

Sobre el movimiento y propiedades físicas de puntos magnéticos brillantes en la fotosfera solar

On the motion and physical properties of magnetic bright points in the solar photosphere

Yeimy Gerardine Berrios Saavedra¹, Dominik Utz², Santiago Vargas Dominguez¹

¹Universidad Nacional de Colombia, Observatorio Astronómico Nacional, Bogotá, Colombia

²Institute of Physics, Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic

*yberrioss@unal.edu.co

Resumen

Las observaciones en alta resolución de la fotosfera solar han revelado la existencia de estructuras compuestas de diminutos Puntos Magnéticos Brillantes o MBPs (por sus siglas en inglés). Tales estructuras a pequeña escala están asociadas con regiones de campo magnético fuerte del orden de kilogauss (kG). Diversas investigaciones han estudiado algunas de las propiedades físicas de los MBPs gracias a observaciones de alta resolución que permiten en la actualidad definir detalles y evolución de tales estructuras. El presente estudio hace un análisis de algunos de estos parámetros dinámicos a través del uso de series de tiempo de imágenes de la fotosfera solar adquiridas con el telescopio solar terrestre de alta resolución, HiFI/GREGOR en la banda G (4308 Å) y el telescopio espacial Hinode. Se realiza el seguimiento de los MBPs para determinar sus movimientos propios. Adicionalmente se obtienen curvas de luz que evidencian su variación en intensidad y se analiza cómo es el comportamiento del tamaño y de la trayectoria a lo largo de su tiempo de vida. Los resultados establecen que las medidas de los parámetros dinámicos de los MBPs están influenciadas por el instrumento utilizado, ya que con el cambio de la resolución espacial y temporal se obtienen resultados diferentes.

Palabras clave: Sol: fotosfera - Sol: evolución - métodos: observacional.

Abstract

High-resolution observations of the solar photosphere have revealed the existence of structures composed of tiny Magnetic Bright Points, or MBPs. Such small-scale structures are associated with regions of strong magnetic field on the order of kilogauss (kG). Various studies have investigated some of the physical properties of MBPs thanks to high-resolution observations that currently allow defining details and evolution of these structures. The present study analyzes some of these dynamic parameters through the use of time series of images of the solar photosphere acquired with the HiFI/GREGOR high-resolution ground-based solar telescope in the G band (4308 Å) and the space-borne telescope Hinode. MBPs are tracked to determine their proper motions. Additionally, light curves are obtained that show its variation in intensity and the behavior of size and trajectory throughout its life time is analyzed. The results establish that the measurements of the dynamic parameters of the MBPs are influenced by the instrument used, since different parameters are obtained with the change in spatial and temporal resolution.

Key words: Sun: photosphere, evolution, observational methods.

1. Introducción

Actualmente las investigaciones en astrofísica solar son muy numerosas, cada día se están realizando investigaciones que aportan al gran cúmulo de conocimiento sobre nuestra estrella, el Sol. En particular, el estudio de pequeñas estructuras sobre la superficie del Sol ha sido de gran interés durante los últimos 20 años. En este contexto, elementos de naturaleza magnética, reciben el nombre de Puntos Magnéticos Brillantes o MBPs (por las siglas en inglés de *Magnetic Bright Points*) y son tan pequeños que se requiere de técnicas avanzadas de observación para su detección en imágenes solares. Los MBPs son estructuras a pequeña escala en la fotosfera solar que se encuentran sobre todo el disco solar, tanto en la superficie del Sol en calma como en regiones activas. Se localizan en la red intergranular, específicamente aparecen en la unión de celdas granulares. Están asociados con regiones de campo magnético fuerte de varios kilogauss, del orden de 1,5 kG ([1], [2], [3], [4]). Los MBPs se caracterizan por presentar un diámetro en el rango de 100 a 300 km, presentan una velocidad promedio de 0,2 - 5 kms⁻¹ y un tiempo de vida de alrededor de 2,5 a 10 minutos como lo muestran los resultados de [5], [6], [7], [8], entre otros.

Aún siendo tan pequeños, los MBPs podrían contribuir significativamente para aportar la energía suficiente que caliente la corona, por cuanto su estudio permite ampliar la comprensión del conocido *problema del calentamiento coronal* como lo indica [9]. Esto se debe a que los MBPs se encuentran sobre toda la superficie del Sol y a que albergan campos magnéticos intensos. Teóricamente, el movimiento del punto de pie o anclaje (*footpoint*) de un MBP genera un flujo de energía que asciende a la corona solar y contribuye al calentamiento de la misma ([10]). Por este motivo, se hace necesario establecer los parámetros dinámicos de estos elementos, tales como su área, el diámetro y la velocidad. Para deducir estos parámetros, se realiza la identificación y el seguimiento de los MBPs a partir de una serie de datos de alta resolución espacial y temporal.

