

SISTEMA DE MONITOREO EN TIEMPO REAL DE ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS PARA EL OBSERVATORIO DE FÚQUENE

Simón Salas Hernández
Santiago Alejandro Pinilla Capador

PROYECTO DE GRADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CATASTRAL Y GEODESTA

DIRECTOR:

ICG. Msc. Andrés Cárdenas Contreras

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESIA
BOGOTÁ D.C., COLOMBIA
2026



SISTEMA DE MONITOREO EN TIEMPO REAL DE ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS PARA EL OBSERVATORIO DE FÚQUENE

AUTORES:

Simón Salas Hernández
Santiago Alejandro Pinilla Capador

DIRECTOR:

ICG. Msc. Andrés Cárdenas Contreras

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESIA
Bogotá D.C., Colombia
2026

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del director

Firma del jurado

Dedicatoria

"A Dios, por ser mi guía y mi fortaleza, por darme la sabiduría necesaria para superar cada obstáculo y culminar este logro."

"A mis padres, por su apoyo y amor incondicional, porque han sido mi guía y mi mayor ejemplo de esfuerzo, constancia y valentía, enseñándome a no rendirme y sosteniéndome con su paciencia, sus consejos y su fe en mí."

"A mi familia, por haber sido mi respaldo incondicional, por confiar en mí y por estar siempre presentes brindándome el aliento necesario. En especial, a mis abuelas Elena y Berta, quienes, aunque no pudieron ver este logro, sé que Dios las tiene en su gloria."

"A mis hermanas, por llenar mi vida de alegría, por su ternura y su cariño, y por darme la fuerza para seguir adelante y ser un ejemplo para ustedes."

"A mi pareja, por su amor, su paciencia y su apoyo incondicional, por estar siempre ahí cuando lo necesitaba y por confiar plenamente en mis capacidades."

"A mis amigos y compañeros, en especial Santiago, por su sincera compañía, por todos los momentos compartidos y por brindarme su apoyo de manera incondicional durante todos estos años."

"Y, finalmente, a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron a la culminación de este logro."

Simón Salas H.

Dedicatoria

"A mis padres, por sus consejos y cariño incondicional, siendo el ancla que me sostuvo en momentos de duda, por ser mi guía de esfuerzo y dedicación a lo largo de este camino."

"A mi hermano, por su apoyo y compañía."

"A mis tíos, Sonia y Mauricio, por su apoyo y cercanía, por nunca dejar de creer en mí."

"A mi abuelita, por brindarme palabras de apoyo en momentos de incertidumbre."

"A mis familiares y amigos, especialmente Miguel y Nicolás, por estar siempre presente y por su ayuda incondicional a lo largo de este proceso."

"A mi compañero de tesis, Simón, por compartir el interés en esta área, creer en este proyecto y dedicarle cada hora para sacarlo adelante."

Santiago A. Pinilla C.

Agradecimientos

Queremos agradecer a Santiago Pinzón y al profesor Santiago Vargas, por su orientación constante a lo largo de todo este proceso, por su disposición para compartir sus conocimientos y por habernos brindado un valioso apoyo, contribuyendo de manera significativa al desarrollo de este proyecto.

También expresamos nuestro agradecimiento al docente director Andrés Cárdenas por su acompañamiento, su orientación académica y su disposición para guiarnos en el desarrollo del trabajo. Al Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), en cabeza del ingeniero Enrique Torres y la geofísica María Rosa, por proveer los recursos y parte de la información esencial que hizo posible este trabajo. Agradecemos a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por brindarnos la oportunidad de vivir este proceso formativo y permitirnos alcanzar este logro.

Asimismo, agradecemos a nuestros compañeros y amigos por su compañía y respaldo constante durante este proceso, siendo fundamentales para mantener la motivación y el impulso.

Finalmente, nuestros más profundos agradecimientos son para nuestras familias, por haber brindado su apoyo incondicional, su comprensión en los momentos más difíciles y la confianza que han depositado en nosotros durante este proceso académico.

Índice

Agradecimientos **2**

Índice de tablas **IV**

Siglas **V**

1. Introducción **1**
1.1. Formulación del Problema . . . 2
1.2. Justificación . . . 2
1.3. Objetivo General . . . 3
1.4. Objetivos Específicos . . . 4
1.5. Alcance . . . 4

2. Marco Teórico **4**
2.1. Antecedentes . . . 4
2.1.1. Indice K . . . 5
2.1.2. Índice Dst (Storm Time Disturbance) . . . 6
2.1.3. Sistemas de Monitoreo de Clima Espacial . . . 7
2.2. MARCO REFERENCIAL . . . 8
2.3. Campo Magnético Terrestre (CMT) . . . 8
2.3.1. Campo Litosférico . . . 9
2.3.2. Campo Externo . . . 9
2.3.3. Campo Ionosférico . . . 10
2.3.4. Magnetosfera . . . 11
2.4. Componentes Geomagnéticas . . . 11
2.5. Índices Geomagnéticos . . . 12
2.6. Observatorio Geomagnético de Fúquene (FUQ) . . . 13

3. Materiales y Métodos **14**
3.1. Planteamiento Metodológico . . . 14
3.2. Datos y Fuentes . . . 15
3.2.1. Registros geomagnéticos empleados del observatorio FUQ . . . 15
3.2.2. Adquisición y transmisión de datos en tiempo real . . . 16
3.2.2.1. Protocolo de comunicación MQTT . . . 16
3.2.2.2. Autenticación y seguridad . . . 17
3.2.2.3. Configuración de sensores . . . 17
3.3. Cálculo del Índice Dst . . . 18
3.3.1. Metodología para Datos Históricos . . . 18
3.3.1.1. Enfoque metodológico . . . 18
3.3.1.2. Preprocesamiento de la serie histórica . . . 19
3.3.1.3. Estimación del campo interno $I(t)$ . . . 20
3.3.1.4. Estimación del campo Externo $E(t)$ . . . 23
3.3.1.5. Estimación de la variación solar quieta $Sq(t)$ . . . 24

3.3.1.6. Estimación del Ciclo Solar $Sc(t)$ . . . 31
3.3.1.7. Estimación de la serie de perturbación $Dist(t)$ e índice local $Dlat(t)$ . . . 33
3.3.2. Implementación en Tiempo Real (Near Real-Time, NRT) . . . 36
3.3.2.1. Enfoque metodológico . . . 36
3.3.2.2. Manejo de datos en tiempo real . . . 37
3.3.2.3. Ventana analítica deslizante . . . 37
3.3.2.4. Estimación del campo externo E(t) . . . 38
3.3.2.5. Estimación de la variación solar quieta Sq(t) . . . 39
3.3.2.6. Estimación de la serie de perturbación Dist(t) e índice local Dlat(t) . . . 40
3.4. Cálculo del Índice K . . . 40
3.4.1. Metodología para Datos Históricos . . . 40
3.4.1.1. Preprocesamiento de la serie histórica . . . 41
3.4.1.2. Integración y organización de la serie histórica. . . . 41
3.4.1.3. Tratamiento de valores atípicos mediante filtro de Hampel . . . 42
3.4.1.4. Depuración adicional de serie Y con umbral de media movil . . . 44
3.4.1.5. Detección e interpolación de vacíos en la serie histórica . . . 46
3.4.1.6. Aplicación del método Linear Elimination (FMI) . . . 48
3.4.1.7. Construcción de intevalos de tres días y bloques trihorarios . . . 49
3.4.1.8. Cálculo de amplitudes trihorarias . . . 50
3.4.1.9. Definición de K9 limit y tabla de limites locales para FUQ . . . 51
3.4.1.10. Determinación preliminar del índice K . . . 52
3.4.1.11. Estimación de medias horarias mediante ventanas moviles . . . 53
3.4.1.12. Estimación de la curva de variación solar regular (SR_1) . . . 54
3.4.1.13. Cálculo del índice K intermedio . . . 55
3.4.1.14. Reestimación de (SR_2) y cálculo del índice K final . . . 56
3.4.2. Implementación en Tiempo Real (NRT) . . . 58
3.4.2.1. Planteamiento metodología general del sistema NRT . . . 59
3.4.2.2. Adquisición y remuestreo de datos . . . 61
3.4.2.3. Depuración y control de calidad de la señal . . . 61
3.4.2.4. Estimación de la curva diaria tranquila y cálculo de la serie residual . . . 62
3.4.2.5. Verificación de suficiencia de datos en ventana trihoraria . . . 64
3.4.2.6. Determinación de la amplitud trihoraria y asignación del índice K . . . 65
3.5. Plataforma Web de Visualización . . . 67
3.5.1. Arquitectura general del Sistema (SIAPV) . . . 67
3.5.2. Backend de procesamiento y servicios . . . 69
3.5.3. Módulo de Visualización . . . 71
3.5.3.1. Datos en tiempo real . . . 72
3.5.3.2. Índices geomagnéticos . . . 72
3.5.3.3. Noticias y actividad reciente . . . 72
3.5.3.4. Fuentes externas de referencia . . . 72
3.5.3.5. Multimedia . . . 72

3.5.3.6. Descarga de datos 72

4. Análisis y Resultados **73**
4.1. Resultado de la adquisicion de datos en NRT 73
4.2. Resultados del índice Dst histórico 75
4.2.1. Campo interno I(t) 75
4.2.2. Campo externo E(t) 76
4.2.3. Variación solar quieta Sq(t) 78
4.2.4. Ciclo solar SC(t) 81
4.2.5. Serie de perturbación $Dist(t)$ e índice local $Dlat(t)$ 82
4.2.5.1. Tormenta del 11 de febrero de 1958 82
4.2.5.2. Tormenta del 9 de febrero de 1986 84
4.2.5.3. Tormenta del 14 de marzo de 1989 86
4.2.5.4. Tormenta del 16 de julio del 2000 88
4.3. Resultados del índice Dst en NRT 90
4.3.1. Tormenta del 19 de enero de 2026 91
4.3.2. Tormenta del 20 de marzo de 2026 93
4.3.3. Tormenta del 4 de abril de 2026 94
4.4. Resultados del índice K histórico 96
4.4.1. Curva Solar Diaria Regular SR para (FUQ) 99
4.4.2. Serie histórica del índice K final (FUQ) 100
4.4.2.1. Tormenta del 26 de mayo de 1967: 101
4.4.2.2. Tormenta del 04 de agosto de 1972: 105
4.4.2.3. Tormenta de Halloween del 2003: 109
4.4.2.4. Tormenta de 10 de Octubre de 2024 113
4.4.3. Comparación del índice K local con Kp histórico 116
4.4.3.1. Comparación durante eventos de tormenta geomagnética 118
4.5. Resultados del índice K en NRT 121
4.5.1. Tormenta del 20 de enero de 2026 123
4.5.2. Tormenta del 20 de marzo de 2026 124
4.5.3. Tormenta del 4 de abril de 2026 126
4.6. Resultado de la plataforma web de visualización 127

5. Conclusiones **131**

A Anexo: Datos y Fuentes **139**

B Anexo: Índice Dst **153**

C Anexo: Índice K **167**

D Anexo: Plataforma Web de Visualización **178**

Índice de tablas

1. Resumen de las series históricas empleadas en el preprocesamiento 42
2. Límites de rangos para el índice K en el Observatorio de Fúquene (FUQ), obtenidos por escalamiento proporcional de la escala de Niemegk, adoptando $K9 = 300\,\mathrm{nT}$. 52
3. Clasificación del indicador de calidad *Quality Check Flags* (QCF) en función de la cobertura de datos en la ventana trihoraria empleada para el cálculo del índice K operativo en FUQ. 65
4. Resumen de los registros históricos utilizados en la estimación del índice Dst local para el Observatorio Geomagnético de Fúquene, discriminados por fuente y período de cobertura. 75
5. Las 10 combinaciones más omptimas para los parámetros del filtro A según el *score* de optimización planteado para evaluar el proceso de optimización sistemática.. 78
6. Las 10 combinaciones más omptimas para los umbrales de amplitud espectral para el fitlro B según el *score* de optimización planteado. 79
7. Resumen estadístico de la comparación entre $Dlat_i$ de FUQ y los observatorios del USGS durante la tormenta del 19–27 de enero de 2026. 92
8. Resumen estadístico de la comparación entre $Dlat_i$ de FUQ y los observatorios del USGS durante la tormenta del 20–21 de marzo de 2026. 94
9. Resumen estadístico de la comparación entre $Dlat_i$ de FUQ y los observatorios del USGS durante la tormenta deL 4 de abril de 2026. 95
10. Resumen de los registros históricos utilizados en la estimación del índice K local en FUQ, discriminados por intervalo temporal y resolución de muestreo. Se presentan los registros totales, los valores válidos iniciales, la cantidad de datos eliminados durante la depuración, los valores válidos finales y el número de índices K calculados. 96
11. Resumen estadístico de la comparación entre el índice K de FUQ y los observatorios de referencia durante la tormenta de enero de 2026. 124
12. Resumen estadístico de la comparación entre el índice K de FUQ y los observatorios de referencia durante la tercera tormenta analizada. 125
13. Resumen estadístico de la comparación entre el índice K de FUQ y los observatorios de referencia durante la tormenta de abril de 2026. 127
14. Supuestos de volumetría. 149
15. Plantilla de especificación del servidor. 152

Siglas

ASM: Adaptive Smoothing Method

AAS: Anomalía del Atlántico Sur

BGS: British Geological Survey

CMT: Campo Magnético Terrestre

Dlat: Disturbance local normalized by latitude

Dst: Disturbance Storm Time

EEJ: Electrochorro Ecuatorial (Equatorial Electrojet)

ESA: European Space Agency

FFT: Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)

FMI: Finnish Meteorological Institute

FUQ: Observatorio Geomagnético de Fúquene

GNSS: Global Navigation Satellite System

IAGA: Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía

IATME: Asociación Internacional de Magnetismo Terrestre y Electricidad

IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

IGRF: International Geomagnetic Reference Field

INTERMAGNET: International Real-time Magnetic Observatory Network

IPGH: Instituto Panamericano de Geografía e Historia

Kp: Índice K planetario

Ks: Índice K estandarizado

LDI: Local Disturbance Index

MAD: Desviación Absoluta Mediana

MARCOS: MagPy's Automated Realtime Collector and Organization System

MARTAS: MagPy's Automated Real Time Acquisition System

MQTT: Message Queue Telemetry Transport

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

NRT: Near Real-Time (Tiempo casi real)

PPM: Proton Precession Magnetometer

PSK: Pre-Shared Keys (Claves precompartidas)

QDC: Quiet Day Curve (Curva diaria tranquila)

QHM: Quartz Horizontal Magnetometer

RC: Corriente de Anillo (Ring Current)

REGMEX: Red de Estaciones Geomagnéticas de México

RMI: Royal Meteorological Institute (Belgium)

RMSE: Raíz del error cuadrático medio

SANSA: South African National Space Agency

SC: Solar Cycle

SCIESMEX: Servicio de Clima Espacial Mexicano

SEC: Space Environment Center

SIAPV: Sistema Integral de Adquisición, Procesamiento y Visualización

Sq: Solar Quiet (Variación solar quieta)

SR: Solar Regular (variación solar regular diaria)

SV: Secular Variation

SWPC: Space Weather Prediction Center

TLS: Transport Layer Security

UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México

USGS: Servicio Geológico de los Estados Unidos

VM: Virtual Machine (Máquina virtual)

WDC: World Data Center

ZAMG: Institución Central de Meteorología y Geodinámica (Austria)

Resumen

El presente trabajo desarrolla un sistema integral para la adquisición, procesamiento, validación y visualización de índices geomagnéticos (SIAPV) a partir de los datos del Observatorio Geomagnético de Fúquene (FUQ), con el propósito de fortalecer el monitoreo del clima espacial en Colombia. Las metodologías usadas contemplan el cálculo de índices geomagnéticos tanto para series históricas como en tiempo casi real (Near Real - Time, NRT), mediante el procesamiento de registros de alta resolución. Para el calculo del índices K, se empleo una adaptación del método *Linear Elimination* del Finnish Meteorological Institute (FMI), incluyendo etapas de preprocesamiento, depuración de la señal, estimación de la variación solar regular (SR) y determinación de amplitudes trihorarias. De igual manera, se implemento la estimación del índice Dst a partir del método propuesto por Love et al. (2009), que parte de segregación del campo magnético en sus componentes interna y externa, junto con la caracterización de parámetros asociados como la variación solar calmada (Sq), el ciclo solar (Sc) y la perturbación magnética ($Dist$).Adicionalmente, se desarrolla un sistema de procesamiento en tiempo casi real basado en uso de ventanas deslizantes, que permite la estimación de manera continua de los índices a partir de los datos disponibles adquiridos en tiempo real. Los productos obtenidos son integrados en una plataforma web de visualización, la cual tiene como objetivo facilitar el acceso público a la información y apoyar el análisis del clima espacial.

Palabras clave: Índices geomagnéticos, observatorio de Fúquene, variación solar quieta, perturbación magnética, tiempo casi real, ventana deslizante, transformada de Fourier, clima espacial, monitoreo en tiempo real, visualización web

1. Introducción

El estudio del campo magnético terrestre constituye un componente fundamenta en la compresión de estudios Sol-Tierra y de los procesos asociados al clima espacial (Cowley 1995; C. Russell 2000). Las perturbaciones geomagnéticas reflejan la respuesta de la magnetosfera y la ionosfera frente a diferentes fenómenos asociados a la actividad solar, de tal manera que su seguimiento mediante índices especializados es de gran importancia, ya que permiten en caracterizar y proporcionar una medida semicuantitativa del nivel de actividad geomagnética, además de reconocer eventos con potencial impacto sobre la Tierra (Rostoker 1972). En este contexto, índices como K y Dst se han consolidado como herramientas ampliamente utilizadas por diversos observatorios para describir y analizar las variaciones del campo magnético, especialmente en tormentas geomagnéticas y otros fenómenos asociados. En consecuencia, el desarrollo de sistemas de monitoreo basado en este tipo de índices ha adquirido especial relevancia en los últimos años, teniendo en cuenta que múltiples países han impulsado plataformas orientas a la observación de la actividad magnética y el clima espacial (Pirjola et al. 2005; Vargas-Domínguez et al. 2026).

En Colombia, el Observatorio Geomagnético de Fúquene (FUQ) representa un punto estratégico para el estudio del campo magnético terrestre y del clima espacial (Carmona et al). Desde su fundación, el observatorio ha sido un punto de gran importancia para la adquisición de mediciones del campo magnético, debido a su localización en una zona de interés dentro de la Anomalía del Atlántico Sur (AAS) y su posición privilegiada con respecto a fenómenos propios de otras latitudes (Courtillot et al. 1988; Alva Carmona et al. 2025). Mas recientemente la modernización instrumental desarrollada entre el 2022 y el 2023, junto con la incorporación de conectividad para la transmisión de manera continua de datos en tiempo real (Alva Carmona et al. 2025; Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC 2026), abrió la puerta a la posibilidad de disponer de observaciones geomagnéticas digitales de alta resolución y avanzan hacia esquemas de procesamiento en tiempo caris real (NRT).

Sin embargo, a pesar de dichos avaneces, la disponibilidad de datos en tiempo casi real no garantiza la existencia de herramienta que permitan interpretar de manera oportuna el estado actual de la activad geomagnética y a pesar que existen antecedentes metodológicos para el cálculo de índices a nivel internación y algunas aproximaciones desarrolladas con registros históricos de Fúquene (Pinzon et al. 2022; Cortés Rojas 2025; Alejandra et al. 2018), persiste la necesidad de contar con un sistema integral que implemente de manera automatizada la adquisición, procesamiento, validación y publicación de índices geomagnéticos de carácter local, tanto para series históricas como para datos NRT.

Como respuesta a dicha problemática, el presente trabajo desarrollo un sistema integral orientado al cálculo de índices geomagnéticos, tomando como insumo los datos del Observatorio Geomagnético de Fúquene, con énfasis en el tratamiento de series históricas y la implementación operativa en tiempo casi real. De manera complementaria, se propone la integración de estos productos en una plataforma web que permita la visualización al público, con la finalidad de facilitar el acceso, consulta y análisis de la información. De esta manera, el estudio solo aporta al fortalecimiento del monitoreo de la actividad geomagnética en Colombia, si no también en la modernización de las capacidades nacionales de observación del clima espacial para uso científica y aplicado de la información del observatorio.

1.1. Formulación del Problema

En Colombia el Observatorio Geomagnético de Fúquene, fundado en 1953, surgió como un esfuerzo internacional del IPGH orientado en comprender el campo magnético de la tierra, además del estudio y monitoreo de los fenómenos asociados (Alva Carmona et al. 2025; Manrique et al. 2017), siendo un punto clave junto al observatorio geomagnético de Huancayo en Perú para el estudio de fenómenos electromagnéticos ecuatoriales.

Hasta el 2022, la captura de datos en el observatorio se realizaba mediante magnetómetros análogos, por tal motivo los registros se consignaban en magnetogramas y cartas geomagnéticas. No obstante, tras la actualización realizada entre 2022 y 2023 en el observatorio con la implementación de instrumentos digitales, como los variómetros triaxiales y magnetómetros de protones, así como la reciente implementación de internet satelital, permitió la posibilidad de obtener datos de alta resolución en tiempo real en intervalos de a la décima del segundo (Alva Carmona et al. 2025; Manrique et al. 2017).

Es importante destacar que actualmente observatorios como CONRAD, de la Institución Central de Meteorología y Geodinámica (ZAMG) de Austria, y El Observatorio de Kyoto, perteneciente al Word Data Center (WDC) de Geomagnetismo, cuentan con módulos web, que permiten el acceso a la información en tiempo real sobre índices geomagnéticos. Asimismo, estudios como los realizados por Gannon et al. (2011) y Bartels et al. (1939) presentan metodologías para el cálculo de índices como K y Dst en casi tiempo real (definición de inglés *"near real time"*).

Las contribuciones del Observatorio a la investigación sobre el clima espacial son esenciales para pronosticar los fenómenos climáticos espaciales que pueden afectar las comunicaciones, la navegación y los sistemas eléctricos de la Tierra (Manrique et al. 2017). En este sentido, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), junto con algunas de sus subdirecciones e instituciones interesadas en el monitoreo del clima espacial para aplicaciones en telecomunicaciones, exploración geofísica y minera, navegación y posicionamiento mediante sistemas GNSS, requieren actualmente del seguimiento en tiempo real del clima espacial mediante índices especializados en las variaciones ionosféricas y de corriente anular, que permitan detectar y analizar fenómenos capaces de generar impactos operativos en dichas actividades.

A partir del problema planteado, se formulan las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cómo se puede realizar el cálculo de índices geomagnéticos históricos y en tiempo real para los datos geomagnéticos adquiridos del Observatorio Geomagnético de Fúquene?
- ¿Cómo implementar un sistema público NRT que adquiera, procese y publique índices magnéticos locales a partir de datos del observatorio de Fúquene?

1.2. Justificación

Teniendo en cuenta las actualizaciones realizadas en los últimos años en el Observatorio Geomagnético de Fúquene en términos de la implementación de nuevos equipos para la obtención de datos de campo magnético terrestre y la modernización de sus sistemas de adquisición, permitió

fortalecer significativamente la capacidad operativa del mismo (Alva Carmona et al. 2025). En este contexto, se incorporó conectividad por medio de internet satelital, con la finalidad de tener una transmisión continua de las mediciones obtenidas del campo magnético, a la sede central del IGAC.

Dado que el Observatorio Geomagnético de Fúquene desempeña un papel crucial en el monitoreo geomagnético internacional debido a su latitud ecuatorial, sus mediciones permiten obtener observaciones limpias de las variaciones geomagnéticas, sin aportes significativos asociados a fenómenos como corrientes aurorales o Electro Jet Ecuatorial (EEJ) (Curto et al. 2007; Alva Carmona et al. 2025). Esto lo convierte en un punto clave para el análisis de fenómenos electromagnéticos asociados a la ionosfera y la magnetosfera terrestre, fundamentales en la investigación del clima espacial.

En este escenario, resulta ser de gran importancia disponer de herramientas que permitan adquirir y procesar en tiempo real los datos obtenidos por el observatorio, de tal manera que se puedan utilizar como insumo principal de índices como la variación solar quieta (Sq), los índices K, Rc y Dst, que constituyen parámetros esenciales para caracterizar el nivel y el comportamiento de la actividad geomagnética, de tal manera que estos actúen como indicadores que faciliten la interpretación del estado del mismo.

Sin embargo, a pesar de que existen antecedentes de investigaciones en las que se calcularon algunos de estos índices a partir de registros históricos del Observatorio Geomagnético de Fúquene, como los trabajos desarrollados por Pinzon-Cortes et al. (2025) para el índice Dst y por Cortés Rojas (2025) para la variación solar calmada (Sq), actualmente no se dispone de procesos automatizados que permitan el cálculo de estos índices a partir de los datos adquiridos en el observatorio en tiempo real. Además, actualmente no existe un sistema público operando que permita la visualización de dichos datos a través de los portales oficiales del IGAC. En consecuencia, el monitoreo de la actividad geomagnética continúa dependiendo de análisis posteriores a la adquisición de los datos, lo que limita la capacidad de respuesta y alerta temprana ante posibles perturbaciones geomagnéticas.

En función de lo anterior, el desarrollo de una metodología que permita la adquisición y procesamiento en tiempo real de manera continua a partir de las mediciones del Observatorio Geomagnético de Fúquene para el cálculo en tiempo real de índices geomagnéticos, así como la integración de dicha información en una plataforma web de acceso público, resulta no solo ser un aporte de gran importancia en la modernización del sistema de monitoreo geomagnético del país, sino también su implementación constituye una herramienta pública de acceso oportuno a información clave para la comunidad científica, entidades gubernamentales y sectores susceptibles a los efectos del clima espacial.

1.3. Objetivo General

Desarrollar un sistema integral de adquisición, procesamiento, validación y visualización de índices geomagnéticos a partir del Observatorio Geomagnético de Fúquene (FUQ), orientado al monitoreo y apoyo de estudios de clima espacial en Colombia.

1.4. Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un algoritmo para la adquisición y preprocesamiento de datos geomagnéticos del Observatorio Geomagnético de Fúquene (FUQ), a través de la implementación de software científico de transmisión continua de datos.
- Desarrollar un módulo web de visualización que integre y represente en tiempo real los índices geomagnéticos, desde el portal del Centro de Control Geodésico Nacional del IGAC.
- Validar la metodología utilizada para el cálculo de los índices obtenidos en tiempo real con base en los índices obtenidos por otros observatorios.

1.5. Alcance

A nivel social, el proyecto servirá como un sistema integral de adquisición, procesamiento y visualización de datos geomagnéticos de acceso público, a través de la implementación de una plataforma web de visualización y consulta en tiempo casi real e histórica de los datos de las componentes magnéticas adquiridas por el Observatorio Geomagnético de Fúquene (FUQ), así como los índices geomagnéticos calculados. Esto permitirá disponer de manera pública de un centro de datos de información geomagnética para Colombia.

A nivel académico, fortalecerá las capacidades de adquisición, procesamiento y análisis de información geomagnética de alta resolución, permitiendo la generación de productos científicos confiables para el estudio del campo magnético terrestre y del clima espacial. Disponiendo también de datos históricos y en tiempo casi real de índices geomagnéticos, lo cual aportará a la consolidación de líneas de investigación en geomagnetismo y en clima espacial.

Este producto servirá como plataforma principal para la integración de nuevos índices y productos obtenidos por el Observatorio Geomagnético de Fúquene.

2. Marco Teórico

2.1. Antecedentes

Los índices geomagnéticos son medidas que representan y describen el estado del comportamiento dinámico campo magnético de la tierra, lo cual constituye una manifestación física de la respuesta de la magnetosfera y la ionosfera terrestre regida por la interacción del sol y el viento solar, que en última instancia afectan al clima espacial y procesos físicos subyacentes. (Cowley 1995; C. Russell 2000; C. T. Russell 2011; Menvielle et al. 2011). De tal manera que, desde la mitad del siglo XX, se consolidaron como parámetros de vital importancia para los estudios Sol – Tierra, más específicamente en estudios relacionados al clima espacial (Space Weather), siendo las principales herramientas para detectar y describir eventos asociados a lo anterior. A continuación, se presentan algunos estudios relevantes para el cálculo de dichos índices en Colombia y a nivel internacional:

2.1.1. Indice K

Los primeros desarrollos relacionados con el cálculo del índice K se remontan al trabajo realizado por Bartels et al. (1939), en respuesta a la Asamblea de Washington de la Asociación Internacional de Magnetismo Terrestre y electricidad (IATME) celebrada en septiembre de 1939, donde se estipulo la cooperación internacional para el desarrollo de un índice geomagnético tri-horario. Como resultado de dicha iniciativa, los autores propusieron el índice de rango de tres horas K.

Este índice fue definido en términos de números enteros en la escala de 0 a 9, el cual fue diseñado con el propósito de cuantificar el grado de actividad geomagnética ocasionada por las corrientes eléctricas generadas alrededor de la tierra por la radiación solar, a partir de registros magnéticos de observatorios a nivel global. Es importante destacar que este índice se desarrolló a partir de un rango máximo de perturbaciones observadas en las componentes horizontales que definen el campo magnético en intervalos de 3 horas, respecto a una curva de variación diurna regular esperada en condiciones geomagnéticamente tranquilas, eliminando previamente el aporte asociado a las variaciones regulares o no-K-variations Bartels et al. (1939).

Poco después Bartels (1949) introdujo los índices estandarizados Ks, que consiste en un proceso para asignar a cada índice K, un índice estandarizado Ks, expresado en tercios de unidad y el índice planetario Kp, que resulta ser un parámetro global que cuantifica el nivel de actividad geomagnética, a partir del promedio de los índices estandarizados Ks, para inicialmente 11 observatorios geomagnéticos ubicados en latitudes subaurorales. Es importante destacar que estos mismos se basan en índices anteriores, específicamente en el índice global Km, los índices reducidos Kr y el índice global Kw (Bartels et al. 1939; Bartels et al. 1940).

A partir de los desarrollos anteriormente mencionados, además de la incorporación de registros magnéticos en formatos digitales y la disponibilidad de computadoras en los diferentes observatorios a nivel global, algunos autores como Alldredge (1960), Van Wijk et al. (1977) y Mayaud (1980), desarrollaron métodos automatizados, basados en escalados computacional (Computhing Scaling Methods) para la obtención del índice K, a través de la estimación y eliminación de la variación solar diurna (SR) por medio de diferentes métodos, ya sea mediante la selección de días tranquilos o a treves del filtrado de armónicos de alta frecuencia. Sin embargo, varios estudios comparativos como el realizado por Hopgood (1986) y el realizado por Menvielle et al. (1995), demuestran que estos métodos alcanzan una concordancia de aproximadamente el 70 al 80 % con respecto al escalado manual.

Por otro lado, el estudio realizado por Menvielle et al. (1995) describe el Método de Suavizado Adaptativo, o *Adaptive Smoothing Method* (ASM), propuesto por Nowożyński et al. (1991) Nowożyński et al. (1991), así como el *Finnish Meteorological Institute Method* (FMI), también denominado Método de Eliminación Lineal, desarrollado por Sucksdorff et al. (1991). Ambos métodos requieren una optimización manual y, como resultado, tienden a seguir demasiado de cerca el comportamiento de los magnetogramas. Debido a ello, fueron adoptados por INTERMAGNET para el cálculo del índice K en diferentes observatorios.

También es importante mencionar las diferentes implementaciones en tiempo casi real del índice K, como la desarrollada por Choi et al. 2005 a través de la modificación del Finnish Meteorolical Institute Method (FMI), de tal manera que el nuevo método utiliza un día de actividad

geomagnética calmada, estimado a través de los índices K reportados por NOAA/SEC menores a 3 y reemplazándolos en los datos del día anterior y posterior a la fecha de estudio, obteniendo así un índice K muy similar en comparación con el método FMI tradicional y correlacionado con los índices obtenidos del observatorio de Kakioka.

Así mismo, la metodología propuesta Stankov et al. (2010) del Royal Belgian Meteorological Institute (RMI) para el cálculo del índice K local en tiempo casi real consiste en el uso de un algoritmo que emplea una ventana deslizante de 3 horas con la finalidad de calcular un valor K horario, asignándolo al final de cada ventana. Para ello, la curva de la variación solar regular diaria (SR) se construye a partir de las mediciones correspondientes a los 27 días más recientes, seleccionando únicamente los días geomagnéticamente tranquilos o quiet days, es decir, aquellos en los que el índice Kp de 3 horas no alcanza valores iguales o superiores a 3. Posteriormente, Permitiendo así estimar valores de SR en resolución de un minuto y separar la variación regular de las perturbaciones geomagnéticas de corto período.

En el caso de Latinoamérica, el Servicio Magnético de México, operado a través del Instituto de Geofísica de la UNAM, y mediante su proyecto Red de Estaciones Geomagnéticas de México (REGMEX), tiene como objetivo construir una red de cinco estaciones geomagnéticas (GMS), con el propósito de monitorear el campo magnético regional y publicar información de índices geomagnéticos en tiempo casi real, a partir de aproximaciones del índice K mexicano (KMEX) y del índice planetario Dst (ΔHMEX) Corona-Romero et al. (2024)

Por último, es importante destacar que para el caso del desarrollo del índice K para Colombia, la investigación realizada por Alejandra et al. (2018) realizo una aproximación del cálculo de dicho índice para la actividad geomagnética registrada en octubre de 2013, teniendo en cuenta los datos adquiridos por el Observatorio Geomagnético de Fúquene (FUQ) e implementando la metodología de Eliminación Lineal o Finnish Meteorolical Institute Method (FMI) desarrollado por Sucksdorff et al. (1991).

2.1.2. Índice Dst (Storm Time Disturbance)

Para comprender más a profundidad el índice Dst, es necesario abordar el papel de la corriente de anillo (Ring Current, RC), la cual es una corriente toroidal que circula alrededor del plano ecuatorial de la tierra (Daglis et al. 1999). Durante las tormentas geomagnéticas, la magnetosfera cercana a la tierra experimenta cambios significativos en su intensidad y ubicación, generando una población de partículas cargadas y calientes que se desplazan a través de la magnetosfera interna. En este contexto, surgen dos sistemas principales de corrientes: uno que fluye en dirección oeste y otro que fluye en dirección este (Ganushkina et al. 2018). El índice Dst cuantifica las perturbaciones de RC, presentando una correlación con la intensidad de la corriente de anillo.

Las primeras aproximaciones al cálculo de este índice se remontan a finales de la década de 1940, en el marco de un estudio orientado a medir las variaciones del campo magnético durante eventos de tormenta, dirigido por Vestine (1947). Inicialmente, estos trabajos tenían como objetivo minimizar las perturbaciones magnéticas en la cartografía. Posteriormente, Sugiura (1963) desarrolló la metodología formal para la estimación del índice Dst, la cual consiste en sustraer una línea base dependiente del tiempo de los datos registrados por observatorios

magnéticos de baja latitud y, posteriormente, promediar los campos de perturbación residuales obtenidos a partir de varios observatorios (Love et al. 2009).

Teniendo este contexto claro, el índice Dst se cataloga como un indicador clave para el estudio del clima espacial, para poder caracterizar la actividad geomagnética, en donde el observatorio de Kioto presenta el cálculo de este índice en tres niveles distintos de procesamiento (Final, Provisional y Quicklook), basándose en observatorios de baja latitud. Por otra parte, el servicio geológico de los Estados Unidos ha generado un desarrollo para el cálculo de este índice en una versión operativa con una resolución al minuto, teniendo una disponibilidad casi real, basándose en técnicas que conforman el dominio del tiempo y de la frecuencia, que en comparación con el Word Data Center de Kyoto los resultados validan la fiabilidad de su aplicación y el poder comprender el estado actual de la corriente de anillo y el entorno geomagnético, lo que lo hace ideal para análisis científicos y usos operativos (Gannon et al. 2011).

En el ámbito nacional, estudios como Pinzon-Cortes et al. (2025) han realizado una aproximación del cálculo y análisis del índice Dst a partir de datos locales, en donde se calcula un índice de perturbaciones locales (LDI) utilizando registros geomagnéticos del Observatorio Geomagnético de Fúquene (FUQ). Los autores demostraron que con el cálculo de estos datos se puede generar unos proxies del índice Dst, que presenta una alta correlación con el índice Dst oficial durante periodos que presentan una fuerte actividad geomagnética. El resultado de este estudio valida el uso de observatorios ecuatoriales para la caracterización de la corriente de anillo y para mejorar la representación espacial y temporal de las tormentas geomagnéticas.

2.1.3. Sistemas de Monitoreo de Clima Espacial

Teniendo en cuenta que el clima espacial corresponde a un fenómeno de naturaleza global, no implica que se comporte de manera uniforme para toda la superficie terrestre, esto dependerá también de las variables asociadas a su posición geográfica, a la dinámica ionosférica regional y al nivel de exposición de la infraestructura tecnológica de cada país. En respuesta ante esta variabilidad, en los últimos años varios países han impulsado la creación de sistemas nacionales de vigilancia y pronóstico del clima espacial, estas plataformas se orientan a la observación continua de la actividad solar y geomagnética (Vargas-Domínguez et al. 2026).

Un ejemplo es la página desarrollada por parte del instituto geofísico de la UNAM llamada REGMEX, en donde se encuentran los índices geomagnéticos planetarios y regionales, los cuales presentan consistencias cualitativas y cuantitativas, que tiene como resultado que los eventos geomagnéticos regionales siguen una misma tendencia en los resultados planetarios. Se concluye de este estudio que el desarrollo de infraestructura, instrumentación y productos orientados a la investigación y el monitoreo del clima espacial es fundamental para poder abordar los riesgos y los efectos nocivos del clima espacial (Corona-Romero et al. 2024).

Adicionalmente, se destacan otros sistemas internacionales consolidados de monitoreo del clima espacial, como lo son: el sistema de la NOAA (EE.UU), Space Weather Prediction Center (SWPC) y el European Space Weather Centre de la agencia espacial europea ESA, los cuales operan redes de observatorios y modelos de pronóstico en tiempo casi real, proporcionando información clave para la gestión del riesgo asociado al clima espacial.

2.2. MARCO REFERENCIAL

2.3. Campo Magnético Terrestre (CMT)

La Tierra está rodeada por un campo magnético propio conocido como Campo Magnético Terrestre (CMT), que se puede describir como la superposición de contribuciones provenientes de diferentes orígenes, ya sea asociadas al campo principal de la tierra, el campo cortical o el campo externo (Lanza et al. 2006), de tal manera que la contribución más dominante en un 97 % del campo magnético proviene de flujos convectivos del núcleo fluido magnetizado interior de la tierra y sus interacciones inductivas con el campo magnético de acuerdo con los postulados de la teoría de Geodinamo (Voorhies 1995; Langel et al. 1998; Malakhov et al. 2022).

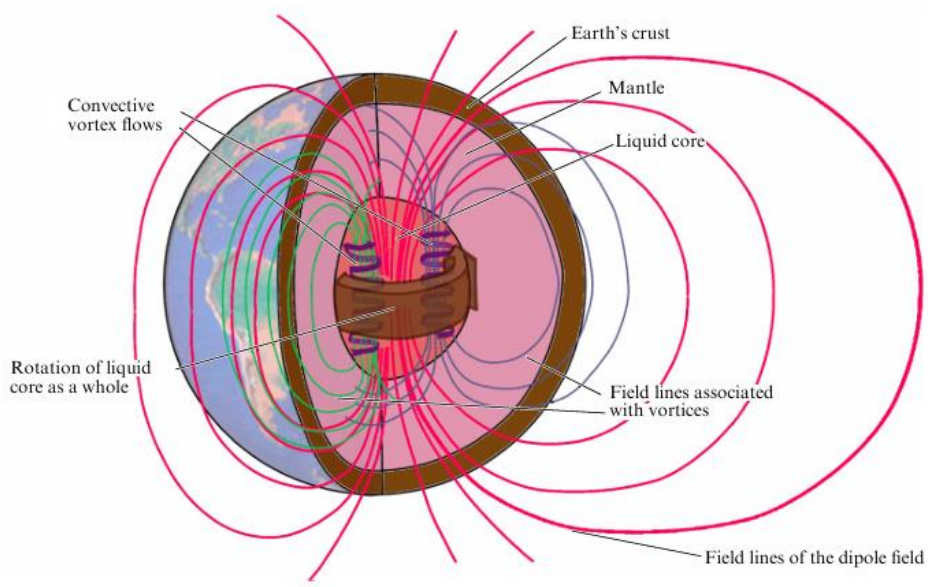


Figura 1: Esquema de generación del campo principal. Fuente: Malakhov et al. (2022).

Por otro lado, el campo externo se refiere al aporte asociado a las corrientes eléctricas que fluyen en la ionosfera y magnetosfera, debido a la interacción de la radiación electromagnética del sol y los vientos solares. Un ejemplo de esto es la Variación Solar Diaria Calmada (Sq), que es una manifestación de un sistema de corrientes ionosféricas producidas por el calentamiento de los lados diurnos y nocturnos de la ionosfera, generando corrientes eléctricas que impulsan el plasma ionosférico (Sabaka et al. 2013).

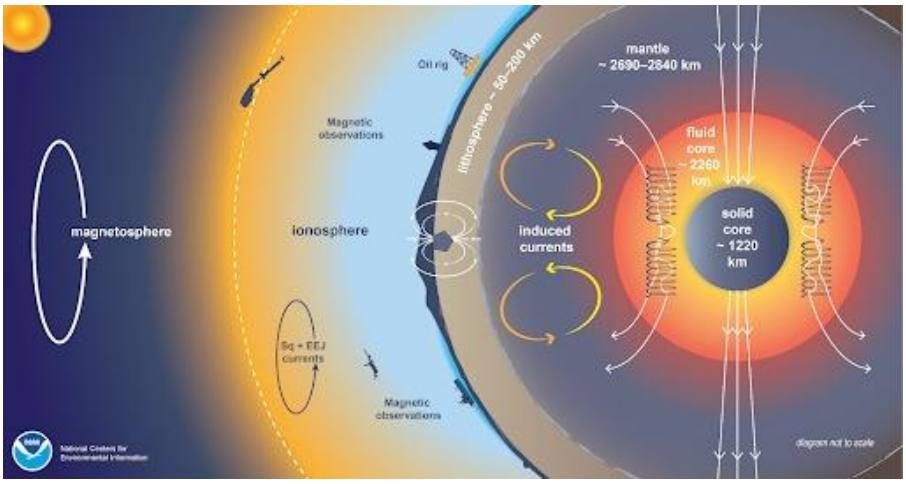


Figura 2: Fuentes del campo magnético terrestre. Fuente: NOAA- National Centers for Environmental Information (NCEI) (2024).

2.3.1. Campo Litosférico

El campo litosférico representa aproximadamente el 3 % del campo magnético total observado en la superficie terrestre, y está directamente asociado con las rocas ferromagnéticas presentes en la corteza terrestre y las capas superiores de astenosfera. Estas rocas adquieren magnetización, ya sea mediante procesos de magnetización inducida bajo los efectos del campo magnético o por la magnetización residual adquirida después de enfriarse y atravesar la temperatura de Curie. Como resultado de dichos procesos, las rocas magnetizadas generan anomalías de carácter local que constituyen un aporte importante al campo magnético total (Malakhov et al. 2022).

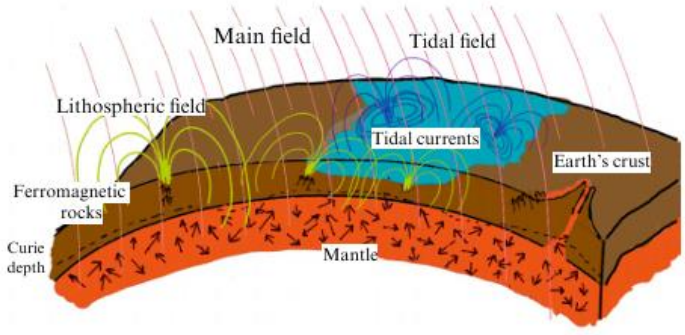


Figura 3: Diagrama de la generación de los campos litosférico y mareal. Fuente: Malakhov et al. (2022).

2.3.2. Campo Externo

El campo externo corresponde a las perturbaciones magnéticas asociadas a las corrientes espaciales producidas en la magnetosfera externa de la tierra. Estas corrientes incluyen la corriente de anillo, compuesta por las partículas atrapadas en cinturones de radiación las cuales realizan una deriva longitudinal alrededor del planeta; las corrientes de la Magnetopausa o corrientes de Chapman-Ferraro formadas por partículas cargadas en el viento solar que fluyen en la magnetosfera; las corrientes de cola magnética; y las corrientes alineadas o corrientes de Birkeland.

En la superficie terrestre la contribución asociada a estas corrientes no contribuye más del 2 al 3 % (Malakhov et al. 2022).

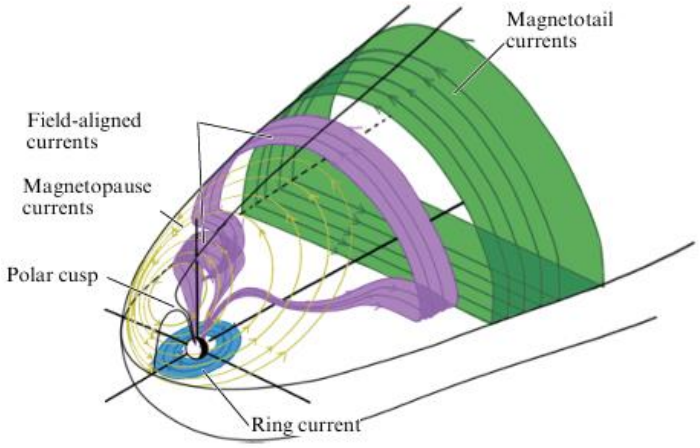


Figura 4: Sistema de corrientes magnetosféricas. Fuente: Malakhov et al. (2022).

2.3.3. Campo Ionosférico

Las corrientes ionosféricas surgen del calentamiento que presenta la atmósfera a causa del sol, la gravedad lunar y otros factores. Estas corrientes fluyen en una capa conductora que se denomina E-layer, la cual se encuentra a altitudes de 90 a 150 km. Se asocian estas corrientes a una circulación de masas de aire en la atmósfera neutra; las contribuciones promedio del campo ionosférico son del orden de decenas de nT, donde una contribución local puede ser mucho mayor en latitudes polares, llegando a ser dominantes durante las perturbaciones magnetosféricas (Malakhov et al. 2022).

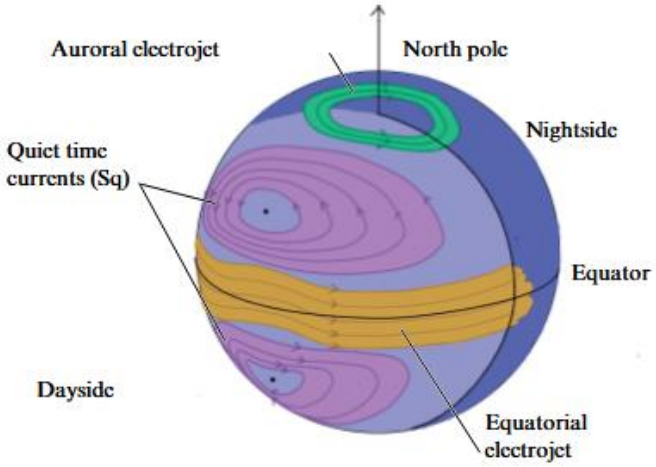


Figura 5: Sistema de corrientes magnetosféricas. Fuente: Malakhov et al. (2022).

2.3.4. Magnetosfera

La magnetosfera surge entre la interacción del viento solar y el geodínamo, generando las líneas del campo en el lado diurno y extendiéndolas en una cola magnética la cual se genera en dirección opuesta al sol (Ganushkina et al. 2018), se distingue principalmente por una gran cantidad de fuentes de diversa naturaleza en las que se encuentran corrientes internas en el núcleo terrestre, hasta corrientes ionosféricas y magnetosféricas, los cuales son componentes individuales que conforman el campo total de la región (Malakhov et al. 2022).

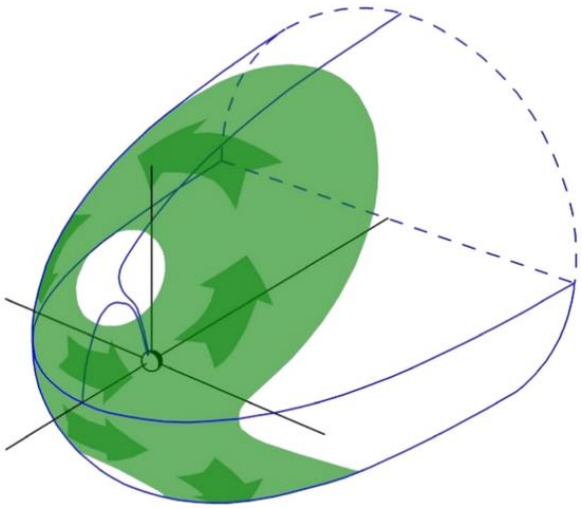


Figura 6: Sistema de corrientes magnetosféricas. Fuente: Ganushkina et al. (2018).

2.4. Componentes Geomagnéticas

Según el manual técnico de Intermagnet St-Louis et al. (2024), las componentes se usan para describir los elementos individuales del vector magnético y sus magnitudes, donde encontramos las siguientes componentes:

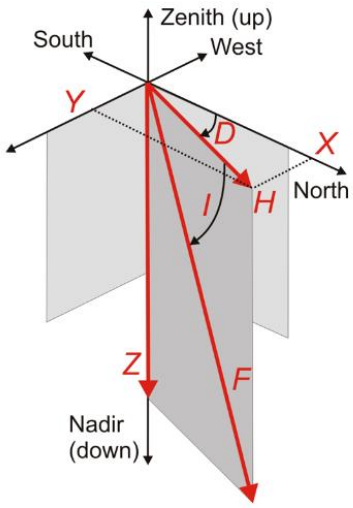


Figura 7: Componentes geomagnéticas. Fuente: St-Louis et al. (2024).

- **Componente X:** La componente norte, es la intensidad que presenta el vector del campo magnético en la dirección del norte geográfica, sus valores son positivos y se calcula de la siguiente manera:

$$X = H \cdot \cos(D) \tag{1}$$

- **Componente Y:** El componente este, es la intensidad que presenta el vector del campo magnético en la dirección del este geográfica, se calcula de la siguiente manera:

$$Y = H \cdot \sin(D) \tag{2}$$

- **Componente Z:** La intensidad vertical, es el valor que presenta el vector del campo magnético en la dirección vertical, Z es negativo al sur del ecuador geomagnético y se calcula de la siguiente manera:

$$Z = F \cdot \sin(I) \tag{3}$$

- **Componente H:** La intensidad horizontal, es el valor que presenta el vector del campo magnético en la dirección del plano horizontal a lo largo del meridiano magnético y se calcula mediante dos formas:

$$H = F \cdot \cos(I) \tag{4}$$

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} \tag{5}$$

- **Componente D:** Declinación o variación, es el ángulo entre el vector magnético y el norte verdadero y se calcula de la siguiente manera:

$$D = \arctan\left(\frac{X}{Y}\right) \tag{6}$$

- **Componente I:** La inclinación, es el ángulo entre el vector magnético y el plano horizontal, en grados de arco, se calcula de la siguiente manera:

$$I = \arctan\left(\frac{Z}{H}\right) \tag{7}$$

- **Componente F:** La intensidad total del campo, es calculada a partir de los elementos de campo XYZ o HDZ y consistente con ellos, se calcula de la siguiente manera:

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \tag{8}$$

2.5. Índices Geomagnéticos

Los índices geomagnéticos según Menvielle et al. (2010) se han convertido desde la mitad del siglo XX en parámetros clave para los estudios sol – tierra y de clima espacial, siendo comúnmente utilizados para detectar y describir eventos relacionados a este tipo de fenómenos.

Por otro lado, los índices geomagnéticos se pueden definir como medidas asociadas a la actividad geomagnética, los cuales buscan describir el comportamiento del campo magnético en un periodo de tiempo determinado, es decir actúan como una respuesta de la magnetosfera y de la ionosfera del planeta al forzamiento solar (Menvielle et al. 2010).

La primera aproximación para el desarrollo de un índice con la finalidad de caracterizar la actividad geomagnética se realizó en el año 1885, donde se buscó estimar las perturbaciones geomagnéticas de forma diaria para el Observatorio Geomagnético de Greenwich, utilizando las componentes H y D del Campo Magnético Terrestre (CMT), poco después se introdujo el índice C, definido en un rango de valores de 1, 2 y 3, el cual describía el grado relativo de perturbación en el campo magnético (Menvielle et al. 2010).

Con el desarrollo del Índice K, fruto del trabajo realizado por Bartels et al. (1939), el cual buscaba cuantificar el grado de actividad geomagnética ocasionada por las corrientes eléctricas generadas alrededor de la tierra por la radiación solar, se logró el desarrollo del índice Kp por Bartels (1949), considerado pionero por su importancia para el desarrollo de nuevos índices como el Dst (Sugiura 1963), AE (Davis et al. 1966), entre otros (Menvielle et al. 2010).

2.6. Observatorio Geomagnético de Fúquene (FUQ)

En Colombia el Observatorio Geomagnético de Fúquene (FUQ), fundado en 1953, surgió como un esfuerzo internacional del IPGH orientado en comprender el campo magnético de la tierra, además del estudio y monitoreo de los fenómenos asociados (Alva Carmona et al. 2025; Manrique et al. 2017), siendo un punto clave junto al observatorio geomagnético de Huancayo en Perú para el estudio de fenómenos electromagnéticos ecuatoriales.

El observatorio se encuentra ubicado en el municipio de Fúquene, específicamente en la laguna de Fúquene 100 km al norte de Bogotá. Este fue construido en la isla conocida como El Santuario de Fúquene en el año 1952, de tal manera que para el año 1953 se logró obtener su primer magnetograma (Pinzon et al. 2022). Es importante mencionar que diferentes estudios geológicos determinaron que la geología local era aporpiada para la contrucción del observatorio, siendo que está compuesta principalmente de depósitos lacustres de areniscas que recubren formaciones de Chiquinquirá y la formación Simiti (Fuquen et al. 2005) y autores como Melo 2012 describen que estás formaciones en especial la formación Simiti están consituidos por capas superpuestas diferenciadas en 5 segmentos (A, B, C, D, E), donde los segmentos A, C y E son areniscas o rocas con un alto porcentaje de arena, mientras B y D son limolitas, cuarzo y mica.

De tal manera que la geología del área en la que se encuentra el observatorio geomagnético es óptima, ya que evita todo tipo de contaminación y ruido que llegue a afectar las mediciones del campo magnético terrestre, asociado la presencia minerales ferromagnéticos generalmente relacionados con rocas de caracter ígneo o metamórfico. (Laranja et al. 2017).

Desde su fundación, el observatorio ha estado equipado con instrumentos especializados para medir con precisión el comportamiento del campo magnético terrestre (CMT). Inicialmente, contó con un magnetómetro Askania, un inductor Ruska y un magnetómetro de oscilación, destinados a la medición absoluta de las variables D, I y del campo escalar F. Posteriormente, esta instrumentación fue ampliada con la incorporación de un magnetómetro horizontal de cuarzo (*Quartz Horizontal Magnetometer*, *QHM*) y un magnetómetro de precesión protónica (*Proton Precession Magnetometer*, *PPM*), los cuales permitían registrar de manera análoga la información del campo magnético (Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) 2020; Alva Carmona et al. 2025).

