

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**

DEPARTAMENTO DE EMFTEL



**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

Código de TFG: ETE50

Tormentas Geomagnéticas y su Impacto en la Biosfera  
Geomagnetic Storms and Their Impact on the Geomagnetic Field

Supervisor: José Miguel Miranda Pantoja

**Juan Manuel Hurtado Restrepo**

Grado en Física

Curso académico 2024-25

Convocatoria febrero

---

## Resumen:

Las tormentas geomagnéticas son fenómenos naturales recurrentes en nuestro planeta, con efectos que repercuten especialmente en latitudes altas. En los últimos años hemos sido testigos de un renovado interés por el estudio de estos eventos, motivado en gran medida por el impacto que tienen sobre todo en la tecnología satelital, la aeronavegación y en los sistemas eléctricos. Estos esfuerzos han desembocado en una estrecha colaboración entre sectores industriales y la academia, materializada en el crecimiento de una red global de centros dedicados a la investigación, pronóstico y alerta de amenazas.

Existen también, numerosas publicaciones en las que se sugiere que las tormentas magnéticas pueden suponer un riesgo directo para seres vivos, provocando desde cambios en los patrones migratorios de los animales y alteración en el crecimiento de las plantas, hasta exacerbar condiciones cardíacas o neurológicas preexistentes en las personas.

Ante la seria amenaza que pueden representar este tipo de perturbaciones magnéticas, gobiernos y empresas han impulsado el desarrollo de productos especializados, destinados tanto a prevenir como a proteger las infraestructuras, ecosistemas y comunidades; algunos de estos incluso incorporan herramientas de última generación como la inteligencia artificial. Como parte de este proyecto de TFG, hemos apostado por diseñar, construir y testar un prototipo de radiotelescopio de bajo costo que nos permita identificar señales de radiación compatibles con un escenario de tormenta geomagnética.

## Abstract:

Geomagnetic storms are natural phenomena that occur frequently on our planet, with effects that are particularly felt at high latitudes. In recent years we have witnessed a renewed interest in the study of these events, motivated largely by the impact they have on satellite technology, aircraft navigation and electrical systems. These efforts have led to close collaboration between industrial sectors and academia, materialized in the growth of a global network of centers dedicated to research, forecasting and threat warning.

There are also numerous publications suggesting that geomagnetic storms can pose a direct risk to living beings, causing changes in the migratory patterns of animals and alterations in plant growth, as well as exacerbating pre-existing cardiac or neurological conditions in people.

Faced with the serious threat that these types of magnetic disturbances can represent, governments and companies have promoted the development of specialized products aimed at both preventing and protecting infrastructure, ecosystems and communities; some of these even incorporate cutting-edge tools such as artificial intelligence. As part of this TFG project, we have decided to design, build and test a low-cost radio telescope prototype that will allow us to identify radiation signals compatible with a geomagnetic storm scenario.

## Keyword:

Tormentas geomagnéticas, fulguraciones, eyecciones de masa coronal (EMC), campo magnético interplanetario (IMF), viento solar, ionosfera, magnetosfera, redes de detección y alerta, NOAA, ESA, space weather, space climate, sistema de engranajes, sensores, sistema de soporte, motoreductores, antena log-periódica, medidor de potencia, controlador.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
1.1. Objetivos . . . . .	2
1.2. Metodología . . . . .	2
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>2</b>
2.1. Campo Magnético . . . . .	2
2.2. Tormentas Geomagnéticas . . . . .	6
2.3. Redes de detección . . . . .	8
2.3.1. Mundo . . . . .	8
2.3.2. Europa . . . . .	9
2.3.3. España . . . . .	10
<b>3. Efectos de las Tormentas Geomagnéticas</b>	<b>11</b>
3.1. Efectos Directos . . . . .	11
3.1.1. Seres humanos . . . . .	12
3.1.2. Plantas y Animales . . . . .	12
3.2. Efectos Indirectos . . . . .	12
<b>4. Montaje Experimental</b>	<b>13</b>
4.1. Sistema de soporte . . . . .	13
4.2. Sistema de engranajes . . . . .	13
4.3. Motores . . . . .	13
4.4. Antena y medidor de potencia . . . . .	14
4.5. Sensores . . . . .	14
4.6. Controlador . . . . .	15
<b>5. Análisis</b>	<b>15</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>17</b>
<b>Referencias</b>	<b>17</b>

## 1. Introducción

El presente documento es la memoria del proyecto de TFG *Tormentas geomagnéticas y su impacto en la biosfera*, en el que hemos querido abordar tres líneas clave del complejo fenómeno geofísico de las *tormentas geomagnéticas*. Concretamente, los puntos a los que hacemos referencia son: las redes de detección y alerta, los efectos sobre los seres vivos y sus entornos, y los instrumentos de medición.

A fin de tratar con propiedad los temas que nos hemos propuesto abarcar, hemos definido una serie de objetivos puntuales así como también una metodología que nos ayudarán delimitar el camino a seguir para cumplir con los propósitos que nos hemos marcado.

### 1.1. Objetivos

- Conocer los fundamentos de la detección y caracterización experimental de las tormentas solares y las perturbaciones que producen en el campo geomagnético.
- Conocer los efectos que producen las tormentas solares en la biosfera.
- Familiarizarse con las redes de detección y alerta de las tormentas solares.
- Construir un receptor para monitorizar la radiación solar a frecuencias de microondas.

### 1.2. Metodología

- Emplearemos como punto de partida las referencias de la ficha del TFG para elaborar la revisión bibliográfica de los efectos de las tormentas geomagnéticas.
- Utilizaremos herramientas tales como *Web of Science* para la selección de las referencias bibliográficas del trabajo.
- Registraremos tras una exhaustiva búsqueda en la web, las principales redes de detección y alerta dispersas por el globo, tomando como ejemplo el trabajo realizado por agencias de renombre como la ESA o la NOAA.
- Realizaremos un curso de formación en receptores de radiofrecuencia, que servirá de base para el diseño y construcción de un prototipo de radiotelescopio con el que efectuaremos medidas orientadas a monitorizar actividad solar.

## 2. Marco Teórico

En esta sección trataremos algunos conceptos físicos fundamentales, que más adelante nos serán de gran utilidad para entender el contexto del problema que nos hemos propuesto abordar.

### 2.1. Campo Magnético

Desde la antigüedad es conocida la existencia del campo magnético de la Tierra, gracias a las aplicaciones desarrolladas para la navegación entre las que se encuentra la brújula. Siglos más tarde, entre el XVII y el XVIII, se sientan los fundamentos del geomagnetismo de la mano de científicos como H. Gillibrand quien fue de los primeros en observar las variaciones del campo magnético, o E. Halley que publicó los primeros mapas magnéticos entre 1698 y 1700. Algunos años después S. Poisson realizaría una contribución capital al extender la *teoría general del potencial* en un intento

por formalizar aspectos ya conocidos sobre el campo magnético [95].

La investigación de Poisson, conduciría a un modelo vectorial de campo magnético que en ausencia de fuentes es conservativo, es decir que existe una función potencial  $V$  satisfaciendo:

$$\mathbf{B} = -\nabla V \quad (1)$$

El campo escalar  $V$ , puede descomponerse como la suma de dos contribuciones,  $V = V_{int} + V_{ext}$ , que responden al origen interno ( $V_{int}$ ) y externo ( $V_{ext}$ ) de  $\mathbf{B}$ . En particular, el potencial del campo magnético externo en coordenadas esféricas (radial  $r$ , longitud  $\lambda$  y colatitud  $\theta$ ) tiene la siguiente apariencia [48], [88]:

$$V_{ext}(r, \lambda, \theta) = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{r}{a}\right)^n Y_n^m(\lambda, \theta) \quad (2)$$

donde

$$\begin{cases} Y_n^m(\lambda, \theta) = (g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda)) P_n^m(\cos(\theta)) & (\text{armónicos esféricos}) \\ P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} (x^2 - 1)^n & (\text{polinomios de Legendre}) \\ P_n^m(x) = (1 - x^2)^{m/2} \frac{d^m P_n(x)}{dx^m} & (\text{funciones de Legendre}) \\ a := 6,38 \times 10^6 \text{ m} & (\text{radio ecuatorial}) \\ g_n^m, h_n^m & (\text{coeficientes de Gauss}) \end{cases}$$

El campo geomagnético de origen externo tiene diversas fuentes, como son: la ionosfera que es una capa ionizada y conductora, la magnetosfera que rodea la Tierra y en la que el campo principal ejerce su influencia, el núcleo externo, la litosfera que para temperaturas por encima de la de Curie contribuye con fuentes de campo magnético estáticas, el propio Sol con el viento solar y el campo magnético interplanetario.

En líneas generales, podemos afirmar que el campo externo se pone de manifiesto, fundamentalmente por sus variaciones, que son de corto periodo y pueden ser muy intensas [95].

La ionosfera es una capa ionizada que se ubica a 50 km altura sobre la superficie de la Tierra. Fue propuesta originalmente por B. Stewart para explicar las variaciones observadas en el campo externo, y más tarde fue validada por los estudios de G. Marconi sobre la propagación de ondas de radio a grandes distancias.