La identificación de MBPs se realiza con un algoritmo automático de detección que se basa en el siguiente procedimiento: se segmenta cada una de

las imágenes, haciendo una partición de las mismas en ciertas zonas de igual intensidad. Posterior a esto, se identifican los MBPs con base en su gradiente de brillo, el cual es alto debido a que estos son elementos muy brillantes que se encuentran en una región más oscura. Finalmente, estos diminutos elementos son rastreados en una secuencia de imágenes con el fin de determinar sus características dinámicas y evolutivas. Este proceso se describe en mayor detalle en [8] y en [11].

Las imágenes que se procesan para este fin son adquiridas por telescopios solares de alta resolución, como el telescopio GREGOR, que produce series temporales de alta calidad gracias a su sistema de óptica adaptativa, y el telescopio espacial Hinode, cuyas observaciones no son afectadas por la atmósfera terrestre ni por la degradación asociada en la calidad de la imagen.

2. Datos y metodología

Para realizar la caracterización de la dinámica de los MBPs en la fotosfera solar se utilizaron dos conjuntos de datos en la banda G centrada en 4308Å. El primer conjunto de datos es de marzo de 2007 del telescopio espacial Hinode: **conjunto de datos I** y el segundo conjunto de datos de julio de 2019 del telescopio GREGOR: **conjunto de datos II**. Los dos conjuntos presentan un campo de visión cercano al centro del disco solar, evitando efectos de proyección que causan la deformación de la imagen fotosférica al aproximarse al limbo solar.

El conjunto de datos I consta de 332 imágenes adquiridas con el satélite Hinode, en particular con el telescopio óptico solar SOT, con el filtro de banda ancha (BFI). Estos datos corresponden a observaciones solares realizadas el día 10 de marzo de 2007 (7:00 a 9:59 UT). Su resolución temporal es de 30 segundos y su resolución espacial es de 0,108 arcseg/px. El campo de visión (FOV por sus siglas en inglés) es de 55,8 × 111,6 arcseg². Estas observaciones, cuya descripción detallada se encuentra en [8], se caracterizan por ser de alta resolución y por estar libres de los efectos adversos del *seeing*¹.

¹Defectos que causa la turbulencia atmosférica sobre la calidad de las imágenes.

Por otro lado, el conjunto de datos II consta de 769 imágenes del día 13 de julio de 2019 (7:38 a 08:48 UT) adquiridas con el instrumento HiFI del telescopio terrestre GREGOR, en colaboración con el proyecto SOLARNET, como se indica en [8]. Este conjunto de datos se caracteriza por presentar una resolución temporal de 5 segundos, una resolución espacial de 0,0286 arcseg/px y un FOV de 32,4 x 26,0 arcseg². A pesar de que son datos que poseen efectos de *seeing* cuentan con corrección por óptica adaptativa.

Para analizar la dinámica de los MBPs se han utilizado diferentes métodos, por ejemplo, algoritmos semiautomáticos y automáticos de identificación de MBPs. En particular, en el presente estudio se hace uso del proceso empleado por [7], en el que se utiliza un algoritmo automático de identificación.

El algoritmo consta de dos rutinas: segmentación e identificación. El proceso de segmentación consiste en un algoritmo de patrón de reconocimiento de las regiones que conforman a la imagen dependiendo de su intensidad. Es decir, el algoritmo separa y agrupa las zonas de la imagen que tienen igual intensidad (grupos de píxeles). Posteriormente, se aplica sobre las imágenes segmentadas el algoritmo de identificación que determina el gradiente de brillo de los segmentos que conforman a la imagen para seleccionar aquellos que se clasificarán como MBPs. Finalmente, se almacena esta información en archivos de datos separados para su posterior análisis.

3. Análisis y discusión

Uno de los parámetros dinámicos que se busca establecer como parte de esta investigación desarrollada en [8], es la velocidad de los MBPs, para entender cómo es su distribución; si es igual la distribución de la velocidad y de sus componentes x e y para finalmente saber cuál es el valor promedio de la velocidad de un MBP. Otro de los parámetros de interés es la variación de la intensidad en el brillo de un MBP junto con la variación en su tamaño con el fin de establecer si existe alguna relación entre estas.

A continuación, se describirá el proceso empleado para calcular la velocidad de los MBPs.

3.1. Velocidad de Puntos Magnéticos Brillantes

El primer paso para calcular la velocidad horizontal de un MBP es determinar la posición de su baricentro de brillo:

$$\vec{r}_b = \frac{\sum_i I_i \vec{r}_i}{\sum_i I_i} \quad (1)$$

donde, I_i es la intensidad del píxel i y \vec{r}_i la posición del píxel i .

