

Trabajo Fin de Máster

**LOCALIZACIÓN DE ESTRUCTURAS
MAGNÉTICAS SUBGRANULARES EN UN
MODELO NUMÉRICO DE
MAGNETOCONVECCIÓN SOLAR**

Daniel Muñoz Pérez

Tutor: Fernando Moreno Insertis

4 de junio de 2018

Índice

Abstract	3
1. Introducción	7
1.1. Estructuras bipolares emergentes.	7
1.1.1. Observaciones	7
1.1.2. Modelado teórico	8
1.1.3. Ámbito y alcance de este trabajo	10
1.2. Código Bifrost y simulación pública	11
1.2.1. Datos generales sobre el código Bifrost	11
1.2.2. La simulación pública de convección desde el interior solar hasta la corona	11
1.3. VAPOR	13
2. Objetivos	13
3. Metodología	14
3.1. Caracterización	15
3.2. Detección de estructuras magnéticas.	15
4. Visión general sobre el campo de velocidad y el campo magnético en la simulación pública de Bifrost	17
4.1. Mapas de velocidad y campo magnético	17
4.2. Estadística	20
4.2.1. Velocidad	20
4.2.2. Campo magnético	21
5. Resultados: Estructuras magnéticas subgranulares emergentes	23
5.1. Primera inspección del dominio	23
5.1.1. Criterios para la identificación	23
5.1.2. Catálogo de candidatas	24
5.1.3. Análisis detallado	25
5.2. Visualización 3D con VAPOR	28
5.2.1. Análisis 3D de estructuras megnéticas	28
6. Conclusiones	38
Referencias	40

Introduction: for more than ten years now, the advances in astronomical instrumentation, in particular in solar physics, have allowed to reach high spatial resolution in photospheric observations, with details down to $0,2''$ now being routinely obtained. This led to the detection of the appearance of small bipolar magnetic structures within granules in the solar surface. Different research papers of the past and present decades have suggested that those small bipoles were indicative of the emergence of a tiny magnetic loop from the solar interior. However, the observations are not enough to confirm this conclusion: even after application of inversion techniques what one deduces is the distribution of physical variables in the limited height range where the observed spectral line is formed and under restrictive assumptions. It is necessary to carry out three-dimensional numerical modelling, locating this type of features in radiation-magnetohydrodynamic simulations, to be able to find out their origin, and their structural and evolutionary properties in the solar interior and atmosphere.

Three milestones in the observational detection of this kind of magnetic structures were: De Pontieu (2002) identified a magnetic flux concentration on clearly subgranular scales for the first time. Some years later, Centeno et al. (2007) detected a suggestive evolutionary pattern whereby first a horizontal magnetic field patch appeared within a granule, with two vertical magnetic field patches of opposite polarity appearing on the edges of the horizontal field region at a later stage. Finally, Martínez-González & Bellot (2009) detected a large number of instances of this kind of bipolar features so they could to make a statistical study. The authors used spectral lines forming at different heights and concluded that a small fraction of those magnetic structures rise above the photosphere, reaching the cromosphere.

From the theoretical point of view, there is only one paper (Moreno-Insertis et al., 2017) in which the physics of the formation, configuration and evolution of subgranular magnetic concentrations is studied through three-dimensional numerical modelling. Those authors detected two kinds of such structures in a radiative-MHD model carried out with the Bifrost code for a quiet-Sun region with global emergence of magnetic flux: (a) rising magnetic flux tubes and (b) magnetic sheets covering whole granules. They additionally detected the appearance of magnetic sheets in a different 3D simulation, also obtained with the Bifrost code but publicly available, called the Bifrost Public Simulation, or *BPS*, in the following. In this Master's thesis we attempt to complete their work by finding rising tiny magnetic tubes emerging within granules in the BPS. This will be a first step toward proving the existence of this kind of magnetic structures in different solar environments.

The BPS was made available to the scientific community through the Hinode Data Center. The model encompasses from the top layers of the convection zone to the corona, more precisely 2,4 Mm below and 14,4 Mm above the surface. The horizontal extent is $24 \times 24 \text{ Mm}^2$. The data cubes contain values of temperature, gas pressure, density and the three components of velocity and magnetic field. The time sequence extends for 26 minutes of solar time with 10 s cadence.

Method: first of all we have carried out a characterization of the BPS data using the magnetic field and velocity vector fields. We have drawn color maps of their vertical components at different heights to find similarities with the expectations from the theoretical and observational results of those heights. Additionally, we have carried out a brief statistical analysis of those quantities in the depths of the box corresponding to the convection zone.

The actual search for the concentrated magnetic structures that is the main objective of this Master's thesis was implemented in two successive stages. A first selection of candidates was attempted via inspection of maps of the vertical velocity at the solar surface with isocontours of the vertical and horizontal magnetic field components superimposed. The sites of emergence of bipolar regions were located by requesting that (1) a patch of horizontal field appears in the interior of a granule with area and magnetic strength growing in time; this was to be followed by (2) the appearance of two patches of vertical field of mutually opposite polarity; finally, (3) the whole structure had to be seen moving toward the intergranule, where it disappeared.

In the second stage, more conclusive evidence for the presence of rising magnetic loops was sought via 3D visualization: the analysis of isocontours on horizontal surfaces cannot provide complete eviden-

ce since it misses the distribution of variables in the interior and atmosphere. For the 3D visualisation, the software VAPOR (UCAR) was used, specifically its tools to calculate isosurfaces of different physical variables, magnetic field lines and color maps in planes with arbitrary 3D orientation. In particular, we have used isosurfaces of magnetic field strength at $B = 100\text{-}200$ G, adding maps for the vertical component of the velocity on horizontal planes. Some of the cases selected in the previous (2D) stage had to be discarded given their irregular shape or their links with preexisting intergranular magnetic features. For those cases clearly identified as magnetic tubes we have studied a time sequence to check their origin and time evolution. For them, two further 3D tests were carried out: we have drawn field lines in them to have an impression of the associated magnetic surfaces. Second, we have plotted field intensity maps on transverse vertical planes to check the degree of concentration of the magnetic distribution.

Results: regarding the characterization of the BPS, we have confirmed that the features explored match the general expectations from the theory of magnetoconvection. Concerning the detection of rising magnetic loops, we could isolate up to 26 cases of evolutionary patterns that fulfilled the conditions set using the 2D horizontal map method. After applying the more strict 3D methods, we could confirm 11 of them as concentrated rising magnetic loops. Corresponding to the requests set for a positive detection, those tubes emerge from the subphotospheric layers and become visible in the granular cell interior. They are then dragged toward the intergranule where they eventually disappear. The whole process takes an approximate average time of some five minutes. Some common features for those tubes are: magnetic isosurfaces with rising loop shape, magnetic field lines roughly contained within the isosurfaces, marked magnetic concentration with up to two orders of magnitude larger strength in the center of the loop structure than in the surrounding volume.

This thesis focuses on, and illustrates in detail, two of the emerging concentrated magnetic tubes. One is a canonical case that clearly follows the general evolutionary pattern mentioned above. The other one is a special case in which the emergence of the magnetic loop is perturbed by the simultaneous formation of an intergranular lane in its domain. This causes a *fold* in the magnetic arch and the resulting emerging structure has the shape of a double loop.

The results obtained in this Master's thesis have been used as part of a Letter recently published in the *Astrophysical Journal Letters* (Moreno-Insertis et al., 2018).

Introducción: desde hace ya más de diez años, los avances en la instrumentación astronómica, en particular en Física Solar, han permitido alcanzar muy alta resolución espacial en las observaciones fotosféricas, llegándose a obtener resolución mejor que 200 km. Ello ha permitido detectar la aparición de pequeñas estructuras magnéticas bipolares en el interior de gránulos en la superficie del Sol. Son varios los trabajos que hablan de este tipo de detecciones que sugieren que lo que se está viendo es la emergencia de un pequeño arco magnético desde el interior solar. Sin embargo, las observaciones no son suficientes para confirmar esta suposición ya que, incluso aplicando técnicas de inversión, sólo permiten obtener valores de variables físicas en el rango limitado de altura en que se forma la línea espectral observada y bajo suposiciones restrictivas. Es crucial utilizar modelado numérico tridimensional y localizar este tipo de estructuras en simulaciones magnetohidrodinámicas para conocer detalles estructurales, evolutivos y propiedades sobre las misma desde el interior solar hasta la atmósfera.

Tres hitos históricos en la detección observacional de estas estructuras magnéticas han sido los siguientes: en el trabajo de De Pontieu (2002) se detectan por primera vez concentraciones de flujo magnético a escalas claramente subgranulares. Unos años más tarde, Centeno et al. (2007) detectan más detalles de estas concentraciones de campo magnético, encontrando una zona de campo horizontal en cuyos extremos se encuentran dos polos de campo magnético vertical de signo opuesto. Finalmente, en el trabajo de Martínez-González & Bellot (2009), se detectan de nuevo este tipo de estructuras pero un número suficientemente alto de veces como para poder realizar un estudio estadístico; estos autores también usaron líneas espectrales con formación a diferentes alturas y concluyeron que una fracción pequeña de las estructuras magnéticas ascendían desde la fotosfera hasta la cromosfera.

Desde el punto de vista teórico solo ha habido un trabajo, realizado por Moreno-Insertis et al. (2017), en que, mediante modelado numérico 3D, se intenta entender la física de la formación, estructura y evolución de dichas concentraciones magnéticas de tamaño subgranular. Los autores detectan dos tipos diferentes de estas estructuras en un modelo radiativo-MHD realizado con el código Bifrost y para una situación de Sol en calma en que está teniendo lugar emergencia global de flujo magnético: estructuras de tubo magnético ascendente y estructuras de tipo capa. En el mismo trabajo, también se detectan capas magnéticas en otro modelo numérico 3D, de acceso público, también realizado con el código Bifrost, al que nos referiremos aquí con las siglas BPS. Nuestro objetivo en este TFM es completar este trabajo localizando estructuras magnéticas tubulares que emergen en el interior de gránulos en dicha simulación pública de Bifrost (BPS). Con esta detección probaremos que las micro-estructuras magnéticas tubulares también aparecen en modelos MHD con condiciones solares diferentes a las del modelo de Moreno-Insertis et al. (2017).

La simulación BPS fue puesta a disposición de la comunidad científica a través del Hinode Data Center. Abarca desde las capas altas de la zona de convección hasta la corona solar, más concretamente desde 2.4 Mm por debajo de la superficie hasta 14.4 Mm por encima de ésta. La extensión horizontal del dominio es de 24×24 Mm². Estos datos contienen valores de temperatura, presión, densidad másica, densidad de partículas y las tres componentes del campo magnético y la velocidad. Los datos constituyen una secuencia temporal desde 3850s hasta 5410 s, aproximadamente media hora de tiempo solar, con cadencia de 10 segundos solares.

Métodos: en primer lugar se ha realizado una caracterización de los datos de la simulación a través de las magnitudes velocidad y campo magnético. Se han representado mapas de color de u_z y B_z a diferentes alturas con el fin de localizar en la BPS comportamientos y características similares a lo que conocemos del Sol observacional y/o teóricamente. También se ha llevado a cabo un análisis estadístico de estas magnitudes en las diferentes profundidades de la caja que corresponden a la zona de convección.

Tras esto se ha procedido a la búsqueda del tipo de estructuras magnéticas mencionadas. Esta búsqueda se ha dividido en dos partes. Primero, se ha intentado localizar la emergencia de arcos magnéticos mediante una inspección a nivel superficial de mapas horizontales de velocidad vertical donde se han superpuesto isocontornos de intensidad de campo magnético. Esto se ha hecho con vistas a localizar fenómenos de aparición de estructuras bipolares. Para confirmar una detección se ha seguido la siguiente pauta: primeramente se ha exigido que apareciese una zona concentrada espacialmente de campo magnético horizontal en el interior del gránulo; después se requería que ese área aumentase

de intensidad y tamaño, apareciendo posteriormente dos polos de campo magnético vertical de signo mutuamente opuesto en los extremos de la zona cubierta por campo horizontal. Finalmente, hemos exigido que toda la estructura sea arrastrada hacia el intergránulo y que desaparezca allí.

Sin embargo, la visualización de isocontornos no es una evidencia definitiva de la localización de arcos magnéticos ya que sólo vemos una sección horizontal y esto no es suficiente para conocer la forma de nuestra estructura magnética. Por esta razón, para la segunda parte del método de detección necesitamos visualización en 3D de los datos. Hemos usado el software VAPOR (UCAR) y, en particular, sus herramientas de cálculo de isosuperficies de diferentes variables físicas, de líneas de campo magnético, y de mapas de color sobre planos con orientación 3D arbitraria. Para visualizar las estructuras en tres dimensiones hemos calculado isosuperficies de intensidad de campo magnético para valores entre 100 y 200 G añadiendo mapas de velocidad vertical sobre planos horizontales. Se ha elegido un instante temporal en que la estructura haya evolucionado lo suficiente y se han podido descartar algunas de las candidatas de la visualización 2D por tener una forma irregular o por pertenecer a estructuras magnéticas intergranulares mayores. Para las estructuras que sí eran claramente tubos magnéticos, hemos visualizado toda su secuencia temporal para ver dónde se forman y cómo evolucionan. Para analizar las estructuras más a fondo hemos realizado dos pruebas más: una ha sido la representación de líneas de campo en el interior de tubo magnético para ver el comportamiento en el interior del objeto. Y una última que ha sido la representación de un mapa de intensidad de campo magnético en un plano trasversal a la estructura con el fin de conocer más información sobre el grado de concentración de la misma.

Resultados: en la parte de caracterización de los datos hemos observado cómo la BPS reproduce características generales de la magnetoconvección que concuerdan con lo que conocemos observacional y/o teóricamente. En cuanto a la detección de estructuras magnéticas emergentes con forma de arco, hemos podido seleccionar hasta 26 estructuras mediante el método de detección 2D. Éstas han sido tratadas como candidatas al tipo de estructura buscada a espera de la confirmación definitiva a través de la visualización 3D. Tras llevarla a cabo, confirmamos que 11 de las estructuras observadas se corresponden con el tipo de objeto buscado. En dichas estructuras se han observado una serie de características comunes. Primero, dado el proceso de selección escogido, siguen las pautas evolutivas ya descritas: emergencia en el interior del gránulo, arrastre hacia la región intergranular por los movimientos del plasma y desaparición de la estructura en el intergránulo; todo esto en un tiempo de vida próximo a los 5 minutos. También una serie de características estructurales: forma tubular plegada en forma de arco, identidad de tubo de flujo magnético en el sentido clásico electromagnético, independencia del resto de estructuras magnéticas del entorno y concentración notable con intensidades hasta 2 órdenes de magnitud por encima del entorno.

En este trabajo se ilustran en detalle dos de dichas estructuras de tubo emergente. Una de ellas es un caso ejemplar que sigue los diferentes pasos evolutivos claramente. El otro es un caso especial donde la emergencia del arco magnético se ve sorprendida por la formación de un intergránulo bajo ella; esto pliega la estructura magnética y produce la emergencia de un doble arco.

Los resultados obtenidos en este Trabajo Fin de Máster han sido usados como parte de una Letter publicada muy recientemente en *Astrophysical Journal Letters* (Moreno-Insertis et al., 2018).

1. Introducción

El Sol es la estrella más cercana a nosotros y es, por tanto, nuestra llave para comprender multitud de fenómenos estelares. Nos acerca un poco más a entender el Universo.

Una magnitud esencial para entender el comportamiento del Sol es el campo magnético. Y para entender el magnetismo solar se hace crucial el estudio de procesos de emergencia de flujo magnético desde el interior hasta la atmósfera. Ésto se da en multitud de escalas espaciales, desde las mayores (grandes regiones activas) hasta, al menos, escalas tan pequeñas como las menores que se han podido observar. La emergencia de flujo magnético en las capas fotosféricas se produce por la interacción del campo con los movimientos del plasma en las celdas convectivas; por tanto, para entender el campo magnético solar tenemos que estudiar la magnetoconvección. Sin embargo, hay claras limitaciones a la hora de estudiar estos fenómenos, tanto desde el punto de vista observacional como teórico. Observacionalmente, la resolución de los detectores en Tierra y a bordo de satélites ha mejorado mucho en los últimos años pero, aún así, no es lo bastante buena para detectar con detalle la emergencia de campo magnético a tamaños muy por debajo de los gránulos. Por otro lado, el modelado teórico/numérico es fundamental para asociar las observaciones a las leyes de la física del plasma y transporte radiativo, y entender la física de los procesos solares, también en escalas inobservables por pequeñas o en niveles del interior inaccesibles a la observación. El modelado numérico multidimensional ha tomado un papel cada vez más importante debido al enorme aumento de la potencia de cálculo de los ordenadores y la aparición de códigos numéricos versátiles y efectivos. Aún así, tanto la teoría como las observaciones son insuficientes por separado para explicar todo lo que desconocemos acerca del magnetismo solar. Se requiere de un avance conjunto entre ambas para la consecución de respuestas. Es aquí donde encaja nuestro trabajo, localizando en una simulación numérica avanzada de magnetoconvección estructuras de tamaño subgranular del mismo tipo de las que se han encontrado en el Sol en el límite espacial de detección de las observaciones actuales.

1.1. Estructuras bipolares emergentes.

1.1.1. Observaciones

En los últimos años los avances en las capacidades observacionales han permitido estudiar el Sol en resoluciones inferiores al segundo de arco. Esto ha permitido detectar la emergencia de estructuras magnéticas bipolares en el interior de gránulos. De tratarse de arcos magnéticos emergentes de muy pequeña escala espacial estaríamos antes un descubrimiento que plantea multitud de cuestiones sobre la generación y evolución del campo magnético en las celdas convectivas de diferentes tamaños.

De Pontieu (2002) dio el primer paso histórico en la detección de este tipo de estructuras publicando la primera detección de concentraciones de flujo magnético de tamaño subgranular a partir de datos del SST (Swedish 1-m Solar Telescope, ORM, La Palma) que permitía una resolución espacial de $0,3''$. Entre otros métodos el autor utilizó técnicas espectropolarimétricas para analizar los datos obtenidos de la línea de Fe I en 6302 \AA . Se detectaron elementos magnéticos de un tamaño de $0,5''$ y un flujo total de $5 \cdot 10^{17} \text{ Mx}$, con una vida media de unos 15 minutos antes de ser dispersados por los flujos convectivos de la superficie solar.

El siguiente paso en esta línea se produjo con Centeno et al. (2007), momento en que se observaron directamente dipolos a través de magnetogramas de regiones de Sol en calma tomados con el instrumento SP/SOT instalado en Hinode, con resolución espacial de $0,32''$. La aparición de estas estructuras se da siguiendo unas pautas: en primer lugar se detecta en el interior de un gránulo una zona con notable campo magnético horizontal con una intensidad de unos 200 G. Minutos más tarde aparecen dos polos de componente vertical de campo magnético y signo opuesto, que surgen en los extremos del área inicial con campo horizontal. La estructura magnética ofrece un flujo total de $\sim 10^{17} \text{ Mx}$. A partir de ese momento, los polos magnéticos comienzan a desplazarse hacia la región intergranular y los elementos magnéticos dejan de ser visibles. En dicho trabajo se interpreta ésto como la aparición de un pequeño arco magnético en el gránulo cuyos puntos extremos, anclados a la fotosfera, son arrastrados por los movimientos del plasma hacia el intergránulo, donde el arco es finalmente absorbido hacia el interior solar.

