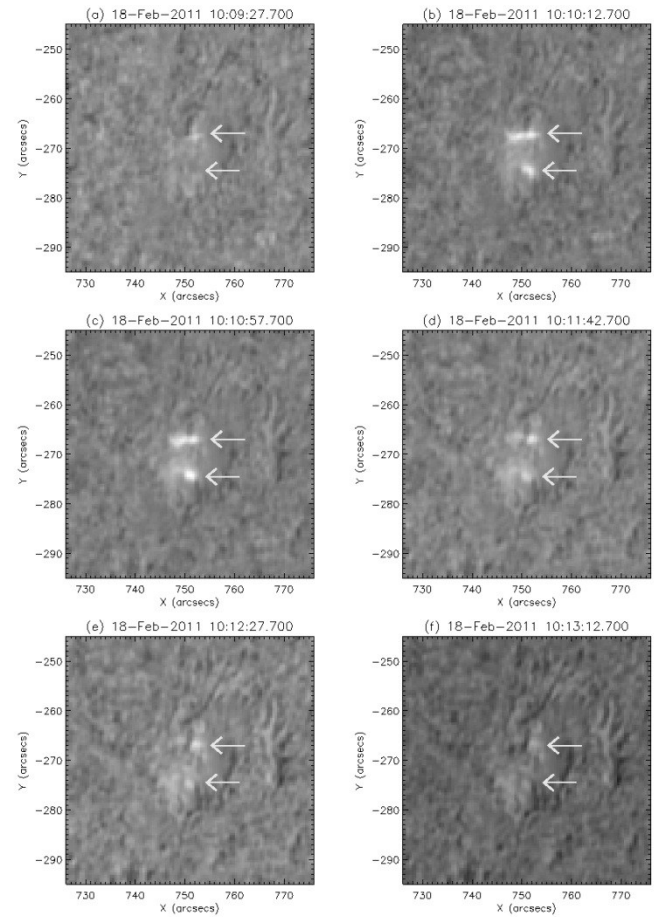


Fig. 2. Mapas de diferencia en el continuo con referencia en la imagen tomada a las 10:09:27 UT. Las flechas de color blanco, representan las dos fuentes de emisión en la intensidad del continuo para esta fulguración.

En cada uno de los núcleos de emisión, se realiza una curva de evolución temporal, donde se toma el promedio de emisión de cada una de las fuentes. Para discernir entre las fuentes y la emisión de fondo de la imagen, se toma como criterio que cada uno de los pixel tenga una emisión superior a los 4000 (Dn/s) [11]. Así en la fig. 3 (a,b) se encuentran los picos de emisión en luz blanca. De igual forma, se realiza la integral de las curvas en el intervalo donde se produce la emisión. Esto con el fin de obtener el flujo en luz blanca de la fulguración (tabla 1).

De igual manera, en la misma región espacial donde se encuentran las fuentes de emisión en luz blanca, se grafican la componente en la línea visual del campo magnético como función del tiempo, usando magnetogramas de SDO/HMI (fig. 3). Se encuentra que en la fuente norte el campo magnético puede ser ajustado a 3 regímenes lineales diferentes, los cuales se muestran en la fig. 3 (c). Las líneas de tendencia permiten estimar una variación del campo previa al pico de emisión de $\Delta B/\Delta t = -7.12 \text{ G/s}$ y de $\Delta B/\Delta t = -7.55 \text{ G/s}$ al final de la fulguración. Vale resaltar el cambio de polaridad en el campo durante la emisión, que es un comportamiento bastante

extraño en las fulguraciones. En la fuente sur el comportamiento es ligeramente diferente, mostrando solamente dos tendencias lineales; antes y después del instante del máximo, con una variación estimada de $\Delta B/\Delta t = -3.61$ G/s. La estimación de las variaciones del campo magnético durante las fulguraciones solares constituye una parte fundamental en el entendimiento del mecanismo físico de acumulación y posterior liberación de la energía magnética libre en el sistema, siendo el campo magnético el principal contribuyente al balance en este tipo de fenómenos. De igual manera, la energía entregada por el campo puede correlacionarse en diferentes eventos con la generación de CME's y sismos solares (*sunquakes*), y con la aparición o no de fuentes de emisión en luz blanca, como es este caso, y en otras longitudes de onda.