Este cálculo se debe realizar para la coordenada x y para la coordenada y :

$$\vec{x}_b = \frac{\sum_i I_i \vec{x}_i}{\sum_i I_i} \quad (2)$$

$$\vec{y}_b = \frac{\sum_i I_i \vec{y}_i}{\sum_i I_i} \quad (3)$$

Posterior a esto, se calcula la distancia recorrida por el baricentro de brillo de cada MBP (conociendo su posición en x y en y en dos imágenes consecutivas) con la ecuación:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (4)$$

Donde:

x_1 es la posición en x del MBP en la imagen 1, y x_2 su posición x en la imagen 2.

y_1 es la posición en y del MBP en la imagen 1, y y_2 su posición y en la imagen 2.

Luego, se debe establecer el radio en el cual se va a realizar el seguimiento de los MBPs para luego calcular su velocidad. Es decir, se debe fijar una distancia máxima en la cual dos MBPs (en imágenes consecutivas) serán considerados el mismo elemento pero desplazado cierto número de píxeles. Por lo tanto, se establece que si un MBP está dentro de una distancia igual o menor a 2 píxeles respecto a otro MBP, estos dos son el mismo elemento en dos imágenes diferentes.

El siguiente paso es medir la velocidad en la dirección x y en la dirección y , para luego calcular la velocidad efectiva con la ecuación:

$$v = \sqrt{(v_x)^2 + (v_y)^2} \quad (5)$$

Finalmente, con esta información se elabora el histograma de frecuencias de la velocidad de los MBPs

para el conjunto de datos I. Este es presentado en la figura 1 junto con un ajuste a una función Rayleigh (en rojo) y sus dos componentes (en verde). El valor de la velocidad media para la primera componente, que representa el 49% de la distribución total, es $\mu = 2,3 \text{ kms}^{-1}$. La segunda componente cuenta con un valor medio $\mu = 1,1 \text{ kms}^{-1}$ y representa el 51% de la distribución total. El parámetro de ajuste μ es mostrado en la tabla 1.

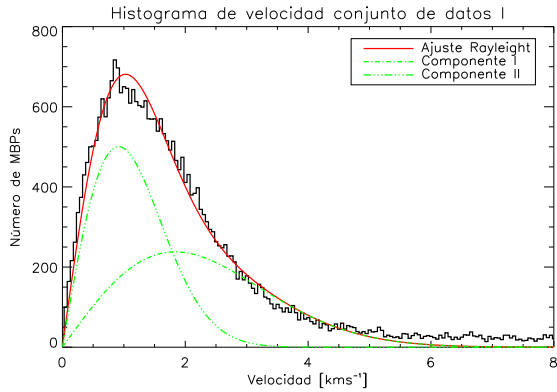


Figura 1. Distribución de la velocidad de los MBPs junto con un ajuste Rayleigh (en rojo) y sus dos componentes (en verde). Este resultado se puede apreciar en la discusión de [8].

Cada una de las dos componentes en color verde de la figura 1 representa una población de MBPs que se caracterizan por poseer diferentes rangos de velocidad. La primera componente de esta distribución se caracteriza por tener una velocidad cuyo rango está en 0 a 5 kms^{-1} , y sus MBPs forman parte de un grupo levemente menos numeroso de elementos. Por su parte, la segunda componente indica que hay una población de MBPs cuya velocidad está en el rango de 0 a 2 kms^{-1} , pero son mayores en número. Se considera que el primer grupo de MBPs, debido a sus mayores valores de velocidad, podría tener un campo magnético débil que permite el movimiento rápido de esta población. Por su parte, el segundo grupo posiblemente tiene un campo más fuerte que inhibe que sus MBPs se muevan más rápidamente.

A diferencia de la velocidad, sus componentes muestran una distribución Gaussiana. Las figuras 2 y 3 muestran el histograma de frecuencias de la velocidad x e y de los MBPs, respectivamente, con ajuste a una curva normal en color rojo y sus dos componentes en color verde. Se ubicó una línea recta

azul en el valor de velocidad igual a cero para mayor claridad.

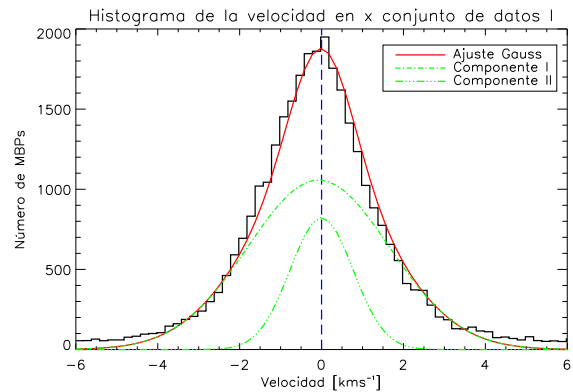


Figura 2. Distribución de la velocidad en x con ajuste Gaussiano en color rojo y en color verde sus dos componentes. La línea recta vertical se ubicó en una velocidad igual a cero, como se mencionó en [8].