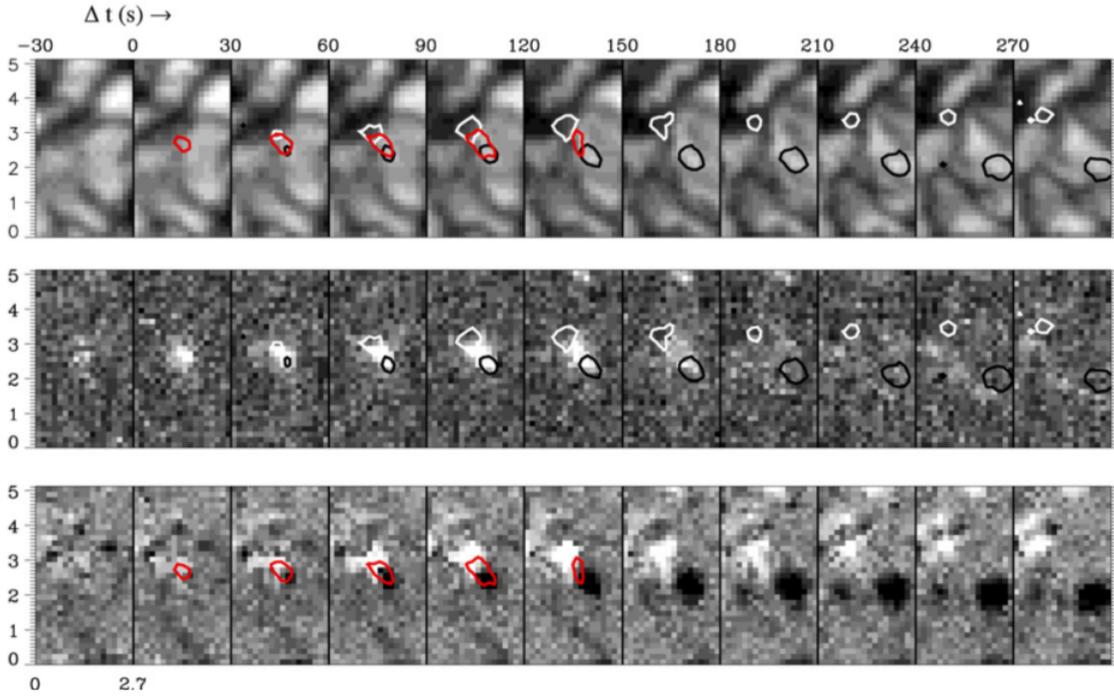


Figura 1: Figura 2 de Martínez-González & Bellot 2009. Emergencia de arcos magnéticos de pequeña escala en la fotosfera de una región en calma del Sol. Arriba: mapas de intensidad del continuo a 630 nm. En medio: polarización lineal total en la línea 630.25 nm, saturada en 0.3 pm. Abajo: polarización circular total en la línea 630.25 nm. Los contornos rojos representan la polarización lineal mayor que 0.22 pm. Contornos negros y blancos indican señales de polarización circular mayores que ± 0.1 pm. Ejes en arcosegundos.

El tercer escalón observacional vino de la mano de Martínez-González & Bellot (2009). A partir de datos del satélite Hinode y el DOT (Dutch Open Telescope) detectaron en torno a 70 episodios de emergencia de estructuras magnéticas como las anteriormente descritas. El tiempo de vida medio observado en dichas estructuras fue menor a los 10 minutos y el flujo total promedio era de unos 10^{17} Mx. Se determinó que la aparición de este tipo de estructuras se da en las partes de las celdas convectivas que poseen movimientos ascendentes de material, es decir, en el interior de los gránulos, y que suceden con una frecuencia de una estructura por cada hora y por cada región de $7'' \times 7''$. Ver figura 1.

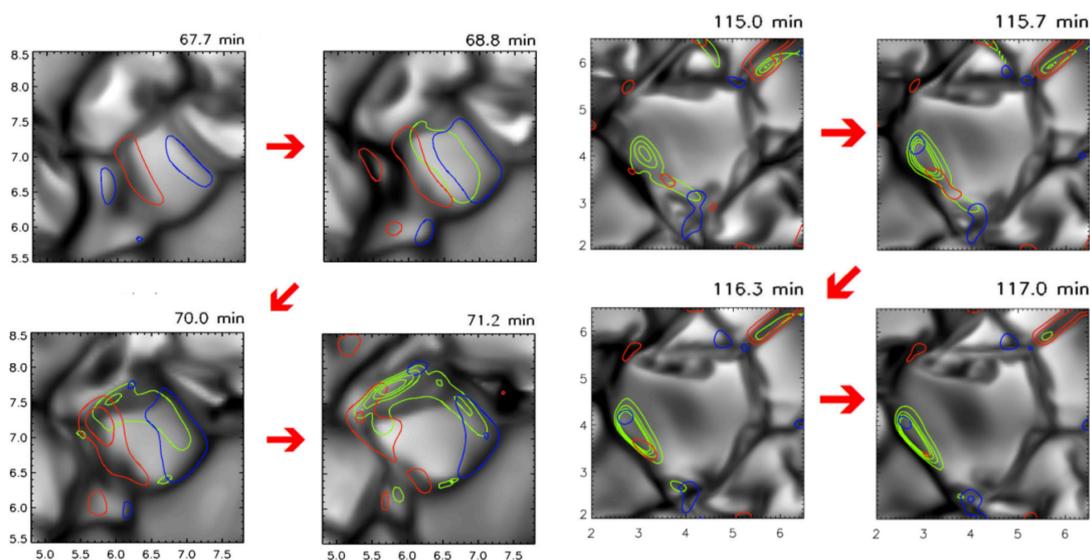
Tras la consecución de estos tres hitos se ha visto multiplicado el número de detecciones de emergencia de elementos magnéticos de muy pequeña escala. Como ejemplo citamos las publicaciones de Orozco et al. (2008), Martínez-González et al. (2010), Gömöry et al. (2010), Palacios et al. (2012), Guglielmino et al. (2012).

1.1.2. Modelado teórico

El modelado teórico de este tipo de eventos es fundamental para comprender la formación y evolución de los microtubos magnéticos en el interior solar, así como los muchos aspectos importantes de su evolución en la atmósfera que no se pueden obtener mediante técnicas observacionales. La realización de modelos de estos episodios de emergencia va a aprovechar la extensa tradición de modelado bi y tri-dimensional de magnetoconvección desde los años 1980 (ver los artículos de revisión de Nordlund et al. 2009 y Freytag et al. 2012). Primeros modelos en que se estudia la emergencia de tubos magnéticos en una simulación realista de magnetoconvección son los de Stein & Nordlund (2006), Cheung et al. (2007) y Cheung et al. (2008). Sin embargo dichos estudios se realizaron muy temprano en la historia observacional de este tema y no pusieron el foco en la comprensión de la formación y evolución de microestructuras magnéticas en interacción con los flujos convectivos.

El primer y único abordaje hasta la fecha de este tema desde el punto de vista teórico-computacional se da en el artículo Moreno-Insertis et al. (2017). Éste se tomará como pilar principal en que se basa nuestro trabajo. En él, utilizando el código Bifrost (ver sección 1.2), se realiza una simulación de mag-

netoconvección que abarca desde 2,5 Mm bajo la superficie hasta 10 Mm sobre la misma, incluyendo por tanto las capas altas de la zona de convección, la fotosfera, cromosfera y parte de la corona, pasando por la región de transición. Dicho modelo corresponde a una situación de Sol en calma: los valores promedio estadístico de campo magnético en la fotosfera (concretamente en la superficie corrugada $\tau_{500} = 1$) son $B_{RMS} = 72$ G, $\langle |B| \rangle = 29$ G y $\langle |B_z| \rangle = 13$ G, que son compatibles con valores promedio obtenidos mediante observaciones. El recinto en el que se realiza la simulación tiene unas dimensiones horizontales de 10×10 Mm². La resolución espacial de la simulación es de 19.5 km horizontalmente (equivalente a 0.027 segundos de arco). En la dirección vertical se tiene mallado no uniforme, y la resolución máxima, que se alcanza en la fotosfera, es de 16 km. En este trabajo, se inyecta flujo magnético desde el fondo del dominio y se deja ascender arrastrado por los movimientos de las celdas convectivas, primero las de mayor tamaño (mesogranular) en las partes profundas de la caja y luego las celdas granulares al acercarse a la superficie. Se trata, por tanto, de un modelo de emergencia global de flujo magnético tipo la que puede ocurrir cuando emerge una región activa efímera en el interior de un supergranulo.



(a) Figura 6 de Moreno-Insertis et al. 2017.

(b) Figura 7 de Moreno-Insertis et al. 2017.

Figura 2: Mapas en escala de grises de intensidad para cuatro instantes temporales con isocontornos de polarización circular (rojo y azul) y horizontal (verde) superpuestos. Coordenadas en Mm.

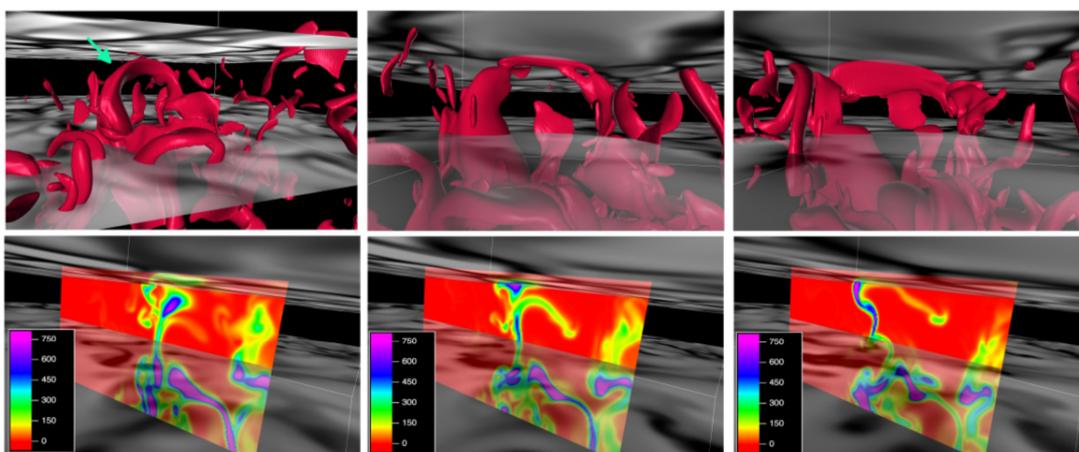


Figura 3: Figura 12 de Moreno-Insertis et al. 2017. Evolución temporal de una concentración de campo con forma de arco que da lugar a los contornos de Stokes de la figura 2.b. En la fila superior, isosuperficies de campo magnético de intensidad $B = 500$ G en los instantes $t = 113.3$, 115.5 y 118.0 min. En la fila inferior, mapas de color de intensidad de campo en planos verticales situados transversalmente al eje principal del arco. Valores de la barra de color en Gauss.

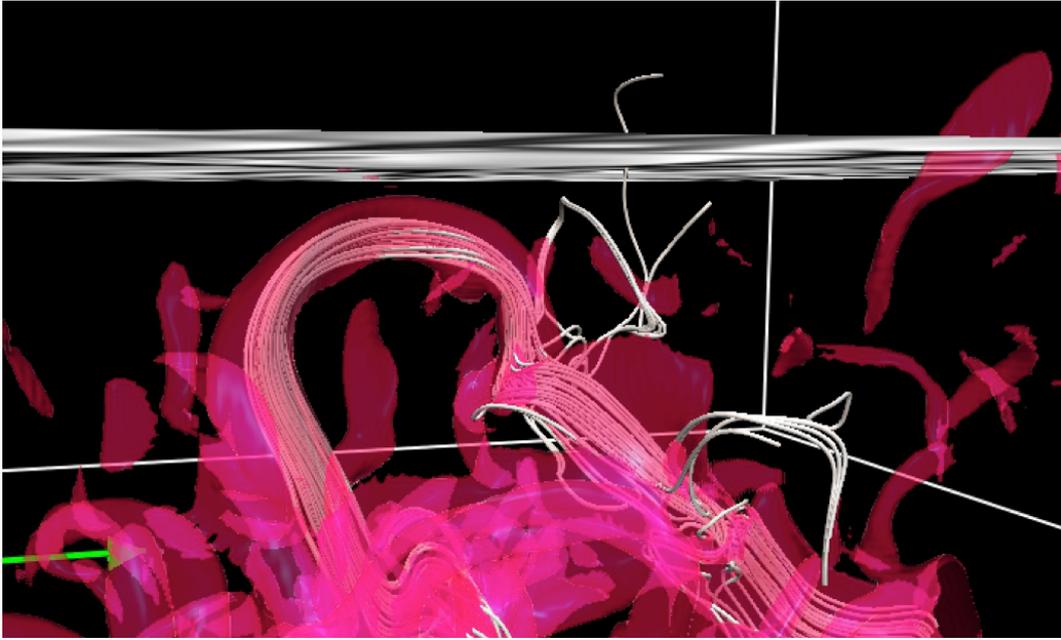


Figura 4: Figura 13 de Moreno-Insertis et al. 2017. Ilustración de la naturaleza de tubo de flujo del arco ascendente de la figura 3.

En este trabajo se detectó claramente la emergencia de estructuras magnéticas de tamaño subgranular en el interior de celdas granulares en la superficie y baja atmósfera. Para realizar la detección se sintetizaron espectros en la línea FeI 6302 incluyendo la obtención de parámetros de Stokes y perfiles de polarización. De esta forma se pudo llevar a cabo una representación de isocontornos de parámetros de Stokes V y $\sqrt{Q^2 + U^2}$ sobre mapas de velocidad en la superficie (ver figura 2), esto es, el método principal de detección usado por los autores citados más arriba en la sección 1.1.1. Con este método de generación de parámetros sintéticos cuasi-observacionales el modelo numérico puede aportar información de gran valor con el fin de detectar episodios de emergencia de campo magnético estructurado. Adicionalmente, en el artículo se hizo uso extenso de técnicas de visualización 3D, que cobran un papel importante en este contexto, permitiendo ir mucho más allá de la observación: la visualización permite la representación de líneas de campo magnético e isosuperficies de intensidad de campo con las que se puede identificar estructuras magnéticas, como tubos de flujo, de forma clara. En el artículo, aprovechando las posibilidades del modelado teórico, se estudia también, mediante métodos estadísticos y de visualización 3D, la formación y evolución de las estructuras por debajo de la superficie.

De esta forma se consiguió la detección de episodios de emergencia magnética en la superficie (ver figura 3), que se vio que tenía lugar en dos formas principales. En la primera, como tubos de flujo magnético, el campo alcanza la superficie solar en forma de arco en el seno de una celda granular y con tamaño menor a la misma. El otro modo de emergencia es en forma de capa magnética. Cuando un tubo emergente se encuentra en la zona en que está teniendo lugar la formación de un gránulo, se ve expandido al igual que el material de su entorno y acaba emergiendo como una capa básicamente horizontal que cubre todo el gránulo a una altura de unos pocos cientos de kilómetros sobre la fotosfera. En dicho artículo se informó también de la detección de estructuras emergentes tipo capa en otra simulación numérica 3D, también realizada mediante el código Bifrost y que se halla a disposición pública, de la que se hablará en lo sucesivo.

1.1.3. Ámbito y alcance de este trabajo

Aunque ya exista una colección de detecciones de naturaleza teórico-numérica de emergencia de estructuras magnéticas organizadas a nivel subgranular con explicación de su origen, estadística y visualización 3D, dicho trabajo se hizo para un modelo correspondiente a sol en calma y dentro de unos parámetros determinados en cuanto a tamaño de caja, distribución a gran escala de campo magnético y duración temporal del experimento. Es de interés ampliar dicho estudio a otros modelos numéricos que

traten de situaciones solares diferentes. Realizar una simulación numérica 3D de magnetoconvección incluyendo desde la zona de convección hasta la corona es una empresa de gran envergadura, que supera con mucho el marco de un trabajo de fin de master, con lo cual procede usar un modelo ya realizado y cuyas cajas de datos sean accesibles. En el trabajo de Moreno-Insertis et al. (2017) ya se llevó a cabo esta tarea de ampliación, detectando la formación de capas magnéticas en una simulación de acceso público realizada con el código Bifrost (para la que utilizaremos las siglas BPS en lo que sigue). En el presente trabajo, por tanto, nos centraremos en la emergencia de estructuras tubulares de flujo magnético para complementar el trabajo ya realizado.

Cabe destacar que, como antesala a la publicación del trabajo de Moreno-Insertis et al. (2017), los autores decidieron adelantar resultados mediante una letter (Moreno-Insertis et al., 2018), postponiendo la publicación del artículo completo hasta incluir una mayor variedad de entornos solares. En dicha letter se han incluido algunos de los resultados obtenidos durante la realización de este TFM ya que la detección de emergencia de micro-tubos en la BPS completa los resultados ya obtenidos por los autores del artículo completo.

Los objetivos concretos de este trabajo se indican en el apartado 2.

1.2. Código Bifrost y simulación pública

1.2.1. Datos generales sobre el código Bifrost

Bifrost es un código altamente paralelizable que resuelve modelos 3D magnetohidrodinámicos realistas. Ha sido descrito con detalle por Gudiksen et al. (2011). Básicamente, el código se encarga de resolver las ecuaciones de los fluidos magnetizados (masa, impulso y energía) junto con la ecuación de inducción de la magnetohidrodinámica, lo que lo hace pieza clave en la resolución de modelos solares. Además, el código da solución también a la ecuación de transporte radiativo en las zonas de la fotosfera y cromosfera, regiones, sobre todo esta última, de gran dificultad de estudio debido a la complejidad de los fenómenos que tienen lugar en ellas. El código incluye aspectos de transporte radiativo con efectos de falta de equilibrio termodinámico local (NLTE) como, por ejemplo, procesos de scattering. Tiene implementadas tablas con gran cantidad de datos de laboratorio realistas para la ecuación de estado y opacidades. Ofrece también el tratamiento de la conducción térmica y el enfriamiento radiativo ópticamente delgado, los cuales juegan un papel relevante en la región de transición y en la corona. Todo esto convierte a Bifrost en un código de referencia para la resolución de modelos 2D y 3D en entornos de atmósfera solar.

1.2.2. La simulación pública de magnetoconvección desde el interior solar hasta la corona

Los autores del código Bifrost, en el marco de la colaboración para la misión espacial IRIS, han llevado a cabo una simulación realista de magnetoconvección que, además de unos pocos miles de kilómetros en el interior y la fotosfera, incluye alturas coronales. Dicho modelo ha sido puesto a disposición pública a través de Hinode Science Data Centre Europe (Carlsson et al., 2016), y a la que, como ya se ha dicho, nos referimos con las siglas BPS. Los datos son relativos a las capas contenidas entre la parte superior de la zona de convección y la corona solar, pasando por la cromosfera y la zona de transición; y contienen los valores varias magnitudes físicas, como son: la temperatura, la presión, la densidad de masa, la energía interna, la densidad de número de partículas, las tres componentes de la velocidad y del campo magnético. A continuación exponemos diferentes aspectos particulares de esta simulación dado que es el contexto en el que se llevan a cabo las detecciones de emergencia en este trabajo.

Caja computacional

La simulación se ha realizado en una caja de dimensiones $24 \times 24 \text{ Mm}^2$ en el plano horizontal (XY) y con una profundidad (z) que se extiende desde los 2,4 Mm bajo la superficie hasta 14,4 Mm sobre ella (figura 5). La superficie se ha definido a partir de la profundidad óptica a una longitud de onda de

500nm: la altura promedio de la superficie corrugada en que $\tau_{500} = 1$ se ha definido como $z = 0$. Los valores negativos de z se refieren a las zonas bajo la superficie y los positivos a las zonas exteriores.

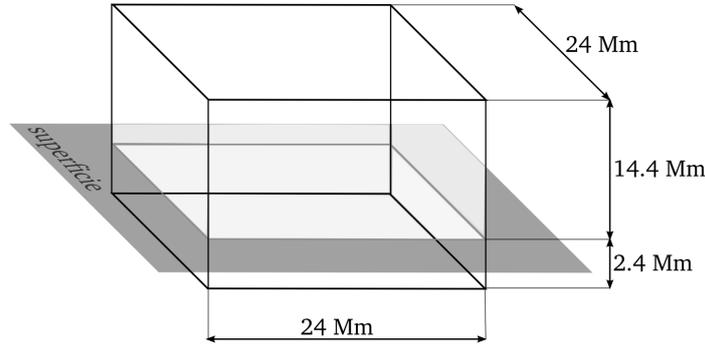


Figura 5: Esquema de la caja computacional usada en la simulación.

