

Emisión submilimétrica de micro-estructuras magnéticas en la crómosfera solar

Juan Carlos Rodríguez Rodríguez

30-08-2019

Contents

Introducción	iii
1 Estructuras de micro-escala en la cromosfera solar	1
1.1 El código <i>Pakal</i>	3
1.2 Sobre el Sol quieto y la emisión submilimétrica solar	4
2 Extensión al modelo Pakal - Añadiendo presión magnética	11
3 Pruebas a la extensión de Pakal y sus Resultados	19
3.1 Características Físicas de los modelos de prueba Arcos Magnéticos y Flujo Emergente	19
3.1.1 Arcos Magnéticos	19
3.1.2 Flujo Emergente	23
3.2 Resultados	24
3.2.1 Micro arco magnetico	24
3.2.2 Flujo emergente	30
4 Discusión y conclusiones	37
5 Anexos	39

Introducción

El estudio del Sol ha resultado indispensable para el desarrollo de la humanidad. En la antigüedad, por ejemplo, la observación del Sol permitió a los humanos generar el modelo de estaciones del año; el cual nos permitió realizar predicciones sobre, entre muchas otras cosas, la agricultura y los mejores tiempos para emprender largos viajes. Hoy en día, el estudio del Sol está indisolublemente relacionado con el progreso de nuestras tecnologías. Por ejemplo, se puede decir que la actividad del Sol, particularmente de su atmósfera tienen una relación directa con nuestros avances aeroespaciales y en materia de telecomunicaciones.

El estudio de ésta resulta importante, pues como ha ocurrido con anterioridad, la actividad solar puede incluso llegar a dañar nuestro sistemas de telecomunicaciones (Loper, 2019). Principalmente, el mayor desconcierto que existe con el comportamiento de la actividad solar son los repentinos y radicales abillamientos conocidos como ráfagas solares que son eventos en donde se aceleran cargas eléctricas y se producen descomunales cantidades de energía de típicamente 10^{32} ergs en forma radiante, en forma térmica y en forma cinética respectivamente. A su vez, las ráfagas solares usualmente anteceden a fenómenos de mayor escala conocidos como Eyecciones de Masa Coronal, que son desprendimientos de grandes porciones de la atmósfera externa del Sol y que se proyectan al medio interplanetario, donde eventualmente pueden arribar a la Tierra causando potenciales desastres naturales y tecnológicos como los descritos en (Loper, 2019)

Es así como el estudio del estado físico de la atmósfera solar conlleva a importantes cuestionamientos y avances en la descripción del modo en cómo se genera y se transporta energía a través de ésta.

Sin embargo, hasta el momento, a la disciplina de la física solar le ha resultado imposible desarrollar un modelo preciso que prediga el comportamiento de la atmósfera solar. Esto se debe a que aún no se posee de un conocimiento certero de la física de la atmósfera solar. Algunos teóricos han argumentado que las repentinas y radicales variaciones de la atmósfera solar son causadas por inestabilidades de los campos magnéticos allí presentes (Fleishman and Melnikov, 2003). Considerando lo anterior, en esta tesis se estudia empíricamente dicha teoría a través de una extensión de un modelo de simulación computacional.

Precisamente, esta tesis extiende el presente conocimiento en física solar mediante dos principales contribuciones. La primera contribución reside en proveer evidencia parcial y exploratoria, a través de una simulación computacional, que las variaciones repentinas y radicales de la cromósfera se deben al efecto de los campos magnéticos de los niveles cromosféricos y coronales. La segunda contribución se halla en la extensión de un modelo de simulación computacional existente para que considere el efecto de los campos magnéticos mismos. Con

relación a esta segunda contribución, se extiende particularmente el modelo de simulación computacional llamado Pakal empleado para diagnosticar la emisión milimétrica y submilimétrica proveniente de niveles coronales (De la Luz et al., 2010).

Actualmente, el código de Pakal realiza sus modelos de simulación sin considerar el efecto de los campos magnéticos en el cálculo de la densidad del plasma de la cromósfera. Esto ocasiona que sus resultados sobre la densidad no sean del todo precisos en comparación con las observaciones reales. Mediante la extensión del código propuesta en esta tesis, se le posibilita a Pakal la capacidad de considerar el efecto de los campos magnéticos. Como resultado, sus aproximaciones a la densidad observada son más precisos. Lo anterior puede ayudar a entender mejor las variaciones repentinas y radicales observables en la temperatura de la cromósfera. Y como se mencionó anteriormente, sugiere que hay evidencia muy parcial y exploratoria del efecto de los campos magnéticos en el comportamiento de la cromósfera.

Chapter 1

Estructuras de micro-escala en la cromosfera solar

La atmósfera solar se divide en las siguientes capas: la fotosfera, cromósfera, región de transición y la corona solar. Cada una de estas regiones poseen distintos regímenes de densidad y temperatura ilustrándose en la figura 1.1.

La atmósfera solar está descrita básicamente por la física de un plasma magnetizado. El estado del plasma y/o su interacción con el campo magnético establecen mecanismos de emisión en prácticamente todo el espectro electromagnético. Estos mecanismos consisten en transiciones atómicas (que pueden ser ionizantes, de recombinación y tipo ligado-ligado) y mecanismos de emisión libre-libre como radiación *bremsstrahlung*, radiación sincrotrónica y radiación plasma.

La atmósfera solar se extiende desde los niveles fotosféricos hasta el medio coronal pasando por el medio cromosférico, involucrando un rango de longitud de $1R_{\odot}$ – $3R_{\odot}$. La *fotosfera* se constituye de granulos convectivos de pequeña escala (10^3 km), separados de entre sí por capas intergranulares, las cuales concentran elementos de alto flujo magnético ($|B| \leq 1\text{kG}$). La escala temporal de la ocurrencia de un gránulo es de unos minutos aproximadamente. La *cromósfera* (fig. 1.2) es una capa que se extiende por alrededor de 2×10^3 km. Emite copiosamente en la línea espectral $H\alpha$ ($\lambda = 6563$ nm) y ultravioleta. Similarmente a la fotosfera, la base de la cromósfera presenta gránulos con una escala de tamaño relativamente mayor concentrando flujo magnético, el cual está asociado en unos casos con flujos verticales de plasma llamados *espículas* o a microarcs magnéticos en otros casos (Hathaway, 2014). Más allá de la base de la cromósfera cambia la condición en la presión dominante, ya que mientras la presión del gas domina a niveles fotosféricos, a estos niveles esta condición se invierte y las distribuciones de brillo observadas están dominadas por la geometría del campo magnético.

El rango de temperaturas implicado en este cambio de morfología, de gránulos a estructuras filamentosarias magnéticas (*loops*) es de $2 \times 10^5 \text{ K} < T < 10^6 \text{ K}$

El escenario anterior propone que, a través de las espículas se establece un mecanismo continuo de transferencia de material y energía hacia la corona solar, por lo que se han propuesto modelos que expliquen tanto la dinámica y estructura térmica de una condición conocida como *Sol Quiet*, en referencia a regiones del Sol que exentas de cualquier manifestación de actividad observable.

Modelos estáticos de atmósferas referentes, son los desarrollados por Vernazza et al. 1991 (VAL), Fontenla et al. 1993 y Avrett y Loeser 2008 (C7). En ellos, se ajusta una atmósfera hidrostática, promediando propiedades estratificadas, aproximación plano-paralela, hasta reproducir el correspondiente espectro emergente para un conjunto de observaciones seleccionadas. Aún cuando la física de aquellos modelos es bastante realista, no toma en cuenta la dinámica a escala angular menor al poder de resolución de las observaciones comparadas con los modernos instrumentos de hoy.

Con el advenimiento de instrumentos que observan en el rango UV, tales como IRIS (Interface Region Imaging Spectrograph) muestra que la estructura de la atmósfera (y muy particularmente, de la cromósfera) es tan caóticamente distribuida, que un modelo que promedie propiedades como en el párrafo anterior no puede capturar la complejidad del escenario real.

Carlsson y Sten (1994) modelan bidimensionalmente la emisión emergente térmica libre-libre cromosférica a longitudes de onda milimétricas y sub-milimétricas. La temperatura de brillo resultante varía sensiblemente en el tiempo debido a la propagación de ondas de choque y modos de oscilación, contabilizando una complejidad más realista para la temperatura local del gas en las capas de formación del continuo de emisión. Las escalas angulares involucradas en estos resultados están por debajo de los $0.1''$. Así, la emisión milimétrica y submilimétrica dependen fuertemente. Loukitcheva et al. 2004 refieren que las el escenario dinámico de la estructura cromosférica es consistente con la emisión milimétrica y submilimétrica observada.

Son estas propiedades de la red cromosférica que justifican la exploración causal de campos magnéticos de esta tesis.

Si bien, en comparación con los modelos dinámicos mencionados arriba, los modelos estáticos han sido escasamente estudiados, un ejemplo es *PakalMPI* (De la Luz 2010) es un código que resuelve la ecuación de transferencia radiativa en tres dimensiones en una aproximación plano-paralela, cuya estratificación sigue perfiles conocidos de densidad y temperatura...

En este trabajo se basa los modelos semi-empíricos VAL y C7, lo cuales, bajo determinadas modificaciones se introducen en código *PakalMPI*...

Mencionar a ALMA

En añadidura, las observaciones del experimento VAULT (Very high Angular resolution ULtraviolet Telescope por sus siglas en inglés) complementan la evidencia de una estructura caótica cromosférica y de la existencia de pequeños loops fríos (Vourlidas, Sanchez, and Landi, 2010), los cuáles confirman la presencia de campos magnéticos. VAULT es un proyecto de exploración espacial que data de 1999 y que busca estudiar la conexión entre la corona y la cromósfera solar al observar la línea espectral más fuerte del sol, la $\text{Ly}\alpha$ a 1216Å. La resolución angular de subarcosegundos ($\approx 0.3''$) permite ver directamente los pequeños loops fríos en la estructura de Sol Quiet. El parecido de los resultados entre los modelos y las observaciones indican que la explicación de las estructuras finas observadas en términos de loops fríos es plausible.

Como se muestra en la figura 1.4 las imágenes de vault nos permiten mejorar la calidad de nuestras observaciones, permitiéndonos tener un mejor entendimiento de la composición de la atmósfera solar (nótese también la calidad de la figura Y).

1.1 El código *Pakal*

Como se mencionó anteriormente, esta tesis busca extender el código *Pakal*. Este programa fue construido por Victor de la Luz en el año 2011 (De la Luz, 2011). Dicho programa es un modelo numérico innovador que pretende resolver la ecuación de transferencia radiativa en una geometría tridimensional (3D), usando una aproximación para una atmósfera localmente plano paralelo; lo anterior utilizando un sistema inteligente. Con este programa se generan las capas estratificadas de la atmósfera en una estructura lógica. La salida del código puede ser en forma de mapas bi-dimensionales o un perfil de una dimensión, que reproduce las observaciones con alta precisión, dando información física detallada acerca del entorno donde la radiación fue generada y/o transmitida.

Pakal se encuentra dividido en cuatro distintos módulos: El modelo numérico, la geometría, los métodos numéricos y las funciones físicas. Estos cuatro módulos pueden ser modificados independientemente sin afectar el funcionamiento de los otros. En esta tesis se modifica el módulo de las funciones físicas donde se resuelve la ecuación de transferencia.