Los valores medios de la velocidad en x son $\mu = -0,063 \pm 1,7 \text{ kms}^{-1}$ para su primera componente, la cual representa el 76% de la totalidad y $\mu = -0,00007 \pm 0,7 \text{ kms}^{-1}$ para la segunda componente que representa el 24% de la distribución total. Esta información se resume en la tabla 2.

Nuevamente, las dos componentes de esta distribución indican que existen dos poblaciones de MBPs que se caracterizan por poseer diferentes rangos de velocidad en la componente x . La primera componente de esta distribución representa una población de MBPs, los cuales poseen una velocidad en x cuyo rango está en -5 a 5 kms^{-1} y son más numerosos. Por su parte, la segunda componente indica que hay una población de MBPs cuya velocidad en x está en el rango de -2 a 2 kms^{-1} pero son menores en número.

Para el caso de la velocidad y , el valor medio es $\mu = 0,024 \pm 1,5 \text{ kms}^{-1}$ para su primera componente (73% de la totalidad) y $\mu = -0,024 \pm 0,6 \text{ kms}^{-1}$ para su segunda componente (27% de la distribución total), estos datos son presentados en la tabla 3. En las figuras 2 y 3 se puede ver que tanto la velocidad en x como la velocidad en y presentan el mismo patrón de distribución para sus dos componentes.

De nuevo, las dos componentes de esta distribución indican que existen dos poblaciones de MBPs que se caracterizan por poseer diferentes rangos de

Tabla 1. Parámetro de ajuste μ para la velocidad del conjunto de datos I.

Descripción	Media (μ) [kms ⁻¹]	Parámetro de peso [%]
Distribución Rayleigh componente I	2,3	49
Distribución Rayleigh componente II	1,1	51

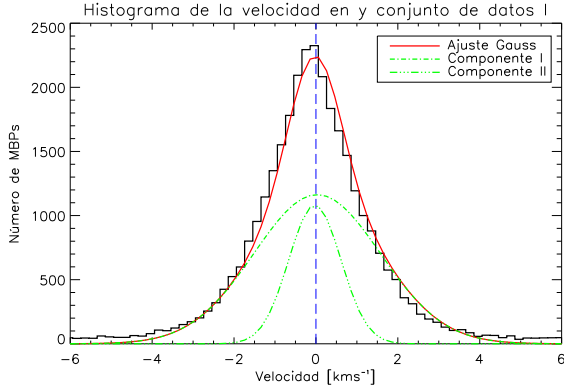


Figura 3. Siguiendo el enfoque presentado en [8]; distribución de la velocidad en y con ajuste Gaussiano (rojo) y sus dos componentes (verde). La línea punteada vertical se ubicó como referencia en un valor de velocidad igual a cero.

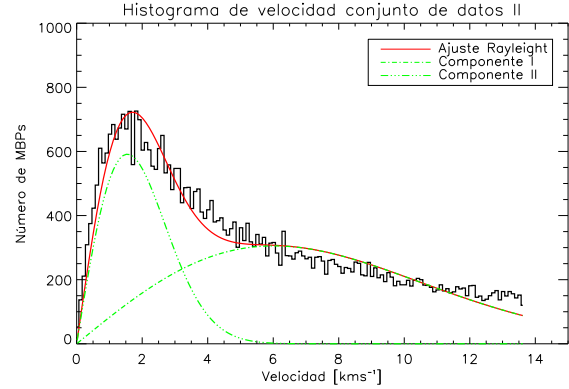


Figura 4. De acuerdo con [8], distribución de dos componentes de la velocidad con ajuste Rayleigh (rojo) y las dos componentes (verde).

velocidad en la componente y. La primera componente de esta distribución representa una población de MBPs, los cuales poseen una velocidad en y cuyo rango está en -5 a 5 kms⁻¹ y son mayores en número. Por su parte, la segunda componente indica que hay una población de MBPs cuya velocidad en y está en el rango de -2 a 2 kms⁻¹ pero son menores en cantidad.

En lo que sigue se muestra un análisis, similar al anterior, pero para el conjunto de datos II. Una vez se conocen las velocidades de los MBPs se elabora el histograma de frecuencias presentado en la figura 4, que sigue una distribución Rayleigh (línea roja), en color verde se muestran sus dos componentes. El valor medio encontrado para la primera componente de la distribución (67% de la totalidad) es $\mu = 7,5$ kms⁻¹ y para la segunda componente (33% de la totalidad) es $\mu = 1,9$ kms⁻¹ (ver tabla 4). No es sorprendente que para este conjunto de datos se obtengan valores mayores de velocidad, ya que se espera que a mayor resolución del telescopio las velocidades medidas sean mayores.