Sin embargo, en el año 2020 estos equipos fueron reemplazados debido a su antigüedad y a las fallas asociadas a esta. Posteriormente, en el marco de la renovación integral de las instalaciones e instrumentación llevada a cabo entre 2022 y 2023, se integró un variometro *fluxgate* triaxial (*FGE*) del British Geological Survey (BGS) y un variometro *LEMI-025* para la medición de las variaciones de las componentes X, Y, Z y del campo escalar F. Asimismo, se incorporaron dos teodolitos *DI-flux* del Royal Meteorological Institute (RMI) de Bélgica para mediciones absolutas, junto con tres magnetómetros de precesión protónica *GSM-19* (Alva Carmona et al. 2025).

Adicionalmente, con las nuevas implementaciones realizadas en 2025, que incluyeron la incorporación de un sistema de energía solar para garantizar la autonomía energética de las instalaciones y la instalación de internet satelital, así como la operación de equipos como el *LEMI-025*, reconocido por su alta resolución y precisión, y el *GSM-19*, se lograron las condiciones necesarias para la transmisión continua de datos en tiempo real (Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC 2026; Alva Carmona et al. 2025). Estas mejoras integrales han incrementado significativamente la capacidad de FUQ para monitorear fenómenos geomagnéticos con mayor exactitud y confiabilidad.

3. Materiales y Métodos

3.1. Planteamiento Metodológico

La metodología que se plantea para este proyecto parte con una fase de investigación y planificación, seguida por la implementación y operación de índices, el diseño de un sistema de monitoreo de datos en tiempo casi real y, finalmente, la documentación y cierre del proyecto. Estos pasos permiten que el proyecto tenga componentes teóricos, técnicos y operativos para poder garantizar los resultados.

En la primera fase se realiza una recopilación y revisión exhaustiva de literatura científica que tenga relación con el cálculo de índices geomagnéticos con el fin de garantizar una metodología confiable. A su vez se analiza el contexto del Observatorio Geomagnético de Fúquene, en donde se tienen en cuenta variables como: su ubicación, los equipos, su infraestructura, su geología y qué tipo de información tiene disponible. Adicionalmente, se realiza una capacitación para profundizar en las extensiones Marcos y Martas del software XMagpy, para asegurarse de tener una correcta adquisición de los datos en tiempo real.

Posteriormente se realiza la estimación y validación de los índices geomagnéticos históricos, específicamente el índice Dst bajo la metodología propuesta por Love et al. (2009) para el observatorio de Hermanus ubicado en Sudáfrica, y el índice K (Sucksdorff et al. 1991). Los resultados de esto permiten evaluar el comportamiento histórico de actividad geomagnética registrada por el observatorio de Fúquene, y se realiza la operación del algoritmo de recolección y almacenamiento de datos adquiridos, estableciendo así las bases para el análisis en tiempo real.

La siguiente etapa se conforma en el desarrollo del sistema de monitoreo de datos en tiempo real, que incluye el cálculo de los índices Dst y K en tiempo real, permitiendo así la visualización

continua de las componentes magnéticas y de los índices calculados, facilitando con ello el seguimiento y análisis de actividad geomagnética. Durante todo el proceso fueron fundamentales las reuniones semanales de seguimiento para evaluar los avances y resolver las dudas y problemas que se presentaron durante la investigación e implementación.

Por último, se plantea la fase de cierre, en la que se elaboran las conclusiones que surgen gracias al proceso metodológico y de los resultados obtenidos. Se redacta el informe final en donde se documenta el funcionamiento de la plataforma desarrollada y las limitaciones encontradas, realizando con ello la socialización mediante el jurado evaluador.



Figura 8: Diagrama Metodología General del Proyecto. Fuente: Elaboración Propia.

3.2. Datos y Fuentes

3.2.1. Registros geomagnéticos empleados del observatorio FUQ

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizaron los registros de las series históricas asociadas a las mediciones del campo magnético terrestre (CMT) del Observatorio Geomagnético de Fúquene (FUQ), publicadas a través del World Data Center (WDC) del British Geological Survey (BGS) (`https://wdc-dataportal.bgs.ac.uk/`). Estas series históricas constituyen la base fundamental para la construcción de los registros históricos de los índices K local y Dst local, ya que contienen las observaciones del CMT necesarias para estimar las perturbaciones geomagnéticas registradas desde 1955.

Actualmente, el repositorio de registros geomagnéticos del WDC para FUQ cuenta con disponibilidad de datos desde el 01/01/1955 hasta el 31/12/2024. De esta manera, en primer lugar,

se emplearon datos correspondientes al intervalo 1955–2020 con resolución temporal horaria, mientras que, en segundo lugar, se utilizaron las series del periodo 2021–2024, las cuales contaban con resolución al minuto. Ambos conjuntos incluyeron mediciones de las componentes magnéticas H, D y Z, así como de las componentes cartesianas X, Y y Z. Sin embargo, es importante destacar que estos registros presentan intervalos vacíos de datos, especialmente en los periodos comprendidos entre junio de 1980 y enero de 1981, noviembre de 2017 y abril de 2018, y junio de 2020 y enero de 2024.

Estas series históricas constituyen la información observacional sobre la cual se fundamentó el cálculo de los índices geomagnéticos K y Dst históricos. En este sentido, su disponibilidad y cobertura temporal permitieron la reconstrucción del comportamiento histórico del campo geomagnético en el observatorio.

3.2.2. Adquisición y transmisión de datos en tiempo real

Para la adquisición y transmisión de datos en tiempo real del Observatorio Geomagnético de Fúquene, utilizamos la arquitectura construida por (Leonhardt et al. 2026), siendo un paquete de software libre desarrollado por GeoSphere Austria encargado de la adquisición, transmisión y almacenamiento de datos geomagnéticos. Cuenta con dos módulos principales: MARTAS (*MagPy's Automated Real Time Acquisition System*), que se encarga de adquirir los datos desde los sensores, y MARCOS (*MagPy's Automated Realtime Collector and Organization System*), es el encargado de recolectar, almacenarlos y organizarlos los datos.

3.2.2.1 Protocolo de comunicación MQTT

El módulo de adquisición de MARTAS se centra en el protocolo MQTT (*Message Queue Telemetry Transport*), el cual es un estándar para la transmisión de datos en tiempo real, dicho modulo lee los datos que captura el sensor a través del puerto serial, los transforma en un formato generalizado que va a incluir datos y metadatos, y los distribuye en un *broker* MQTT. Por otra parte, el módulo MARCOS se conecta a dicho *broker*, almacenando los datos recibidos en una base de datos MariaDB, archivos binarios o los retransmite a una interfaz web mediante WebSockets.

En este caso el *bróker* que se utiliza es Mosquitto, es una implementación del protocolo MQTT de código abierto incluyendo la configuración de un puerto (por defecto es el puerto 1883), en este puerto se define parámetros como el número máximo de mensajes en cola, esto es útil en caso de que haya una interrupción de red, cuándos se reestablezca la comunicación con el equipo se reenviaran los datos en cola.

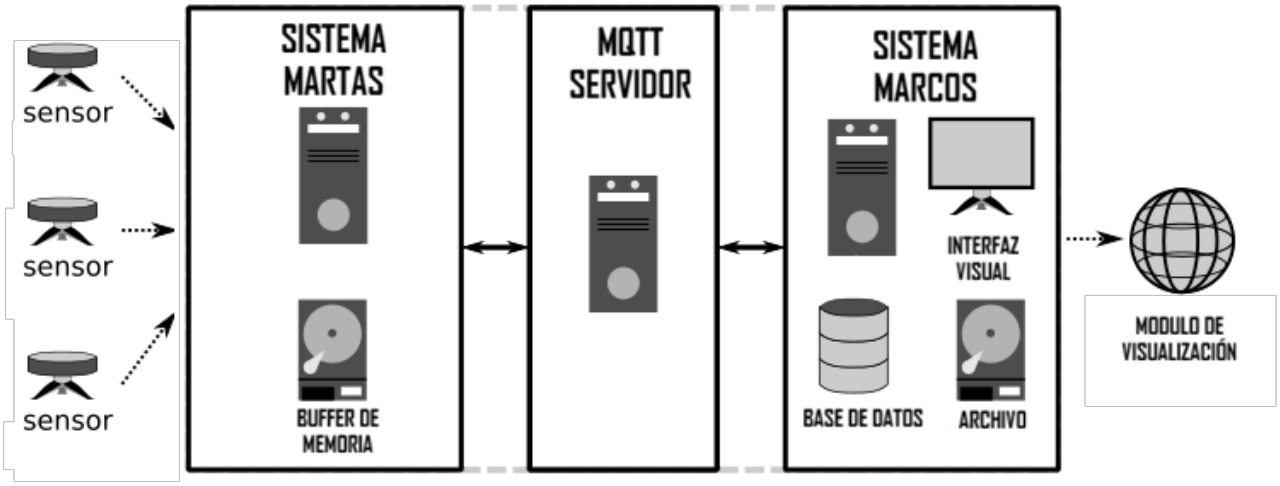


Figura 9: Esquema de adquisición y transmisión de los datos en tiempo real, se logra evidenciar los tres nodos que van a gestionar la adquisición, el envió y la recepción de los datos. Modificado de (Leonhardt et al. 2025)

3.2.2.2 Autenticación y seguridad

Para garantizar la integridad de los datos, estos tendrán cifrado TLS (*Transport Layer Security*) y claves precompartidas (PSK,*Pre-Shared Keys*) que se aplicara mediante las credenciales asignadas en *broker* Mosquitto, las cuales se almacenarán en un archivo resguardado con contraseña. Teniendo la autenticación aprobada, solo aceptara solicitudes que puedan ser comprobadas por el *broker*; de otro modo, se rechazarán las conexiones anónimas.

Las credenciales se asignarán mediante la herramienta `addcred` de MagPy, almacenando las credenciales de forma segura para cualquier conexión que se tenga a partir del protocolo MQTT.

3.2.2.3 Configuración de sensores

Cada sensor que se tenga registrado tendrá un archivo de configuración (`sensors.cfg`), el cual tendrá los parámetros del sensor y sus metadatos (puerto, velocidad en baudios, tamaño de palabra, bits de parada y paridad). Cada sensor se identificará mediante un `SensorID` que será único; se conformara por el número de serie, un número de revisión que se actualizara si el equipo recibe mantenimiento, por último un número de revisión de datos crudos y filtrados. Por ejemplo, `LEMI025_97_0001_0001`).

Para el caso del Observatorio de Fúquene, la transmisión de datos tendrá una resolución a la décima de segundo y se almacenaran en una tabla MariaDB identificada por el `SensorID` del instrumento.

3.3. Cálculo del Índice Dst

3.3.1. Metodología para Datos Históricos

3.3.1.1 Enfoque metodológico

En esta subsección, se describe la metodología que se implementó para el cálculo histórico del índice Dst local para el Observatorio de Fúquene. Se adopto la metodología propuesta por Love et al. (2009) para el observatorio de Hermanus (HER) ubicado en Sudáfrica y manejado por la agencia nacional espacial de Sudáfrica (SANSA), basada en una revisión del algoritmo utilizado por el World Data Center para el observatorio de Kyoto. La diferencia fundamental entre este método revisado y el estándar radica en que la eliminación de la variación solar quieta (Sq) se realiza mediante un proceso de filtrado en capas, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

En la metodología original, el índice Dst final se obtiene mediante el promedio con los observatorios de Hermanus (HER), Kakioka (KAK), Honolulu (HON) y San Juan (SJG). En este trabajo, la metodología se realizo hasta antes de promediar este valor con otros observatorios, con el fin de obtener un valor local $Dlat$, el cual corresponde a la perturbación local normalizada por latitud magnética (Love et al. 2009).

Para entender el comportamiento de este índice, Love et al. (2009) menciona que las mediciones registradas por un observatorio geomagnético provienen de corrientes eléctricas tanto internas como externas a la Tierra. Además, describen esta señal capturada como la suma de las siguientes componentes:

$$H(t) = C + SV + Sq + SC + Dist \tag{9}$$

En donde C corresponde a la magnetización permanente de la corteza, SV es la representación del campo principal y su variación secular, Sq es la variación solar quieta (Solar Quiet),SC representa cualquier variación cíclica de largo plazo ligada al ciclo solar, y por último, $Dist$ corresponde a la serie temporal de perturbación.

La componente C es el magnetismo que se origina en las rocas ígneas y metamórficas ubicadas por debajo de su temperatura de Curie (temperaturas entre los 200 y 700 °C) en la corteza terrestre y el manto superior. El gradiente de temperatura respecto a la profundidad de la tierra implica que las rocas que están por debajo de la profundidad de Curie (20 Km) no serán magnéticas. A su vez las rocas sedimentarias presentan un magnetismo secundario (Purucker et al. 2007).

Por su parte SV es entendida como los cambios paulatinos que presenta el campo magnético en escalas de tiempo de años a siglos, siendo estas variaciones generadas por los movimientos convectivos en el núcleo terrestre (Jackson et al. 2015).

Siendo Sq la fuente primaria donde residen corrientes eléctricas ionosféricas, aunque las corrientes magnetosféricas y las corrientes telúricas inducidas en la corteza y el manto también contribuyen de manera significativa a la señal (Campbell 1989).

Considerando que SC representa cualquier variación cíclica de largo plazo ligada al ciclo solar, con una periodicidad típica de unos 10.5 años (Clua de Gonzalez et al. 1993; Macmillan et al. 2007).

Se busca obtener $Dist$, debido a que esta frecuentemente dominada por tormentas geomagnéticas. Presenta un comportamiento no estacionario y ocurre de manera intermitente en escalas de tiempo de horas a días, y constituye el foco principal del análisis para el cálculo del índice Dst (Love et al. 2009).

3.3.1.2 Preprocesamiento de la serie histórica

Para el cálculo del índice Dst histórico del Observatorio Geomagnético de Fúquene, se requiere utilizar la componente horizontal H del campo magnético, la cual se obtuvo a partir de dos fuentes de datos. La primera corresponde a los registros históricos disponibles en el World Data Center (WDC), en donde se encuentra el período comprendido entre 1955 y 2015. La segunda fuente corresponde a datos proporcionados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), cubriendo el período 2016–2018. Ambas series fueron unificadas a una resolución temporal horaria, obteniendo así una serie continua de la componente H para el período 1955–2018.

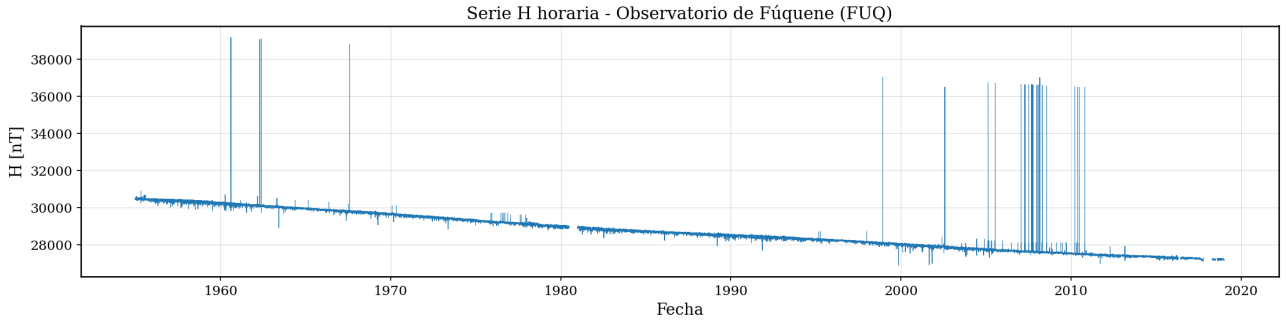


Figura 10: Serie temporal de la componente magnetica horizontal (H) del observatorio geomagnetico de Fuquene, apartir de datos del año 1955, recolectados por wdc hasta el año 2015 y datos obtenidos por el IGAC para el periodo del 2016-2018 .

En la Figura 10 se observa la serie temporal de la componente H durante el periodo 1955-2018, se realiza una etapa de preprocesamiento para obtener una limpieza de los datos, esto con el fin de eliminar los valores que puedan afectar el cálculo del índice Dst, primero se eliminaron valores que correspondan a errores instrumentales o de transmisión, como lo son valores superiores a más de 34,000 nT, posteriormente se realizó un algoritmo que identifique valores que difieren en medidas de más de 5,000 nT respecto al valor vecino que tengan. Estos valores se dejaron como datos faltantes NaN, para lograr una integridad en la serie temporal y que en el momento del procesamiento no vayan a tener ningún tipo de cálculo estos datos.

$$H_i = \text{NaN} \quad \text{si} \quad \begin{cases} \big(|H_i - H_{i-1}| > \delta \wedge |H_i - H_{i+1}| > \delta \wedge |H_{i-1} - H_{i+1}| < 0{,}3\delta\big) \\ \qquad \vee \quad (H_i > H_{max}) \end{cases} \tag{10}$$

Donde H_i son los valores de la componente H en el momento i, H_{i-1} y H_{i+1} serán los valores vecinos anteriores y posteriores, δ es el umbral de detección seleccionado de $5,000$ nT y H_{max} se el límite superior en nT siendo $34\,000$ nT.

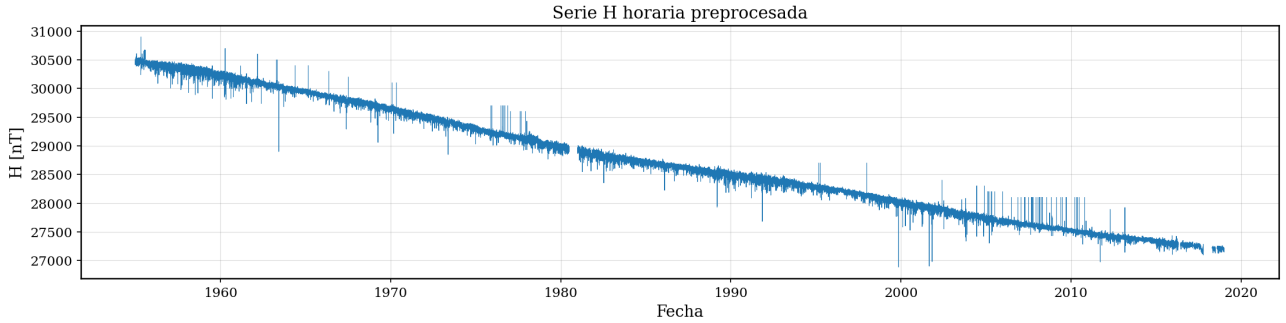


Figura 11: Serie temporal de la componente magnetica horizontal (H) para el periodo 1955-2018, tras la aplicación del algoritmo descrito en la ecuación (10), permitiendo remover valores anomalos de gran magnitud y ruidos instrumentales.

La ecuación (10) permite sustituir datos que presentaban valores anómalos por valores no numéricos (NaN). En la figura 11 se presenta la serie temporal con los valores anómalos sustraídos para el periodo que corresponde entre 1955-2018, se evidencia una tendencia decreciente coherente según la variación secular del campo magnético, permitiendo con ello conservar la integridad de la señal para etapas posteriores de limpieza.

3.3.1.3 Estimación del campo interno $I(t)$

El primer paso del procesamiento es la estimación de las contribuciones del campo interno $I(t)$. Courtillot et al. (1988) mencionan que las frecuencias mas altas tienen un origen en fuentes externas como la ionosfera y la magnetosfera, mientras que las variaciones de períodos mas largos provienen de fuentes internas, que nacen del movimiento de los fluidos en el núcleo terrestre a profundidades superiores a los 2900 km. Esto genera un dinamo del núcleo terrestre, formando así un campo magnético principal. Es fundamental entender este concepto ya que para el calculo del índice Dst se busca aislar la contribución externa de corta duración. Sin embargo, para llegar a tener esta señal aislada, se tiene que caracterizar y remover la componente interna, la cual esta definida como C y $SV(t)$,se genera en el núcleo terrestre y es calculada a partir del desplazamiento del vector magnético a lo largo de las décadas (Love et al. 2009; Courtillot et al. 1988).

$$I(t) = C + SV(t) \tag{11}$$

Love et al. (2009) identifica que el campo interno I(t) se estima mediante la ecuación (11), a partir de la identificación de un subconjunto de la serie temporal denominada *días calmados*, que son los períodos magnéticos más tranquilos que se van a encontrar en la serie, estos intervalos presentan contribuciones mínimas de fuentes externas, dejando así una señal predominante que tiene origen en el campo interno. Para el cálculo de estos días se construye una ventana deslizante de 24 horas, dentro de la cual se calcula el promedio de las diferencias absolutas entre horas consecutivas.

$$\delta H_i = \frac{1}{24} \sum_{m=1}^{24} |H_{i+m} - H_{i+m-1}| \tag{12}$$

En donde δH_i es una medida de la variabilidad local de la serie que se centra en el instante i. Posteriormente para cada mes, se seleccionan los 5 días con menor valor de δH_i, esto se hace ya que se toma el criterio de que 5 días representan aproximadamente el 17 % del mes, lo cual es suficiente para poder capturar el comportamiento del campo interno excluyendo los períodos que pueden perturbar y contaminar la serie. Estos días seleccionados no tienen que coincidir necesariamente con los Días Internacionalmente Quietos (*International Quiet Days*) definidos por el GeoForschungsZentrum de Potsdam, aunque puede haber coincidencias entre ambas series (Love et al. 2009). Para el cálculo realizado con los datos del observatorio de Fúquene, se realiza una consideración, si el día tuvo más de tres mediciones horarias disponibles se consideraba este día viable, esto se tuvo en cuenta para evitar datos erróneos en días donde solo hay una medición, dejando la siguiente fórmula para el caso de este observatorio:

$$\delta H_i = \begin{cases} \dfrac{1}{24} \displaystyle\sum_{m=1}^{24} |H_{i+m} - H_{i+m-1}| & \text{si } n_i > 3 \\ \text{NaN} & \text{si } n_i \leq 3 \end{cases} \tag{13}$$

Donde n_i será el número de mediciones horarias disponibles en el momento i.

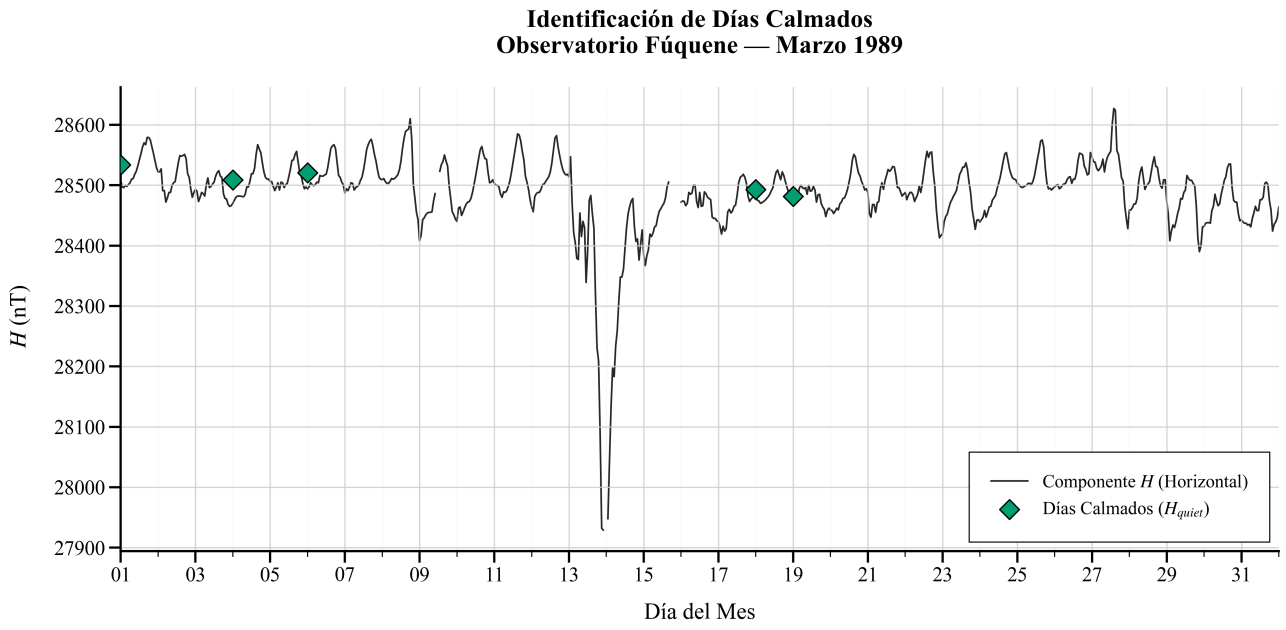


Figura 12: Identificación de los 5 días mas calmados para el mes de Marzo del año 1989 en el observatorio de Fúquene. La linea negra representa la serie de tiempo horaria de la componente horizontal (H), los diamantes verdes corresponden a los días calmados seleccionados mediante la ecuación (13).

En la figura 12 se identifican los días calmados para el mes de marzo de 1989. Se procede a calcular $I(t)$ ajustando los valores de la componente H en los días encontrados; se realiza

mediante el polinomio de Chebyshev de primera especie $T_k(t)$ (Love et al. 2009), debido a que son polinomios ortogonales que permiten aproximar funciones dentro de un intervalo finito, minimizando la dependencia entre términos, por consiguiente se obtiene una convergencia rápida lo que resulta efectivo en la estimación de funciones suaves. Esto es esencial, debido a que la variación secular es una señal que se presenta en una escala temporal y varía suavemente a lo largo de las décadas (Conte et al. 1980). Teniendo esto claro, se modela el cálculo de $I(t)$ como:

$$I(t) = \sum_{k} c_k T_{k-1}(t) \tag{14}$$

En donde los coeficientes de c_k serán determinados por minimos cuadrados de la siguiente manera:

$$\mathbf{c} = \arg\min_{\mathbf{c}} \sum_{j=1}^{N_q} \left(H_{q_j} - \sum_{k=0}^{K} c_k T_k(t_{q_j}) \right)^2 \tag{15}$$

Siendo así, N_q el número total de días quietos encontrados anteriormente, H_{q_j} siendo el valor diario que tiene la componente H en el día calmado encontrado j, t_{q_j} el tiempo del día quieto j y por último T_k es el polinomio de Chebyshev de primera especie evaluado en ese instante t_{q_j}. Teniendo todo este término al cuadrado representando el error entre el valor observado y el valor predicho por el polinomio evaluado en cada día quieto, siendo la sumatoria que acumula este error sobre todos los N_q de los días disponibles. Minimizando esta suma (arg mín) para poder encontrar los coeficientes c_k que van a producir el mejor ajuste del polinomio, lo cual resolvimos bajo la función `Chebyshev.fit` de la librería NumPy (Harris et al. 2020). El grado de truncamiento propuesto por Love et al. (2009) menciona que se debe escoger un valor $K \leq 10$ para evitar errores de sobreajuste y el que mejor se asocie según el observatorio, para nuestro caso, fue de $K \leq 5$, se realiza este ajuste dentro del dominio temporal de la serie que está definida por el primer y último día calmado disponible, evitando así errores de extrapolación que puedan dar valores externos a la serie.

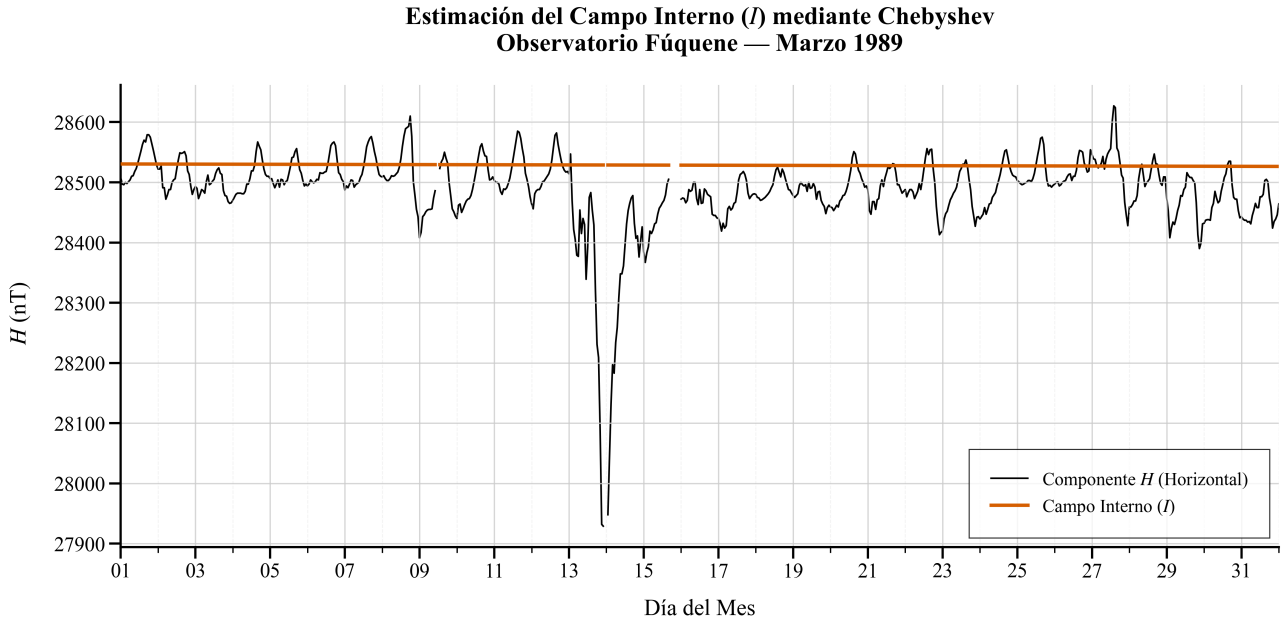


Figura 13: Cálculo del campo interno $I(t)$, a partir de los polinomios de Chebyshev. La línea negra representa la serie de tiempo horaria de la componente horizontal (H), la línea naranja representa la contribución de la señal del campo interno, seleccionados bajo la ecuación (14).

Teniendo la señal del campo interno ya caracterizada, se puede evidenciar que el comportamiento de la curva obtenida mediante el polinomio de Chebyshev (vease la figura 13) tiene una gran diferencia respecto a la serie horaria de la componente horizontal (H), la cual presenta fluctuaciones para este periodo de marzo del año 1989 debido a interacciones con el viento solar y la ionosfera.

Por otra parte, se logra evidenciar que la componente I permanece estable frente a comportamientos de gran magnitud. Un ejemplo de esto es los días comprendidos entre el 13 al 15 de marzo de 1989 (figura 13), la componente H sufrió alteraciones que lograron hacerla caer hasta -600 nT, mientras que el campo interno permaneció estable, logrando aislar eficazmente fuentes externas.

3.3.1.4 Estimación del campo Externo $E(t)$

Después de haber logrado la caracterización de la señal del campo interno $I(t)$ (vease la figura 13), se procede a realizar el cálculo del campo externo $E(t)$, el cual incluirá todas las contribuciones que son asociadas a fuentes externas del campo medido desde el observatorio. Según Love et al. (2009), el cálculo de la serie del campo externo $E(t)$ se obtendrá extrayendo la serie del campo interno I de la serie que corresponde a la componente H, de la siguiente manera:

$$E_i = H_i - I(t_i) \tag{16}$$

Donde H_i va a ser el valor que tiene la componente horizontal en el instante i, $I(t_i)$ es el valor que tenga el campo interno calculado mediante la ecuación (14) en ese mismo instante.

Obteniendo como resultado la serie para el observatorio del campo externo $E(t)$, la cual va a contener superposiciones de las siguientes contribuciones (Love et al. 2009):

$$H_i - I(t_i) = E_i = Sq_i + SC_i + Dist_i \tag{17}$$

La ecuación (17) representa las contribuciones consideradas en la metodología propuesta por Love et al. (2009), donde Sq_i va a ser la variación solar quieta, SC_i es la variación que se asocia al ciclo solar, y por último $Dist_i$ corresponde a la serie que presenta las perturbaciones conocidas como tormentas magnéticas, siendo esto uno de los pasos finales del procesamiento.

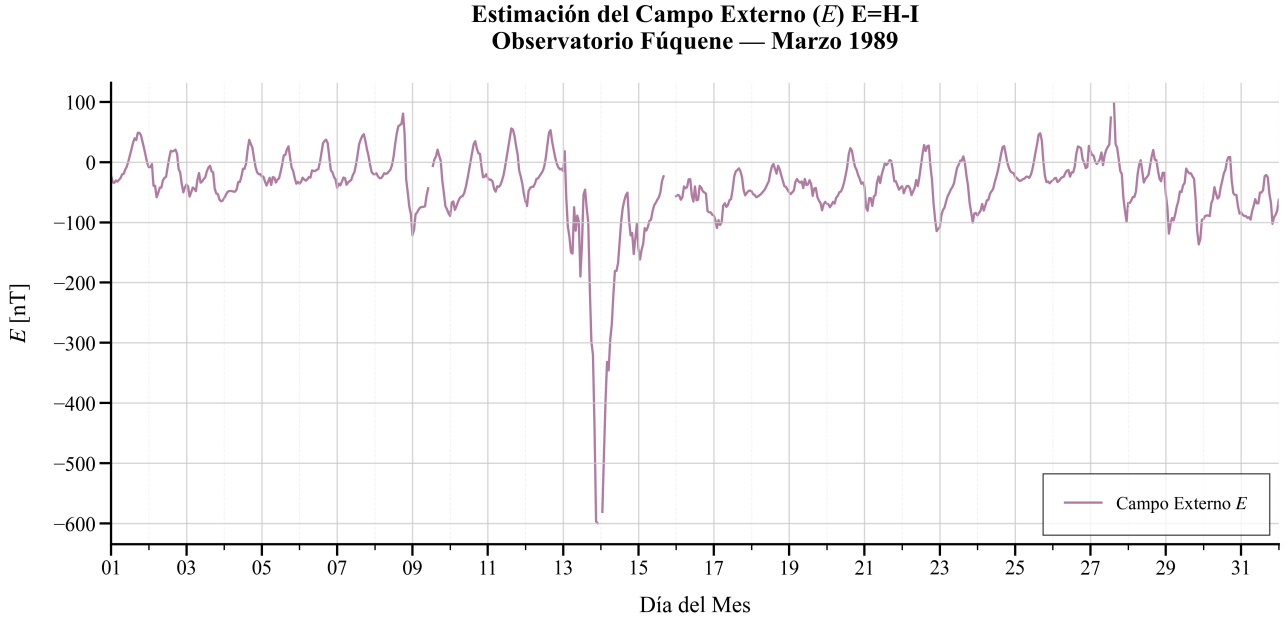


Figura 14: Cálculo de la serie del campo Externo $E(t)$ para el mes de marzo de 1989, mediante la ecuación (16).

En la figura 14 se observa el cálculo de $E(t)$ para el mes de marzo de 1989. Se evidencia la extracción de la señal del campo interno (ver Figura 13) teniendo los valores de la serie centrados en 0, obteniendo así las perturbaciones de alta magnitud que hubo para este mes, las cuales se asocian a tormentas geomagnéticas que alcanzan valores de hasta -600 nT entre los días 13 y 15 del mes seleccionado.

3.3.1.5 Estimación de la variación solar quieta $Sq(t)$

Después de haber realizado la caracterización del campo externo $E(t)$, hay que analizar los periodos de alta actividad geomagnética, dado a que estas perturbaciones de alta magnitud tienen que ser identificadas y removidas, obteniendo una estimación del campo externo aparte para el cálculo de la variación solar quieta Sq. Se realiza en el dominio de la frecuencia; puesto que estos valores presentan perturbaciones altas que pueden contaminar la estimación espectral en el caso de las componentes periódicas estacionarias (Love et al. 2009).

Love et al. (2009) identifica los periodos de alta actividad geomagnética ordenando los valores de E_i de mayor a menor, siendo el valor más grande el instante t_i el cual abrirá una ventana temporal de mínimo 24 horas (teniendo 12 horas antes y 12 horas después del t_i), en donde los limites serán denotados bajo un umbral sobre el valor absoluto de $|E|$ que tendrá esta ventana deslizante de 12 horas. Después de lograr identificar estos periodos con alta actividad magnética, estos datos se eliminan hasta remover los periodos de que tienen perturbaciones (Love et al. 2009).Para el Observatorio Geomagnético de Fúquene, teniendo en cuenta que es un observatorio que presenta latitud ecuatorial, la variación solar quieta puede tener valores significativamente elevados, optamos por tener un umbral de $\delta = 100$ nT, se hace con el fin de no remover señales que puedan tener un impacto considerable.

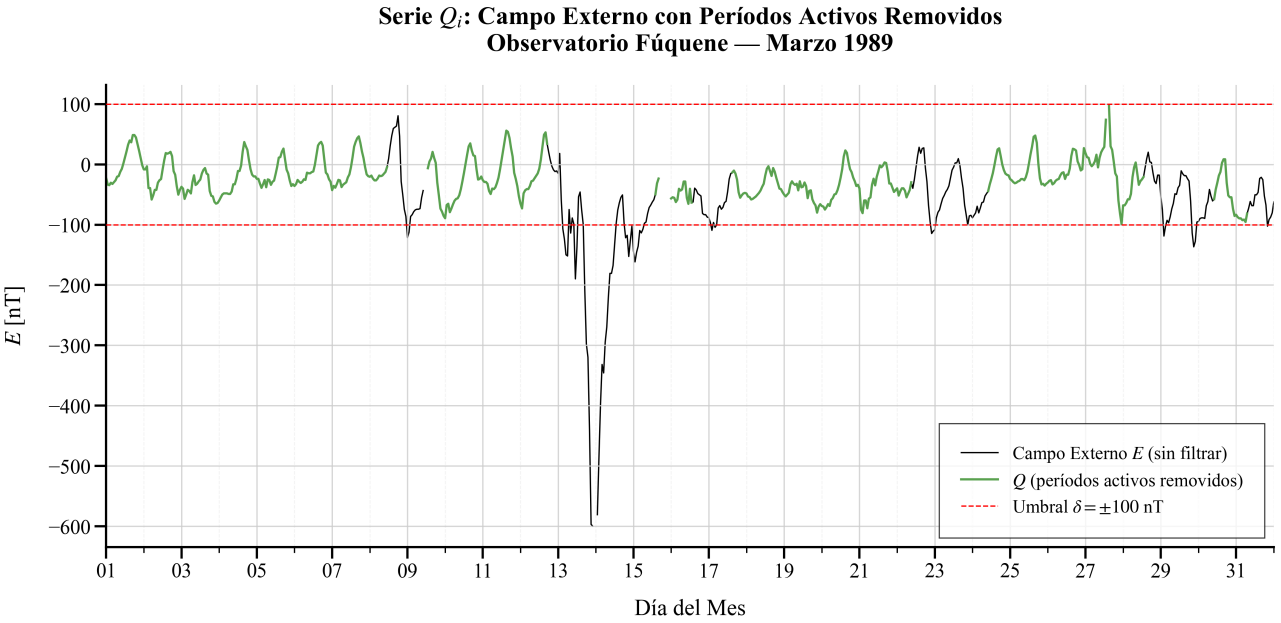


Figura 15: Serie Q_i que corresponde al campo externo $E(t)$ para el mes de marzo de 1989, en donde se removieron los periodos de actividad geomagnética. Las lineas rojas discontiuas representan el umbral seleccionado de $\delta = 100$ nT.

Tras remover estos periodos de actividad (ver figura 15), en el cual se pueden identificar los vacios visibles asociados a la tormetna magnetica del 13 al 15 de marzo de 1989, se presenta un nuevo problema, el cual ocurre en que la serie temporal presenta ciertos vacíos que requieren ser llenados antes de aplicar la transformada de Fourier, en la cual se debe tener una serie continua y que no presente interrupciones (Love et al. 2009). Hay dos casos que se presentan en esta metodología; para vacíos (gaps) que tengan periodos cortos de una hora, se les considera pérdidas aisladas, en las que se va a utilizar una interpolación simple entre los valores vecinos inmediatos siguiendo la ecuacion (18)

$$E_i = \frac{1}{2}(E_{i+1} + E_{i-1}) \tag{18}$$

Se presenta un segundo caso, en el que existen vacíos con mayor duración a una hora que se tienen que llenar para preservar la señal de la variación diurna (Sq), la cual se va a interpolar

a través de los días. En este caso los valores faltantes de la serie horaria en el instante i, se busca el día anterior al que presenta valores faltantes y el día después, interpolando la hora correspondiente entre el día anterior y después (Love et al. 2009).

$$E_i = \frac{1}{m+n}\left(nE_{i-24m} + mE_{i+24n}\right) \tag{19}$$

En la ecuación (19), m y n son representadas como los días anteriores y posteriores al día con datos faltantes. Para evitar las discontinuidades que presentan los extremos de los segmentos interpolados, se aplica una transformación lineal, lo cual se hace para que estos segmentos presenten valores que coincidan con una transición suave con los datos que se tienen a ambos lados, teniendo con esta interpolación en la serie Q_i la posibilidad de empezar el procesamiento espectral (Love et al. 2009).

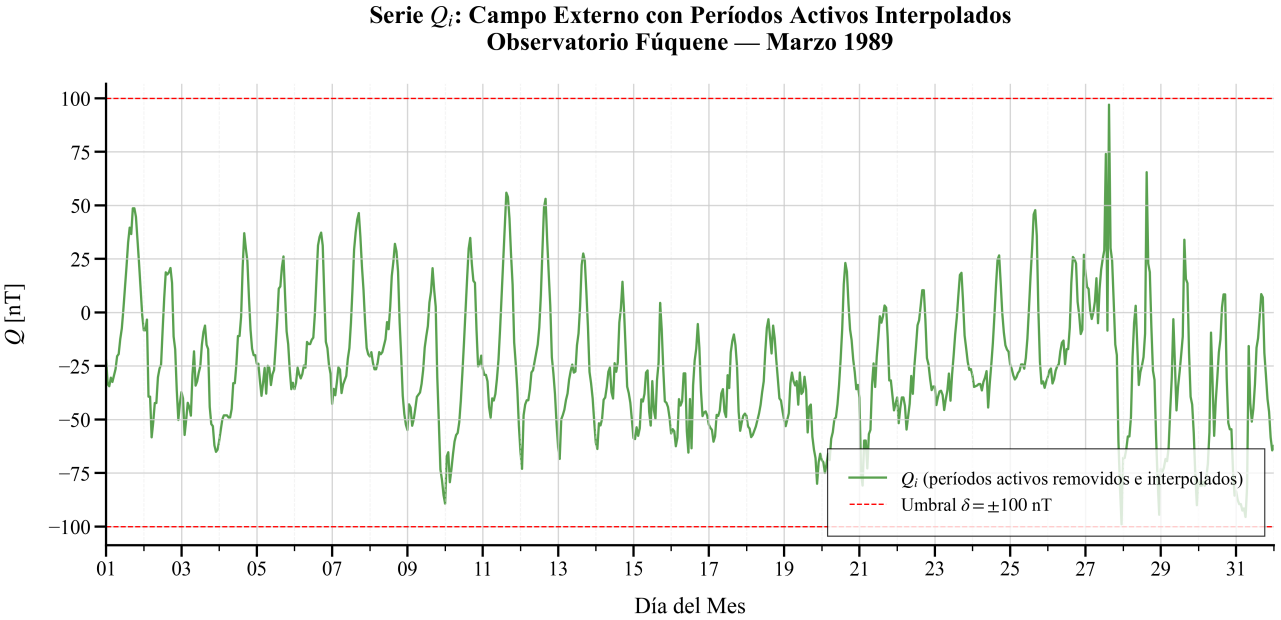


Figura 16: Serie Q_i que corresponde al campo externo $E(t)$ para el mes de marzo de 1989, tras la interpolación llenando los datos faltantes de los periodos removidos de la figura 15 , esto mediante la ecuación (19). Las lineas rojas discontiuas representan el umbral seleccionado de $\delta = 100$ nT.

Después de haber logrado la interpolación en la serie Q_i (ver figura 16), con estos datos se puede estimar la variación solar quieta Sq, teniendo presente que para lograr encontrar estos valores se tiene que pasar los datos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia como lo mencionan Love et al. (2009). Es importante entender que se tiene que aplicar la transformada de Fourier ya que la variación solar quieta es una señal estacionaria y periódica, que al momento de ver la señal en el dominio de la frecuencia se pueden distinguir los armónicos en la serie Q_i.

Para estimar la variación solar quieta Sq partimos de aplicar la Transformada Rápida de Fourier (FFT) a la serie interpolada Q_i, transformando con esto la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia con la ecuación (20)

$$\mathcal{F}(Q_i) = q_\iota = \sum_{n=0}^{N-1} Q_n \, e^{-j2\pi\iota n/N}, \quad \iota = 0, 1, \ldots, N-1 \tag{20}$$

donde N va a ser el número que se tiene de muestras en la serie horaria y q_ι va a ser el resultado de los coeficientes complejos de Fourier, se puede decir que estos coeficientes contienen toda la información espectral de la serie. La variación solar quieta $Sq(t)$ es representada por Love et al. (2009) como una serie de Fourier tridimensional, que va a capturar la superposición de procesos físicos que tienen diferentes escalas temporales.

Estos procesos físicos tienen armónicos acoplados y definidos, en los que se asocian a periodos de rotación de la tierra como los armónicos diurnos (d), la órbita de la Luna que se asocia a los armónicos diurnos (d) y mensuales (m) y la órbita de la Tierra alrededor del Sol se vincula como los armónicos diurnos (d), mensuales (m) y anuales (a) (Love et al. 2009)

$$Sq(t) = \Re \left\{ \sum_{\iota_d, \iota_m, \iota_a} sq_{\iota_d, \iota_m, \iota_a} \, e^{i\iota_d \omega_d t} \, e^{i\iota_m \omega_m t} \, e^{i\iota_a \omega_a t} \right\} \tag{21}$$

$$\omega_d = \frac{1}{24} \text{ cph}, \quad \omega_m = \frac{1}{30 \times 24} \text{ cph}, \quad \omega_a = \frac{1}{365 \times 24} \text{ cph}$$

Para el caso del Observatorio Geomagnético de Fúquene, se pueden verificar los armónicos directamente en el espectro de Fourier de la serie Q_i, como se muestra en la figura 17. Logrando evidenciar los armónicos diurnos d_1 (24 h), d_2 (12 h), d_3 (8 h) y d_4 (6 h), como las contribuciones de magnitud como lo es el armónico mensual m_1 (30 días) y el armónico anual a_1 (365 días). Esto confirma la variación solar quieta Sq y que puede ser extraída por la ecuación (21).

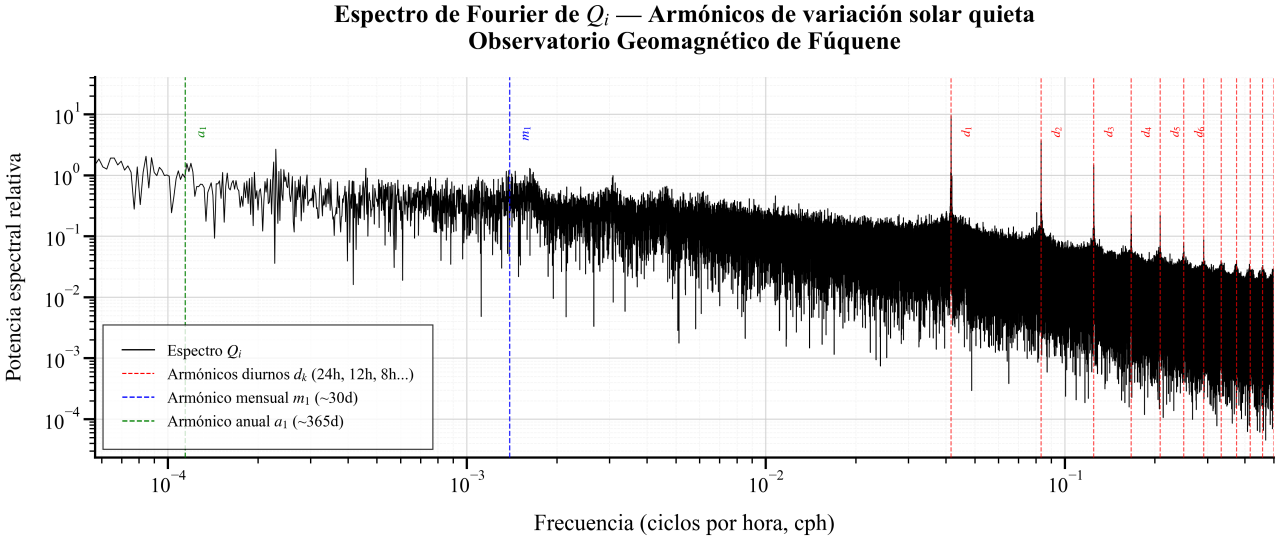


Figura 17: Espectro de Fourier de la serie Q_i del Observatorio Geomagnético de Fúquene. Las líneas punteadas de color rojo son los armónicos diurnos d, las lineas punteadas de color azul son los armónicos mensuales m y por último las lineas punteadas de color verde son los armónicos anuales a. .

Para el calculo de la variación solar quieta (Sq) se utilizó dos metodologías complementarias, las cuales se diferencian principalmente en como se extraen las componentes estacionarias del espectro resultante de Fourier. Para evaluar la eficacia de la diferencia de las metodologías, los resultados que se obtengan se contrastaran respecto al índice Dst oficial del WDC de Kyoto.

Enfoque A — Filtrado espectral multi-banda con ventana ajustable:

siguiendo la metodología propuesta por Love et al. (2009) para extraer la variación solar quieta (Sq), se plantea construir un filtro multi-banda B el cual va a estar en el dominio de la frecuencia, consiste en una ventana que se va a centrar en los armónicos de interés, los cuales van a variar según el observatorio. Se definirá para cada armónico de orden k como:

$$B(f) = \begin{cases} 1 & \text{si } |f - k\omega_r| < \dfrac{\Delta\omega_r}{2} \quad \text{o} \quad |f + k\omega_r| < \dfrac{\Delta\omega_r}{2} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \tag{22}$$

En donde $r \in \{d, m, a\}$ corresponden a los armónicos diurno, mensual o anual, k va a ser el orden del armónico y por último $\Delta\omega_r$ siendo el ancho del filtrado de la ventana para el armónico escogido mediante la siguiente formula:

$$\Delta\omega_r = \Delta\omega \cdot k\omega_r \tag{23}$$

A partir de la ecuación se puede evidenciar que el ancho de la ventana va a ser proporcional a la frecuencia del armónico, en consecuencia, los armónicos más altos van a tener una ventana más ancha. El filtro global $B(f)$ va a ser la construcción de la unión de todas las ventanas individuales para cada armónico:

$$B(f) = \bigcup_{r \in \{d,m,a\}} \bigcup_{k=1}^{K_r} B_{k,r}(f) \tag{24}$$

Siendo K_r el número máximo de armónicos que se van a considerar para cada proceso físico mencionado anteriormente. Teniendo este filtro construido, se puede obtener la estimación de Sq, asignando los armónicos asociados para el observatorio en el dominio espectral:

$$sq_\iota = B(f_\iota) \cdot q_\iota \tag{25}$$

Teniendo el filtro de ventana aplicado, se realiza la Transformada Inversa de Fourier para devolverlo al dominio del tiempo y obtener Sq

$$Sq_i = \mathcal{F}^{-1}(sq_\iota) \tag{26}$$

Para el caso del Observatorio Geomagnético de Fúquene el parámetro de $\Delta\omega$ se determinó mediante un proceso de optimización sistemática, el cual parte de considerar 20,025 posibles combinaciones para los parámetros del filtro B teniendo una búsqueda cuadrática de parámetros, evaluando todas las posibles combinaciones que existen en el espectro definido. Se evaluó de manera simultánea tanto el factor del ancho de la ventana para los valores entre $\Delta\omega \in [0{,}001, 0{,}120]$, teniendo un total de 445 valores equiespaciados en una escala logarítmica, que serán combinados frente a los armónicos diurnos $K_d \in \{4, 6, 8, 10, 12\}$, mensuales $K_m \in \{1, 2, 3\}$ y anuales

$K_a \in \{1, 2, 3\}$, teniendo todo el periodo de referencia de la serie comprendida entre 1955-2018 y a su vez comparando el resultado final del índice local *Dlat* con el índice Dst oficial del WDC de Kyoto (Love et al. 2009).

La métrica que se escogió para evaluar la eficiencia del modelo de búsqueda fue el *score* s, que se define como:

$$s = \frac{\rho}{\text{RMSE}} \tag{27}$$

Estableciendo ρ como el coeficiente de correlación de Pearson que se va a encontrar mediante *Dlat* y *Dst*, de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Dlat_i - \overline{Dlat})(Dst_i - \overline{Dst})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Dlat_i - \overline{Dlat})^2 \cdot \sum_{i=1}^{n}(Dst_i - \overline{Dst})^2}} \tag{28}$$

Por otro lado RMSE va a ser la raíz del error cuadrático medio, calculada mediante:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Dlat_i - Dst_i)^2} \tag{29}$$

Donde n van a ser el número de observaciones comunes entre ambas series, se escogieron estas métricas ya que penalizan de manera simultánea una baja correlación y un alto error, buscando un equilibrio entre ambas teniendo como resultados de la optimización los datos presentados en el cuadro 5.

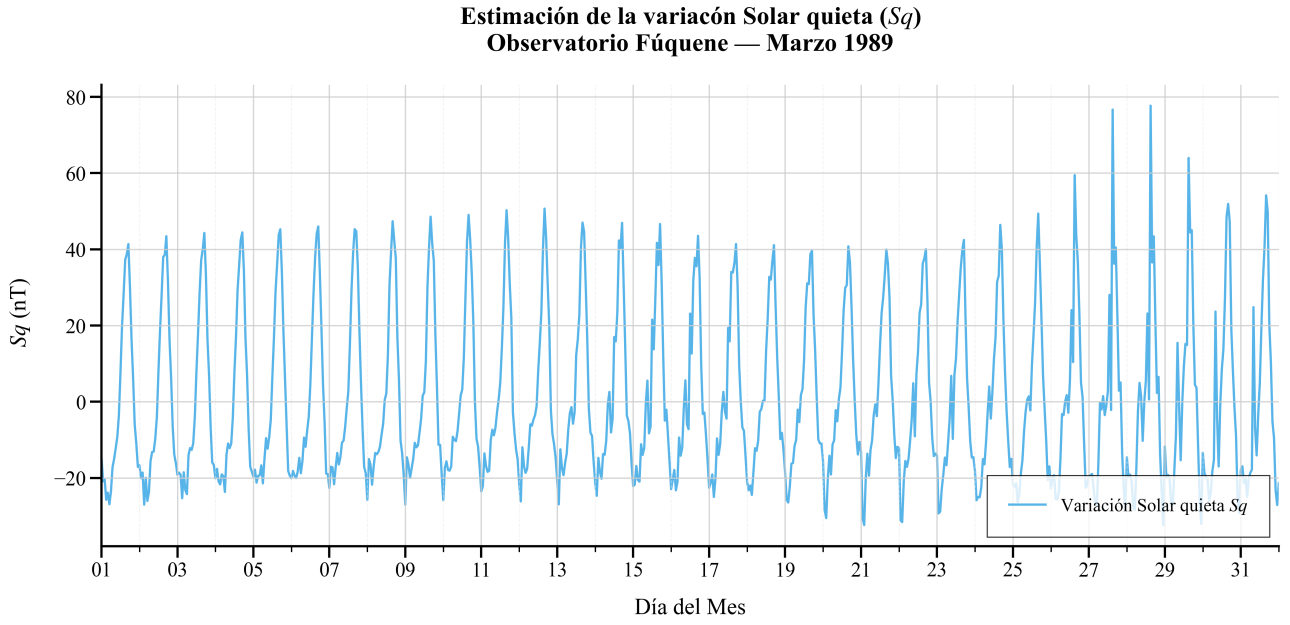


Figura 18: Serie temporal de la variación solar quieta Sq estimada mediante el filtrado espectral multi-banda para el Observatorio Geomagnético de Fúquene para el mes de marzo de 1989, aplicando los parámetros óptimos escogidos: $\Delta\omega = 0{,}046831$, $K_d = 12$, $K_m = 1$ y $K_a = 1$.