	Picos de emisión en luz blanca [Dn/s]	Flujo de emisión en luz blanca [Dn/s]
Fuente norte	5.43×10^4	9.24×10^5
Fuente sur	3.67×10^4	5.95×10^5
Cocientes	1.48	1.55

Tabla 1. Picos de emisión, flujo en luz blanca durante el flare y el cociente entre la emisión del fuente norte y sur de los picos y flujos de cada una.

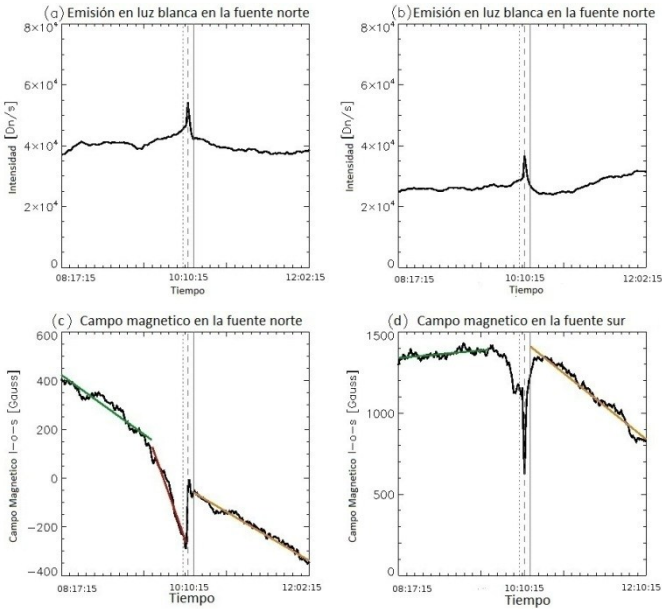
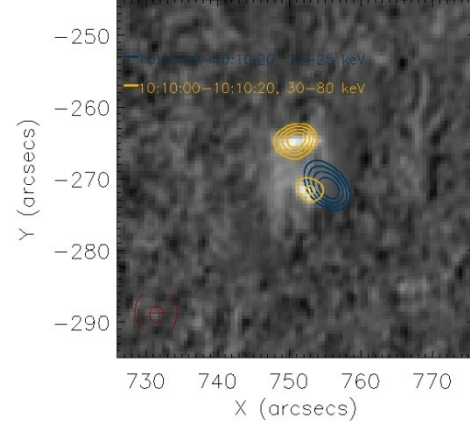


Fig. 3. Variación temporal en la emisión en luz blanca (a y b) y en la componente de la línea de la visual del campo magnético (c y d) para cada una de las fuentes, con los tiempos de inicio, máximo y final de la fulguración. Las líneas verticales punteada, a trazos y rígida, representan el comienzo, máximo y final de la fulguración. Para la variación del campo magnética B_{los} , las rectas de colores verde, rojo y amarillo representan regresiones lineales en cada intervalo temporal.

La fig. 4 muestra la superposición del mapa de diferencias en intensidad de HMI, donde se observa el cambio transitorio en la emisión, con los contornos RHESSI-HXR para las bandas de energía de 12-25 keV, que representan rayos X blandos, y 30-80 keV como emisión en rayos X duros (izquierda), junto con el rango de 25 – 50 keV (derecha). Las

dos regiones emisoras muestran una correlación espacial. Debido a esto, realizamos la aproximación para las fuentes espaciales de rayos X duros y las de luz blanca, se encuentran a las mismas alturas sobre la fotosfera solar.