Mallado

El mallado referente a nuestra caja contiene $504 \times 504 \times 496$ puntos de red. Está uniformemente distribuido horizontalmente, lo que nos da una resolución espacial de 48 km. Aunque mucho menos fina que la del modelo de Moreno-Insertis et al. 2017, esta resolución es suficiente para poder detectar estructuras como las que perseguimos encontrar en este trabajo. En el eje z la distribución del mallado no es homogénea, sino que va desde los 19 km en fotosfera y cromosfera hasta los 100 km en la parte superior de la caja. Se ha seleccionado un mallado no uniforme verticalmente debido a la mayor complejidad y la menor escala espacial de los fenómenos en las regiones cercanas a la superficie, que requieren de mayor resolución espacial para poder ser reproducidos adecuadamente.

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno en los laterales de la caja han sido fijadas como periódicas. En la tapa inferior de la caja se han utilizado condiciones genéricas como las que se utilizan corrientemente para obtener modelos realistas de convección: tapa abierta para la entrada de masa, permitiendo además la salida libre en las zonas de flujo descendente; temperatura efectiva (o, de forma equivalente, el flujo solar) resultante no fijada directamente en la simulación sino que, en realidad, la condición que se ha fijado ha sido el flujo de entropía en la tapa inferior del dominio, y se ha variado en un proceso de retroalimentación hasta conseguir valores realistas de T_{eff} y F_{Sun} . También se impone la condición de nodo de presión, evitando que las ondas escapen por la tapa inferior. Respecto al campo magnético, y todavía en la tapa inferior, se ha impuesto el hecho de que las líneas de campo sean arrastradas de forma pasiva por los movimientos descendentes del plasma sin que, por otro lado, sea alimentado externamente en las zonas de flujo ascendente. En la tapa superior se aplican condiciones que permiten la salida de ondas incidentes procedentes del interior de la caja, evitando la entrada de ondas desde fuera. Esto se hace usando métodos de características (ver Gudiksen et al. 2011).

Condición inicial

Como punto de partida la simulación pública usa un modelo anterior puramente hidrodinámico de pequeñas dimensiones, $6 \times 6 \times 3 \text{ Mm}^3$ al que se le extiende el dominio tanto lateralmente como en altura. Dicha extensión se realizó gradualmente, dejando que el modelo alcanzase un estado relajado estadísticamente estacionario en cada paso. El paso final es añadir alturas cromosféricas y coroneales. Desde ese punto, se deja de nuevo al sistema relajarse hasta un estado estadísticamente estacionario a lo largo de 1750 s de tiempo solar. La temperatura coronal alcanzada en este proto-modelo es de

250 000 K solamente. Hasta este momento la condición inicial es puramente hidrodinámica, no posee campo magnético. El siguiente paso consistió en añadir un campo magnético en todo el dominio, proceso que se realizará a partir de una extrapolación potencial sobre la base de una configuración dada en la tapa inferior del dominio. Esta configuración magnética en la tapa inferior es el principal parámetro libre del modelo y consiste en dos regiones de polaridades dominantes opuestas y separadas una de la otra por unos 8 Mm. La distribución de campo magnético de estos polos es tal que el flujo neto es nulo. La presencia de campo magnético permite que la temperatura coronal aumente hasta un valor del orden de 10^6 K y que se mantenga de forma autoconsistente. Este tipo de calentamiento coronal magnético autoconsistente ya se había conseguido en el marco de la tesis doctoral de B. Gudiksen (ver Gudiksen & Nordlund 2005), uno de los autores de Bifrost. Al modelo resultante final tras de relajación se le deja evolucionar: de dicha evolución se ha hecho pública una parte comprendida entre $t = 3850$ s y $t = 5440$ s, que es también el intervalo de tiempo que se ha usado para el presente trabajo. La distribución de campo fotosférico resultante tiene una topología similar a la de una región de red magnética intensificada (*enhanced network*) del Sol. El campo magnético promedio sin signo en la fotosfera es de 48 G.

Oscilaciones globales en la caja numérica

Están presentes en el fluido en el seno de la simulación, sobre todo en la zona de convección y en la parte inferior de la atmósfera, diferentes oscilaciones, fundamentalmente de naturaleza acústica, que afectan a toda la extensión horizontal de la caja. La tapa inferior actúa como nodo de presión haciendo reflejarse los modos acústicos con el fin de imitar la refracción de este tipo de modos en la parte profunda de la atmósfera. Se da excitación de los modos-p de manera análoga a la situación del Sol real; sin embargo, la energía se reparte en una serie muy limitada de modos dándole a estos mucha más amplitud de la que tendrían en la realidad.

1.3. VAPOR

VAPOR son las siglas de **V**isualization and **A**nalysis **P**latform for **O**cean, Atmosphere, and Solar **R**esearchers, y es un producto de NCAR (National Center for Atmospheric Research) al que dan soporte U.S. National Science Foundation y Korea Institute of Science and Technology Information. Se trata de un software de visualización 3D disponible gratuitamente en su página web para equipos Linux y Windows con los requisitos gráficos necesarios.

VAPOR ofrece multitud de herramientas y métodos para la visualización de datos magnetohidrodinámicos. Dándole como entrada un cubo de datos como los que nos ocupan en este trabajo, VAPOR permite representar diferentes elementos relativos al mismo, como isosuperficies, líneas de campos vectoriales, etc. Estos cubos de datos deben ser construidos previamente como archivo *.vdf* que contenga todas las magnitudes deseadas, las coordenadas del mallado del cubo y toda la secuencia temporal de datos que deseamos.

En el apartado de Metodología (sección 3) explicaremos en detalle las herramientas de VAPOR usadas en el presente trabajo.

2. Objetivos

- El objetivo principal de este trabajo desde el punto de vista de la Física Solar es la confirmación de la existencia de tubos magnéticos emergentes de tamaño subgranular en una simulación tridimensional de magnetoconvección realizada con el código Bifrost y cuyas cajas de datos son de acceso público (Bifrost Public Simulation, o BPS). La existencia de estructuras magnéticas bipolares en el interior de gránulos en el Sol en calma fue obtenida observacionalmente por diferentes autores (empezando por Centeno et al. (2007), Martínez-González & Bellot (2009)) usando datos fotosféricos de alta resolución espacial (SST, Hinode/SOT). Desde el punto de vista teórico, en el trabajo reciente de Moreno-Insertis et al. (2017) se localizaron estructuras magnéticas de tamaño subgranular en un modelo de magnetoconvección 3D también calculado con el código Bifrost pero distinto a la simulación BPS y que corresponde a un caso de emergencia global

de una región de flujo magnético del tamaño de una región efímera en el Sol en calma: usando técnicas de visualización 3D, síntesis espectropolarimétrica a posteriori y técnicas estadísticas, dichos autores comprobaron que las estructuras subgranulares que detectaron eran de dos tipos, a saber, arcos magnéticos que emergían en el interior de gránulos o capas magnéticas que evolucionaban cubriendo casi completamente los gránulos en que se formaban. Este último tipo, no descrito previamente en la literatura, es especialmente interesante al poder corresponder dichas estructuras a las descritas recientemente en el trabajo observacional de Centeno et al. (2017). En el trabajo de Moreno-Insertis et al. (2017), además, también se detectaron estructuras de tipo capa magnética en la BPS, pero no se extendió el trabajo hasta detectar en dicha simulación estructuras de tipo micro-arco magnético ascendente. El presente trabajo tiene como objetivo localizar dichas pequeñas estructuras tubulares en la simulación BPS, completando, de ese modo, la identificación teórica de Moreno-Insertis et al. (2017). Dado que ambas simulaciones numéricas corresponden a diferentes tipos de regiones de Sol en calma, con la detección planteada en este trabajo se puede dar un primer paso en la comprensión teórica de la aparición de este tipo de fenómenos de emergencia magnética de muy pequeña escala en diferentes entornos solares.

- Como objetivo fundamental, planteamos en este trabajo la localización de esas estructuras bipolares usando fundamentalmente mapas tanto de velocidad vertical como de intensidad magnética en planos horizontales fotosféricos, posteriormente suplementados con las técnicas de visualización 3D (isosuperficies magnéticas, trazado de líneas de campo) ya usadas en el trabajo teórico de Moreno-Insertis et al. (2017). En dicho trabajo se utilizaron, además, isocontornos de nivel de polarización a partir de síntesis espectral de la línea del Fe I a 6302 Å. Esta última técnica acerca el modelo teórico a las observaciones y facilita mucho la localización de estructuras bipolares, de forma análoga al caso observacional. Dada la falta de dichos datos espectropolarimétricos en la BPS, en el presente trabajo hay que limitarse al uso de mapas de velocidad (u) y de campo magnético (B) en planos: el objetivo en este aspecto es demostrar que las técnicas usadas en este trabajo son ampliamente suficientes para conseguir la detección buscada. Una vez lograda la detección de esa forma, las técnicas de visualización 3D permitirán comprobar y confirmar la misma proporcionando datos sobre la estructura magnética a diferentes profundidades imposibles de obtener en una observación.
- Como objetivos de entrenamiento en técnicas de trabajo teórico-numérico destacamos (1) el aprendizaje del manejo y gestión de conjuntos de datos de gran tamaño (el tamaño de los ficheros *fits* con los cubos de datos usados suman un total de cerca de 1 Terabyte); (2) el aprendizaje de la exploración de series temporales de cajas de datos tridimensionales y localización de estructuras de tamaño muy pequeño mediante técnicas de visualización 2D y 3D; (3) aprendizaje de identificación de estructuras con objetos y patrones de evolución temporal predichos por la Magnetohidrodinámica solar y Física del Plasma; y, finalmente, (4) la mejora en el conocimiento y desarrollo práctico de técnicas de programación.

3. Metodología

En este apartado se explicarán los métodos usados en la obtención de resultados a partir de los datos de la BPS. Se especificarán las herramientas matemáticas necesarias para la correcta caracterización de los datos así como los pasos seguidos en el proceso de localización de las estructuras que es la parte principal de este trabajo. Debido al complejo tratamiento teórico que queremos realizar, toma especial importancia el uso de herramientas adecuadas para la consecución de los objetivos. Hemos recurrido a dos paquetes que permiten conseguir los resultados buscados; como son IDL y VAPOR. IDL nos ofrece ciertas ventajas frente a otros lenguajes de programación. Entre ellas destacamos la flexibilidad del lenguaje, el uso de su propia interfaz gráfica y la abundancia de recursos en temas astrofísicos. Nos ha permitido realizar cálculos de las diferentes magnitudes estadísticas, mapas 2D y representaciones de isocontornos. Por otro lado, VAPOR ofrece las herramientas necesaria para la visualización tridimensional de los datos; que es pieza clave en la detección del tipo de estructuras magnéticas que buscamos. La posibilidad de representar diferentes objetos como cortes en el cubo,

isosuperficies o líneas de campo nos arma de recursos muy útiles y necesarios para localizar y estudiar la evolución de estas estructuras.

3.1. Caracterización

Para la caracterización de los datos de la simulación hemos requerido de diferentes prácticas para la obtención de los resultados deseados.

Mapas de color

En una primera toma de contacto con los datos, se han seleccionados cortes horizontales a diferentes alturas y para diferentes magnitudes como velocidad vertical o campo magnético vertical. Seleccionando alturas específicas podemos comparar los resultados de nuestra simulación con los esperados en el Sol según las observaciones.

Estadística

Primeramente se realizará un análisis estadístico de las magnitudes principales en nuestro trabajo, velocidad y campo magnético. Representaremos y compararemos cualitativamente las siguientes expresiones:

- Promedio horizontal $\langle f \rangle$
- Promedio horizontal de la componente vertical $\langle f_z \rangle$
- Promedio horizontal del valor absoluto de la componente vertical $\langle |f_z| \rangle$
- Raíz Cuadrática Media $\sqrt{\langle f^2 \rangle}$
- Desviación estándar $\sqrt{\langle (f - \langle f \rangle)^2 \rangle}$

Promedios horizontales

Es interesante a nivel estadístico conocer como varían ciertas magnitudes, como la velocidad vertical o el campo magnético, en función de la altura. Se hace preciso entonces realizar promedios horizontales de dichas variables para las diferentes alturas realizando medias aritméticas del valor de la magnitud en todos los puntos con la misma coordenada z . Denotaremos en adelante el promedio horizontal de una magnitud A como $\langle A \rangle$, entendiendo que es función de z , ya que cada altura tendrá un promedio horizontal propio.

3.2. Detección de estructuras magnéticas.

La detección de las estructuras es la parte crucial del trabajo y la que más dificultad presenta; es por eso que se debe seguir un proceso delicado y meticuloso. A continuación detallaremos los pasos seguidos en nuestra búsqueda.

Búsqueda inicial de candidatas

El dominio, de $24 \times 24 \text{ Mm}^2$, es mucho mayor que las dimensiones de las estructuras que buscamos, que son subgranulares. Si visualizamos todo el dominio en su evolución temporal nos resultará casi imposible detectar fenómenos de emergencia subgranular debido a su tamaño y a la presencia de zonas con gran intensidad de campo magnético que complican la búsqueda. Por eso, se ha optado por dividir el recinto en 25 partes iguales, que forman un mallado de 5×5 ; dimensiones ahora sí más razonables para detectar la emergencia de pequeñas estructuras magnéticas. Se ha representado para cada subdominio un mapa de color de u_z a $z = 0$, para identificar claramente los gránulos y los integránulos; y superpuestos a éste varios isocontornos para B_z y $B_h = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$. Se ha observado toda la secuencia temporal para cada subdominio buscando apariciones de campo magnético con las características

impuestas por las observaciones: En primer lugar se requiere que aparezca cierta cantidad de campo horizontal, siendo acompañado segundos más tarde con dos polos de campo vertical (positivo y negativo) en los extremos del mismo. Esta aparición requerimos que se de en zonas interiores del gránulo y que, una vez formada, se desplace hacia el intergránulo y acabe desapareciendo. Las estructuras que cumplen estos requisitos serán seleccionadas como candidatas a espera de una confirmación firme mediante visualización en 3D.

Preparación de candidatas para visualización en 3D

Los cubos de datos con los que trabajamos son lo bastante grandes como para que el software VAPOR no nos permita trabajar con total fluidez en los equipos del Centro de Cálculo de Alumnos del Departamento de Astrofísica de la Universidad de La Laguna (CCA). Por tanto, a partir de éstos, se han creado cubos nuevos, de dimensiones más ajustadas al tipo de estructuras y en el intervalo temporal pertinente. Para cada candidata a estructura se ha creado una serie de cubos de datos, centrados en la misma y en un intervalo temporal que contiene la aparición y desaparición de la estructura.

Visualización en 3D mediante VAPOR

Las herramientas que nos ofrece VAPOR son de gran utilidad a la hora de realizar una representación gráfica de nuestros datos. A continuación mostramos las funciones principales usadas en nuestra visualización:

- **Probe:** En esta opción podremos representar cortes en el cubo eligiendo el ángulo y la posición deseada, así como limitar la porción del corte que se muestra para centrarse en partes concretas. En el corte se representan mapas de color de la magnitud que ese desee (B , u , etc).
- **Iso:** Aquí podremos representar isosuperficies de la magnitud deseada (ej. B , T , etc), es decir, dando un valor nos representa superficies donde cierta magnitud tome ese valor. Herramienta de gran utilidad para la representación de las estructuras magnéticas, como veremos más adelante.
- **Flow:** nos permite representar líneas de un campo vectorial. Tiene una utilidad evidente para la representación de líneas de campo magnético. El proceso de representación se realiza a través de lo que llaman semillas (*seeds*): el programa coloca semillas en el dominio y representa las líneas de campo que pasan a través de éstas. La colocación de estas semillas puede ser aleatoria dentro de un dominio marcado o incluso se puede definir las posiciones concretas en las que colocarlas.
- **Animation:** Los cubos de datos están contruidos de tal forma que contienen diferentes instantes temporales del dominio y VAPOR nos permite fácilmente pasar de uno a otro o incluso reproducir la secuencia completa automáticamente. Es esta herramienta fundamental para el estudio de las estructuras, para ver cómo aparecen, cómo evolucionan y cómo son destruidas.

Además de esto es destacable la posibilidad que ofrece VAPOR de movilidad absoluta en el dominio, girando, acercando, arrastrando, seleccionando regiones en las que representar, etc. También importante la opción de representar varias de estas figuras de forma simultánea o incluso modificando la opacidad de un objeto para permitir ver otros más allá. Todo esto convierte a VAPOR en una herramienta más que adecuada para el trabajo que estamos realizando.

El procedimiento seguido para la comprobación de las candidatas a estructuras ha sido el siguiente:

1. Selección de un instante temporal en el que la estructura esté formada y haya emergido. Para elegir un instante adecuado podemos basarnos en los mapas de contornos realizados con IDL. Para el resto de pasos será necesaria la utilización de VAPOR para visualizar los diferentes objetos.
2. Representación de un corte horizontal a altura $z = 0$ con mapa de color de u_z representando la superficie solar.

3. Representaciones de isosuperficies para $|B|$ en un valor en torno a 100 – 200G según el caso.
4. Acotación de la región donde se encuentra la estructura para que el resto de zonas magnéticas no interfieran en la visualización.

Llegados a este punto podemos descartar algunas candidatas. El tipo de estructura que buscamos debe ser de forma tubular, formando un arco que emerge en la superficie. Y es importante también su independencia: descartaremos arcos que se encuentren conectados con los grandes campos presentes en los intergránulos.

5. Representación de ciertas líneas de campo que pasen por el interior de la estructura tubular para comprobar que, efectivamente, se trata de un tubo de flujo magnético.
6. Visualización de la secuencia temporal completa para comprobar que la estructura es un arco formado en el interior y que emerge hasta alcanzar la fotosfera.

4. Visión general sobre el campo de velocidad y el campo magnético en la simulación pública de Bifrost

Antes de dedicarnos a la parte principal del trabajo, la detección de estructuras magnéticas, vamos a tener una breve toma de contacto con los datos de la BPS. Nos centraremos en analizar distintos aspectos del campo de velocidad y el campo magnético, que son las magnitudes esenciales en la búsqueda que vamos a realizar en los capítulos siguientes. Es por esto que analizar el comportamiento de dichas magnitudes nos puede ayudar a comprender mejor los resultados de este trabajo. Hay también otro propósito tras esta primera inspección de los datos y es la adquisición de conocimientos sobre magnetoconvección solar; así como familiarizarse con el tratamiento de datos presentes en ficheros *.fit*.

4.1. Mapas de velocidad y campo magnético

En este apartado mostraremos diferentes cortes horizontales de las componentes verticales de la velocidad y el campo magnético con el fin de inspeccionar el comportamiento de las mismas a lo largo del dominio de la simulación.

En la figura 6 se muestran las magnitudes a un nivel próximo a la superficie. Para la velocidad se observa cómo se reproduce de forma fiel el patrón de granulación de la superficie del Sol. Podemos comprobar cómo el ascenso del plasma tiene lugar en los gránulos mientras los intergránulos componen las zonas en las que se da el descenso del mismo. Como vemos, a esta altura las zonas intergranulares están completamente conectadas dando lugar a una definición clara de las celdas convectivas presentes en la superficie. En cuanto al campo magnético, se puede ver como éste se encuentra concentrado en lo que se corresponde con los intergránulos mostrando mayor intensidad incluso en los vértices de los mismos. Esta concentración del campo es fruto natural del proceso convectivo bajo la superficie y de la dominancia del plasma sobre el campo magnético en esta zona, que hace que las líneas de campo sean arrastradas por los movimientos del fluido. Se detectan dos zonas extensas de diferente polaridad cada una a cada lado del dominio, posiblemente fruto de la condición inicial impuesta en la simulación y explicada en la sección 1.2.2.

Si nos sumergimos en el interior solar hasta $z = -0,99$ Mm (figura 7), observamos una serie de cambios cualitativos respecto al nivel superficial. En el mapa de velocidad vemos cómo el patrón granular se ha desvirtuado: la mayoría del dominio correspondes a ascenso de material y los pasillos de descenso de plasma ya no están interconectados sino que el descenso está ligeramente más localizado. Se empiezan a distinguir tamaños mesogranulares en las celdas convectivas. Con respecto al campo magnético se distinguen concentraciones menos definidas que el caso superficial pero de igual manera localizadas en zonas de descenso de material.