En la figura 18 se puede evidenciar la estimación de la variación solar quieta Sq, tras aplicar el filtro multi-banda $B(f)$ con los parámetros óptimos que se determinaron tras realizar el proceso de optimización sistemática. Se evidencia un patrón cuasiperiódico diurno que tiene amplitudes que oscilan entre los rangos de -20 nT y $+60$ nT, lo cual se puede asociar a los armónicos diurnos. La regularidad que presenta el ciclo diario y la ausencia de las perturbaciones de alta magnitud, confirman que el filtro espectral multi-banda ha logrado aislar de manera exitosa la componente Sq a partir de la Transformada Inversa de Fourier(Ecuacion (26)), quitando otras señales que pueden perturbar la variación solar quieta.

Enfoque B — Filtrado a partir de un umbral adaptativo:

Por otra parte, se presenta una alternativa al filtro multi-banda, en donde se ve desde un enfoque según lo planteado por la metodología de Sugiura (1963), teniendo un umbral que va a ser de amplitud adaptativa para poder eliminar el componente espectral. La gran diferencia respecto al Enfoque A, es que no se van a seleccionar los armónicos que se conocen en Sq, sino que se van a retener todas las componentes que superen un umbral A_{umbral}, siendo estas componentes los picos dominantes del espectro que se van a asociar a la variación solar quieta (Love et al. 2009).

Teniendo como punto de partida la serie $E(t)$, se realiza la Transformada Rápida de Fourier:

$$\mathcal{F}(E_i) \rightarrow Y_\iota \tag{30}$$

Teniendo los datos en el dominio espectral, se construya una máscara M_ι que va a retener los valores cuyas amplitudes superen el umbral A_{umbral}:

$$M_\iota = \begin{cases} 1 & \text{si } \dfrac{2}{N}|Y_\iota| > A_{umbral} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \tag{31}$$

Siendo N el número total de muestras que va a tener la serie $E(t)$, obteniendo después el espectro filtrado mediante:

$$Y_\iota^{filt} = M_\iota \cdot Y_\iota \tag{32}$$

Al final obteniendo la serie temporal de Sq a partir de la Transformada Inversa de Fourier:

$$Sq_i^B = \mathfrak{R}\left\{\mathcal{F}^{-1}(Y_\iota^{filt})\right\} \tag{33}$$

El calculo para el umbra óptimo A_{umbral} se calcula mediante la desviación estándar del espectro en las amplitudes:

$$A_{umbral} = k \cdot \sigma\left(|Y_\iota|\right) \tag{34}$$

En donde $\sigma(|Y_\iota|)$ va a ser la desviación estándar del espectro en las amplitudes y k será el factor de escala que se va a optimizar, que se va a estimar mediante un barrido iterativo en donde comprende 200 valores entre los rangos $k \in [0{,}5, 2{,}0]$. Evaluando cada valor mediante la correlación de Pearson ρ y el RMSE, teniendo como criterio la ecuación (27).

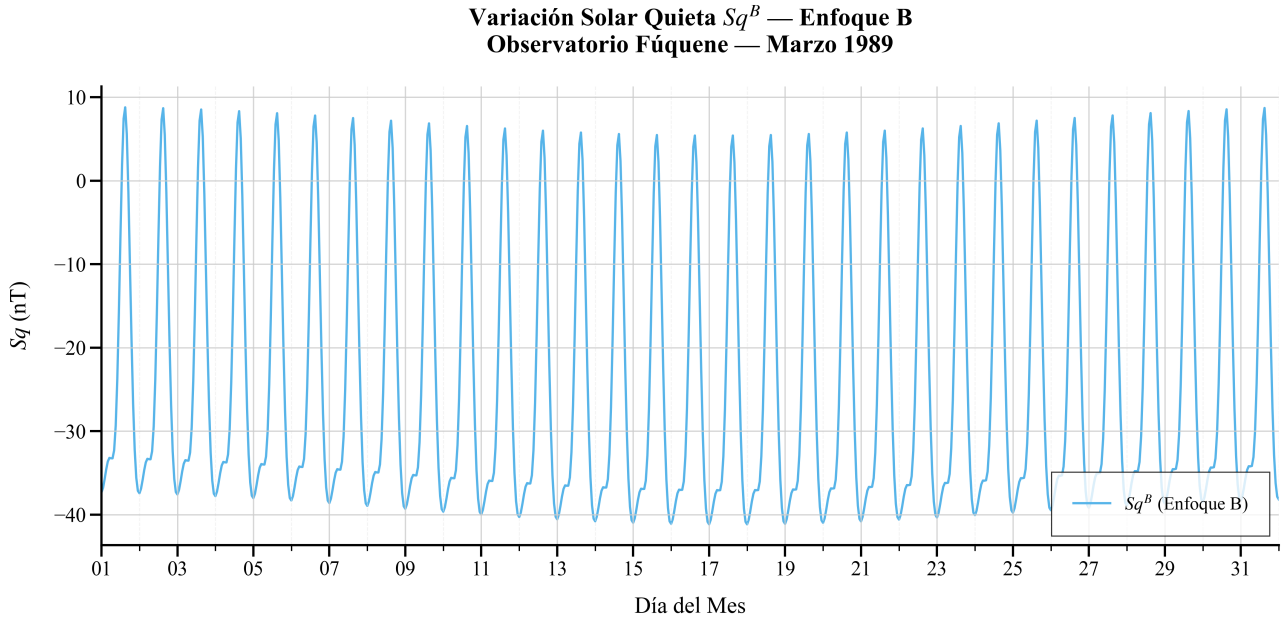


Figura 19: Serie temporal de la variación solar quieta Sq estimada mediante el enfoque B, usando un umbral adaptativo para el Observatorio Geomagnético de Fúquene para el mes de marzo de 1989,:$A_{umbral} = 1{,}3008150407520376$ nT.

En la Figura 19, podemos evidenciar la serie Sq_i^B que se estimó para el mes de marzo de 1989. Esta presentan oscilaciones con una amplitud en el orden de los ± 10 nT. Teniendo una diferencia en que este caso se tiene una máscara espectral M_ι, la cual va a determinar las componentes que constituyen la señal encontrada de Sq, en lugar de tener una selección de armónicos para substraer esas señales.

3.3.1.6 Estimación del Ciclo Solar $Sc(t)$

En la señal del campo externo $E(t)$, se encuentra una señal de muy baja frecuencia que se asocia al ciclo solar que se denomina $Sc(t)$, Love et al. (2009) menciona que la estimación de esta componente esta directamente relacionada con la de la variación solar quieta. Teniendo los datos en el dominio de la frecuencia (q_i) se aplica un filtro distinto llamado filtro paso-bajo, el cual va a retener todas las frecuencias que son inferiores a $1/3$ año^{-1}, en donde H va a ser una función de escalón de Heaviside:

$$H \cdot q_\iota = sc_\iota \tag{35}$$

El resultado de esta estimación va a ser el módulo de lago periodo de la actividad magnética global la cual es asociada al ciclo solar de Schwabe el cual varia aproximadamente 11 años (Courtillot et al. 1988), la metodología planteada por Love et al. (2009) parte de que es necesario remover esta señal ya que en el momento del cálculo de los armónicos de Sq, la ventana del filtro multi-banda B como es ajustado según el armónico genera un ensanchamiento en la señal del espectro capturada, por eso mismo es necesario tener el ajuste iterativo que se hizo en Sq para lograr minimizar este error sobre los armónicos resultantes, aun así la distorsión de estos picos

que presenta Sq se tienen que tratar de forma independiente. Para el caso del Observatorio de Fúquene, la frecuencia del corte del filtro paso-bajo lo definimos como:

$$f_c = \frac{1}{3 \times 365 \times 24} \text{ cph} \tag{36}$$

Esto corresponde ya que se tiene presente un período mínimo de 3 años, el cual es propuesto por Love et al. (2009). Se elige este periodo ya que va a ser una frecuencia de corte en donde se garantiza que únicamente se van a caracterizar las señales asociadas al ciclo solar de Schwabe y que otras señales que tengan periodos largos sean retenidas, esto se realiza para evitar que se contamine la señal Sq y Sc, logrando asegurar que cada señal sea estimada de forma independiente y sin tener algún solapamiento espectral (Love et al. 2009). El filtro Heaviside $H(f)$ va a ser definido en el dominio de la frecuencia como:

$$H(f) = \begin{cases} 1 & \text{si } |f| \leq f_c \text{ y } f \neq 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \tag{37}$$

En donde la condición de $f \neq 0$ va a excluir únicamente las componentes que tengan frecuencia cero que es conocida como corriente directa (DC), esto por que corresponde a la media de la serie q_i. Esto se hace por que en el espectro de Fourier la frecuencia $f = 0$ no va a ser ninguna oscilación, sino que va a representar una constante que va a igualar a la media aritmética que va a tener la señal en el dominio del tiempo. Se presenta esta condición ya que bajo condiciones optimas se espera que la serie $E_i = H - I(t)$ se espera una media de cero, esto dado que $I(t)$ va a modelar la tendencia de largo periodo de la componente horizontal H. Pero dado a que el ajuste polinomial Chebyshev presenta un sesgo inevitable debido al residuo de actividad geomagnética que pueden tener los días tranquilos, además de los vacíos de información que cuentan los datos. Para el Observatorio de Fúquene la media que presenta la serie interpolada es de $Q_i = -4{,}04$ nT. Si no se tuviera esta condición en el resultado del cálculo $Dist_i$ generaría un desplazamiento de $+4{,}04$ nT que se propagaría durante toda la serie, al tener presenta la condición $f \neq 0$ las medidas resultantes de SC_i la serie presentaría una variación a lo largo del periodo aproximadamente de ± 37 nT, lo cual es una amplitud consistente para un observatorio de latitud ecuatorial (Macmillan et al. 2007). Para obtener la serie temporal del ciclo solar se aplica la transformada inversa de Fourier:

$$SC_i = \Re \left\{ \mathcal{F}^{-1}(sc_\iota) \right\} \tag{38}$$

Obteniendo como resultado de este procedimiento sobre la serie Q_i que presenta el Observatorio Geomagnético de Fúquene, lo que se muestra en la figura 20, en la cual se presenta un ejemplo de la serie temporal SC_i del segmento correspondiente al mes de marzo de 1989.

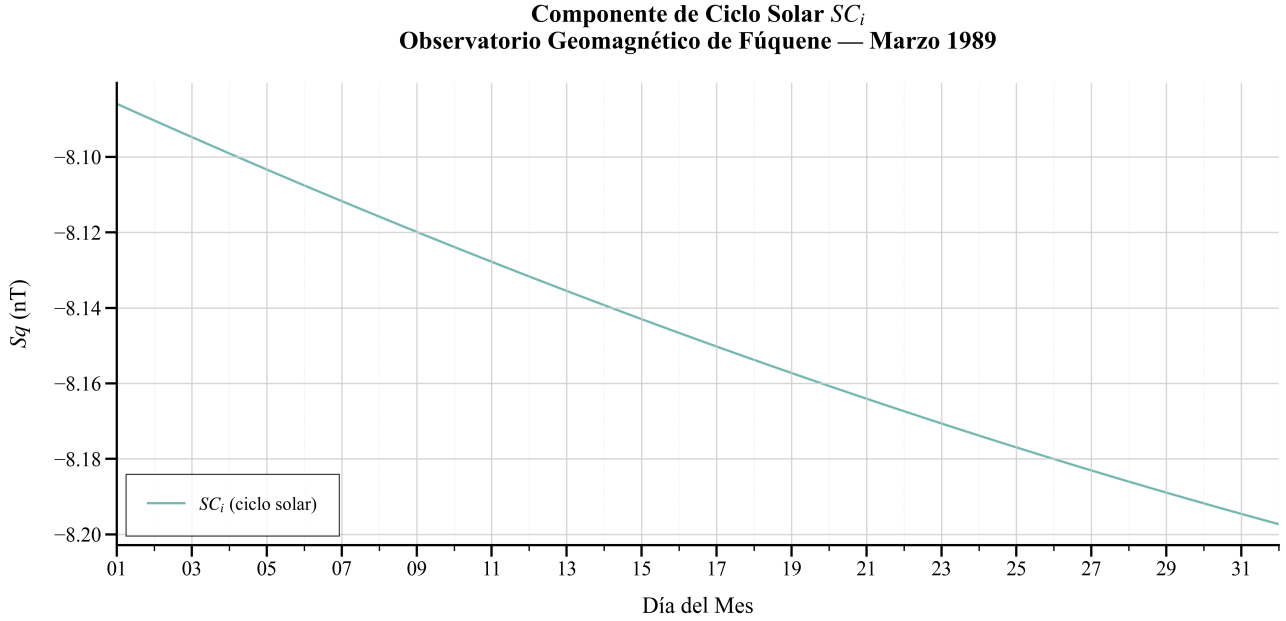


Figura 20: Serie temporal del ciclo solar SC_i estimada para el Observatorio Geomagnético de Fúquene durante marzo de 1989. Obtenida mediante la aplicación del filtro de paso-bajo Heaviside mediante la ecuación (35), teniendo frecuencias de corte $f_c = 1/(3 \times 365 \times 24)$ cph y teniendo la exclusión de la condición de frecuencia cero ($f \neq 0$).

En la Figura 20 se presenta un ejemplo de la caracterización de la señal del ciclo solar SC_i, la cual se estimo para el mes de marzo de 1989 en el Observatorio de Fúquene. Se logra evidenciar que para el mes de marzo se logra ver una variación lineal decreciente, que aproximadamente decrece de $-8{,}07$ nT a $-8{,}20$ nT, al ser tan solo un mes se observa que la variación es suave, si presentar oscilaciones por el corto periodo de ejemplo, siendo la disminución de tan solo unos pocos nanoteslas (nT).

3.3.1.7 Estimación de la serie de perturbación $Dist(t)$ e índice local $Dlat(t)$

Teniendo ya las señales caracterizadas de la variación solar quieta Sq_i y la componente del ciclo solar SC_i, se puede calcular la serie de perturbación $Dist_i$ para el Observatorio de Fúquene, esta serie va a tener como resultado valores que se pueden asociar a la actividad de tormentas. Teniendo claro que se utilizo anteriormente dos enfoques distintos para la estimación de Sq_i. Para el **Enfoque A** la serie se va a obtener mediante:

$$Dist_i^A = E_i - Sq_i^A - SC_i \tag{39}$$

Obteniendo como resultado del **Enfoque A** la ilustración de la Figura 21, en el que se presenta la serie de $Dist_i^A$ correspondiente a un ejemplo del mes de marzo de 1989:

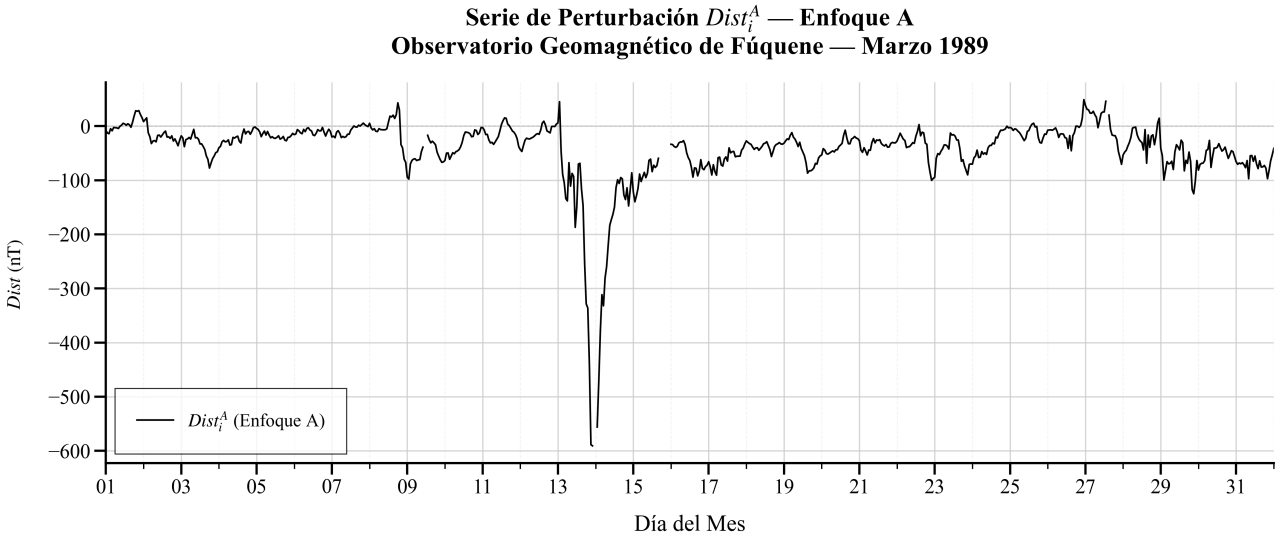


Figura 21: Serie temporal de perturbación $Dist_i$ utilizando el **Enfoque A** para el Observatorio Geomagnético de Fúquene durante marzo de 1989. Se obtuvo mediante la ecuación (39), se logra percibir señales de alta magnitud asociadas a una tormenta geomagnética.

Por otro lado, para el **Enfoque B**, la componente SC_i queda contenida dentro del Sq_i^B. Esto se puede explicar por el teorema de Parseval y las propiedades que tienen la Transformada de Fourier (Press et al. 1992), en términos generales el umbral va a retener todas las componentes espectrales que superen el valor optimo encontrado de A_{umbral}, una de estas componentes es la señal del ciclo solar SC_i, la cual va a tener amplitudes espectrales superiores al valor óptimo de $A_{umbral} = 1{,}3008150407520376$ nT, lo que dará lugar a que estén incluidas en Sq_i^B. Obteniendo la perturbación disturbance field mediante la siguiente expresión simplificada:

$$Dist_i^B = E_i - Sq_i^B \tag{40}$$

Obteniendo como resultado del **Enfoque B** la ilustración de la Figura 22, en el que se presenta la serie de $Dist_i^B$ correspondiente a un ejemplo del mes de marzo de 1989:

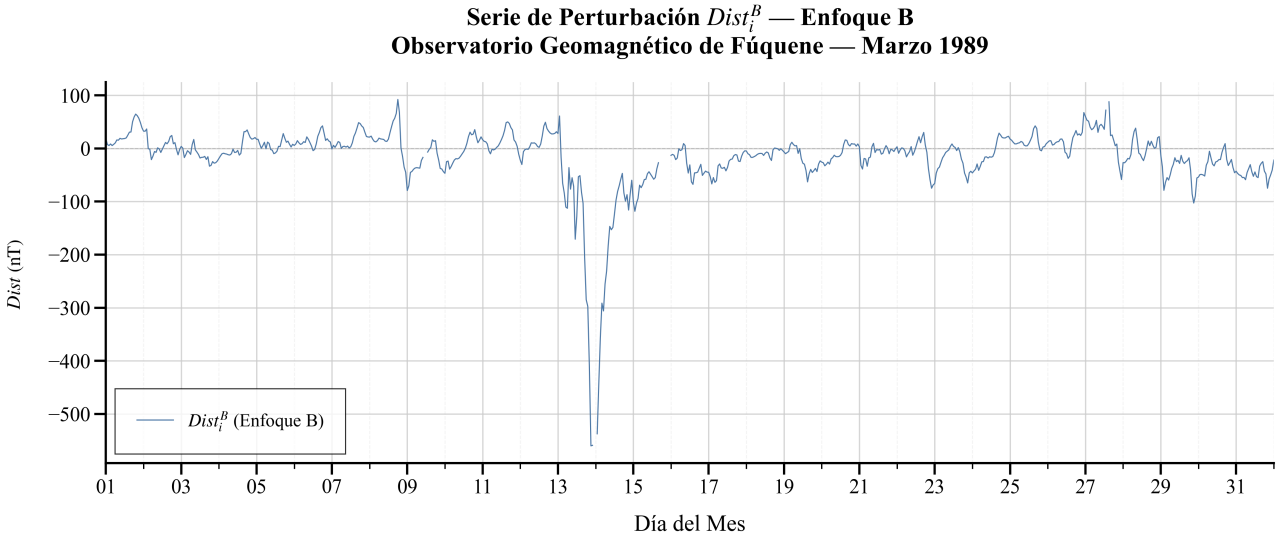


Figura 22: Serie temporal de perturbación $Dist_i$ utilizando el **Enfoque B** estimada para el Observatorio Geomagnético de Fúquene durante marzo de 1989. Se obtuvo mediante la ecuación (40), se puede percibir señales de alta magnitud asociadas a una tormenta geomagnética.

Por último, para estimar el índice de perturbación local $Dlat_i$, se tiene que aplicar la corrección por latitud magnética del observatorio geomagnético de Fúquene, esto se hace para proyectar la perturbación en la latitud magnética del observatorio(Love et al. 2009):

$$Dlat_i = \frac{Dist_i}{\cos(\lambda_B)} \tag{41}$$

En donde la latitud magnética del observatorio geomagnético de Fúquene es de $\lambda_B = 14{,}686$ este valor es determinado por el modelo de campo geomagnético de referencia internacional (IGRF) (Thébault et al. 2015). Por medio de esta corrección permite normalizar las contribuciones de las perturbaciones medida en Fúquene respecto a las que se medirían en el ecuador geomagnético, en donde la sensibilidad que tiene las corrientes de anillo es máxima (Sugiura 1963).

Teniendo como resultado, la serie temporal de $Dlat_i$ el cual se comparó con el índice Dst del WDC de Kyoto, el comportamiento se ilustra en la figura 23 para el mes de marzo de 1989, donde se percibe la tormenta de gran magnitud geomagnética, una de las más intensas registradas en el sigo XX (Love et al. 2009).

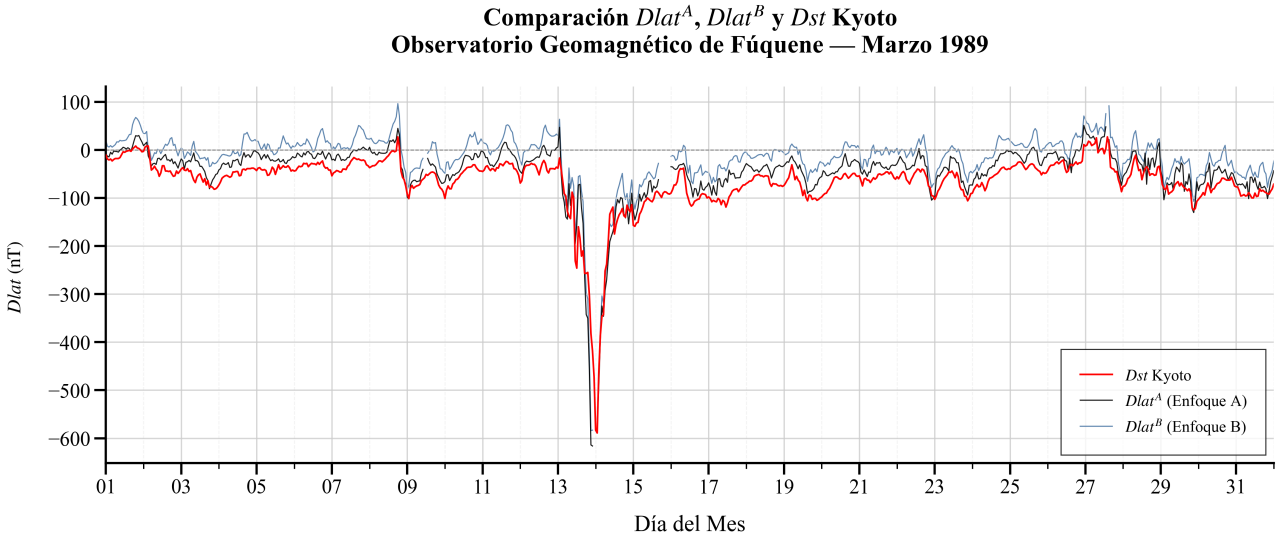


Figura 23: Serie temporal de perturbación local $Dlat_i$ estimada para el Observatorio Geomagnético de Fúquene durante marzo de 1989. La linea negra es el resultada del **Enfoque A**, la linea azul representa el resultado del **Enfoque B** y por ultimo la linea roja son los datos obtenidos del índice *Dst* oficial del WDC de Kyoto. Se observa una señal de alta magnitud asociadas a una tormenta geomagnética entre los días del 13 al 15 de marzo de 1989.

3.3.2. Implementación en Tiempo Real (Near Real-Time, NRT)

3.3.2.1 Enfoque metodológico

La metodología expuesta en la sección anterior permite el cálculo del índice Dst para series temporales extensas (del orden de décadas) y a su vez se necesita de datos definitivos que ya estén validados por el WDC, esto impide que se pueda calcular de manera continua la actividad geomagnética. Bajo este contexto es necesario poder distinguir entre los niveles de procesamiento que presenta el índice Dst que tiene observatorio de Kyoto, los cuales los divide en tres niveles: Final, Provisional y Quicklook, siendo el final el nivel de procesado más demorado por la limitación del tiempo. Para lograr superar esta limitación, Gannon et al. (2011) realiza una metodología para desarrollar una versión operativa del índice Dst del USGS, el cual busca estimar el índice en NRT con una resolución temporal de un minuto, y establece una jerarquía clara entre los distintos cálculos de la siguiente forma:

- **Índice Definitivo (Definitive Dst):** Siendo esta la versión más procesada, se necesita al menos 23 años de datos que generen una resolución optima frente a las componentes periódicas en el dominio de la frecuencia, siendo el nivel mas preciso pero a su vez el que requiere mayor tiempo.
- **Índice Operacional (Operational Dst):** Este nivel es equivalente a un índice en tiempo casi real (NRT), en la que emplea una ventana deslizante de 6 meses de datos, los que se van a recalcular continuamente a medida que se ingresen nuevos datos, generando ciertas limitaciones en los armónicos de Sq (Gannon et al. 2011).

Esta metodología tiene las bases del mismo esquema de procesamiento del índice definitivo de Love et al. (2009), siendo una combinación de procedimientos en el dominio del tiempo y

filtrando en el dominio de la frecuencia para lograr aislar la serie de perturbación $Dist_i$ para cada observatorio. Para lograr la producción de este índice en tiempo casi real se plantean ciertos cambios que son necesarios para poder realizar y simplificar este cálculo, siendo la primera diferencia el periodo analítico que se va a utilizar, mientras que en los índices definitivos, como ya lo mencionamos se usan ventanas de 23 años o más, en la versión operacional se usa una ventana deslizante de 6 meses que se va a recalcular constantemente (Gannon et al. 2011). Esta metodología es efectiva, teniendo resultados para Gannon et al. (2011) de habilidad (*skill score*) de 0.980 para el período 2004—2005.

Sobre la metodología adaptad en implementar el índice operacional para el Observatorio Geomagnético de Fúquene (FUQ), dado a que solo se tiene una estación única, a diferencia de lo implementado por USGS, donde se promedia cuatro observatorios distribuidos globalmente, se describen a continuación las modificaciones realizadas y mencionadas por Gannon et al. (2011) sobre el método definitivo.

3.3.2.2 Manejo de datos en tiempo real

En el momento de la captura de los datos en tiempo casi real, se debe tener en cuenta que hay ciertos aspectos a considerarse, ya que estos datos presentan anomalías que no se encuentran en los datos definitivos (Gannon et al. 2011). Para el Observatorio de Fúquene, los datos para el Observatorio de Fúquene se adquieren a través del magnetómetro LEMI-025 por medio del sistema MARCOS/MARTAS con una resolución a la décima de segundo, combinando los registros históricos al minuto, para poder conformar la ventana analítica.

Gannon et al. (2011) menciona que hay tres tipos de anomalías que se presentan en los datos preliminares. La primera son los picos espurios o (*spikes*), surgen por errores de transmisión o interferencia; estos valores se detectan mediante la desviación estándar y se reemplazan por un dato interpolado una vez que se tenga al menos un día de datos validos posteriores al pico.

La segunda anomalía corresponde a saltos de línea base (*baseline offsets*), casi siempre es un error de calibración o de algún cambio físico que sufre el entorno. Se presentan como escalones abruptos en la serie. Considerando que posteriormente se elimina la tendencia de la serie, estos valores no afectan el resultado final (Gannon et al. 2011).

Finalmente, se consideran los datos faltantes o los valores tardíos. De acuerdo con Gannon et al. (2011), un sistema en el que se capturan datos en tiempo real, se establece un tiempo esperado para la llegada de los datos. En la implementación para Fúquene, se calcula el promedio de los valores obtenidos para el campo externo E con una resolución al minuto, en caso de no recibir datos dentro del intervalo mencionado, el valor correspondiente se registrará como faltante y se interpola en una etapa posterior.

3.3.2.3 Ventana analítica deslizante

El principal cambio es la reducción que tiene del periodo analítico, esto implica que el numero que se va a tener de muestras disponibles para la Transformada Discreta de Fourier disminuyen proporcionalmente, teniendo una consecuencia directa sobre el dominio espectral. El método presentado por Gannon et al. (2011) remplaza la serie completa de 23 años por una ventana deslizante de 6 meses, que se va a definir como:

$$W = [t_0 - 6 \text{ meses},\ t_0] \tag{42}$$

Siendo t_0 el último día completo obtenido de la serie. Conforme se incorporan nuevos datos, t_0 se estará actualizando y la ventana se desplazará con el fin de tener una extensión fija de 6 meses. Esto tendrá implicaciones al momento de sustraer la variación secular en los armónicos de Sq.

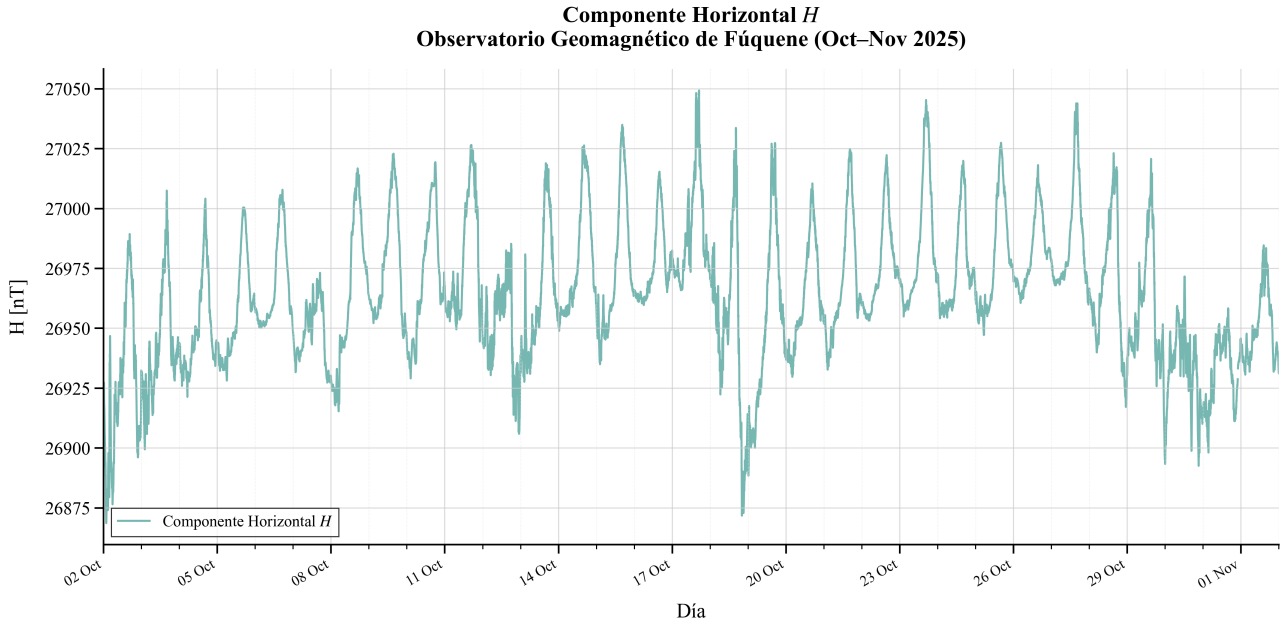


Figura 24: Variación de la componente Horizontal (H) del campo magnético registrada en el observatorio de Fúquene durante el periodo de octubre a noviembre del 2025

3.3.2.4 Estimación del campo externo E(t)

Para estimar el campo interno $I(t)$, es necesario encontrar los días calmados sobre la componente horizontal (H), mediante el criterio descrito en la sección 3.3.1.3. Para los 6 meses comprendidos dentro de la ventana deslizante, se seleccionan los 5 días por mes con menor variabilidad diaria δH_i, la cual se estima mediante la ecuación 12. Estos días presentan contribuciones mínimas de fuentes externas, evitando la contaminación por perturbaciones geomagnéticas.

Una vez obtenidos los días calmados, se calcula la línea base $I(t)$ empleando un modelo lineal por mínimos cuadrados sobre los valores de la componente H de los días encontrados.

$$I(t) = a_0 + a_1\, t \tag{43}$$

Siendo t el tiempo absoluto de la serie desde el inicio de la ventana W. El coeficiente a_0 es el nivel base del campo interno al inicio de la ventana, a_1 es el valor de la pendiente de la deriva secular a lo largo de los 6 meses. De acuerdo con Gannon et al. (2011), un ajuste lineal resulta suficiente sobre este intervalo, y se expresa que una variación lineal es suficiente para un rango tan corto.

Teniendo los coeficientes calculados, se calcula el campo externo a partir de substraer la línea base obtenida por la componente horizontal.

$$E_i = H_i - I(t_i) = H_i - (a_0 + a_1\, t_i) \tag{44}$$

Denotando H_i como el valor de la componente horizontal en el instante i y t_i el tiempo desde el inicio de la ventana, obteniendo la serie E_i que tendrá las contribuciones de la variación solar quieta Sq y de la perturbación por tormentas $Dist$. Cabe señalar que Gannon et al. (2011) manifiesta que la componente del ciclo solar SC se va a manifestar en la tendencia lineal; por esta razón, no es necesario extraer SC en la versión operativa.

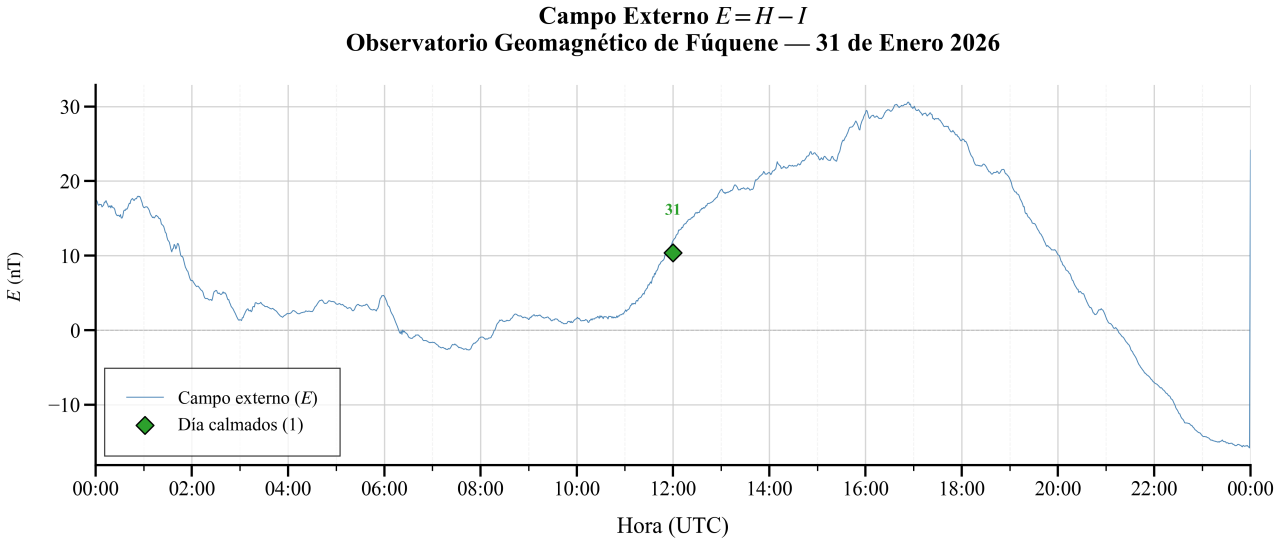


Figura 25: Componente externa (E) del campo magnético registrada en el observatorio de Fúquene durante el día 31 de Enero. Los diamantes de color verde representan la selección del día calmado.

3.3.2.5 Estimación de la variación solar quieta Sq(t)

Al igual que en la sección 3.3.1.5, es necesario identificar los periodos con alta actividad geomagnética y removerlos de la serie $E(t)$. Esto se realiza para evitar que se contamine la serie al momento de aplicar la Transformada de Fourier. Definimos un umbral $\delta = 100$ nT al igual que en la sección anterior para generar una ventana que elimine los valores que excedan este limite.

Los datos faltantes son interpolados mediante la ecuación 19 con el fin de garantizar la continuidad de la serie, esta interpolación va a requerir al menos un día completo de datos en cada extremo de la perturbación. Según Gannon et al. (2011) para poder resolver esta limitación, se extrapola la señal en un rango temporal previo a la tormenta, esto es viable ya que la variación solar quieta no varia significativamente de un día a otro, permitiendo el calculo incluso si hay alguna ausencia en los datos posteriores a la perturbación.

Teniendo la serie interpolada procedemos a aplicar la Transformada Rápida de Fourier (FFT) por medio de la ecuación (14), con el fin de extraer la variación solar quieta Sq en el dominio

de la frecuencia mediante el proceso descrito en la sección 3.3.1.5. Se construye el filtro multibanda B mediante la ecuación 22, para el caso de recibir los datos NRT se especifica que el ancho de la ventana tiene que ser de un valor más grande con el propósito de tener mayor contenido espectral.

Al tener un periodo tan corto como lo son 6 meses implica un numero considerable menor de muestras en el espectro de Fourier, Gannon et al. (2011) menciona que esto va a producir que los picos espectrales tengan un ensanchamiento mayor en los armónicos. A pesar de la reducción de los datos, la metodología señala que las señales diarias y subdiarias se pueden identificar claramente en el espectro de 6 meses, de tal manera que la estimación de Sq conservara la calidad para el cálculo del índice operacional.

3.3.2.6 Estimación de la serie de perturbación Dist(t) e índice local Dlat(t)

Es importante aclarar que debido a la serie de datos de 6 meses es muy difícil estimar la componente del ciclo solar SC, puesto que se necesita periodos muy largos para poder calcularla y lograr distinguir sus variaciones (∼11 años), en periodos cortos se manifiesta como una tendencia que resultará esencialmente lineal, esta señal será totalmente incorporada en la estimación de la línea base $I(t)$ (Gannon et al. 2011). Por lo siguiente, la serie de perturbación operacional se obtiene como:

$$Dist_i^{NRT} = E_i - Sq_i^{NRT} \tag{45}$$

Por último se aplica la normalización por latitud magnética, la cual se implementa de la misma manera que en el método definitivo:

$$Dlat_i^{NRT} = \frac{Dist_i^{NRT}}{\cos(\lambda_B)} \tag{46}$$

3.4. Cálculo del Índice K

3.4.1. Metodología para Datos Históricos

Esta subsección describe la metodología implementada para el cálculo histórico del índice K local para el Observatorio de Fúquene. Su desarrollo es consecuencia de la necesidad actual de generar índices geomagnéticos a partir de datos digitales, dado que el escalado manual del índice K, establecido por la IAGA implica retrasos en su producción, así como en la disponibilidad de este (Menvielle et al. 1995; Stankov et al. 2010). Dado lo anterior, la construcción de una serie retrospectiva de la actividad geomagnética, basada en los registros históricos disponibles, es fundamental para el análisis temporal.

No obstante, el cálculo histórico del Índice K no puede realizarse de manera directa sobre los registros históricos disponibles a través del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el World Data Center (WDC), ya que, estos presentan diferencias en su resolución temporal, cuentan con periodos de cobertura intermitentes y condiciones variables de calidad. En el caso de FUQ, se realizó la lectura, organización e integración de los archivos históricos disponibles en formato horario y al minuto, esto debido a la necesidad de estructurar la información según las

diferencias en la resolución de los datos. A partir de ello, se definieron dos series de trabajo:Una serie horaria correspondiente al periodo 1955 y 2020 y una serie al minuto para el intervalo 2021 y 2025.

Una vez definida la base histórica del trabajo, el cálculo del índice K se realizó mediante el método Lineal Elimination propuesto por Lasse Hakinnen para el Finnish Meteorological Institute (FMI), reconocido oficialmente en 1993 por la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía (IAGA) Frøystein et al. (2025), como un método oficial para derivar K de manera automatizada. De manera general, el método consiste en estimar la amplitud de la perturbación geomagnética local a partir de la remoción de la variación solar regular en intervalos trihorarios.

3.4.1.1 Preprocesamiento de la serie histórica

3.4.1.2 Integración y organización de la serie histórica.

Antes de aplicar el método Linear Elimination, era importante considerar que la serie histórica integra información de archivos horarios y al minuto (`.HOR` y `.MIN`, respectivamente), lo que da lugar a dos series temporales diferenciadas; entre el 01/01/1955 y el 31/12/2020, y una al minuto entre el 01/01/2021 y el 31/01/2025. En consecuencia, fue necesario implementar un preprocesamiento, que consistía en la depuración de duplicados, tratamiento de valores atípicos e interpolación de vacíos, con el fin de garantizar una base de datos consistente para el cálculo del índice histórico.

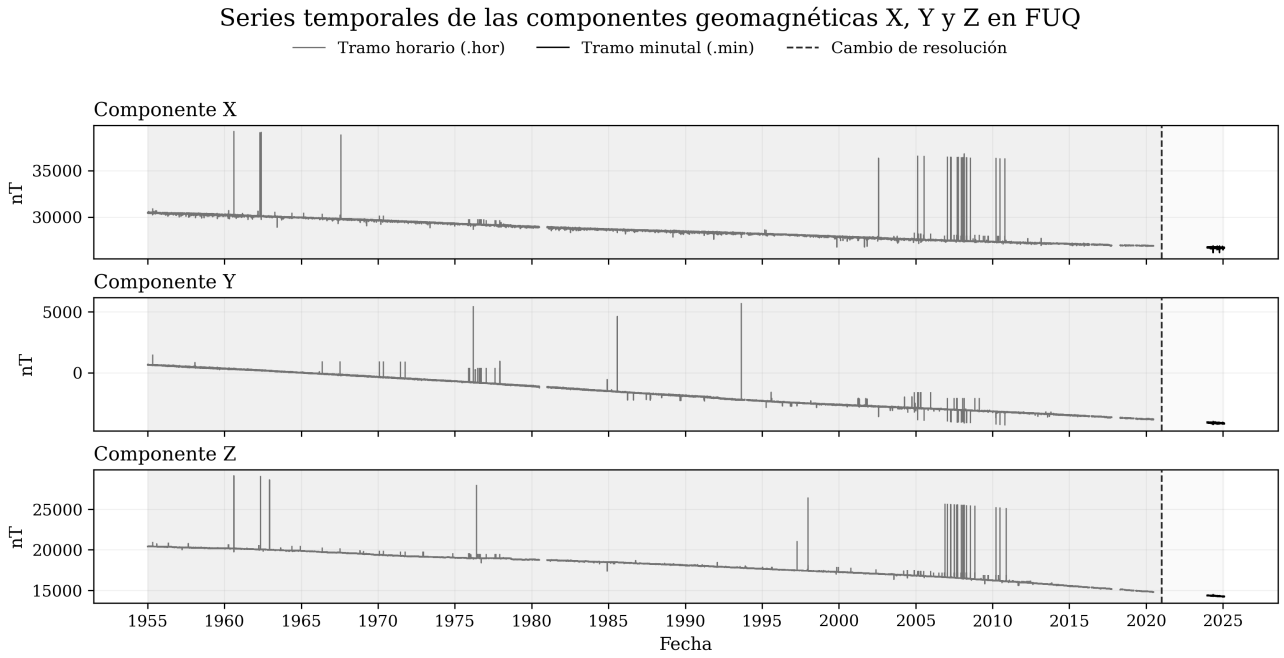


Figura 26: Comparación de Series temporales de las componentes geomagnéticas X, Y y Z en FUQ. Fuente: Elaboración Propia.

En primera Instancia, se realizó la lectura, organización e integración de los archivos históricos disponibles en formato horario y al minuto, Esto debido a la necesidad de estructurar la información según las diferencias en la resolución de los datos. Como se observa en la Tabla X, la

base histórica de trabajo estuvo compuesta por las dos series temporales anteriormente mencionadas, diferenciadas según su resolución: una serie horaria, constituida por 792 archivos y una serie al minuto, conformada por 409 archivos. En ambos casos se dispuso de información para las componentes del campo magnético X, Y y Z, con u volumen total superior a 1.7 millones de registros.

Tabla 1: Resumen de las series históricas empleadas en el preprocesamiento

Serie temporal	**Formato**	**Periodo**	**Resolución**	**N° de archivos**	**Registros**
Serie horaria	.HOR	01/01/1955 – 31/12/2020	1 hora	792	578 544
Serie minutal	.MIN	01/01/2021 – 31/01/2025	1 minuto	409	584 291

Nota: La columna de registros corresponde al número de observaciones por componente geomagnética para cada serie temporal.

3.4.1.3 Tratamiento de valores atípicos mediante filtro de Hampel

Un problema común asociado a la adquisición digital de datos magnéticos es la presencia de ruido y valores espurios que no están asociados a fenómenos físicos. Estos registros anómalos pueden se originados por diversas fallas técnicas. Una vez organizada e integrada la serie histórica, el tratamiento de los valores anómalos, ya fueran *outliers* o *spikes*, se concentró en su identificación oportuna y en el tratamiento de estas fallas, dado que estos registros en si mismos, constituyen un problema importante, ya que, no solo representan observaciones que se desvían abruptamente del comportamiento esperado de la muestra, sino que también degradan la precisión de los datos y pueden conducir a tasas de error elevadas y a distorsiones en los parámetros y en las estimaciones estadísticas (Stankov et al. 2010; Zhang et al. 1990).

En consecuencia, se procedió al tratamiento de los valores atípicos debido a la presencia de *outliers* y *spikes* puntuales que podían no solo distorsionar localmente la amplitud de la perturbación geomagnética, sino también alterar la variación diaria de la componente en estudio, afectando directamente la estimación de las medianas horarias en bloques trihorarios.

En esta etapa se aplicó un procedimiento de depuración de la serie histórica con el fin de identificar y corregir picos espurios y valores atípicos que pudieran afectar el análisis posterior y, en particular, el cálculo del índice K local. Para ello, se empleó el filtro de Hampel (H_k), el cual pertenece a la clase de filtros basados en decisiones y se caracteriza por su capacidad para detectar observaciones atípicas a partir de estadísticos robustos calculados sobre una ventana móvil (Pearson et al. 2016).

$$w_k^K = \{x_{k-K}, \ldots, x_k, \ldots, x_{k+K}\} \tag{47}$$

Donde w_k^K representa la ventana móvil centrada en la observación x_k, y K corresponde al semiancho de la ventana. Para cada ventana se calcula la mediana local, la cual actúa como valor de referencia robusto frente a observaciones extremas:

$$m_k = \text{median}\{x_{k-K}, \ldots, x_k, \ldots, x_{k+K}\} \tag{48}$$

Posteriormente, se estima la variabilidad local de la señal mediante la Desviación Absoluta Mediana (MAD), definida como:

$$\text{MAD}_k = \text{median}_{j\in[-K,K]} \left(\left| x_{k-j} - m_k \right| \right) \tag{49}$$

En este estudio también se empleó la versión escalada de la MAD, expresada como:

$$S_k = 1{,}4826 \cdot \text{median}_{j\in[-K,K]} \left(\left| x_{k-j} - m_k \right| \right) \tag{50}$$

Donde el factor 1.4826 permite convertir la MAD en una estimación insesgada de la desviación estándar bajo el supuesto de datos gaussianos. No obstante, su principal utilidad en este trabajo radica en que constituye una medida robusta de dispersión, poco sensible a valores atípicos y adecuada para estimar la variabilidad local de la señal geomagnética. Con base en la mediana local y en la dispersión robusta estimada, el filtro de Hampel adopta la siguiente regla de decisión:

$$y_k = \begin{cases} x_k, & \text{si } |x_k - m_k| \leq tS_k \\ m_k, & \text{si } |x_k - m_k| > tS_k \end{cases} \tag{51}$$

Donde y_k es el valor filtrado y t corresponde al umbral de decisión. De esta manera, cuando la diferencia absoluta entre la observación central y la mediana local supera el umbral definido por la dispersión robusta de la ventana, el dato es clasificado como atípico y sustituido por la mediana local. En caso contrario, se conserva el valor original.

A diferencia de la desviación estándar, el estadístico MAD proporciona una medida directa de la escala de una variable respecto a su mediana y resulta más robusto en contextos reales donde pueden presentarse errores de observación, medición o registros espurios (Elamir 2012). En consecuencia, el filtro de Hampel permite depurar la serie histórica sin alterar de manera significativa la estructura general ni la variabilidad de baja amplitud de la señal geomagnética.

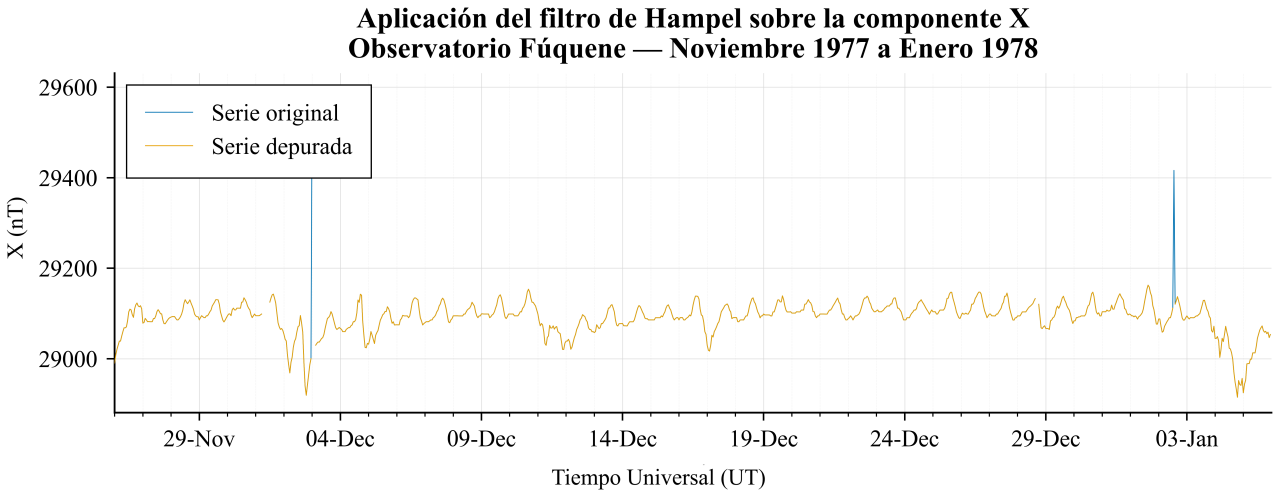


Figura 27: Ejemplo de aplicación del filtro de Hampel sobre la componente X de la serie histórica de FUQ, mostrando la señal original y la señal depurada en un tramo temporal de referencia. Fuente: Elaboración Propia.

En la implementación desarrollada para este estudio, el filtro se aplicó sobre las componentes geomagnéticas X, Y y Z, mediante una ventana móvil centrada, empleando un umbral de decisión definido en función de la dispersión robusta local, de tal manera que los valores detectados como atípicos fueron sustituidos por la mediana local de la ventana correspondiente. Este enfoque resultó especialmente adecuado para las series temporales de a las componentes geomagnéticas de FUQ, ya que permitió remover anomalías puntuales, sin eliminar variaciones propias asociadas al comportamiento geomagnético.

3.4.1.4 Depuración adicional de serie Y con umbral de media movil

A pesar de la aplicación del filtro Hampel, en la componente Y se identificaron anomalías residuales que no fueron identificadas completamente y que, por tanto, podían seguir afectando el comportamiento de la señal. En particular, se observaron desviaciones locales con respecto al comportamiento medio de la serie, las cuales no fueron capturada de manera adecuada con base al criterio de mediana local y dispersión robusta.

En consecuencia, se recurrió al uso del filtro de media móvil como un criterio complementario para la depuración de la serie, orientado a detectar desviaciones residuales respecto al comportamiento local de la señal. Dado que el filtro de media móvil es uno de los filtros más comunes en el procesamiento digital de señales en el dominio del tiempo, por su facilidad y simplicidad es optimo para reducir ruido aleatorio mientras conserva una respuesta nítida ante cambios bruscos, su uso resulto adecuado como herramienta auxiliar del preprocesamiento (Smith 2003; Blackledget 2006).

El filtro de media móvil calcula, para cada observación de una serie en el domino del tiempo, la media de las muestras contenidas en una venta de tamaño arbitrario generalmente impar. De esta manera, cada dato puede compararse con una referencia de la media local representativa del comportamiento medio de la señal (Blackledget 2006). En este estudio, dicha referencia actúa como criterio de comparación para identificar desviaciones locales persistentes de la componente Y.

Matemáticamente, la media móvil puede expresarse como:

$$\mu_k = \frac{1}{2L+1} \sum_{j=-L}^{L} x_{k+j} \tag{52}$$

donde:

- μ_k es la media móvil local asociada a la observación x_k,
- L es el semiancho de la ventana,
- y $2L + 1$ corresponde al número total de observaciones incluidas en la ventana.

Teniendo en cuenta esta referencia, se evaluó la diferencia absoluta entre cada observación y el valor medio de su ventana local. Cuando dicha referencia superó un umbral predefinido, la observación se clasificó como atípica:

$$|x_k - \mu_k| > U \tag{53}$$

donde:

- U representa el umbral de decisión.

En la implementación de filtro desarrollada para este estudio, este criterio se aplicó específicamente sobre la componente Y, empleando una ventana impar de 61 observaciones y un umbral U de 100 nT. Esta etapa permitió complementar la depuración realizada anteriormente mediante el filtro de Hampel, reduciendo así la influencia de las anomalías residuales, manteniendo, al mismo tiempo, la estructura general de la señal.