Como todo modelo, *Pakal* está basado en una serie de supuestos que le brindan una serie de fortalezas, pero también una serie de limitantes; las cuales se presentarán a continuación. Con relación a sus supuestos, *Pakal* presenta un modelo aplicado a una geometría solar radial 3D, asumiendo una atmósfera local plano-paralela, y una emisión térmica de radio libre-libre de gas hidrógeno-helio en equilibrio termodinámico. Para sus cálculos *Pakal* asume un grosor de la Cromósfera de 2200km. Además también utiliza perfiles radiativos precalculados de densidad y temperatura (basado en modelos hidrostáticos, hidrodinámicos o MHD) para calcular la emisión de una fuente de estructuras 3D con alta resolución espacial. En todo momento *Pakal* asume un estado de Sol Quietos y la ausencia de campos magnéticos. El término Sol Quietos hace referencia a regiones del Sol que se encuentran exentas de cualquier manifestación de actividad observable. Con los supuestos antes mencionados, el programa concerniente resuelve la ecuación de transferencia radiativa en un conjunto de líneas dirigidas de la fuente al observador.

En relación con las limitaciones de *Pakal*, si bien este permite la entrada de observaciones, no está basado en ellas, y por lo tanto los resultados que no representan por completo las características físicas. De igual forma, *Pakal* se encuentra limitado a la fotosfera y cromósfera, esto debido a que estas regiones presentan una baja actividad magnética lo cual permite despreciarla; contrario a lo que ocurriría en la corona solar. *Pakal* también omite la emisión *gyrosynchrotron* al despreciar los campos magnéticos. Finalmente, el código de *Pakal* no logra reproducir en un 100% las funciones de densidad y temperatura del plasma solar.

Finalmente como concerniente a sus fortalezas, *Pakal* ha demostrado poder mejorar el tiempo de integración hasta por un orden de magnitud comparado a códigos de integración lineal. Por ejemplo, en una prueba que utilizaba 32 procesadores de una máquina Cray del CNS en San Luis Potosí, se generaron espectros sintéticos de 32 frecuencias, con pasos de integración de 1km del centro del disco solar en aproximadamente 3 segundos. Además, *Pakal* puede correr en clusters, supercomputadoras y computadoras personales. Los resultados de *Pakal* han sido probados por su robustez. Particularmente, se realizaron satisfactoriamente pruebas de convergencia y estabilidad de la parte numérica y del

sistema experto, las cuáles son presentadas en De la Luz et al. 2010. Por último, Pakal permite modelar computacionalmente modelos empíricos, teóricos y semi empíricos.

En esta tesis se propone una extensión en el módulo de funciones físicas (denominado Jaguar). Particularmente se agrega el efecto de los campos magnéticos a la ecuación de transferencia al agregar la componente de la presión magnética. Lo anterior convierte al modelo hidrodinámico que se usa actualmente en un modelo magnetohidrodinámico. Con esta adición ahora (1) se puede generar un escenario más apegado a las observaciones físicas de la atmósfera solar, y (2) se facilita la adaptación del código ante la adición de cualquier modelo de campo magnético. Con relación a esto último, ahora se puede solo cambiar una pequeña fracción del código (la parte donde se encuentra el modelo de campo magnético) sin necesidad de alterar el core de Pakal .

1.2 Sobre el Sol quieto y la emisión submilimétrica solar

Históricamente el concepto de Sol quieto se ha visto modificado, por lo que antes que todo se recomienda al lector tener precaución en asumir una consistencia conceptual en textos de diferentes tiempos. Hoy en día, este término se refiere a dos conceptos. Primeramente se puede referir a las regiones del Sol que abarcan todas las regiones de campo magnético cerrado (excluyendo las regiones activas), claramente demarcando el territorio de Sol quieto de los hoyos coronales, que abarca regiones de campo magnético abierto. Segundamente, se refiere a un estado solar general que ocurre cada 11 años y se caracteriza por una actividad solar baja. Esta actividad solar baja básicamente es equivalente a la primera definición antes mencionada. En esta tesis cuando se utiliza el concepto de sol quieto, nos estamos refiriendo a la primer definición, la cual describe el fenómeno solar de interés. Se asume únicamente el estado de sol quieto debido a la complejidad del Sol activo. Sin embargo, el entendimiento del sol quieto también nos ayudaría a entender mejor el Sol Activo. Concretamente, la correcta caracterización del Sol Quietos nos permitiría entender el fondo de radiación del Sol Activo.

Una característica relevante del Sol quieto para esta tesis es el de la intensidad de sus campos magnéticos. Particularmente los campos magnéticos en Sol quieto, medidos según las líneas espectrales de Zeeman, contienen un campo de $B = .1 - .5G$, mientras que sus fuerzas absolutas de campo en elementos resueltos varían entre $B = 10-50G$. Estos valores se utilizan en el modelo computacional propuesto en este texto.

Si bien se conocen los rangos de la magnitudes de los campos magnéticos del Sol quieto, existe una dificultad en medir las magnitudes concretas de estos debido a corrientes desconocidas y condiciones no libres de fuerza. Lo anterior ocasiona que se tengan que calcular extrapolaciones a lo largo de la cromósfera y la región de transición para obtener valores aproximados. Sin embargo, estas mediciones extrapoladas contienen ruidos, lo que las hace imprecisas. Lo anterior justifica que el modelo presentado en esta tesis tome valores de campos magnéticos no concretos.

Otra característica importante del Sol quieto para esta tesis es la emisión

milimétrica del plasma. Se ha comprobado que la observación de la emisión milimétrica del plasma en Sol Quietó es equivalente a observar la totalidad de las emisiones de la Cromósfera Solar cuando está en el estado solar de Sol Quietó (Loukitcheva and Nagnibeda, 2000). Con la emisión milimétrica se puede aproximar el grado de ionización de toda la atmósfera solar; y con esta última se pueden inferir aproximaciones de la temperatura, la densidad y la presión que hay en ella. Estas últimas aproximaciones se realizan según diferentes modelos; los cuales se pueden conceptualizar como empíricos, semi-empíricos y observacionales.

Independientemente del tipo de modelo, por definición, todos tienen limitaciones en sus cálculos de temperatura, densidad y presión. En el modelo propuesto, se busca robustecer el modelo Pakal de Víctor de la Luz mediante la anexión de el efecto teórico de los campos magnéticos. Esta anexión se puede justificar, por diferentes teorías y observaciones. Por ejemplo, un estudio reciente por Meunier (2018) propone que las pequeñas regiones de campo magnético contribuyen significativamente a la emisión cromosférica y por consiguiente a la emisión milimétrica. Lo anterior, como se explicó previamente, afectaría a los cálculos de la temperatura, la densidad y la presión de la cromósfera; haciéndolos teóricamente más precisos.

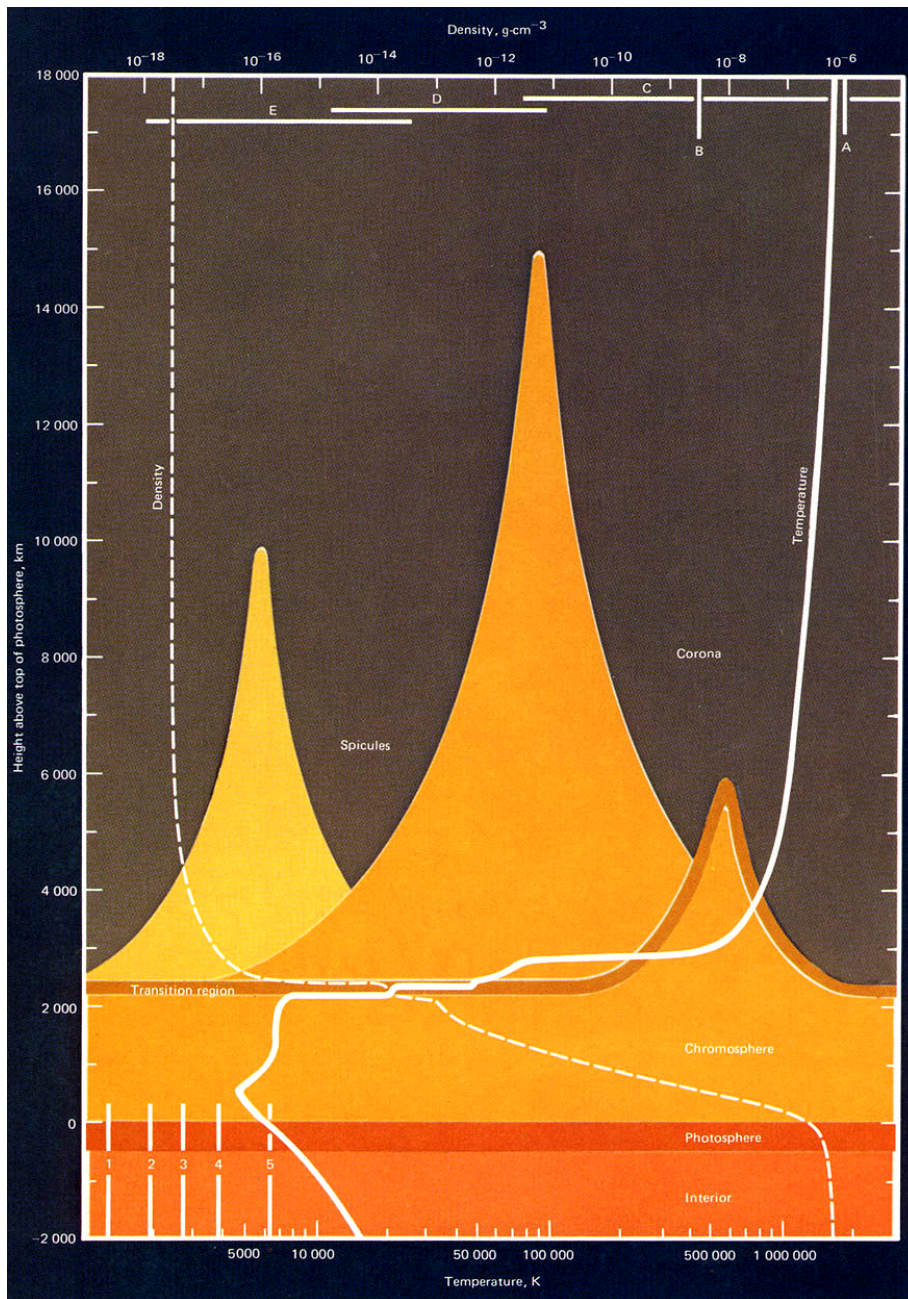
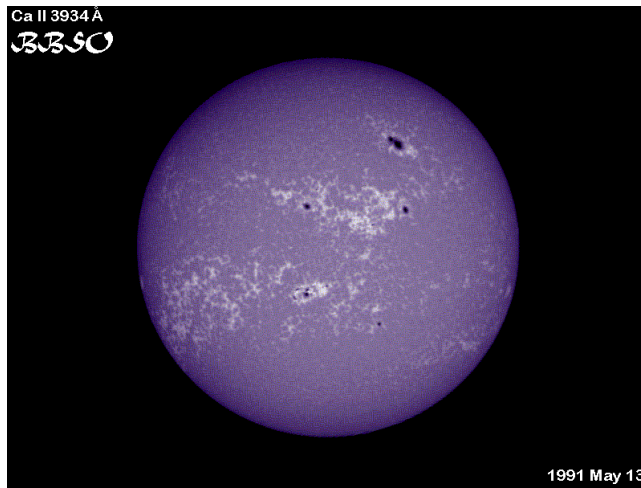


Ilustración de la estructura de la atmósfera del Sol (tomada de <https://history.nasa.gov/SP-402/p2.htm>).