Los estudios conducidos por A.E. Kennelly y O. Heaviside permitieron deducir la existencia de una subcapa que es la realmente responsable de reflejar las ondas electromagnéticas, ésta se conoce como  $E$ . Estudios posteriores realizados por S.J. Barnett y E.V. Appleton, confirmaron la existencia de una nueva subcapa, la llamada  $F$ . Actualmente, la ionosfera se divide en cuatro subcapas, a saber: la  $D$  que abarca el espacio de 50 a 90 km y sólo existe durante el día; la  $E$  distribuida entre 90 y 140 km y con un máximo de densidad en torno a los 110 km; y la  $F$  que se desdobra en dos, la  $F_1$  que se encuentra encasillada entre 140 y 200 km y la  $F_2$  que extiende entre 200 y 500 km. En cada una de las subcapas la concentración de partículas cargadas es característica de algunos elementos químicos que podemos encontrar en los gases atmosféricos, principalmente  $N_2$  y  $O_2$  [39], [49].

La magnetosfera es una región del espacio donde el campo magnético terrestre interactúa con el viento solar y el campo magnético interplanetario. En términos generales, podemos afirmar que en

el interior de la magnetosfera domina el campo geomagnético, mientras que en su exterior lo hace el campo interplanetario.

La magnetosfera al igual que la ionosfera se divide en subcapas, de las cuales la más externa de todas es la magnetopausa, donde el campo geomagnético es prácticamente tangencial; sobresalen también la plasmósfera y los cinturones de Van Allen.

En cuanto a la geometría de la magnetosfera, es distinta en las zonas diurna y nocturna. Las líneas de campo de la zona nocturna en altas latitudes no se cierran y son lanzadas hacia la parte opuesta a la dirección Tierra – Sol, formando la magnetocola con un radio de hasta  $60a$ ; esto genera una desprotección en las zonas polares, el llamado sumidero polar. Por su parte, las líneas de campo en la región diurna alcanzan un radio de entre  $10a$  y  $11a$  [50].

En 1958 satélites del *Explorers Program* descubrieron regiones de alta radiación con un número anómalo de partículas atrapadas. El hallazgo se produjo gracias a que el equipo de investigadores de J. Van Allen incluyó un contador de Geiger en los satélites, lo que permitió reconocer dos regiones donde se producía un recuento inusualmente alto de partículas, llegando incluso a saturar el dispositivo. Dichas regiones más tarde se llamaron cinturones de Van Allen.

A grandes rasgos, existen 2 cinturones de Van Allen, aunque uno de ellos se subdivide bajo determinadas condiciones, formando un tercer cinturón. El más cercano a la Tierra conocido como cinturón interno se encuentra a una altura de entre  $1000$  y  $3000\text{ km}$ , y contiene básicamente protones de energías que van desde los  $10$  hasta los  $100\text{ MeV}$ ; mientras que el más alejado o cinturón externo situado entre  $20000$  y  $30000\text{ km}$ , está configurado por electrones de energías en el rango de  $0,1 - 10\text{ MeV}$ .

Las partículas que sufren confinamiento magnético, se mueven en cada cinturón siguiendo una trayectoria helicoidal a lo largo de líneas del campo geomagnético y rebotando entre los puntos espejo que son los polos magnéticos. El tiempo de rebote es de  $2\text{ s}$  para los protones y de unos  $0,1\text{ s}$  en el caso de los electrones [55].

El Sol es una estrella amarilla de tipo  $G2$  capaz emitir radiación electromagnética, la mayoría en el espectro visible, pero es asimismo una fuente continua de emisión de plasma o viento solar, con explosiones y expulsiones irregulares de partículas energéticas. El conjunto de estos eventos definen la actividad solar.

Muchos de los fenómenos solares ocurren en la región más superficial, denominada fotosfera. Entre ellos cabe destacar: las manchas solares, las playas solares, las prominencias solares, las fulguraciones y las eyecciones de masa coronal (CME) [19].

El viento solar es un flujo continuo de partículas originado por la corriente de plasma liberada de la atmósfera solar. Este flujo que varía entre  $2 - 7 \times 10^{12}\text{ partículas/sm}^2$  y está constituido principalmente por protones con un pequeño porcentaje de partículas alfa con energías que van desde  $1,5$  a  $10\text{ keV}$ .

El viento solar viaja a velocidades supersónicas, que oscilan entre  $400\text{ km/s}$  (viento solar bajo) y  $750\text{ km/s}$  (viento solar alto). Este viento no es uniforme ni temporal ni espacialmente, y en presencia de otros eventos característicos de la actividad solar, como las fulguraciones, se ve perturbado aumentando su densidad y velocidad. La importancia de la influencia de las fulguraciones sobre el viento solar, reside en que éstas al llegar a la Tierra pueden desencadenar tormentas magnéticas; desde que se produce una fulguración hasta que sus efectos llegan a la Tierra a través del viento solar, pasan de media unas  $36$  horas.

El viento solar tiene además de una velocidad radial una tangencial, esto es debido a la rotación del Sol. El periodo medio de rotación es de  $27$  días, aunque el giro es más rápido en el ecuador ( $25$  días) que en los polos ( $35 - 40$  días). El viento solar está por tanto modulado por la rotación solar,

y la trayectoria que sigue al emitirse es una espiral conocida como espiral de Parker [50], [79].

El campo magnético interplanetario o IMF por sus siglas en inglés, es el campo magnético solar arrastrado por el viento solar. Se trata de un campo “congelado” con una intensidad promedio de unas  $5nT$  y a una distancia de dos radios solares, es esencialmente dipolar. Su geometría depende de la espiral de Parker y al aproximarse a la Tierra, puede tener polaridad normal o inversa, respecto a la polaridad del campo geomagnético [50], [73].

El ciclo solar es el periodo que caracteriza la actividad solar y tiene una duración aproximada de 11 años. Actualmente, nos encontramos en el ciclo número 25 que inició a finales de 2019, se prevé que el máximo se alcance a mediados de 2025 y que finalice en 2030. Este registro de la periodicidad de la actividad solar se inició con el primer ciclo en 1755, sólo un año antes el astrónomo francés Jean-Jacques D. Mairan fue el primero en sugerir una relación entre la actividad magnética terrestre y el Sol. Además del periodo de once años existen otros ciclos de mayor duración que modulan el comportamiento de la estrella, entre ellos se destacan los *cambios de polaridad en el campo magnético solar*, que es muy regular y tiene una periodicidad completa de 22 años, y el ciclo de Gleissberg cuya duración varía entre 72 y 85 años [53], [54].

Las manchas solares son regiones oscuras de baja temperatura, de aproximadamente  $4000K$  frente a las temperaturas normales que podemos encontrar en la fotosfera que varían entre  $5000K$  y  $6000K$ . Las manchas suelen presentarse en grupo y son de geometría circular con un radio medio de  $10000km$ . El número de manchas se mide con el *número de Wolf*,  $R = k(10g + f)$ , que depende del número de manchas individuales  $f$ , el número de grupos de manchas  $g$  y del factor de visibilidad del observatorio  $k$ .

A principios del siglo XX, fue el astrofísico norteamericano G. E. Hale el primero en ligar el campo magnético del Sol con las manchas solares; años más tarde T. G. Cowling explicaría que el origen de las manchas está en el campo toroidal que es arrastrado fuera de la fotosfera, produciendo un bucle en la cromosfera [25].

Las siguientes imágenes corresponden a la evolución del número de manchas solares y el flujo de radiación de los ciclos solares 24 y 25, junto con las respectivas predicciones.

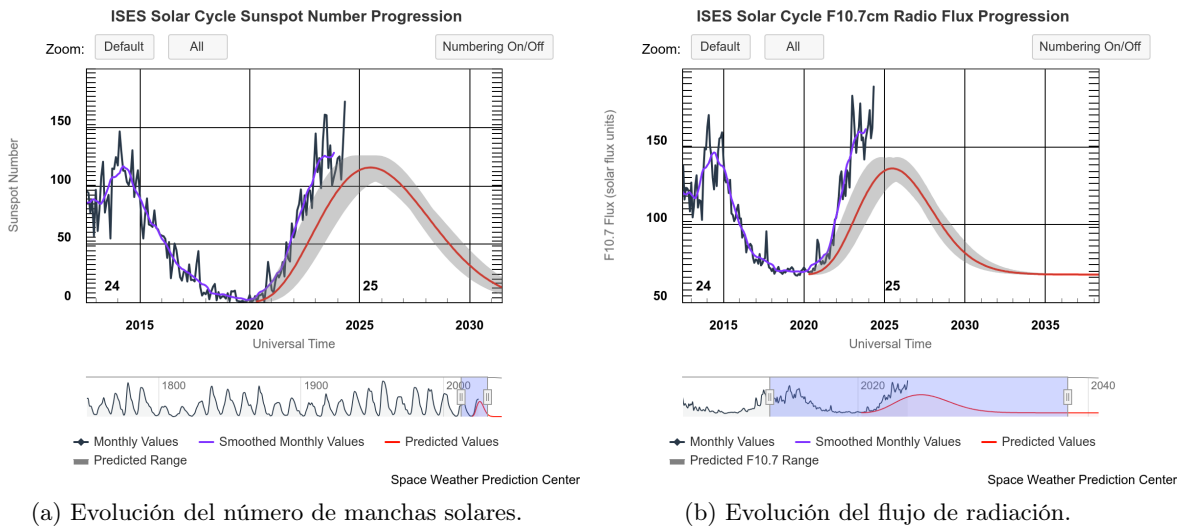


Figura 1: Ciclos solares 24° y 25° [61].