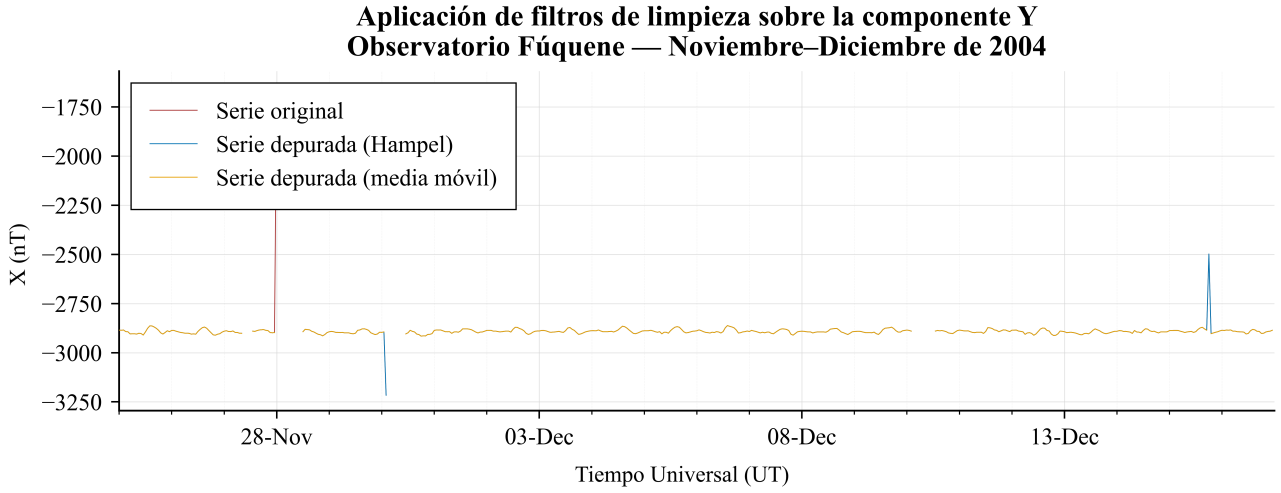


Figura 28: Comparación del proceso de depuración aplicado a la componente Y de la serie histórica de FUQ. Se muestra la señal original, la serie depurada mediante el filtro de Hampel y la serie final obtenida tras la aplicación complementaria del criterio de media móvil. Fuente: Elaboración Propia.

3.4.1.5 Detección e interpolación de vacíos en la serie histórica

Una vez completada la depuración de la serie histórica, se procedió a la identificación e interpolación de vacíos presentes en las series de datos. Esta etapa fue necesario debido a discontinuidades evidenciadas de manera intermitentes en el registro que podían afecta la continuidad mínima requerida para el cálculo del índice K, especialmente en la estimación de amplios trihorarias y en la construcción de una base histórica consolidada. Sin embargo, es importante aclarar que la interpolación no se aplicó de manera indiscriminada, si no bajo criterios basados en la resolución temporal y la duración de cada vacío.

Dado que la serie histórica de FUQ se compuso de un tramo horario y un tramo al minuto, el tratamiento de vacíos se realizo mediante dos enfoques diferenciados. Para la serie al minutos se empleó un método de importación orientado a vacíos cortos, mientas que para la serie horaria se adopto un procedimiento especifico para datos de menor resolución, acorde con las condiciones de continuidad para la formación de los bloques trihorarios.

En la serie al minuto, se adoptó un enfoque de interpolación para vacíos de corta duración basado en la aplicación del método FMI, mediante el uso de interpolación lineal para discontinuidades menores a 15 minutos. Este procedimiento fue seleccionado por su adecuación al tratamiento de vacíos breves en registros con alta resolución temporal Matzka et al. (2021), ya que este permite reconstruir segmentos faltantes, preservando la continuidad de la señal sin alterar de manera significativa su variabilidad natural. Esto se debe a que parte del supuesto de que cada punto estimado se sitúa en el vector que une los puntos más cercanos con el supuesto de estos dos son similares Mara Ribeiro et al. (2022).

La interpolación lineal consiste en estimar valores faltantes a partir de una relación lineal entre dos observaciones conocidas que delimitan el vacío Noor et al. (2013). Así, si x_0 y x_1 representan los extremos temporales del segmento faltante, el valor interpolado para un punto intermedio x se calcula como:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}(x - x_0) \tag{54}$$

donde:

- $f(x_0)$ y $f(x_1)$ representan los valores observados en los extremos del vacío.
- $f(x)$ corresponde al valor interpolado en un instante intermedio x.

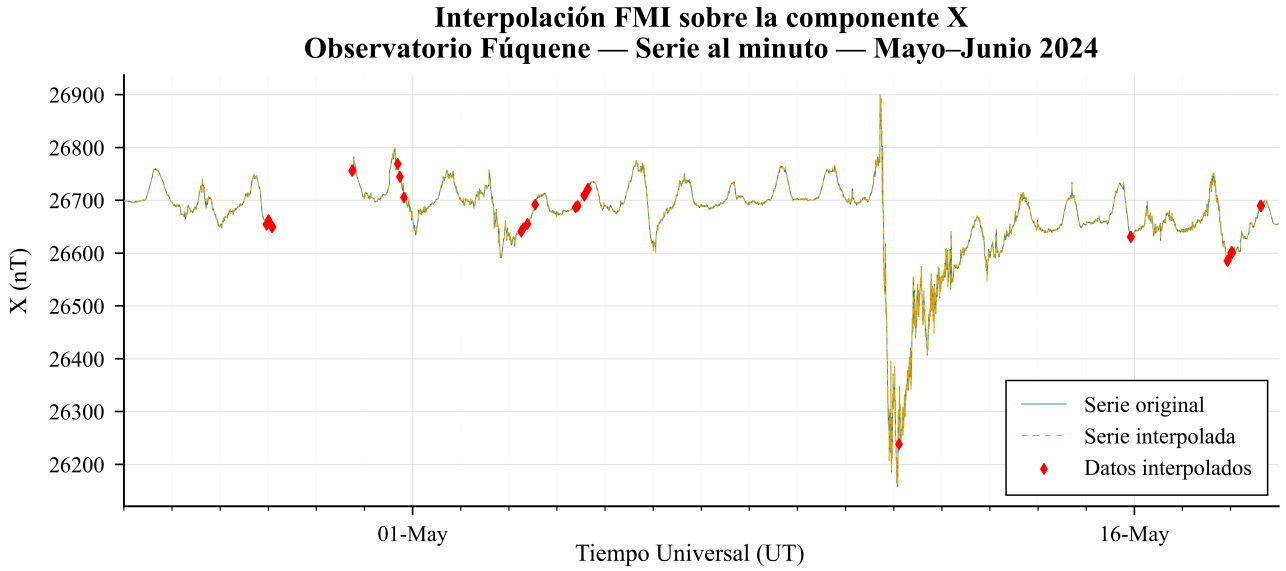


Figura 29: Ejemplo de interpolación aplicada a vacíos cortos en la serie al minuto de la componente X del Observatorio Geomagnéticos de Fúquene (FUQ), mediante el método de FMI. La comparación entre la serie original y la serie interpolada permite observar la continuidad recuperada en los segmentos faltantes, donde los valores reconstruidos se destacan mediante marcadores.

En la serie horaria, el tratamiento de discontinuidades se realizó mediante el método de interpolación propuesto por Love et al. 2009 para el índice Dst, adoptado por su pertinencia para registro geomagnéticos de menor resolución temporal y usado por su utilidad en el relleno de discontinuidades largas, particularmente aquellos menores a 24 horas. A diferencia de la serie al minuto, en este caso se empleó un criterio más restrictivo, dado a que la perdida de uno o más registros en términos de horas limitaba la reconstrucción confiable de la señal.

De manera general, este método parte del supuesto de que la variación geomagnética puede conservar similitud entre días cercano Love et al. 2009. Para vacíos horarios aislado, la estimación del valor se realizo a partir del promedio de los registros adyacentes.

$$E_i = \frac{1}{2}\left(E_{i+1} + E_{i-1}\right) \tag{55}$$

donde:

- E_i representa el valor faltante.
- E_{i-1} corresponde a la observación horaria inmediatamente anterior.
- E_{i+1} corresponde a la observación horaria inmediatamente posterior.

En el caso de discontinuidades más prolongadas, el método considera el uso de datos correspondientes a la misma hora del día en días próximos, con el fin de mantener de manera parcial la variación diurna del registro Love et al. 2009, el valor estimado se puede expresar como.

$$E_i = \frac{1}{m+n}\left(nE_{i-24m} + mE_{i+24n}\right) \tag{56}$$

donde:

- m y n representan el número de días hacia atrás y hacia adelante utilizados como referencia,
- E_{i-24m} y E_{i+24n} corresponden a los valores observados en el mismo tiempo local de días adyacentes válidos.

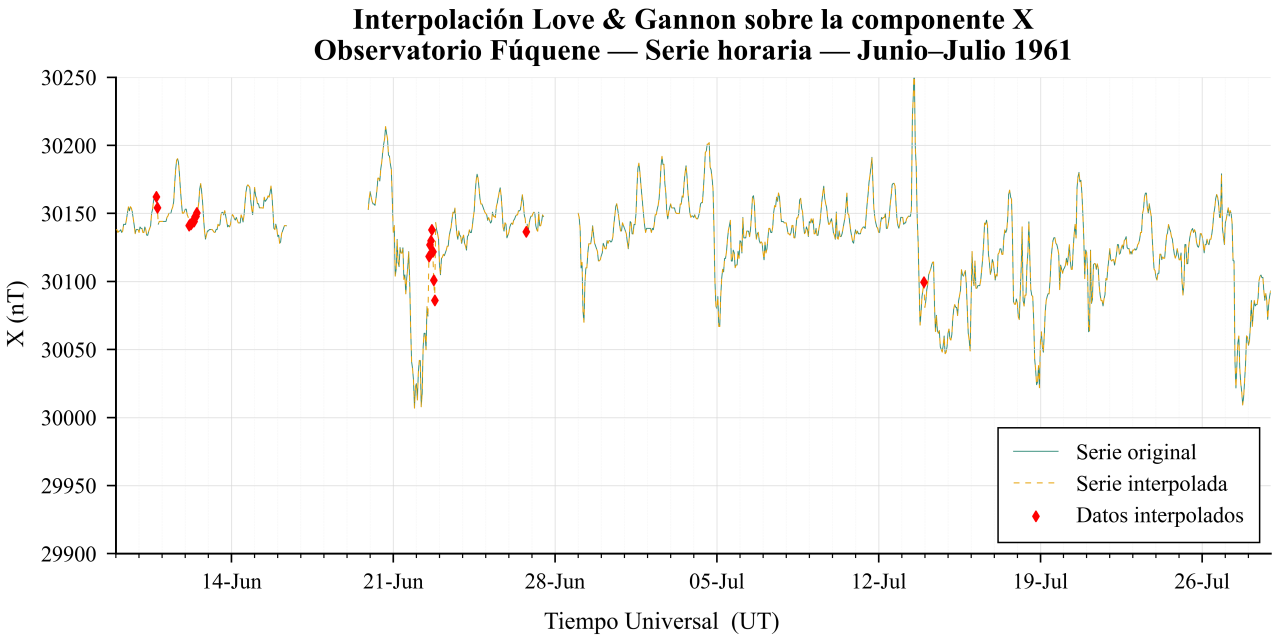


Figura 30: Ejemplo de interpolación aplicada a vacíos en la serie horaria de la componente X del Observatorio Geomagnéticos de Fúquene (FUQ), mediante el método de Love y Gannon. En la figuta se compara la serie original con la serie interpolada, mientras que los marcados identifican los puntos estiamados donde no se disponía de registros.

Este procedimiento permitió completar vacíos horarios conservando, en la medida de lo posible, la estructura temporal de baja frecuencia necesaria para el análisis posterior. Como resultado del preprocesamiento, obtuvimos una base histórica depurada, consistente en el tiempo y manteniendo los parámetros de continuidad suficientes para la aplicación del método basado en *Linear Elimination*, empleado por el FMI, que posteriormente permitiría la derivación histórica del índice K local para el observatorio FUQ.

3.4.1.6 Aplicación del método Linear Elimination (FMI)

Una vez completado el preprocesamiento de la serie histórica, se procedió a la aplicación del método del *Finnish Meteorological Institute* (FMI), basado en el método *Linear Elimination* descrito por Sucksdorff et al. (1991), para la derivación computarizada del índice K local en el Observatorio de Fúquene. En esencia, Sucksdorff et al. (1991) planteó este método para la producción computacional de índices K, tratando de seguir criterios como que los valores resultantes de K fueran lo más cercanos posible a los obtenidos mediante escalado manual, que

el procedimiento mantuviera su validez para un observatorio específico y que, además, pudiera ser aplicado en diferentes observatorios.

En términos generales, el procedimiento se basa en el uso de valores medios simples observados, generalemente con resolución de un minuto, organizados en bloques trihorarios. A partir de estos, se estima la amplitud de la perturbación magnética, junto la estimación de la curva de variación solar regular; posteriormente, se realiza la reevaluación del índice sobre los residuales de la serie, con el fin de obtener una medida específica del rango de la perturbación magnética (Sucksdorff et al. 1991; Frøystein et al. 2025).

3.4.1.7 Construcción de intevalos de tres días y bloques trihorarios

En el método Linear Elimination, el análisis de la serie histórica no se realiza punto a punto de forma aislada, si no que se requiere de la definición de bloques móviles de tres días (Sucksdorff et al. 1991). Esta organización permite determinar el día central como referencia para el cálculo del índice K, mientras que los días adyacentes a este proporcionan el contexto temporal para evaluar la continuidad de la serie y posteriormente construir las medias horarias. En consecuencia, para cada bloque de tres días se exige una cobertura completa de las componentes X y Y como criterio para considerar el bloque valido.

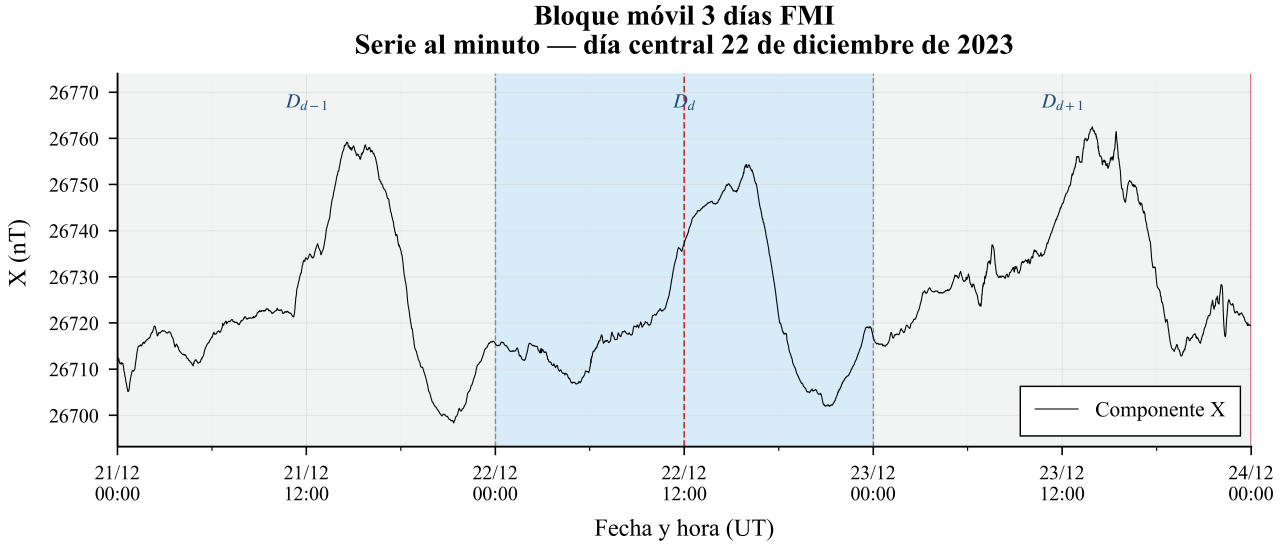


Figura 31: Ejemplo de construcción de bloque móvil de tres días empleado en em método FMI para el cálculo de la serie histórica del índice K en FUQ. La región sombreada representa el día central D_d, empleado para el cálculo del índice K, mientras que D_{d-1} y D_{d+1} corresponde al día previo y al día posterior.

$$B_d = \{D_{d-1}, D_d, D_{d+1}\} \tag{57}$$

Donde D_{d-1}, D_d y D_{d+1} representan, respectivamente, el día previo, el día central y el día posterior.

Una vez se definen los bloques de tres días, el día central se divide en 8 intervalos consecutivos de tres horas, correspondientes a los periodos 00:00–03:00, 03:00–06:00, ..., 21:00–24:00 UT (Sucksdorff et al. 1991; Frøystein et al. 2025). Sobre estos bloques trihorarias se evaluó posteriormente la amplitud de la perturbación geomagnética, constituyendo la base temporal para la obtención del índice K preliminar.

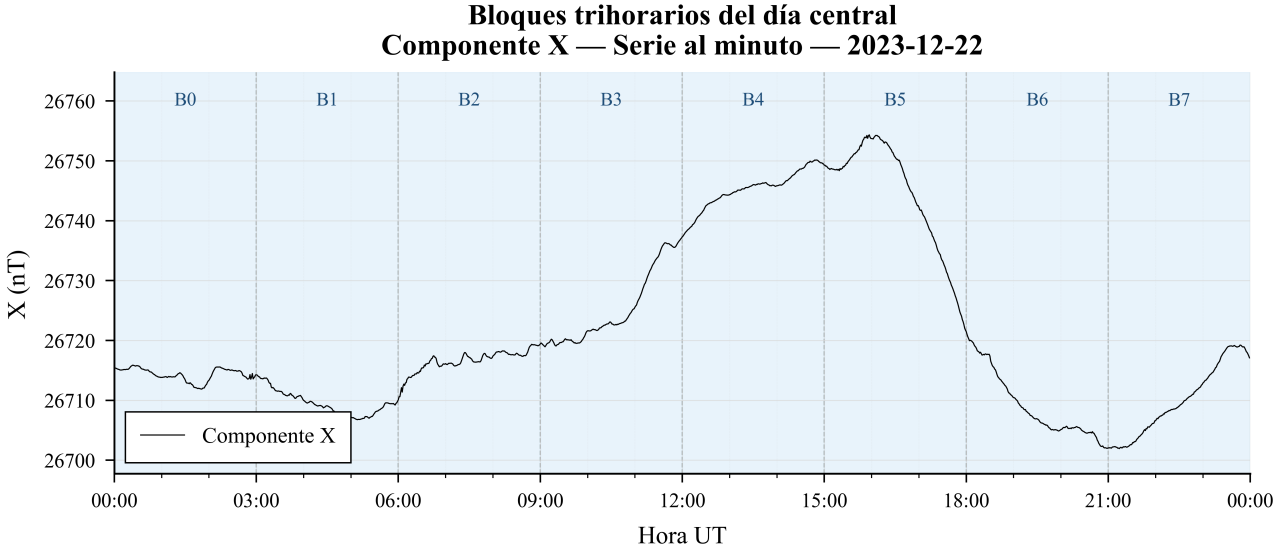


Figura 32: Ilustra de construcción de bloques trihorarios sobre el día central del bloque FMI para la serie al minuto de la componente X para FUQ. El día central se divide en ocho bloques consecutivos de tres horas denotados como $B0, B1, \ldots, B7$, correspondientes a los periodos 00:00–03:00, 03:00–06:00, ..., 21:00–24:00 UT..

$$I_h = [t_h,\, t_h + 3\,\mathrm{h}), \qquad h = 0, 1, \ldots, 7 \tag{58}$$

Donde t_h corresponde a los instantes de inicio de cada subintervalo trihorario del día central.

3.4.1.8 Cálculo de amplitudes trihorarias

De acuerdo con la derivación del método FMI para el cálculo del índice K, una vez definidos los bloques trihorarios en función de los días centrales, se procede al cálculo de la amplitud de la perturbación magnética mediante el método simple de máximo-mínimo. Este procedimiento consiste en determinar la diferencia absoluta entre el valor máximo y el valor mínimo de las componentes horizontales del campo magnético dentro de cada bloque de 3 horas, con el objetivo de obtener un valor de K preliminar (Sucksdorff et al. 1991; Stankov et al. 2010).

$$A_h = \left|\mathrm{máx}(I_h) - \mathrm{mín}(I_h)\right| \tag{59}$$

Donde A_h es la amplitud del intervalo trihorario I_h. Además, dado que para cada componente se obtiene un rango dentro del bloque de tres horas, se selecciona el mayor de los dos como valor representativo de la perturbación magnética.

$$A_h = \text{máx}\left(A_h^X, A_h^Y\right) \tag{60}$$

donde:

- A_h^X es la amplitud calculada para la componente X en el intervalo trihorario h,
- A_h^Y es la amplitud calculada para la componente Y en el intervalo trihorario h,
- A_h corresponde a la amplitud final adoptada para el bloque, definida como la mayor entre ambas componentes.

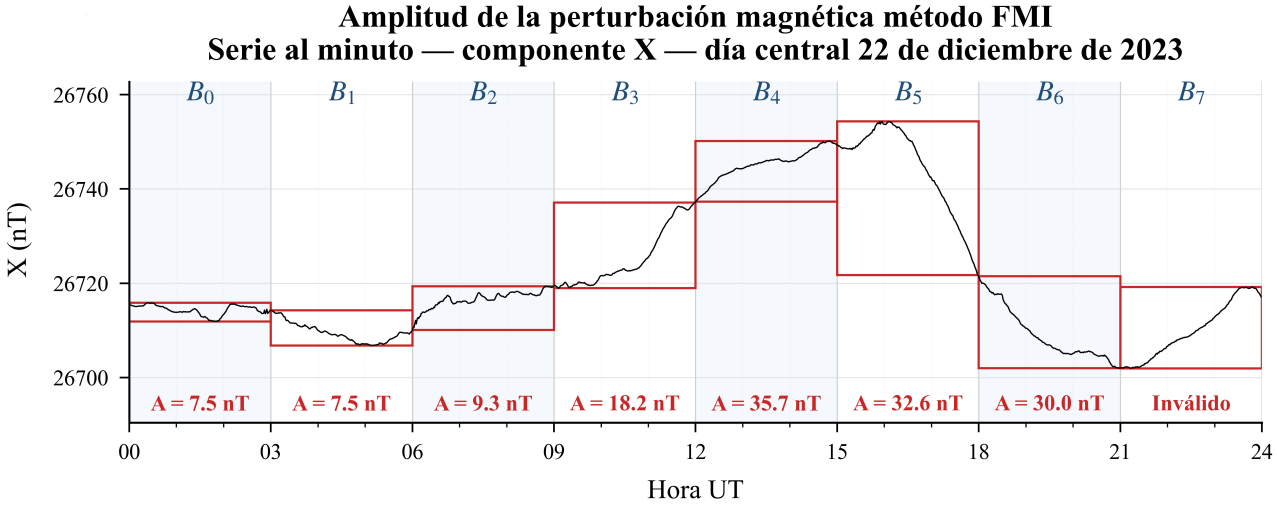


Figura 33: Ilustra de construcción de bloques trihorarios sobre el día central del bloque FMI para la serie al minuto de la componente X para FUQ. El día central se divide en ocho bloques consecutivos de tres horas denotados como $B0, B1, \ldots, B7$, correspondientes a los periodos 00:00–03:00, 03:00–06:00, ..., 21:00–24:00 UT..

3.4.1.9 Definición de K9 limit y tabla de limites locales para FUQ

La intensidad de las perturbaciones geomagnéticas depende fuertemente de la latitud geomagnética, de tal manera que estas aumentan de acuerdo con las zonas ecuatorial y auroral del campo magnético terrestre; por ello cada observatorio debe definir su propia tabla de escalado (Stankov et al. 2010). Las escalas de límites K para los distintos observatorios son proporcionales a la escala de Niemegk y resultan ser una escala con una distribución cuasilogarítmica. En esta, los límites K se duplican desde $K = 1$ hasta $K = 4$ en la parte logarítmica de la escala, mientras que los $K > 4$ aumentan con menor pendiente (Bartels 1957a; Matzka et al. 2021).

Dado que se trata de una escala cuasilogarítmica, para definir las escalas de los límites K de un observatorio solo es necesario establecer el límite inferior para $K9$; los demás límites se obtendrán a partir de la Ecuación (61). Esto procedimiento permite que otros observatorios tengan una distribución de frecuencias lo más cercana posible a la de Niemegk. Según Bartels

1957b y Bartels 1957a el valor límite $K9$ para observatorios ecuatoriales debe ser de 300 nT; en consecuencia, se adoptó dicho valor como el límite $K9$ para el Observatorio de Fúquene. Así, para Fúquene (FUQ) el límite inferior de $K9$ es $R^{\mathrm{FUQ}}_{\mathrm{lim},9} = 300\,\mathrm{nT}$. En consecuencia, a partir de los límites del rango de Niemegk $R^{\mathrm{NGK}}_{\mathrm{lim},i}$, los límites para FUQ se calculan mediante la expresión:

$$R^{\mathrm{FUQ}}_{\mathrm{lim},i} = R^{\mathrm{FUQ}}_{\mathrm{lim},9} \times \frac{R^{\mathrm{NGK}}_{\mathrm{lim},i}}{R^{\mathrm{NGK}}_{\mathrm{lim},9}}, \qquad i = 0, 1, 2, \ldots, 8, 9. \tag{61}$$

A partir de la ecuación anterior y tomando como referencia los límites de rango del observatorio de Niemegk, se calcularon los límites locales de escala para el observatorio de Fúquene. La Tabla 2 presenta los valores obtenidos para cada clase del índice K, junto con los límites de referencia de Niemegk.

Tabla 2: Límites de rangos para el índice K en el Observatorio de Fúquene (FUQ), obtenidos por escalamiento proporcional de la escala de Niemegk, adoptando $K9 = 300\,\mathrm{nT}$.

Valor de K	**Límites de rango para Niemegk (nT)**	**Límites de rango para Fúquene (nT)**
0	$0 - 5$	$0 - 3$
1	$5 - 10$	$3 - 6$
2	$10 - 20$	$6 - 12$
3	$20 - 40$	$12 - 24$
4	$40 - 70$	$24 - 42$
5	$70 - 120$	$42 - 72$
6	$120 - 200$	$72 - 120$
7	$200 - 330$	$120 - 198$
8	$330 - 500$	$198 - 300$
9	$500+$	$300+$

3.4.1.10 Determinación preliminar del índice K

Una vez definidas las amplitudes trihorarias y establecidos los limites locales para el observatorio de Fúquene, se procedió a estimar los valores preliminares del índice K. Para esto, se tomó la amplitud obtenida en cada bloque de tres horas y fue comparado con la tabla escalada de limites locales a partir de Niemegk, asignando el valor de K correspondientes al rango donde se ubico la amplitud de la perturbación magnética.

De esta manera, el valor preliminar del índice K para cada bloque trihorario se obtiene por medio de una clasificación por intervalos, donde las amplitudes mayores se asociación a niveles más altos de actividad magnética. Este valor constituye una primera aproximación al índice local y sirve entrada de las etapas posteriores del método FMI (Stankov et al. 2010).

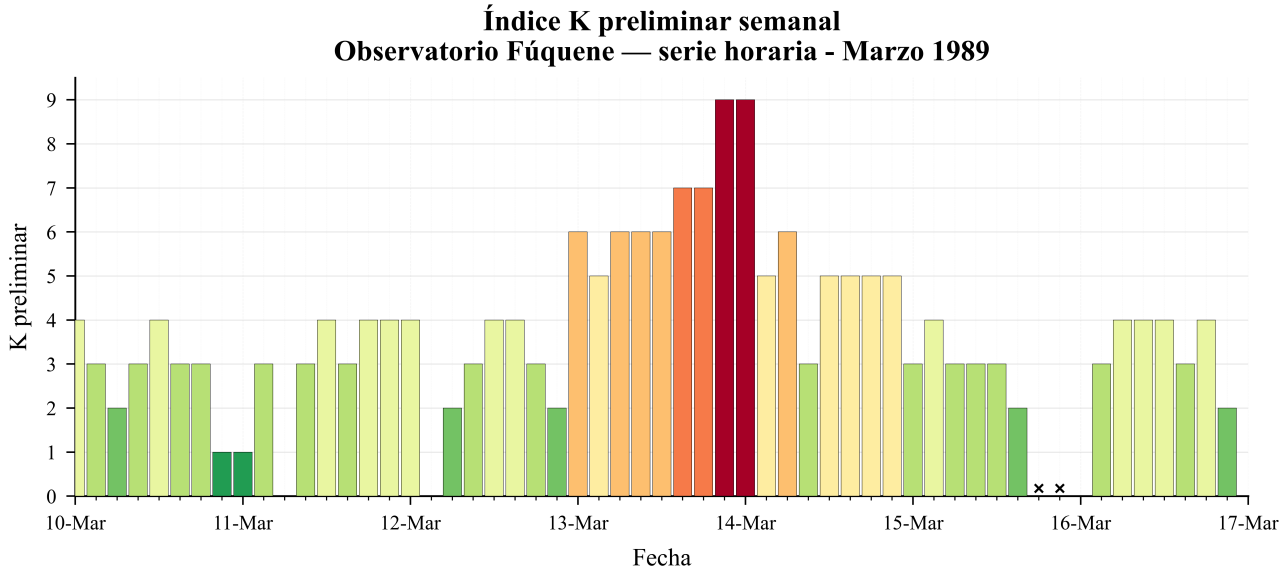


Figura 34: Ejemplo serie semanal del índice K preliminar para FUQ obtenida a partir de la serie horaria en marzo de 1989. Cada barra representa el valor asignado para un bloque trihorario, una vez calculada la amplitud geomagnética y comparada con los límites locales adoptados para el observatorio.

3.4.1.11 Estimación de medias horarias mediante ventanas moviles

Una vez obtenidos los valores preliminares del índice K, el método *Linear Elimination* tiene como tarea principal la determinación de la curva de variación diaria regular S_R. Para ello, es necesario calcular las medias horarias de la componente geomagnética utilizada.

En esta etapa, el método del *Finnish Meteorological Institute* (FMI) no emplea únicamente los datos contenidos dentro de cada hora, sino que extiende el rango de observaciones considerando información previa y posterior al intervalo horario. De este modo, para cada hora, el valor medio se calcula a partir de los datos contenidos en dicha hora junto con los datos de los dos intervalos de tiempo vecinos, cada uno con una longitud de $m+n$ minutos (Sucksdorff et al. 1991; Stankov et al. 2010).

La longitud de esta ventana de promediado depende tanto de la hora local como del nivel de actividad geomagnética estimado anteriormente. En particular, el parámetro m depende de la hora local, tomando los siguientes valores:

$$L = \left(L_{\text{hour}} + K^{3,3}\right) \text{ min} \tag{62}$$

$$L_{\text{hour}} = \begin{cases} 90, & \text{horas locales 21:00 y 03:00,} \\ 60, & \text{horas locales 18:00 y 21:00 y 03:00 y 06:00,} \\ 0, & \text{horas locales 06:00 y 18:00.} \end{cases} \tag{63}$$

donde L representa la longitud de la ventana de cálculo expresada en minutos, L_{hour} corresponde a un término base dependiente de la hora local, y K es el nivel de actividad geomagnética.

Por otro lado, el parámetro n depende del nivel de actividad geomagnética, el cual se describe mediante el valor preliminar del índice K. De este modo, n se define como una función exponencial de tal manera que $n = K^{3,3}$ permitiendo ampliar la ventana de promediado en condiciones de mayor perturbación geomagnética (Sucksdorff et al. 1991; Stankov et al. 2010).

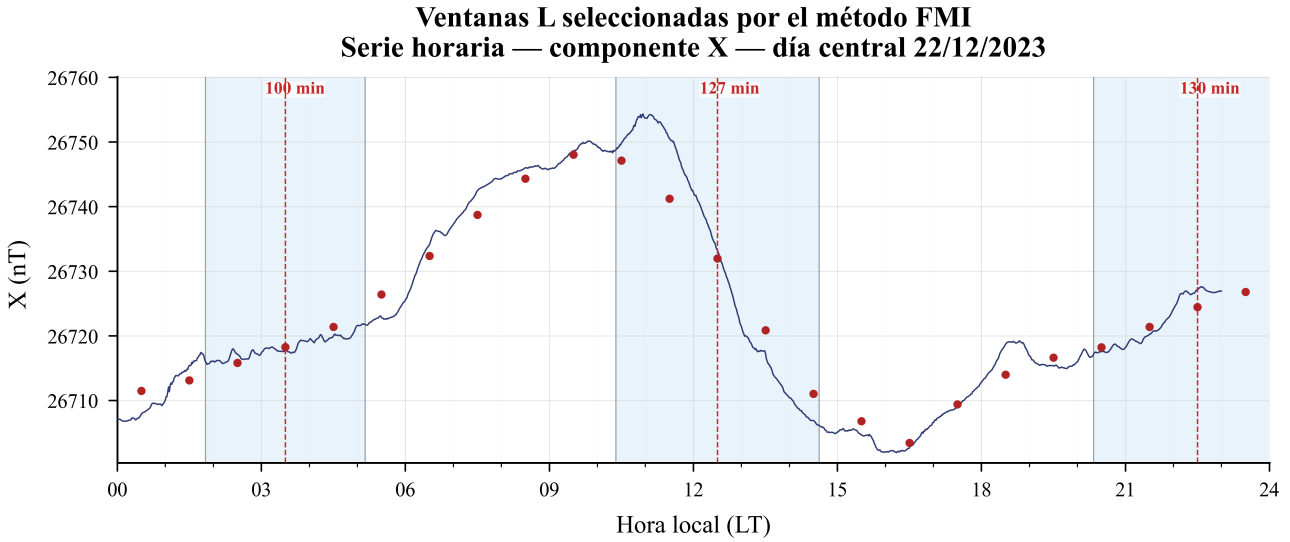


Figura 35: Ejemplo de la determinación de ventanas L y el cálculo de las medias horarias para la componente X de la serie al minuto de FUQ. Las áreas sombreadas indican la extensión de las ventanas de medias horarias, mientras que los puntos rojos representan los valores medios horarios derivados del cálculo.

3.4.1.12 Estimación de la curva de variación solar regular (SR_1)

Con base en las medias horarias calculadas para cada componente, se realizó la estimación de la curva de variación solar regular S_R. El método *Linear Elimination* entiende esta curva como una aproximación funcional de la variación diurna del campo geomagnético en condiciones regulares.

Esto quiere decir que la curva de variación regular diurna desempeña un papel importante para una componente dada del campo geomagnético, ya que representa el concepto de *no-variación* K, entendido como los aportes al campo magnético asociados a fenómenos de carácter regular y de larga duración, como la radiación electromagnética solar, la variación diaria solar y lunar en condiciones tranquilas, la corriente anular, entre otros (Matzka et al. 2021; Angenheister 1939; Yamazaki et al. 2016).

El método desarrollado por el FMI propone la sustracción, de la señal magnética total, de los aportes asociados a la *no-variación* K, ya que esto permite estimar con mayor detalle las perturbaciones geomagnéticas irregulares o *variaciones* K, originadas por cambios rápidos, generalmente menores que los periodos trihorarios, asociados a fenómenos como pulsaciones geomagnéticas, tormentas y *bays* (Matzka et al. 2021; Bartels 1957b; Siebert et al. 1996).

De esta manera, entendiendo que la *no-variación* K corresponde básicamente a efectos de periodos más largos que los de su contraparte, se considera el cálculo de la curva de variación

regular diurna S_R como un ajuste por armónicos de Fourier de quinto orden a los puntos medios de cada hora (Matzka et al. 2021; Sucksdorff et al. 1991; Stankov et al. 2010). De forma general, la curva S_R puede expresarse como:

$$SR(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{5} \left[a_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{24}\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{24}\right) \right] \tag{64}$$

Donde $SR(t)$ representa la variación solar regular en función del tiempo, mientras que a_0, a_k y b_k corresponden a los coeficientes del ajuste armónico. Esta formulación permite representar mediante una función suave la tendencia diaria regular del campo geomagnético a partir de las medias horarias obtenidas previamente.

Es importante destacar que Matzka et al. (2021) señala que la *no-variación K* constituye una tendencia mucho más clara en estaciones subaurorales; en observatorios de baja latitud y cercanos al ecuador geomagnético esta distinción puede resultar menos marcada. Por esta razón, la estimación de la curva regular S_R y la definición de límites locales de escala constituyen etapas fundamentales en la derivación del índice K para observatorios como Fúquene.

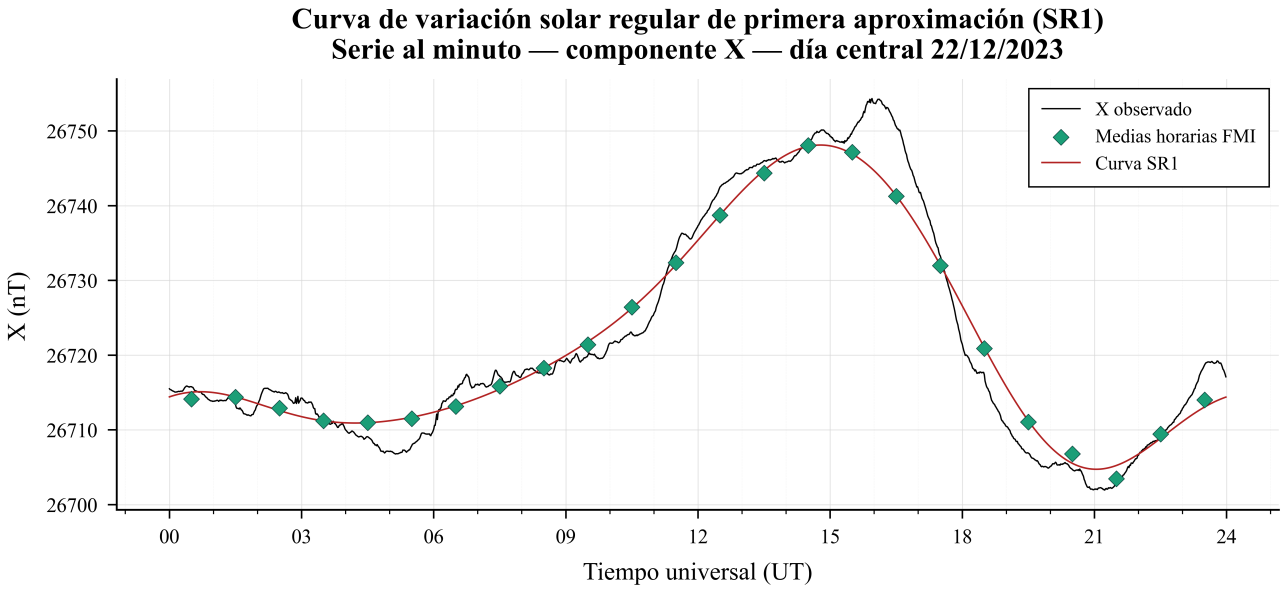


Figura 36: Ejemplo de la curva de variación solar regular de la primera aproximación SR_1 estimada para la componente X en la serie al minuto de FUQ. Los puntos representan las medias horarias calculadas median el método FMI, mientras que la línea continua corresponde al ajuste armónico de quinto orden.

3.4.1.13 Cálculo del índice K intermedio

Una vez determinada la curva de variación solar regular S_R, se procedió a sustraerla de la señal original del día central para cada una de las componentes horizontales. Este procedimiento permitió obtener una serie residual libre de los aportes asociados a la *no-variación K*, como segunda aproximación para la estimación del índice K.

Una vez eliminadas las *no-variaciones* K mediante la curva S_R de los datos originales, los valores intermedios de K se derivan aplicando nuevamente el criterio de máximo-mínimo y seleccionando el mayor de los rangos de las dos componentes horizontales, además de emplear la tabla de límites locales definida para FUQ (Sucksdorff et al. 1991; Stankov et al. 2010). El resultado de este procedimiento corresponde al índice K intermedio, el cual constituye una estimación más refinada con respecto al valor preliminar.

$$X_{\text{res},1}(t) = X(t) - SR_1^X(t) \tag{65}$$

$$Y_{\text{res},1}(t) = Y(t) - SR_1^Y(t) \tag{66}$$

Donde $X_{\text{res},1}(t)$ y $Y_{\text{res},1}(t)$ representan las componentes residuales del campo geomagnético, obtenidas al sustraer la variación regular diaria $SR_1(t)$ de las componentes observadas $X(t)$ y $Y(t)$, respectivamente. Estas series residuales contienen principalmente las perturbaciones geomagnéticas o también conocidas como *variaciones* K, sobre las cuales se recalcula la amplitud trihoraria y el correspondiente valor del índice K.

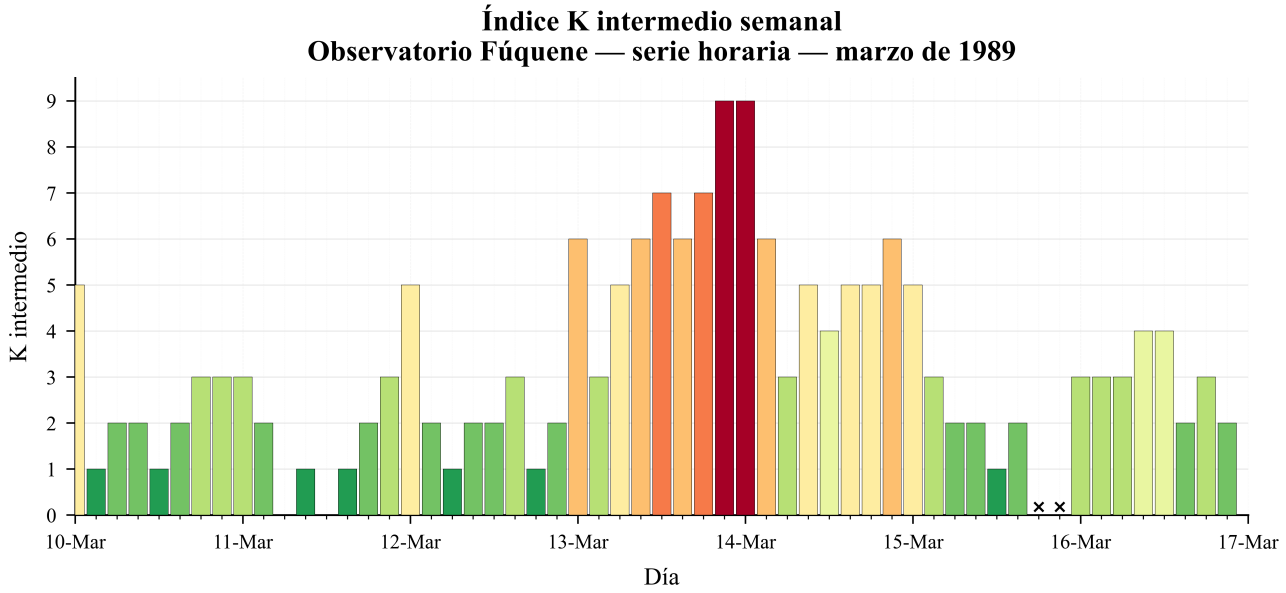


Figura 37: Ejemplo serie semanal del índice K intermedio para FUQ obtenida a partir de la serie horaria en marzo de 1989. Cada barra representa el valor asignado para un bloque trihorario, una vez calculada la amplitud geomagnética y comparada con los límites locales adoptados para el observatorio.

3.4.1.14 Reestimación de (SR_2) y cálculo del índice K final

Una vez obtenido el índice K intermedio, se procedió a realizar una segunda iteración del método *Linear Elimination*, con el objetivo de refinar la variación solar regular y obtener el valor final del índice K. Para ello, se utilizó la serie residual obtenida de la sustracción de la curva S_R, junto con los valores de K intermedios previamente calculados, para recalcular la longitud base de promediado y obtener nuevas medias horarias, a partir de las cuales se ajustó una segunda curva mediante una serie de Fourier de quinto orden, obteniendo así una segunda

curva de variación solar regular, denotada como S_{R2} (Sucksdorff et al. 1991; Stankov et al. 2010).

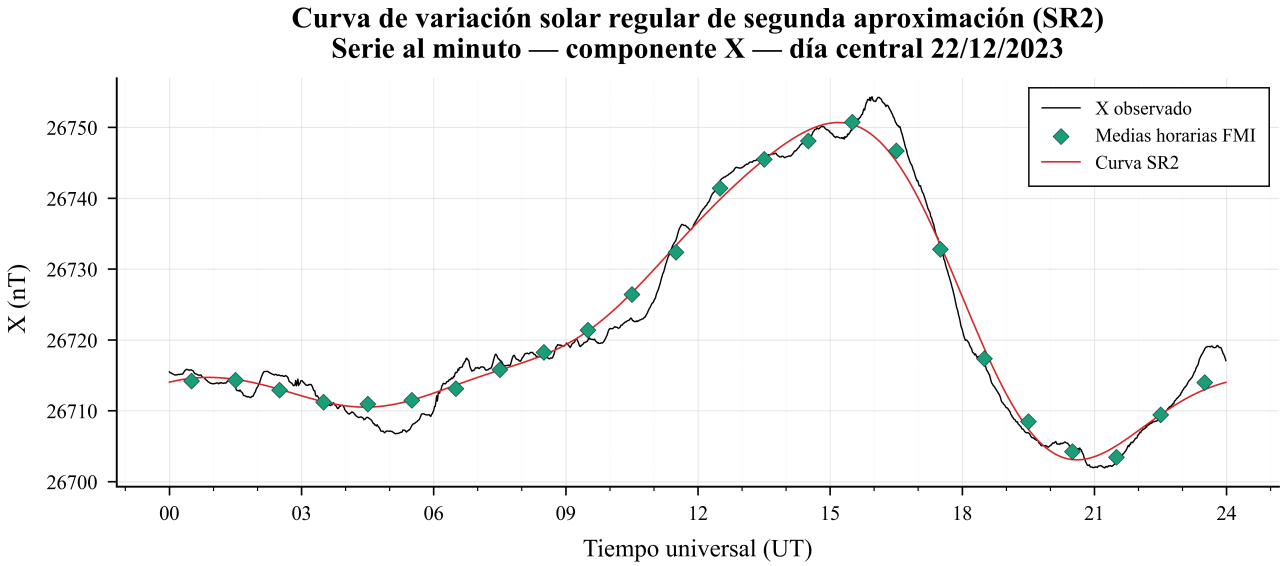


Figura 38: Ejemplo de la curva de variación solar regular de la segunda proximación SR_2 estimada para la componente X en la serie al minuto de FUQ. Los puntos representan las medias horarias calculadas median el método FMI, mientras que la línea continua corresponde al ajuste armónico de quinto orden.

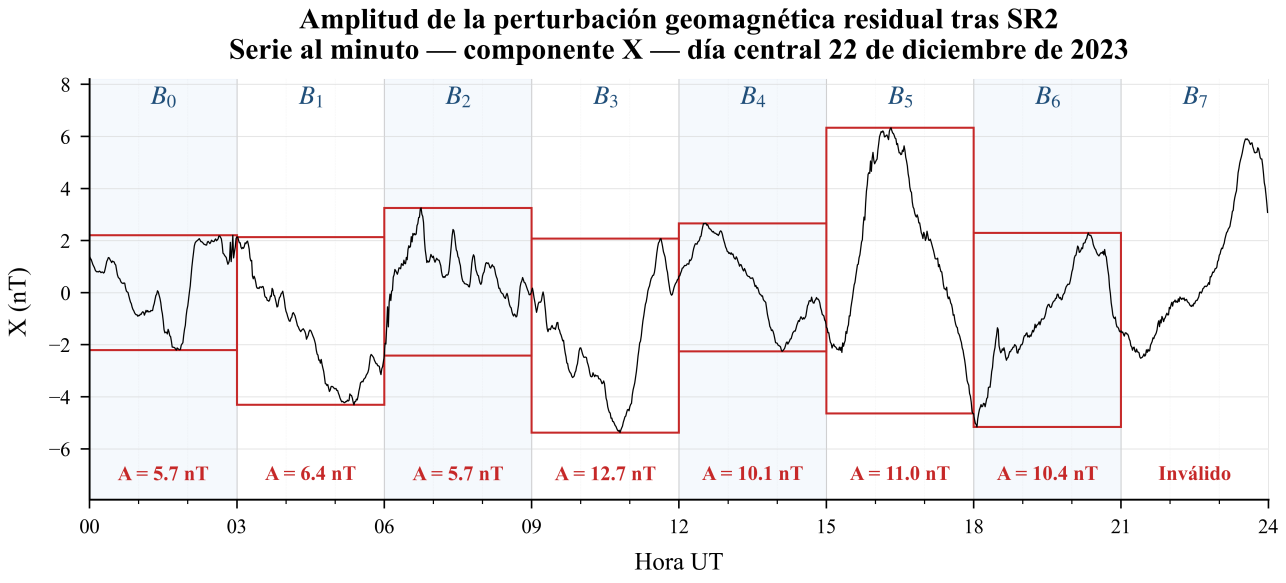


Figura 39: Ejemplo de las amplitudes obtenidas para cada uno de los 8 bloques trihorarios del día 22 de dicimebre de 2023, después de sustraer la variación solar regular de la serie residual anterior.

Esta nueva curva constituye una aproximación más refinada de la *no-variación* K asociada al campo geomagnético. Su sustracción de la señal original permitió obtener una segunda serie

residual, sobre la cual se calcularon nuevamente las amplitudes trihorarias y, mediante la tabla de límites locales definida para FUQ, se determinó el índice K final.

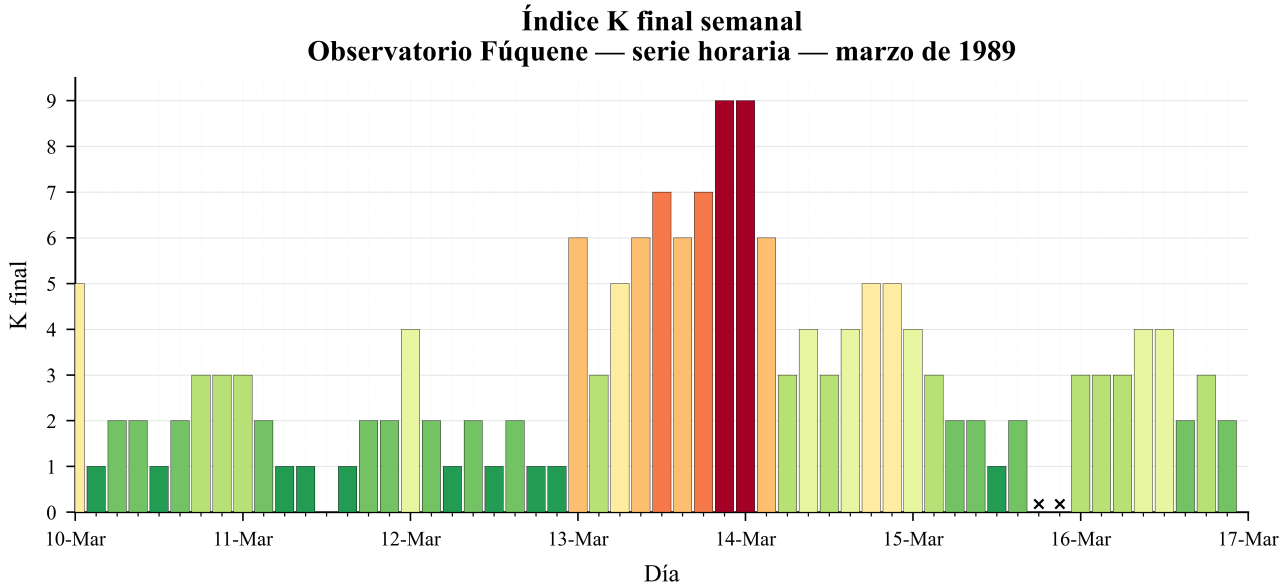


Figura 40: Ejemplo serie semanal del índice K final para FUQ obtenida a partir de la serie horaria en marzo de 1989. Cada barra representa el valor asignado para un bloque trihorario, una vez calculada la amplitud geomagnética y comparada con los límites locales adoptados para el observatorio.

3.4.2. Implementación en Tiempo Real (NRT)

Una vez establecido el procedimiento para la derivación del índice K local para el Observatorio Geomagnético de Fúquene, se procedió al desarrollo de una implementación en tiempo real de este índice, orientada a su estimación operativa a partir del flujo de datos recientes del observatorio.

Trabajos previos, como los desarrollados por Choi et al. 2005 para el Observatorio Geomagnético de Gyeongju del Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) (35,44° N, 129,23° E) y Stankov et al. 2010 para el Centro Geofísico de Dourbes del Royal Meteorological Institute (RMI) (50,1° N, 4,6° E), respectivamente, han propuesto distintas metodologías para el cálculo de un índice K local operacional a partir de datos magnéticos en tiempo real.

De manera general, ambas metodologías buscan resolver un mismo problema: la obtención de un índice K en tiempo casi real. Sin embargo, difieren en la forma de abordar la principal limitación del método clásico de *Linear Elimination* propuesto por el FMI, el cual depende del uso de información correspondiente al menos hasta un día posterior a la fecha bajo análisis para la estimación de la curva de variación solar regular, denotada como S_R. En consecuencia, este método presenta restricciones para su aplicación estrictamente en tiempo real (Choi et al. 2005; Stankov et al. 2010).

En el caso del Observatorio Geomagnético de Gyeongju, el procedimiento para la obtención del índice K en tiempo casi real consistió en consultar el índice K_p, publicado diariamente por

NOAA/SEC, e identificar el día más reciente en el cual los ocho intervalos trihorarios presentaran valores $K_p < 3$. Dicho día era entonces considerado como el tercer día geomagnéticamente tranquilo requerido para la conformación de la ventana de tres días empleada en la estimación de las medias horarias y de la curva S_R (Choi et al. 2005).

Por su parte, el procedimiento propuesto por el Centro Geofísico de Dourbes planteó el cálculo de un índice K local a partir del uso de ventanas deslizantes de tres horas, con el fin de generar un valor operativo al menos una vez por hora. Este enfoque se fundamenta en lo señalado por Della Rose, quien mostró que valores de K obtenidos en intervalos inferiores a tres horas pueden diferir considerablemente de aquellos calculados bajo el esquema trihorario estándar. Adicionalmente, dado que la estimación de S_R en tiempo real mediante la aplicación directa del método FMI presenta limitaciones asociadas a la necesidad de contar con observaciones distribuidas a ambos lados del instante actual, se propuso reemplazar dicha estimación por una curva diaria tranquila construida a partir de la selección de *Quiet Days* dentro de una ventana de 27 días previos al instante de cálculo. Esta curva diaria tranquila, o *Quiet Day Curve* (*QDC*), se emplea entonces como una aproximación operativa de la variación solar regular (Stankov et al. 2010; Takahashi et al. 2001; Matzka et al. 2021).

3.4.2.1 Planteamiento metodología general del sistema NRT

Una vez discutidos los principales antecedentes y enfoques para la estimación del índice K en tiempo casi real, en esta sección se describe la metodología adoptada para la implementación operativa de este índice en el Observatorio Geomagnético de Fúquene. En particular, se presenta el flujo de trabajo diseñado para la obtención automática de un valor de K local a partir de los datos de las componentes magnéticas adquiridas por el observatorio, procurando preservar, en la mayor medida posible, la lógica original de la metodología de *Linear Elimination* del FMI, pero introduciendo las adaptaciones necesarias para su cálculo en condiciones NRT.