Bajando hasta la tapa inferior del dominio $z = -2,44$ Mm (figura 8), podemos notar que se ha perdido por completo el patrón granular de la velocidad estando las zonas de descenso de material aún más concentradas que a alturas mayores. En el campo magnético notamos los claros rastros de la

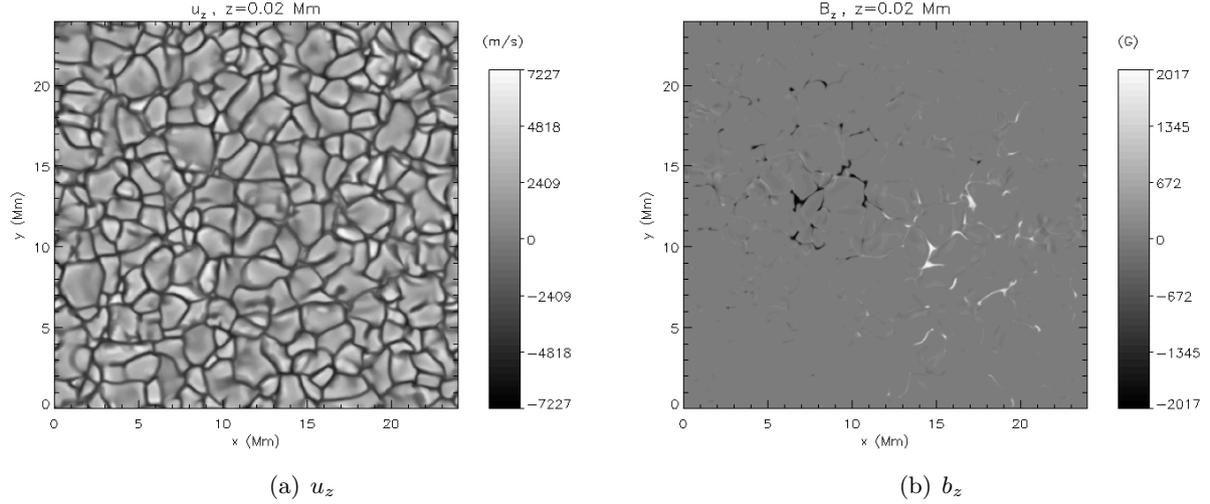


Figura 6: Mapas en escala de grises de la componente vertical de la velocidad y el campo magnético en $z = 0,02$ Mm.

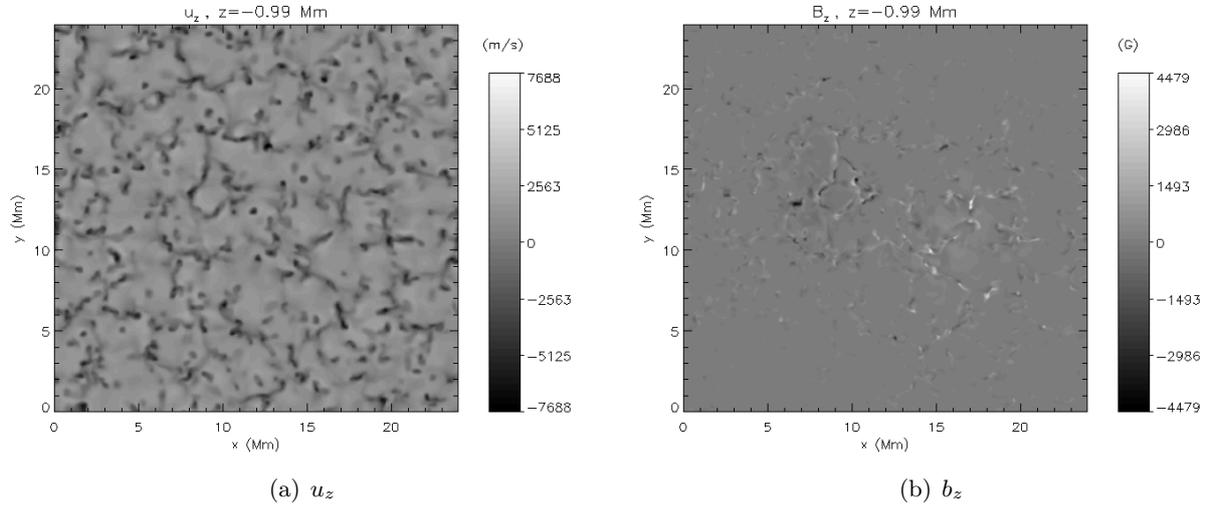


Figura 7: Mapas en escala de grises de la componente vertical de la velocidad y el campo magnético en $z = -0,99$ Mm.

condición de contorno impuesta en la simulación: dos grandes polaridades colocadas de forma simétrica y a distancia de los contornos laterales del dominio.

Hemos analizado la zona convectiva de la simulación; es procedente ahora analizar las características de nuestras magnitudes a diferentes alturas sobre la superficie. Ascendiendo hasta $z = 0,4$ Mm (figura 9), notamos que rápidamente se ha perdido el patrón granular de la velocidad y las concentraciones de campo que veíamos en la superficie comienzan a desligarse. Nos encontramos en una zona en la que el campo magnético es el dominante frente al plasma. Por otro lado, el movimiento granular ya se desdibuja, pues el movimiento convectivo no puede penetrar hasta esas alturas.

Un poco más arriba, a alturas coronales $z = 1,4$ Mm (figura 10), el campo magnético se distribuye en dos grandes polaridades centradas en el dominio. Ésto se corresponde con la distribución magnética que se quería estudiar en la simulación pública de Bifrost y que se ha logrado mediante la imposición de la condición inicial explicada en 1.2.2. El mapa de velocidades está claramente influenciado por la configuración de campo magnético; detectándose conexiones entre ambas polaridades debido a que ahora el plasma se desplaza a través de las líneas de campo que unen sendos polos.

Ascendiendo bastante respecto al corte anterior llegamos a $z = 4,4$ Mm (figura 11), donde se pueden detectar las dos polaridades del campo magnético claramente formadas y determinando la configuración del mapa de velocidades. A alturas coronales tan altas el campo magnético es dominante

frente al plasma como se puede observar en esta figura.

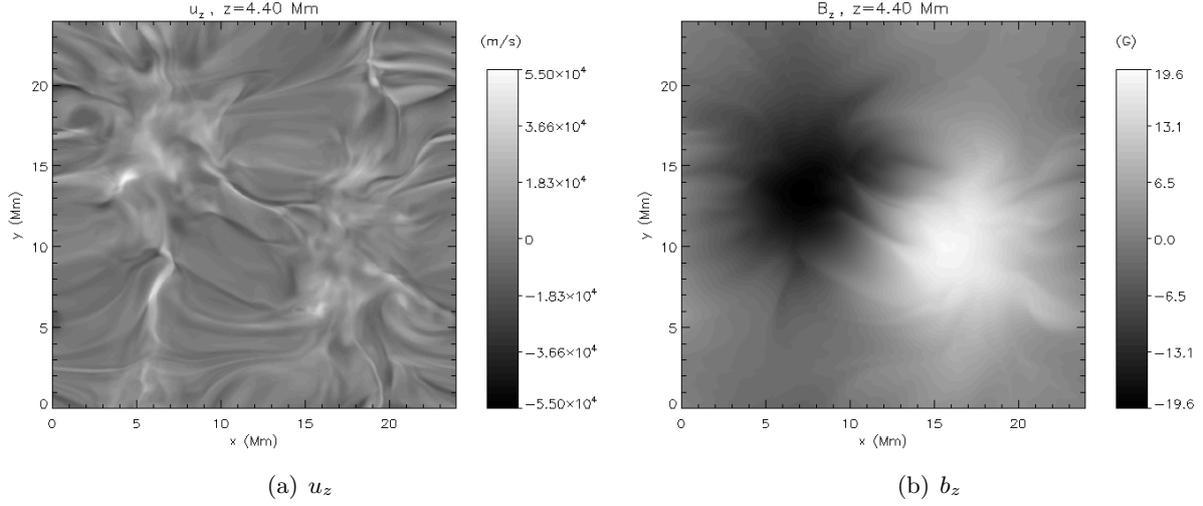


Figura 11: Mapas en escala de grises de la componente vertical de la velocidad y el campo magnético en $z = 4,4$ Mm.

4.2. Estadística

En esta parte analizaremos detalles estadísticos sobre la velocidad y el campo magnético los cuáles nos darán información sobre las características de ambas magnitudes a lo largo del dominio de la simulación. Utilizaremos magnitudes estadísticas como: promedio horizontal, raíz cuadrática media (RMS) o desviación estándar (SD).

4.2.1. Velocidad

En la figura 12 se muestran diferentes valores estadísticos para la velocidad en dos instantes temporales diferentes ($t = 4500$ s y $t = 5100$ s) y suficientemente distanciados. En rojo, la raíz cuadrática media en cada corte horizontal; en negro, el promedio horizontal del módulo; en verde, el promedio de la componente vertical; en azul claro, el promedio de módulo de la componente vertical y, en azul oscuro, la desviación estándar.

En las gráficas de la figura 12 se observa que todas las magnitudes estadísticas aumentan de valor a medida que se asciende en la zona convectiva (salvo $\langle u_z \rangle$ en el panel del instante $t = 5100$ s, que explicaremos a continuación). Como vemos los valores de u_{RMS} y $\langle |u| \rangle$ son muy similares salvo por una ligera diferencia debida a que u_{RMS} es más sensible a la intermitencia espacial de los datos. La diferencia de valor entre $\langle |u_z| \rangle$ y $\langle u_z \rangle$ muestra, como es natural, que no toda la velocidad vertical es positiva sino que también hay plasma descendiendo. Un detalle relevante es el valor negativo que toma $\langle u_z \rangle$ en $t = 5100$ s frente al valor positivo que toma en $t = 4500$ s. Ésto es una primera evidencia de las oscilaciones solares presentes en nuestro dominio: el primer instante muestra un momento en que la oscilación solar estaba en su fase de velocidad positiva por tanto todo el fluido se ve desplazado hacia arriba. En cambio, el segundo instante muestra una fase de velocidad negativa en la oscilación por tanto hay un movimiento global del fluido hacia abajo.

Con el fin de estudiar la isotropía del campo de velocidades hemos representado en la figura 13 valores de la raíz cuadrática media para cada componente de la velocidad (x en azul claro, y en verde y z en azul oscuro) junto con u_{RMS} en negro y $\langle u \rangle$ en rojo. También se ha añadido en línea punteada el valor que deberían tener las RMS de cada componente de la velocidad si nos encontrásemos en un campo isótropo. Aquí se ve claramente como se cumple isotropía horizontal siendo las gráficas de RMS para u_x y u_y prácticamente iguales. Sin embargo, están por debajo del valor que tendrían en caso de isotropía tridimensional. En la zona convectiva, el valor para la componente z es claramente superior, lo que indica una mayor tendencia del plasma a ascender o descender frente a desplazamientos horizontales.

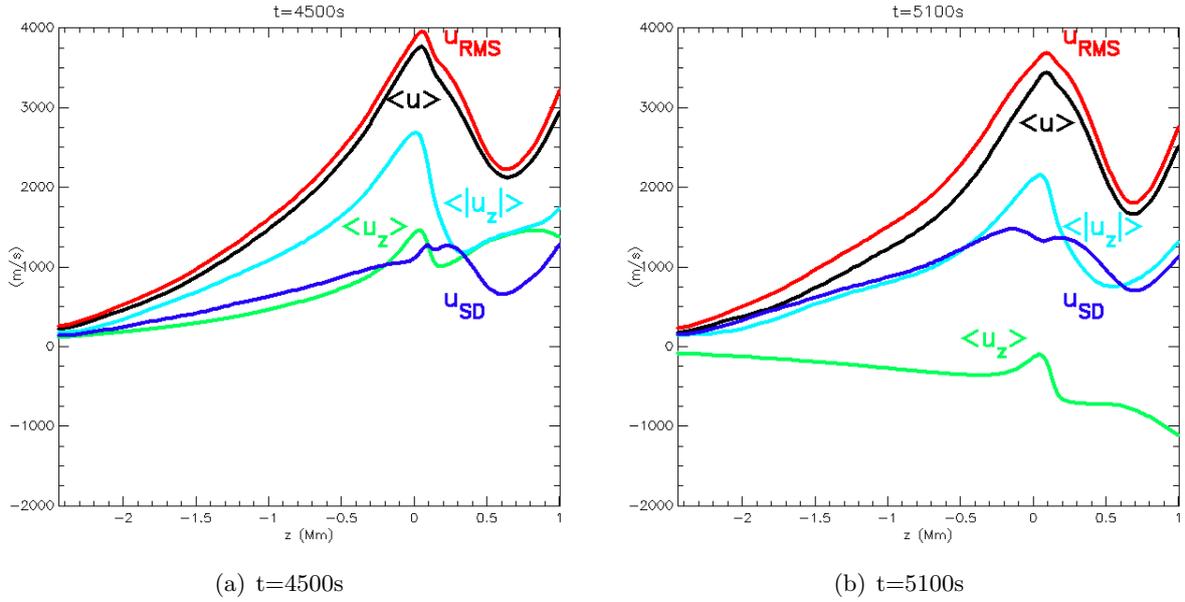


Figura 12: Representación del promedio horizontal del módulo de la velocidad (negro), promedio horizontal de la componente vertical de la velocidad (verde), promedio horizontal del valor absoluto de la componente vertical de la velocidad (azul claro), raíz cuadrática media de la velocidad (rojo) y desviación estándar (azul oscuro), para dos instantes de tiempo diferentes y suficientemente espaciados.

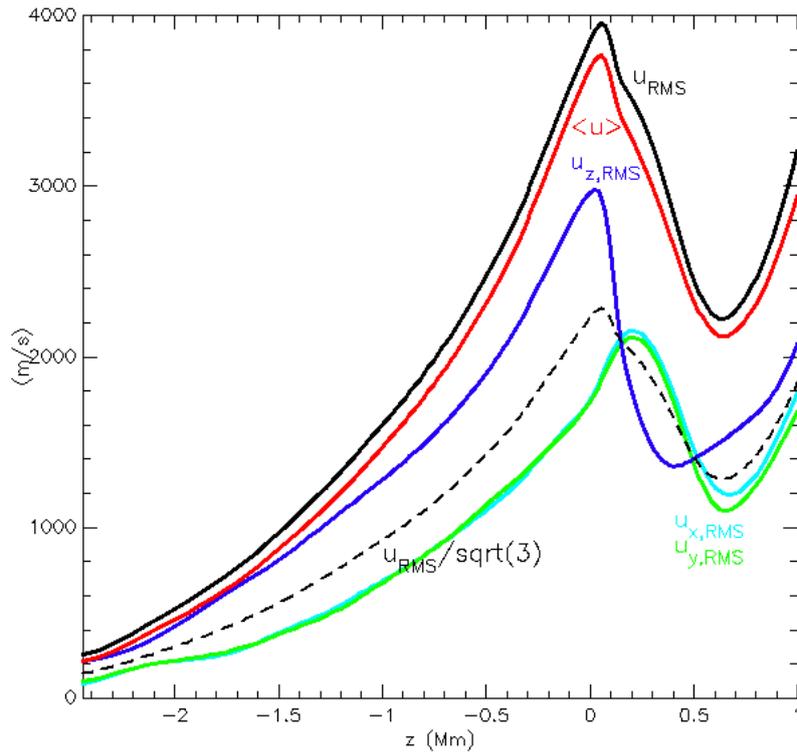


Figura 13: Representación de la RMS de la velocidad, junto con el promedio de la velocidad y la RMS de cada una de las componentes. En línea punteada representamos el valor que tendrían las RMS de las componentes en caso de velocidad isotrópica. Se ha seleccionado un instante temporal cualquiera, en este caso $t = 4500$ s.

4.2.2. Campo magnético

En la figura 14 se muestran diferentes valores estadísticos para el campo magnético en los dos instantes temporales ya usados para la velocidad. En rojo, la raíz cuadrática media; en negro, el promedio horizontal del módulo; en verde, el promedio de la componente vertical; en azul claro, el

promedio de módulo de la componente vertical y, en azul oscuro, la desviación estándar.

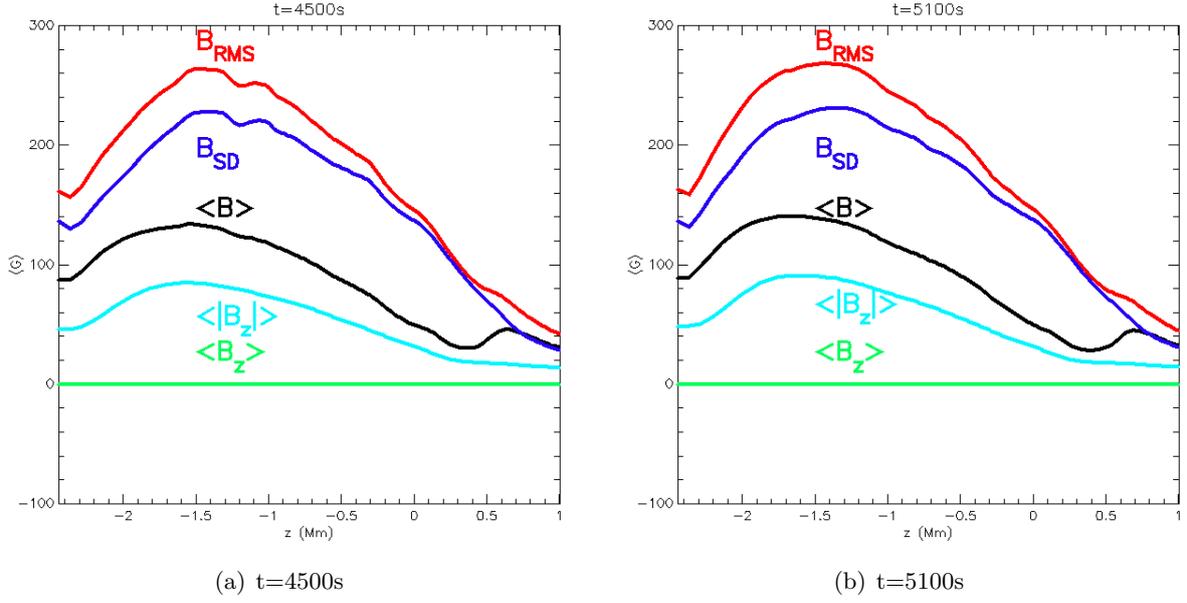


Figura 14: Representación del promedio horizontal del módulo del campo magnético (negro), promedio horizontal de la componente vertical del campo magnético (verde), promedio horizontal del valor absoluto de la componente vertical del campo magnético (azul claro), raíz cuadrática media del campo magnético (rojo) y desviación estándar (azul oscuro), para dos instantes de tiempo diferentes y suficientemente espaciados.

En esta ocasión, y a diferencia del caso de la velocidad, vemos cómo el $\langle |B| \rangle$ y B_{RMS} difieren en un factor 2, lo que está relacionado con la gran intermitencia espacial del campo. El valor tan elevado de la desviación estándar también corrobora este hecho. Ésto es debido a que, como efecto de la convección, las líneas de campo son comprimidas en regiones de bajada de flujo que están muy localizadas en la zona convectiva.

Si nos fijamos en el promedio de la componente vertical vemos su valor constante a cero, hecho esperado ya que la condición inicial de campo se impuso con flujo nulo y la ecuación de inducción muestra la imposibilidad de la creación de flujo neto vertical dentro de nuestro dominio, teniendo en cuenta, además, que las condiciones de contorno periódicas de la cajan hacen que el flujo que se pierde por un lado se recupere por el opuesto.

En los diferentes instantes temporales se ha observado un ligero aumento de todos los promedios a medida que se avanza en el tiempo. Se puede observar parte de este ligero aumento en las dos imágenes de la figura 14. Esto podría deberse a que el estado de la simulación no es del todo estacionario al menos en cuanto al campo magnético. Aún así, el aumento es mínimo: un crecimiento del 12,8 % entre el máximo del promedio horizontal del campo magnético en el instante inicial y el instante final de la BPS.