HMI/SDO Diff. in intensity/RHESSI 2011–Feb–18



HMI/SDO Diff. in intensity/RHESSI 2011–Feb–18

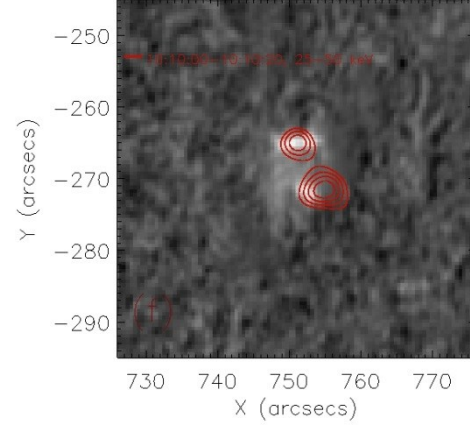


Fig. 4. Diagrama de diferencias en intensidad del continuo de HMI, combinado con los contornos de RHESSI CLEAN, con los niveles de 60, 70, 80, y 90% respecto al máximos detectado en las bandas de 12–25 y 30–80 keV (Izquierda) y de 25-50 keV (Derecha), cada uno con un intervalo de integración de 20s.

Suponemos ahora que el cociente entre el flujo en rayos X duros (F_{RXD}) y rayos X blandos (F_{RXB}), es proporcional a la razón entre el flujo en luz blanca donde son emitidos los rayos X fuertes (o en la región fotósfera cercana a dicha emisión) (F_{LB}^{RXD}) y el flujo de luz blanca donde son emitidos los rayos X blandos (F_{LB}^{RXB}). Lo anterior está basado en la fuerte correlación observada entre los núcleos de emisión en luz blanca y las fuentes en rayos X duros [11], [12]. Físicamente se considera que los electrones dentro del bucle de la fulguración luego de su aceleración en el sitio de reconexión, emiten rayos X duros por procesos de emisión Bremsstrahlung al chocar con capas inferiores de la atmósfera solar. En este mismo proceso, el plasma fotosférico y cromosférico es calentado súbitamente, incrementándose así la intensidad de emisión en el continuo. Por otra parte, las partículas que quedan confinadas en el bucle, emiten en rayos X blandos y en longitudes de onda del Extremo Ultravioleta (EUV) por procesos térmicos. Este cociente entre flujos de rayos X duros

y blandos lo podemos asociar al cociente entre la densidad electrónica que se precipita (ρ_{pp}) y aquella población electrónica que queda confinada en el bucle coronal (ρ_{pc}). Es decir

$$\frac{F_{LB}^{RXD}}{F_{LB}^{RXB}} \propto \frac{F_{RXD}}{F_{RXB}} \propto \frac{\rho_{pp}}{\rho_{pc}} \quad (6)$$

Puesto que $\frac{\rho_{pp}}{\rho_{pc}} = 1.55$ se infiere que, bajo las suposiciones realizadas, la cantidad de partículas que se precipitan contra la cromosfera es $3/2$ respecto a las que son confinadas en el bucle.

III. DISCUSIÓN

La fulguración del 18 de Febrero de 2011 presentó una fuerte emisión en luz blanca y en rayos-X en dos fuentes, que pese a que solamente representan el 0.1% del área de la región activa, mostraron un incremento del 25% con respecto al nivel de fondo en luz blanca (*quiet sun*). Esto indica la presencia de un considerable número de partículas colisionantes con las capas bajas de la atmósfera solar, el cual fue estimado en relación a la densidad numérica de partículas que quedaron confinadas en la trampa magnética generada después del proceso de reconexión. Para esto, la razón en la emisión en luz blanca de las dos fuentes observadas, fue considerada como un indicador para relacionar directamente la emisión de rayos-X blandos y duros en las diferentes ubicaciones, con ayuda de los contornos de emisión obtenidos con datos del satélite RHESSI. Bajo las suposiciones realizadas, el número de partículas que se precipitan contra la fotosfera es 1.55 veces las que son confinadas en el bucle.

De igual forma, se caracterizó la evolución temporal del campo magnético en cada una de las regiones que presentó un incremento considerable en la emisión en el continuo, ajustándose a diferentes regímenes de decrecimiento lineal durante la fulguración, mostrando en ambos casos cambios negativos en la magnitud del campo magnético en la línea de la visual. Este resultado ya ha sido observado anteriormente en eventos energéticos [13] asociado con la restructuración del campo magnético durante la fulguración, sirviendo como indicador de la cantidad de energía magnética en la componente de la línea visual, y del momentum transferido durante la fase impulsiva.