A diferencia del procedimiento histórico, la principal limitación en el cálculo del índice K operativo en tiempo casi real bajo el método clásico de *Linear Elimination* radica en la estimación de la curva de variación solar regular, S_R, la cual depende del uso de información futura para la construcción de las longitudes utilizadas en la determinación de las ventanas de cálculo de las medias horarias (Choi et al. 2005; Stankov et al. 2010). En consecuencia, la implementación en tiempo real debe operar únicamente con los datos disponibles hasta el instante de cálculo.

Por otro lado, una limitación adicional corresponde a la dependencia de índices estimados en otros observatorios, particularmente el índice K_p, cuyo cálculo se basa en el uso de una red de 13 observatorios de carácter subauroral, ubicados aproximadamente entre los 40° y 55° de latitud geomagnética corregida (CGM) (Matzka et al. 2021). Esta condición difiere del contexto geomagnético del Observatorio de Fúquene, por lo cual su utilización como referencia operativa para la estimación del índice K local no se consideró adecuada, ya que podría introducir sesgos asociados a dinámicas ionosféricas y magnetosféricas propias de otras latitudes. Bajo este criterio, se descartó además la dependencia de servicios externos o APIs que suministraran índices globales.

Bajo estas consideraciones, el sistema desarrollado se estructuró tomando como base el enfoque de cálculo del índice K operativo propuesto para el Centro Geofísico de Dourbes del Royal

Meteorological Institute (RMI) (Stankov et al. 2010). De esta manera, se definió un esquema de cálculo operativo basado en una secuencia de etapas que incluye la adquisición y verificación de los datos de entrada, la depuración básica de la señal, la estimación de una curva diaria tranquila (*Quiet Day Curve*, *QDC*) como aproximación de la variación solar regular (S_R) (Stankov et al. 2010; Takahashi et al. 2001; Matzka et al. 2021), el cálculo de la serie residual en ventanas trihorarias deslizantes, la determinación de la amplitud de las perturbaciones geomagnéticas y su posterior conversión a un valor del índice K mediante los límites locales definidos para FUQ. Adicionalmente, se incorporaron criterios de control de calidad asociados a cada valor de K calculado en tiempo casi real, orientados a evaluar la suficiencia y continuidad de los datos empleados en cada ventana de análisis.

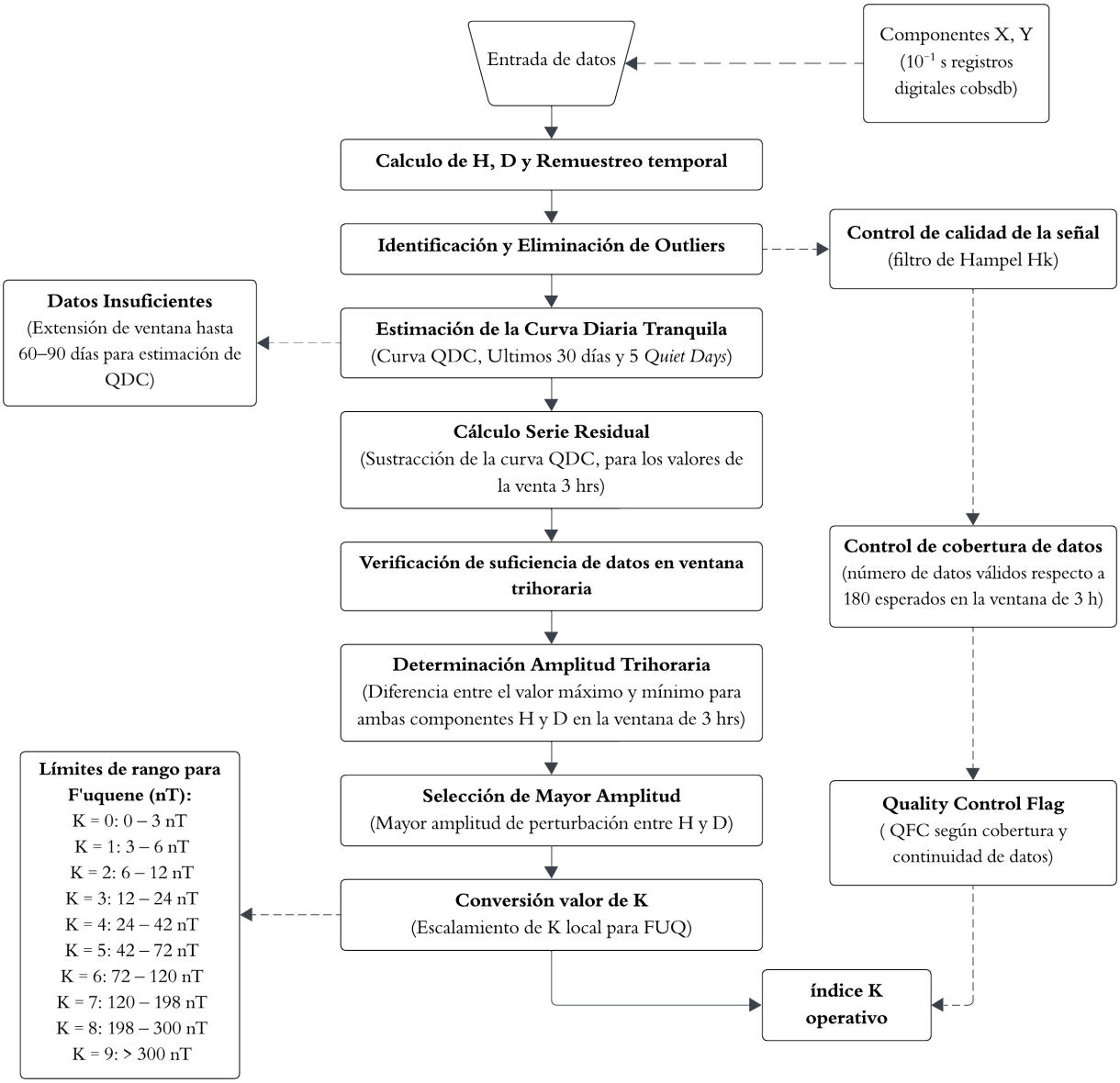


Figura 41: Esquema del flujo metodológico implementado para la estimación del índice K local en tiempo casi real (NRT) en el Observatorio Geomagnético de Fúquene.

3.4.2.2 Adquisición y remuestreo de datos

El proceso de cálculo del índice K en tiempo casi real inicia con la adquisición de los datos de las componentes magnéticas provenientes del Observatorio Geomagnético de Fúquene (FUQ). El observatorio cuenta actualmente con registros de las componentes X, Y y Z del campo magnético con una resolución temporal de una décima de segundo (1 Hz), adquiridos mediante un variometro *LEMI-025* y transmitidos en tiempo casi real a través de internet satelital. Estos datos son recolectados y gestionados mediante un sistema automatizado de adquisición basado en *MagPy*, *MARTAS* y *MARCOS* (Alva Carmona et al. 2025; Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC 2026; Leonhardt et al. 2025). Esta alta resolución temporal permite capturar adecuadamente las variaciones rápidas del campo magnético.

A partir de las componentes cartesianas X y Y, se calcula la componente horizontal H Ecuación (5) y la declinación D Ecuación (6), las cuales son empleadas como variables principales en la estimación del índice K, debido a su sensibilidad a perturbaciones del campo magnético. Estas componentes constituyen la base para el análisis de la actividad geomagnética local en el esquema de cálculo adoptado (Choi et al. 2005; Stankov et al. 2010).

Dado que el índice K se define sobre intervalos trihorarios y emplea como entrada series temporales con resolución uniforme, y considerando además criterios de eficiencia computacional asociados al sistema de procesamiento, los datos son sometidos a un proceso de remuestreo mediante promedios simples, mediante el cual se agregan a una resolución temporal de un minuto.

La serie resultante a resolución minutal constituye el insumo principal para las etapas de depuración, estimación de la variación solar regular y cálculo de la amplitud geomagnética dentro de ventanas trihorarias deslizantes.

3.4.2.3 Depuración y control de calidad de la señal

Posteriormente, la serie temporal resultante del proceso de adquisición y remuestreo fue sometida a una etapa de depuración y control de calidad, orientada a detectar observaciones anómalas y reducir la influencia de picos espurios y valores atípicos sobre el cálculo del índice K operativo.

Para esta etapa se empleó, de manera similar al cálculo histórico del índice K, el filtro de Hampel (H_k) como herramienta para el tratamiento de valores anómalos, tales como picos espurios y *outliers*, permitiendo su identificación y depuración. Este tipo de observaciones representa desviaciones abruptas respecto al comportamiento local de la muestra, las cuales pueden degradar y alterar la señal.

El filtro de Hampel (H_k) pertenece al grupo de filtros basados en decisiones y emplea una ventana móvil w_k^K, centrada en la observación x_k, con un ancho fijo determinado por K. Para cada ventana se calcula la mediana local como valor de referencia robusto frente a datos atípicos, y además se utiliza la Desviación Absoluta Mediana (MAD) como medida robusta de dispersión de la señal, la cual resulta particularmente adecuada en contextos reales de adquisición de datos NRT (Pearson et al. 2016; Elamir 2012).

Con base en la mediana local de la ventana y en la Desviación Absoluta Mediana (MAD), el filtro de Hampel adopta la regla de decisión descrita en la Ecuación (27), donde y_k corresponde al valor filtrado y t al umbral de decisión. De esta manera, cuando la diferencia absoluta entre la observación central y la mediana local supera el umbral definido a partir de la dispersión robusta de la ventana, el dato es clasificado como atípico y sustituido por la mediana local. En caso contrario, se conserva el valor original (Pearson et al. 2016; Elamir 2012).

En la implementación en tiempo casi real del índice K operativo, el filtro se aplicó sobre la serie con el fin de mitigar la presencia de picos espurios o valores anómalos aislados antes de la estimación de la curva diaria tranquila y del cálculo de la amplitud trihoraria. La serie resultante de esta etapa de depuración constituyó la base para la estimación de la curva diaria tranquila (*Quiet Day Curve*, QDC) y para las etapas posteriores del cálculo del índice K operativo.

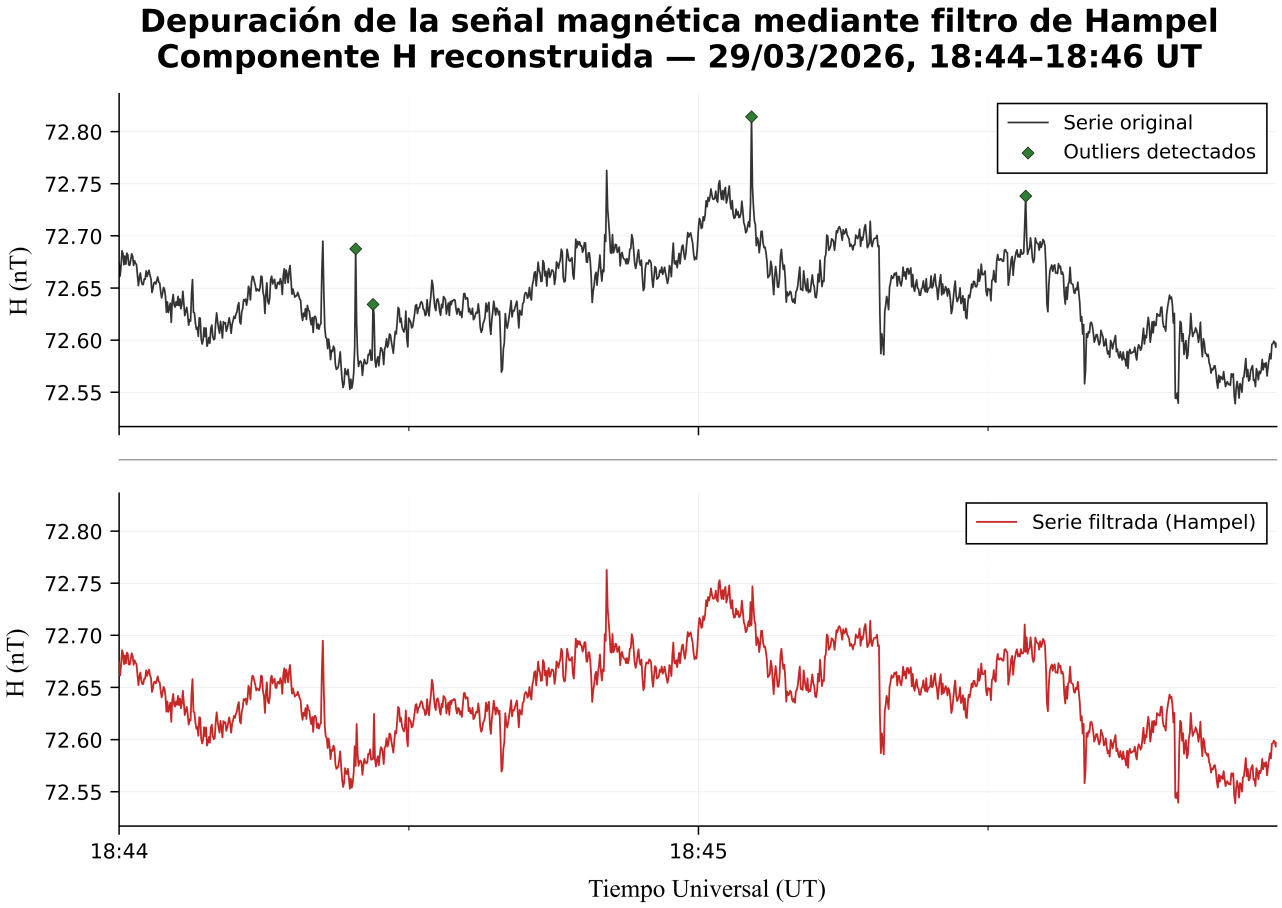


Figura 42: Ejemplo de depuración de la señal magnética de la componente H mediante la aplicación del filtro de Hampel en una ventana temporal de una hora. En el panel superior se muestra la serie original con los valores atípicos detectados, mientras que en el panel inferior se presenta la serie filtrada, en la cual se han corregido los picos espurios.

3.4.2.4 Estimación de la curva diaria tranquila y cálculo de la serie residual

Una vez completada la etapa de depuración y control de calidad de la señal, en el método original de *Linear Elimination* del FMI se propone la estimación de la curva de variación

solar regular (S_R). Sin embargo, este procedimiento presenta una limitación importante para su implementación en tiempo casi real, dado que requiere información futura, al menos de un día posterior al instante de análisis, para su estimación, debido a que las medias horarias se calculan a partir de ventanas L de longitud variable (Choi et al. 2005; Stankov et al. 2010).

En consecuencia, el enfoque de cálculo del índice K operativo propuesto por el Centro Geofísico de Dourbes del Royal Meteorological Institute (RMI) plantea la estimación de las no-variaciones K a partir de una curva diaria tranquila (*Quiet Day Curve*, QDC), empleada como aproximación de la curva de variación solar regular (S_R), siguiendo lo descrito por (Stankov et al. 2010; Takahashi et al. 2001; Matzka et al. 2021).

Originalmente, el enfoque propuesto por el Centro Geofísico de Dourbes plantea el uso de un intervalo de 27 días inmediatamente anteriores al instante de cálculo. No obstante, esta aproximación supone una limitación en el caso de FUQ, debido a la intermitencia observada en las series de H y D, particularmente durante el mes de febrero. Por esta razón, en el presente trabajo se adoptó inicialmente un intervalo de cálculo de 30 días, dentro del cual se seleccionan los 5 días con menor actividad geomagnética (*Quiet Days*). Sin embargo, cuando los *Quiet Days* obtenidos en este primer intervalo resultan insuficientes, la búsqueda puede extenderse a intervalos de 60 o 90 días previos.

La selección de los días geomagnéticamente tranquilos *Quiet Days* se realiza mediante el cálculo del parámetro δH_i, el cual representa una medida de la variabilidad promedio del campo magnético a partir de ventanas móviles de 24 horas, dentro de las cuales se estima el promedio de las diferencias absolutas minuto a minuto de las componentes H y D, permitiendo determinar el nivel de actividad magnética diaria. De esta manera, los días con menores valores de δH_i son considerados como los más tranquilos y son seleccionados para la construcción de la curva diaria tranquila (QDC) (Love et al. 2009).

$$\delta H_i = \frac{1}{1440} \sum_{m=1}^{1440} |H_{i+m} - H_{i+m-1}| \tag{67}$$

Una vez construidas las curvas candidatas a partir de los *Quiet Days*, estas son evaluadas frente a la señal observada mediante el cálculo del error cuadrático medio (*Root Mean Square Error*, $RMSE$). Este parámetro estima la diferencia proemdio entre la serie observada H_i y la curva estimada QDC, considerando a N como en número total de observaciones en el intervalo analizado. De este modo, la curva diaria tranquila adoptada corresponde a aquella que mínima el valor de $RMSE$, constituyendo la mejor aproximación a la variación solar regular.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (H_i - QDC)^2} \tag{68}$$

Finalmente, la curva diaria tranquila (QDC) adoptada se sustrajo de la serie depurada, obteniendo así una serie residual que representa las perturbaciones geomagnéticas remanentes, o *K-variations*. Esta serie es empleada posteriormente para la determinación de la amplitud trihoraria y su conversión al valor del índice K operativo.

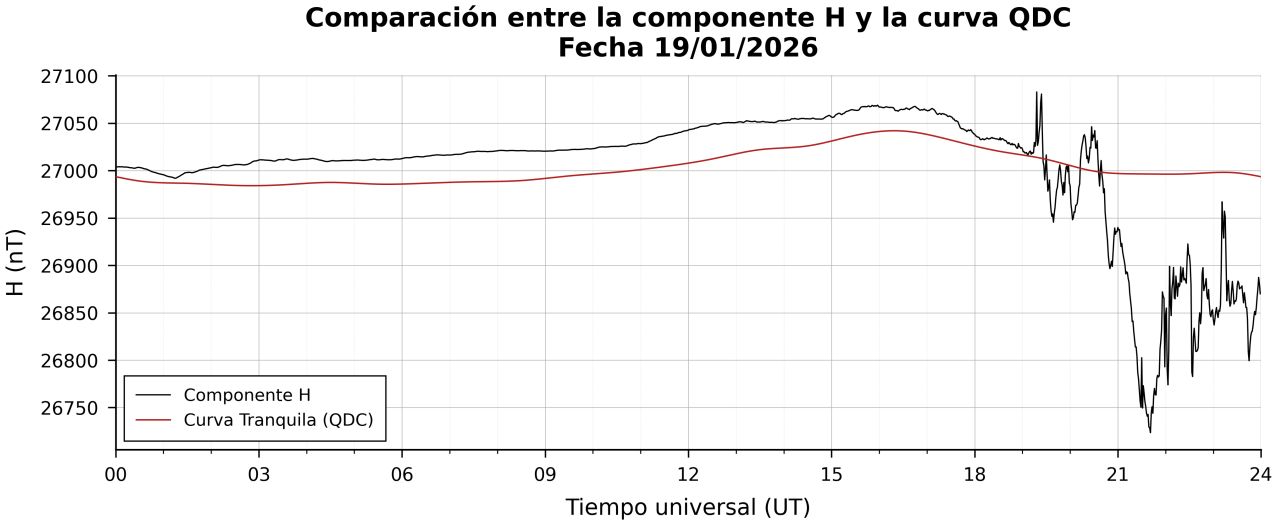


Figura 43: Comparación entre la componente horizontal H observada y la curva diaria tranquila (QDC) estimada para el día 19/01/2026. La QDC representa la aproximación de la variación solar regular del campo geomagnético, mientras que la señal observada incluye tanto la variación regular como las perturbaciones geomagnéticas.

3.4.2.5 Verificación de suficiencia de datos en ventana trihoraria

Posteriormente, la serie residual obtenida fue sometida a un proceso de control de calidad, con la finalidad de verificar la suficiencia de datos dentro de cada ventana trihoraria de cálculo. Esto con el propósito de garantizar que la estimación del índice K operativo (*nowcast*) se realice a partir de una base de datos adecuada y continua, y que, en consecuencia, el valor obtenido sea lo más cercano posible al valor definitivo del índice K.

De esta manera, y siguiendo lo establecido por Stankov et al. (2010), es necesario integrar un sistema de control de calidad (*Quality Control*, *QC*) capaz de evaluar la información disponible en el conjunto de datos de entrada, específicamente el número de observaciones válidas dentro de cada ventana de análisis. Este criterio permite determinar si la amplitud geomagnética puede ser estimada de manera confiable y, por ende, si el valor del índice K operativo es representativo.

El objetivo de esta etapa es asegurar la consistencia y completitud de los datos, teniendo en cuenta que la presencia de vacíos o discontinuidades dentro de la ventana trihoraria implica un deterioro en la calidad del resultado. En este sentido, tanto la cantidad de datos faltantes como su distribución temporal dentro del intervalo influyen directamente en la confiabilidad del índice estimado.

Por tanto, el sistema de control de calidad adoptado se desarrolló con base en la metodología propuesta por Stankov et al. (2010), mediante la definición de indicadores de calidad denominados *Quality Check Flags* (*QCF*), los cuales se establecen en función de la cantidad de registros válidos disponibles dentro de la ventana trihoraria. De este modo, el nivel de confianza asociado al índice K operativo depende directamente de la cobertura de datos.

En el caso del Observatorio Geomagnético de Fúquene (FUQ), el sistema *Quality Check Flags* (*QCF*) se definió a partir de la evaluación de la cobertura efectiva de registros en la ventana

móvil de tres horas empleada para el cálculo del índice K. Considerando que para cada ventana trihoraria se esperan 180 registros a resolución de un minuto, se definió como condición de máxima calidad la disponibilidad del 100 % de los datos, es decir, 180 registros completos ($QCF = 0$).

Asimismo, se establecieron distintos niveles de calidad en función del porcentaje de cobertura: coberturas entre el 83 % y el 99 % de los registros ($QCF = 1$) son consideradas aceptables, mientras que coberturas inferiores al 83 % ($QCF = 2$) corresponden a datos de baja calidad. Finalmente, en casos de insuficiencia severa de información, no se genera el índice K operativo, dado que no se cumplen las condiciones mínimas para una estimación confiable.

Tabla 3: Clasificación del indicador de calidad *Quality Check Flags* (*QCF*) en función de la cobertura de datos en la ventana trihoraria empleada para el cálculo del índice K operativo en FUQ.

QCF	**Cobertura (%)**	**Datos válidos**	**Descripción**
0	100 %	180	Condición óptima. Datos completos y continuos en la ventana trihoraria.
1	83 % – 99 %	150 – 179	Calidad aceptable. Datos suficientes para una estimación confiable del índice K.
2	< 83 %	< 150	Baja calidad. El resultado presenta menor confiabilidad debido a la insuficiencia de datos.
–	Insuficiente	–	No se calcula el índice K por falta severa de datos en la ventana de análisis.

La clasificación presentada en la Tabla 3 permite asociar un nivel de confianza al valor del índice K operativo, en función de la disponibilidad de datos dentro de cada ventana de análisis.

3.4.2.6 Determinación de la amplitud trihoraria y asignación del índice K

Una vez establecida la calidad mínima de la ventana de análisis, se procedió a la determinación de la amplitud de las perturbaciones geomagnéticas asociadas a las *K-variations*, a partir de la serie residual obtenida.

La estimación de la amplitud de la perturbación geomagnética se mantuvo como parte del esquema general del método FMI original. De esta manera, una vez definidos los bloques trihorarios de cada ventana móvil horaria, se procedió al cálculo de la amplitud de la perturbación mediante el método simple de máximo–mínimo, el cual consiste en determinar la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de las componentes H y D dentro de cada bloque de tres horas, de acuerdo con la Ecuación (59). (Sucksdorff et al. 1991; Stankov et al. 2010).

$$A_H = \text{máx}(H_{\text{res}}) - \text{mín}(H_{\text{res}}) \tag{69}$$

$$A_D = \text{máx}(D_{\text{res}}) - \text{mín}(D_{\text{res}}) \tag{70}$$

$$A = \text{máx}(A_H, A_D) \tag{71}$$

Como se determinó anteriormente para el índice K histórico, la intensidad de las perturbaciones geomagnéticas depende fuertemente de la latitud magnética en la que se localiza el observatorio. En consecuencia, resulta necesario definir una escala de límites K específica para FUQ, adoptando un valor de límite inferior $K9 = 300$ nT. De este modo, fue posible escalar los límites locales de K a partir de la escala cuasilogarítmica de Niemegk, siguiendo la Ecuación (61).

Por último, una vez estimadas las amplitudes de cada bloque trihorario y establecidos los límites locales para FUQ, se procedió a la asignación de los valores de K operativo en tiempo casi real. Para ello, la amplitud obtenida en cada bloque fue comparada con la tabla escalada de límites locales derivada de Niemegk, presentada en la Tabla 2, asignando el valor de K correspondiente al rango en el cual se ubicó la amplitud.

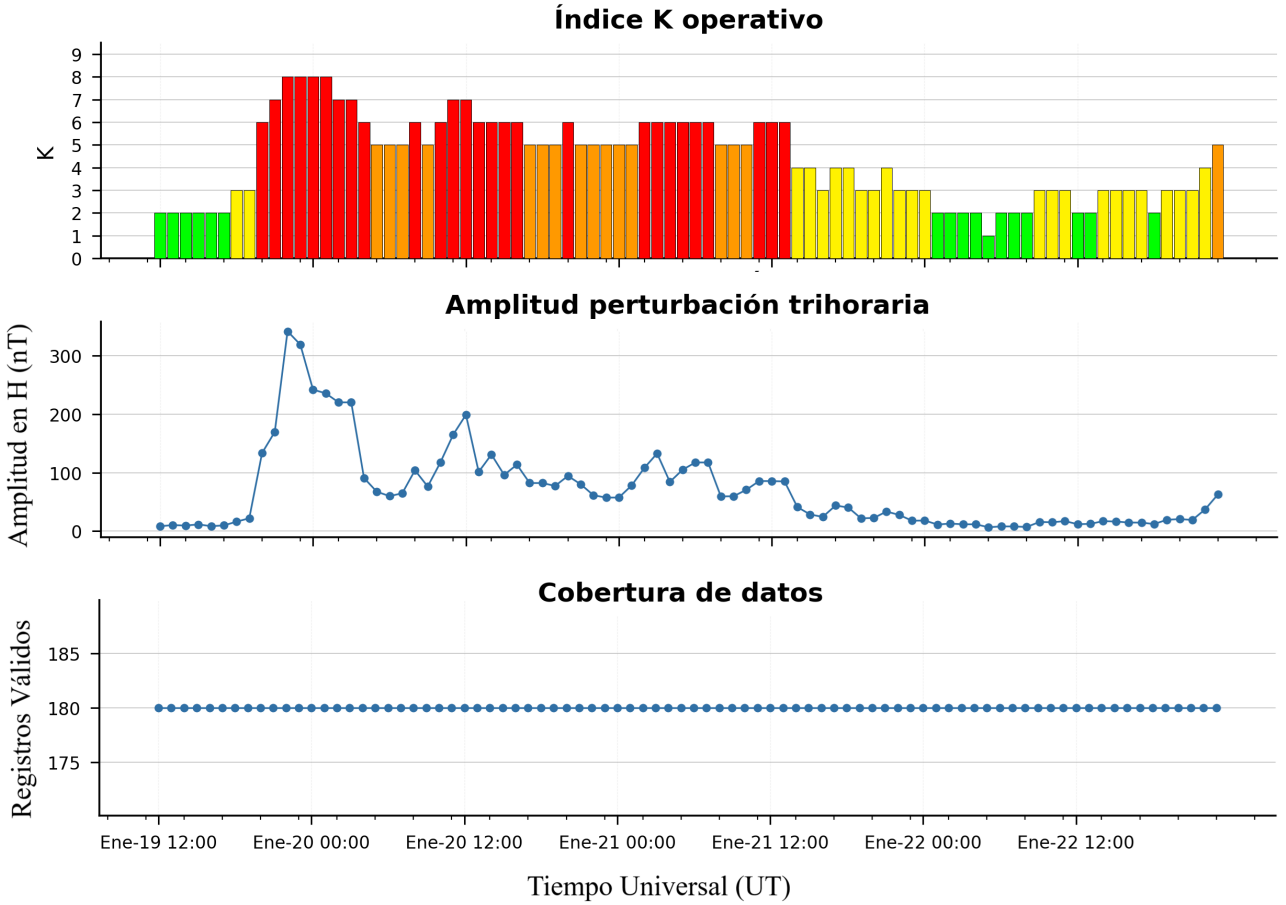


Figura 44: Comportamiento del índice K operativo en tiempo casi real para el Observatorio Geomagnético de Fúquene (FUQ), junto con la amplitud de la perturbación geomagnética trihoraria y la cobertura de datos en cada ventana de análisis para el periodo comprendido entre el 19/01/2026 y el 22/01/2026.

De esta manera, el sistema implementado permita la estimación del índice K operativo horario en tiempo casi real, adoptando un procedimiento que conserva la base conceptual del método *Linear Elimination* del FMI, pero introduciendo adoptaciones necesarias para su aplicación en un contexto NRT. En este sentido, el sistema garantía resultados consistentes y confiables basados en revisiones de control de calidad, permitiendo su uso en aplicaciones operativas y de monitoreo de clima espacial.

3.5. Plataforma Web de Visualización

3.5.1. Arquitectura general del Sistema (SIAPV)

La plataforma web de visualización y consulta de datos geomagnéticos implementada para el Observatorio Geomagnético de Fúquene fue desarrollada como un sistema integrado de adquisición, procesamiento y visualización (SIAPV), orientado a la publicación de datos en tiempo casi real de las variables geomagnéticas medidas por el observatorio y de los índices derivados de estas.

En este contexto, el flujo de la información comienza en el Observatorio Geomagnético de Fúquene, donde se lleva a cabo la adquisición automática de las componentes asociadas al CMT. Específicamente, los equipos *LEMI-025* y *GSM-19* cumplen con la tarea de adquirir en tiempo real las componentes X, Y y Z, con una resolución temporal de una décima de segundo (1 Hz), y el campo escalar F con resolución al minuto, respectivamente (Alva Carmona et al. 2025).

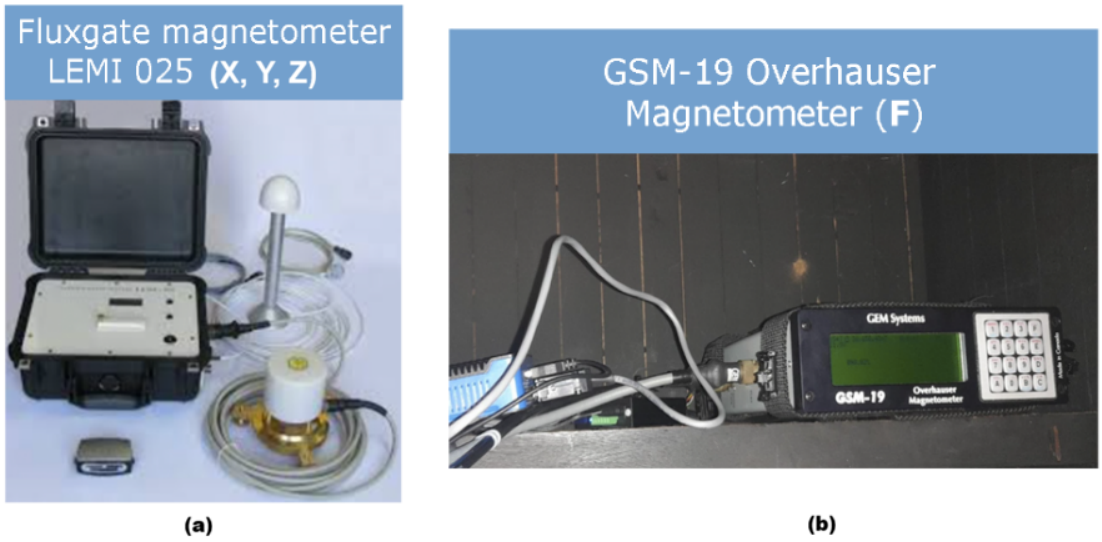


Figura 45: Equipos utilizados para la medición del campo geomagnético en FUQ. La figura (a) corresponde al magnetómetro LEMI-025 de resolución temporal 1 Hz, empleado para registrar las componentes cartesianas X, Y y Z, mientras que la figura (b) muestra el magnetómetro GSM-19 de resolución temporal 1 minuto, utilizado para medir el campo escalar F. Modificado de (Alva Carmona et al. 2025)

Gracias a las implementaciones realizadas en 2025, el observatorio cuenta con acceso a internet satelital y con un sistema autónomo de energía solar que abastece las instalaciones (Instituto

Geográfico Agustín Codazzi - IGAC 2026), lo cual permite la transmisión de datos en tiempo casi real hacia la infraestructura de procesamiento remoto. Bajo este esquema, los datos son transmitidos desde el computador interno del sistema variométrico hacia el servidor remoto mediante el protocolo de mensajería MQTT, implementado a través de MARTAS (*MagPy's Automated Realtime Acquisition System*) (Leonhardt et al. 2025). Esta herramienta facilita la comunicación en tiempo casi real entre el observatorio y el servidor a través de un sistema de autenticación basado en usuario/contraseña, el cual permite el acceso controlado a la unidad de adquisición mediante una lista de credenciales autorizadas.

La infraestructura de procesamiento remoto se encuentra alojada en una instancia (*Virtual Machine*, VM) provista por Oracle Cloud Infrastructure (OCI), basada en procesadores Ampere de arquitectura ARM. Este tipo de infraestructura se caracteriza por ofrecer configuraciones flexibles de núcleos y memoria, permitiendo ajustar los recursos computacionales de acuerdo con la demanda de trabajo y evitando el desperdicio de recursos, lo que resulta adecuado para aplicaciones orientadas a servicios web (Oracle 2026). En este caso, dicha configuración permitió mantener de manera estable los procesos de recepción, almacenamiento y procesamiento en tiempo casi real de los datos geomagnéticos de FUQ.

Como parte de la arquitectura del sistema, se integra el sistema MARCOS (*MagPy's Automated Realtime Collector and Organization System*) (Leonhardt et al. 2025), el cual actúa como el componente de gestión, almacenamiento y organización de los datos dentro de la VM o servidor remoto. Este sistema se encarga de recibir la información transmitida a través del protocolo MQTT, estructurarla y almacenarla en la base de datos "*cobsdb*", constituyendo un elemento clave en la integración del flujo de datos dentro del sistema SIAPV, garantizando la continuidad operativa, así como el acceso, organización y centralización de la información adquirida.

De acuerdo con la anterior, la información recibida y procesada es almacenada en la base de datos de tipo relacional denominada "*cobsdb*", la cual actúa como el repositorio de información central del SIAPV, almacenando distintos tipos de información geomagnética, incluyendo series temporales, las componentes del CMT, índices operativos y parámetros asociados al procesamiento.

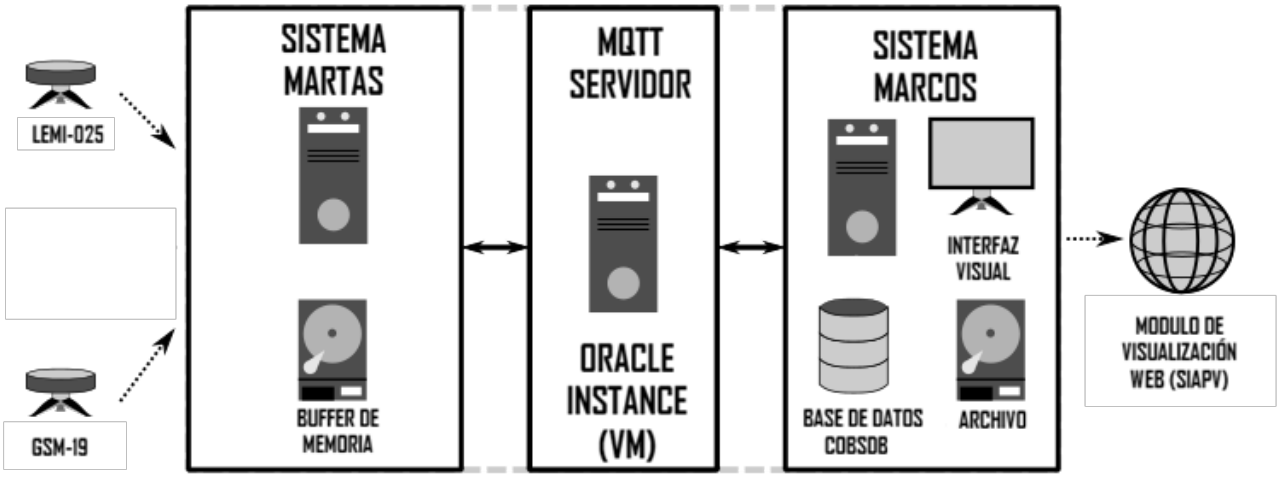


Figura 46: Esquema del flujo de datos desde los sensores (LEMI-025, GSM-19) hacia el servidor remoto y el sistema de recolección MARCOS a través del protocolo MQTT del sistema de adquisición MARTAS. Modificado de (Leonhardt et al. 2025)

3.5.2. Backend de procesamiento y servicios

Una vez definida la estructura general del SIAPV, sobre la infraestructura remota alojada en la VM de Oracle se implementó el backend, orientado a gestionar la consulta, el procesamiento y la exposición de datos mediante servicios web, integrando la base de datos, los módulos de cálculo y la interfaz de visualización. En este sentido, esta capa del SIAPV constituye el núcleo del procesamiento de datos dentro del sistema.

En particular, esta capa fue desarrollada empleando el framework de Python *FastAPI*, el cual resulta una herramienta idónea para automatizar procesos de backend dentro del desarrollo de aplicaciones web, permitiendo ejecutar rutinas de procesamiento y exponer los resultados obtenidos mediante *endpoints* HTTP (Lubanovic 2023; X. Wu 2024).

Bajo este esquema, se implementó una capa de servicios orientada a la consulta, procesamiento y exposición de la información geomagnética. Por medio de esta herramienta, el backend actúa como intermediario entre el sistema de almacenamiento MARCOS y el módulo web de visualización, accediendo directamente a la base de datos *cobsdb*, desde donde recupera la información de las series temporales, así como los productos derivados asociados al procesamiento.

Adicionalmente, el backend se encarga de ejecutar rutinas de procesamiento, incluyendo la lectura del archivo correspondiente a la línea base (`.bvl`), obtenido a partir de las mediciones absolutas del CMT adquiridas con el Teodolito Magnetómetro DI-flux y procesadas mediante el módulo de procesamiento de mediciones DI-flux, con el fin de determinar los valores base y la línea base en el software *MagPy* (Alva Carmona et al. 2025; Leonhardt et al. 2025).



Figura 47: Teodolito Magnetómetro DI-flux utilizado en el Observatorio Geomagnético de Fúquene (FUQ) para la adquisición de mediciones absolutas del campo magnético terrestre (CMT). Modificado de (Alva Carmona et al. 2025)

Esta línea base tiene un carácter preliminar y corresponde a las mediciones del mes inmediatamente anterior, asumiendo un valor promedio para cada variable X, Y y Z. De esta manera, los valores obtenidos X_0, Y_0 y Z_0 permiten reconstruir las series temporales de cada componente a partir de las mediciones de la variación del CMT (x, y, z), garantizando que las series de tiempo corresponda de la mejor manera con actividad geomagnética local registrada.

$$X(t) = X_0 + x(t) \tag{72}$$
$$Y(t) = Y_0 + y(t) \tag{73}$$
$$Z(t) = Z_0 + z(t) \tag{74}$$

Asimismo, el backend ejecuta las rutinas necesarias para la derivación de los índices geomagnéticos K y Dst operativos en tiempo casi real, aplicando las metodologías descritas en las secciones 3.4.2 y 3.3.2, incluyendo el cálculo de las curvas SR y QDC, así como la asignación de flags de control de calidad. Una vez procesada la información, los resultados se exponen mediante endpoints HTTP, lo cual permite que la interfaz de visualización acceda de manera eficiente a los datos y productos generados, alojados en la base de datos `cobsdb`.

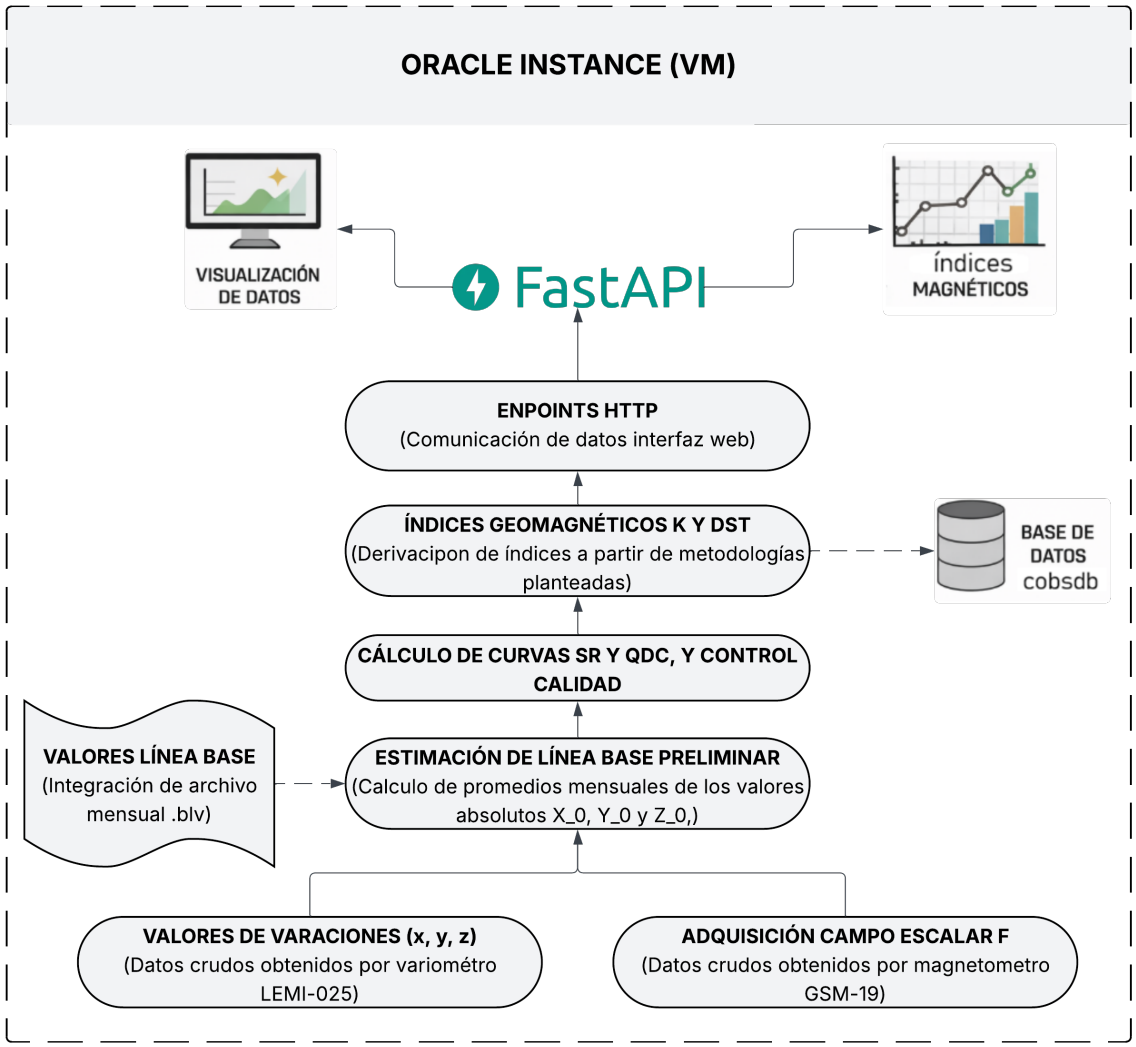


Figura 48: Esquema de la arquitectura interna del backend de SIAPV implementado en la instancia de Oracle Cloud (VM). Se muestra el flujo de datos desde los sensores LEMI-025 y GSM-19, pasando por la estimación preliminar de la línea base y la integración de las variaciones geomagnéticas, hasta el cálculo de las curvas SR y QDC, control de calidad, derivación de los índices K y Dst, exposición mediante endpoints HTTP de FastAPI. Modificado de (Alva Carmona et al. 2025)

3.5.3. Módulo de Visualización

La implementación de una plataforma web para la actividad geomagnética en tiempo real es una necesidad que ha sido reconocida por la comunidad científica internacional. Sistemas como el centro de prediccion de clima espacial de la NOAA, el centro europeo de clima espacial de la agencia espacial europea (ESA) y el Servicio de Clima Espacial Mexicano (SCiESMEX) son algunos ejemplos de plataformas de visualización en línea, que permiten a investigadores y al público general poder consultar la actividad geomagnética en tiempo real (Vargas-Domínguez et al. 2026). Bajo este contexto y teniendo en cuenta la arquitectura expuesta en la sección anterior (3.5.1), se realiza una plataforma web con las siguientes secciones:

3.5.3.1 Datos en tiempo real

Siendo la sección principal de la plataforma, presenta las componentes del campo magnéticos con la línea base obtenidas mediante la ecuación 74, que son adquiridos desde el magnetómetro LEMI-025 y el magnetómetro escalar GSM-19. Cada grafica presenta el valor mas reciente obtenido y permite configurar la cantidad de datos que se quieren visualizar bajo 5 ventanas de datos: 50, 150, 300, 600 y 1000, que corresponden en tiempo a aproximadamente un minuto y medio de datos.

Adicionalmente, se presentan las series derivadas del procesamiento de los datos en tiempo casi real, como la serie del campo interno $I(t)$, el campo externo $E(t)$ y la variación solar quieta Sq. Estas dos últimas tienen una resolución al minuto, con una ventana de visualización configurable que varía en un periodo de 1 hora a 7 días de visualización.

3.5.3.2 Índices geomagnéticos

Esta sección presenta el resultado del cálculo de los índices en NRT. El primero corresponde a la serie de perturbación $Dist$ y a la perturbación normalizada por latitud $Dlat$, seguidamente está el índice K. Debajo de estas series temporales se incluye dos velocímetros uno para $Dlat$ y otro para K, los cuales mostraran el valor actual del índice y la escala del estado de la tormenta según Gonzalez et al. (1994) para el caso del índice $Dlat$, por otro lado se sigue la escala de la NOAA para tormentas geomagnéticas para el índice K.

3.5.3.3 Noticias y actividad reciente

Se incorpora un modulo de noticias sobre el clima espacial, el cual consulta periódicamente fuentes internacionales mediante un API, se filtrarán las noticias por relevancia y se va a priorizar las que se relacionen con tormentas geomagnéticas, erupciones solares y eyecciones de masa coronal. Cada noticia presentara un resumen y el enlace a la fuente original.

3.5.3.4 Fuentes externas de referencia

En esta sección se incluyen enlaces directos a fuentes externas que monitorean la actividad geomagnética global y permiten comparar los resultados. Se organizan en tres categorías: índices K, índices Dst o $Dist$, y por último enlaces a observatorios geomagnéticos.

3.5.3.5 Multimedia

Este panel de multimedia presenta un contenido explicativo relacionado con el campo geomagnético y el clima espacial, explicando ciertos conceptos fundamentales sobre el monitoreo geomagnético.

3.5.3.6 Descarga de datos

Por último está el módulo de descargas, el cual permite consultar el registro de las variables disponibles en la plataforma. Asimismo, ofrece la posibilidad de descargar la información que se requiera bajo los formatos CSV, JSON o IAGA-2002, para el rango de fechas seleccionadas, generando una vista previa de los datos seleccionados, lo que permitiendo verificar su contenido antes de descargarlo.

4. Análisis y Resultados

4.1. Resultado de la adquisicion de datos en NRT

Tras la implementación de la arquitectura de software libre construida por (Leonhardt et al. 2026), permitiendo establecer un sistema de adquisición continua entre los equipos del observatorio geomagnético de Fúquene y el servidor que va a recibir esta información. Este sistema permite integrar los datos de los dos sensores ya mencionados, centralizando así la recepción mediante el módulo collector de MARTAS.

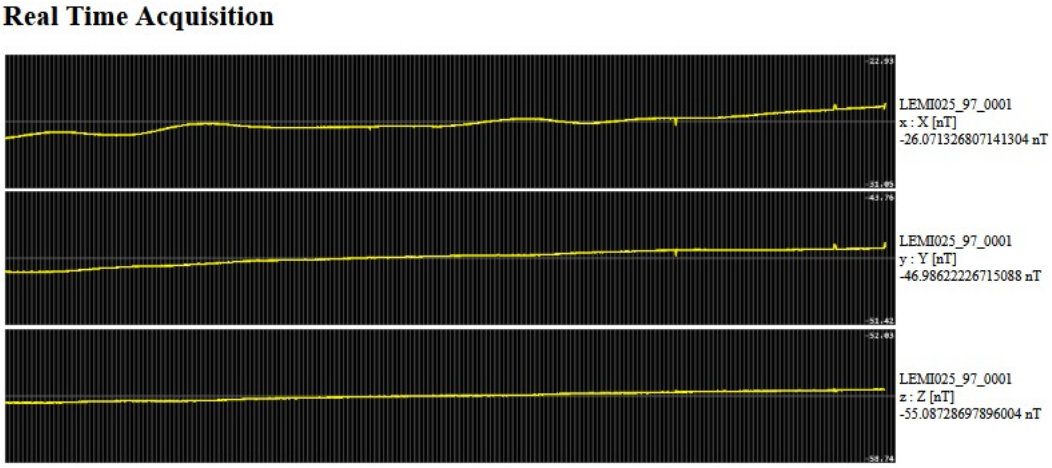


Figura 49: Sistema de adquisición de MARTAS, implementado para los sensores LEMI y GSM del observatorio geomagnético de Fúquene. Se puede evidenciar el registro de algunas componentes magnéticas x, y, z obtenidas mediante el sensor LEMI.

En la figura 49, es el resultado de la adquisición mediante el módulo de MARTAS, el cual adquiere la información y la distribuye mediante servicios de red internos, en los que se usan puertos del sistema específicos. En este caso el puerto 8080 permite canalizar los datos hacia otros módulos del sistema.

Se maneja la adquisición por servicios de red y puertos, dado que permite separar esta función de otros procesos como el almacenamiento o la visualización, facilitando el uso de la arquitectura modular descrita anteriormente. Este enfoque garantiza una adquisición de datos continuos, estables y con la posibilidad de escalarlos, asegurando que la integridad de los datos capturados por los sensores pueda ser transmitida a otros apartados que se requieran. Con esto se establece una base solida para el procesamiento de los datos.

Una vez establecido el módulo de MARTAS, el protocolo MQTT se va a encargar de enviar estos datos mediante un bróker bajo el puerto 1883 hacia el modulo MARCOS el cual permite visualizar, consultar y almacenar la información en una base de datos.

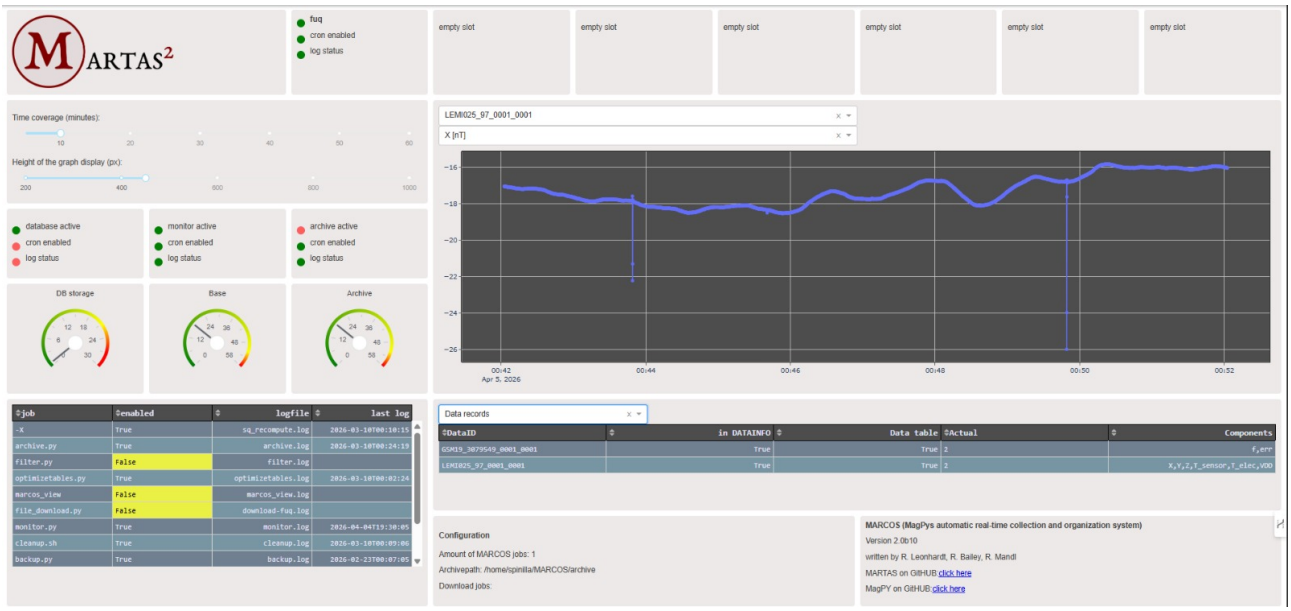
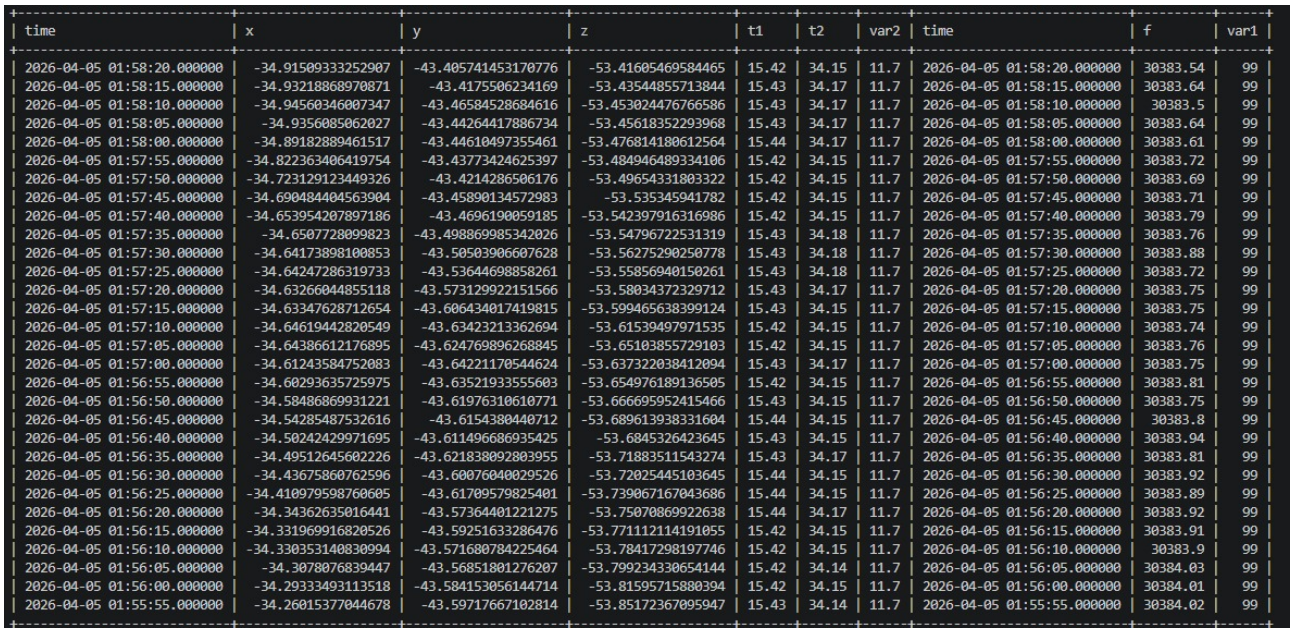


Figura 50: Sistema de recolección de MARCOS implementado para los sensores LEMI y GSM del observatorio geomagnético de Fúquene. Se puede visualizar los metadatos de la información recolectada mediante un framework Dash.