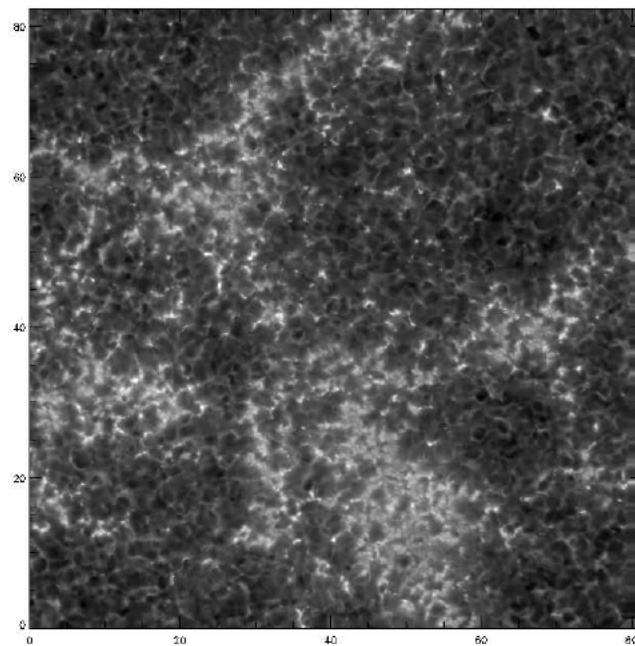
*Existe debate sobre si la región de transición es una región por sí misma o forma parte de la Cromósfera. Independientemente de esto, se localizaría entre la Cromósfera y la Corona Solar.

{atmosfera_solar}



Fuente: The Chromospheric Network Mayo 2017, NASA página web oficial

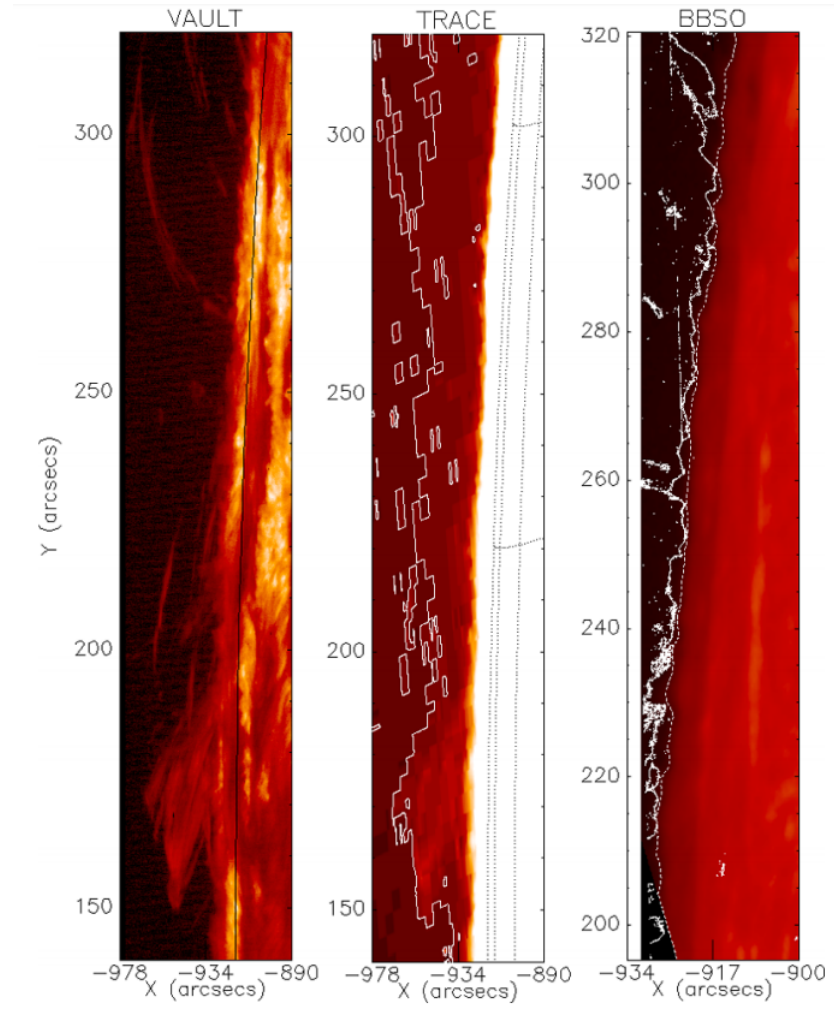
<fig:chromosphericnet>



Red cromosférica solar observada desde el Telescopio Solar Sueco (Swedish Solar Telescope) en la línea H Ca II.

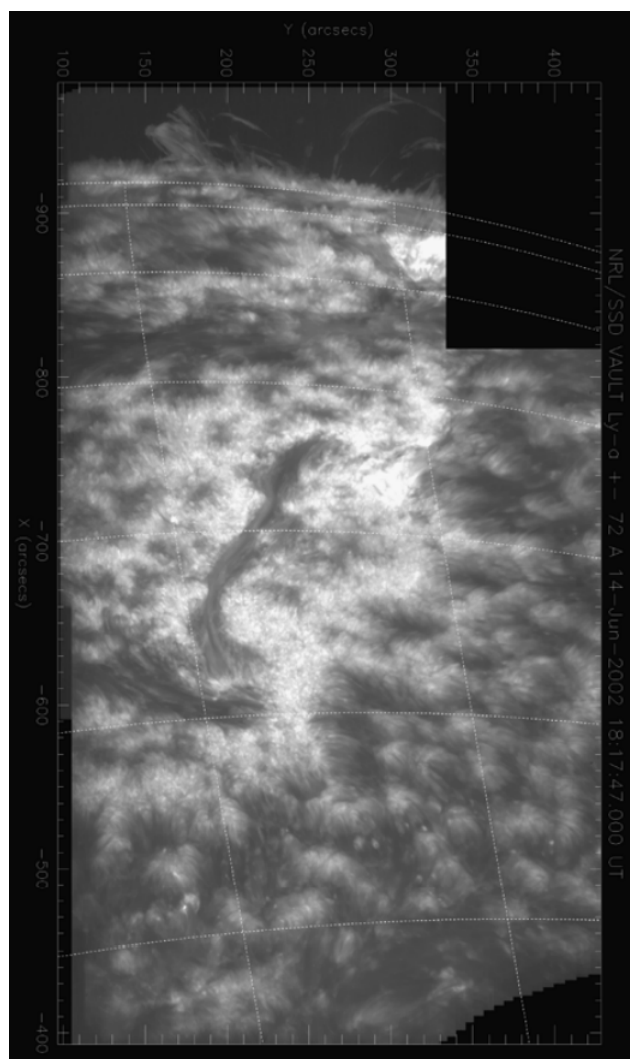
Fuente: https://www.researchgate.net/figure/The-chromospheric-network-as-observed-with-the-Swedish-Solar-Telescope-in-the-Ca-II_fig8_259104617

chromospheric_network2)?



"Fuente: Vourlidas, et al., 2009"

<fig:vault_compare>



"Fuente: Vourlidas, et al., 2009

?<fig:vault_complete)?

Chapter 2

Extensión al modelo Pakal - Añadiendo presión magnética

La extensión propuesta en esta tesis al modelo computacional Pakal le añade a este último el efecto de la presión magnética a la ecuación de estado. Con lo anterior, el modelo de Pakal, que en principio era un modelo computacional que simulaba un modelo hidrostático para el comportamiento del plasma, se robustece al convertirse en un modelo de Magnetohidrostática. Hablando en términos físicos, se podría decir que el modelo original resolvía la siguiente ecuación de estado:

$$\frac{dp}{dz} = g\rho$$

donde

$$p = p_g + \frac{1}{2}\rho v_t^2$$

A esta fórmula, se le añade el efecto de la presión magnética, resultando en la siguiente ecuación (Priest, 2014).

$$p = p_g + \frac{1}{2}\rho v_t^2 + p_B$$

Cabe aclarar que la fórmula que utiliza el código de la extensión a Pakal considera la siguiente ecuación de presión magnética para realizar los cálculos:

$$p_B = \frac{B^2}{8\pi}$$

A continuación se precisará el código de la extensión computacional al programa Pakal realizado en esta tesis. Se contextualizará dicho código con secciones del código original. Las extensiones al código se diferenciarán al código original al estar con un estilo de letra en **negrita**, mientras que los nombres de los archivos se encuentran subrayados. Además, se comentará la función realizada por el código agregado.

Para hacer posible la adición del efecto de la presión magnética sobre la ecuación de estado dentro del código Pakal, se modificaron los siguientes archivos:

hmodel.h En esta libreria se definen la estructura de la atmosfera, a la cual se le agregaron las componentes x, y, z del campo magnetico, asi como la variable ξ para la modulacion del mismo

```

1 typedef struct{
2     int id;
3     double z;
4     double T;
5     double P;
6     double H;
7     double V;
8     double vt;
9     double ne;
10    double ne_lte;
11    double bhm;
12    double fz;
13    /*-----*/
14    //Se agregan las componentes del campo y xi
15    double Bx;
16    double By;
17    double Bz;
18    double xi;
19    /*-----*/
20 }Atmosphere;

```

main.c Esta es la parte donde el módulo Jaguar se encarga de llamar a las respectivas funciones que llevan a cabo los cálculos de cada uno de los pasos de integración. En este código se agregó la lectura de los valores de campo. Los parametros amplitud e intensidad son los respectivos valores del campo magnetico.

El parámetro alpha se define en el capítulo 4.

El parámetro B_x0 representa la altura a la que nace el campo magnético, tomando como referencia la base de la fotosfera.

```

1
2 int main(int argc, char **argv){
3     int i, j;
4     Model model;
5     char env[500];
6     char comando[500];
7     double hydro_step;
8     double pzl;
9     double Y;
10    double fz1;
11    double dx;
12    int chromospheric_network;
13    int cell;
14    int hydro;
15    /*-----*/
16    //Los parametros amplitud e intensidad son los respectivos
17    //valores del campo magnetico
18    //El parametro alpha representa el angulo entre el nacimiento del
19    //campo magnetico y el punto que se desea calcular, tomando como
20    //referencia de centro el centro solar
21    //B_x0 representa la altura de nacimiento del campo, tomando como
22    //referencia la base de la fotosfera
23    //magnetic es la variable que nos dice si se llamo la bandera del
24    //campo magnetico
25    double amplitude, intensity, alpha;
26    int magnetic = 0;

```

```

22 int B_x0;
23 /*-----*/
24
25 printf("Loading Atomic Model:\n");
26 model = newModel(argv[1]);
27 chromospheric_network=0;
28 hydro = 0;
29
30 for (i=1; i<argc; i++) {
31     sprintf(comando, "%s", argv[i]);
32     if (strcmp(comando, "-hydro") == 0) {
33         hydro= 1;
34     }
35
36     if (strcmp(comando, "-cn") == 0) {
37         sprintf(comando, "%s", argv[++i]);
38         if (sscanf(comando, "%i\n", &cell) > 0) {
39             chromospheric_network=1;
40             printf("Error: Network or cell is required.\n");
41             return 0;
42         }
43     }
44 /*-----*/
45
46 //Aqui se lee la bandera del campo magnetico representada por -
47 //B y se transfieren al codigo los parametros de entrada
48 if (strcmp(comando, "-B") == 0) {
49     sprintf(comando, "%s", argv[++i]);
50     if (sscanf(comando, "%lf\n", &amplitude) > 0) {
51         sprintf(comando, "%s", argv[++i]);
52         if (sscanf(comando, "%lf\n", &intensity) > 0) {
53             sprintf(comando, "%s", argv[++i]);
54             if (sscanf(comando, "%lf\n", &alpha) > 0) {
55                 sprintf(comando, "%s", argv[++i]);
56                 magnetic = 1;
57             }
58         }
59     }
60 }
61
62 B_x0 = 1;
63 loadInitValues(&model, 0);
64 if(magnetic == 1) {
65     init_B(amplitude, intensity, alpha, &model, B_x0);
66 }
67 printf("Layer 0\n");
68 NLTE(&model, 1e-14, 0, 0.0, 0.0, 0.0, chromospheric_network, cell, 0);
69 writeModel(model, "dummy/");
70
71 for (i=1; i<= model.n; i++) {
72     pz1 = model.atm.P;
73     fz1 = model.atm.fz;
74     dx = model.atm.z;
75     loadInitValues(&model, i);
76 /*-----*/
77
78 //En caso de que la bandera haya sido activada, se calcula el
79 //campo magnetico y modidica directamente los valores de las
80 //capas de la atmosfera por medio del parametro &model.