En la figura 15 mostramos valores de la raíz cuadrática media para cada componente del campo (x en azul claro, y en verde y z en azul oscuro) junto con B_{RMS} en negro y $\langle B \rangle$ en rojo. También se ha añadido en línea punteada el valor que deberían tener las RMS de cada componente del campo si nos encontrásemos en un campo isótropo. Al igual que en el caso de la velocidad, se observa la mayor relevancia de la componente vertical del campo frente a las componentes horizontales. En éstas últimas, vemos que no hay exactamente isotropía horizontal y es que hemos visto en los mapas de campo que existen dos grandes polaridades en los lados izquierdo y derecho del dominio impuestas por la condición inicial. Al estar distribuidas a lo largo del eje x existirá una mayor cantidad de líneas de campo que vayan de un polo a otro lo que podría ser la causa de esta ligera anisotropía. Habría que ver si la diferencia de campo entre los polos, del orden de 1000 G, produce un efecto tan pequeño como el que vemos: 10-30 G.

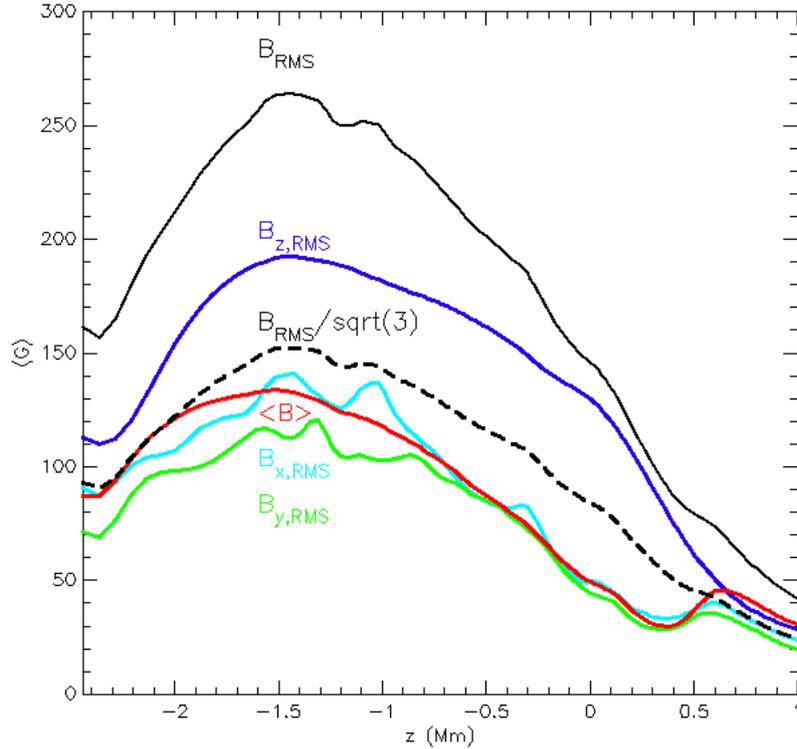


Figura 15: Representación de la RMS del campo magnético, junto con el promedio del campo y la RMS de cada una de las componentes. En línea punteada representamos el valor que tendrían las RMS de las componentes en un campo isótropo. Se ha seleccionado un instante temporal cualquiera, en este caso $t = 4000$ s.

5. Resultados: Estructuras magnéticas subgranulares emergentes

Tras el análisis y caracterización de los datos en el apartado anterior, pasamos a abordar el tema principal de nuestro trabajo, la localización de estructuras magnéticas. El proceso se ha llevado a cabo y se presenta en dos partes: una primera parte en que se realiza una primera inspección de la superficie mediante isocontornos de campo magnético sobre mapas de color de velocidad vertical con la que se realizará selección de posibles candidatas a las estructuras buscadas. Y una segunda parte en la que se comprueba, mediante visualización en 3D, la naturaleza de arco magnético emergente de las candidatas seleccionadas. Se requiere de ambos procesos para la localización óptima de estas estructuras ya que el rastreo de isocontornos no es concluyente al tratarse solo de un corte horizontal de la estructura.

5.1. Primera inspección del dominio

5.1.1. Criterios para la identificación

Hemos realizado un rastreo del dominio de la simulación con el fin de localizar candidatas estructuras magnéticas subgranulares emergentes. Lo que buscamos son pequeñas estructuras subgranulares que emergen en el propio gránulo y son arrastradas hacia el intergránulo. Siguiendo las pautas aportadas por el trabajo de Moreno-Insertis et al. (2017) y a la vista de los resultados observacionales, la emergencia se debe producir siguiendo las siguientes fases: primero se detectará la aparición de una zona de componente horizontal del campo magnético, a continuación aparecerán en los extremos de la misma componentes verticales de campo magnético con polaridad opuesta, finalmente esta estructura irá siendo arrastrada hacia el intergránulo y perdiendo intensidad hasta desaparecer.

Para realizar la búsqueda de estas estructuras, tal y como describimos en la sección 3.2, hemos seleccionado mapas de velocidad vertical a altura $z = 0$, nivel de superficie, donde se observa claramente la granulación. En dichos mapas se han superpuesto isocontornos para el campo magnético horizontal y vertical. También, al tener un dominio mucho mayor al tamaño subgranular de las estructuras, hemos

dividido el dominio en 25 subdominios y analizado cada uno de ellos en toda su secuencia temporal buscando el tipo de emergencia descrita.

5.1.2. Catálogo de candidatas

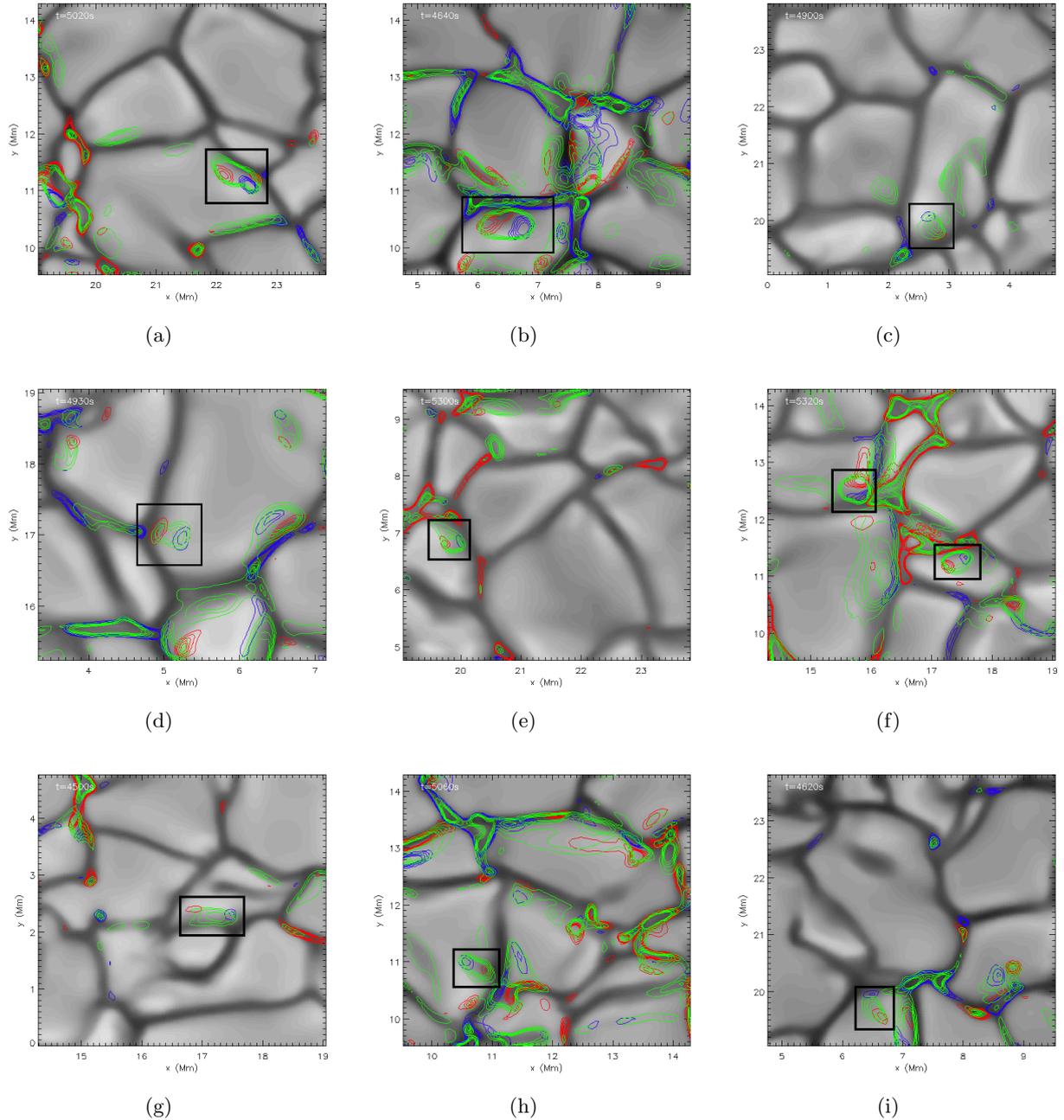


Figura 16: Catálogo de algunas de las estructuras magnéticas seleccionadas tras una inspección de isocontornos de campo magnético a altura $z = 0\text{Mm}$.

Mediante la utilización del paquete IDL hemos detectado al menos 26 estructuras que cumplen los requisitos impuestos. En la figura 16 se ha representado mapas de color para la velocidad vertical y diferentes isocontornos: en verde, campo horizontal; en rojo, campo vertical hacia arriba; en azul, campo vertical hacia abajo. Los isocontornos corresponden a intensidades de campo de 100-150-200-250-300 G. Se muestran nueve de las candidatas localizadas en un instante representativo en que la estructura bipolar se distingue con claridad. Observamos que suelen aparecer dentro del gránulo pero no lejos del intergránulo; esto ha sido una característica común en todas. Algunas de ellas aparecen con la línea que une sus polos más o menos perpendicular al intergránulo (figuras 16.c,e,f,h,i) y otras,

en cambio, alineadas más bien en dirección paralela al mismo (figuras 16.a,b,d,f,g). También se observa que aparecen en gránulos de diferentes tamaños y que el hecho de que haya campo magnético fuerte cerca no es un factor importante ya que emergen en regiones tanto cercanas a alto campo (ej. 16.f) como regiones con campo muy bajo (ej. 16.g).

5.1.3. Análisis detallado

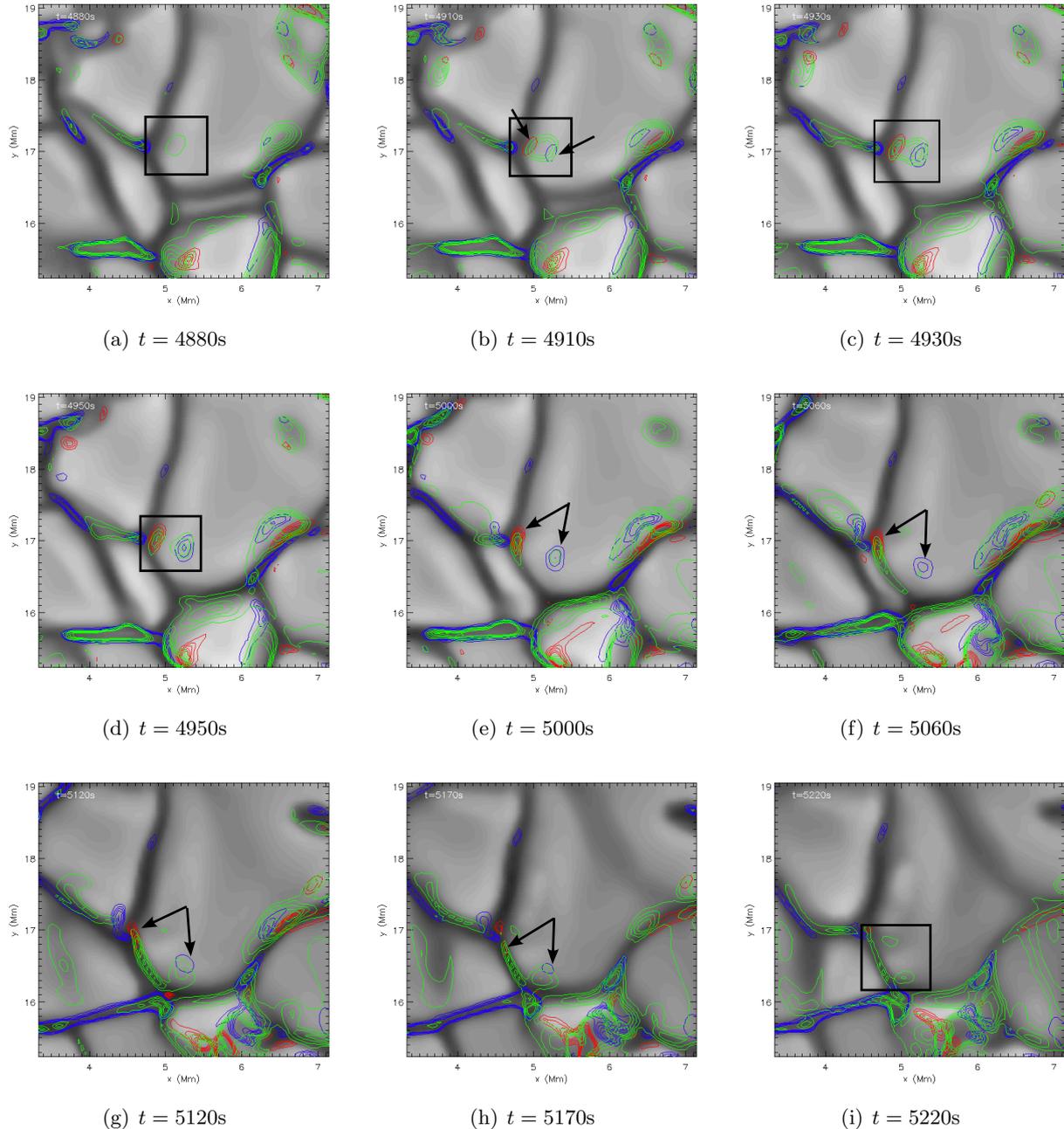


Figura 17: Primer ejemplo de aparición de estructura magnética. Secuencia temporal del caso mostrado en la figura 16.d.

Una vez vista la gran afluencia de este tipo de estructuras en la BPS, observaremos en detalle la evolución de lo que, *a priori*, parecen dos ejemplos claros de emergencia de tubo magnético. El primer caso corresponde a la estructura mostrada en la figura 16.d, y el segundo corresponderá a la estructura que encontramos en 16.g. Se han seleccionado estos casos ya que cumplen paso por paso los requisitos buscados, de forma clara y evidente, sin que ninguna otra concentración de campo interfiera en la visualización.

En la figura 17, mostramos los instantes temporales de la aparición y evolución del primer ejemplo

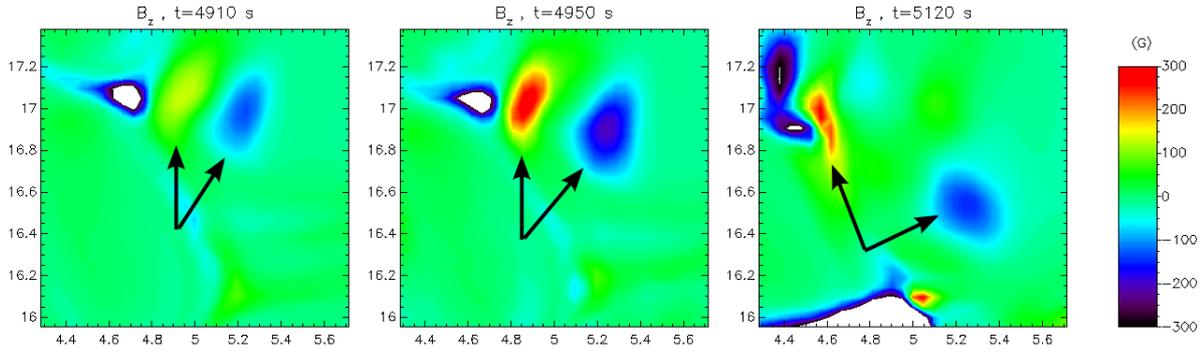


Figura 18: Mapa de color de campo magnético vertical para instantes concretos de la evolución de la estructura mostrada en la figura 17.b,d,g. En blanco zonas externas a nuestra estructura emergente. Están saturadas debido a su mucha mayor intensidad de campo.

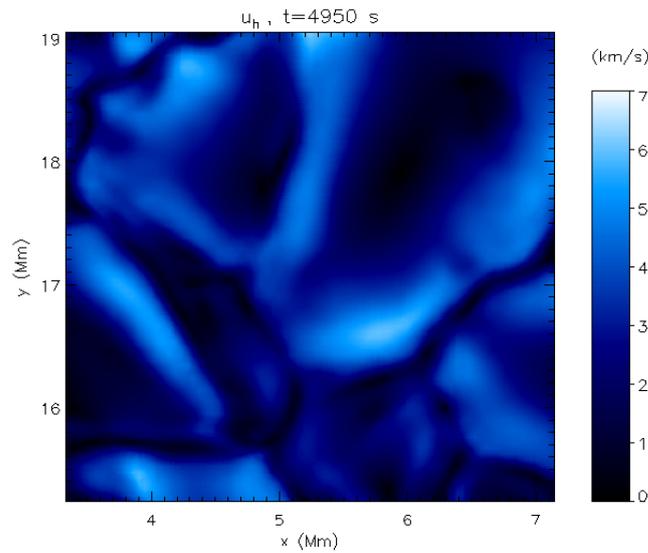


Figura 19: Mapa de color de módulo de velocidad horizontal del plasma en la zona de aparición de la estructura mostrada en la figura 17.

seleccionado. En (a) se observa la primera aparición de componente horizontal del campo magnético, que ocurre en una zona interior al gránulo pero cercana al intergránulo. En (b) se ve cómo empieza a surgir el dipolo de campo magnético vertical. Lo hace de forma perpendicular al pasillo intergranular más próximo y sigue existiendo una zona de campo magnético horizontal entre los polos. Vemos una versión más evolucionada en (c); donde se aprecia que ha aumentado la intensidad de la estructura. En este proceso no ha cambiado de posición, se mantiene prácticamente en el mismo lugar donde comenzó a aparecer. En (d) los polos han alcanzado su intensidad máxima, por encima de 200 G (ver figura 18); la componente horizontal ha desaparecido de la zona intermedia a los polos. Una vez la estructura ha aparecido, comienza el proceso de arrastre y pérdida de intensidad. En (e) se ve cómo los polos han sido arrastrados hacia la zona intergranular y han visto disminuida su intensidad por debajo de 200 G. En (g) y (h) se muestra el proceso de arrastre: los polos van perdiendo cada vez más intensidad y se acercan cada vez más al integránulo. En (i) la estructura ha desaparecido totalmente de nuestra representación.