El siguiente paso en la investigación busca analizar un mayor número de fulguraciones en luz blanca con el fin de determinar si las características acá encontradas para este evento en particular muestran alguna tendencia que pueda ser explicada en términos de los modelos estándar para una fulguración solar.

IV. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Grupo de Astrofísica Solar (GOSA) del Observatorio Astronómico Nacional y en especial a Juan C. Buitrago, por la colaboración brindada en los diferentes seminarios durante la elaboración del presente trabajo. Las

imágenes de este trabajo fueron obtenidas usando IDL 7.1 bajo la licencia del Observatorio Astronómico Nacional.

V. REFERENCIAS

- [1] Carrington, R.C., "Description of a singular appearance seen in the Sun on September 1". *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 20, pp 13 – 16. 1859.
- [2] A. O. Benz, "Flare Observations". *Living Reviews in Solar Physics* 2007.
- [3] K. Shibata, T. Magara, "Solar Flares: Magnetohydrodynamic Processes". *Living Reviews in Solar Physics* 2012.
- [4] Fletcher and h. S. Hudson, "Spectral and spatial variations of flare hard x-ray footpoints." *Solar Physics* 210, pp 307–321, 2002.
- [5] J. Aschwanden, "Particle acceleration and kinematics in solar flares". Capítulo 8, pp 157-160.
- [6] M. Aschwanden, "Physics of the solar corona. An introduction with problems and solutions". Capítulo 12. pp 537-539
- [7] Kosovichev, A.G., Zharkova, V.V.: 1998, "X-ray are sparks quake inside Sun". *Nature* 393, pp 317 - 318.
- [8] J.D. Alvarado-Gomez, J.C. Buitrago-Casas, J.C. Martinez-Oliveros, C. Lindsey, H. Hudson, B. Calvo-Mozo. "Magneto- Acoustic Energetics Study of the Seismically Active Flare of 15 February 2011". Aceptado para publicación en *Solar Physics*.
- [9] J. Schou, J.M. Borrero, A.A. Norton, S. Tomczyk, S. Elmore, D. Card, "Polarization Calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) onboard the Solar Dynamics Observatory (SDO)". *Solar Physics*. 275, pp 327.
- [10] Hurford, G.J., Schmahl, E.J., Schwartz, R.A., Conway, A.J., Aschwanden, M.J., Csillaghy, A., Dennis, B.R., Johns-Krull, C., Krucker, S., Lin, R.P., McTiernan, J., Metcalf, T.R., Sato, J., Smith, D.M.: 2002, "The RHESSI Imaging Concept". *Solar Physics* 210, pp 61 - 86. ADS:
- [11] L. Fletcher y H. S. Hudson. "Impulsive Phase Flare Energy Transport By Large-Scale Alfvén Waves And The Electron Acceleration Problem". *The Astrophysical Journal*, 675, pp 1645–1655, 2008.
- [12] G. D. Holman, "Solar eruptive events". *Physics Today*. Abril 2012
- [13] H. Wang, C. Liu "Observational evidence of back-reaction on the solar surface associated with coronal magnetic restructuring in solar eruptions", *Astrophysical Journal Letters*, Mayo de 2010.
- [14] L. K. Harra, "Coronal nonthermal velocity following helicity injection before an X-Class flare". *The Astrophysical Journal* 691 (2009) L9.
- [15] K. I. Harvey, "The explosive phase of solar flares". *Solar Physics* 16, pp 423 – 430.
- [16] Priest, E.R. and Forbes, T.G., 2002, "The magnetic nature of solar flares", *Astron. Astrophys. Rev.*, 10, 313–377. pp 8 - 10
- [17] V. Gaizauskas. "Preflare Activity". *Solar Physics* 121, pp 135-152, 1989
- [18] H. Wang, C. Liu "Observational evidence of back-reaction on the solar surface associated with coronal magnetic restructuring in solar eruptions", *Astrophysical Journal Letters*, Mayo de 2010.