Como se ha visto en los resultados anteriores, esta distribución también presenta dos componentes,

cada una de las cuales representa dos poblaciones de MBPs. La primera de estas representa un población de MBPs cuya velocidad se encuentra en el rango de 0 a 12 kms⁻¹ los cuales son más numerosos. De igual manera, la componente número dos representa una población de MBPs con una velocidad en el rango de 0 a 4 kms⁻¹. Se sugiere que el primer grupo de MBPs posee un campo magnético débil por su velocidad mayor, a diferencia del segundo grupo que podrían tener un campo más fuerte.

De manera similar al conjunto de datos I, el conjunto de datos II presenta para las componentes de la velocidad x e y ajustes a una distribución Gaussiana, como se muestra en las figuras 5 y 6 respectivamente, junto con sus dos componentes en color verde. Para el caso de la velocidad en x el valor medio encontrado es $\mu = -0,009 \pm 4,8$ kms⁻¹ para la componente número uno con un 80% de la distribución total. Por su parte, la componente número dos presenta un valor medio $\mu = -0,14 \pm 1$ kms⁻¹ con una contribución del 20% de la totalidad (ver tabla 5).

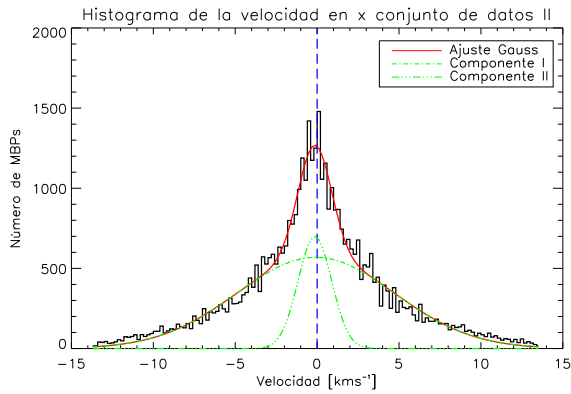
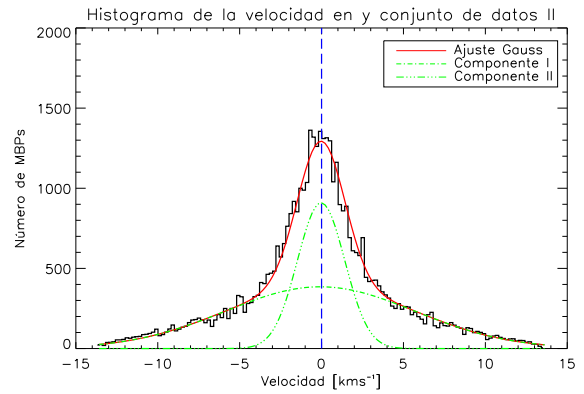
La primera componente de esta distribución representa una población de MBPs cuya componente x de la velocidad se encuentra en el rango de -14 a 14 kms⁻¹ y se caracterizan por ser mucho más nu-

Tabla 2. Parámetros de ajuste σ y μ para la componente x de la velocidad del conjunto de datos I.

Descripción	Media (μ) [kms ⁻¹]	Desviación estándar (σ) [kms ⁻¹]	Parámetro de peso [%]
Distribución Gauss componente I	-0,063	1,7	76
Distribución Gauss componente II	-0,00007	0,7	24

Tabla 3. Parámetros de ajuste σ y μ para la componente y de la velocidad del conjunto de datos I.

Descripción	Media (μ) [kms ⁻¹]	Desviación estándar (σ) [kms ⁻¹]	Parámetro de peso [%]
Distribución Gauss componente I	0,024	1,5	73
Distribución Gauss componente II	-0,024	0,6	27


Figura 5. Distribución de la velocidad en x con ajuste Gauss (rojo) y sus dos componentes (verde). Para más detalles ver [8].

Figura 6. Distribución de la velocidad en y con ajuste Gauss (rojo) y sus dos componentes (verde), tal y como se muestra en [8].

merosos. En cuanto a la segunda, de igual manera, representa una población de MBPs cuyo rango de velocidad x está entre -3 y 3 kms⁻¹ y se caracterizan por ser menores en cantidad.

Análogamente, la componente y de la velocidad presenta una distribución con ajuste Gaussiano en color rojo (ver figura 6) con valor medio para su primera componente $\mu = -0,08 \pm 5,7$ kms⁻¹ para el 63% de la distribución y $\mu = -0,03 \pm 1,4$ kms⁻¹ para la segunda componente con el 37% de la distribución total. Lo anterior se muestra en la tabla 6.