En la figura 50, se presenta el resultado de la recolección de los datos del observatorio geomagnético de Fúquene, el cual despliega una visualización en un aplicativo web basado en el framework Dash. Este aplicativo se ejecuta en el sistema mediante el puerto 8050, permitiendo una interacción con los datos en tiempo real.

El resultado de este proceso se basa en la recolección continua de los datos. En el caso del observatorio de Fúquene, se generan a una resolución de 10 muestras por segundo, obteniendo un total de 864,000 datos y aproximadamente 67 megabyte de registros al día. Estos se almacenarán en una base de datos que facilitará el acceso a la información, permitiendo que múltiples usuarios puedan consultar los datos de manera paralela. Con ello se simplifica la detección de anomalías en la información, se generan análisis preliminares y, por último se validan y procesan los datos adquiridos.



time	x	y	z	t1	t2	var2	time	f	var1
2026-04-05 01:58:20.000000	-34.91509333252907	-43.405741453170776	-53.41605469584465	15.42	34.15	11.7	2026-04-05 01:58:20.000000	30383.54	99
2026-04-05 01:58:15.000000	-34.93218868970871	-43.4175506234169	-53.43544855713844	15.43	34.17	11.7	2026-04-05 01:58:15.000000	30383.64	99
2026-04-05 01:58:10.000000	-34.94560346007347	-43.46584528684616	-53.453024476766586	15.43	34.17	11.7	2026-04-05 01:58:10.000000	30383.5	99
2026-04-05 01:58:05.000000	-34.9356085062027	-43.44264417886734	-53.45618352293968	15.43	34.17	11.7	2026-04-05 01:58:05.000000	30383.64	99
2026-04-05 01:58:00.000000	-34.89182889461517	-43.44610497355461	-53.476814180612564	15.44	34.17	11.7	2026-04-05 01:58:00.000000	30383.61	99
2026-04-05 01:57:55.000000	-34.822363406419754	-43.43773424625397	-53.484946489334106	15.42	34.15	11.7	2026-04-05 01:57:55.000000	30383.72	99
2026-04-05 01:57:50.000000	-34.723129123449326	-43.4214286506176	-53.49654331803322	15.42	34.15	11.7	2026-04-05 01:57:50.000000	30383.69	99
2026-04-05 01:57:45.000000	-34.690484404563904	-43.45890134572983	-53.535345941782	15.42	34.15	11.7	2026-04-05 01:57:45.000000	30383.71	99
2026-04-05 01:57:40.000000	-34.653954207897186	-43.4696190059185	-53.542397916316986	15.42	34.15	11.7	2026-04-05 01:57:40.000000	30383.79	99
2026-04-05 01:57:35.000000	-34.6507728099823	-43.498869985342026	-53.54796722531319	15.43	34.18	11.7	2026-04-05 01:57:35.000000	30383.76	99
2026-04-05 01:57:30.000000	-34.64173898100853	-43.50503906607628	-53.56275290250778	15.43	34.18	11.7	2026-04-05 01:57:30.000000	30383.88	99
2026-04-05 01:57:25.000000	-34.64247286319733	-43.53644698858261	-53.55856940150261	15.43	34.18	11.7	2026-04-05 01:57:25.000000	30383.72	99
2026-04-05 01:57:20.000000	-34.63266044855118	-43.573129922151566	-53.58034372329712	15.43	34.17	11.7	2026-04-05 01:57:20.000000	30383.75	99
2026-04-05 01:57:15.000000	-34.63347628712654	-43.606434017419815	-53.599465638399124	15.43	34.15	11.7	2026-04-05 01:57:15.000000	30383.75	99
2026-04-05 01:57:10.000000	-34.64619442820549	-43.63423213362694	-53.61539497971535	15.42	34.15	11.7	2026-04-05 01:57:10.000000	30383.74	99
2026-04-05 01:57:05.000000	-34.64386612176895	-43.624769896268845	-53.65103855729103	15.42	34.15	11.7	2026-04-05 01:57:05.000000	30383.76	99
2026-04-05 01:57:00.000000	-34.61243584752083	-43.6422117054624	-53.637322038412094	15.43	34.17	11.7	2026-04-05 01:57:00.000000	30383.75	99
2026-04-05 01:56:55.000000	-34.60293635725975	-43.63521933555603	-53.654976189136505	15.42	34.15	11.7	2026-04-05 01:56:55.000000	30383.81	99
2026-04-05 01:56:50.000000	-34.58486869931221	-43.61976310610771	-53.666695952415466	15.43	34.15	11.7	2026-04-05 01:56:50.000000	30383.75	99
2026-04-05 01:56:45.000000	-34.54285487532616	-43.6154380440712	-53.689613938331604	15.44	34.15	11.7	2026-04-05 01:56:45.000000	30383.8	99
2026-04-05 01:56:40.000000	-34.50242429971695	-43.611496686935425	-53.6845326423645	15.43	34.15	11.7	2026-04-05 01:56:40.000000	30383.94	99
2026-04-05 01:56:35.000000	-34.49512645602226	-43.621838092803955	-53.71883511543274	15.43	34.17	11.7	2026-04-05 01:56:35.000000	30383.81	99
2026-04-05 01:56:30.000000	-34.43675860762596	-43.60076040029526	-53.72025445103645	15.44	34.15	11.7	2026-04-05 01:56:30.000000	30383.92	99
2026-04-05 01:56:25.000000	-34.410979598760605	-43.61709579825401	-53.739067167043686	15.44	34.15	11.7	2026-04-05 01:56:25.000000	30383.89	99
2026-04-05 01:56:20.000000	-34.34362635016441	-43.57364401221275	-53.75070869922638	15.44	34.17	11.7	2026-04-05 01:56:20.000000	30383.92	99
2026-04-05 01:56:15.000000	-34.331969916820526	-43.59251633286476	-53.771112114191055	15.42	34.15	11.7	2026-04-05 01:56:15.000000	30383.91	99
2026-04-05 01:56:10.000000	-34.330353140830994	-43.571680784225464	-53.78417298197746	15.42	34.15	11.7	2026-04-05 01:56:10.000000	30383.9	99
2026-04-05 01:56:05.000000	-34.3078076839447	-43.56851801276207	-53.799234330654144	15.42	34.14	11.7	2026-04-05 01:56:05.000000	30384.03	99
2026-04-05 01:56:00.000000	-34.29333493113518	-43.584153056144714	-53.81595715880394	15.42	34.15	11.7	2026-04-05 01:56:00.000000	30384.01	99
2026-04-05 01:55:55.000000	-34.26015377044678	-43.5971667102814	-53.85172367095947	15.43	34.14	11.7	2026-04-05 01:55:55.000000	30384.02	99

Figura 51: Registros de la base de datos que recolecta la informacion para el observatorio geomagnético de Fúquene, de los sensores LEMI y GSM en tiempo UTC para el día 5 de abril del 2026 .

4.2. Resultados del índice Dst histórico

Para el cálculo de los resultados del índice Dst histórico del Observatorio Geomagnético de Fúquene, se analizaron un total de 561,024 mediciones históricas de la componente H correspondientes al periodo comprendido entre el 01/01/1955 y el 31/01/2018, con una resolución horaria para todo el intervalo de tiempo.

Tabla 4: Resumen de los registros históricos utilizados en la estimación del índice *Dst* local para el Observatorio Geomagnético de Fúquene, discriminados por fuente y período de cobertura.

Fuente	**Período**	**Resolución**	**Registros (h)**
WDC	1957–2015	Horaria	534,720
IGAC	2016–2018	Horaria	26,304
Total registros cargados			561,024
Total valores $Dlat_i$ final			544,465

En la tabla 4 se presenta el número de registros que se usaron para el cálculo de $Dlat_i$ dado que el preprocesamiento de la serie resulto en la eliminación de 16,559 (2.95 %) datos, conservándose 544,465 datos que cumplieron los criterios mencionados en la metodología.

4.2.1. Campo interno I(t)

La estimación del campo interno de la Tierra es el primer paso fundamental de la metodología Love et al. (2009), debido a que permite separar las contribuciones del campo interno de la Tierra de las variaciones que tienen origen externo.

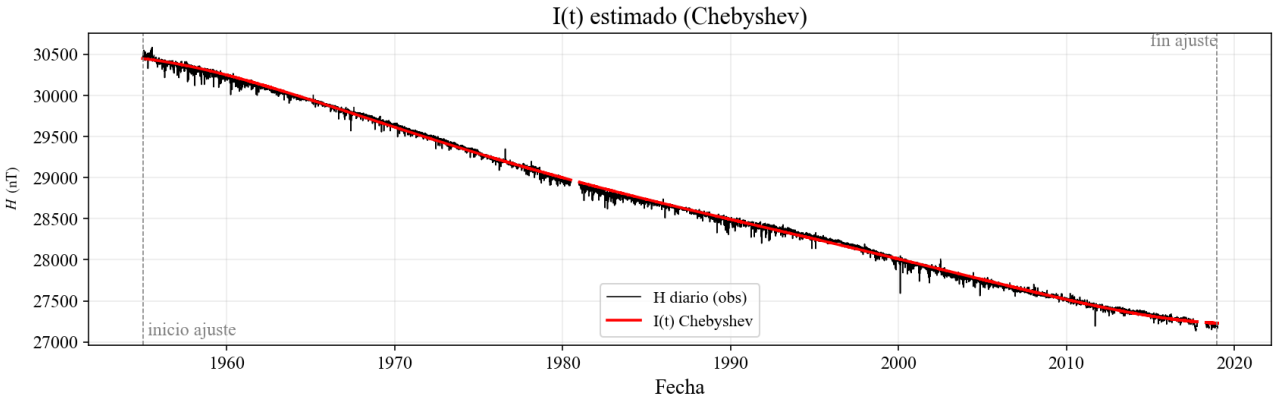


Figura 52: Calculo del campo interno de la tierra $I(t)$ para el observatorio geomagnético de Fúquene en el periodo comprendido de 1955-2018. La línea de color rojo representa el calculo obtenido mediante la ecuación(14) para el campo interno, la línea de color negro representa la componente horizontal obtenida por los datos del WDC y del IGAC, las líneas punteadas representan el inicio y el fin de las series. Se puede evidenciar tendencia negativa de los valores magnéticos registrados durante estos 63 años.

La figura 52 es el resultado del calculo de la serie temporal de $I(t)$, estimada mediante la ecuación(14), en donde se evidencia una tendencia general decreciente a lo largo de período de análisis, pasando de valores cercanos a los 30,400 nT que presentaba al principio de la serie en el año 1955 hasta aproximadamente 27,500 nT al final de la serie en 2018. Esta tendencia representa que aproximadamente los valores han disminuido en 2,900 nT en 63 años, lo cual corresponde a un decrecimiento anual de ~ 47 nT/año.

El comportamiento decreciente se puede llegar a explicar por la ubicación en la que se encuentra el observatorio geomagnético de Fúquene, ya que está situado en una región que llega a tener influencias de la Anomalía del Atlántico Sur (AAS). Esta zona presenta los valores de geomagnetismo más bajos del planeta y una tasa de decrecimiento significativamente mayor quela del promedio global (Courtillot et al. 1988).

Es importante tener una estimación correcta de esta serie, de tal manera que, si se llegara a calcular incorrectamente, puede generar propagaciones directas en la serie del campo externo que afectarían el resultado de la perturbación $Dist_i$.

4.2.2. Campo externo E(t)

La estimación del campo externo es el punto central de la metodología, debido a que contiene todas las variaciones de origen externo a la Tierra.

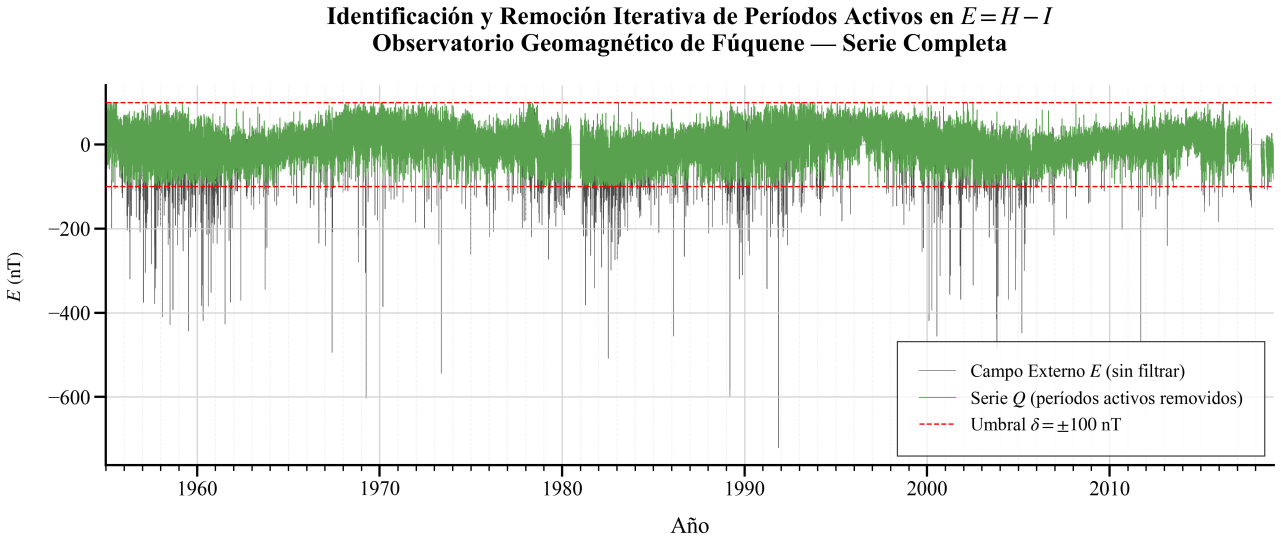


Figura 53: Cálculo del campo externo de la Tierra $E(t)$ para el observatorio geomagnético de Fúquene en el periodo comprendido de 1955-2018. Las líneas de color negro representan el resultado de la ecuación(16), las líneas de color verde representan la serie del campo externo con los periodos activos removidos e interpolados mediante la ecuación(19) y por ultimo las líneas punteadas de color rojo representan el umbral seleccionado de $\delta = 100$ nT. Se evidencia que los periodos extensos que tienen datos faltantes, no se interpolaron para conservar la integridad de la serie.

En la figura 54 se presenta el resultado de la serie E(t) que se cálculo mediante la siguiente ecuación(16),donde se observa que durante los periodos de actividad geomagnética tranquila las amplitudes oscilan entre ±50–70 nT, siguiendo la tendencia de la variación diurna. Durante periodos de alta actividad geomagnética, se evidencian picos que superan los −600nt, estos valores se asocian a grandes tormentas geomagnéticas según la escala de Gonzalez et al. (1994). Un ejemplo de estos valores es la tormenta que sucedió en marzo de 1989.

Por otra parte, se observa el resultado de la serie $Q(t)$, la cual representa la remoción de periodos con alta actividad geomagnética y su posterior interpolación mediante la ecuación (19). En los resultados se observa que toda la serie permanece dentro de los parámetros definidos $\delta = \pm 100$ nT, lo que verifica que se remueven tanto las perturbaciones de alta magnitud como la ausencia de valores anómalos que se puedan generar por la interpolación.

La tendencia que se presenta en la figura 54, se asocia a la modulación del ciclo solar que varia aproximadamente cada 11años, de tal manera que los periodos que presentan una alta densidad de tormentas coinciden con lo máximos ciclos solares que van del 19 a 24, teniendo una coherencia física entre los resultados de la serie $E(t)$ y las variaciones del ciclo solar. Se presentan datos faltantes en la serie, con mayor énfasis en el año 1986, este periodo coincide con un intervalo de 6 meses sin registros en los datos originales del observatorio.

Finalmente, la serie $Q(t)$ es la serie que resulta en el procesamiento espectral mediante FFT para lograr el cálculo de Sq_i. Tener un resultado optimo, asegura una adecuada resolución espectral de los armónicos y evita la contaminación en la separación entre Sq_i y $Dist_i$.

4.2.3. Variación solar quieta Sq(t)

La estimación de la variación solar quieta permite Sq, es fundamental en el cálculo de la serie de perturbación, debido a que se obtiene mediante la sustracción de componentes espectrales como Sq respecto del campo externo E.

La razón por la cual se escogieron las dos métricas estadísticas complementarias es la necesidad de poder evaluar el desempeño de los resultados. La correlación de Pearson ρ calculada mediante la ecuación(28), mide la similitud presentada entre las señales $Dlat_i$ y Dst, capturando la dinámica de la actividad geomagnética temporal. Mientras que el RMSE, va a cuantifica la magnitud del error absoluto en nanosteslas, esto es relevante debido a que penalizara los errores en eventos de alta magnitud geomagnética asociada a las tormentas, es decir que medirá la diferencia entre el valor estimado ($Dlat_i$) y el valor real (Dst,), evaluando el desempeño del método en condiciones donde los valores van a presentar una mayor variabilidad (Love et al. 2009).

Obteniendo al final el parámetro *score*, que se calcula mediante la ecuación(27). Este parámetro busca encontrar el valor optimo que maximice la correlación y minimice el error, garantizando que el resultado no presente un sobreajuste en cuanto a la correlación a costa de un mayor error y que no minimice el error sacrificando una correspondencia temporal con el índice que se tiene de referencia. Para el enfoque A se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 5: Las 10 combinaciones más omptimas para los parámetros del filtro A según el *score* de optimización planteado para evaluar el proceso de optimización sistemática..

$\Delta\omega$	K_d	K_m	K_a	s	ρ	RMSE (nT)
0.046831	12	1	1	0.034358	0.776026	22.5862
0.046563	12	1	1	0.034352	0.775965	22.5888
0.046295	12	1	1	0.034348	0.775936	22.5905
0.047099	12	1	1	0.034342	0.775779	22.5898
0.046027	12	1	1	0.034340	0.775863	22.5936
0.045759	12	1	1	0.034335	0.775833	22.5957
0.044151	12	1	1	0.034332	0.775988	22.6023
0.043883	12	1	1	0.034330	0.775971	22.6036
0.045491	12	1	1	0.034329	0.775782	22.5983
0.080065	12	1	1	0.034329	0.772999	22.5173

En la tabla 5, se puede evidenciar que los parámetros óptimos escogidos son $\Delta\omega = 0{,}046831$, $K_d = 12$, $K_m = 1$ y $K_a = 1$, teniendo una correlación de $\rho = 0{,}776$ y un RMSE de 22,59 nT, se destaca que dentro de las 10 combinaciones más con mejor puntaje, los valores de los armónicos son consistentes teniendo todas valores de $K_d = 12$, $K_m = 1$ y $K_a = 1$, lo que puede sugerir que para observatorios de latitudes ecuatoriales como Fúquene, los armónicos diurnos son los que dominan la variación solar quieta, mientras que armónicos más largos o grandes como los mensuales y anuales, no tienen tanta contribución. Obteniendo la serie de variación solar quieta Sq_i con los parámetros mejor optimizados para el Observatorio de Fúquene. Para el enfoque B se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 6: Las 10 combinaciones más omptimas para los umbrales de amplitud espectral para el fitlro B según el *score* de optimización planteado.

Umbral A_{umbral} (nT)	s	ρ	RMSE (nT)
1,3053	0,021597	0,610984	28,2896
1,3051	0,021597	0,610984	28,2896
1,3040	0,021597	0,610984	28,2896
1,3044	0,021597	0,610984	28,2896
1,3037	0,021597	0,610984	28,2896
1,3031	0,021597	0,610984	28,2896
1,3035	0,021597	0,610984	28,2896
1,3033	0,021597	0,610984	28,2896
1,3013	0,021597	0,610984	28,2896
1,3010	0,021597	0,610984	28,2896

En la tabla 6, se puede evidenciar los umbrales óptimos escogidos para $A_{umbral} = 1{,}3008150407520376$, teniendo una correlación de $\rho = 0{,}6109$ y un RMSE de 28,2896 nT. Las diferencias que presenta con los resultados de enfoque A, es que los valores de s, ρ y RMSE son prácticamente iguales, lo que se puede evidenciar es que la función objetivo es plana y es poco sensible a variaciones en el umbral sobre ese rango de valores.

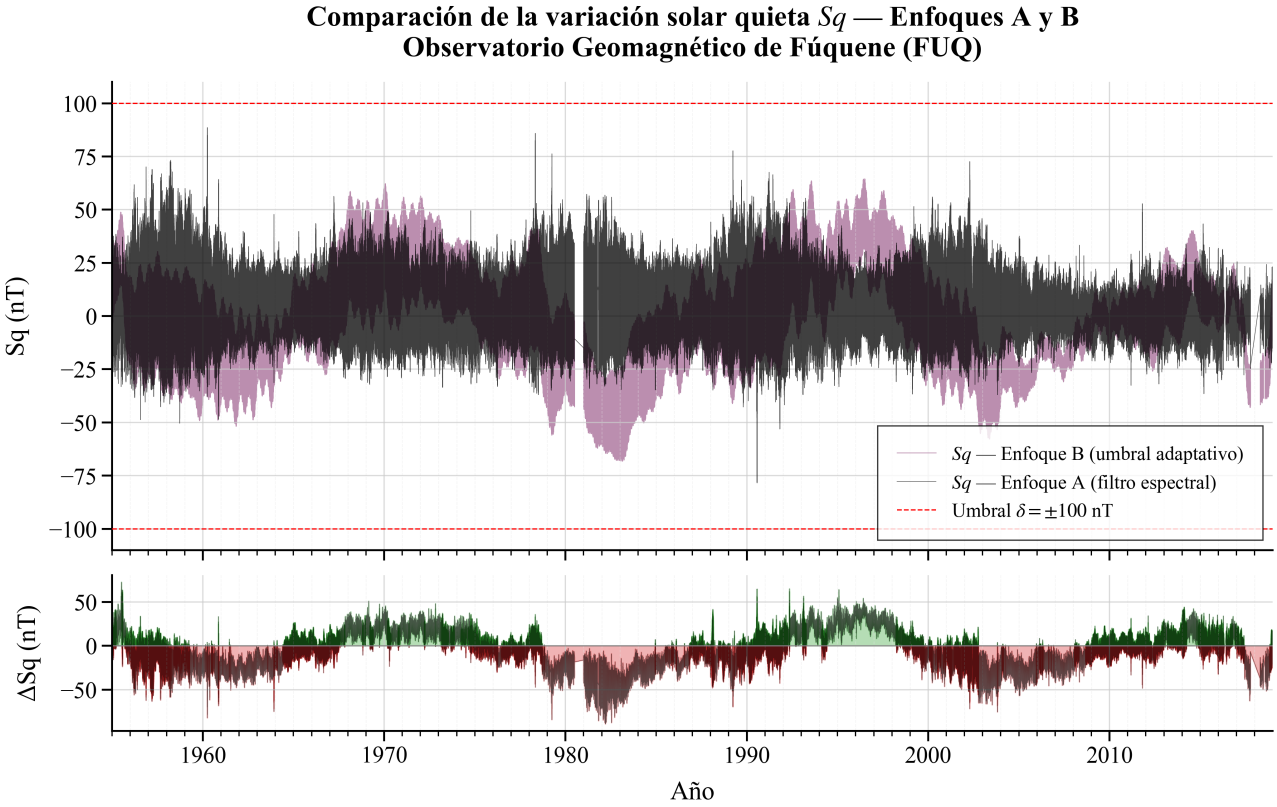


Figura 54: Cálculo de la variación solar quieta $Sq(t)$ para el observatorio geomagnético de Fúquene en el periodo comprendido de 1955-2018. En el primer panel se encuentran inicialmente líneas de color negro que representan el resultado del enfoque A calculado mediante la ecuación(22), las líneas de color purpura son el resultado del enfoque B calculado mediante la ecuación(32) y por ultimo las líneas punteadas de color rojo representan el umbral seleccionado de $\delta = 100$ nT. En el segundo panel se encuentra $\Delta Sq = Sq_B - Sq_A$, el cual cuantifica la divergencia de los dos enfoques.

En la figura 53, se presenta el resultado de la serie de variación solar quieta en el dominio del tiempo y la comparación del enfoque A y el enfoque B. En el panel superior se puede evidenciar que Sq_B presenta una tendencia algo distinta a Sq_A, donde los valores máximos de la serie corresponden a los ciclos solares, siendo consistente con la metodología utilizada del umbral óptimo, que retiene las componentes espectrales adicionales aparte de la variación solar quieta. Mientras que el enfoque A no retendrá las componentes espectrales adicionales gracias a los armónicos diurnos, mensuales y anuales.

En el panel inferior se muestra el ΔSq, indicando en color verde los periodos donde $Sq_B > Sq_A$ y de color rojo los valores que $Sq_B < Sq_A$. Se identifica el predominio de valores negativos, lo que quiere indicar que en términos de amplitud los valores que resultan del enfoque B presentan una menor amplitud que el enfoque A, esto se debe a que en el momento de aplicar el filtro espectral multibanda se capturan momentos de perturbación geomagnética cuya frecuencia llegan a solapar con los armónicos diurnos. Se evidencia del resultado que los periodos donde hay mayor divergencia entre los métodos, es cuando hay mayor intensidad de tormentas geomagnéticas y en contra parte cuando hay baja actividad geomagnética estos métodos convergen.

A partir del año 2000 en adelante se puede evidenciar un factor que contribuyen al comporta-

miento de la serie, siendo la llegada del ciclo solar 24 uno de los ciclos históricamente más débiles, reduciendo la divergencia entre los métodos por la disminución de tormentas magnéticas. Obteniendo este resultado se puede corroborar que ambos métodos van a captar una diferencia en el cálculo de la serie de perturbación $Dist$ y por lo tango en el índice $Dlat$ que deriva de esta estimación.

4.2.4. Ciclo solar SC(t)

La componente de ciclo solar SC captura las variaciones del campo externo asociadas a la actividad del ciclo solar que tiene una duración aproximada de 11 años, esta componente se sustrae de E junto a Sq para evitar contaminar la serie de perturbación $Dist$ y poder aislar cualquier anomalía que afecte el resultado final.

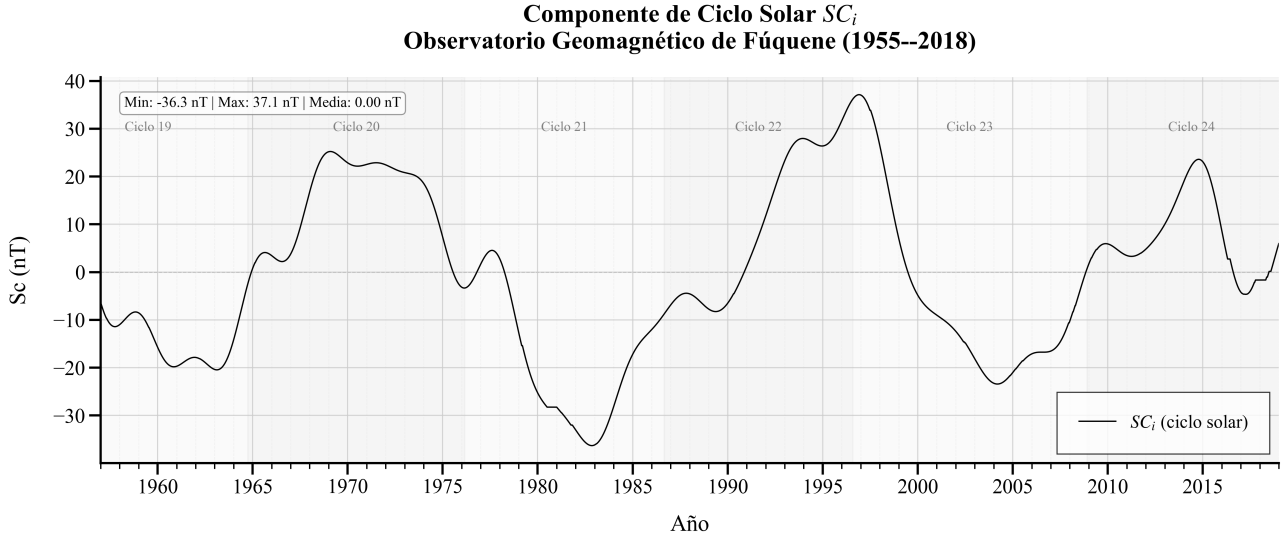


Figura 55: Cálculo de la serie del ciclo solar $SC(t)$ para el observatorio geomagnético de Fúquene en el periodo comprendido de 1955-2018. La línea de color negro representa el resultado de la ecuación(35), los recuadros sombreados representan cada ciclo solar que se encuentra en la y por último se encuentra su valor máximo, medio y mínimo en la parte izquierda de la gráfica.

La Figura 55 presenta el resultado de la componente $SC(t)$ estimada mediante la ecuación(35), oscilando entre un mínimo de -36.3 nT, un valor medio de 0,00 nT y un valor máximo de 37.1 nT. Este valor medio de 0 nos indica que se removió el offset en el dominio de la frecuencia correctamente; al excluir valores de $f = 0$ se logro excluir la componente de la corriente directa, capturando de manera precisa la señal del ciclo solar.

Se logra identificar de manera clara los ciclos solares del 19 al 24, delimitados por franjas verticales. Los valores de alta magnitud magnética coinciden con los ciclos 20 y 22, alrededor de los años 1970 y 1955, los valores mínimos en la serie se observan en los periodos de transición durante los años 1983 y 2005, teniendo valores negativos en la serie durante estas épocas y por último, se observa que la serie 24 corresponde al pico más bajo dentro de los ciclos que se obtenidos, lo que indica una consistencia con el debilitamiento de la actividad solar en las últimas décadas.

La relevancia de esta componente es esencial para el enfoque A, por lo que se tiene que sustraer explícitamente del campo externo junto con Sq_A, esto se hace para estimar la serie $Dist_A$ (Love et al. 2009). Si no se llega a remover esta componente de $Dist_A$, contaminaría la serie, porque seguirá tendencias de largo periodo que no van a corresponder a una actividad de tormenta geomagnética, sino a la modulación del ciclo solar, sesgando por completo el resultado que se obtendría del índice local $Dlat_A$. Por otro lado en el enfoque B, no es necesario sustraer este componente dado que se aplico el filtro por umbral, el cual va a retener componentes de baja frecuencia dentro de Sq_B, obteniendo implícitamente SC_i en la estimación anterior.

4.2.5. Serie de perturbación $Dist(t)$ e índice local $Dlat(t)$

A partir del procedimiento descrito en la metodología para el enfoque A y el enfoque B, se genera el calculo de la serie de perturbación geomagnética $Dist(t)$, la cual contiene únicamente las señales asociadas a tormentas geomagnéticas, después de aplicarle la corrección de normalización por latitud geomagnética obtenemos el resultado final, el índice $Dlat(t)$.

Para validar los resultados del índice $Dlat$, se realizo 4 comparaciones directas con el Dst de Kyoto, durante 4 tormentas geomagnéticas que se seleccionaron por su relevancia histórica, intensidad y distribución temporal a lo largo de la serie calculada para el observatorio geomagnético de Fúquene.

4.2.5.1 Tormenta del 11 de febrero de 1958

Esta tormenta ocurre en el ciclo solar 19, teniendo valores mínimos en el Dst de -426 nT. Se selecciona esta tormenta porque se presenta durante la primera década de la serie Dst del observatorio de kyoto y del observatorio geomagnético de Fúquene, permitiendo evaluar el desempeño de la metodología en condiciones extremas con valores tempranos de la serie.

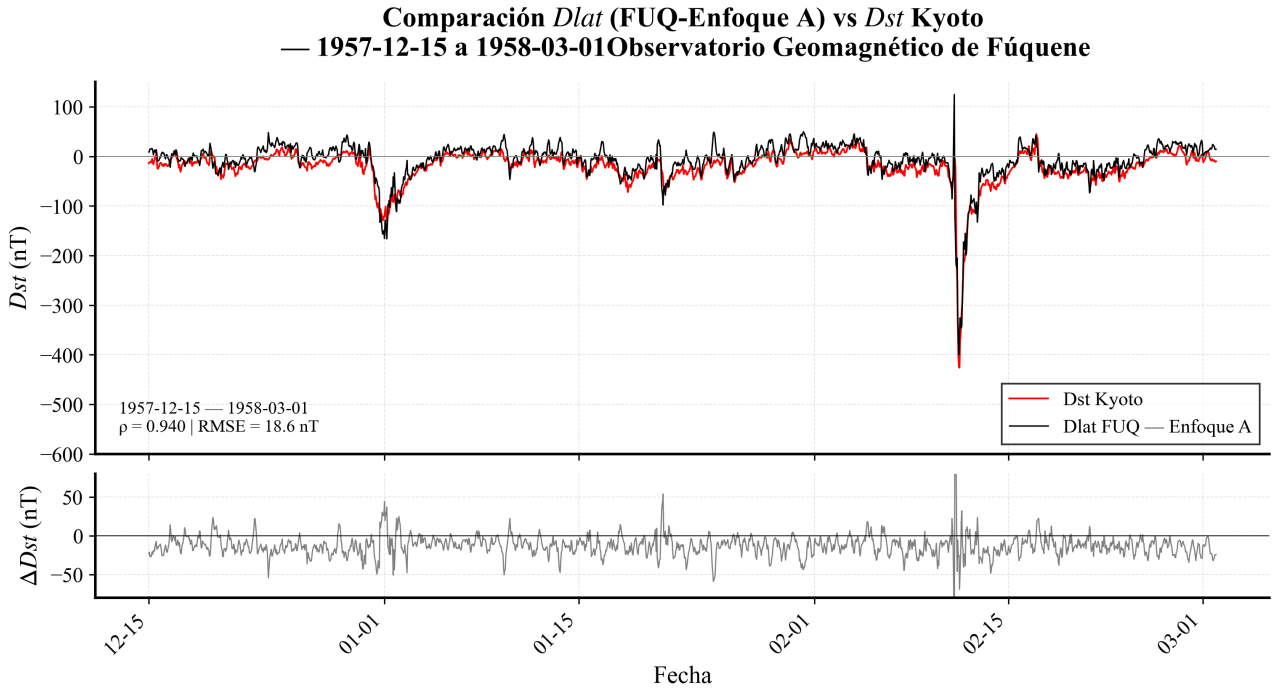


Figura 56: Cálculo del índice *Dlat* para el observatorio geomagnético de Fúquene en el periodo comprendido de diciembre de 1957 a marzo de 1958. La línea de color negro representa el resultado del índice Dlat para el enfoque A mediante la ecuación(39), la línea de color rojo representa la seria Dst obtenida por el observatorio de Kyoto. En el segundo panel se encuentra $\Delta Dst = Dst - Dlat_A$, el cual cuantifica la divergencia de los dos enfoques.

En la figura 56 se presenta la comparación del índice local $Dlat_A$ calculado para el Observatorio de Fúquene mediante el Enfoque A y el índice Dst oficial de Kyoto. Se selecciona este periodo tan extenso para comparar la tormenta geomagnética del 1 de enero de 1958, que llega a tener valores cercanos a los -180 nT, mientras que para la tormenta del 11 de febrero de 1958 se registran valores que superan los -400 nT.

Se evidencia que el índice $Dlat_A$ sigue la morfología que presenta el Dst, manteniendo la estructura en sus 3 fases: fase de inicio, fase principal y su fase de recuperación, mientras que para los periodos de calma en ambas series se percibe un valor cercano a cero. Se obtiene para este periodo una correlación de $\rho = 0.940$ y un RMSE de 18.6 nT, En la divergencia presente en el panel inferior, los valores oscilan entre el rango de ± 50 nT durante la mayor parte del periodo, teniendo un residuo mayormente negativo, lo que indica que los valores del Dst son un poco más negativos que los que registra el cálculo de Fúquene para esta ventana de datos.

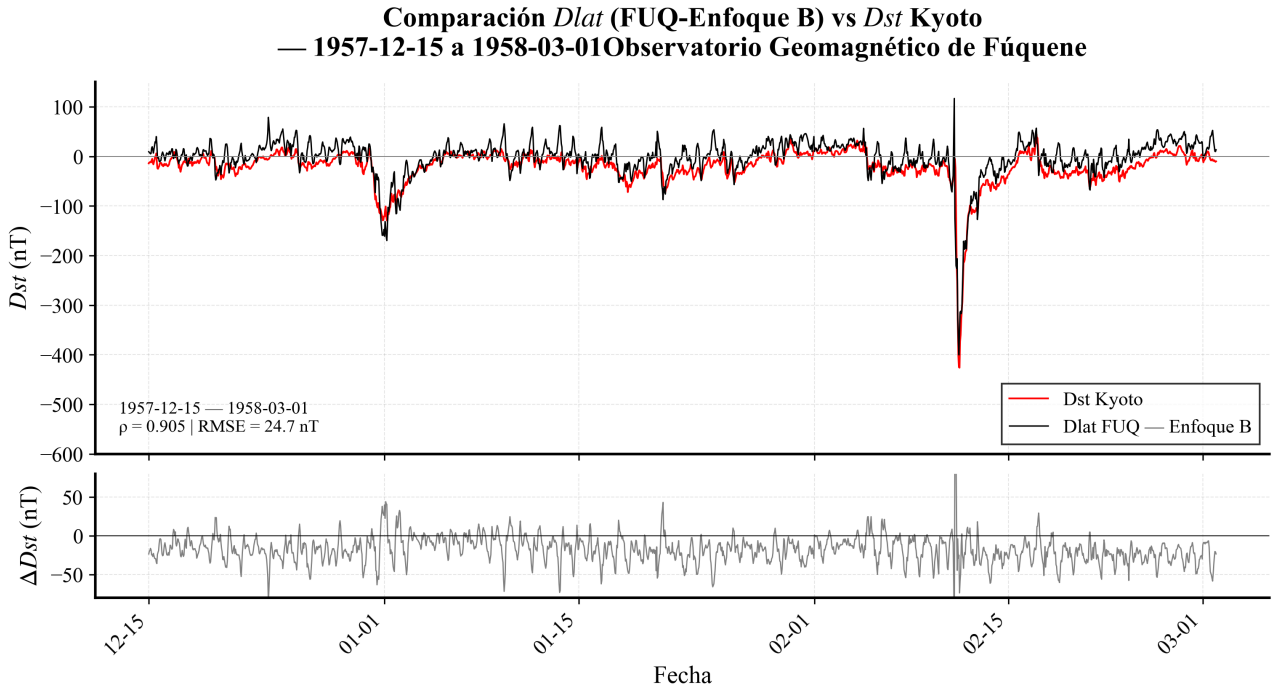


Figura 57: Cálculo del índice *Dlat* para el observatorio geomagnético de Fúquene en el periodo comprendido de diciembre de 1957 a marzo de 1958. La línea de color negro representa el resultado del índice Dlat para el enfoque B mediante la ecuación(40), la línea de color rojo representa la seria Dst obtenida por el observatorio de Kyoto. En el segundo panel se encuentra $\Delta Dst = Dst - Dlat_B$, el cual cuantifica la divergencia de los dos enfoques.

La figura 57 presenta la misma ventana y comparación temporal para el $Dlat_B$ obtenido mediante el enfoque B. La morfología que se presenta como resultado es similar a la del enfoque A, sin embargo, se obtiene una correlación $\rho = 0.905$ y un RMSE de 24.7 nT, resultados inferiores a los del enfoque A. En la divergencia se presentan valores con mayor amplitud y una señal residual más pronunciada hacia valores negativos en comparación con el enfoque A.

4.2.5.2 Tormenta del 9 de febrero de 1986

Esta tormenta ocurre durante el periodo de transición del ciclo solar 21, teniendo valores cercanos a los -307 nT. Se selecciona esta tormenta por estar en un periodo donde los datos que presenta el observatorio geomagnético de Fúquene tienen ciertas anomalías, debido a que la segunda mitad del año no se presentan datos, lo que permite evaluar la metodología en condiciones de cobertura puntuales y limitadas.

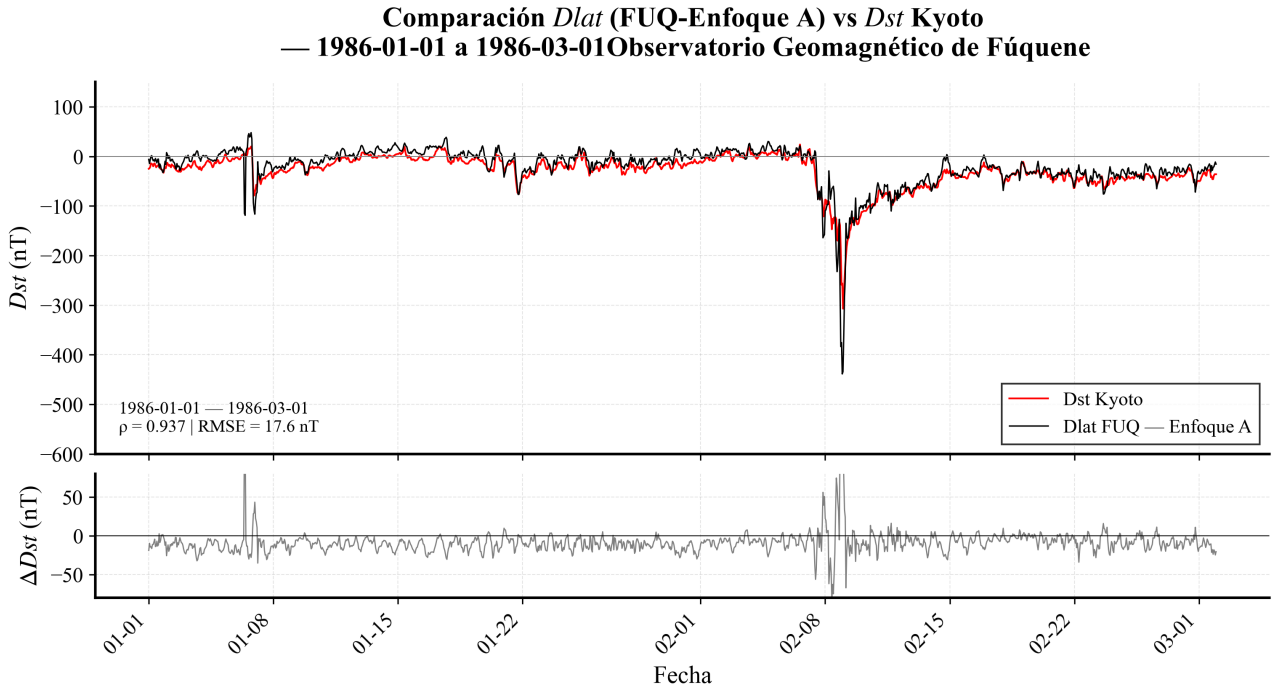


Figura 58: Cálculo del índice *Dlat* para el observatorio geomagnético de Fúquene en el periodo comprendido de enero a marzo de 1986. La línea de color negro representa el resultado del índice Dlat para el enfoque A mediante la ecuación(39), la línea de color rojo representa la seria Dst obtenida por el observatorio de Kyoto. En el segundo panel se encuentra $\Delta Dst = Dst - Dlat_A$, el cual cuantifica la divergencia de los dos enfoques.

En la figura 58 se presenta la comparación del índice local $Dlat_A$ calculado para el Observatorio de Fúquene mediante el Enfoque A y el índice Dst oficial de Kyoto. Se selecciona el periodo comprendido del 1 de enero al 1 de marzo de 1986, sobre el mes de enero se pueden evidenciar tormentas moderadas del orden de los -100 nT y la tormenta geomagnética principal de la serie ocurriendo el 9 de febrero, que llega a tener valores cercanos a los -450 nT. Obteniendo como resultado una correlación $\rho = 0.937$ y un RMSE de 17.6 nT, valores consistentes con los del ejemplo de 1958.

Se evidencia que en la tormenta principal, el $Dlat_A$ tiene valores más pronunciados a los que se registran en el Dst, esto se evidencia en los picos positivos de la divergencia, teniendo valores aproximados de $\sim +70$ nT que coinciden con el periodo de alta actividad geomagnética, durante la fase de recuperación el valor cae abruptamente aproximadamente a $\sim +20$ nT. Esto indica que la corrección por latitud magnética puede que amplifique la perturbación magnética, además de que los resultados presentados por el índice local $Dlat_A$ corresponden al valor de solo una observatorio geomagnético, mientras que el índice Dst es el promedio de cuatro estaciones.

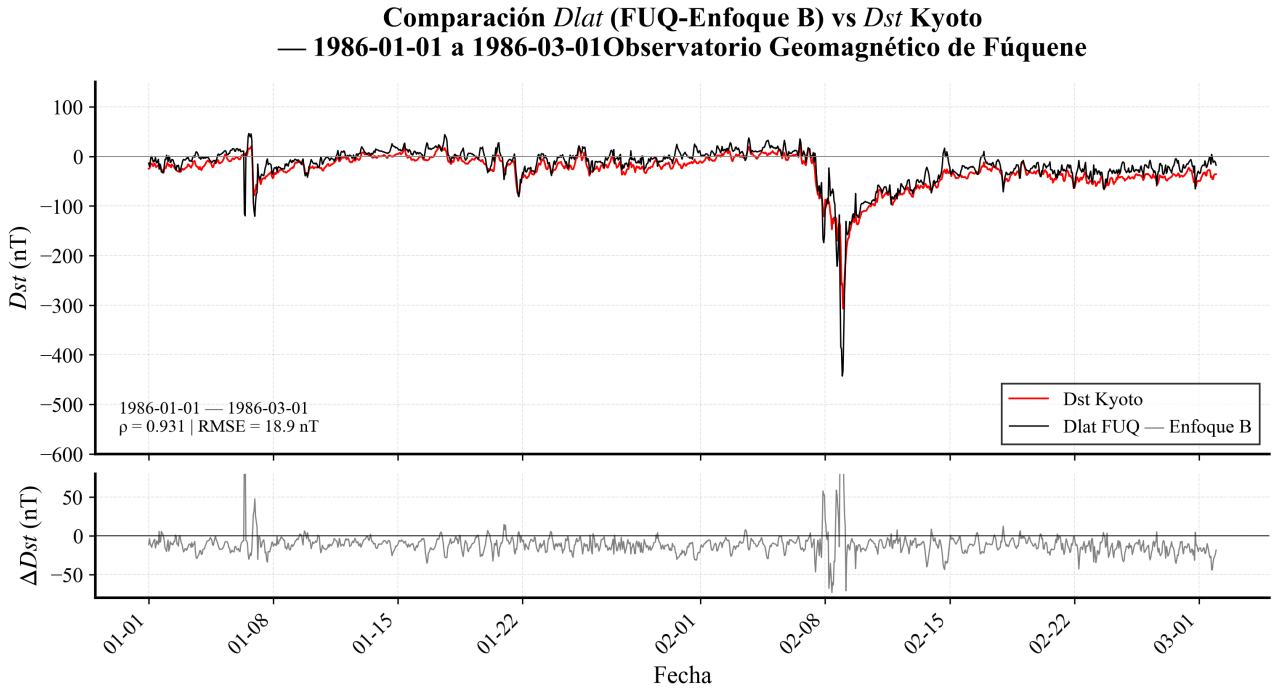


Figura 59: Cálculo del índice *Dlat* para el observatorio geomagnético de Fúquene en el periodo comprendido de enero a marzo de 1986. La línea de color negro representa el resultado del índice Dlat para el enfoque B mediante la ecuación(40), la línea de color rojo representa la seria Dst obtenida por el observatorio de Kyoto. En el segundo panel se encuentra $\Delta Dst = Dst - Dlat_B$, el cual cuantifica la divergencia de los dos enfoques.

La figura 59 presenta la misma ventana y comparación para el $Dlat_B$ obtenido mediante el enfoque B. Se obtiene una correlación $\rho = 0.931$ y un RMSE de 18.9 nT, resultados inferiores a los del enfoque A, pero no tan abruptos como los que se observan en el resultado de la tormenta de 1958. En la divergencia se presentan valores ligeramente más negativos y una mayor amplitud en comparación del enfoque A, pero no tan bruscos como los que se presentan en el periodo de 1958. Esto se puede atribuir al hecho de que es un periodo de baja actividad solar, lo que hace que ambos enfoques converjan en resultados con mayor similitud.

4.2.5.3 Tormenta del 14 de marzo de 1989

Se selecciona esta tormenta, debido a que es una de las tormentas geomagnéticas mas severas del siglo XX alcanzando valores de -589, provocando colapsos en los sistemas eléctricos de Hydro-Québec en Canadá. Es un caso de referencia documentada por *gonzalez1994* y permite evaluar la capacidad del índice en eventos de gran magnitud.

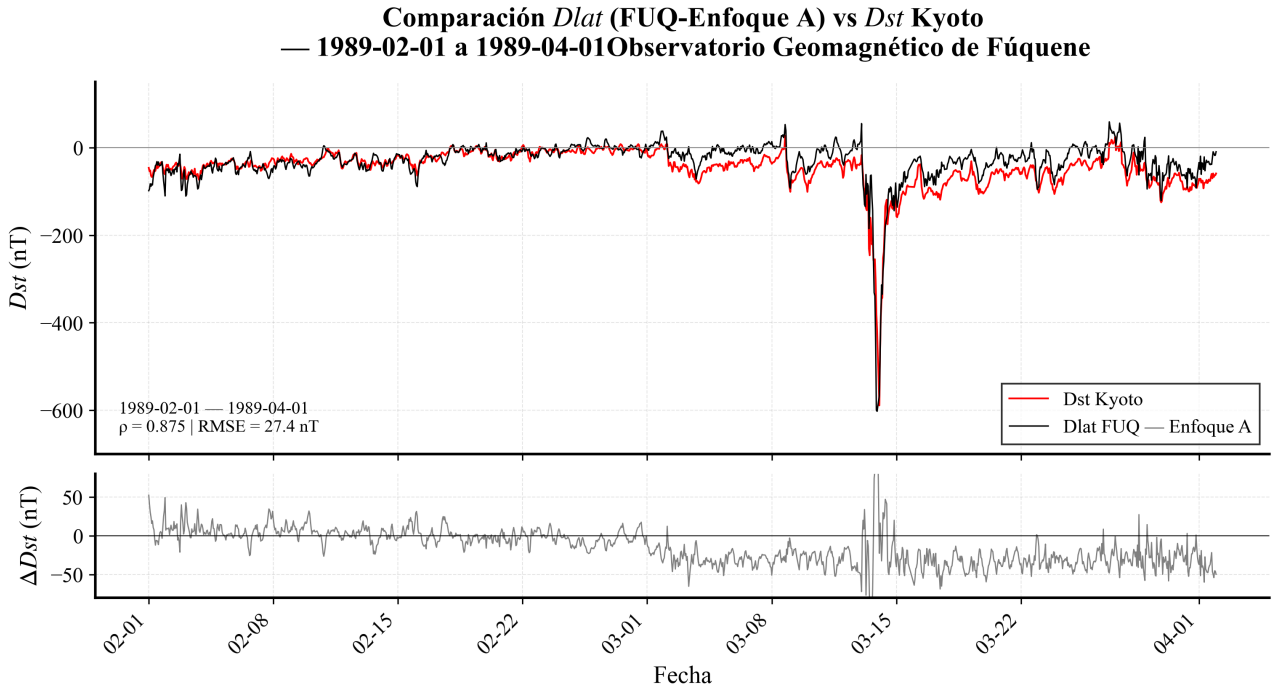


Figura 60: Cálculo del índice *Dlat* para el observatorio geomagnético de Fúquene en el periodo comprendido de febrero a abril de 1989. La línea de color negro representa el resultado del índice Dlat para el enfoque A mediante la ecuación(39), la línea de color rojo representa la seria Dst obtenida por el observatorio de Kyoto. En el segundo panel se encuentra $\Delta Dst = Dst - Dlat_A$, el cual cuantifica la divergencia de los dos enfoques.

En la figura 60 se presenta la comparación del índice local $Dlat_A$ calculado para el Observatorio de Fúquene mediante el Enfoque A y el índice Dst oficial de Kyoto. Se selecciona el periodo comprendido del 1 de febrero de 1989 al 1 de abril de 1986, siendo uno de los eventos más intensos de los que se tiene registro. Se obtiene como resultado una correlación $\rho = 0.875$ y un RMSE de 27.4 nT, siendo los valores de las métricas más bajos que se obtienen en la comparación de algún evento relacionado con una tormenta geomagnética para el índice $Dlat_A$. Presenta valores cercanos a los -600 nT, teniendo una morfología similar al índice Dst pero con una divergencia en la fase de recuperación, obteniendo valores en el orden de los -50 nT que se mantienen hasta el final del periodo, sugiriendo que la recuperación fue más rápida en el índice $Dlat_A$.

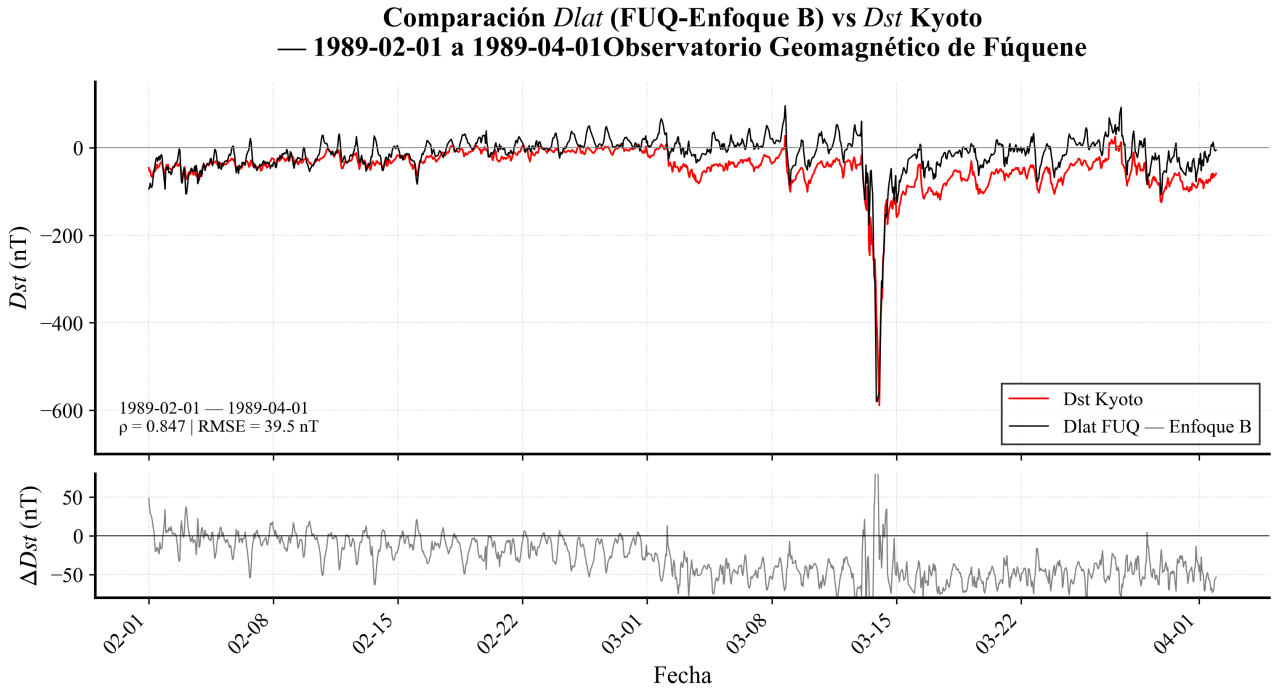


Figura 61: Cálculo del índice *Dlat* para el observatorio geomagnético de Fúquene en el periodo comprendido de febrero a abril de 1989. La línea de color negro representa el resultado del índice Dlat para el enfoque B mediante la ecuación(40), la línea de color rojo representa la seria Dst obtenida por el observatorio de Kyoto. En el segundo panel se encuentra $\Delta Dst = Dst - Dlat_B$, el cual cuantifica la divergencia de los dos enfoques.