Entre la primera aparición de campo horizontal y la aparición total ha pasado poco más de un minuto: es un proceso rápido en comparación al tiempo de vida media de un gránulo. El movimiento que realiza entre (d) y (h) el polo negativo se puede ver que es de unos 0,4 Mm en unos 170 s. Es decir, lo que parece ser el pie de un arco magnético se mueve a una velocidad ligeramente superior a 2 km/s que, cómo vemos en la figura 19, es del orden de la velocidad horizontal del plasma en esa zona. Esto es satisfactorio ya que esperamos que el plasma sea quién arrastra a la estructura magnética. Desde

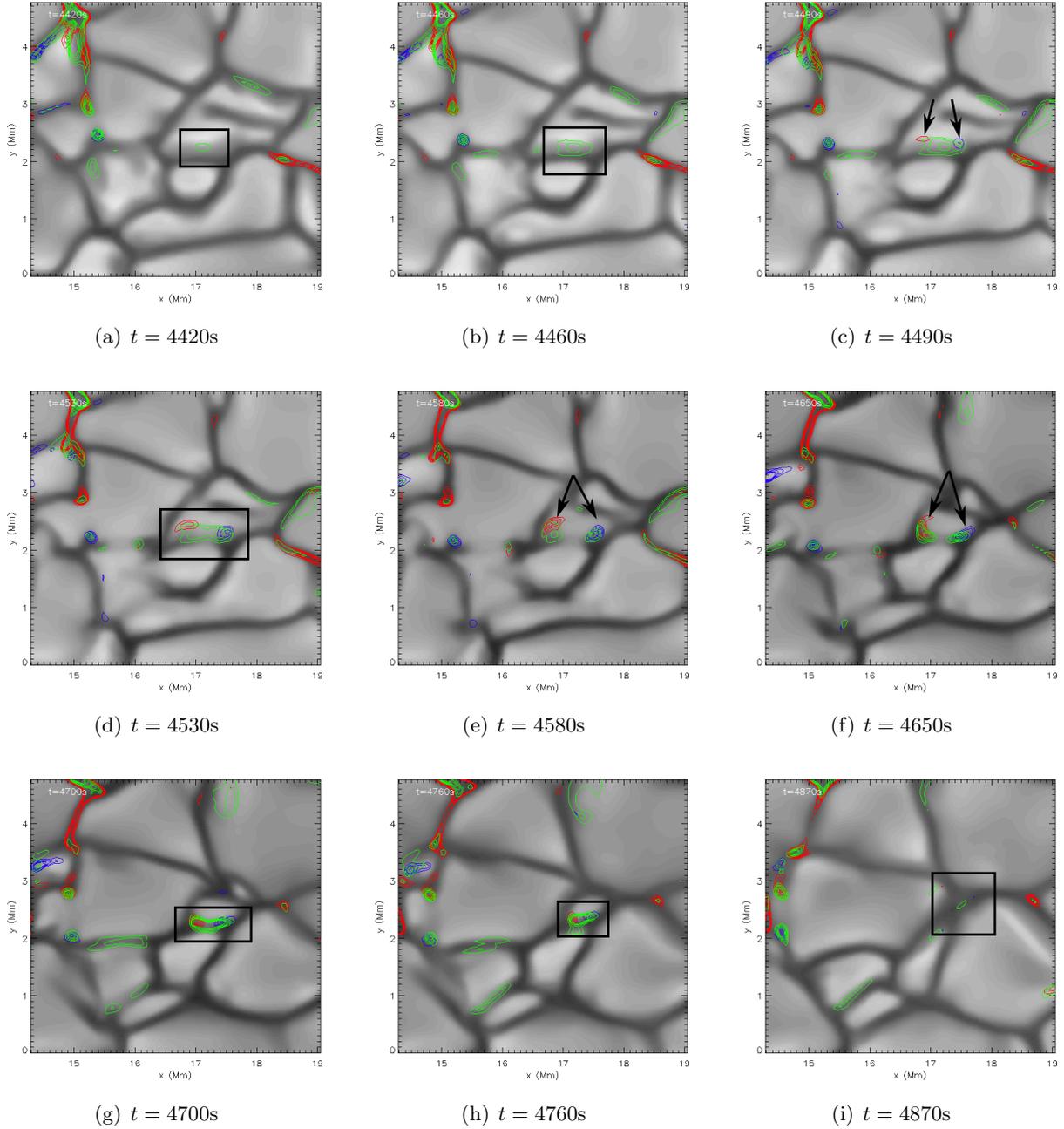


Figura 20: Segundo ejemplo de aparición de estructura magnética. Secuencia temporal del caso mostrado en la figura 16.g.

la aparición hasta la desaparición total de la estructura han pasado algo más de 5 minutos: la vida de estos objetos es muy corta si la comparamos con la vida media de un gránulo. Obviamente, el tiempo empleado en arrastre de la estructura al intergránulo dependerá de la distancia al intergránulo de la estructura magnética.

La siguiente estructura que veremos en detalle será la ya mostrada en la figura 16.g y cuya evolución temporal se muestra en la figura 20 mediante mapas de color horizontales con IDL. Este caso, a diferencia del primer ejemplo, se da en un gránulo pequeño y la desaparición de la estructura viene acompañada de la desaparición del gránulo. Sin embargo, las fases evolutivas son cualitativamente iguales. Observamos la aparición de la misma forma que el primer ejemplo (subfiguras a,b,c): primero surge una zona con componente horizontal del campo magnético para después aparecer dos polos de campo vertical. En (d) la estructura ha aparecido completamente alcanzando valores de intensidad de 300 G, como podemos ver en la figura 21. A partir de ahí notamos cómo se produce de forma brusca un arrastre de los polos mientras el gránulo va encogiéndose. En (h) la estructura ha visto reducida su

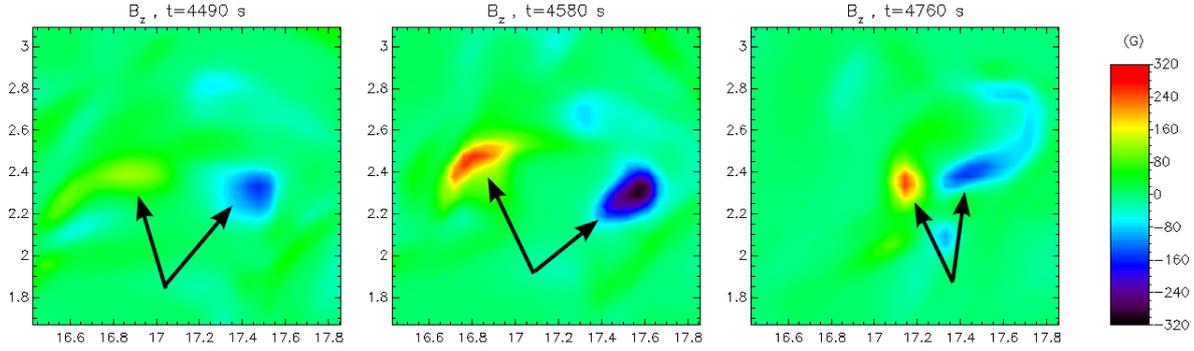


Figura 21: Mapa de color de campo magnético vertical para instantes concretos de la evolución de la estructura mostrada en la figura 20.c,e,h.

extensión debido a la pérdida de espacio por la desaparición del gránulo. En (i) ambos han desaparecido. La aparición ha durado un poco más que en el caso anterior, poco más de 2 minutos y medio; el hecho de que el gránulo sea pequeño y esté desapareciendo hace que el movimiento de material hacia arriba sea menor de lo normal y, por tanto, en el caso de que se trate de una emergencia, esta estructura no podrá emerger tan deprisa. Una vez alcanzada su máxima intensidad, se han invertido unos 5 minutos en el proceso de arrastre y desaparición. De nuevo la desaparición de la estructura ha sido más lenta que su aparición.

A pesar de que los isocontornos mostrados en esta sección sean relativos a componentes del campo magnético sobre planos horizontales y, en cambio, los isocontornos de las figuras observacionales (ver sección 1.1.1) o en los resultados teóricos de Moreno-Insertis et al. (2017) (ver figura 2) sean relativos a parámetros de Stokes, hacen referencia de la misma manera a campo horizontal y vertical positivo y negativo. Las estructuras mostradas en este apartado recogen una serie de similitudes con las estructuras mostradas en los apartados citados: las pautas seguidas durante la aparición, el tiempo invertido en la misma y la evolución de la estructura. Todas estas características son comunes al tipo de estructuras magnéticas encontradas en este trabajo para la BPS.

5.2. Visualización 3D con VAPOR

La representación de secuencias temporales con isocontornos es útil para la selección de candidatas iniciales. Es un proceso relativamente rápido y que permite obtener gran cantidad de estructuras de forma sencilla una vez implementado. Sin embargo no es definitivo: la representación de contornos se realiza en un plano horizontal ($z = 0$), el cuál no nos da información suficiente para afirmar que nuestro objeto tridimensional se trata de un arco. Aunque los isocontornos se representasen sobre la superficie corrugada $\tau_{500} = 1$ (lo que se acercaría a lo observado en algunas líneas espectrales o en luz blanca) no tendríamos tampoco información suficiente para describir la forma tridimensional de la estructura. Se precisa de un análisis de objeto magnético a diferentes alturas para determinar su forma y características. La manera más rápida y efectiva es mediante visualización en 3D del objeto que se realizará a través del software VAPOR.

5.2.1. Análisis 3D de estructuras megnéticas

Las candidatas iniciales han sido visualizadas con VAPOR con el fin de verificar si se trataba de un tubo magnético como los que buscamos. La criba ha dado como resultado varias de las candidatas como no válidas, o bien porque pertenecen a una estructura mayor, o bien porque no son realmente un tubo magnético, o porque su evolución no se corresponde exactamente con lo buscado. Recordamos que buscamos estructuras con forma de tubo, arcos magnéticos, que emerjan en el gránulo y sean arrastrados hacia el intergránulo donde desaparecerán.

Tras el descarte de algunas candidatas se observaron en torno a 11 estructuras tubulares emergentes con los requisitos necesarios. De estas hemos elegido dos a mostrar en este trabajo. La primera es un caso canónico donde se observa la emergencia de un tubo de forma clara y ejemplar. Para la

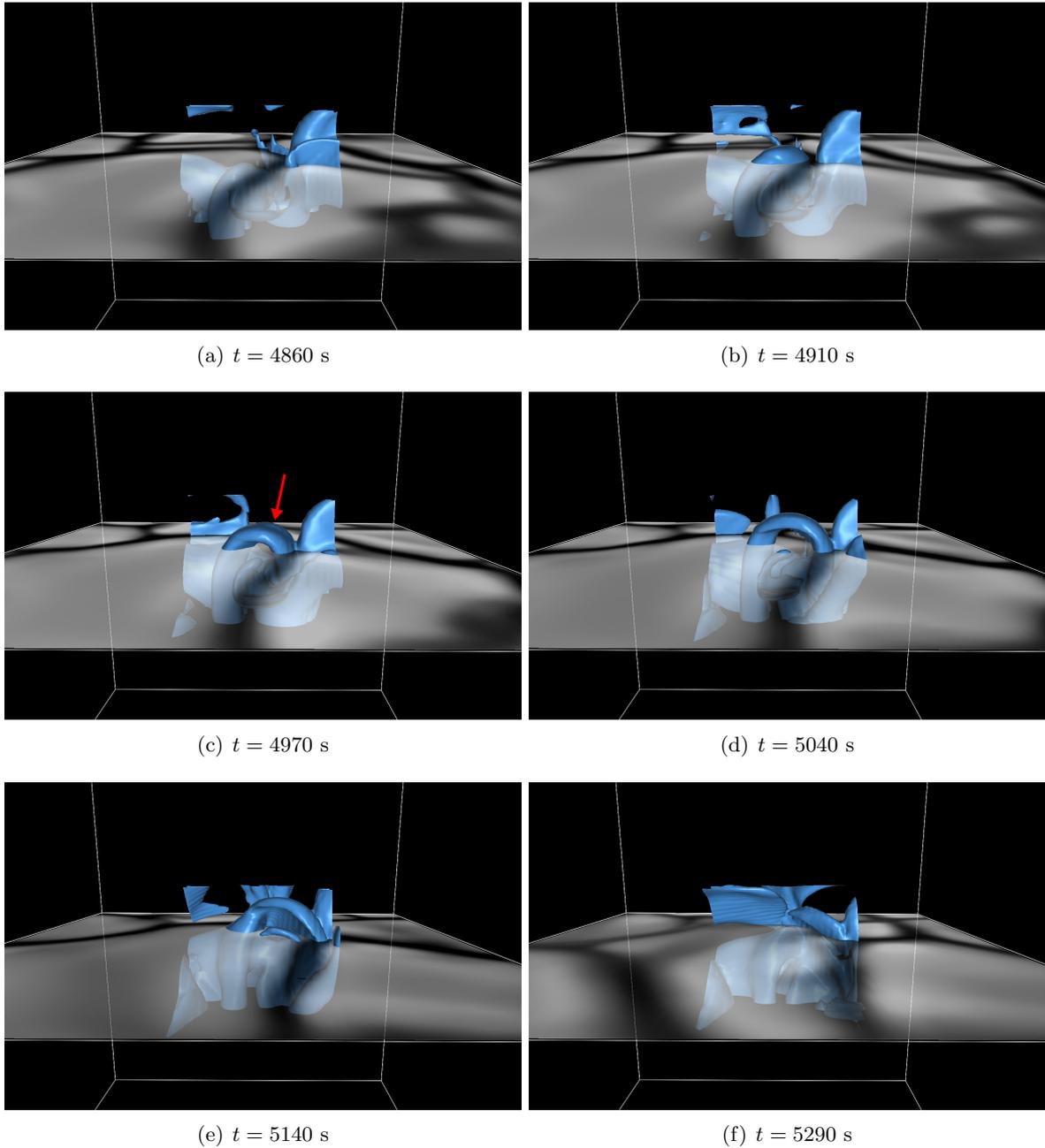


Figura 22: Representación tridimensional de la secuencia temporal de la estructura magnética mostrada en la figura 17. En azul, isosuperficies de intensidad campo magnético a 150G y, en escala de grises semitranslúcida, mapa de velocidades verticales en el plano $z = 0\text{Mm}$. Algunos de estos snapshots han sido incluidos en la letter de Moreno-Insertis et al. (2018)

segunda estructura hemos querido seleccionar un caso especial en el que una estructura emergente se ve sorprendida por la formación de un intergránulo bajo ella lo que la hace plegarse produciendo la emergencia de un doble arco. La primera estructura que mostraremos es ya conocida por el lector ya que se corresponde con la mostrada en la figura 17.

Para analizarlas visualmente de forma correcta hemos seguido los pasos y recursos descritos en la sección 3.2. Hemos utilizado la opción *iso* para el módulo del campo fijando un valor de unos 150 G. Esto nos permite ver las formas de las estructuras magnéticas presentes en el dominio. También la opción *probe* para configurar y representar la capa superficial en campo de velocidades vertical para poder ver la granulación y distinguir entre la parte de la estructura que ya ha emergido de la que no. Para instantes temporales en que la estructura ha emergido y su forma está claramente definida hemos usado la función *flow* seleccionando una serie de semillas dentro del arco que conforma nuestra estructura. Esto nos permite ver si las líneas de campo atraviesan el tubo dando lugar a un flujo

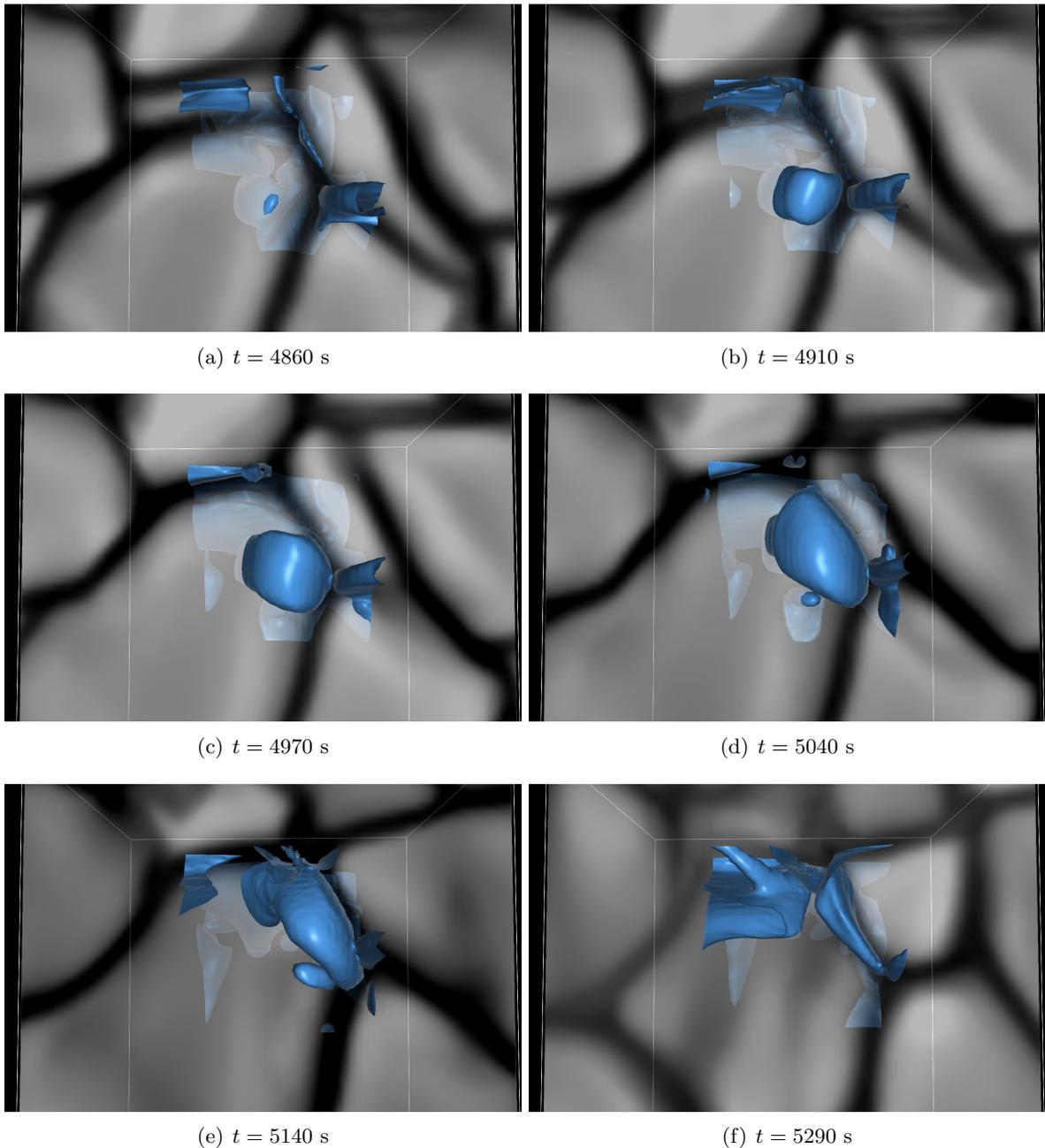


Figura 23: Visión superior de la evolución temporal mostrada en la figura 22.

magnético a lo largo del mismo.

Como análisis extra se han representado cortes verticales del módulo del campo que seccionen el tubo magnético y nos permitan ver si en realidad el tubo es una estructura concentrada e independiente de su entorno. Eventualmente se han colocado cortes horizontales a diferentes alturas para comprobar algunas características como hasta qué altura ascienden los tubos magnéticos sobre la superficie o, en qué altura bajo la misma se forman.