La primera componente de esta distribución representa una población de MBPs cuya componente y de la velocidad se encuentra en el rango de -14 a 14 kms⁻¹ y se caracterizan por ser más numerosos. En cuanto a la segunda, de igual manera, representa una población de MBPs cuyo rango de velocidad y está entre -3 y 3 kms⁻¹ y se caracterizan por ser mucho menores en cantidad. Lo anterior indica que

la velocidad en x como la velocidad en y presentan patrones de distribución para sus dos componentes muy similares, como se evidencia en las figuras 5 y 6.

Es importante mencionar que la velocidad medida de los MBPs está influenciada por el instrumento utilizado, debido a que al calcular la trayectoria entre dos coordenadas de un mismo elemento, esta depende del tamaño del píxel utilizado o la resolución espacial, es decir, a mejor resolución, aumenta la precisión en la velocidad medida. Por lo tanto la velocidad estimada en el caso del telescopio GRECOR es más precisa que la estimada para el satélite Hinode dada la resolución espacial más alta para el primero.

En la siguiente sección, se realizará una breve descripción de la evolución de diferentes parámetros dinámicos de algunos MBPs, tales como la variación de su intensidad (curvas de luz) y la variación de su diámetro en el tiempo junto con la forma que sigue

Tabla 4. Parámetro de ajuste μ para la velocidad del conjunto de datos II.

Descripción	Media (μ) [kms ⁻¹]	Parámetro de peso [%]
Distribución Rayleigh componente I	7,5	67
Distribución Rayleigh componente II	1,9	33

su trayectoria.

3.2. Curvas de luz de los Puntos Magnéticos Brillantes

En la figura 7 se presenta la variación en el tiempo de la intensidad de brillo de seis MBPs a lo largo de ocho imágenes consecutivas. Los valores de intensidad están normalizados al valor medio de la intensidad del Sol en calma (todo el FOV). Como se puede ver en la figura, el brillo muestra un comportamiento oscilatorio en un rango entre aproximadamente un 10% por encima y por debajo del valor medio establecido (intensidad=1). Durante la mayor parte de su tiempo de vida los MBPs alcanzan valores de intensidad por encima del valor medio establecido. Una posible explicación a estas variaciones tiene en cuenta la unión (coalescencia) y separación (fragmentación) de los MBPs, como lo afirma [9], estableciendo que el brillo de un MBP aumenta cuando este se une a otros MBPs vecinos y disminuye cuando un MBP laminal (alargado) sufre la división en MBPs más pequeños.

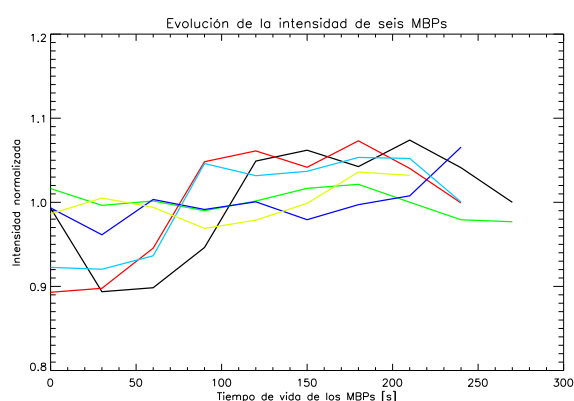


Figura 7. Curva de luz de seis MBPs (diferentes colores para cada uno) del conjunto de datos I con valores de intensidad normalizados al valor medio del Sol en calma. El tiempo de vida medio de estos elementos magnéticos corresponde a una secuencia de ocho imágenes.

3.3. Evolución del tamaño de los Puntos Magnéticos Brillantes

De la misma manera, el diámetro de un MBP muestra un comportamiento oscilatorio (ver figura 8) que eventualmente, puede estar relacionado con las variaciones en su brillo. Una posible explicación a este comportamiento se relaciona con el hecho de que a lo largo de la vida del MBP existen variaciones en el flujo magnético que pueden generar las ya mencionadas fragmentaciones o uniones de MBPs, y que serían responsables de generar cambios en el tamaño de los mismos; dos MBPs se pueden unir para formar uno más grande, o un MBP se puede separar en dos cuyos tamaños sean más pequeños. Cabe resaltar que este estudio no se centra en la física de la unión y fragmentación de MBPs, ya que estos comportamientos complejos, que deben ser estudiados en detalle, están fuera de los objetivos planteados y alcance de esta investigación.