Las fulguraciones solares son emisiones eruptivas que pueden alcanzar tamaños de varios miles de kilómetros, tienen una duración de hasta varias horas y su temperatura puede alcanzar los 11 millones de Kelvin. El número de fulguraciones es un indicador más de la actividad solar, y se relaciona de forma directa con el número medio de Wolf mediante una constante que depende del observatorio:  $N_f = \alpha(\bar{R} - 10)$  [23].

Las imágenes precoces pretenden evidenciar la relación empírica del número de manchas solares y los episodios de erupciones solares durante el ciclo solar.

Agencias como la NOAA han introducido escalas que gradúan la intensidad de los fenómenos de la meteorología espacial, como una estrategia para comunicar a los usuarios de sus productos y al público en general las condiciones de space weather y sus posibles efectos sobre las personas y los sistemas. Las escalas describen las perturbaciones ambientales para tres tipos de eventos: tormentas geomagnéticas, tormentas de radiación solar y apagones de radio. Éstas tienen niveles numerados, análogos al de los huracanes, tornados y terremotos que transmiten la severidad de los eventos; adicionalmente, enumeran los posibles efectos en cada nivel, muestran la frecuencia con la que han ocurrido y dan una medida de la intensidad de las causas físicas [61].

## 2.2. Tormentas Geomagnéticas

Los primeros análisis que se realizaron sobre las variaciones del campo externo, fueron llevados a cabo por G. Graham con 1000 medidas de declinación. Posteriormente, A. Celsius corroboró estos resultados con más de 20 mil medidas de campo geomagnético, observando una componente diurna en el campo externo y estableciendo una relación entre un día perturbado y la aparición de auroras. Esta relación fue verificada unos años después por H. Shawabe, quien además estableció una correlación entre fenómenos geomagnéticos externos y la ocurrencia del ciclo solar de 11 años. La influencia de la Luna en las variaciones del campo externo fue descubierta por K. Kreil.

Tenemos por tanto, que el campo geomagnético externo sufre variaciones periódicas y no periódicas debido a la influencia solar, pero también lunar aunque en menor medida. Adicionalmente, podemos diferenciar dos tipos de situaciones en el que la actividad solar es más o menos intensa, los días perturbados  $S_D$  (solar disturbed) y los días tranquilos  $S_q$  (solar quiet) [44].

Dentro de las variaciones no periódicas, existen diversos fenómenos irregulares todos ellos no predecibles; en particular las más importantes son las *tormentas geomagnéticas*, las *bahías* y las *pulsaciones*. Las tormentas y bahías son fácilmente detectables en los magnetogramas, pues se manifiestan como variaciones bruscas en las componentes; sin embargo, las pulsaciones tienen un periodo muy corto y resulta necesario disponer magnetómetros de alta frecuencia para poder registrarlas.

Las tormentas geomagnéticas se componen de un campo regular de origen magnetosférico y otro irregular de origen ionosférico. Se encuentran dentro de la categoría  $S_D$ , se manifiestan de modo diferente en función de la latitud geográfica y pueden llegar a tener amplitudes de hasta  $500 nT$ .

Los precursores habituales de las tormentas son las eyecciones de masa coronal (CME), los agujeros coronales y las fulguraciones; éstos fenómenos modifican el flujo de viento solar de cuya interacción con el campo geomagnético se originan las tormentas. Además de los precursores, para que se produzca una tormenta es necesario que la polaridad del IMF e incluso la posición de la Tierra dentro de la espiral de Parker sean las correctas.

Existe una ventana de entre 24 y 36 horas desde que se produce el suceso iniciador hasta que sus efectos llegan a la Tierra por medio del viento solar alterado. Si bien la duración de las tormentas magnéticas suele estar en el rango de 24 – 48 horas, pueden llegar a prolongarse por varios días



más [50].

En latitudes medias, las tormentas presentan las siguientes fases:

- Fase inicial: se presenta con un incremento en la componente horizontal a nivel global y puede durar hasta 2 horas.
- Fase principal: se caracteriza por una disminución prolongada de la componente horizontal, siendo más acusada en el ecuador magnético. Adicionalmente, la componente vertical aumenta a medida que nos alejamos del ecuador. Puede durar hasta 24 horas.
- Fase de recuperación: se inicia con el restablecimiento gradual de la componente horizontal que puede tardar hasta varios días.

En latitudes altas, tanto al norte como al sur del ecuador los electrones liberados del plasma llegan hasta los polos geomagnéticos, cerrando un enorme circuito eléctrico que hace pasar una corriente eléctrica a través de las partes más altas de la atmósfera, excitando de paso las moléculas de los gases atmosféricos y dando lugar con ello a una gigantesca lámpara luminiscentes llamada en el hemisferio norte aurora boreal y aurora austral en el sur.

Vista desde el espacio, las auroras polares forman óvalos que pivotan alrededor de los polos geomagnéticos. Estos óvalos están además ligeramente desplazados hacia la zona nocturna del planeta y su tamaño aumenta con la intensidad del viento solar [41], [21].

Las siguientes imágenes corresponden a la evolución del índice  $K_p$  durante los días de tormenta de octubre de 2003 y mayo de 2024.

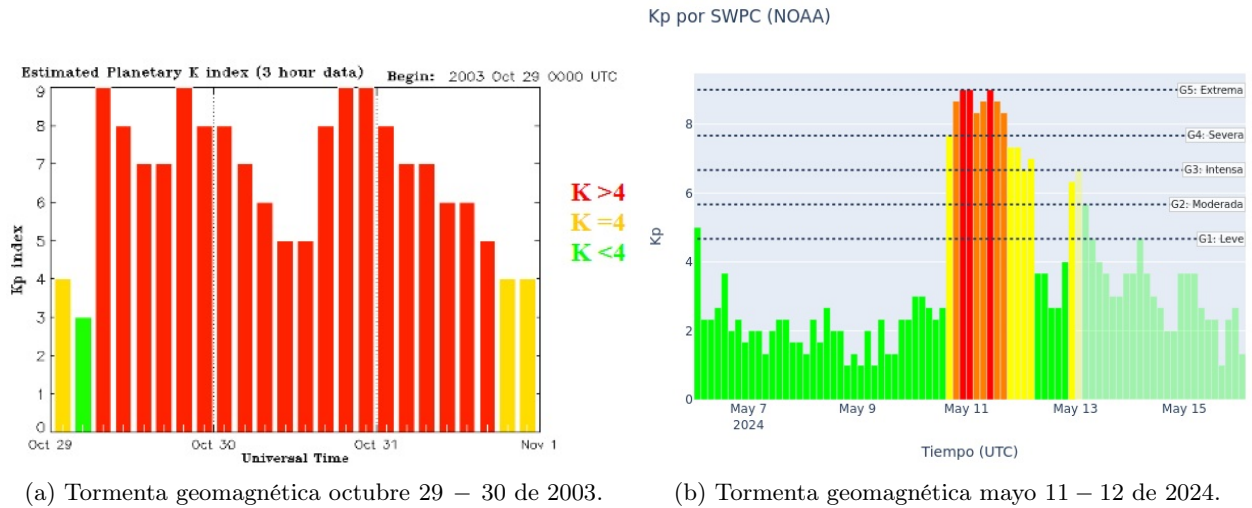


Figura 2: Evolución del índice  $K_p$  para dos episodios de tormenta geomagnética [61].

El índice  $K$  cuantifica las perturbaciones en la componente horizontal ( $H$ ) del campo magnético terrestre con un número entero en el rango de 0 a 9, siendo 1 estado de calma y 5 o más indica una situación de tormenta geomagnética. Éste fue inicialmente introducido por J. Bartels y se deriva de las fluctuaciones máximas de las componentes horizontales ( $X$  e  $Y$ ). El índice planetario  $K_p$  es el índice  $K$  estandarizado medio de trece observatorios geomagnéticos ubicados entre las latitudes  $44^\circ$  y  $60^\circ$ , en el dominio temporal de tres horas. Otro índice geomagnético relevante es el  $Dst$  que

se obtiene a partir de medidas de cuatro observatorios localizados cerca del ecuador magnético, y pretende dar cuenta de las variaciones del campo magnético debidas al anillo de corriente ecuatorial causado por una perturbación. El valor de este índice suele estar en torno a cero los días que se consideran calmos; mientras que las perturbaciones de éste son negativas, indicando una disminución en la intensidad del campo magnético.

En los últimos docientos años se han registrados importantes perturbaciones en forma de tormenta geomagnética, no obstante entre las más intensas y cuyos efectos se han hecho sentir con graves consecuencias sobre las comunidades, cabe destacar las siguientes: el *Carrington Event* de septiembre de 1859 que provocó fallos en la red telegráfica de Norteamérica y Europa; la *New York Railroad Storm* ocurrida del 13 al 15 de mayo de 1921, provocó desperfectos en los sistemas telefónicos y de telégrafos asociados a los sistemas ferroviarios de la ciudad y el estado de Nueva York; *The Great Québec Blackout* del 13 de marzo de 1989 que colapsó la red eléctrica por más de nueve horas, afectando a sies millones de personas y causando daños directos e indirectos cuya tasación superó los 6 mil millones de dólares canadienses; el *Bastille Day Event* del 14 al 16 de julio del año 2000 que causó interrupciones en la comunicación satelital; la *Halloween Storm* ocurrida del 28 al 29 de octubre de 2003, originó fallos sobre sistemas satelitales, aeronaves y en las redes eléctricas de Suecia y Sudáfrica; y la *Mother's Day storm* del 11 al 12 de mayo de 2024, es considerada como una de las mayores de los últimos treinta años, pero que cuyos efectos se limitaron a degenerar las comunicaciones en el espectro de alta frecuencia (HF) [61]. Otro tipo de eventos extremos con efectos sobre la biología, aún discutidos, son los tipo *Miyake* [58].