```

```

78     if(magnetic == 1) {
79         calculate_B(amplitude, intensity, alpha, &model, B_x0);
80     }
81     /*-----*/
82     if (!(hydro)) {
83         printf("Layer %i (ion)\n", i);
84     }
85     /*-----*/
86     //Dado que la opcion hydro no fue activada, se asume que no
87     se busca tampoco el campo magnetico (esto se representa por el
88     0 del final)
89     /*-----*/
90     NLTE(&model, 1e-14, 0, 0.0, 0.0, 0.0, chromospheric_network, cell, 0)
91     ;
92     }else{
93         printf("Layer %i (hydro)\n", i);
94         dx = model.atm.z - dx;
95     }
96     /*-----*/
97     //Si la opcion hydro fue activada, se le pasa al modelo NLTE
98     el parametro "magnetic"
99     /*-----*/
100    NLTE(&model, 1e-14, 1, pz1, fz1, dx, chromospheric_network, cell,
101    magnetic);
102    }
103    writeModel(model, "dummy/");
104    }
105    return 0;
106    }

```

nlte.c Esta seccion resuelve la ecuación de estado con un modelo NLTE (non local thermodynamic equilibrium), y es donde se agrega como tal la influencia de la presión magnética

```

1  #include <string.h>
2
3  double totalParticles = 0.0;
4  double magnetic_true = 0;
5
6  /*-----*/
7  //Es aqui donde se resuelve la funcion de estado, por lo que es
8  donde se realiza la principal contribucion de esta tesis.
9
10 double f_hydro(double Y, double R, double Z, double T, double vt,
11 double bx, double by, double bz, double xi){
12 //g * m_H 6.674e-8 cm^3g-1s-2 * 1.673534e-24 g
13 double R1,KT,R2,R3,R4,R5,R6,B, magnetic_field;
14
15 //Se agrega un archivo que contiene los valores del campo
16 magnetico y de la presion a cada altura, para poder observarlos
17 y graficarlos de ser necesario. Los valores se encuentran
18 contenidos en el archivo magnetic_and_pressure.dat
19 char tmp_name[300];
20 FILE *tmp_file;
21 strcpy(tmp_name, "magnetic_and_pressure.dat");
22 //De momento solamente se toma en cuenta la componente z del
23 campo magnetico, por lo que esta se asigna al valor del campo
24 magnetic_field = bz;

```

```

21
22     if(magnetic_true != magnetic_field)
23     {
24         tmp_file = fopen(tmp_name,"a");
25         magnetic_true = magnetic_field;
26         printf("magnetic_field=%le\n",magnetic_field);
27         fprintf(tmp_file, "%le %le\n", 0.0, xi*magnetic_field/(8*M_PI
28         ));
29         fclose(tmp_file);
30     }
31     first_time = 1;
32     //Esta es la ecuacion resultante con la componente del campo
33     //magnetico (xi*magnetic_field/(8*M_PI))
34     B = 1.0+R+Y+Z+( (0.5*pow(vt,2.0)*(1.0+4.0*Y)*mH)/(kboltz*T)) + xi
35     *magnetic_field/(8*M_PI);
36
37     //B = 1.0+R+Y+Z+( (0.5*pow(vt,2.0)*(1.0+4.0*Y)*mH)/(kboltz*T));
38     //Esta era la ecuacion antes de ser modificada
39
40     return exp(log(GMH) - log(kboltz*T) + log(1.0+4.0*Y) - log (B));
41 }
42 /*-----*/

```

nlte.h En el encabezado de la libreria de NLTE (non local thermodynamic equilibrium) se modifica para aceptar el campo magnetico

```

1 //Se agregan las componentes x, y, z y xi para ser introducidas en
2 //la ecuacion de estado
3 double f_hydro(double Y, double R, double Z, double T, double vt,
4 double bx, double by, double bz, double xi);
5 void NLTE(Model *model, double error, int hydro, double pz1, double
6 fz1, double dx, int chromospheric_network, int cell, int
7 magnetic);

```

Pakal.c Pakal, al ser la parte del código que "interactúa" con el usuario, es la parte que procesa la información de la terminal y la envía al resto del código, tomando como entrada de la terminal los valores amplitud, intensidad y alpha, que son respectivamente los valores que se introducirán al campo magnético. Amplitud: La amplitud del campo Intensidad: La intensidad del campo Alpha: Ángulo entre el nacimiento del campo y la línea de visión a la que se desea calcular

```

1 /*-----*/
2 //campo magnetico
3 double B_amplitude = 0, B_intensity = 0, B_alpha = 0;
4 int magnetic = 0;
5 //componente de campo magnetico
6 if (strcmp(comando, "-B") == 0) {
7     sprintf(comando, "%s", argv[++i]);
8     if (sscanf(comando, "%lf\n", &B_amplitude) > 0) {
9         sprintf(comando, "%s", argv[++i]);
10        if (sscanf(comando, "%lf\n", &B_intensity) > 0) {
11            sprintf(comando, "%s", argv[++i]);
12            if (sscanf(comando, "%lf\n", &B_alpha) > 0) {
13                magnetic=1;
14            }
15        }
16        else{
17            imprimeInstrucciones();
18            return 0;
19        }
20    }
21 }

```

```

20     else{
21         imprimeInstrucciones();
22         return 0;
23     }
24 }
25 else{
26     imprimeInstrucciones();
27     return 0;
28 }
29 }
30 /*-----*/
31
32 if (!(compute_ion_profile)) {
33     if (hydro) {
34
35         sprintf(comando,"rm data/atmosphere/chromosphere/average/*.dat"
36 );
37         system(comando);
38         printf("Computing hydrostatic atmosphere.\n");
39
40         if(magnetic) {
41             sprintf(comando,"jaguar/jaguar %s -hydro -B %le %le %le",
42 atm_model, B_amplitude, B_intensity, B_alpha);
43         }
44         else{
45             sprintf(comando,"jaguar/jaguar %s -hydro",atm_model);
46         }
47
48         system(comando);
49
50         printf("Ready\n");
51         return 0;
52     }else{
53         printf("Using previous ion profiles.\n");
54     }
55 }else{
56     if (chromosnet) {
57         printf("Computing ion profiles CN activated.\n");
58         sprintf(comando,"rm data/atmosphere/chromosphere/chromosnet/
59 cell/*.dat");
60         system(comando);
61         sprintf(modelCell,"%s-CELL",atm_model);
62         printf("Computing %s \n", modelCell);
63         sprintf(comando,"jaguar/jaguar %s -cn 1",modelCell);
64         printf("%s\n",comando);
65         system(comando);
66         printf("Ready\n");
67         printf("Computing ion profiles.\n");
68         sprintf(comando,"rm data/atmosphere/chromosphere/chromosnet/net
69/*.dat");
70         system(comando);
71         sprintf(modelNet,"%s-NET",atm_model);
72         printf("Computing %s \n", modelNet);
73         sprintf(comando,"jaguar/jaguar %s -cn 0",modelNet);
74         printf("%s\n",comando);
75         system(comando);
76         printf("Ready\n");
77         return 0;
78     }else{
79         printf("Computing ion profiles.\n");
80         sprintf(comando,"rm data/atmosphere/chromosphere/average/*.dat"
81 );
82     }
83 }

```

```
77     system(comando);
78     sprintf(comando, "jaguar/jaguar %s", atm_model);
79     printf("%s\n", comando);
80     system(comando);
81     printf("Ready\n");
82     return 0;
83 }
84 }
```


Chapter 3

Pruebas a la extensión de Pakal y sus Resultados

Para probar la extensión realizada al modelo computacional Pakal en esta tesis en esta tesis, se llevaron a cabo la simulaciones del comportamiento de los campos magnéticos según dos modelos distintos. Uno en forma de arcos magnéticos (Aschwanden, 2006) y otro en forma de un flujo emergente (Rees, 1978). A continuación se precisarán las características físicas que se presuponen en cada modelo; así como los resultados obtenidos para cada caso tras la simulación computacional.

3.1 Características Físicas de los modelos de prueba Arcos Magnéticos y Flujo Emergente

Cabe señalar que se eligieron estos dos modelos de campos magnéticos por diversas razones. Primeramente, se utilizaron los supuestos de los Arcos Magnéticos debido a que en algunas observaciones del experimento VAULT, se observaron pequeñas y relativamente frías estructuras cromosféricas ($7-9 \times 10^3 \text{K}$) (Vourlidas, Sanchez, and Landi, 2010); las cuales, hasta el momento, han sido las más pequeñas y con menor temperatura encontradas (véase Anexo 5.1). El origen de estas estructuras aún son un misterio, pero se ha teorizado que podrían ser loops fríos (Vourlidas, Sanchez, and Landi, 2010). El modelo de arcos magnéticos intenta representar estos loops fríos. Por su parte, se realiza la simulación computacional bajo el modelo de campos magnéticos según la teoría de Flujos Emergentes (Rees, 1978) porque algunas observaciones (Bellot and Orozco, 2019) parecen proveer de evidencia de que los campos magnéticos se pueden comportar según lo descrito por la teoría concerniente.

3.1.1 Arcos Magnéticos

Para este modelo el programa utiliza 3 parámetros de entrada: (1) la altura con respecto a la base de la fotosfera donde nace el campo magnético, (2) el momento magnético, y (3) el parámetro α . Por medio de trigonometría, se encuentra además la relación entre los parámetros antes mencionados; obteniéndose y los

valores r y θ (véanse Figura 3.1 y Figura 3.2). A continuación se detallan las propiedades físicas pertinentes para este modelo.

Los siguientes 3 valores son los que toma como entrada el programa Pakal, por lo que pueden ser modificados por el usuario.

Altura de nacimiento del campo (l). Significa la distancia desde el centro del sol hasta el punto donde nace el arco magnético (el conductor enterrado, de acuerdo al modelo de arcos magnéticos. Ver Figura 3.1). El valor utilizado es un supuesto arbitrario bajo parámetros deductivos según características de la fotosfera. Particularmente, debido a que el modelo de arcos magnéticos asume que la fuente de este campo es un conductor, se deduce que éste tendría que estar enterrado debajo de la superficie de la fotosfera, ya que si estuviera por encima podría ser observado con diferentes tecnologías (como VAULT). Por lo tanto, se consideró que el conductor existe entre 150 km debajo.