La figura 61 presenta la misma ventana y comparación para el $Dlat_B$ obtenido mediante el enfoque B. Se obtiene una correlación $\rho = 0.847$ y un RMSE de 39.5 nT, siendo el caso que presenta mayor divergencia con respecto del enfoque A. Este enfoque presenta divergencia en la fase principal y en la fase de recuperación con respecto al índice Dst, divergencia se presentan valores que superan el orden de los -80 nT. Esto refuerza lo mencionado sobre los periodos de actividad solar, siendo que 1989 corresponde al inicio de un pico máximo de ciclo solar.

4.2.5.4 Tormenta del 16 de julio del 2000

Se selecciona la tormenta denominada "Evento solar del Día de la Bastilla", debido a que el día 14 de julio del año 2000 se genera una fulguración de clase X5 produciendo una eyección de masa coronal dirigida hacia la Tierra, generando el día 16 de julio el pico de actividad geomagnética de -300 nT. Ocurrió durante el ciclo solar 23, observadas por las sondas Voyager 1 y Voyager 2, seleccionada por que permite evaluar el desempeño de los resultados en eventos documentados y de alto impacto.

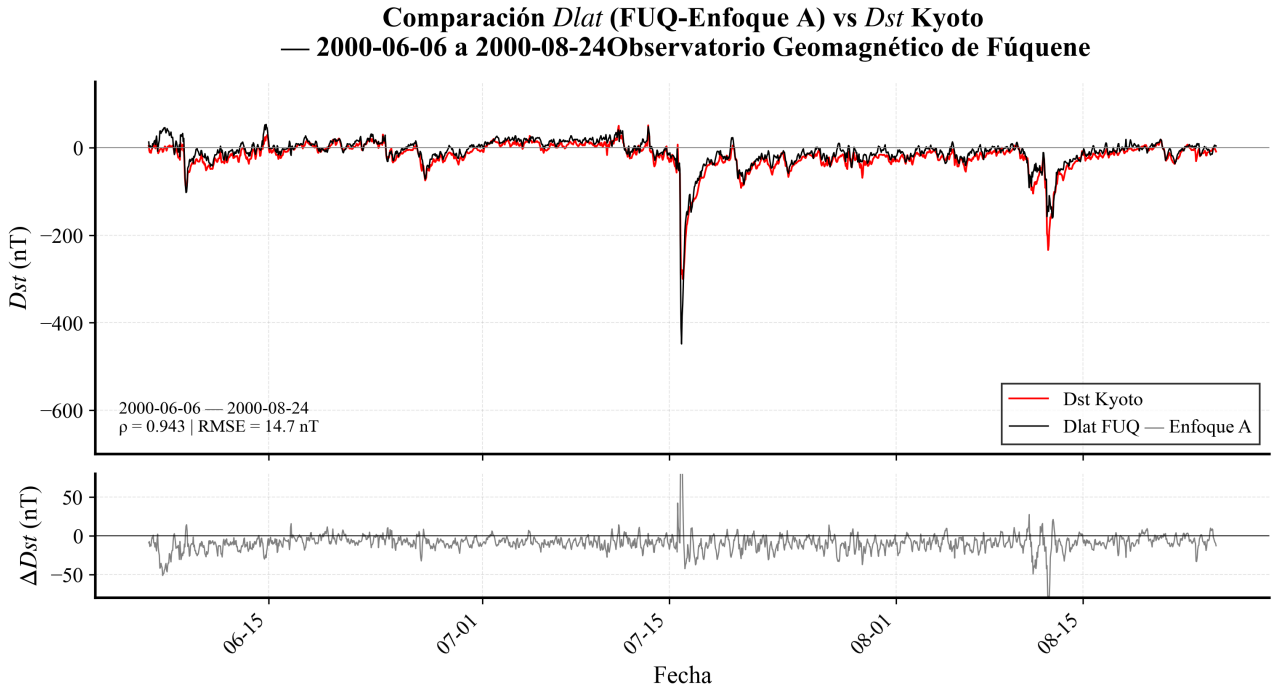


Figura 62: Cálculo del índice *Dlat* para el observatorio geomagnético de Fúquene en el periodo comprendido de junio a agosto del 2000. La línea de color negro representa el resultado del índice Dlat para el enfoque A mediante la ecuación(39), la línea de color rojo representa la seria Dst obtenida por el observatorio de Kyoto. En el segundo panel se encuentra $\Delta Dst = Dst - Dlat_A$, el cual cuantifica la divergencia de los dos enfoques.

En la figura 62 se presenta la comparación del índice local $Dlat_A$ calculado para el Observatorio de Fúquene mediante el Enfoque A y el índice Dst oficial de Kyoto. Se selecciona el periodo comprendido del 6 de junio al 24 de agosto de 2000. Se obtiene como resultado una correlación $\rho = 0.943$ y un RMSE de 14.7 nT, presentando las métricas más optimas de los periodos analizados. Presenta valores cercanos a los -400 nT registrados en el índice $Dlat$.

Se puede evidenciar en la divergencia de este periodo, que en la fase principal de la tormenta con valores más altos en magnitud, presenta valores mayores a 50 nT en la divergencia, debido a que se registra un pico mas bajo en la serie de FUQ. Mientras que en la tormenta de menor magnitud, para el día 15 de agosto la divergencia baja a valores menores de -80 nT, en este caso la serie Dst de kyoto registra valores mas negativos respecto a FUQ.

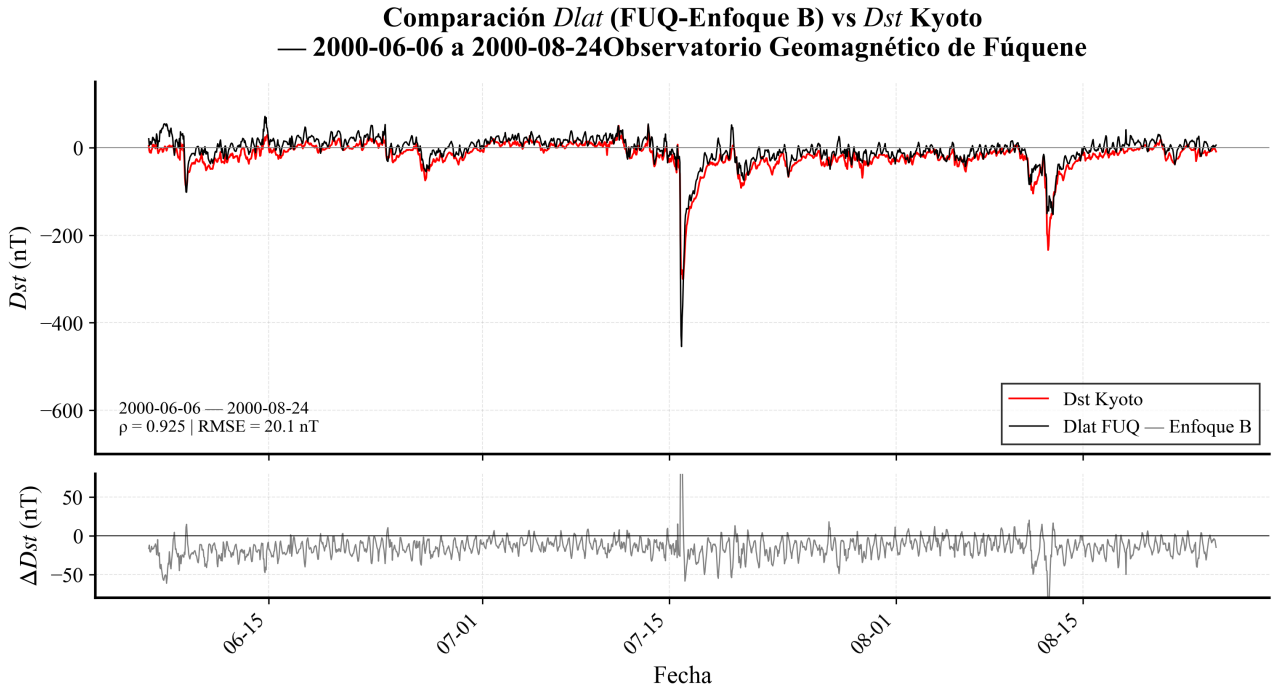


Figura 63: Cálculo del índice *Dlat* para el observatorio geomagnético de Fúquene en el periodo comprendido de junio a agosto del 2000. La línea de color negro representa el resultado del índice Dlat para el enfoque B mediante la ecuación(40), la línea de color rojo representa la seria Dst obtenida por el observatorio de Kyoto. En el segundo panel se encuentra $\Delta Dst = Dst - Dlat_B$, el cual cuantifica la divergencia de los dos enfoques

La figura 63 presenta la misma ventana y comparación para el $Dlat_B$ obtenido mediante el enfoque B. Se obtiene una correlación $\rho = 0.925$ y un RMSE de 20.1 nT, este enfoque presenta divergencias negativas más pronunciadas, lo que puede indicar una sobreestimación del enfoque B respecto al *Dst* de Kyoto.

4.3. Resultados del índice Dst en NRT

Para la validación de los resultados del índice *Dlat* en tiempo real para el observatorio geomagnético de Fúquene, se realiza la comparación mediante 11 estaciones implementadas por parte del servicio geológico de los Estados Unidos (USGS), los cuales reportan valores de índice *Dist* con una resolución al minuto. Estos valores están sujetos a la disponibilidad de los datos de las estaciones para tres eventos geomagnéticos ocurridos en lo que lleva del 2026.



Figura 64: Mapa que indica la ubicación de los observatorios del USGS y el observatorio de Fúquene. Los puntos de color azul representan la ubicación de los observatorios de BOU (Boulder), BSL (Bay St Louis), FRD (Fredericksburg), FRN (Fresno), GUA (Guam), HON (Honolulu), NEW (Newport), SHU (Shumagin), SIT (Sitka), SJG (San Juan) y TUC (Tucson) correspondeitnes al USGS y el punto de color rojo representa la ubicación del obsevatorio de FUQ (Fúquene, Colombia).

4.3.1. Tormenta del 19 de enero de 2026

Siendo una fulguración solar de clase X, desencadeno una tormenta geomagnética clasifica cada como severa en la escala de la NOAA teniendo el valor de G4. La perturbación alcanzo su máxima intensidad el día 21 de enero, teniendo picos de aproximadamente -270 nT, se selecciono esta tormenta por ser la más severa registrada en lo que vamos del ciclo solar 25, representando una exigencia al índice *Dlat* para el Observatorio de Fúquene.

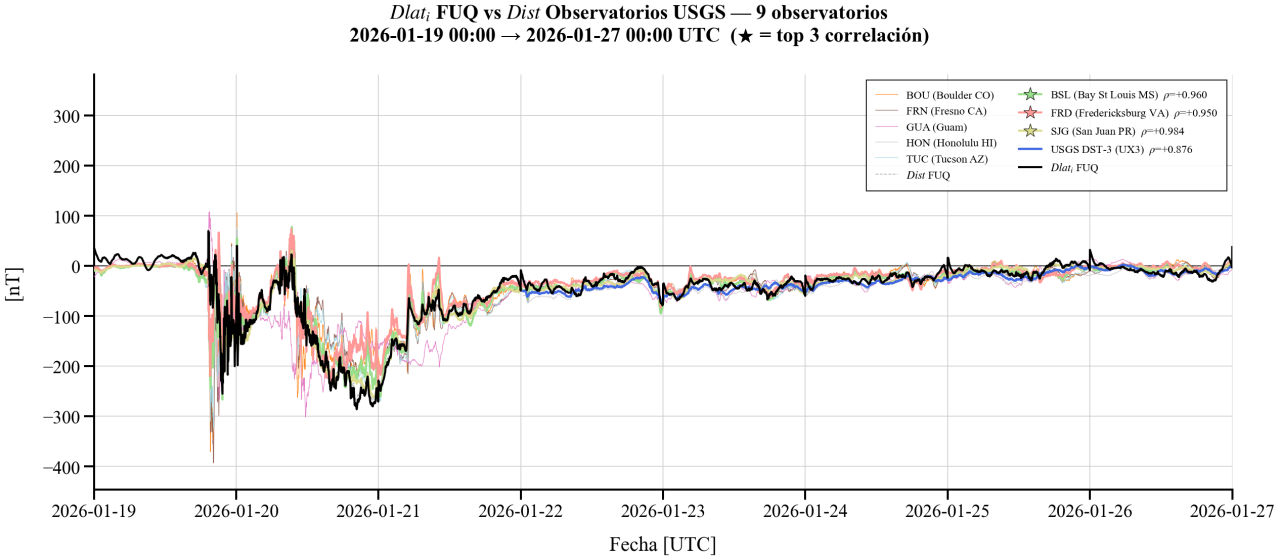


Figura 65: Comparación de los resultados en NRT de la tormenta del 19 de enero de 2026. Se puede observar que los colores que mas resaltan son las estaciones que tuvieron mayor correlación con el índice *Dlat*, de color verde esta la estación de BSL (Bay St Louis), de color naranja la estación de FRD (Fredericksburg) y de color amarillo la estación de SJG (San Juan). Por otro lado, la línea negra corresponde al valor obtenido para el observatorio de FUQ (Fúquene, Colombia).

En la figura 65 se presenta la comparación del índice local *Dlat* calculado para el Observatorio de Fúquene mediante las estaciones que presentan datos para este periodo por parte del USGS. Se selecciona el periodo comprendido del 19 al 27 de enero de 2026, siendo uno de los eventos más intensos de los que se tiene registro para el ciclo solar 25. Los observatorios que presentan una mayor correlación respecto a Fúquene son SJG, BSL y FRD, por último, se recalca que el USGS Dst-3 es el índice *Dist*, promediado para tres estaciones de USGS. Se presenta la siguiente tabla con las métricas calculadas para cada observatorio:

Tabla 7: Resumen estadístico de la comparación entre $Dlat_i$ de FUQ y los observatorios del USGS durante la tormenta del 19–27 de enero de 2026.

Obs	Nombre	ρ	R^2	RMSE (nT)	Bias (nT)	MAE (nT)
SJG	San Juan PR	+0.984	96.9 %	11.0	+1.2	8.7
BSL	Bay St Louis MS	+0.960	92.1 %	18.1	−0.5	12.4
FRD	Fredericksburg VA	+0.950	90.2 %	23.1	−7.6	14.9
TUC	Tucson AZ	+0.909	82.6 %	25.8	−0.3	15.9
BOU	Boulder CO	+0.879	77.2 %	29.6	−3.8	18.0
USGS	USGS Dst-3 (UX3)	+0.876	76.7 %	11.0	+6.5	9.0
FRN	Fresno CA	+0.869	75.6 %	30.4	−0.9	18.0
GUA	Guam	+0.818	67.0 %	37.3	+8.5	22.6
HON	Honolulu HI	+0.785	61.7 %	14.6	+8.9	12.5

En la tabla 7, se puede observar un patrón de asimetría longitudinal de la corriente anular durante esta tormenta geomagnética, gracias el sesgo sistemático (bias) confirma que este

patrón es dependiente de la ubicación geográfica. Donde los observatorios del pacifico presentan altos valores positivos, indicando que el observatorio de FUQ va a sobrestimar la perturbación respecto a estos observatorios. Para observatorios continentales del este, se obtiene un sesgo negativo.Los observatorios de TUC, BSL, BRN Y SJG, presentan un $|bias| < 2$ nT.

4.3.2. Tormenta del 20 de marzo de 2026

Es enerada por eyecciones de masa coronal originadas entre el 16 y el 19 de marzo, generando una perturbación que alcanzó los niveles de G3 considerándose una tormenta fuerte para el 20 de marzo. Se selecciona esta tormenta ya que la perturbación geomagnética coincide con el equinoccio de marzo, donde la actividad geomagnética tiende a intensificarse.

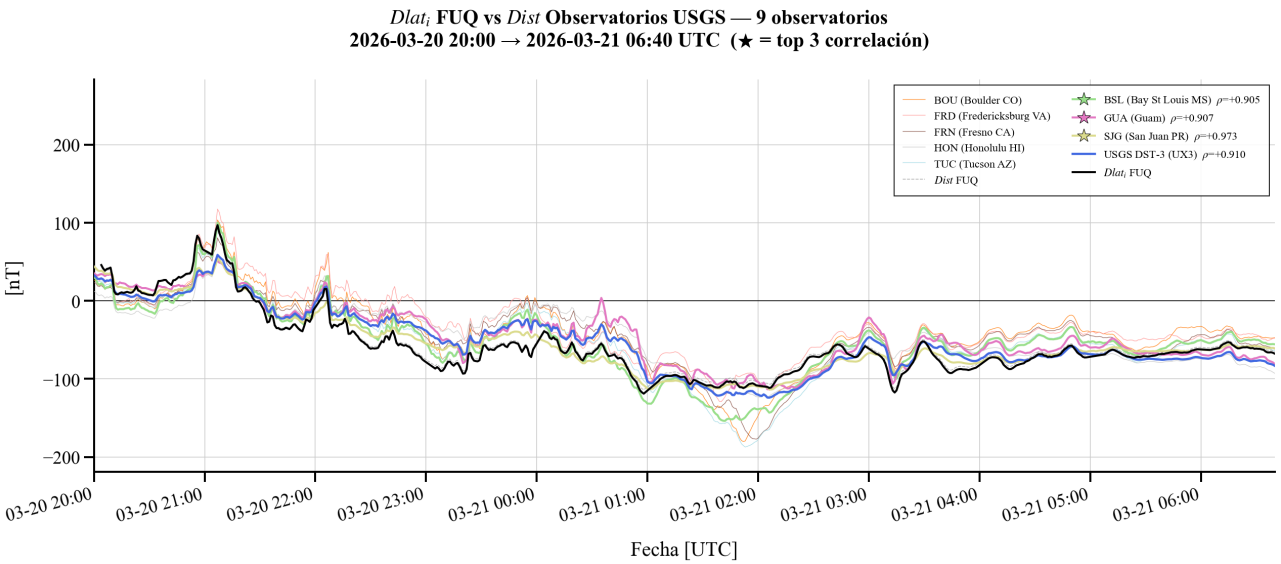


Figura 66: Comparación de los resultados en NRT de la tormenta del 20 de marzo de 2026. Se puede observar que los colores que mas resaltan son las estaciones que tuvieron mayor correlación con el índice *Dlat*, de color verde esta la estación de BSL (Bay St Louis), de color rosado la estación de GUA (GUAM) y de color amarillo la estación de SJG (San Juan). Por otro lado, la línea negra corresponde al valor obtenido para el observatorio de FUQ (Fúquene, Colombia).

En la figura 66 se presenta la comparación del índice local *Dlat* calculado para el Observatorio de Fúquene mediante las estaciones que presentan datos para este periodo por parte del USGS. Se selecciona el periodo comprendido del 20 al 21 de marzo de 2026, teniendo picos de aproximadamente -150 nT. Se evidencia que la fase de inicio llega alrededor de los $+100$ nT, seguida de la fase principal con una caída sostenida que se extiende hasta el final del periodo evaluado. Los observatorios que presentan una mayor correlación respecto a Fúquene son SJG, GUA y BSL, presentándose las métricas de la siguiente manera:

Tabla 8: Resumen estadístico de la comparación entre $Dlat_i$ de FUQ y los observatorios del USGS durante la tormenta del 20–21 de marzo de 2026.

Obs	Nombre	ρ	R^2	RMSE (nT)	Bias (nT)	MAE (nT)
SJG	San Juan PR	+0.973	94.7 %	8.7	−1.7	6.9
USGS	USGS Dst-3 (UX3)	+0.910	82.8 %	16.3	−3.9	13.9
GUA	Guam	+0.907	82.3 %	19.3	−11.3	15.7
BSL	Bay St Louis MS	+0.905	81.9 %	17.5	−5.3	16.0
FRD	Fredericksburg VA	+0.887	78.6 %	29.8	−24.0	26.0
TUC	Tucson AZ	+0.877	76.8 %	21.1	−5.8	19.2
BOU	Boulder CO	+0.869	75.6 %	26.1	−17.1	24.4
FRN	Fresno CA	+0.852	72.6 %	25.0	−14.2	22.7
HON	Honolulu HI	+0.755	57.0 %	27.2	−9.4	22.1

En la tabla 8, a diferencia del evento capturado en enero, el sesgo es completamente negativo para todos los observatorios. Esto indica que *Dlat* de Fúquene subestima la magnitud de la perturbación respecto a la red USGS. Los observatorios del oeste y este de Estados Unidos presentan una métrica de error grande, mientras que SJG se consagra como la estación de referencia más afín que se puede tener en la red. El índice promediado Dst-3 da valores consistentes, manteniendo también un desempeño comparable al evento capturado en enero.

4.3.3. Tormenta del 4 de abril de 2026

Se selecciono este evento siendo el más reciente al momento de la escritura de este documento, permitiendo validar el índice en condiciones geomagnéticas bajas que surgen a partir de una eyección de masa coronal asociada a una fulguración X1.5, produciendo una tormenta G1.

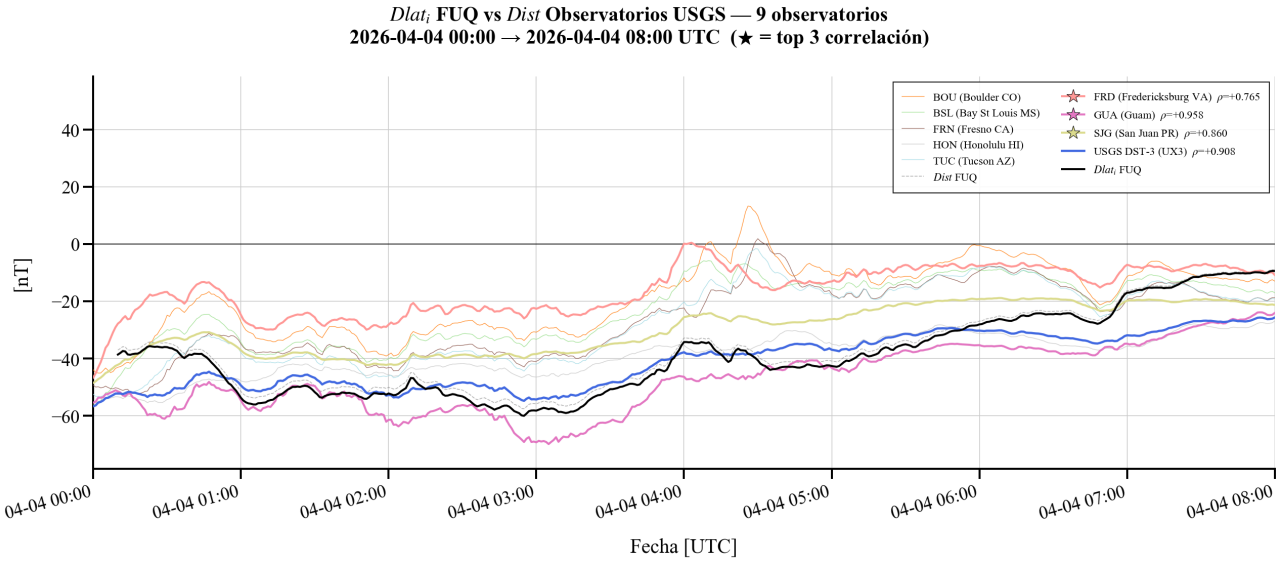


Figura 67: Comparación de los resultados en NRT de la tormenta del 4 de marzo de 2026. Se puede observar que los colores que mas resaltan son las estaciones que tuvieron mayor correlación con el índice *Dlat*, de color naranja esta la estación de FRD (Fredericksburg), de color rosado la estación de GUA (GUAM) y de color amarillo la estación de SJG (San Juan). Por otro lado, la línea negra corresponde al valor obtenido para el observatorio de FUQ (Fúquene, Colombia).

En la figura 67 se presenta la comparación del índice local *Dlat* calculado para el Observatorio de Fúquene mediante las estaciones que presentan datos para este periodo por parte del USGS. Se selecciona el periodo comprendido del 4 de abril de 2026. Los observatorios que presentan una mayor correlación respecto a Fúquene son FRD, GUA y SJG, presentándose las métricas de la siguiente manera:

Tabla 9: Resumen estadístico de la comparación entre $Dlat_i$ de FUQ y los observatorios del USGS durante la tormenta deL 4 de abril de 2026.

Obs	Nombre	ρ	ρ^2	RMSE (nT)	Bias (nT)	MAE (nT)
GUA	Guam	+0.958	91.8 %	10.5	+9.1	9.1
USGS	USGS Dst-3 (UX3)	+0.908	82.4 %	8.9	+3.8	7.2
SJG	San Juan PR	+0.860	74.0 %	11.8	−6.7	11.0
FRD	Fredericksburg VA	+0.765	58.5 %	23.0	−20.1	20.4
HON	Honolulu HI	+0.758	57.5 %	11.3	+2.1	10.4
TUC	Tucson AZ	+0.678	45.9 %	14.9	−9.2	13.1
BSL	Bay St Louis MS	+0.668	44.7 %	17.6	−13.1	15.1
FRN	Fresno CA	+0.656	43.1 %	15.6	−10.1	13.8
BOU	Boulder CO	+0.643	41.4 %	21.3	−17.5	18.3

En la tabla 9 a diferencia del evento capturado en marzo, el resultado del bias es mixto. Esto indica que *Dlat* de Fúquene subestima la magnitud de la perturbación respecto a la red USGS. Los observatorios del Pacífico presentan valores positivos, mientras que los observatorios del

este de Estados Unidos presentan valores negativos. Manteniendo un desempeño en el índice Dst-3 en periodos con actividad geomagnética baja.

4.4. Resultados del índice K histórico

La estimación del índice K local histórico permitió obtener una serie de valores representativos de la actividad geomagnética local en FUQ, a partir de la aplicación del método *Linear Elimination* del FMI. En esta etapa, se evaluó el comportamiento de la curva de variación solar regular, así como la estimación de las amplitudes trihorarias empleadas en la asignación del índice. Adicionalmente, se analizó el comportamiento mixto e individual de las variables X y Y en el cálculo del índice.

Se analizaron un total de 1.162.835 registros históricos correspondientes al periodo comprendido entre el 01/01/1955 y el 31/01/2025, con resolución horaria para el intervalo 1955–2020 y resolución al minuto para el intervalo 2021–2025. De este total, 1.125.089 registros fueron considerados válidos para el procesamiento, mientras que 169 registros en la serie horaria fueron identificados como atípicos y posteriormente depurados, lo que corresponde a una pérdida del 0.03 % en dicho subconjunto. En el caso de la serie minutal, no se registraron datos removidos durante la etapa de depuración. A partir de estas series se obtuvo un total de 181.936 valores finales del índice K, de los cuales 179.852 corresponden al intervalo horario y 2.084 al intervalo minutal. Las series incluyeron datos de las componentes X, Y y Z, y fueron empleadas para la construcción de la curva de variación solar regular (SR), la estimación de las amplitudes trihorarias para la asignación del índice K, y la evaluación del comportamiento individual y mixto de las variables.

Tabla 10: Resumen de los registros históricos utilizados en la estimación del índice K local en FUQ, discriminados por intervalo temporal y resolución de muestreo. Se presentan los registros totales, los valores válidos iniciales, la cantidad de datos eliminados durante la depuración, los valores válidos finales y el número de índices K calculados.

Intervalo	**Resol.**	**Registros**	**Válidos**	**Eliminados**	**% elim.**	**Válidos finales**	**K final**
1955–2020	Horaria	578.544	543.934	169	0.03	543.765	179852
2021–2025	Minutal	584.291	581.324	0	0.00	581.324	2084
						Total valores de K final	181936

En la Tabla 10 se presenta un resumen del número de registros disponibles por periodo y resolución temporal, así como la cobertura de datos utilizada y la cantidad de valores de K obtenidos.

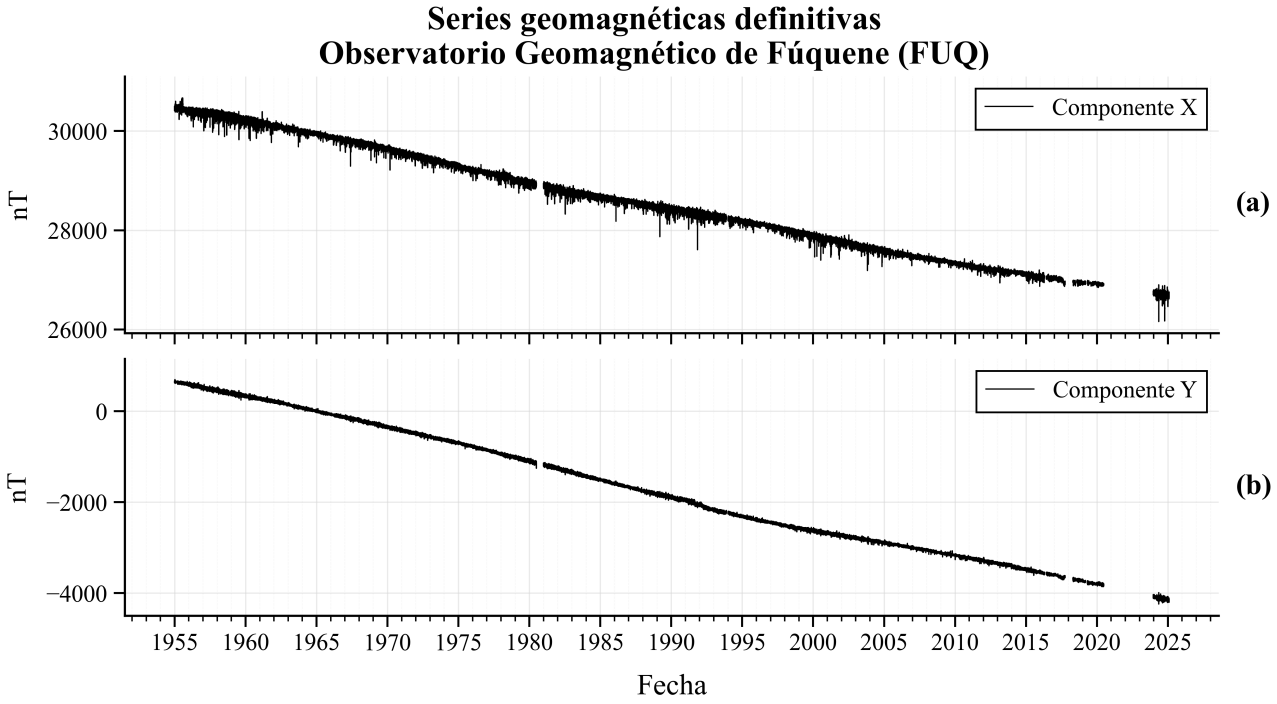


Figura 68: Series geomagnéticas depuradas e interpoladas de las componentes horizontales X (a) y Y (b) para el observatorio de Fúquene durante el periodo 1955–2025.

En la Figura 68 se evidencian las series geomagnéticas depuradas e interpoladas correspondientes a las componentes horizontales X y Y. En el caso de la componente X, la serie inicia alrededor de los 31.000 nT y finaliza cerca de los 26.000 nT, mientras que la componente Y inicia sobre los 500 nT y finaliza alrededor de los -4.000 nT. En ambas componentes se observa una tendencia de largo plazo asociada a la variación secular del campo geomagnético, además de una tendencia decreciente posiblemente relacionada con la ubicación de FUQ respecto a la Anomalía del Atlántico Sur (AAS) (Courtillot et al. 1988). Asimismo, se identifican fluctuaciones de menor escala, posiblemente asociadas a la actividad geomagnética.

Adicionalmente, se evidencia que las componentes X y Y no presentan un comportamiento equivalente, de tal manera que se observan diferencias notorias en las variaciones de menor escala. Sin embargo, en el periodo 2021–2025 ambas series tienden a mostrar un comportamiento más semejante. Estas diferencias resultan relevantes para la estimación del índice K local, dado que su cálculo depende de la determinación de las amplitudes asociadas a las perturbaciones geomagnéticas.

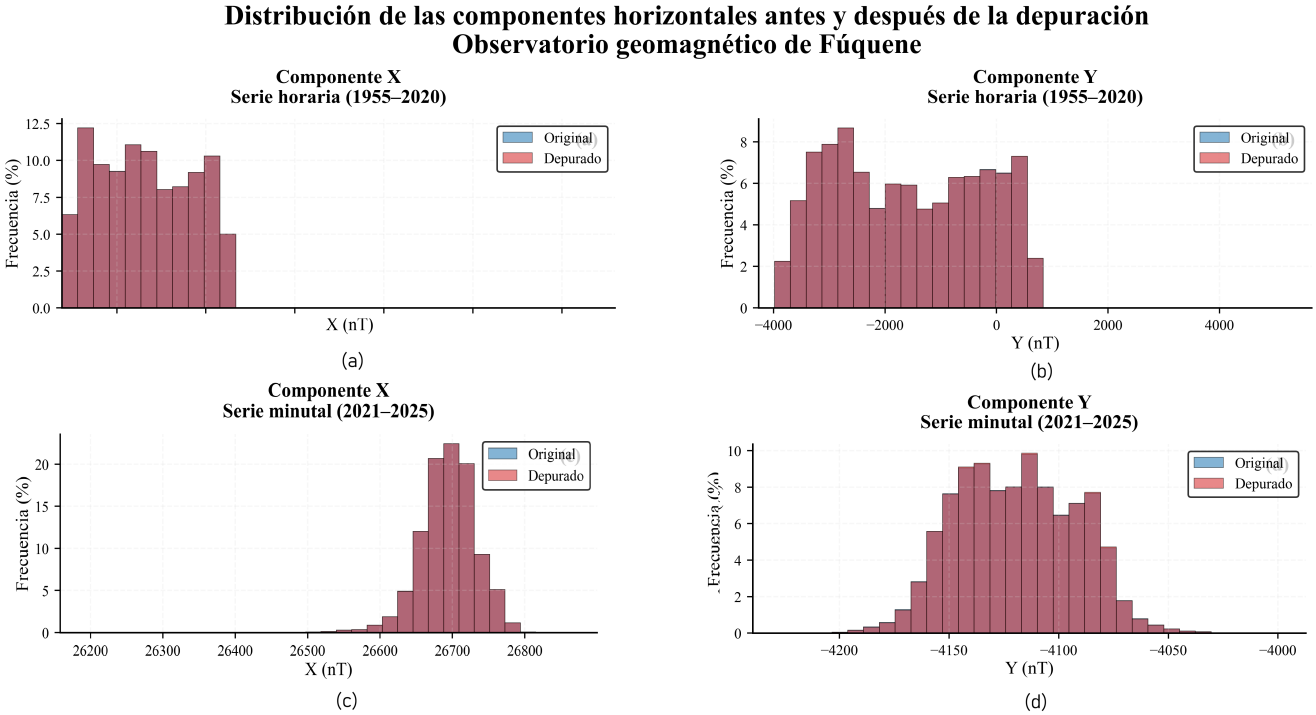


Figura 69: Distribución de frecuencia de las componentes horizontales X (izquierda) y Y (derecha) antes y después del proceso de depuración, para las series horaria (1955–2020) y minutal (2021–2025) en el observatorio geomagnético de Fúquene. Se observa una alta superposición entre las distribuciones originales y depuradas, lo que indica que la eliminación de valores atípicos no alteró de manera significativa los rangos dominantes ni la estructura general de los datos.

Por otro lado, con la finalidad de evaluar el efecto del proceso de depuración sobre las series X y Y empleadas en la estimación del índice K local, en la Figura 71 se presentan las distribuciones de frecuencia de ambas componentes antes y después de la depuración, tanto para la serie horaria como para la serie minutal. En la serie horaria, la componente X concentra la mayor parte de sus valores aproximadamente entre 27.000 y 30.500 nT, mientras que la componente Y se distribuye principalmente entre -4.000 y 500 nT. En ambos casos, la comparación entre las distribuciones original y depurada presenta discrepancias mínimas, lo que indica que la eliminación de datos atípicos produjo cambios reducidos en la distribución general de los valores.

Asimismo, en la serie minutal la componente X se concentra en valores alrededor de 26.600 y 26.750 nT, mientras que la componente Y presenta mayores frecuencias asociadas a valores entre -4.160 y -4.080 nT. En conjunto, estos resultados muestran que la depuración tuvo un efecto puntual en la remoción de valores atípicos, mas no en la modificación significativa de la distribución de los rangos dominantes de las series.

4.4.1. Curva Solar Diaria Regular SR para (FUQ)

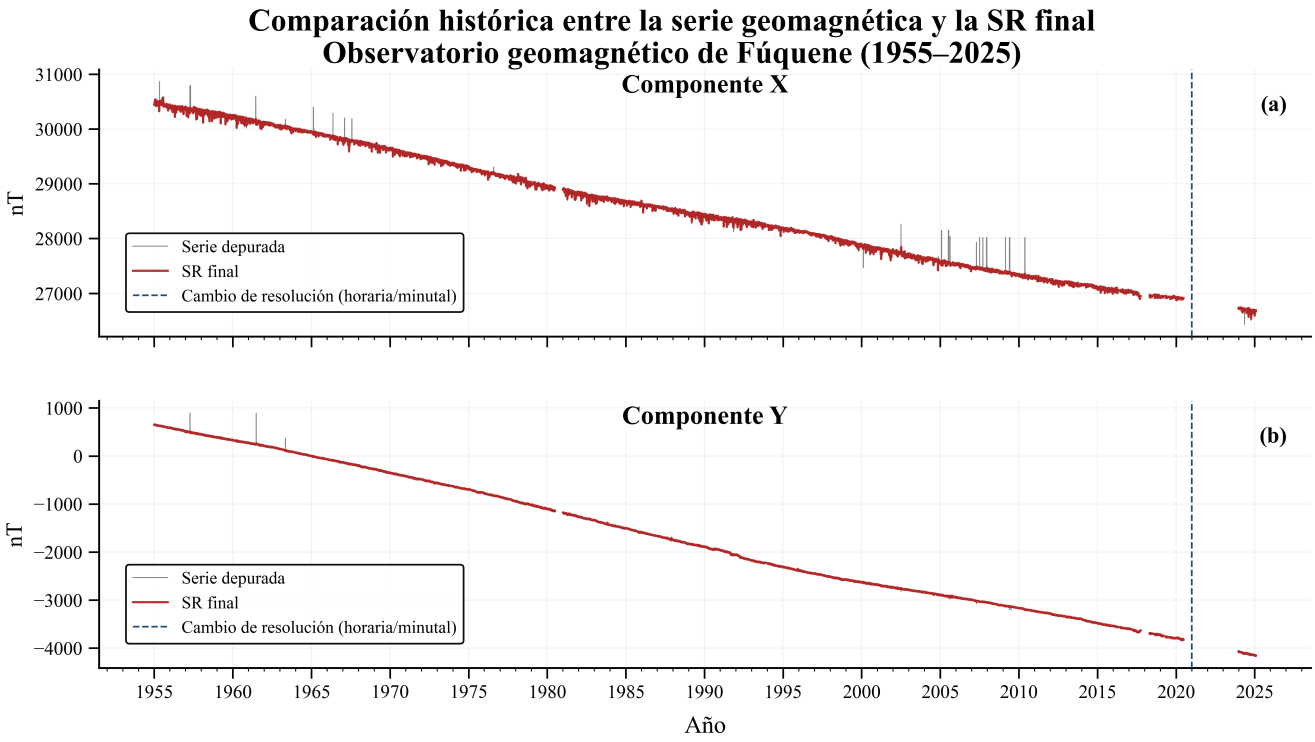


Figura 70: Comparación entre la serie geomagnética depurada y la curva de variación solar regular final (SR) para las componentes horizontales X (a) y Y (b) en el observatorio geomagnético de Fúquene durante el periodo 1955–2025.

En la Figura 70 se presenta la comparación entre la serie geomagnética depurada y la curva de variación solar regular final (SR) para las componentes horizontales X y Y en FUQ. En términos generales, ambas componentes y sus respectivas curvas SR reafirman la tendencia decreciente de largo plazo, asociada a la variación secular del campo magnético, así como a la influencia de la Anomalía del Atlántico Sur (AAS). De esta manera, los valores de la componente X disminuyen aproximadamente desde 30.500 nT hasta 26.800 nT, mientras que la componente Y presenta una variación desde valores cercanos a 500 nT hasta aproximadamente -4.100 nT.

4.4.2. Serie histórica del índice K final (FUQ)

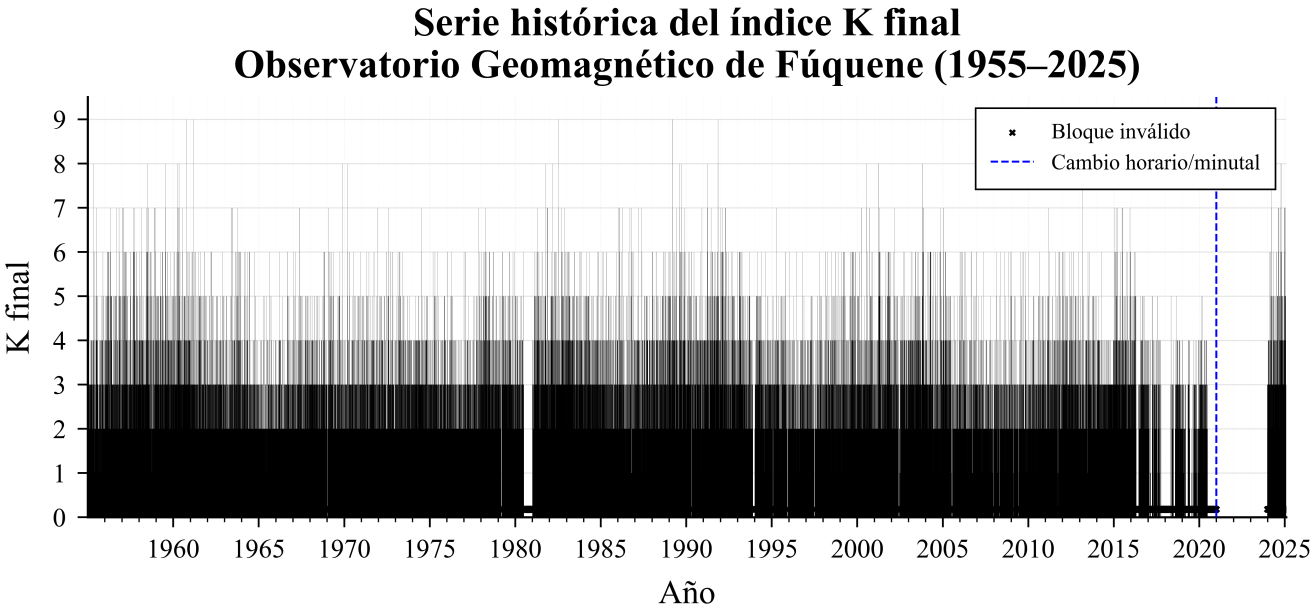


Figura 71: Serie histórica del índice K local final (K_{mixto}) para el observatorio geomagnético de Fúquene durante el periodo 1955–2025. Se evidencia un predominio de valores bajos a moderados del índice, con incrementos puntuales asociados a eventos de alta perturbación geomagnética. La línea discontinua indica la transición entre registros horarios y minutales, sin que se observen discontinuidades significativas en el comportamiento general de la serie.

Como resultado del procesamiento de las series históricas de las componentes X y Y, se obtuvo la Figura 71, en la cual se presenta la serie histórica del índice K local final (K_{mixto}) para FUQ. En términos generales, se observa un predominio de valores bajos a moderados del índice, principalmente entre 0 y 3, lo cual es consistente con la ocurrencia de condiciones geomagnéticas tranquilas durante la mayor parte del tiempo. Sin embargo, se identifican incrementos puntuales del índice que alcanzan valores de 7, 8 e incluso 9, asociados a eventos de perturbación geomagnética intensa, como tormentas geomagnéticas de alta intensidad (Akasofu et al. 1969).

Adicionalmente, hacia el final de la serie se observa la transición entre registros horarios y minutales, sin que se evidencien discontinuidades significativas en el comportamiento general del índice. Esto sugiere que el método aplicado mantiene una respuesta consistente pese al cambio en la resolución temporal de los datos de entrada.

Con el objetivo de evaluar el desempeño del índice K local histórico derivado para FUQ, se realizó un análisis detallado de su comportamiento durante eventos de alta perturbación geomagnética. Para ello, se seleccionaron tres tormentas geomagnéticas representativas a lo largo del periodo de estudio, con el fin de analizar la respuesta del índice frente a variaciones significativas del campo magnético. En particular, se compararon los resultados obtenidos a partir del enfoque mixto, en el cual el índice se asigna usando la mayor amplitud entre las componentes horizontales, con aquellos derivados de manera individual a partir de las componentes X y Y.

4.4.2.1 Tormenta del 26 de mayo de 1967:

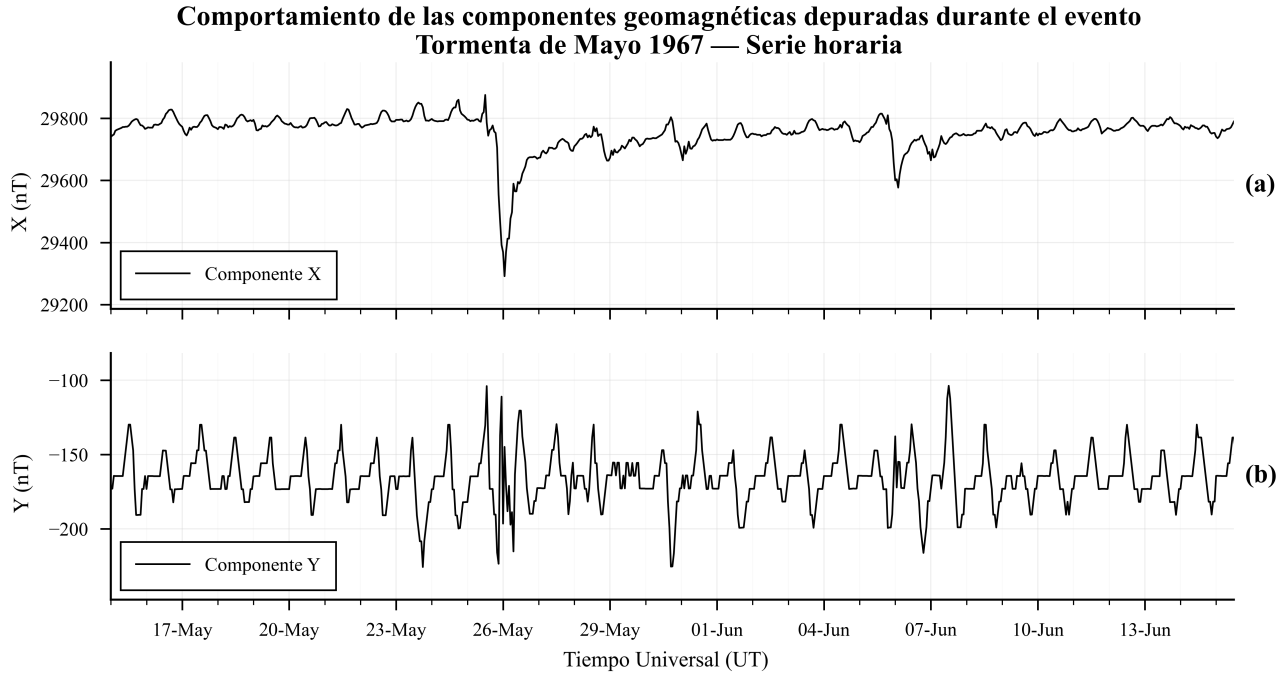


Figura 72: Comportamiento de las componentes geomagnéticas depuradas X (a) y Y (b) durante la tormenta de mayo de 1967, a partir de una serie con resolución horaria. Se observa una disminución abrupta en la componente X asociada a la fase principal del evento, junto con un aumento en la variabilidad de la componente Y, seguida de una recuperación gradual hacia condiciones más estables.

La tormenta geomagnética del 25/26 de mayo de 1967 corresponde a un evento severo asociado a una región solar altamente eruptiva, responsable de varias fulguraciones intensas registradas entre el 20 y el 23 de mayo. En consecuencia, la perturbación principal se desarrolló después de esta secuencia de eventos solares, con un tiempo de tránsito hacia la Tierra del orden de 40 a 70 horas. El evento inició con un doble *sudden storm commencement* (SSC) a las 10:19 y 12:35 UT del 25 de mayo, seguido por una intensificación sostenida de la actividad geomagnética (Akasofu et al. 1969; NOAA 2025).

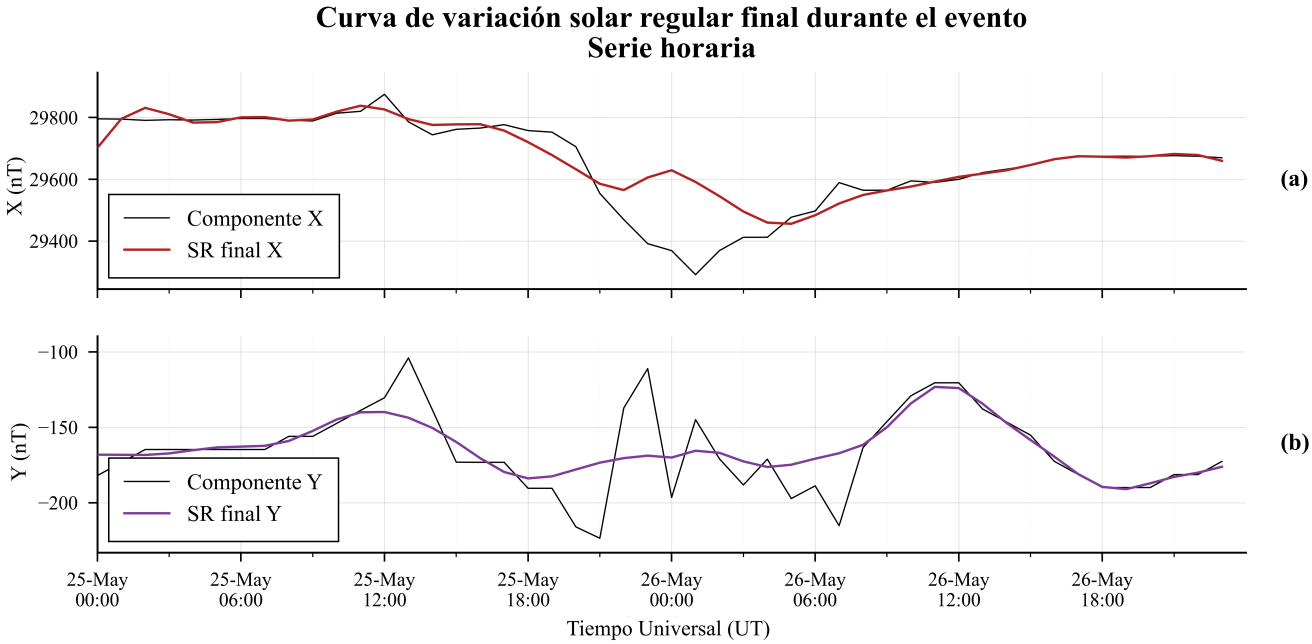


Figura 73: Comparación entre la serie geomagnética depurada y la curva de variación solar regular final (SR) para la componente X durante la tormenta del 25–26 de mayo de 1967. Se observa un buen ajuste entre ambas curvas en condiciones tranquilas, mientras que durante el evento se presentan desviaciones significativas asociadas a perturbaciones geomagnéticas de origen externo.

En la 84 en los paneles (a) y (b) se presenta la comparación entre las series depuradas de las componentes magnéticas X y Y y sus respectivas curvas de variación solar regular (SR) durante el periodo del 25–26 de mayo de 1967. En condiciones previas al evento, particularmente entre las 00:00 y las 15:00 UT del 25 de mayo, ambas componentes describen un buen ajuste con respecto a sus curvas SR, lo que indica un comportamiento estable. Sin embargo, a partir de la tarde del 25 de mayo y con mayor claridad entre las 18:00 UT del 25 de mayo y las primeras horas del 26 de mayo, durante la fase principal de la tormenta, se evidencia para la componente X la máxima desviación con respecto a la curva SR, a las 01:00 UT del 26 de mayo, con una diferencia de 299.69 nT, coincidiendo además con el valor mínimo de la serie, igual a 29 291.60 nT. En contraste, la componente Y presenta una respuesta menos intensa, con una diferencia máxima de 57.68 nT a las 23:00 UT del 25 de mayo y un mínimo de -223.50 nT a las 21:00 UT del mismo día.

Haciendo un análisis estadístico, la componente X presenta una diferencia absoluta media de 39.99 nT respecto a la curva SR, con una desviación estándar de 75.98 nT, mientras que en la componente Y la diferencia absoluta media es de 10.78 nT y la desviación estándar de 18.07 nT. De la misma manera, en la componente X la diferencia supera los 10 nT durante el 54.17 % del tiempo analizado, los 25 nT durante el 33.33 % y los 50 nT durante el 20.83 %. Para la componente Y, estos porcentajes se reducen a 29.17 %, 14.58 % y 4.17 %, respectivamente. En conjunto, estos resultados evidencian que la perturbación geomagnética afectó con mayor intensidad a la componente X, mientras que la componente Y mostró una respuesta más moderada frente a la perturbación.