### 2.3. Redes de detección

Dispersas por el globo existen múltiples organizaciones dedicadas al estudio y detección de perturbaciones en el entorno espacial de la Tierra. Dichas organizaciones a menudo cooperan entre sí para dar mayor cubrimiento y un mejor seguimiento de los fenómenos que afectan al planeta. A continuación, destacamos las agencias más relevantes, clasificándolas en tres grupos de acuerdo con su ámbito de actuación o ubicación.

#### 2.3.1. Mundo

En América Latina existen distintas agencias que monitorizan las condiciones de *space weather*, la mayoría están situadas en países del *Cono Sur* que por su ubicación suelen ser los más afectados por fenómenos de este tipo. En Chile está el *Laboratorio de clima espacial chileno* administrado por la *Universidad de Chile* [27], en Argentina el organismo encargado es el *Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos* de la *Universidad de Buenos Aires* [28], en Uruguay el *Instituto Uruguayo de Meteorología* [4] desempeña estas funciones enfocándolas especialmente a la aeronáutica, y en Brasil el encargado es el *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* [57]. Por su parte, en México el *Instituto de Geofísica* [30] de la *UNAM* comparte responsabilidades con el *Laboratorio Nacional de Clima Espacial* [29] con el que coordina el intercambio de información entre las redes internacionales de clima y meteorología espacial.

En Asia se destacan siete agencias nacionales que corresponden a países como Indonesia donde el responsable es el *Center for Space Research* [37] dependiente de la *The National Research and Innovation Agency*, en India está el *National Physical Laboratory* [68] asociado a la *Agencia India de Investigación Espacial*, en Corea del Sur encontramos el *Korea Space Weather Center* [14], en China el máximo responsable es el *Space environment prediction center* [70], mientras en Japón el servicio está centralizado por el *National Institute of Information and Communications Technology* [89],

entretanto en Turquía el servicio es prestado directamente por la *Turkish Space Agency* [16], y en Israel tenemos el *Space Weather Center* de la *Universidad de Tel Aviv* [93] y vinculado a la *Agencia Espacial de Israel*.

En Norteamérica, una región que en el pasado se ha visto seriamente afectada por esta clase de fenómenos naturales, llegando incluso a comprometer vidas humanas, encontramos una extensa red controlada en Canadá por el *Canadian Space Weather Forecasts Centre* [65]. En Estados Unidos, son agencias federales como la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) [61] y la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) [60], que cooperan entre sí y son referentes mundiales, las encargadas de monitorear las condiciones del entorno de la Tierra y alertar a las distintas dependencias, tanto dentro como fuera de las fronteras de este país, ante cualquier amenaza.

En Oceanía, sobresalen la *Australian Space Weather Forecasting Centre* de Australia [67] como la organización más importante del hemisferio sur, y en Nueva Zelanda la división de geofísica del instituto *GNS Science* [84]. Por otro lado, en Sudáfrica encontramos la *South African National Space Agency* [13] que es la única agencia africana dedicada a temas de meteorología espacial.

Existen además, importantes iniciativas internacionales como la *International Space Weather Initiative* (ISWI) [78], liderada por el *Committee on the Peaceful Uses of Outer Space* de la ONU cuyo objetivo es desarrollar herramientas técnicas y científicas que permitan en primer término comprender y luego pronósticar las condiciones de meteorología espacial. Si bien este proyecto tenía una duración fija de tres años (2009 – 2012), a partir de 2013 se tomó la determinación de continuar con las actividades de investigación y divulgación de la meteorología espacial, y adicionalmente mantenerles como temas permanentes de discusión en la agenda del Subcomité científico y técnico. La atención que actualmente despierta la meteorología espacial no es algo completamente nuevo, tanto es así que podemos encontrar asociaciones como el *International Space Environment Service* (ISES) [3] cuyos antecedentes se remontan hasta 1962. Esta red colaborativa de organizaciones que brindan servicios en todo el mundo, está en la actualidad integrada por 22 Centros de Alerta Regionales, 4 Centros de Alerta Asociados y 1 Centro de Expertos, también coopera estrechamente con la *Organización Meteorológica Mundial* (WMO) [9]. Existen además acuerdos bilaterales como en el caso de los gigantes asiáticos de Rusia y China que han establecido un consorcio, el *Chinese - Russian Consortium* [1], que presta servicios a la aviación de ambos países.

En el sector privado, encontramos también algunos consorcios internacionales como *PECASUS* [6] que presta un valioso servicio a la aviación civil, o el *European Satellite Services Provider* (ESSP) [80] que tiene productos enfocados a la aeronavegación y las telecomunicaciones.

### 2.3.2. Europa

En el continente europeo, podemos encontrar en el ámbito nacional numerosas instituciones que combinan responsabilidades que van desde los servicios meteorológicos, pasando por los sísmológicos hasta llegar a un campo con un atractivo estratégico reciente como es el *space weather*; adicionalmente la mayoría de ellas han apostado por aunar esfuerzos, dados los intereses comunes que comparten, creando y participando en espacios comunes donde se comparte información y se gestionan proyectos de gran impacto. En Italia está el *Space Weather Italian Community* [7] que media en la cooperación entre distintos institutos y observatorios del país; en Francia la entidad encargada es la *Organisation Française de Recherche Appliquative en Météorologie de l'Espace* [2] que está bajo la tutela del *Centre national d'études spatiales* (CNES) y la *Office national d'études et de recherches aérospatiales* (ONERA); en Bélgica estas labores las desempeña el *Royal Observa-*

*tory of Belgium* [64]; entre tanto en Polonia el responsable es el *Heliogeophysical Prediction Service Laboratory* [69] vinculado a la *Academia Polaca de Ciencias*; en Austria encontramos el *Kanzelhöhe Observatory for Solar and Environmental Research* [94] perteneciente a la *Universidad de Graz* y representante en este país del ISES; mientras tanto en el Reino Unido coexisten dos organizaciones que gestionan de forma independiente las alertas, por un lado está la *Met Office* [77] que presta un servicio con un carácter más informativo, y de otro lado está el *British Geological Survey* [90] que divide su tiempo entre la gestión de datos y productos, y la investigación, todo ello en el ámbito de las geociencias, abarcando en el proceso campos como el space weather; por su parte en Rusia existen tres grandes centros que dan cubrimiento a la vasta extensión geográfica del país y están alineados con sus intereses económicos, ellos son el *Institute of Applied Geophysics* (IPG) [10] de la *Academia de Ciencias*, el *Space Weather Prediction Center* [47] del *Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowaves* (IZMIRAN) y el *Space Research Institute* (IKI) [71] que integra centros menores dispersos por este país; en cuanto a Alemania hemos hallamos dos responsables, el renombrado *Helmholtz Centre for Geosciences* (GFZ) [38] que es además responsable de importantes bases de datos empleadas tanto en labores de investigación como en el cálculo de los índices globales de referencia, y el *Institute for Solar-Terrestrial Physics* (DLR) [12]; respecto a Noruega el principal encargado es el *Tromsø Geophysical Observatory* (TGO) [62] del *Norwegian Centre for Space Weather* (NOSWE); por lo que toca a Finlandia, el país dispone de un servicio especial de meteorología espacial que presta el *Finnish Meteorological Institute* [46] en colaboración con el ISES; en lo que corresponde a Suecia está el *Swedish Space Weather Centre* (SSWC) [72] que depende del *Swedish Institute of Space Physics* (IRF); en Islandia la entidad encargada es la *Icelandic Met Office* [75] que brinda un servicio especial para todo lo relativo al space weather; en Irlanda se encuentra la *Magnetometer Network of Ireland* (MagIE) [32] que es una red de observatorios desde los cuales se da seguimiento a las condiciones del entorno de la Tierra y están coordinados por el *Dublin Institute for Advanced Studies* y la *TCD School of Physics*, adicionalmente el *The Irish Meteorological Service* [86] dispone de un observatorio propio que actúa en cooperación con las agencias británicas; en lo que respecta a Dinamarca y Groenlandia hay dos organizaciones integradas que responden conjuntamente a las necesidades de ambos territorios, ellas son la *Technical University of Denmark* (DTU) [24] y el *Greenland Integrated Observing System* (GIOS) [40]; en los Países Bajos la entidad facultada es el *Royal Netherlands Meteorological Institute* (KNMI) [51] que presta un servicio especial de meteorología espacial; en países bálticos como Estonia y Letonia las corporaciones responsables son respectivamente la *Estonian Environment Agency* [36] y la *Latvian Space Office* [76], éstas prestan un servicio enfocado especialmente a la aviación; en Portugal las tareas las desempeña la *Portuguese Space Agency* [15]; en lo que concierne a República Checa podemos encontrar el *Solar Patrol Service* [74] que presta el *Astronomical Institute* (ASU) de la *Czech Academy of Sciences* vinculado además al ISES, y también el *Institute of Atmospheric Physics* (CAS) [63]; en Grecia la responsabilidad recae en el *Hellenic National Meteorological Service* (HNMS) [85]; y en lo referente a Bulgaria el comisionado es un grupo de investigadores de la *Bulgarian Academy of Sciences* [81].