Momento magnético (m). Es la fuerza y orientación magnética de un imán o cualquier objeto que produce un campo magnético. Para el momento magnético se utilizó un valor de $2.5964 \times 10^{12} \text{Mx}$ (solar_chromosphere). Este valor ha sido probado empíricamente, y demostró ser observacionalmente aproximado a los valores teóricos, sin embargo es un parámetro que el código toma como entrada y puede ser variado.

alpha (α). Se refiere al ángulo que se forma entre el nacimiento del arco magnético y el punto que se desea calcular, tomando como referencia base el centro solar (Ver Figura 3.1). Este valor fue calculado de tal forma que Theta arrojará un número muy cercano a 92° .

Los siguientes valores son valores que se calculan por el mismo programa Pakal y son invisibles para el usuario, sin embargo son utilizados para los cálculos del campo magnético.

R_\odot representa al radio solar y se toma un redondeo a $6.96 \times 10^8 m$.

h. Representa la distancia desde el punto cuyo campo magnético se busca calcular hasta el centro solar, menos el radio solar (Ver Figura 3.1). Este valor se toma según lo arrojado por el código Pakal sin la extensión propuesta en esta tesis.

Theta (θ). Es el ángulo que se forma entre la base del nacimiento del arco y el punto que se desea calcular. Las pruebas para el ángulo Theta utilizado fue seleccionado arbitrariamente en 92° para poder reflejar el mayor cambio determinable en el campo magnético (según el modelo de Arcos Magnéticos) dada la resolución computacional utilizada (8 bytes de un double del lenguaje C). Teóricamente el mayor cambio en un campo magnético ocurre en el ángulo de 90° , pero la intensidad del campo magnético resulta indeterminado con este valor de Theta según la ecuación de la intensidad del campo (CORREGIR refiérase a Anexo 3); además debido al redondeo de valores y a las grandes magnitudes utilizadas, los valores arrojados entre 89 y 91 generaron también valores indeterminados. Sin embargo el software está preparado para recibir cualquier valor. La relación entre este ángulo y el ángulo α que es el que utiliza Pakal fue deter-

minado por la ley de senos con las siguientes ecuaciones:

$$\frac{r}{\text{sen}(\alpha)} = \frac{d}{\text{sen}(\omega)}$$

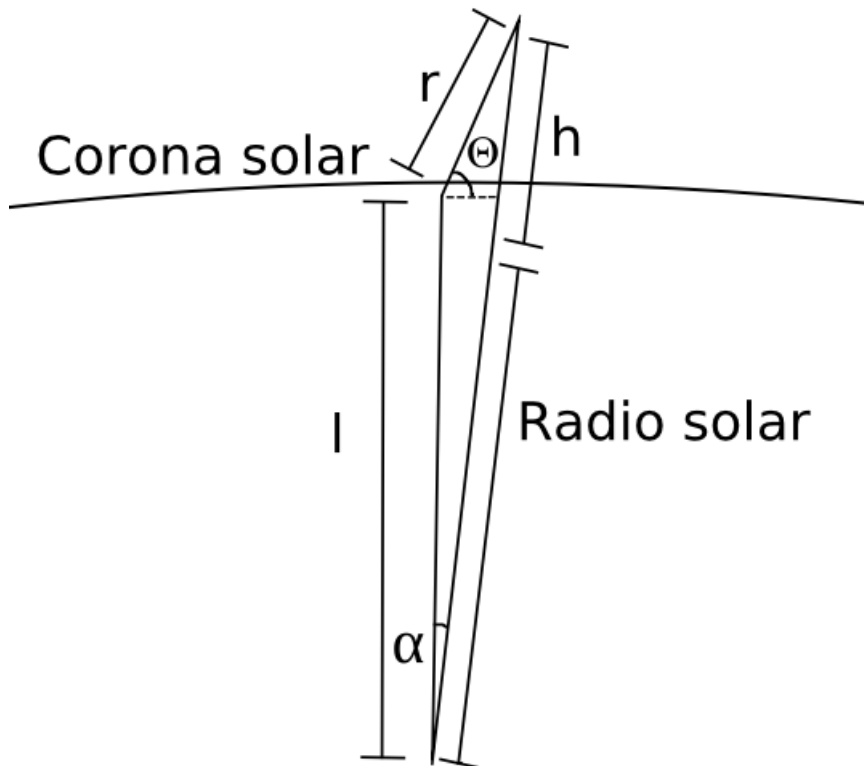
$$\omega = \text{sen}^{-1}\left(\frac{(d)(\text{sen}(\alpha))}{r}\right)$$

$$\alpha + 90 + \theta + \omega = 180$$

$$\theta = 90 - \alpha - \omega$$

r. Representa la distancia medida en línea recta desde el nacimiento del campo magnético hasta el punto cuyo valor de campo se desea calcular. Este valor se calcula de acuerdo de valor h por medio de la ley de cosenos con la fórmula

$$r = \sqrt{(h + R)^2 + (d)^2 - 2(h + R)(d)\cos(\alpha)}$$



Representa la geometría que se utiliza para adaptar los parámetros del arco magnético.

`<arco_geometria>`

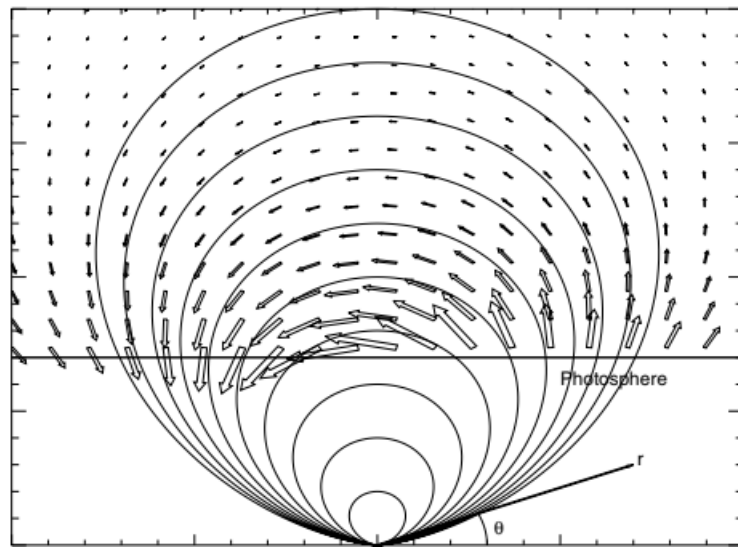


Imagen tomada del Aswanden. Representa el modelo de arco magnético, donde la longitud de las flechas indican la intensidad del campo, y la dirección en la que apuntan corresponde a la del campo.

(arco_magnetico)

3.1.2 Flujo Emergente

Escala de altura (h). Es un valor empírico que permite determinar qué tanto se difumina el campo magnético con respecto a la altura. Su valor fue seleccionado de tal forma que los rangos de sus valores caigan dentro de los empíricos que han sido observados. Concretamente, el rango de observaciones empíricas va de 500 a 1000G (**VAULT**) y para realizar la prueba se tomó aleatoriamente el de valor de 200.

Flujo magnético (phi). Representa el campo magnético total que pasa por un área determinada. Para realizar las pruebas a la extensión computacional propuesta, se tomó como valor del flujo magnético $\phi = 2.8 \times 10^{18} \text{Mx}$. Si bien existe debate sobre las aproximaciones más precisas con respecto a este valor (Meunier, 2018); se consideró éste debido a que los resultados del radio inicial del tubo de flujo del modelo de Flujo Emergente fueron coherentes con la teoría (366km (Meunier, 2018) y (**VAULT**)) al utilizarlo.

Intensidad de campo inicial en su base (B0). Se refiere al valor que toma el campo magnético en la base de su nacimiento, o desde el punto donde se desea comenzar a medir. Los cálculos fueron generados considerando distintos valores de campo magnético (0, 500, 1000 y 1500 Gauss), dado que en la literatura se ha dado este valor entre 1000 y 1500 Gauss. La fuerza de la red cromosférica es 1 kG a $z=0$ con una altura de 500km de acuerdo a Judge (2006 CORREGIR).

3.2 Resultados

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos de las simulaciones según los modelos de arcos magnéticos y flujo emergente.

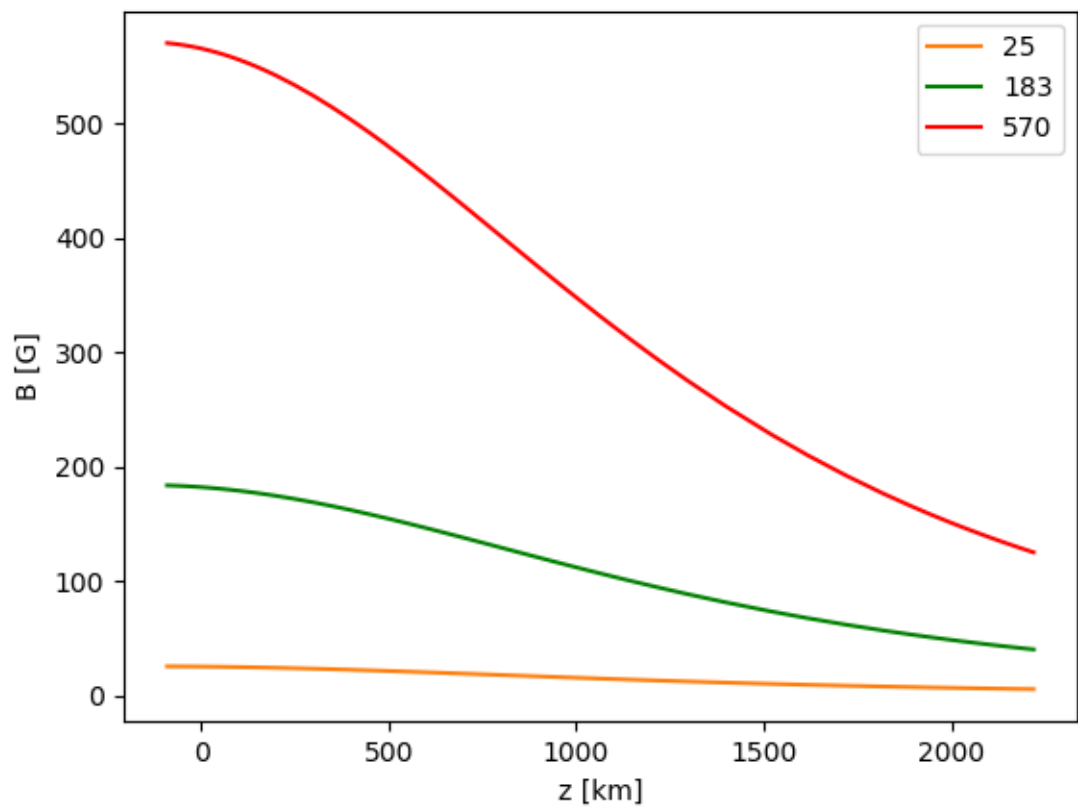
3.2.1 Micro arco magnetico

El modelo de arcos magnéticos es uno de los modelos más simples y más irreales para simular el comportamiento solar. Sin embargo, a su vez, es un modelo que facilita la comprensión y visualización de la morfología del campo magnético de una manera pedagógica.

Los primeros resultados que se presentan, son aquellos concernientes a las pruebas de la codificación del modelo de arcos magnéticos para obtener los perfiles de los propios arcos magnéticos. Particularmente, se realizaron pruebas en los campos magnéticos iniciales de 0, 25, 183 y 570G. Con estos valores se obtuvo un perfil del campo magnético a lo largo de la altura; cuyos resultados se pueden apreciar en la Figura 3.3. Como se puede observar, los valores de los campos magnéticos arriba de los 1,000 km terminan siendo relativamente pequeños, independientemente del valor de entrada. Lo anterior va acorde a la teoría del campo magnético de la cromósfera.