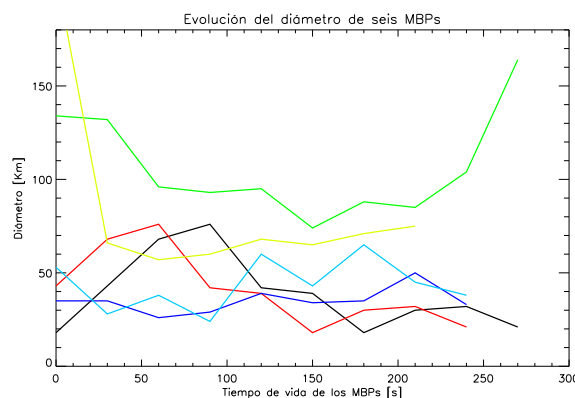


Figura 8. Evolución del tamaño de seis MBPs (diferentes colores para cada uno) del conjunto de datos I.

De aquí, se puede concluir que la vida de un MBP es muy dinámica, ya que no se observa una estabilidad ni en su brillo ni en su diámetro. Lo anterior se puede explicar por causa de las variaciones en flujo del campo magnético, a lo largo del tiempo de vida del MBP, provocadas por la dinámica solar.

Tabla 5. Parámetros de ajuste σ y μ para la componente x de la velocidad del conjunto de datos II.

Descripción	Media (μ) [kms ⁻¹]	Desviación estándar (σ) [kms ⁻¹]	Parámetro de peso [%]
Distribución normal componente I	-0,009	4,8	80
Distribución normal componente II	-0,14	1	20

Tabla 6. Parámetros de ajuste σ y μ para la componente y de la velocidad del conjunto de datos II.

Descripción	Media (μ) [kms ⁻¹]	Desviación estándar (σ) [kms ⁻¹]	Parámetro de peso [%]
Distribución normal componente I	-0,08	5,7	63
Distribución normal componente II	-0,03	1,4	37

3.4. Trayectoria de los Puntos Magnéticos Brillantes

Finalmente, se realiza un análisis de la trayectoria seguida por MBPs en el FOV. En la figura 9 se presenta el camino seguido por cuatro MBPs, el cual evidencia que estos elementos magnéticos tienen un movimiento complejo de ida y vuelta con desplazamientos en las direcciones x y y , evidenciando un comportamiento aleatorio análogo al movimiento browniano. El símbolo * en la figura señala el punto de partida del MBP.

4. Conclusiones

A continuación se describen las principales ideas extraídas del estudio dinámico y morfológico de la muestra de MBPs.

- Los parámetros dinámicos encontrados para los MBPs se ajustan a los resultados encontrados en otros estudios, estos corresponderían a dos poblaciones de MBPs, cuyos parámetros dinámicos están bien definidos en términos de la velocidad y sus componentes.
- Las distribuciones de velocidad de los MBPs dan cuenta de una distribución Rayleigh, de dos componentes, que representarían dos poblaciones de MBPs. De la misma forma que los resultados de las componentes de la velocidad muestran una distribución normal de dos componentes.
- Los MBPs presentan durante su tiempo de vida una morfología y una dinámica inestable; variando la intensidad de su brillo y su tamaño. De la misma forma recorren caminos aleatoriamente sin una dirección preferencial.

- La velocidad medida de los MBPs está influenciada por el instrumento utilizado para la observación, esta depende del tamaño del píxel utilizado o la resolución espacial.

Declaración de conflicto de interés: Los autores manifiestan no tener conflictos de interés.

Referencias

- [1] O. Steiner, J. Bruls y P. H. Hauschildt, “Why are G-Band Bright Points Bright?”, *Advanced Solar Polarimetry—Theory, Observation, and Instrumentation*, vol. 236, pp. 453, 2021.
- [2] E. Wiehr, B. Bovelet, y J. Hirzberger, “Brightness and size of small-scale solar magnetic flux concentrations”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 422, no. 3, pp. L63-L66, 2004.
- [3] P. Nisenson, V. Ballegooyen, A. A. De Wijn, y A. G. Sütterlin, “Motions of isolated G-band bright points in the solar photosphere”, *The Astrophysical Journal*, vol. 587, no. 1, pp. 458, 2003.
- [4] C. Keller, “Resolution of magnetic flux tubes on the Sun”, *Nature Publishing Group*, vol. 359, no. 6393, pp. 307, 1992.
- [5] C. Beck, K. Mikurda, L. R. Bellot Rubio, R. Schlichenmaier y P. Sütterlin, “Magnetic properties of G-band bright points”, *Modern solar facilities-advanced solar science*, pp. 165, 2007.
- [6] J. Sánchez, I. Márquez, J. A. Bonet, I. Domínguez y R. Muller, “Bright points in the internetwork quiet Sun”, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 609, no. 2, pp. L91, 2004.
- [7] D. Utz, A. Hanslmeier, R. Muller, A. Veronig, J. Rybák, y H. Muthsam, “Dynamics of isolated magnetic bright points derived from Hinode/SOT G-band observations”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 511, pp. A39, 2009.
- [8] Y. G. Berrios, D. Utz, S. Vargas, J. I. Campos, S. J. Gonzalez, P. Gömöry, C. Kuckein, H. Balthasar y P. Zelina “Observational evidence for two-component distributions describing solar magnetic bright points”, *Astronomy and Astrophysics*, 2021.