La institución supranacional más relevante del continente, encargada del entendimiento y cooperación entre los distintos estados es la *European Space Agency* (ESA) [35].

### 2.3.3. España

En España hay cuatro organizaciones que hacen seguimiento de las condiciones de *space weather*, si bien lo hacen con propósitos de orígenes distintos, la mayoría de los productos que gestionan resultan útiles en un amplio abanico de campos que van desde la industria hasta la investigación científica.

El primero de los actores con el que nos encontramos es la *AEMET* [11] dentro de cuyas tareas

está actualmente incluida transmitir información de los consorcios internacionales y de la NOAA. El IGN [59] por su parte, gestiona los datos de medidas de campo magnético adquiridas en tres de los cuatro principales observatorios geomagnéticos del país (*Güímar* en *Tenerife*, *San Pablo* en *Toledo* y el *Ebro* [5] en *Tarragona*). El cuarto gran observatorio que también coopera con la red nacional, conserva su histórica independencia siendo controlado por la *Armada* y ubicándose en la localidad de *San Fernando* en la provincia de Cádiz, hablamos del *Real Instituto y Observatorio de la Armada* (ROA) [18]. Finalmente, encontramos en el *Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial* (INTA) [31] el *Laboratorio de Radiación y Meteorología Espacial* que se centra en el estudio de entornos de radiación espacial de alta energía y la interacción radiación-materia.

Además de las instituciones anteriores, en la *Universidad de Alcalá* (UAH) encontramos un grupo de investigación dedicado a la meteorología espacial, el *Space Weather Group - Universidad de Alcalá*. Este grupo ha estado desarrollando una serie de productos incluidos en el marco de un proyecto del Programa Estatal Fomento de la Investigación Científica y Técnica de Excelencia.

En la primera fase de este megaproyecto que cuenta con el respaldo y financiación de la *Agencia Espacial Europea* (ESA), se tiene previsto desarrollar productos de meteorología espacial especialmente diseñados para el sur de Europa; entre ellos se encuentran un prototipo para medir la perturbación magnética en tiempo real utilizando una patente de la UAH (*LDi-meter*), así como nuevos índices regionales (*LDiñ* y *LCiñ*) de media latitud que involucran observatorios del todo el planeta, y la caracterización de ciertas perturbaciones ionosféricas con impacto en infraestructuras y servicios que dependen del sistema *GNSS*. Para la segunda fase, se prevé implementar en otros países europeos los productos e instrumentación desarrollados; países como Austria ya han manifestado su interés por ser partícipes de la iniciativa.

El liderazgo del proyecto recae sobre el grupo de meteorología Espacial de la Universidad de Alcalá, pero cuenta con la participación del grupo *Sistemas Inteligentes* de la UAH, el grupo IONSAT de la Universidad Politécnica de Cataluña, dos grupos de la Universidad de Coímbra y la empresa GMV. En la actualidad ya se encuentran disponibles los índices geomagnéticos *LDiñ* y *LCiñ*, que pueden consultarse en la página web del *Servicio Nacional de Meteorología Espacial* (SeNMEs) [26] creada y administrada por el *Space Weather Group - Universidad de Alcalá*. Sabemos además que el grupo de investigadores ha colaborado en otro proyecto con la *Red Eléctrica de España* para evaluar la vulnerabilidad del sistema ante potenciales amenazas como son las tormentas geomagnéticas.

### 3. Efectos de las Tormentas Geomagnéticas

Las tormentas geomagnéticas al igual que otros fenómenos naturales en nuestro planeta, traen consigo importantes consecuencias que impactan en grados distintos tanto al entorno como a los individuos que en él se inscriben. El nivel afectación, suele depender de factores tales como la intensidad del evento, el alcance geográfico e incluso la complejidad de los sistemas considerados.

Atendiendo a los múltiples factores que rodean a estos eventos, nos aventuramos a clasificar en dos grandes categorías los efectos que dejan tras de sí las tormentas geomagnéticas. Las categorías se definen a partir de los impactos o bien directos o bien indirectos sobre los distintos actores que integran la biosfera.

#### 3.1. Efectos Directos

El primero en informar de los efectos de las tormentas geomagnéticas sobre los sistemas biológicos fue A. Chizhevsky en la década de los treinta. A partir de entonces, son numerosos los estudios que han vinculado efectos de estos fenómenos a los seres vivos.

A continuación presentamos los argumentos centrales de algunos de ellos.

### 3.1.1. Seres humanos

Sobre los efectos de las tormentas geomagnéticas en la salud humana, se han realizado numerosos estudios con resultados no exentos de controversias; así por ejemplo encontramos dos grupos de investigadores, uno mexicano [20] y otro ruso [43], que han hallado algunas alteraciones de la presión sanguínea bajo condiciones de tormenta. De acuerdo con estos investigadores, las alteraciones prevalecen en mujeres y en el caso de personas con condiciones médicas preexistentes como hipertensión, estos eventos pueden suponer un riesgo mortal. Otros grupos como los canadienses [82] o los rusos [82], han ligado trastornos neuropsicológicos con las perturbaciones del campo; según éstos, tormentas suficientemente severas pueden inducir cambios en la actividad eléctrica del cerebro que derivarían en alucinaciones.

Un punto en el que si encontramos consenso, es en el riesgo de exposición a elevados niveles de radiación por parte de los pasajeros y tripulación de los vuelos en latitudes altas, debido a la disminución en la intensidad del campo que se produce en un episodio de tormenta geomagnética. Este riesgo está tipificado en la escala de graduación de la intensidad de los fenómenos de meteorología espacial [61].

### 3.1.2. Plantas y Animales

En el reino animal encontramos publicaciones como [52] y [34], en las que se documenta la influencia que ejercen las perturbaciones del campo magnético en insectos, reptiles, aves, peces y mamíferos. La capacidad de detección del campo magnético o magnetorrecepción de los seres vivos ha sido asociada a las proteínas criptocromos, cuya alta sensibilidad a variaciones del campo se ha probado capaz de modificar las rutas migratorias de las aves o afectar al comportamiento de los murciélagos. En lo que a las plantas respecta, investigadores polacos [33] han indentificado alteraciones del ritmo circadiano en especies pertenecientes a ecosistemas de latitudes altas, con repercusiones en los patrones de crecimiento.

## 3.2. Efectos Indirectos

En nuestras sociedades globalizadas y con alta dependencia tecnológica, son numerosos los sectores que pueden verse potencialmente afectados por la meteorología espacial, desde las telecomunicaciones, el transporte, los servicios meteorológicos y la navegación, hasta la distribución de energía, la producción industrial y la explotación de recursos naturales.

Numerosos estudios como [42] y [83], detallan la vulnerabilidad de nuestros sistemas, basándose en los impactos de eventos del pasado y en la progresión de las revoluciones tecnológicas dentro de las comunidades.

En un informe reciente de la ESA se estimó que el potencial impacto socioeconómico en Europa de un solo fenómeno extremo de meteorología espacial podría ascender a 15,000 millones de euros. Por su parte, la consultora británica *Lloyds of London* en un estudio de 2013 [66], predijo que las tormentas geomagnéticas más extremas podrían afectar entre 20 y 40 millones de personas en los Estados Unidos, causando daños por valor de 2,6 billones de dólares, y con una recuperación que demoraría hasta dos años.

En los próximos años, se espera que la sensibilidad de nuestra sociedad y economía aumente ante los efectos de los fenómenos de meteorología espacial, debido sobre todo a la creciente dependencia de los sistemas de navegación por satélite; entre las soluciones que han llegado a plantearse para proteger nuestra industria y tecnología, además del desarrollo redes de alerta en tierra, encontramos

iniciativas que abogan por posicionar más sondas en puntos estratégicos como el  $L1$ , de manera que tengamos acceso a más datos que permitan anticiparnos a cualquier amenaza proveniente del Sol.

Estudios más audaces como [87] y [17], intentar conectar la frecuencia de ocurrencia de grandes terremotos con explosiones solares y las tormentas geomagnéticas asociadas. Otros autores apuntan a ciertos beneficios que podrían obtenerse de estos eventos, es el caso de técnicas de prospección geofísicas como la magnetotelúrica, que caracteriza el subsuelo por la distribución de la resistividad eléctrica a partir de las fluctuaciones temporales de los campos electromagnéticos.

Ignorando los efectos de las tormentas sobre la constelación de satélites artificiales que orbitan el planeta y tienen como objetivo monitorear las condiciones atmosféricas, algunas investigaciones como [92], [22] y [91], intentan exponer la influencia de los fenómenos de meteorología espacial sobre la dinámica atmosférica. No obstante, las perturbaciones de mayor alcance, más que al space weather, pertenecen a la categoría de space climate en la que se agrupan ciclos y eventos de más larga duración.