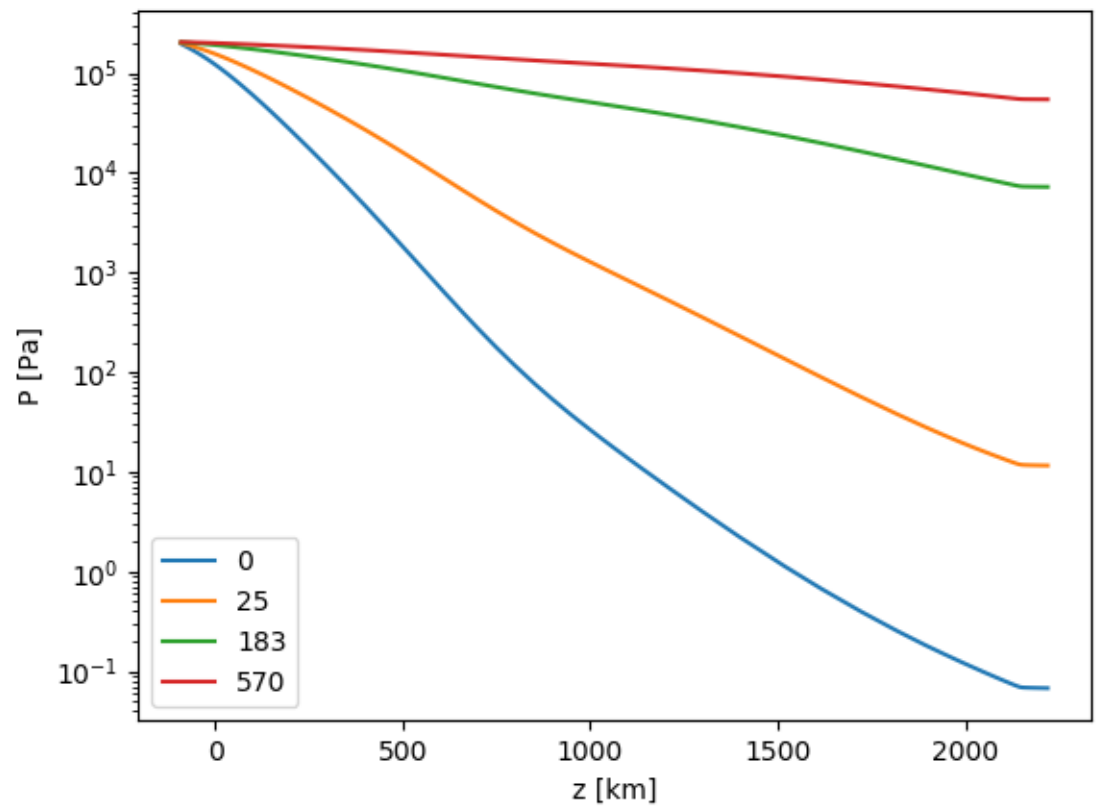
Una vez obtenidos los perfiles de los arcos magnéticos, ya se puede ajustar la presión de la cromósfera a diferentes alturas. Los resultados obtenidos a través de la extensión al código Pakal se representan en la Figura 3.4. En ella se puede ver que conforme más grande es el campo magnético, la presión decreciente menos, manteniéndose a un valor más alto.

Después de obtener los resultados de la presión de la cromósfera, se pueden calcular los valores de la densidad del hidrógeno presente en la cromósfera. Estos resultados se pueden apreciar en el gráfico 3.5. Como se puede observar el comportamiento general es que a mayor campo magnético menor es el gradiente de la densidad. En adición a estos resultados, se muestran también dos comparativos entre los resultados de las densidades para diferentes campos magnéticos. Estos últimos resultados se grafican en la Figura 3.6 y en la Figura 3.7.



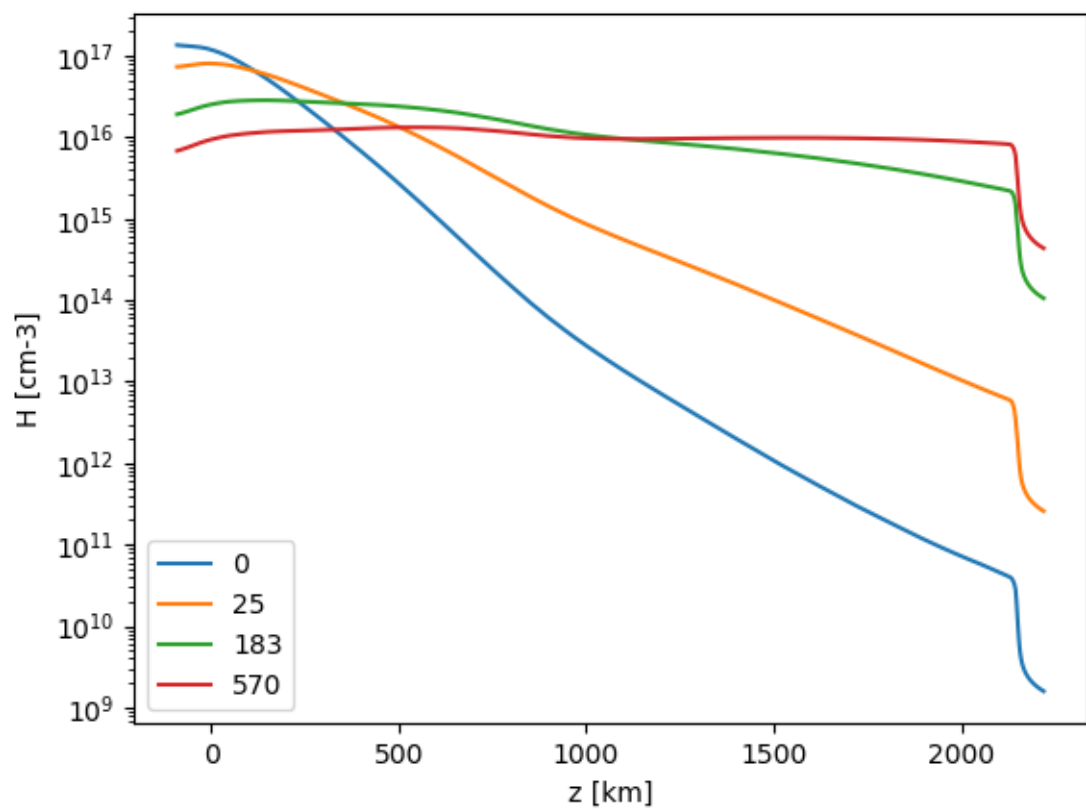
En esta gráfica se describe el comportamiento de la intensidad del campo magnético.

$\langle \text{am_Campo_Magnetico} \rangle$



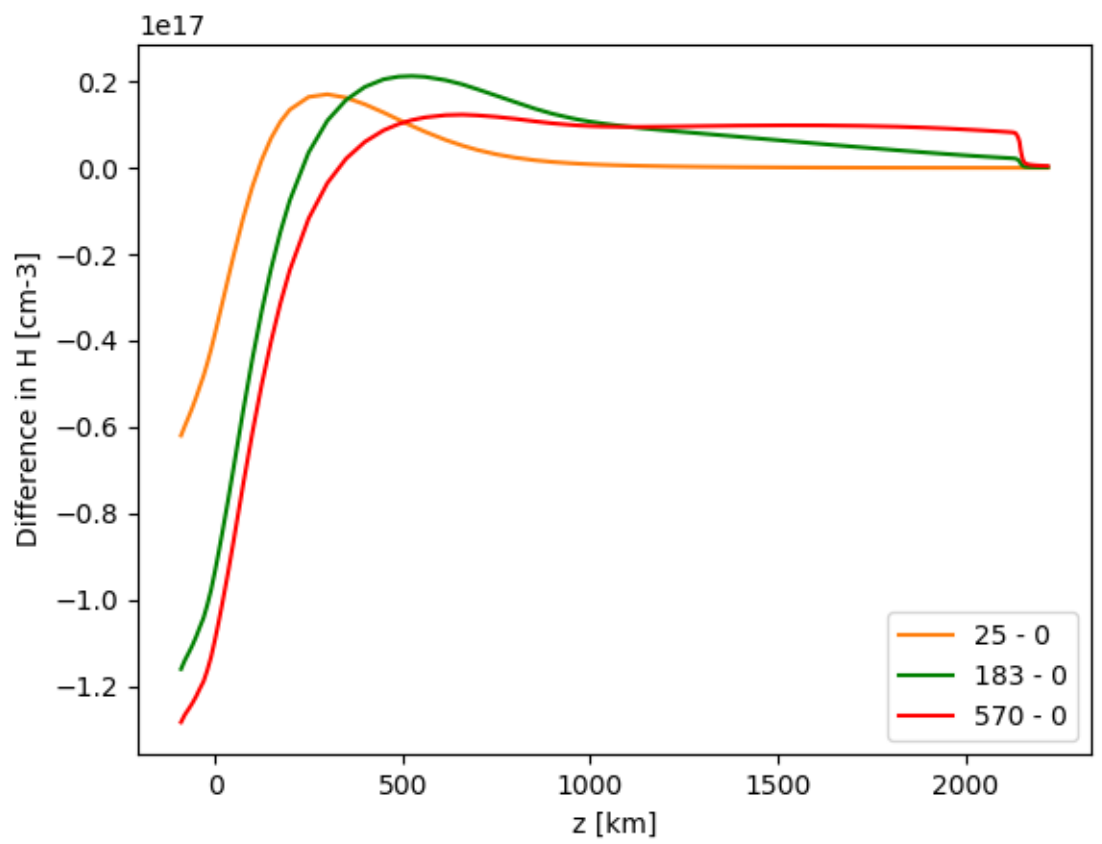
Aquí se presentan cada una de las salidas de las simulaciones con los distintos valores de campo magnético según los resultados anteriores.

(am_Presion)



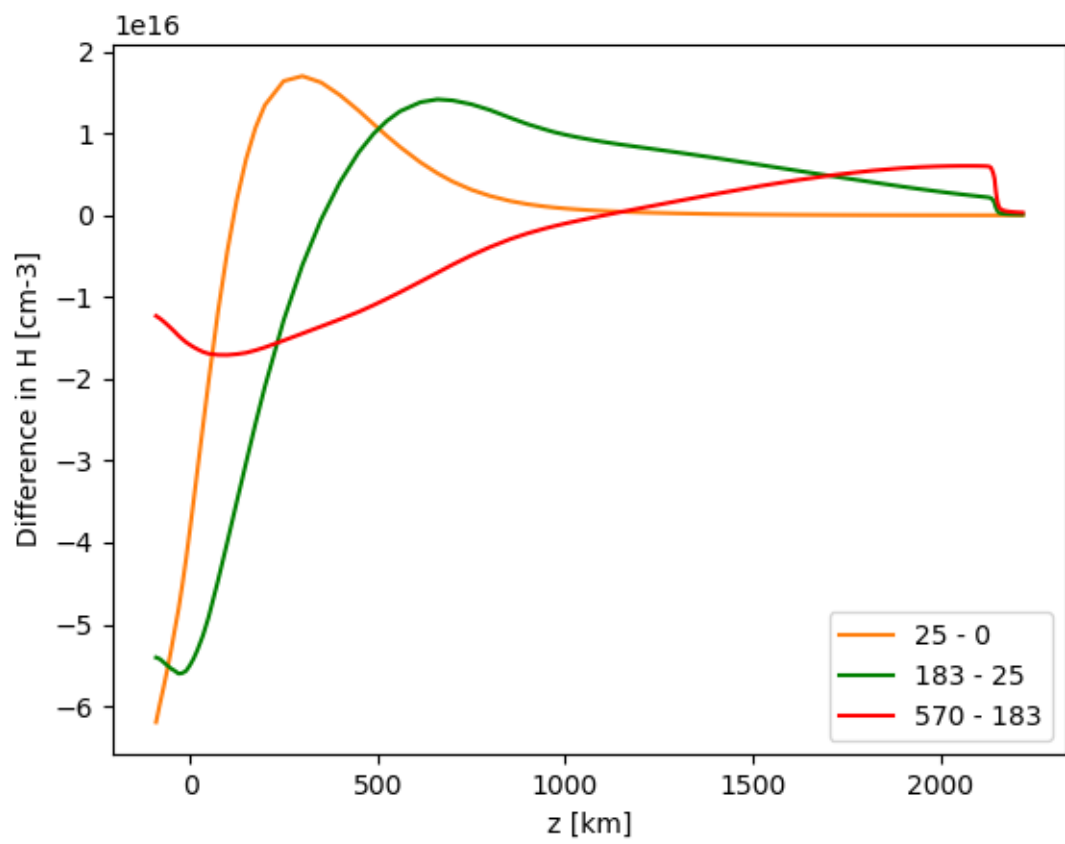
En esta figura se grafican el perfil de densidades de hidrógeno.

am_perfil_de_densidades)



Aquí se muestra una comparación entre las diferentes salidas de las densidades del programa.