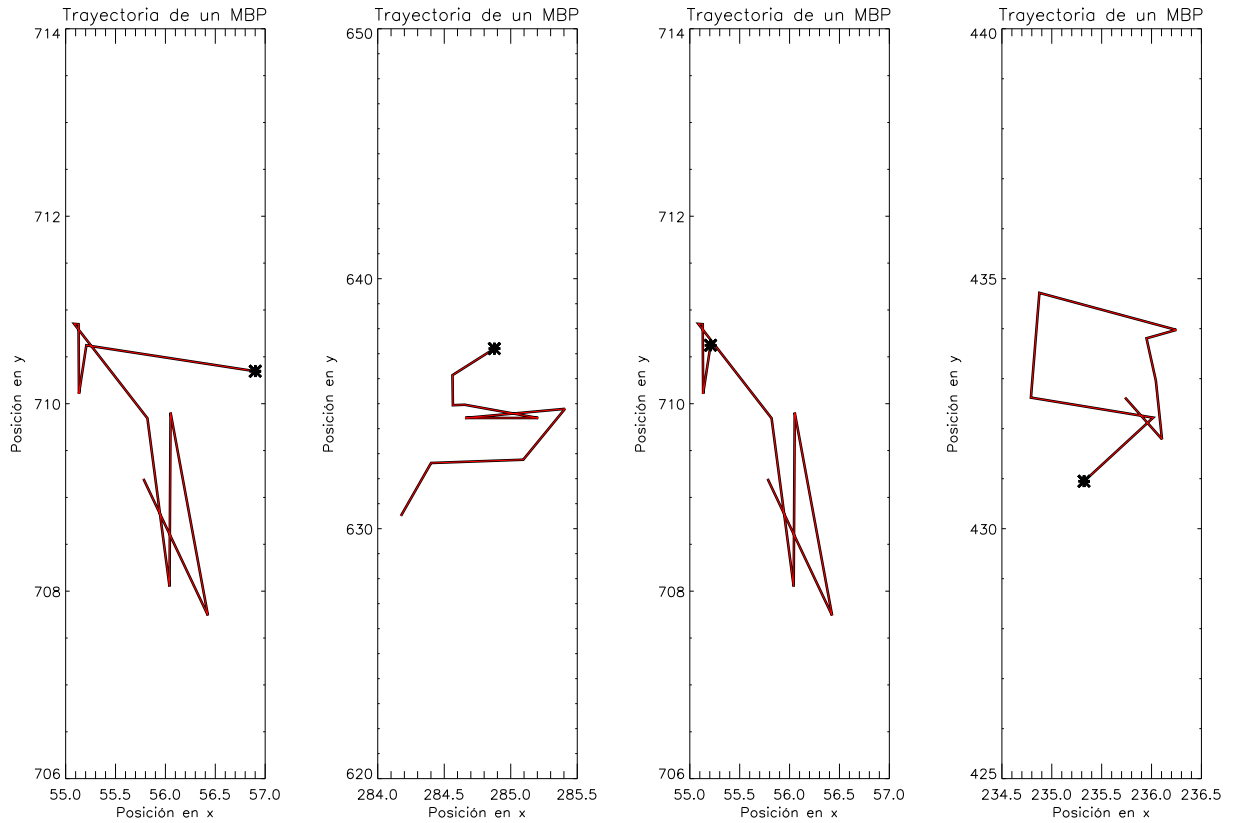


Figura 9. Trayectoria seguida por cuatro MBPs del conjunto de datos I. El símbolo * señala el punto de partida del MBP.

- [9] Y. Liu, Y. Xiang, R. Erdelyi, Z. Liu, D. Li, Z. Ning, Y. Bi, N. Wu y J. Lin, “Studies of isolated and non-isolated photospheric bright points in an active region observed by the new vacuum solar telescope”, *The Astrophysical Journal*, vol. 856, no. 1, pp. 17, 2018.
- [10] D. Utz, A. Hanslmeier, R. Muller, A. Veronig, J. Rybák, y H. Muthsam, “Implications of rapid footpoint motions of photospheric flux tubes for coronal heating”, *Solar physics*, vol. 143, no. 1, pp. 49-68, 1993.
- [11] D. Utz, J. C. del Toro Iniesta, L. R. Bellot, J. Jurčák, V. Pillet, V. Martínez, S. K. Solanki y W. Schmidt, “The formation and disintegration of magnetic bright points observed by Sunrise/IMaX”, *The Astrophysical Journal*, vol. 796, no. 2, pp. 79, 2014.