## 4. Montaje Experimental

Esta parte del proyecto, nos impusimos como reto diseñar y contruir un prototipo operativo de radiotelescopio que nos permitiese medir la potencia de radiación emitida por el sol en el espectro de alta frecuencia (HF). Si bien el dispositivo fue sometido a múltiples pruebas que en más de una ocasión nos hicieron replantearnos el diseño, consideramos que el resultado final, aún susceptible de mejoras, es satisfactorio en la medida que cumple con los objetivos marcados.

Seguidamente, presentamos las principales componentes de la versión final del prototipo de radiotelescopio que empleamos para efectuar tanto las medidas de control como las de campo.

### 4.1. Sistema de soporte

El sistema de soporte del radiotelescopio incluye un carrito de altura regulable y base rectangular de  $29\text{ cm}$  por  $27,5\text{ cm}$ . Sobre este carrito dispusimos una mesa igualmente rectangular, con tablero de PVC y altura fija de  $13,5\text{ cm}$ ; en medio del tablero practicamos un agujero de  $5,5\text{ cm}$  de diámetro por el que hicimos pasar el cableado de los sensores, la alimentación y el controlador. El sistema de soporte, se completa con un conjunto de siete rejillas de acero, un disco plástico con radio exterior de  $15\text{ cm}$  y cuatro patines que permitian a la sección de conexión de los engranajes de azimut y elevación rodar suavemente sobre la mesa de PVC.

### 4.2. Sistema de engranajes

En los mecanismos que ideamos, empleamos piezas de LEGO TECHNIC, elegidas tanto por su flexibilidad y resistencia como por su versatilidad, hecho que nos confirió una enorme ventaja al momento realizar adaptaciones de los diseños durante la fase de pruebas. Para el sistema de azimut usamos tres etapas, mientras que fueron cuatro las etapas en el sistema de elevación; el objetivo de cada etapa era el de reducir la velocidad de entrada a la veinticincoava parte, de manera que la velocidad al final emulase el movimiento del Sol.

### 4.3. Motores

Para impulsar el sistema de engranajes empleamos dos motoreductores de corriente continua (CC). Estos motores de  $25\text{ mm}$  diámetro exterior,  $3\text{ mm}$  de diámetro del eje,  $10\text{ mm}$  de longitud del eje,

96 g de peso y tensión nominal 5 – 15 V; se dispusieron horizontalmente sobre las rejillas de acero y se fijaron con abrazaderas a fin de garantizar su estabilidad y correcto funcionamiento. La elección de este modelo concreto de motores obedeció a criterios tales como disponibilidad, la ligereza y sus reducidas dimensiones.

#### 4.4. Antena y medidor de potencia

Tras un detenido análisis, determinamos que la mejor opción dentro de las antenas disponibles era la logarítmico periódica, tanto por su conveniente geometría como por su directividad. A estas características se suma el hecho de que responde especialmente bien a las señales de la banda de alta frecuencia (HF), que es una de las franjas del espectro que más alteraciones sufre en condiciones de tormenta geomagnética.

La siguiente imagen es el resultado de una simulación hecha con MATLAB, en la que recreamos el diagrama de radiación de la antena empleada.

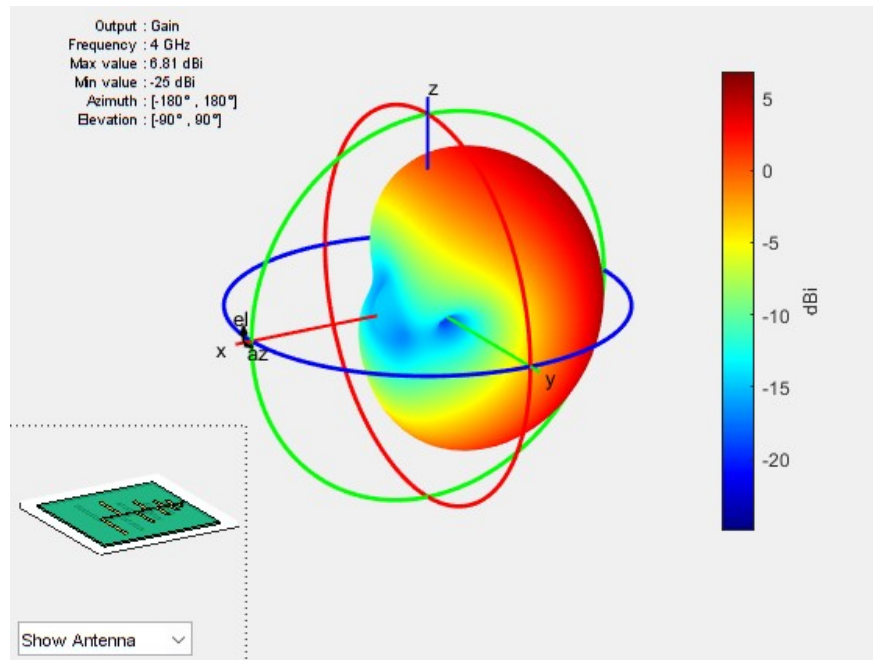


Figura 3: Diagrama de radiación de la antena logoperiódica.

En el montaje experimental la antena estaba conectada directamente al medidor de potencia, el cuál estaba fijado con abrazaderas a las rejillas de soporte. El ancho de banda de trabajo dado por esta sinergia era 1,35 – 4 GHz.

Para la adquisición de datos usamos el programa nativo del medidor de potencia *GUI Setup Package Mini-Circuits* [56], el cuál tras cada prueba nos permitía generar un fichero Excel con los datos, para su posterior análisis.

#### 4.5. Sensores

Para calibrar el radiotelescopio y monitorizar su correcto funcionamiento, empleamos un par de módulos *AS5600 Magnetic Angle Measurement Sensor Magnetic Encoder*, operados mediante un dispositivo *Arduino Nano 33 IoT [ABX00027]*. Este *Arduino* a su vez estaba controlado por un script de MATLAB, que escribimos específicamente para registrar y posteriormente analizar la señal dada por los sensores.



La elección de este tipo sensores obedeció a factores tales como la alta precisión y sus reducidas dimensiones; esta última condición nos facilitó adaptar las penúltimas etapas de los sistemas engranajes de azimut y elevación para medir sus velocidades de rotación .

#### 4.6. Controlador

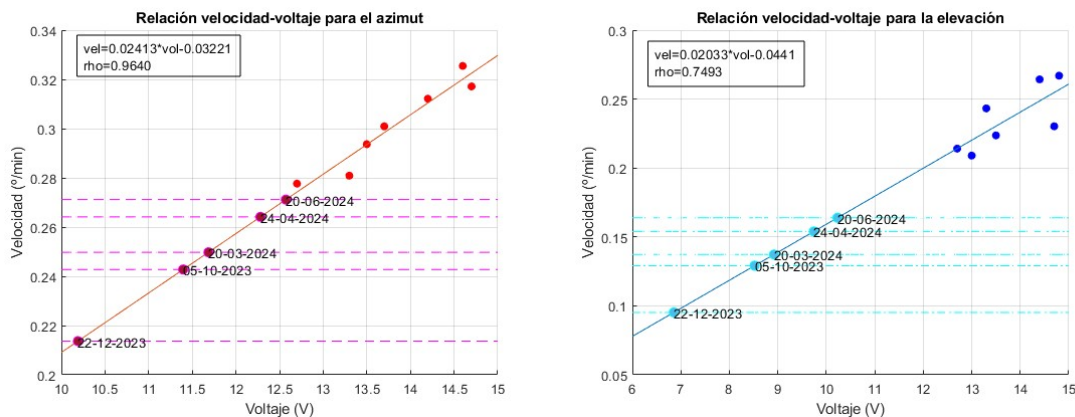
A fin de conseguir una mejor operatividad y una mayor precisión en el radiotelescopio, integramos un dispositivo *Arduino Uno Rev3* [A000066] y un *módulo dual L298N H Bridge* a los motores de azimut y elevación. El control simultáneo de los motores, lo conseguimos ejecutando una rutina de MATLAB que comunicaba instrucciones al *Arduino* a partir de parámetros de entrada como el sentido de giro de los motores, la velocidad de rotación y el tiempo funcionamiento. En el script incluimos también comandos que nos permitían controlar una webcam con la hicimos fotos del dispositivo, y que junto con las lecturas de los sensores nos posibilitaron verificar el correcto funcionamiento del prototipo.

Adicionalmente, incluimos una mirilla adosada al eje de la antena que nos permitía comprobar y ajustar manualmente el ángulo de elevación en las circunstancias que así lo requirieron.

### 5. Análisis

A lo largo del proceso experimental llevamos a cabo numerosas pruebas orientadas a calibrar el prototipo de radiotelescopio y a verificar la correcta adquisición de datos en distintos entornos.

Una vez conseguimos estabilizar la integración entre los sistemas de engranajes, los motores y el controlador, el siguiente paso fue determinar una relación entre el voltaje de salida de la fuente y las velocidades de salida de los sistemas de elevación y azimut. Para este propósito, tomamos dos serie de medidas, una para elevación y otra para azimut, en las que variamos gradualmente el voltaje de la fuente y con ayuda de los sensores determinamos la velocidad en las últimas etapas de los engranajes.



(a) Relación de voltaje y velocidad para el azimut. (b) Relación de voltaje y velocidad para la elevación.