Primera estructura:

Comenzamos con la muestra de los resultados para la primera estructura. En la figura 22 se ha representado una secuencia temporal para una isosuperficie de 150 G de intensidad de campo magnético junto con el plano superficial de velocidad vertical en $z = 0$. En (a) la emergencia aún no ha tenido lugar. Se observa una concentración magnética subsuperficial que está en proceso de ascenso. Más adelante observaremos el proceso de ascensión detenidamente. El comienzo de la emergencia

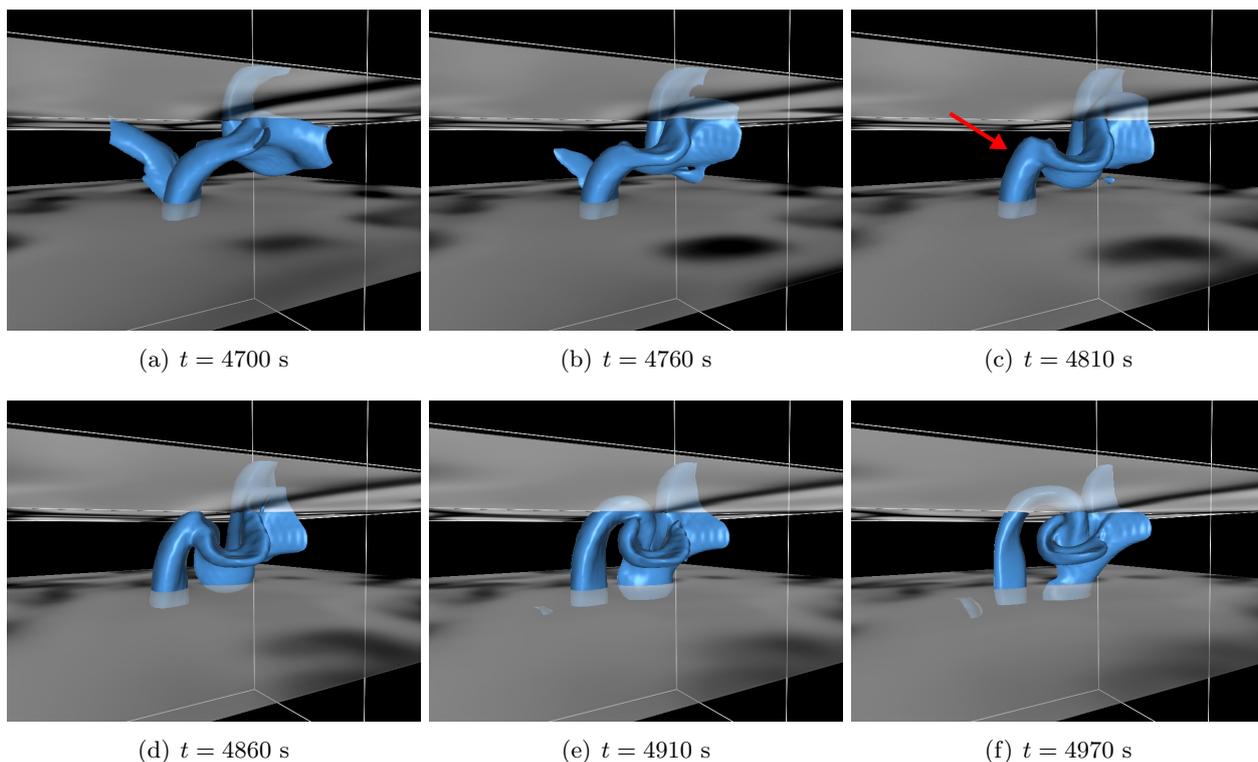
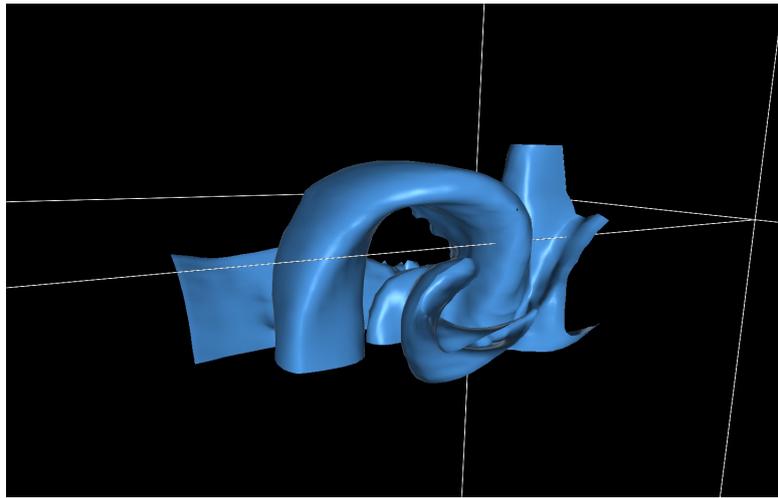


Figura 24: Secuencia temporal de la evolución de la estructura magnética mostrada en la figura 22 en niveles por debajo de la superficie instantes antes de su emergencia.

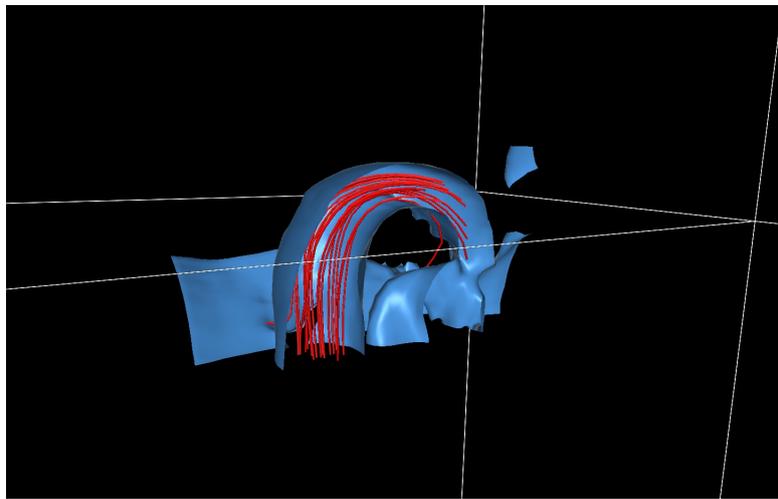
tiene lugar en (b) y se ve cómo la concentración de campo del paso anterior ha seguido ascendiendo alcanzando alturas fotosféricas. Ya se intuye cierta forma tubular pero no es hasta (c) cuando se observa claramente el tubo magnético que aún no ha alcanzado su máxima altura. En (d) el tubo es evidente y la estructura ha conseguido ascender hasta unos 300 km sobre la superficie solar, que ha sido el orden típico en otras estructuras observadas. En el paso (e) el arrastre hacia el intergranulo es evidente y el tubo magnético empieza a ser plegado, comenzando su proceso de desaparición. En el paso (f) la estructura es totalmente engullida por el intergranulo y mimetizada con las estructuras magnéticas intergranulares, completando así las fases evolutivas del tubo magnético emergente. La documentación de la emergencia de esta estructura ha sido incluida como parte de los resultados de la letter mencionada en el apartado 1.1.3: Moreno-Insertis et al. (2018).

En la figura 22 se observa de manera clara las distintas fases de la evolución temporal de estas estructuras; sin embargo, no está tan claro si la ascensión se produce en el interior del granulo ya que el ángulo de visualización no nos permite distinguir bien este hecho. Es por eso que mostramos también la representación evolutiva desde un ángulo superior en la figura 23. En los pasos (a) y (b), vemos que la emergencia se está produciendo en el interior del granulo aunque muy cerca del intergranulo. En (d) parte del arco ya emergido está siendo arrastrado hacia el intergranulo y, como en la figura 22, los pasos (e) y (d) muestran la estructura que ha sido llevada hacia el intergranulo y plegada hacia el interior.

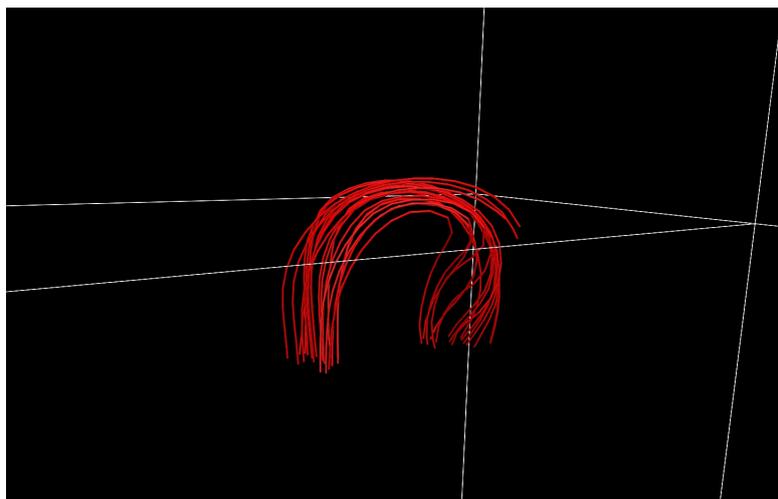
Como parte del estudio del proceso evolutivo de la estructura hasta ahora nos hemos centrado en las fases posteriores a su emergencia, pero también es interesante conocer cómo llegan hasta ese punto este tipo de estructuras. En la figura 24 mostramos algunos instantes temporales de este proceso. Además de en $z = 0$, aquí hemos incluido una superficie horizontal de velocidad vertical a 600 km por debajo de la superficie para acotar la profundidad a la que el arco se forma. Podemos ver en esta figura la presencia de un tubo magnético en (a), que de repente empieza a curvarse en (b). La curva que se produce en el tubo se vuelve más pronunciada en (c), para ser finalmente lanzada hacia arriba como vemos en el resto de pasos de la evolución temporal. Cada paso está separado del anterior por 50 segundos lo que hace que el proceso de emergencia (de (a) hasta (e)) dure aproximadamente 3 minutos y medio. Esta duración es del orden de los tiempos de emergencia total y arrastre comentados con



(a)



(b)



(c)

Figura 25: Visualización de las líneas de campo magnético en el interior de la estructura magnética mostrada en 22.

anterioridad.

La forma tubular con la representación de isosuperficies es evidente y, sin embargo no nos da certeza de que la estructura sea un tubo magnético formado por líneas de campo a lo largo del mismo. Es por eso que se han representado en la figura 25 líneas de campo a partir de una serie de semillas

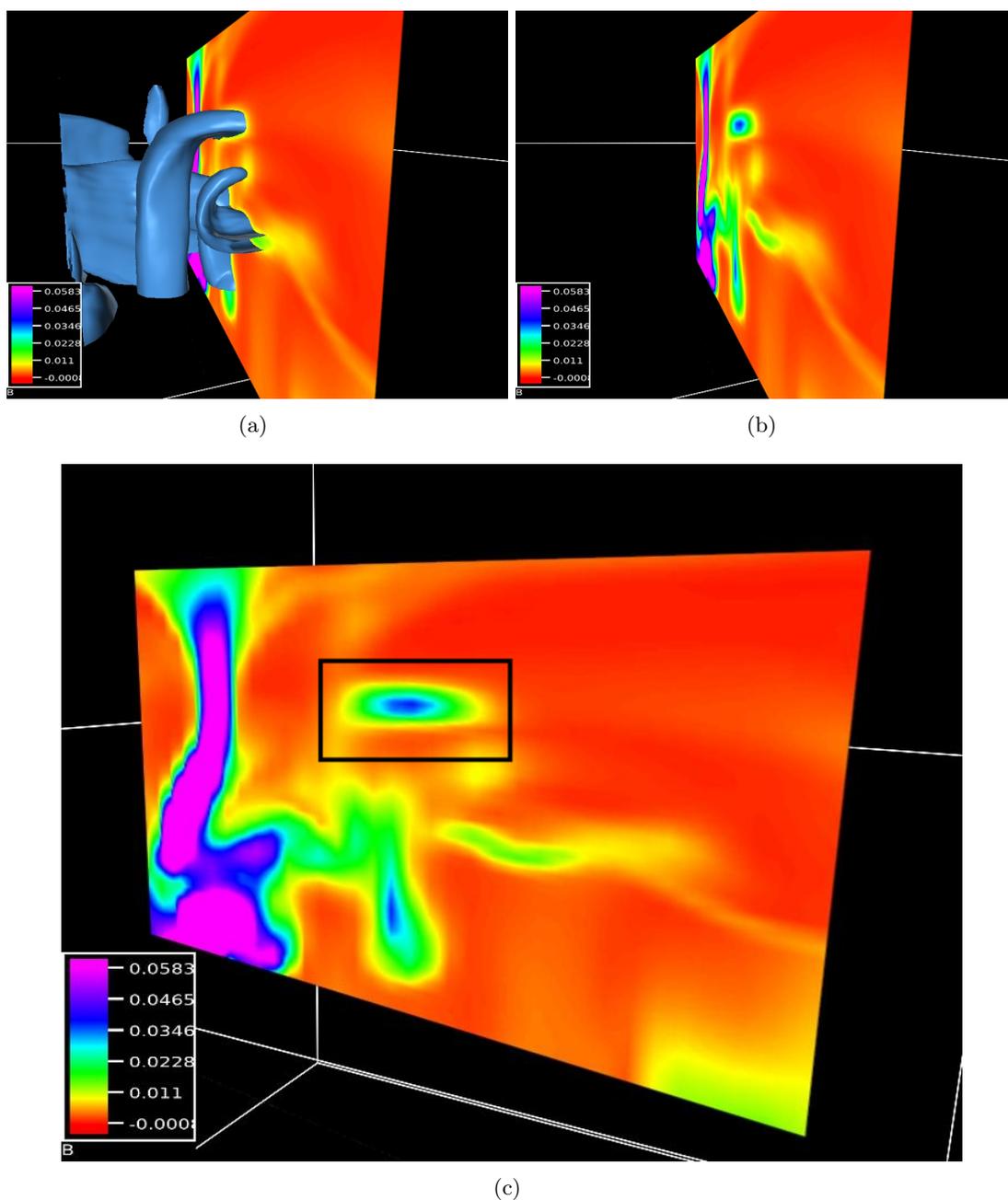


Figura 26: Mapa de intensidad de campo magnético en un corte vertical sobre la estructura magnética mostrada en 22.

colocadas dentro del tubo en un estado ya evolucionado. Podemos ver cómo las líneas recorren la totalidad del tubo indicando claramente que se trata de un tubo magnético en el sentido clásico y elemental del término. En (a) se ha representado la isosuperficie como referencia para las siguientes imágenes. En (b) se ha realizado un corte y hemos representado sólo la mitad del tubo con la idea de que se pueda ver el interior. Se ve cómo las líneas presentes en el interior recorren el tubo de un extremo a otro. Finalmente en (c), hemos eliminado la isosuperficie dejando sólo las líneas y se reproduce perfectamente la forma del tubo magnético. Éste es un fenómeno ya observado también en las estructuras detectadas en el trabajo de Moreno-Insertis et al. (2017) como vemos en la figura 4.

El hecho de que la isosuperficie a un valor determinado tenga forma tubular no nos indica que esta estructura sea concentrada e independiente, podría ser que más allá de la isosuperficie el valor del campo descienda lentamente haciendo que no se pueda distinguir cierta estructura como aislada. Es por eso que en la figura 26 hemos representado un corte vertical del campo magnético para comprobar este hecho. Se ha comprobado que, mientras el campo magnético dentro del tubo es próximo a los 400 G, el campo en el entorno del tubo no supera los 10 G; lo que señala nuestra estructura como un

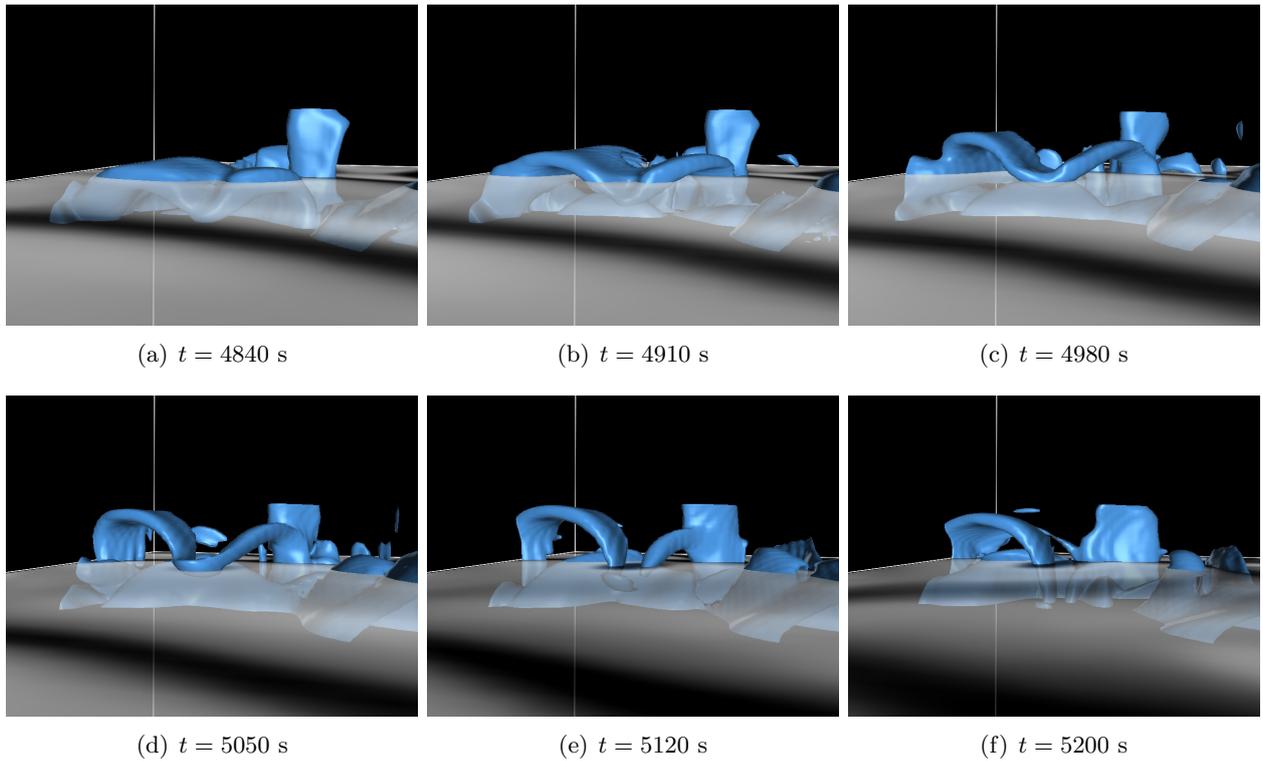


Figura 27: Representación tridimensional de la secuencia temporal de un caso peculiar de estructura magnética. En azul, isosuperficies de intensidad campo magnético a 150 G y, en escala de grises semitranslúcida, mapa de velocidades verticales en el plano $z = 0$ Mm.

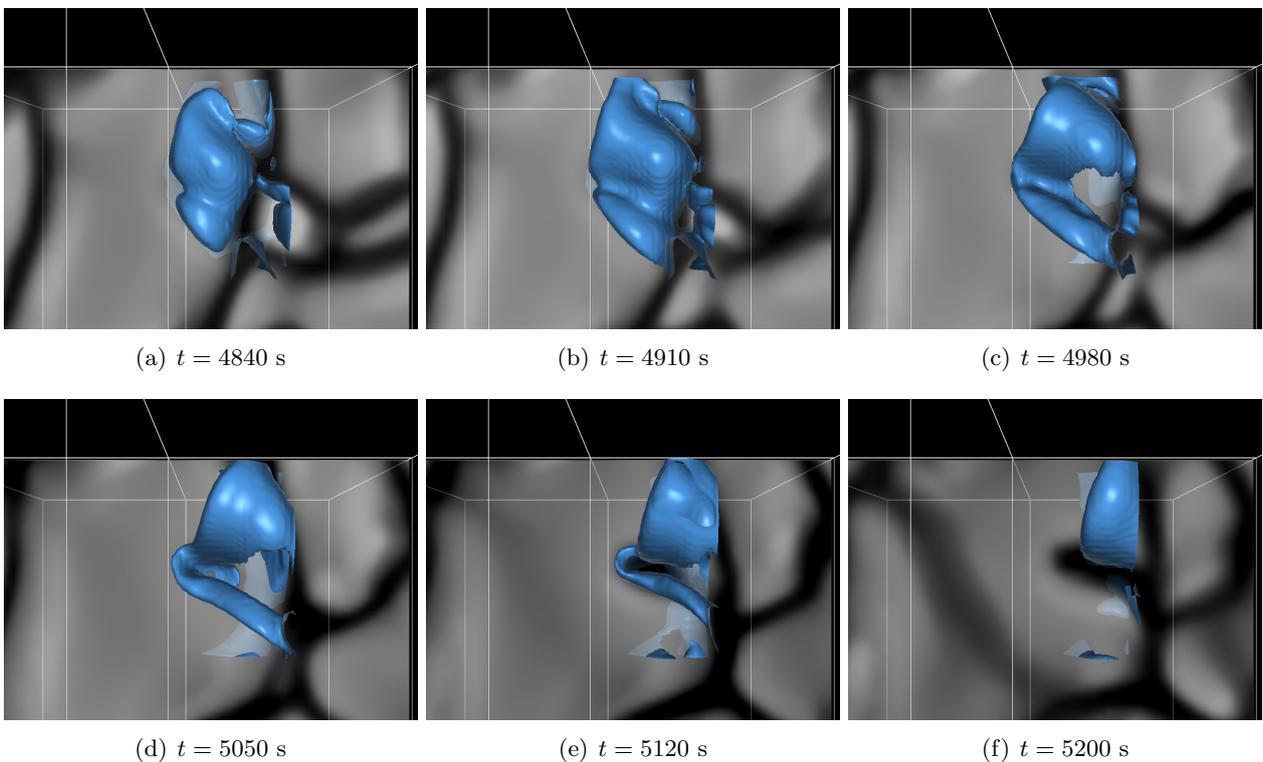


Figura 28: Visión superior de la evolución temporal mostrada en la figura 22.

tubo concentrado e independiente del resto de construcciones magnéticas de las proximidades.