(am_diferencias_absolutas)



Aquí se muestra un diferencial de cada uno de las salidas de las simulaciones contra las salidas de la simulación con un valor más bajo.

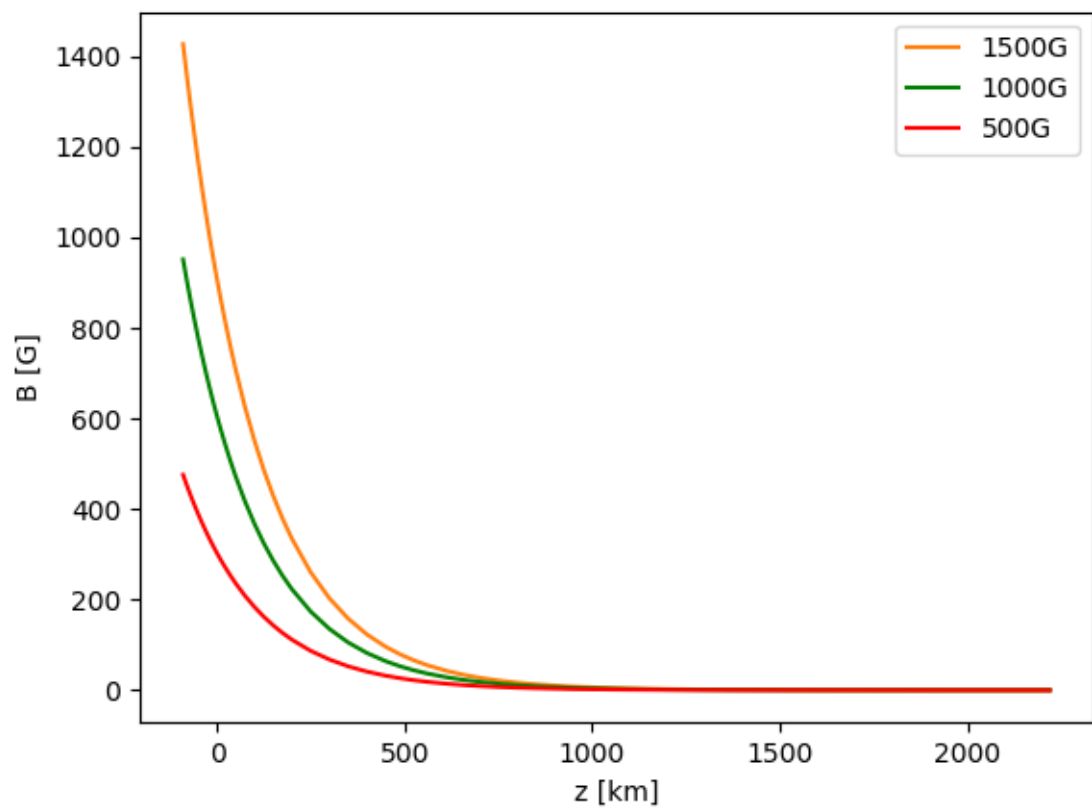
a_diferencias_relativas)

3.2.2 Flujo emergente

El modelo de Flujo emergente es más complejo que el modelo de arcos magnéticos, lo que lo hace físicamente más plausible. Sin embargo, es un modelo que no provee de explanantes a la generación de los campos magnéticos.

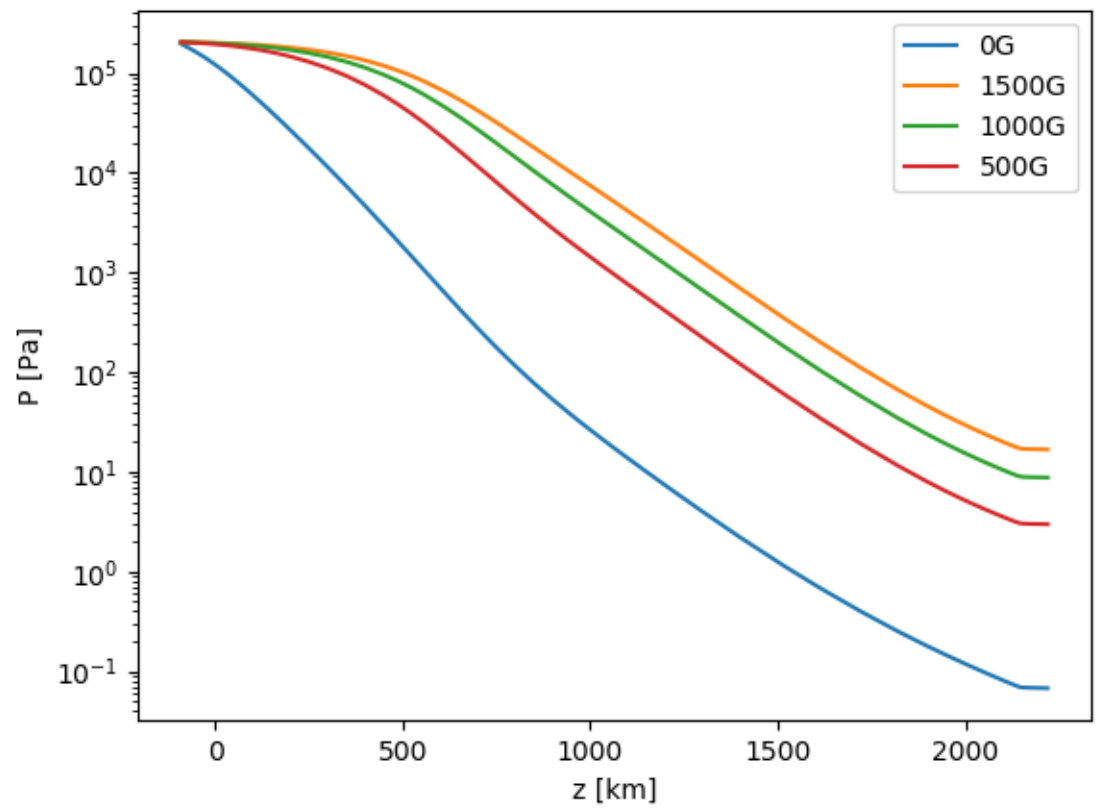
Al igual que con el modelo anterior. Primero se calculó el perfil de los campos magnéticos según esta teoría. Para esto, y como se explicó en secciones anteriores, se utilizaron los valores de 500, 1000 y 1500G. Como se puede apreciar en la Figura 3.8, la intensidad del campo magnético decae mucho más rápido en comparación con el modelo anterior, a tal grado que para los 1,000km ya es prácticamente despreciable su valor. Este fenómeno es aún más acertado a las teorías pertinentes.

Similarmente a lo realizado en el modelo de Flujo emergente, una vez obtenidos los valores del perfil de los campos magnéticos se procedió a calcular la presión cromosférica. En este modelo se puede entrever un desplazamiento en la caída de la presión de la cromósfera (Véase Figura ??). A su vez, con este nuevo valor, se obtuvo el perfil de densidad, el cual presenta un desplazamiento en el gráfico para cada valor de campo. Finalmente, una vez obtenidos todos estos resultados, también se procedió a realizar dos comparativos entre los resultados de las diferentes perfiles de densidades. Los resultados de estas comparativas se pueden apreciar en la Figura 3.11 y Figura 3.12.

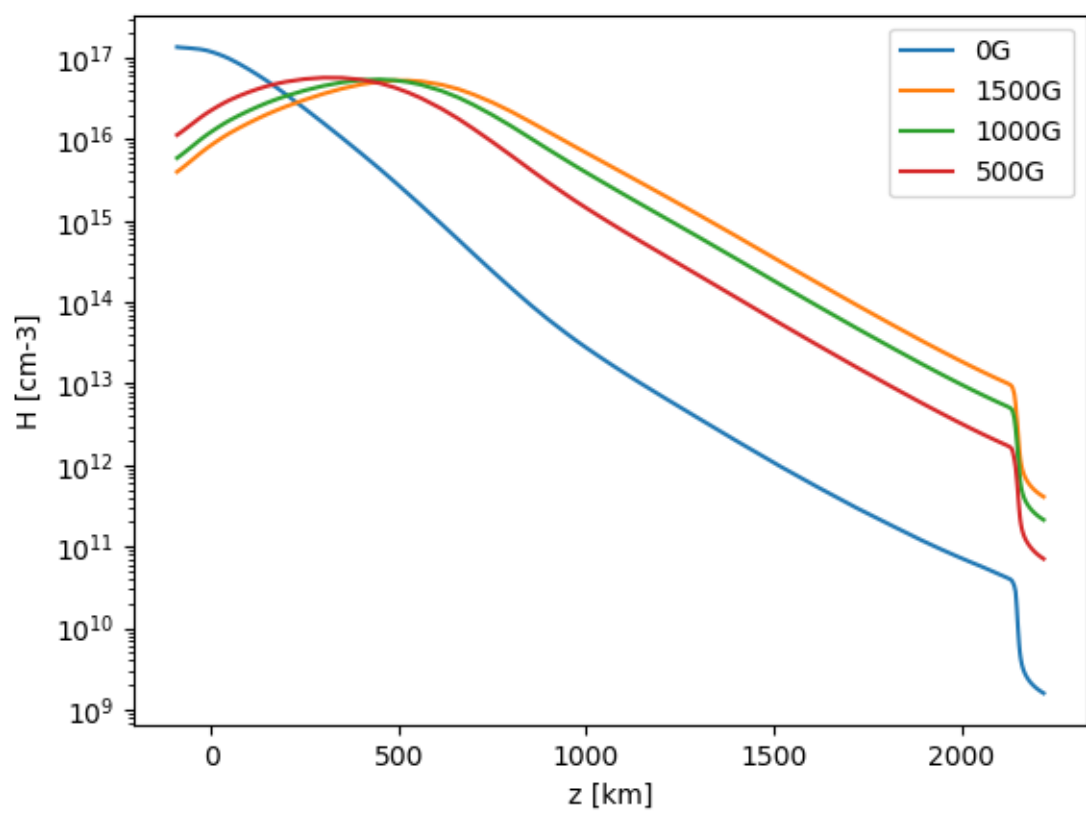


En esta gráfica se describe el comportamiento de la intensidad del campo magnético.