Figura 4: Relación entre el voltaje y la velocidad.

En las gráficas anteriores, además de los pares datos experimentales (voltaje, velocidad) rotulados con puntos rojos y azules, encontramos los ajuste lineales respectivos. También están representadas las velocidades medias del movimiento del Sol en azimut y elevación para los días etiquetados, que se han calculadas a partir de las coordenadas del astro disponibles en el producto de Posición del

Sol del servicio *SunEarthTools.com* [8]. Con las velocidades medias del Sol en los días seleccionados, deducimos del ajuste el voltaje de salida de la fuente que se requiere para que el radiotelescopio haga un seguimiento sincronizado de la actividad de la estrella.

La bondad de los ajustes dado por el coeficiente de determinación, que en el caso de azimuth es de 0,964 y en el de elevación 0,748, resultan aceptables si consideramos que estos son una primera aproximación de un problema realmente complejo.

Por supuesto, una de las partes más importantes de esta etapa del proyecto fue la toma de medidas con el prototipo de radiotelescopio. Éstas se llevaron a cabo en distintas circunstancias, hecho nos condujo a realizar una comparativa de los registros obtenidos, de los cuales tres se realizaron al aire libre y uno en un entorno cerrado y controlado.

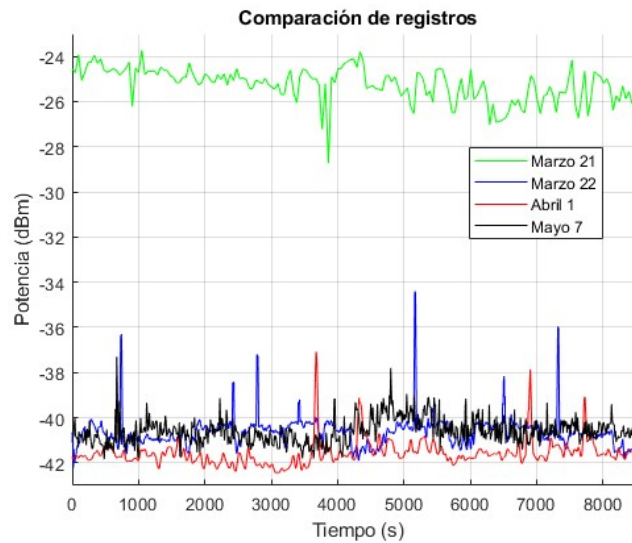


Figura 5: Comparativa de registros.

Lo primero que salta a la vista de la gráfica anterior, son los elevados valores del registro verde por comparación con los demás; éste que corresponde al día 21 de marzo de 2024, fue una prueba indoor realizada en un entorno controlado y usando una fuente de radiación artificial, hecho que explica los altos valores y la claridad de la señal. El mínimo que se observa cerca de los 4000 s, se explica en la medida que en ese instante interpusimos un obstáculo entre las antena emisora de la fuente y la receptora del radiotelescopio, enfrentadas directamente en una sala parcialmente vacía.

Los tres registros restantes corresponden a ensayos outdoor, en los que por supuesto la fuente de radiación era el Sol. No obstante, además de esta fuente natural de radiación, en el entorno circundante al sitio elegido para la adquisición de datos, nos encontramos con múltiples fuentes artificiales que introducían una componente de ruido en las medidas; esta circunstancia explica en parte las discrepancias entre las señales de los días 22 de marzo y 1 de abril, ambos del 2024, en tanto que el primero de estos días fue el viernes anterior a la Semana Santa, mientras el segundo fue el lunes de Pascua. Si bien ambos días fueron laborables en la ciudad de Madrid, consideramos que la actividad humana en las proximidades de la Facultad de Ciencias Físicas de la UCM, lugar en el que se tomaron las medidas, fue significativamente mayor el primero de abril al punto de ejercer una influencia proporcional en los datos. Otras posibles explicaciones a las diferencias podemos hallarlas en la actividad solar particular de cada día y en menor medida en las condiciones atmosféricas.

En lo que respecta al registro restante del día 7 de mayo, destacamos que los valores de la señal son ligeramente altos en comparación con los del 1 de abril, que tomamos como día de referencia. Esta

circunstancia es coherente con el hecho de que por entonces nos encontrábamos en el preámbulo de la muy intensa tormenta geomagnética del 11 de mayo.

Gran parte del material usado, sobre todo en lo relativo a este tercio experimental del proyecto de TFG, que por razones técnicas y de espacio no fue posible incluir en esta memoria, se encuentra alojado en la página web *Geomagnetic World* [45] que creamos expresamente para que pudiesen consultarse contenidos importantes como los scripts de MATLAB, fotografías del montaje experimental, vídeos de los ensayos y adquisición de datos, etc.

## 6. Conclusiones

Son muchas las lecciones aprendidas a lo largo de este proyecto de TFG, pero entre toda ellas me gustaría destacar tres, que creo recogen la esencia de cada parte, estas son:

1. Si bien se han conseguido importantes avances en el desarrollo de algunas redes de detección y alerta temprana, se requiere un mayor compromiso sobre todo por parte de las grandes potencias económicas de forma que puedan alcanzarse acuerdos con medidas que incluyan acciones conjuntas destinadas prepararnos y protegernos ante las amenazas provenientes del entorno de la Tierra.
2. Pese a no haber un consenso en la comunidad científica en lo que se refiere a los efectos de las tormentas geomagnéticas sobre los seres vivos, si existen muchas evidencias que apuntan a consecuencias de importantes sobre sus dinámicas vitales. Dada la relevancia que han adquirido estos temas en los últimos años, se espera que en el futuro se consigan grandes avances, posiblemente de la mano de herramientas disruptivas como la inteligencia artificial.
3. Las experiencias del pasado, nos indican que es necesario propender hacia una visión de desarrollo tecnológico sostenible y con garantías para las comunidades. En este sentido, productos de bajo costo se presentan como una prometedora opción de solución para proteger bienes e intereses.

## Referencias

1. China/russian federation consortium. <https://www.spaceweather-crc.com/>.
2. French organisation for applied research in space weather. <http://www.meteo-espace.fr/oframe>.
3. International space environment service. <http://www.spaceweather.org/index.jsp>.
4. Inumet. <https://www.inumet.gub.uy/>.
5. Observatori de l'ebre. <https://www.obsebre.es/es/>.
6. Pegasus. <https://pegasus.eu/>.
7. Space weather italian community. <http://www.swico.it/>.
8. sunearthtools. [https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php#table](https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php#table).
9. World meteorological organization. <https://wmo.int/>.

10. . <http://ipg.geospace.ru/>.
11. Tiempo espacial. [https://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/tiempo\\_espacial](https://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/tiempo_espacial), AE-MET.
12. Institute for solar-terrestrial physics. <https://www.dlr.de/en/so/>, DLR.
13. Space weather. <https://spaceweather.sansa.org.za/>, SANSA.
14. K. A. Administration. Korea space weather center. <https://spaceweather.kasa.go.kr/eng/main.do>.
15. P. S. Agency. Space weather. <https://ptspace.pt/space-weather/>.
16. T. S. Agency. Space weather. <https://tua.gov.tr/en/national-space-program>.
17. M. Akhoondzadeh and A. De Santis. Is the apparent correlation between solar-geomagnetic activity and occurrence of powerful earthquakes a casual artifact? *Atmosphere*, 13(7):1131, 2022.
18. Armada. Real observatorio de la armada - armada - ministerio de defensa - gobierno de españa. <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/cienciaobservatorio/prefLang-es/02InfoGeneral>.
19. K. Arora, A. Cazenave, E. R. Engdahl, R. Kind, A. Manglik, S. Roy, K. Sain, and S. Uyeda. *Encyclopedia of solid earth geophysics*. Springer Science & Business Media, 2011.
20. T. Azcárate, B. Mendoza, and J. Levi. Influence of geomagnetic activity and atmospheric pressure on human arterial pressure during the solar cycle 24. *Advances in Space Research*, 58(10):2116–2125, 2016.
21. T. Bastian, A. Benz, and D. Gary. Radio emission from solar flares. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 36(1):131–188, 1998.
22. V. Bucha and V. Bucha Jr. Geomagnetic forcing of changes in climate and in the atmospheric circulation. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 60(2):145–169, 1998.
23. W. H. Campbell. *Introduction to geomagnetic fields*. Cambridge University Press, 2003.
24. D. N. S. Center. Dtu space weather. <https://www.spaceweather.space.dtu.dk/>.
25. T. G. Cowling. The magnetic field of sunspots. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 94(1):39–48, 11 1933.
26. U. de Alcalá de Henares. Senmes. <https://www.senmes.es/section/2>.
27. U. de Chile. Laboratorio de clima espacial chileno. <https://ccc.ciencias.uchile.cl/climaespacial/index.php>.
28. D. de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Space weather - meteorología del espacio. <http://spaceweather.at.fcen.uba.ar/2/>, UBA.
29. I. de Geofísica Unidad Michoacán. Lance. <https://www.lance.unam.mx/>.
30. U. N. A. de México. Servicio de clima espacial México. <https://www.sciesmex.unam.mx/>, SCIESMEX.