La serie de resultados expuestos colocan a esta estructura como un ejemplo claro del tipo de tubos magnéticos buscados. Es clara la similitud cualitativa de la estructura tubular con la mostrada en la

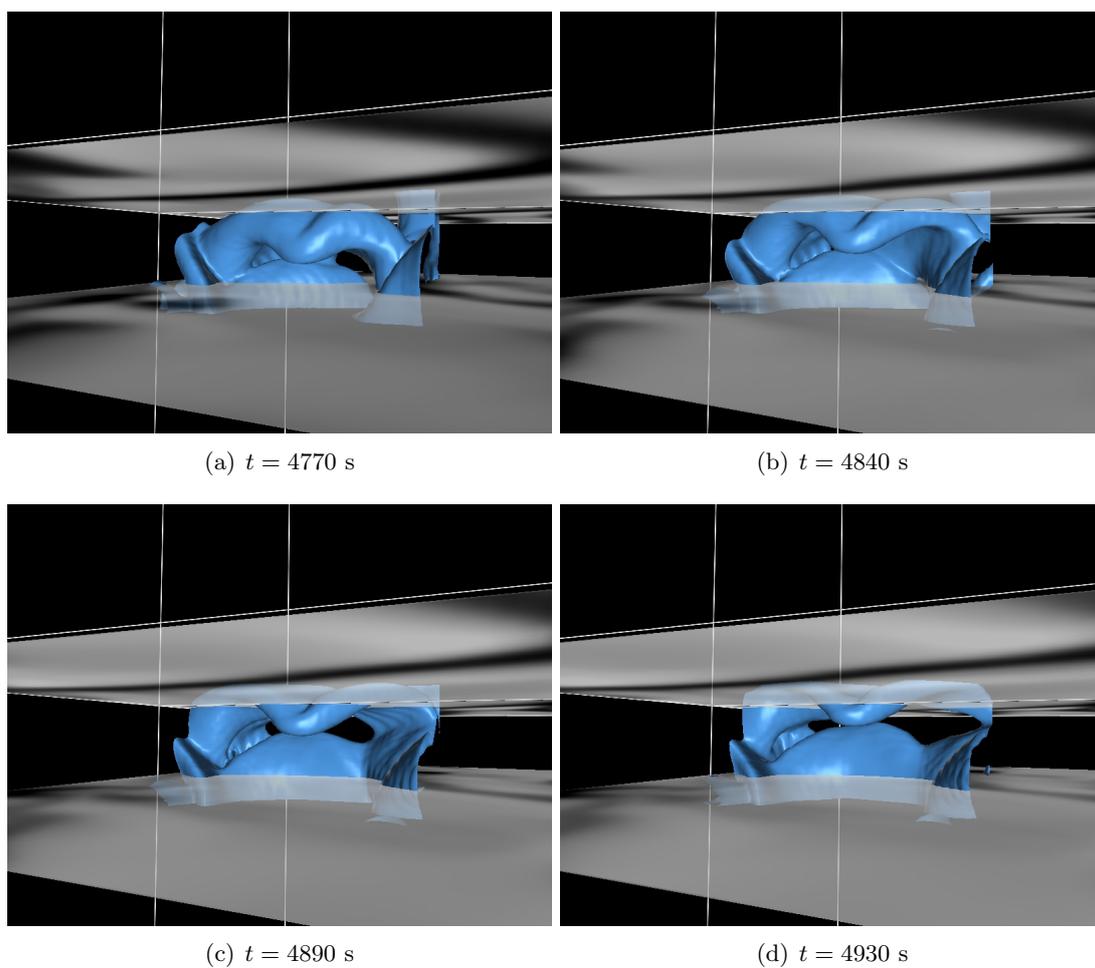


Figura 29: Secuencia temporal de la evolución de la estructura magnética mostrada en la figura 27 en niveles por debajo de la superficie instantes antes de su emergencia.

figura 3 obtenida en el trabajo de Moreno-Insertis et al. (2017); tanto en la forma de arco del objeto como en su independencia respecto al resto de estructuras magnéticas de su entorno.

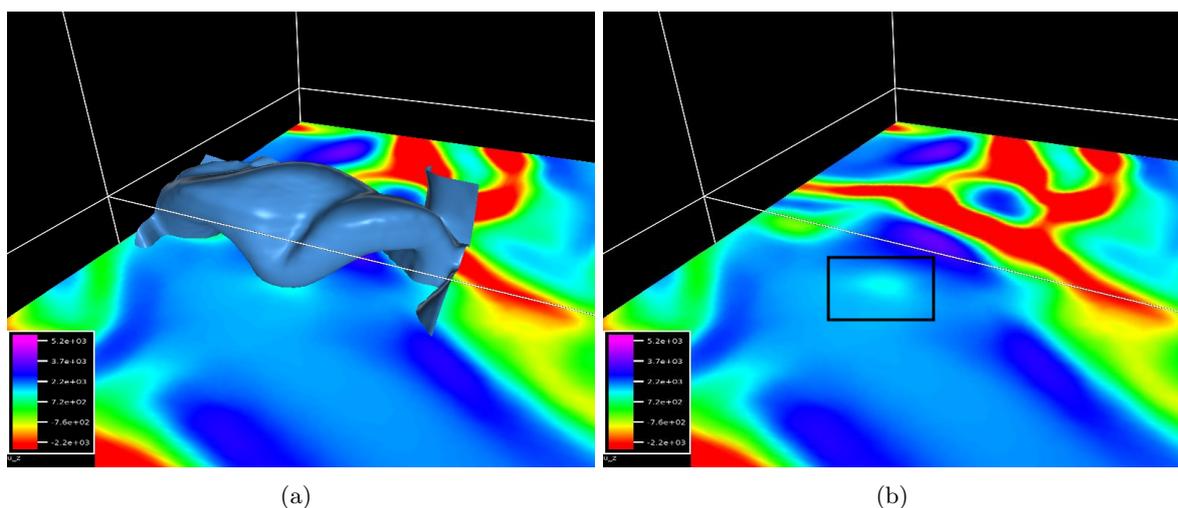
Segunda estructura:

La siguiente estructura que vamos a mostrar corresponde a un caso especial en que la emergencia se ve alterada por la formación de un intergránulo bajo la misma, lo cuál frena el ascenso de una parte del arco y consigue plegarlo haciendo que emerja un doble arco. En la figura 27 mostramos la evolución de esta estructura junto con un corte horizontal en $z = 0$ para la velocidad vertical. En (a) observamos el comienzo de la emergencia de nuestra estructura, el cuál se desarrolla de forma progresiva de (b) a (d). Desde el principio nos llama la atención que la forma de arco de la estructura viene perturbada por una depresión central en la misma. El motivo queda patente en (e) y (f), donde bajo la depresión se ha formado finalmente un intergránulo que comienza a absorber la estructura.

En la figura 28 mostramos la misma secuencia evolutiva pero vista desde arriba, desde donde se observa la emergencia dentro del gránulo pero cerca del intergránulo y la aparición de un intergránulo en la parte de la depresión de la estructura. En (c) la estructura está totalmente emergida y en (e) se ve claramente cómo aparece el intergránulo y la estructura es engullida, completando este proceso en (f).

Si observamos la evolución de la estructura bajo la superficie, en la figura 29, notamos que la depresión ya estaba presente en la estructura desde su comienzo de emergencia. Notamos como ésta se hace cada vez más pronunciada ya que, aunque sigue subiendo, lo hace a menor velocidad que el resto de la estructura.

En la figura 30 hemos representado la velocidad vertical en un corte horizontal a una profundidad



(a)

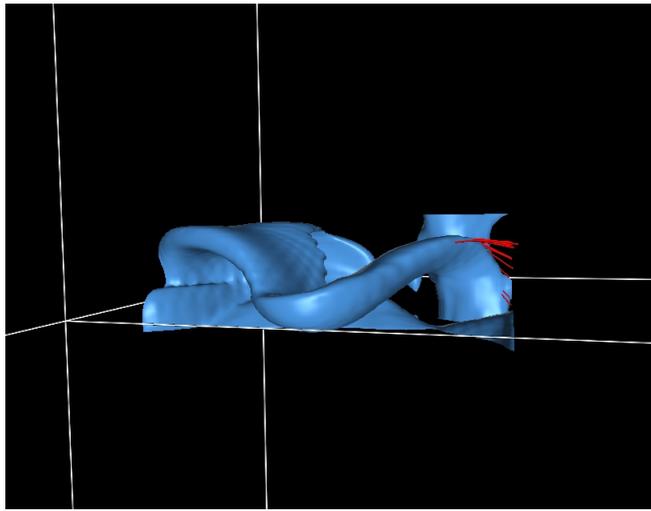
(b)

Figura 30: Mapa de color de velocidad vertical en un plano a 300 km bajo la superficie junto con la estructura magnética mostrada en 27.

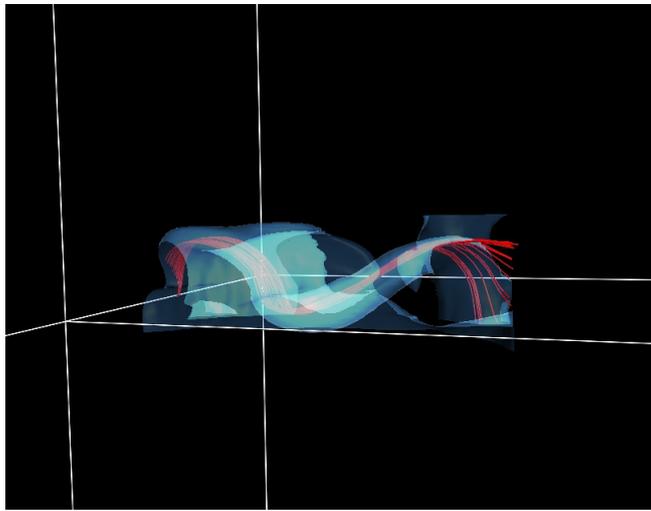
de 300 km y, ajustando la escala de colores para que se distinga, hemos podido detectar que justo bajo la depresión del tubo se encuentra una zona de velocidad ligeramente inferior al entorno, motivo por el cuál la estructura magnética se ve perturbada en esta zona.

De nuevo hemos inspeccionado la estructura para demostrar que se trata de un tubo de flujo magnético. En la figura 31 vemos cómo está recorrida en su totalidad por líneas de campo mediante una representación de la isosuperficie disminuyendo su opacidad para ver el interior y la muestra de las líneas de campo aisladas que reproducen la forma de la estructura.

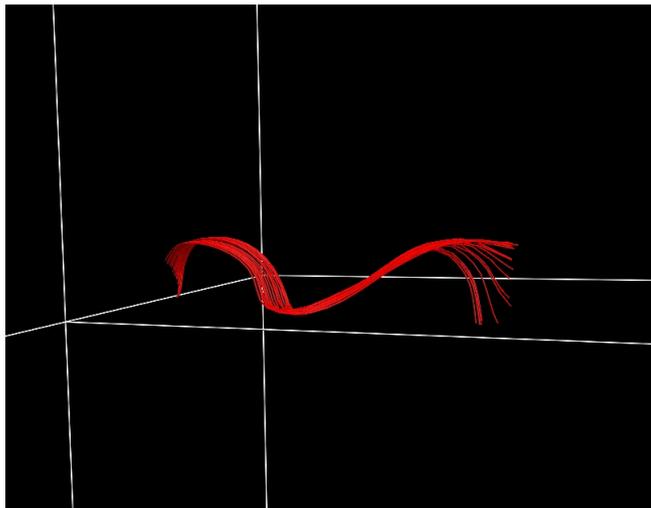
La última comprobación pertinente es la de comprobar que, efectivamente, la estructura es un tubo concentrado de campo magnético y aislado de otras fuentes de campo de su entorno, al igual que veíamos para el caso anterior. En la figura 32 mostramos un corte vertical de campo magnético y, de nuevo, se observa que el campo interior al tubo de flujo es notablemente superior al de su entorno próximo, lo que le da entidad propia a nuestra estructura.



(a)



(b)



(c)

Figura 31: Visualización de las líneas de campo magnético en el interior de la estructura magnética mostrada en 27.

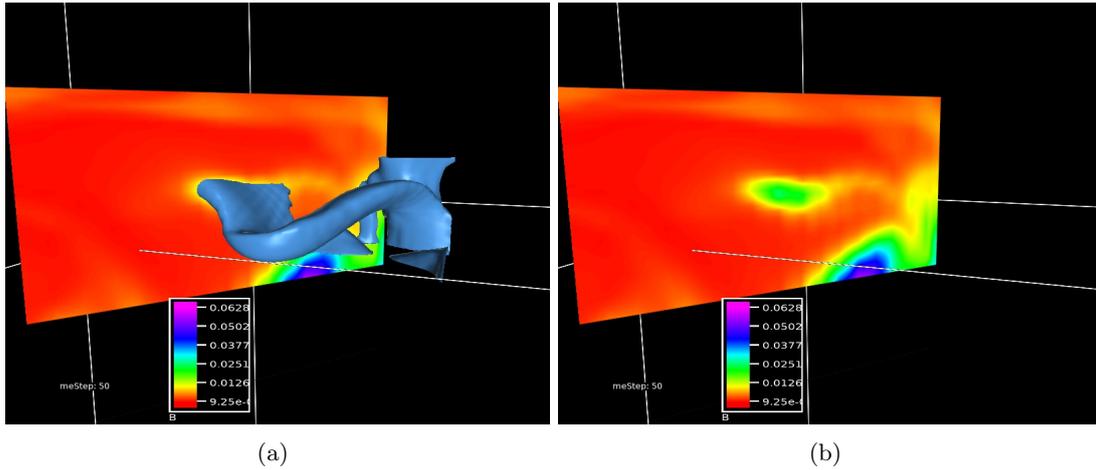


Figura 32: Mapa de intensidad de campo magnético en un corte vertical sobre la estructura magnética mostrada en 27.

6. Conclusiones

- Las estructuras magnéticas tubulares emergentes de tamaño subgranular localizadas por Moreno-Insertis et al. (2017) para un modelo MHD de Sol en calma, han sido detectadas también en este trabajo para la Simulación Pública de Bifrost (BPS). El modelo usado por Moreno-Insertis et al. (2017) correspondía a una situación de emergencia global de flujo magnético, mientras que la BPS modela una situación de magnetoconvección con estructura global magnética como en la red (*network*). Esto indica que el fenómeno descrito por Moreno-Insertis et al. (2017) es esperable con generalidad en la magnetoconvección solar de sol en calma.
- Los tubos magnéticos ascendentes identificados en nuestro trabajo cumplen una serie de características, enumeradas a continuación, que abarcan desde propiedades estructurales hasta evolutivas:
 1. La aparición de los tubos magnéticos se da en zonas del interior de gránulos.
 2. Son arrastradas por los movimientos del plasma hacia la región intergranular más próxima a velocidades en torno a 2 km/s, ligeramente más bajas que la velocidad horizontal del plasma en la misma región.
 3. Una vez en el intergránulo, la estructura desaparece disminuyendo su intensidad y siendo arrastrada por los movimientos descendentes del plasma.
 4. El tiempo de vida de estas estructuras desde su emergencia hasta su desaparición es de varios minutos, típicamente unos 5 minutos.
 5. La estructura tridimensional de estos objetos, obtenida mediante visualización 3D con el paquete VAPOR, es tubular y en forma de arco.
 6. El trazado de líneas de campo magnético indica que se trata de tubos de flujo magnético en el sentido clásico electromagnético.
 7. Las estructuras son independientes al resto de objetos magnéticos de su entorno. Su intensidad magnética está concentrada espacialmente y tiene valores de entre 200 y 300 G.
 8. Respecto de la frecuencia de aparición de estas estructuras magnéticas en la BPS: hemos obtenido diez identificaciones claras en la media hora de tiempo solar en que consisten los datos públicos de la simulación. Teniendo en cuenta el tamaño horizontal de la caja numérica ($24 \times 24 \text{ Mm}^2$), esto da una frecuencia de aproximadamente un evento por día y Mm^2 .

Las características 1 a 3 se usaron como prerequisites para aceptar un evento candidato como identificación positiva. Las características 4 a 8 son resultados a posteriori obtenidos a partir de

las identificaciones positivas logradas. Todas ellas coinciden cualitativamente con las obtenidas en el trabajo de Moreno-Insertis et al. (2017).

- Se ha llevado a cabo una caracterización de los datos de la BPS mediante la cuál hemos confirmado que varios de los fenómenos o comportamientos del plasma y el campo magnético conocidos observacional y/o teóricamente se reproducen en la simulación. La inspección de las componentes verticales de velocidad y campo magnético a diferentes alturas nos ha mostrado los siguientes hechos:
 1. A nivel de la superficie se reproduce de forma clara la granulación solar tal y como la conocemos. En niveles subsuperficiales las celdas convectivas adquieren tamaños mesogranulares.
 2. El plasma domina frente al campo magnético a lo largo de toda la zona convectiva presente en el dominio de la simulación. A medida que ascendemos sobre la superficie, es el campo magnético el que comienza a dominar el comportamiento del plasma.

Mediante un estudio estadístico de velocidad y campo magnético en la zona convectiva hemos conseguido comprobar las siguientes propiedades:

1. El campo de velocidades no es espacialmente isótropo: aunque horizontalmente sí lo sea, hay predominio estadístico de la componente vertical.
2. El campo magnético no es espacialmente isótropo. En este caso también existe una mayor tendencia vertical pero difiere un poco de la isotropía horizontal.

Todo esto es coherente con los resultados teóricos y observacionales sobre la magnetoconvección solar.

- Las herramientas de visualización 3D que proporciona el paquete VAPOR han sido cruciales para confirmar la forma y evolución de las estructuras magnéticas encontradas. Su utilidad unida a su accesibilidad lo colocan como una opción muy adecuada para la representación de entornos solares tridimensionales.
- Los resultados obtenidos en este Trabajo Fin de Máster han sido usados como parte de una Letter publicada muy recientemente en *Astrophysical Journal Letters* (Moreno-Insertis et al., 2018).

Referencias

- Carlsson, M., Hansteen, V., Gudiksen, B., Leenaarts, J., & De Pontieu, B. 2016, *A&A*, 585
- Centeno, R., et al. 2007, *ApJL*, 666, L137
- . 2017, *ApJS*, 229, 12
- Cheung, M. C. M., Schüssler, M., & Moreno-Insertis, F. 2007, *A&A*, 467, 703
- Cheung, M. C. M., Schüssler, M., Tarbell, T. D., & Title, A. M. 2008, *ApJ*, 687, 1373
- De Pontieu, B. 2002, *ApJ*, 569, 474
- Freytag, B., Steffen, M., Ludwig, H. G., Wedemeyer-Böhm, S., Schaffner, W., & Steiner, O. 2012, *Journal of Computational Physics*, 231, 919
- Gömöry, P., Beck, C., Balthasar, H., Rybak, J., Kucera, A., Koza, J., & Wöhl, H. 2010, *A&A*, 511, 10
- Gudiksen, B., Carlsson, M., Hansteen, V. H., Hayek, W., Leenaarts, J., & Martínez-Sykora, J. 2011, *A&A*, 531
- Gudiksen, B., & Nordlund, A. 2005, *ApJ*, 618, 1031
- Guglielmino, S. L., et al. 2012, *ApJ*, 745, 12
- Martínez-González, M. J., & Bellot, L. R. 2009, *ApJ*, 700, 1391
- Martínez-González, M. J., Manso, R., Asensio, A., & Bellot, L. R. 2010, *ApJL*, 714, L94
- Moreno-Insertis, F., Martínez-Sykora, J., & Hansteen, V. H. 2017, Submitted to *ApJ*
- Moreno-Insertis, F., Martínez-Sykora, J., Hansteen, V. H., & Muñoz, D. 2018, *ApJL*, 859, L26
- Nordlund, A., Stein, R., & Asplund, M. 2009, *Living Rev. Solar Phys.*, 6, 2
- Orozco, D., Bellot, L. R., del Toro, J. C., & Tsuneta, S. 2008, *A&A*, 48, L33
- Palacios, J., Balmaceda, L. A., Domínguez, S. V., Cabello, I., & Domingo, V. 2012, *ASP*, 454, 51
- Stein, R. F., & Nordlund, A. 2006, *ApJ*, 642, 1246