`<fe_Campo_Magnetico>`

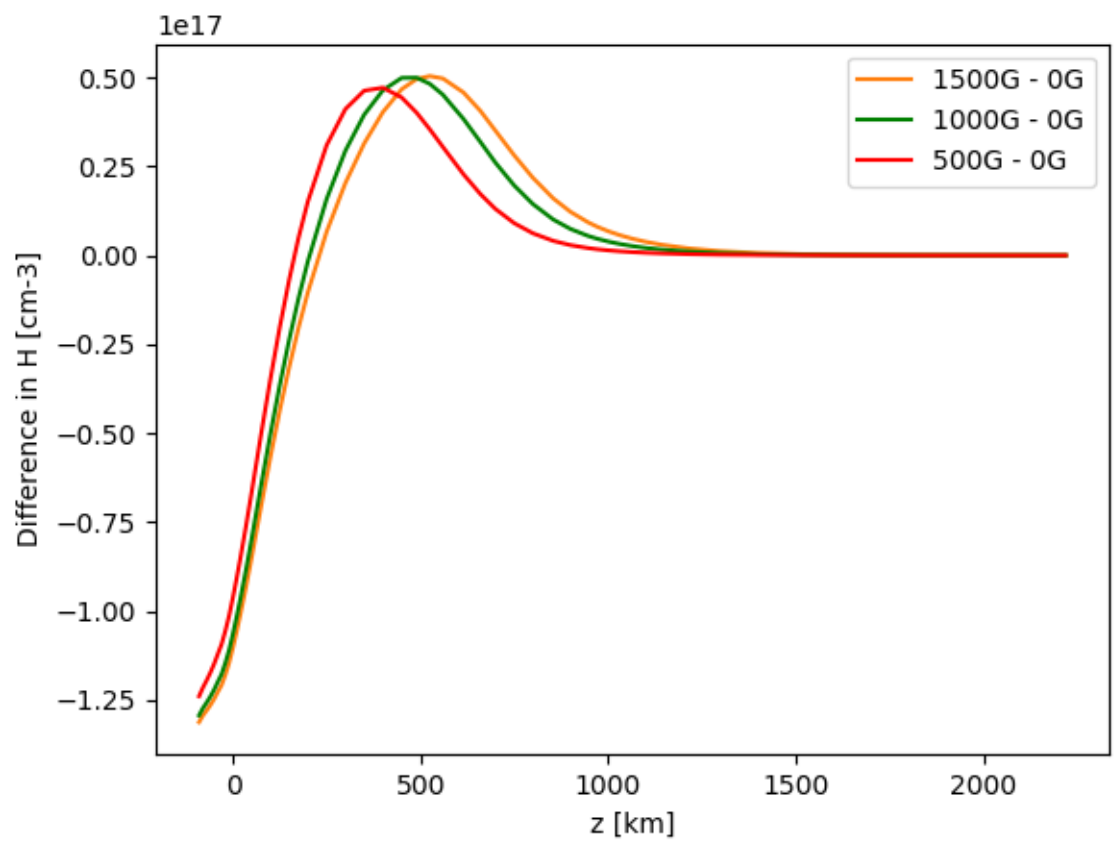


Aquí se presentan cada una de las salidas de las simulaciones con los distintos valores de campo magnético según los resultados anteriores.



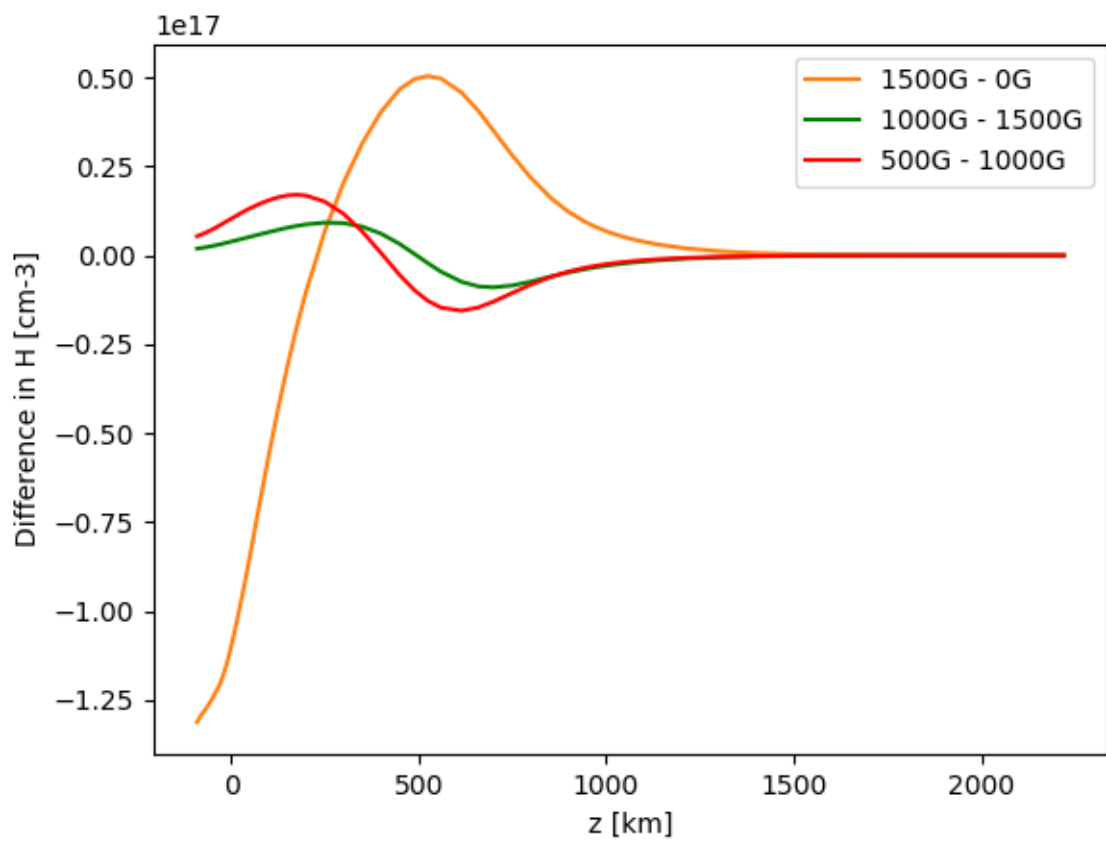
En esta figura se grafican el perfil de densidades de hidrógeno.

e_perfil_de_densidades)?



Aquí se muestra una comparación entre las diferentes salidas de las densidades del programa.

(fe_diferencias_absolutas)



Aquí se muestra un diferencial de cada uno de las salidas de las simulaciones contra las salidas de la simulación con un valor más bajo.

e_diferencias_relativas)

Chapter 4

Discusión y conclusiones

Comparación entre ambos modelos, discusion y resultados
aproximación teórica

Chapter 5

Anexos

Structure	Intensity [LRI] [†]	Radiance [10 ¹² $\frac{ergs}{cm^2 s sr}$]	Opt. Depth <i>Log</i>	T [10 ³ K]	Pressure [dyn/cm ²]
Quiet Sun	0.5 — 5	3.3 — 32.5	4 — 5	8 — 10	0.1 — 1
Quiet Sun Prom.	0.2 — 1.4	1.8 — 9.5	6 — 3	7 — 9 (20)*	1 (0.1)*
Plage	5.7 — 12	37.5—75.0	4	10—13	1
Plage Prom.	1—5	6.7—32.5	3—0	8—40	0.1—1
Offlimb Prom.	0.8—1.1	5.8—7.8	3—0	15—80	0.1—1
Offlimb Loops	0.4—0.5	2.8—3.8	0	30—40	0.1

Diagnóstico cualitativo del plasma para varios tipos de estructuras.

*Es posible que tengan espesor óptico reducido.

[†]Ly α intensidad relativa (LRI). LRI = 1 representa la media de la región de Sol Quiet.

<tabla_flares>

Bibliography

- Aschwanden, Markus (2006). *Physics of the Solar Corona*. Springer Science & Business Media.
- Avrett, E. H. and R. Loeser (Mar. 2008). “Models of the Solar Chromosphere and Transition Region from SUMER and HRTS Observations: Formation of the Extreme-Ultraviolet Spectrum of Hydrogen, Carbon, and Oxygen”. In: *apjs* 175, pp. 229–276. DOI: 10.1086/523671.
- Bellot, Luis and David Orozco (2019). “Quiet Sun magnetic fields: an observational view”. In: *Living Reviews in Solar Physics*.
- De la Luz, V. (2011). “Modelación Tridimensional de la Atmósfera Solar para el Estudio de su Emisión en Radio”. PhD thesis.
- De la Luz, V. et al. (June 2010). “Pakal: A Three-dimensional Model to Solve the Radiative Transfer Equation”. In: *apjs* 188, pp. 437–446. DOI: 10.1088/0067-0049/188/2/437. arXiv: 1106.2180 [astro-ph.SR].
- Eddy, J. A. and R. Ise (1979). “New Sun: The Solar Results From Skylab. NASA SP-402”. In: *NASA Special Publication* 402.
- Fleishman, G. and V. Melnikov (2003). “Gyrosynchrotron emission from anisotropic electron distributions”. In: *The Astrophysical Journal*.
- Fontanela, J. M. (1990). “Energy balance in the solar transition region I. hydrostatic thermal models with ambipolar diffusion”. In: *Astronomy and Astrophysics*.
- Fontenla, J. M., E. H. Avrett, and R. Loeser (1990). “Energy Balance in the Solar Transition Region. I. Hydrostatic Thermal Models with Ambipolar Diffusion”. In: *The Astrophysical Journal*.
- (Mar. 1993). “Energy balance in the solar transition region. III - Helium emission in hydrostatic, constant-abundance models with diffusion”. In: *apj* 406, pp. 319–345. DOI: 10.1086/172443.
- Hathaway, D. (2014). *Chromospheric Features*. URL: <https://solarscience.msfc.nasa.gov/feature2.shtml>.
- Jackson, John David (1962). *Physics of the Solar Corona*. John Wiley and Sons.
- Lin, Haosheng and Thomas Rimmele (1999). “The granular magnetic fields of the quiet sun”. In: *The Astrophysical Journal*.
- Loper, Robert D. (2019). “Carrington-class events as a great filter for electronic civilizations in the drake equation”. In: *Astronomical Society of the Pacific*.
- Loukitcheva, Maria A. and Valery G. Nagnibeda (2000). “Radio Emission of Solar Chromosphere at Millimeter Wavelengths”. In: *European Space Agency*.
- Mariska, John T. (1993). *The Solar Transition Region*. Cambridge Astrophysics Series.

- Meunier, N. (2018). “Solar chromospheric emission and magnetic structures from plages to intranetwork: Contribution of the very quiet Sun”. In: *Astronomy and Astrophysics*.
- Priest, Eric (2014). *Magnetohydrodynamics of the Sun*. Cambridge University.
- Rees, Seemel (1978). “Line Formation in an Unresolved Magnetic Element: A Test of the Centre of Gravity Method”. In: *Astronomy and Astrophysics*.
- Vernazza, J. E., E. H. Avrett, and R. Loeser (Apr. 1981). “Structure of the solar chromosphere. III - Models of the EUV brightness components of the quiet-sun”. In: *apjs* 45, pp. 635–725. DOI: 10.1086/190731.
- Vourlidas, A., B. Sanchez, and E. et al. Landi (2010). “The structure and Dynamics of the Upper Chromosphere and Lower Transition Region as Revealed by the Subarcsecond VAULT Observations, Astronomy and Astrophysics”. In: *Solar Physics*.