31. I. N. de Técnica Aeroespacial. Servicio de investigación en radiación y meteorología espacial. <https://www.inta.es/INTA/es/servicios/e2efce90-03ff-11e7-8186-ed22714883d2/>.
32. DIAS. The magnetometer network of ireland - magie. <https://www.magie.ie/>.
33. A. P. Dubrov. *The geomagnetic field and life: geomagnetobiology*. New York: Plenum Press, 1978.
34. W. Erdmann, H. Kmita, J. Z. Kosicki, and Ł. Kaczmarek. How the geomagnetic field influences life on earth—an integrated approach to geomagnetobiology. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 51(3):231–257, 2021.
35. ESA. Esa space weather service network. <https://swe.ssa.esa.int/current-space-weather>.
36. M. s. f. a. Estonian Environment Agency. Space weather. <https://www.lennuilm.ee/2019/11/space-weather/?lang=en>.
37. R. O. for Aeronautics and Space. Space weather information and forecast services. <https://swifts.brin.go.id/>, BRIN.
38. G. R. C. for Geosciences. Gfz space weather products. <https://spaceweather.gfz-potsdam.de/>, GFZ Helmholtz Centre Potsdam.
39. C. M. R. Fowler. *The solid earth: an introduction to global geophysics*. Cambridge University Press, 1990.
40. G. I. O. S. GIOS. Space weather. <https://gios.org/projects/space-weather/>.
41. W. Gonzalez, J.-A. Joselyn, Y. Kamide, H. W. Kroehl, G. Rostoker, B. T. Tsurutani, and V. Vasyliunas. What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 99(A4):5771–5792, 1994.
42. I. Gulati, R. Tiwari, M. Johnston, and S. Dlay. Impact of solar flares on hf radio communication at high latitude. In *2019 International Conference on Automation, Computational and Technology Management (ICACTM)*, pages 550–554. IEEE, 2019.
43. Y. I. Gurfinkel, A. Vasin, R. Y. Pishchalnikov, R. Sarimov, M. Sasonko, and T. Matveeva. Geomagnetic storm under laboratory conditions: Randomized experiment. *International journal of biometeorology*, 62:501–512, 2018.
44. P. Hejda, F. Valach, and M. Revallo. Historical geomagnetic observations from prague observatory (since 1839) and their contribution to geomagnetic research. *History of Geo- and Space Sciences*, 14(1):51–60, 2023.
45. J. M. Hurtado Restrepo. Geomagnetic world. <https://sites.google.com/ucm.es/geomagneticworld/inicio?pli=1>.
46. F. M. Institute. Space weather in finland. <https://rwc-finland.fmi.fi/index.php/space-weather-in-finland/>, Avaruussääkeskus – RWC Finland.
47. IZMIRAN. Space weather prediction center. <http://spaceweather.izmiran.ru/eng/index.html>. [Accessed 22-06-2024].

48. J. D. Jackson and R. F. Fox. *Classical electrodynamics*. American Association of Physics Teachers, 1999.
49. J. A. Jacobs. *Geomagnetism: Volume 3*, volume 3. Elsevier, 2016.
50. J. A. Jacobs. *Geomagnetism: Volume 4*, volume 4. Elsevier, 2016.
51. R. N. M. I. KNMI. Space weather. <https://spaceweather.knmi.nl/>.
52. V. V. Krylov, O. D. Zotov, B. I. Klain, N. V. Ushakova, N. P. Kantserova, A. V. Znobisheva, Y. G. Izyumov, V. V. Kuz'mina, A. A. Morozov, L. A. Lysenko, et al. An experimental study of the biological effects of geomagnetic disturbances: The impact of a typical geomagnetic storm and its constituents on plants and animals. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 110:28–36, 2014.
53. W. Lowrie and A. Fichtner. *Fundamentals of geophysics*. Cambridge university press, 2020.
54. L. Ma. Gleissberg cycle of solar activity over the last 7000years. *New Astronomy*, 14(1):1–3, 2009.
55. M. Manda, M. Korte, A. Yau, E. Petrovsky, I. U. of Geodesy, and Geophysics. *Geomagnetism, Aeronomy and Space Weather: A Journey from the Earth's Core to the Sun*. Special Publications of the International Union of Geodesy and Geophysics. Cambridge University Press, 2019.
56. Mini-Circuits. Power meters - software documentation resources. <https://www.minicircuits.com/softwaredownload/pm.html>.
57. T. Ministry of Science and Innovation. Estudo e monitoramento brasileiro do clima espacial. <https://www2.inpe.br/climaespacial/portal/pt/>, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
58. F. Miyake, K. Nagaya, K. Masuda, and et al. A signature of cosmic-ray increase in ad 774–775 from tree rings in japan. *Nature*, 486:240–242, 2012.
59. I. G. Nacional. Geomagnetismo. <https://www.ign.es/web/ign/portal/gmt-area-geomagnetismo>.
60. NASA. Soho space weather. <https://soho.nascom.nasa.gov/spaceweather/>.
61. NOAA. Space weather prediction center. <https://www.swpc.noaa.gov/homepage>.
62. T. G. Observatory. Norwegian centre for space weather. <https://site.uit.no/spaceweather/>.
63. I. of Atmospheric Physics of Czech Academy of Sciences. Group of numerical simulations of heliospheric plasmas. <https://www.ufa.cas.cz/en/homepage-en/>.
64. R. O. of Belgium. Operational directorate “solar physics and space weather”. <https://sidc.be/>.
65. G. of Canada. Space weather canada. <https://www.spaceweather.gc.ca/>.
66. L. of London. Solar storm risk to the north american electric grid. <https://www.lloyds.com/news-and-insights/risk-reports/library/solar-storm>, Mayo de 2013.
67. T. B. of Meteorology. Australian space weather forecasting centre. <https://www.sws.bom.gov.au/>.

68. M. of Science and Technology. National physical laboratory. [http://cgc.nplindia.org/atul/cgc/rwc/INTRUCTION4\\_BuIn.htm](http://cgc.nplindia.org/atul/cgc/rwc/INTRUCTION4_BuIn.htm).
69. P. A. of Science. Heliogeophysical prediction service laboratory. <http://rwc.cbk.waw.pl/>.
70. C. A. of Sciences. Space environment prediction center. <http://eng.sepc.ac.cn/>.
71. S. R. I. R. A. of Sciences. Space weather iki ran. <https://spaceweather.ru/content/online-data-sets>.
72. S. I. of Space Physics. Swedish space weather center. <https://www.spaceweather.se/>, IRF.
73. S. K. L. of Space Weather. Key laboratory of solar activity and space weather. <https://www.swl.ac.cn/chinese/knowledge/knowledge1.htm>.
74. A. I. of the Czech Academy of Sciences. Solar patrol service. <https://www.asu.cas.cz/~sunwatch/>.
75. I. M. Office. Aurora forecast for saturday evening. <https://en.vedur.is/weather/forecasts/aurora/>.
76. L. S. Office. Mission space. <https://latviaspace.gov.lv/en/latvian-space-office/>.
77. M. Office. Space weather. <https://www.metoffice.gov.uk/weather/specialist-forecasts/space-weather>.
78. U. N. C. on the Peaceful Uses of Outer Space. International space weather initiative (iswi). <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/psa/bssi/iswi.html>.
79. E. N. Parker. Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields. *The Astrophysical Journal*, 128:664–676, 1958.
80. E. S. S. Provider. Space weather. <https://www.essp-sas.eu/our-references/space-weather/>.
81. S. Research and B. Technology Institute. Space climate. <https://spaceclimate.bas.bg/SW/indexEN.php>.
82. K. S. Saroka, J. M. Caswell, A. Lapointe, and M. A. Persinger. Greater electroencephalographic coherence between left and right temporal lobe structures during increased geomagnetic activity. *Neuroscience Letters*, 560:126–130, 2014.
83. C. J. Schrijver and G. L. Siscoe. *Heliophysics: space storms and radiation: causes and effects*. Cambridge University Press, 2010.
84. G. Science. Space weather. <https://www.gns.cri.nz/our-science/natural-hazards-and-risks/space-weather/>.
85. H. N. M. Service. Space weather. <https://newportal.emy.gr/en/space-weather?tab=general>.
86. T. I. M. Service. Met éireann. <https://www.met.ie/>.
87. J. F. Simpson. Solar activity as a triggering mechanism for earthquakes. *Earth and Planetary Science Letters*, 3:417–425, 1967.

88. N. Sleep and K. Fujita. *Principles of geophysics*. Blackwell Science, Massachusetts, 1997.
89. A. E. R. I. Space Environment Laboratory. Space weather forecast. <https://swc.nict.go.jp/en/>, NICT.
90. B. G. Survey. Geomagnetic storm forecasts. [http://www.geomag.bgs.ac.uk/data\\_service/space\\_weather/alerts.html](http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/space_weather/alerts.html).
91. B. A. Tinsley. Solar activity, weather, and climate: The elusive connection. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 104(12):E2171–E2191, 2023.
92. N. Todorović and D. Vujović. Links between geomagnetic activity and atmospheric cold fronts passage over the belgrade region, serbia. *Meteorological Applications*, 29(6):e2107, 2022.
93. T. A. University. Space weather center. <https://www.spaceweather.sites.tau.ac.il/>.
94. A. University of Graz. Kanzelhöhe observatory for solar and environmental research. <https://www.spaceweather.at/>.
95. A. Vallina and J. Mezcu. *Fundamentos de geofísica*. Alianza Universidad Textos. Alianza, 1997.