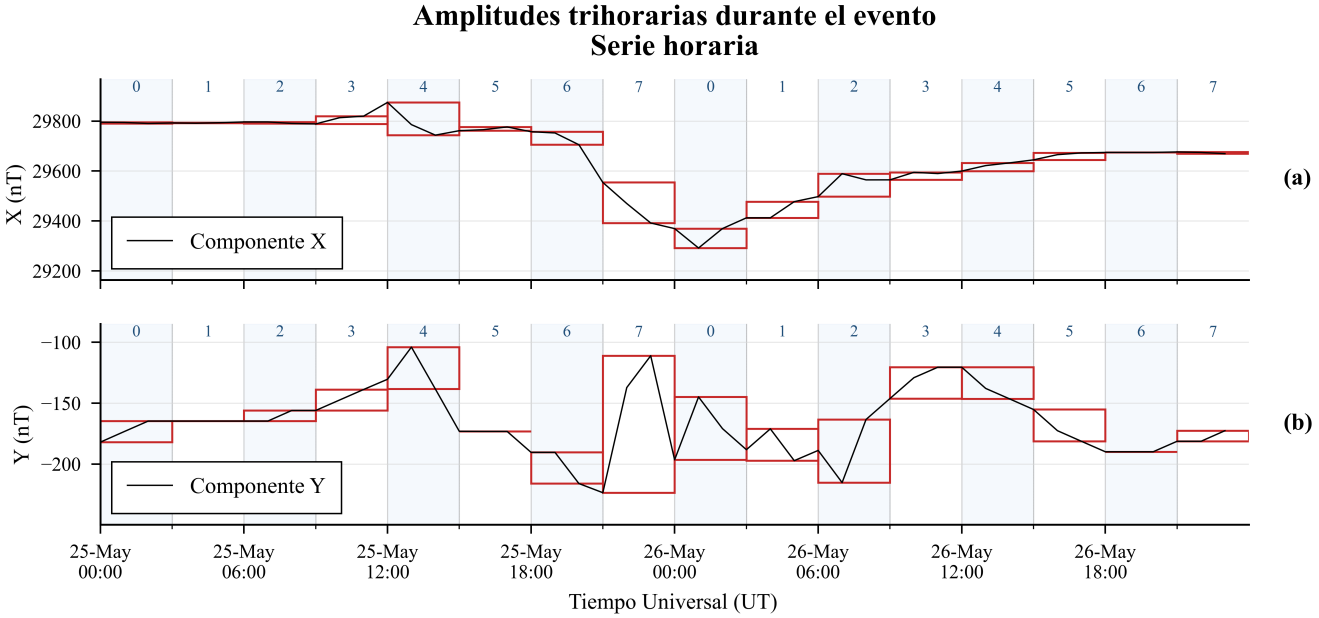


Figura 74: Amplitudes trihorarias calculadas durante la tormenta geomagnética del 25–26 de mayo de 1967 en FUQ, para las componentes horizontales (a) X y (b) Y, a partir de la serie horaria. Los rectángulos rojos representan las amplitudes máximas por intervalo trihorario utilizadas en la estimación del índice K. Se observa una mayor variabilidad en la componente X, con amplitudes más elevadas respecto a la componente Y, especialmente durante la fase principal del evento.

La Figura 74, en sus paneles (a) y (b), muestra las amplitudes trihorarias de cada bloque dispuesto para las componentes X y Y durante el periodo de tormenta del 25 al 26 de mayo de 1967. En ambos casos se observa que las amplitudes aumentan progresivamente hacia el final del 25 de mayo, de tal manera que alcanzan sus valores máximos en el intervalo correspondiente a las 21:00 UT del 25 de mayo, lo que coincide con la fase de intensificación de la tormenta.

En el caso específico de la componente X, la amplitud máxima alcanza 162.40 nT a las 21:00 UT del 25 de mayo, mientras que la amplitud media es de 47.11 nT y la desviación estándar de 46.49 nT. Estos valores evidencian una alta variabilidad temporal y una respuesta intensa de la componente frente a las perturbaciones geomagnéticas. Por su parte, la componente Y presenta una amplitud máxima de 112.40 nT, también a las 21:00 UT del 25 de mayo, con una amplitud media de 26.98 nT y una desviación estándar de 27.23 nT. Aunque esta componente reproduce una evolución similar del evento, sus amplitudes son significativamente menores en comparación con la componente X, lo que confirma que la perturbación se manifiesta con mayor intensidad en esta última.

Como comparación entre ambas, la amplitud máxima de X supera en aproximadamente 50.00 nT a la de Y, mientras que la amplitud media de X es casi 1.75 veces mayor que la de Y. Esto indica que, durante esta tormenta, la componente X concentra una mayor proporción de la variabilidad perturbada del campo geomagnético.

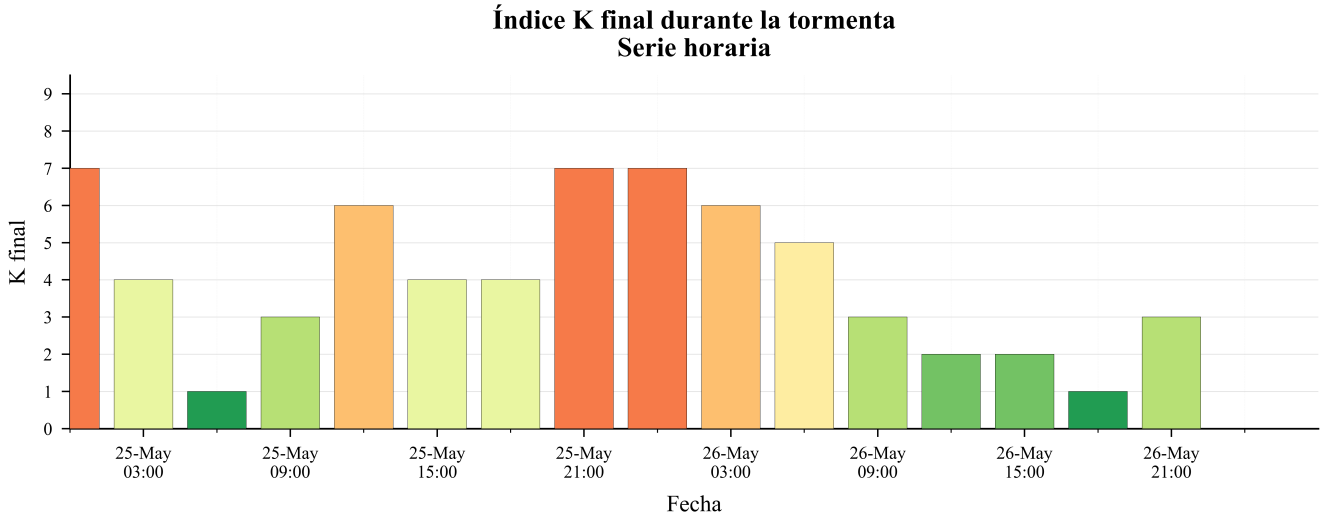


Figura 75: Evolución temporal del índice K local final (K_{mixto}) durante la tormenta geomagnética del 25–26 de mayo de 1967. Se observa un incremento significativo del índice, alcanzando valores máximos de $K = 7$, lo que indica condiciones geomagnéticas intensas en el observatorio de Fúquene.

La Figura 75 presenta la evolución temporal del índice K local para FUQ durante la tormenta del 25 al 26 de mayo de 1967. A lo largo del periodo se identifican 16 intervalos trihorarios analizados, en los cuales el índice presenta un valor medio de 4.06 y una desviación estándar $\sigma =$ 2,04, lo que indica una variabilidad importante relacionada con la intensidad de la perturbación.

En términos generales, la tormenta muestra valores bajos a moderados en el intervalo inicial, con un valor mínimo de $K = 1$, pero alcanza condiciones intensas durante la fase principal, registrando un valor máximo de $K = 7$. De acuerdo con la distribución de los valores de K, el 56.25 % de los intervalos trihorarios presentan valores de $K \geq 4$, lo que significa que más de la mitad del evento estuvo caracterizado por actividad geomagnética al menos moderadamente perturbada. Adicionalmente, el 37.50 % de los intervalos alcanzan valores de $K \geq 5$, mientras que el 31.25 % presentan valores de $K \geq 6$, lo que evidencia una proporción considerable del evento bajo condiciones geomagnéticas intensas.

En este sentido, y considerando las figuras anteriores, la evolución del índice K local resume adecuadamente la progresión del evento, desde una fase inicial de perturbación moderada hasta una fase principal intensa, seguida por una fase de recuperación gradual durante las horas posteriores.

4.4.2.2 Tormenta del 04 de agosto de 1972:

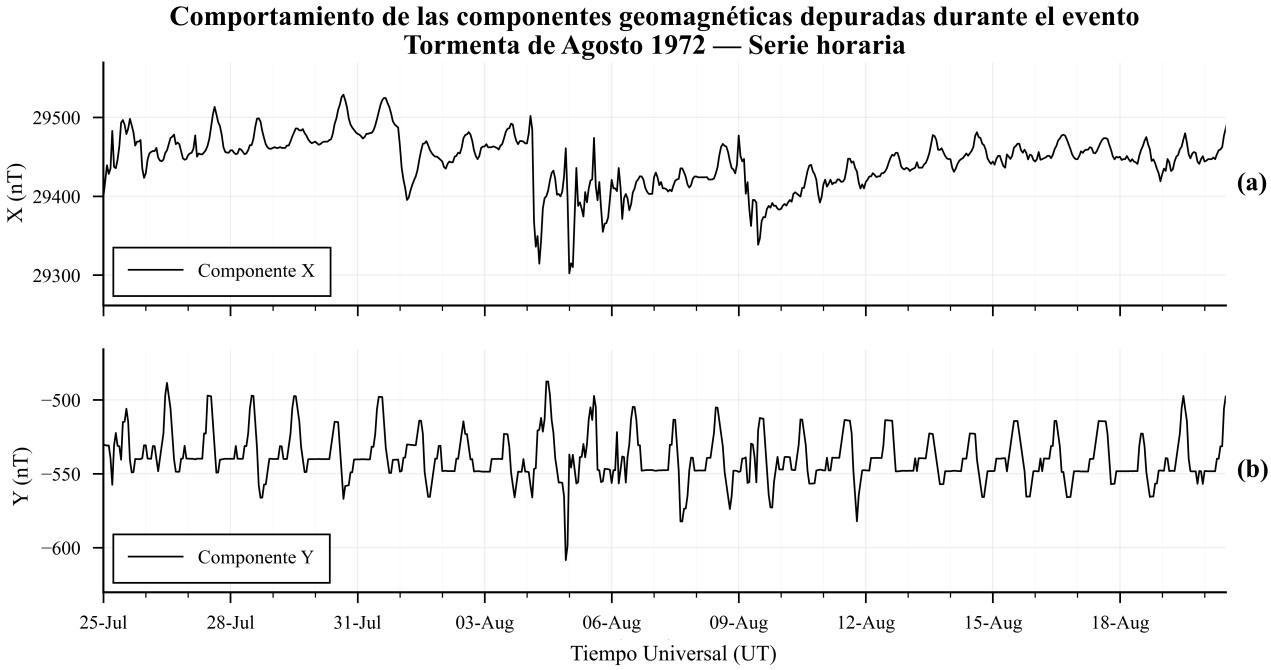


Figura 76: Comportamiento de las componentes geomagnéticas depuradas X (a) y Y (b) durante la tormenta de agosto de 1972, a partir de una serie con resolución horaria. Se observa un incremento en la variabilidad de ambas componentes durante la fase principal del evento, seguido de una recuperación progresiva hacia condiciones geomagnéticas más estables.

La tormenta geomagnética de agosto de 1972 correspondió a uno de los eventos solares de mayor intensidad del ciclo solar, asociado a una secuencia de grandes fulguraciones solares y eyecciones de masa coronal ocurridas entre el 3 y el 6 de agosto. La rápida transmisión de las perturbaciones magnéticas hacia la Tierra produjo una respuesta geomagnética severa, acompañada de avistamientos de auroras de gran intensidad, daños en las telecomunicaciones y alteraciones en sistemas tecnológicos y militares. Además, el evento generó una fuerte perturbación en la ionosfera y en la capa de plasma de la Tierra, cambios evidenciados por el satélite *ISIS 2* (Brace et al. 1974).

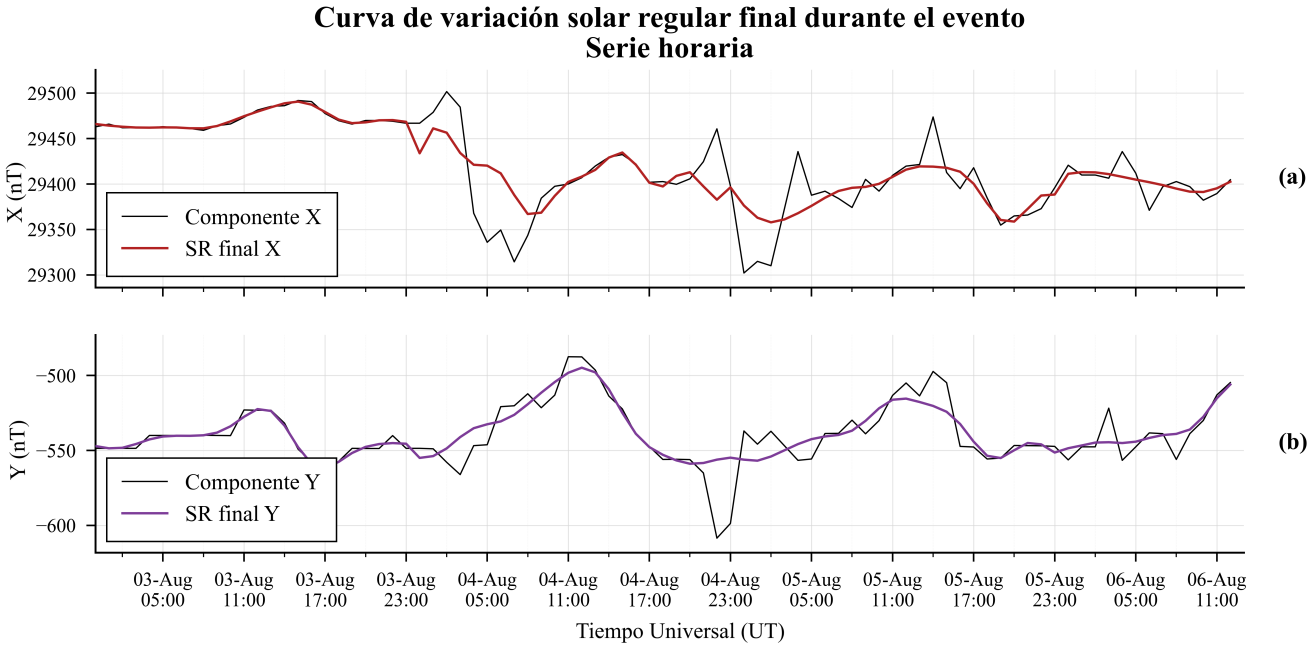


Figura 77: Comparación entre las series depuradas de las componentes X y Y y sus respectivas curvas de variación solar regular SR durante la tormenta geomagnética de agosto de 1972. Se observa un mayor desacople durante la fase principal del evento, particularmente en la componente X, seguido de una recuperación progresiva hacia condiciones geomagnéticas estables.

En la Figura 77 se muestra la comparación entre las series depuradas de las componentes X y Y, y sus correspondientes curvas SR, durante la tormenta geomagnética de agosto de 1972, que comprendido el periodo entre el 3 y el 6 de agosto (duración de 84 horas).

Durante la fase inicial, el 03 de agosto, ambas componentes muestran un comportamiento cercano a la curva SR, con desviaciones pequeñas. Sin embargo, durante la fase principal del evento, particularmente entre las 00:00 y 06:00 UT del 4 de agosto, se observa una mayor separación entre la señal observada y la curva SR, especialmente en la componente X. En este caso, la máxima desviación alcanza 84.33 nT a las 05:00 UT del 4 de agosto, mientras que la componente Y presenta una desviación máxima de 52.36 nT a las 22:00 UT del mismo día. En la fase de recuperación, entre el 5 y el 6 de agosto, ambas componentes tienden nuevamente a ajustarse a la curva SR, indicando el restablecimiento de condiciones geomagnéticas más estables.

Estadísticamente, la componente X presenta una diferencia absoluta media de 14.42 nT y una desviación estándar de 25.60 nT, mientras que la componente Y presenta valores menores de 6.66 nT y 10.95 nT, respectivamente. Asimismo, la diferencia supera los 50 nT en el 10.59 % del tiempo en X, mientras que en Y este porcentaje es apenas del 1.18 %, lo que evidencia una mayor respuesta de la componente X frente a la perturbación.

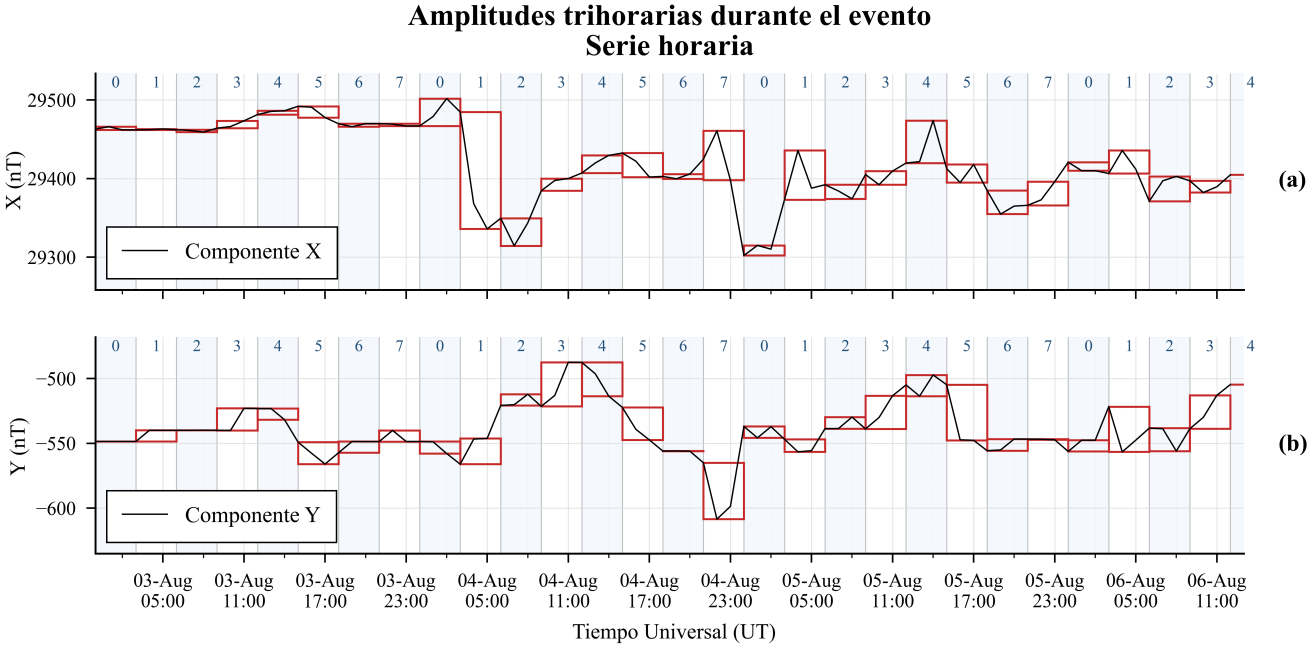


Figura 78: Amplitudes trihorarias de las componentes X y Y durante la tormenta geomagnética de agosto de 1972. Se observa un incremento significativo durante la fase principal del evento, con mayor intensidad en la componente X, seguido de una disminución progresiva en la fase de recuperación.

La Figura 78 muestra la evolución de las amplitudes trihorarias durante el evento de tormenta de agosto de 1972, donde se evidencia un incremento progresivo desde la fase inicial hasta alcanzar su valor máximo durante la fase principal, el 4 de agosto en horas de la madrugada. Sin embargo, durante la fase de recuperación, ambas componentes retornan progresivamente a valores cercanos a los niveles base.

La componente X presenta una amplitud máxima de 148.70 nT a las 03:00 UT del 4 de agosto, con una amplitud media de 29.54 nT y una desviación estándar de 28.14 nT, lo que indica una variabilidad significativa durante el evento. Por su parte, la componente Y alcanza una amplitud máxima de 43.50 nT a las 21:00 UT del mismo día, con una media de 15.77 nT y una desviación estándar de 12.14 nT. A modo de comparación, la amplitud máxima de X es aproximadamente 3.4 veces mayor que la de Y, lo que confirma que la perturbación geomagnética se manifiesta con mayor intensidad en la componente X.

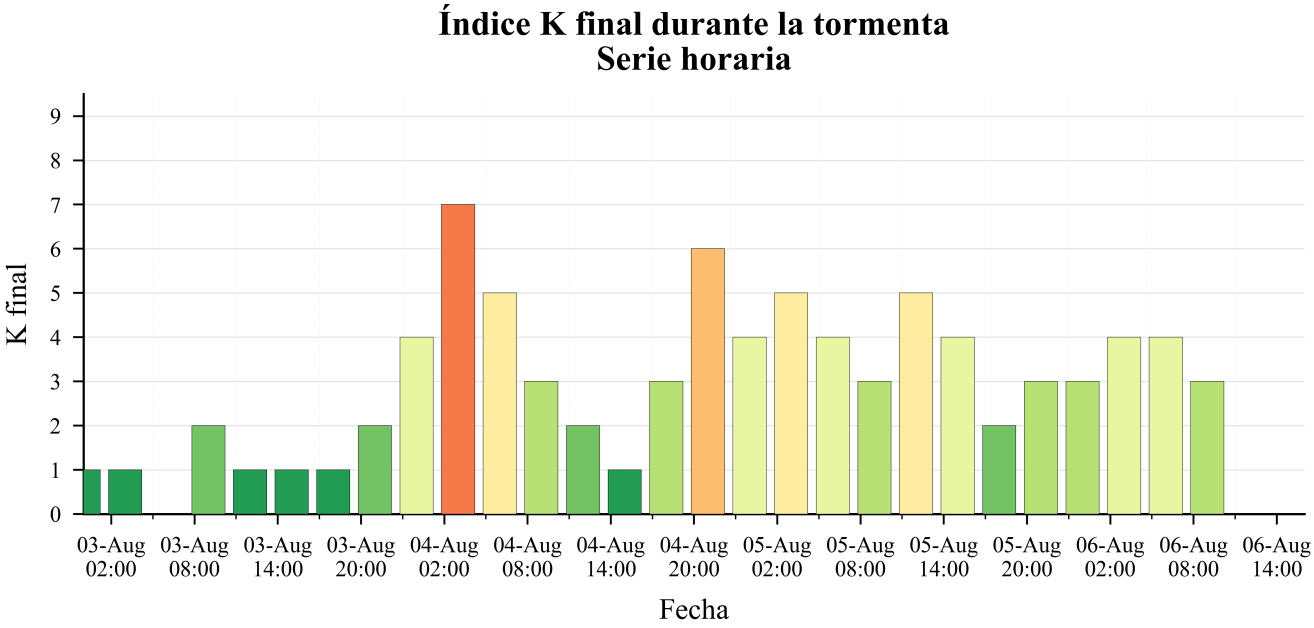


Figura 79: Amplitudes trihorarias de las componentes X y Y durante la tormenta geomagnética de agosto de 1972. Se observa un incremento significativo durante la fase principal del evento, con mayor intensidad en la componente X, seguido de una disminución progresiva en la fase de recuperación.

La Figura 79 presenta la evolución del índice K local durante la tormenta geomagnética de agosto de 1972. En general, se identificaron condiciones de actividad geomagnética bajas a moderadas, con valores medios de $K = 2{,}96$ y una desviación estándar $\sigma = 1{,}72$, lo que indica una variabilidad moderada a lo largo del periodo.

Durante la fase inicial predominan valores bajos ($K = 0$–2), mientras que en la fase principal del evento, desarrollada el 4 de agosto, se alcanza un valor máximo de $K = 7$ a las 03:00 UT, indicando condiciones de tormenta geomagnética intensa. Desde el punto de vista estadístico, el 38.82 % de los intervalos presentan valores de $K \geq 4$, el 17.65 % alcanzan $K \geq 5$ y el 7.06 % presentan $K \geq 6$, lo que evidencia que, aunque el evento incluye episodios intensos, estos no dominan la totalidad del periodo analizado.

Finalmente, durante la fase de recuperación entre el 5 y el 6 de agosto, se observa una disminución progresiva hacia valores bajos ($K = 0$–3), indicando el restablecimiento gradual de condiciones geomagnéticas más estables.

4.4.2.3 Tormenta de Halloween del 2003:

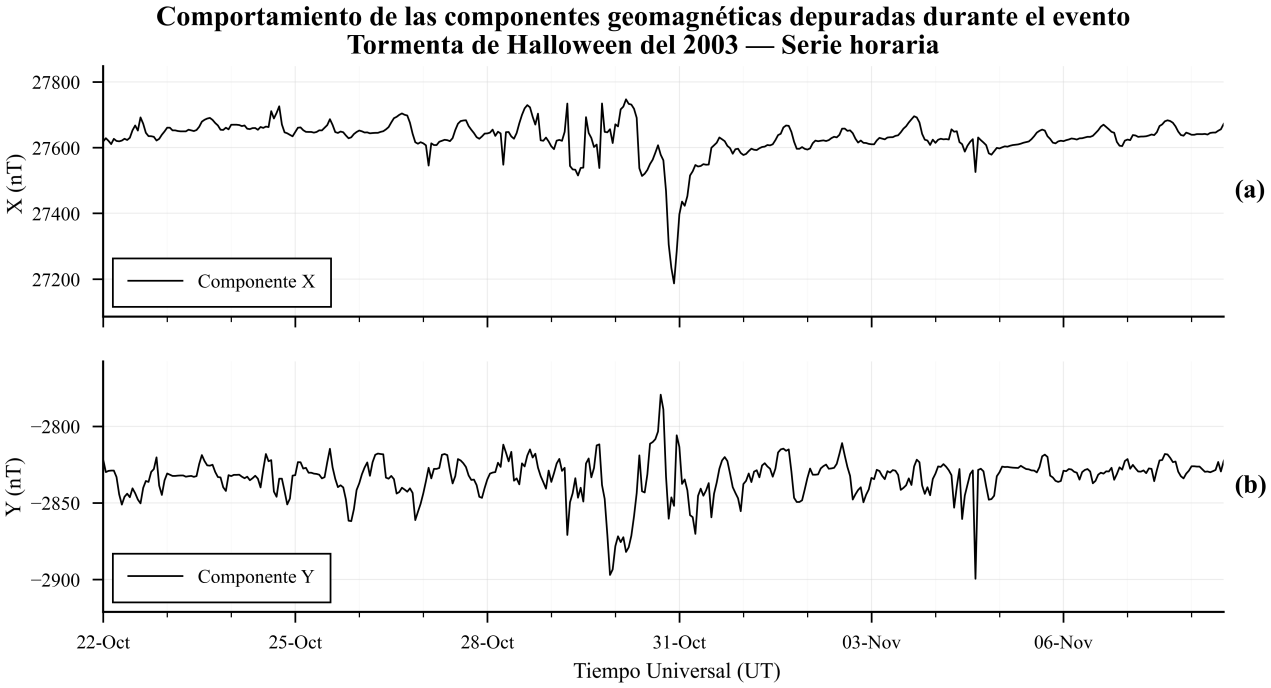


Figura 80: Comportamiento de las componentes geomagnéticas depuradas X (a) y Y (b) durante la tormenta de Halloween de 2003, utilizando una serie con resolución horaria. Se identifican perturbaciones significativas en ambas componentes durante la fase principal, con mayor amplitud en la componente X, y una recuperación progresiva posterior.

La tormenta geomagnética ocurrida entre octubre y noviembre de 2003, también conocida como *Halloween Storm*, corresponde a una secuencia de eventos asociados a variaciones en regiones de manchas solares activas de carácter altamente eruptivo, responsables de al menos 17 fulguraciones registradas entre el 19 de octubre y el 5 de noviembre de 2003. En particular, las fulguraciones de los días 28 y 29 de octubre, clasificadas como X17/4B y X10/2B, estuvieron acompañadas por eyecciones de masa coronal de muy alta velocidad, cuyos choques alcanzaron la Tierra y produjeron dos de las tormentas geomagnéticas más intensas del ciclo solar 23. En consecuencia, se registró una intensificación extrema de la actividad geomagnética, con afectaciones significativas sobre distintos sistemas tecnológicos (C.-C. Wu et al. 2005).

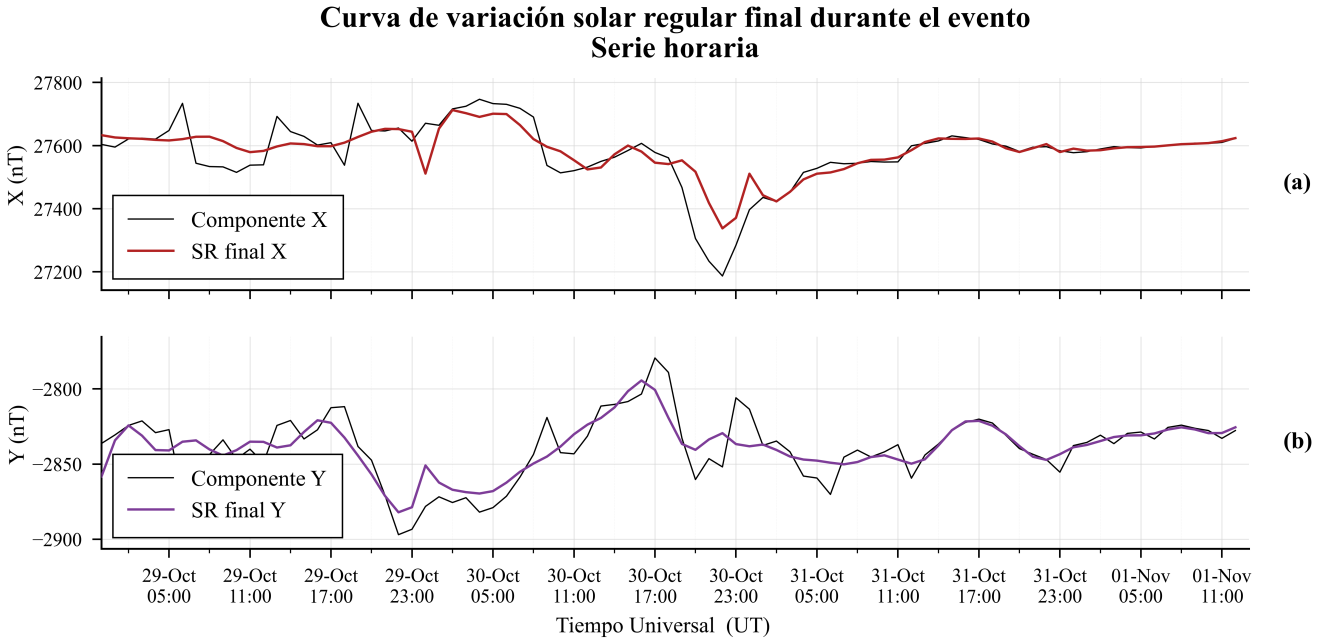


Figura 81: Comparación entre la serie geomagnética depurada y la curva de variación solar regular final (SR) para la componente X durante la tormenta del 25–26 de mayo de 1967. Se observa un buen ajuste entre ambas curvas en condiciones tranquilas, mientras que durante el evento se presentan desviaciones significativas asociadas a perturbaciones geomagnéticas de origen externo.

En La Figura 81 se presenta la comparación entre las series depuradas de las componentes X y Y, y sus correspondientes curvas SR durante el evento conocido como tormenta de Halloween, comprendido entre el 29 de octubre y el 1 de noviembre de 2003 (duración de 84 horas). Durante la fase inicial (00:00–18:00 UT del 29 de octubre), ambas componentes muestran un comportamiento cercano a la curva SR, con desviaciones mínimas; sin embargo, durante la fase principal, entre las 18:00 UT del 30 de octubre y las 00:00 UT del 31 de octubre, se evidencia una tendencia a la separación entre las componentes y la curva SR.

En la componente X, la máxima desviación con respecto a la curva SR alcanza 211.54 nT a las 20:00 UT del 30 de octubre, coincidiendo con el desarrollo del mínimo absoluto (27 186.80 nT a las 22:00 UT). A diferencia de esto, la componente Y presenta un valor de desviación máxima mucho menor, de 35.77 nT, registrado a las 06:00 UT del 29 de octubre. Estadísticamente, X presenta una diferencia absoluta media de 33.28 nT y una desviación estándar de 55.23 nT, mientras que Y presenta valores de 8.74 nT y 12.03 nT, respectivamente. En consecuencia, la diferencia supera los 50 nT en el 23.53 % del tiempo en X, mientras que en Y este porcentaje es nulo, lo que confirma una mayor sensibilidad de la componente X ante la perturbación geomagnética.

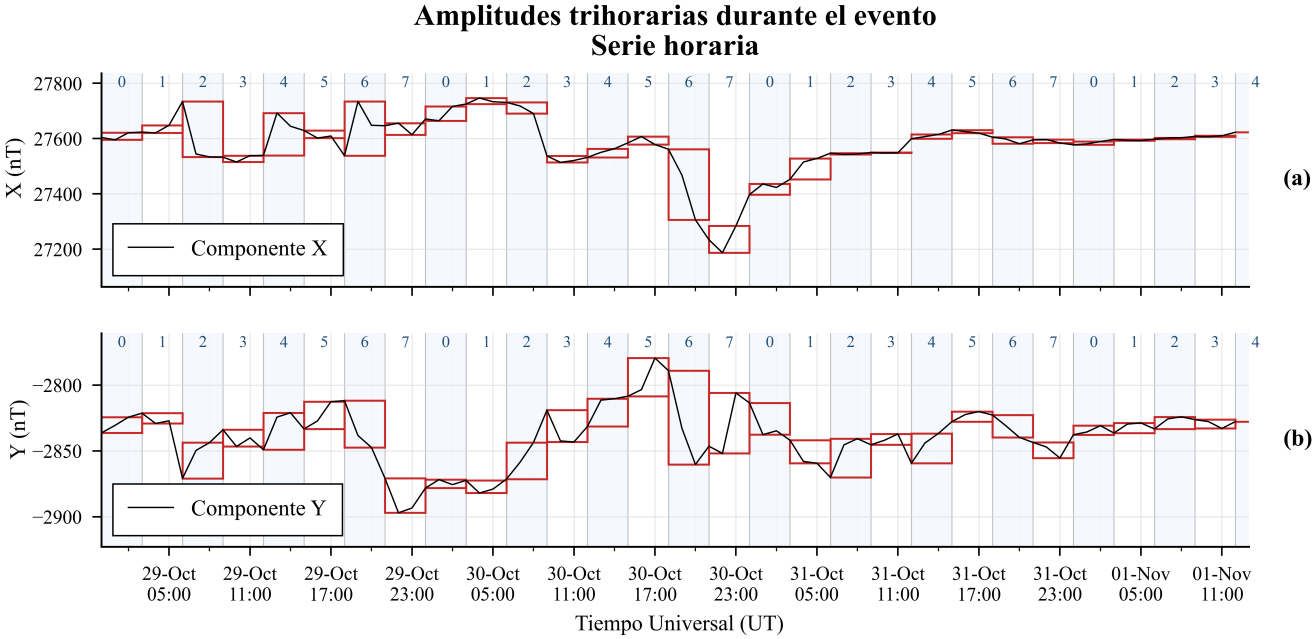


Figura 82: Comparación entre la serie geomagnética depurada y la curva de variación solar regular final (SR) para la componente X durante la tormenta del 25–26 de mayo de 1967. Se observa un buen ajuste entre ambas curvas en condiciones tranquilas, mientras que durante el evento se presentan desviaciones significativas asociadas a perturbaciones geomagnéticas de origen externo.

La Figura 82 muestra la evolución de las amplitudes trihorarias durante el evento de la tormenta de Halloween, evidenciando un incremento progresivo desde la fase inicial hasta alcanzar su fase principal, específicamente el 30 de octubre en horas de la tarde. Durante la fase de recuperación (31 de octubre–1 de noviembre), ambas componentes muestran una disminución progresiva de las amplitudes, retornando a valores cercanos a los de referencia.

La componente X presentó una amplitud máxima de 255.60 nT a las 18:00 UT del 30 de octubre, con una amplitud media de 53.35 nT y una desviación estándar de 64.91 nT, lo que evidencia una alta variabilidad asociada a la tormenta. Por otro lado, la componente Y alcanzó una amplitud máxima de 71.30 nT en el mismo instante, con una amplitud media de 20.44 nT y una desviación estándar de 14.07 nT. En consecuencia, se puede afirmar que la amplitud máxima de X es aproximadamente 3.6 veces mayor que la de Y, indicando que la perturbación geomagnética se manifestó predominantemente en la componente X.

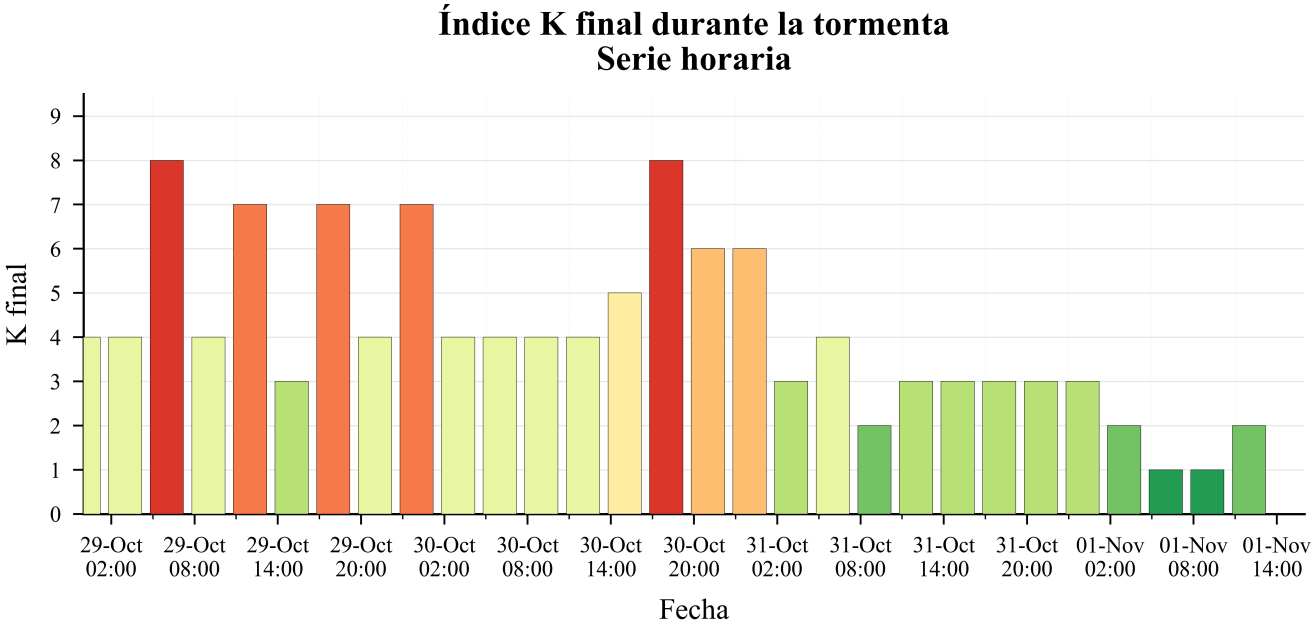


Figura 83: Comparación entre la serie geomagnética depurada y la curva de variación solar regular final (SR) para la componente X durante la tormenta del 25–26 de mayo de 1967. Se observa un buen ajuste entre ambas curvas en condiciones tranquilas, mientras que durante el evento se presentan desviaciones significativas asociadas a perturbaciones geomagnéticas de origen externo.

La Figura 83 presenta la evolución del índice K local durante el evento de la tormenta de Halloween, de tal manera que se identifican condiciones de actividad geomagnética moderada a intensa, con un valor medio de $K = 4{,}15$ y una desviación estándar $\sigma = 1{,}91$, lo que refleja una alta variabilidad a lo largo del periodo.

Durante la fase inicial del evento predominan valores bajos y moderados ($K = 1$–4), mientras que la fase principal alcanza valores máximos de $K = 8$, como por ejemplo a las 06:00 UT del 29 de octubre, indicando condiciones de tormenta severa. Un análisis estadístico muestra que el 60.00 % de los intervalos presentan valores de $K \geq 4$, el 28.24 % alcanzan $K \geq 5$ y el 24.71 % presentan $K \geq 6$, evidenciando que una proporción considerable del evento estuvo bajo condiciones de tormenta intensa.

Por último, en la fase de recuperación se observa una disminución progresiva de los valores de K, retornando a niveles bajos ($K = 1$–3), lo que indica el restablecimiento gradual de condiciones geomagnéticas más estables.

4.4.2.4 Tormenta de 10 de Octubre de 2024

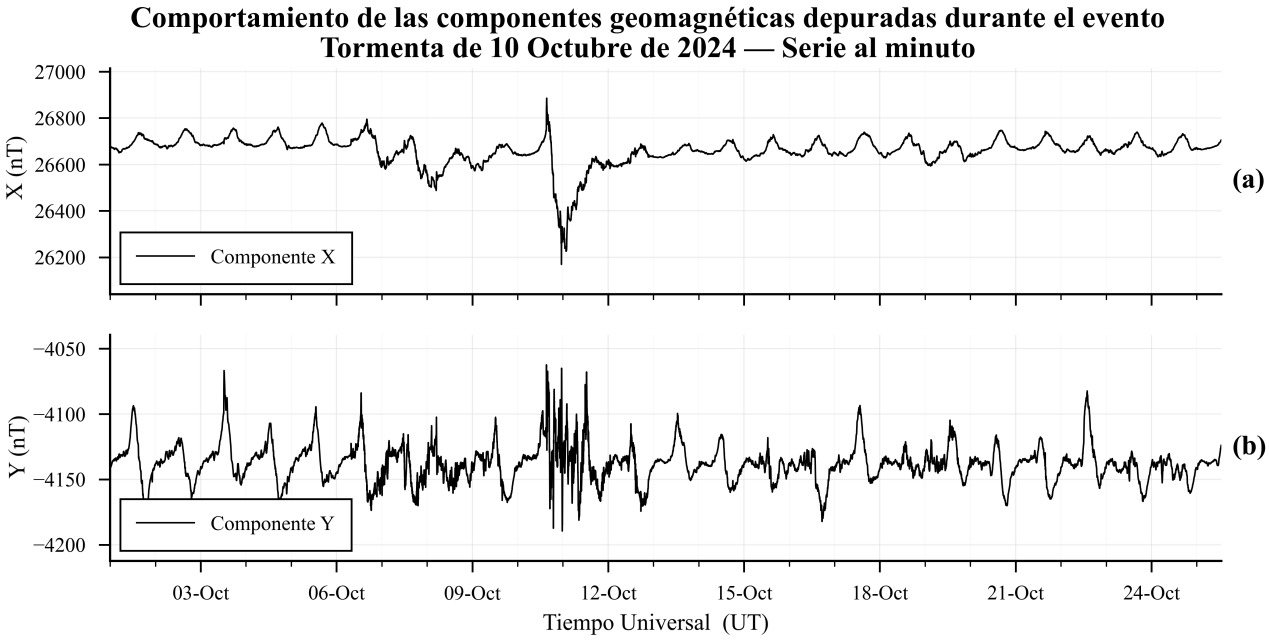


Figura 84: Comportamiento de las componentes geomagnéticas depuradas X (a) y Y (b) durante la tormenta de octubre de 2024, a partir de una serie con resolución al minuto. Se evidencia una perturbación intensa caracterizada por variaciones abruptas, especialmente en la componente X, durante la fase principal del evento, seguida de una estabilización gradual en la fase de recuperación.

La tormenta geomagnética del 8 al 11 de octubre de 2024, asociada con los mismos fenómenos que produjeron la tormenta del Día de las Madres, corresponde a uno de los episodios geomagnéticos más intensos de los últimos 20 años y a la perturbación más severa del ciclo solar 25. El evento, en su fase principal, alcanzó su intensidad máxima el 10 de octubre, con un valor de Dst = -335 nT, y estuvo precedido por una tormenta inicial el 8 de octubre con Dst = -135 nT. De acuerdo con las observaciones analizadas, el evento produjo un incremento en la ionización de la atmósfera a la llegada de las perturbaciones, seguido de disminuciones rápidas y generalizadas, con valores anómalamente bajos (Pierrard et al. 2025).

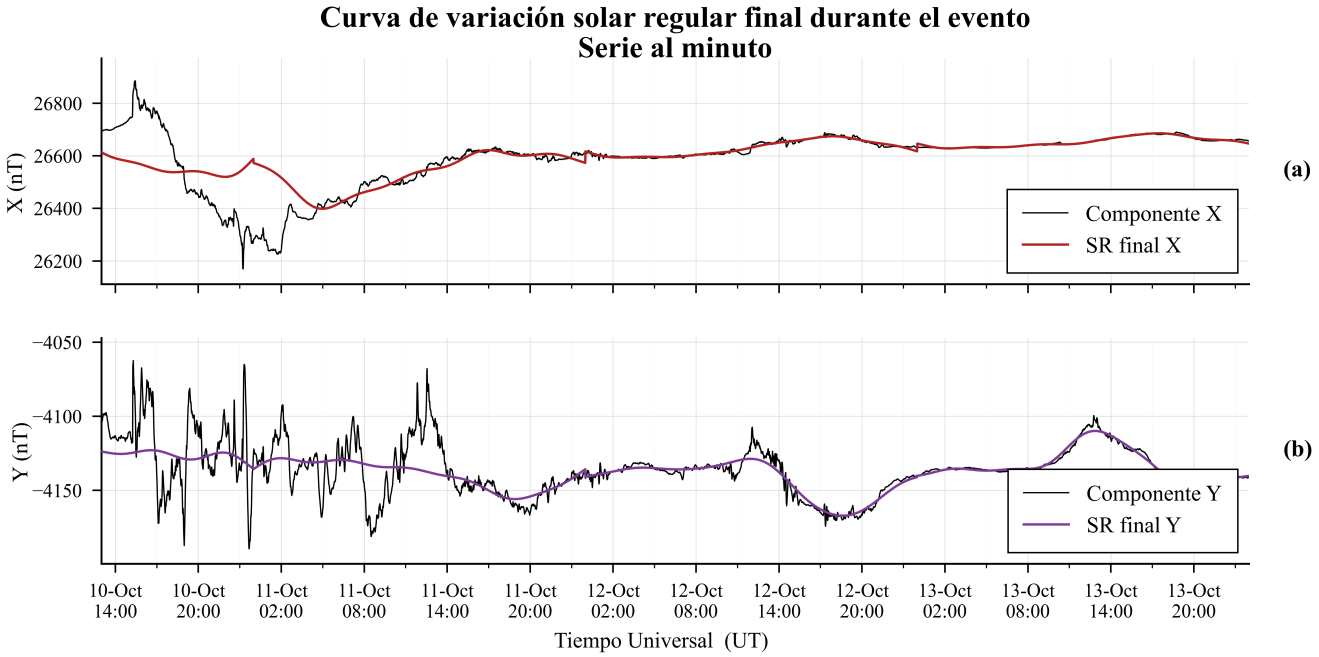


Figura 85: Comparación entre las series depuradas de las componentes X (a) y Y (b) y sus respectivas curvas de variación solar regular (SR) durante la tormenta geomagnética de octubre de 2024, para el intervalo comprendido entre el 10 y el 13 de octubre. Se observa una mayor separación entre la señal observada y la curva SR durante la fase principal del evento, especialmente en la componente X, seguida de una recuperación progresiva hacia condiciones más estables.

La Figura 85 presenta una comparación entre las series depuradas de las componentes X y Y y sus correspondientes curvas SR, durante la tormenta ocurrida entre el 10 y el 13 de octubre de 2024 (con una duración de 82.98 horas). Durante la fase inicial del evento, entre las 13:00 UT y las primeras horas del 10 de octubre, ambas componentes muestran un distanciamiento progresivo con respecto a la curva SR, fenómeno que se intensifica hacia la fase principal o pico de la tormenta. En la componente X, la máxima desviación respecto a la curva SR alcanza 379.91 nT a las 23:14 UT del 10 de octubre, coincidiendo además con el mínimo absoluto de la serie, igual a 26 169.52 nT. En contraste, la componente Y presenta una respuesta menos intensa, con una desviación máxima de 69.69 nT a las 12:33 UT del 11 de octubre.

Estadísticamente, la componente X presenta una diferencia absoluta media de 35.80 nT y una desviación estándar de 78.09 nT, mientras que la componente Y registra valores considerablemente menores, con una diferencia absoluta media de 7.15 nT y una desviación estándar de 12.86 nT. Asimismo, la diferencia supera los 50 nT durante el 17.41 % del tiempo en X, mientras que en Y este porcentaje corresponde únicamente al 0.78 %, lo que evidencia una mayor sensibilidad de la componente X frente a las perturbaciones. Por último, en la fase de recuperación, entre el 12 y el 13 de octubre, ambas componentes muestran una tendencia a aproximarse a su curva SR, indicando el restablecimiento de las condiciones geomagnéticas estables.

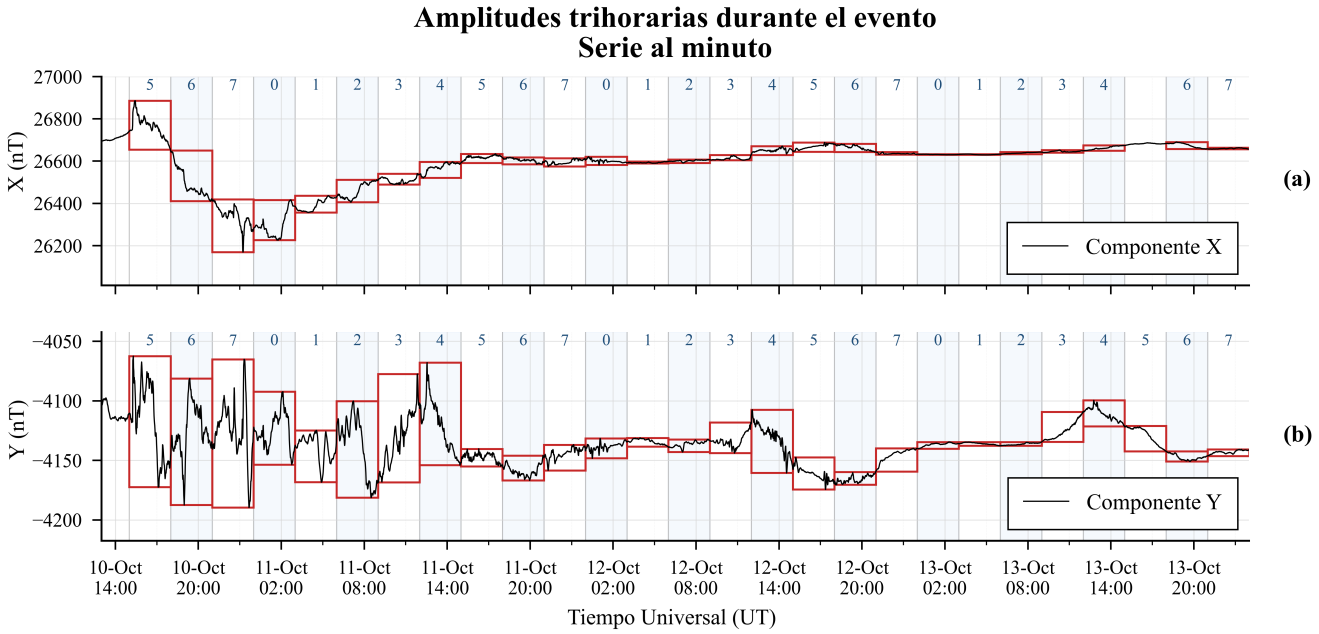


Figura 86: Amplitudes trihorarias calculadas para las componentes X (a) y Y (b) durante la tormenta geomagnética de octubre de 2024, a partir de la serie al minuto. Los recuadros rojos representan los intervalos trihorarios utilizados en la estimación del índice K. Se observa un incremento marcado de las amplitudes durante la fase principal del evento, con mayor intensidad en la componente X.

La Figura 86 muestra la evolución temporal de las amplitudes trihorarias durante la tormenta de octubre de 2024, evidenciando un incremento significativo desde la fase inicial de la tormenta hasta alcanzar los mayores valores durante la fase principal del evento, específicamente el 10 de octubre en horas de la noche. En la componente X, la amplitud máxima alcanza 249.35 nT a las 21:00 UT del 10 de octubre, con una amplitud media de 66.88 nT y una desviación estándar de 73.89 nT, lo que indica una alta variabilidad temporal y una respuesta intensa. Por su parte, la componente Y presenta una amplitud máxima de 124.44 nT en el mismo instante, con una amplitud media de 37.96 nT y una desviación estándar de 36.42 nT.

Comparando ambas componentes, la amplitud máxima de X es aproximadamente 2 veces mayor que la de Y, mientras que la amplitud media de X también supera claramente a la de Y. Esto indica que, durante esta tormenta, la mayor proporción de la perturbación geomagnética se manifestó en X.

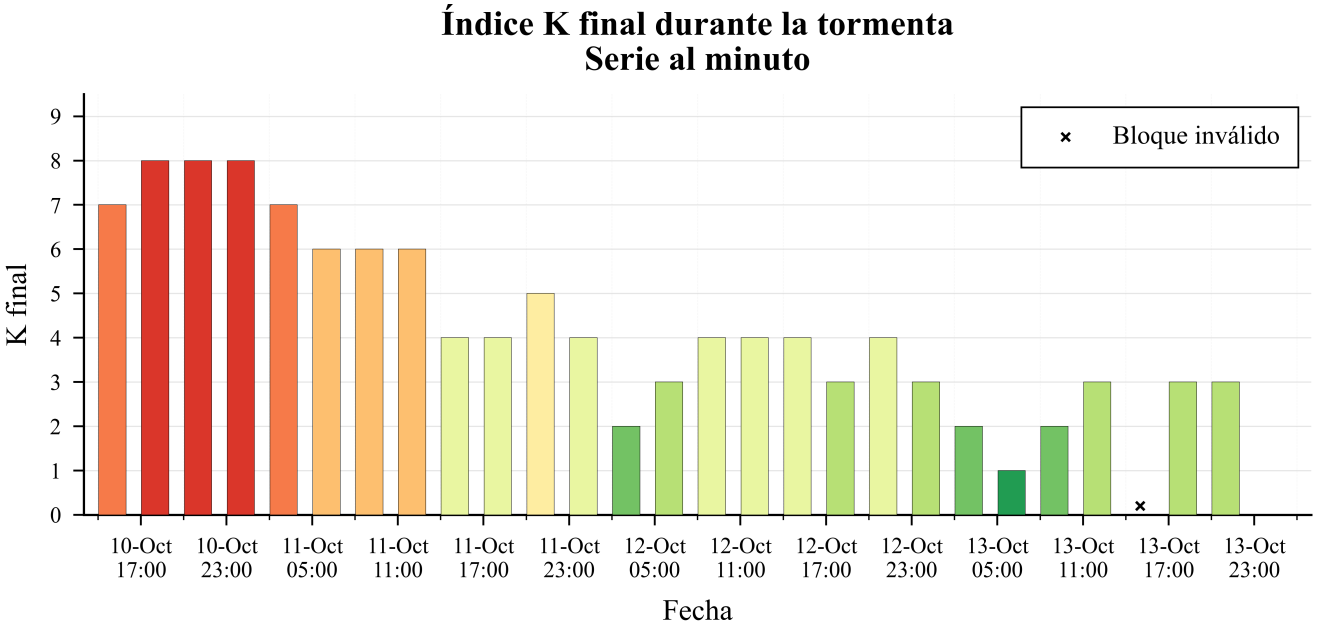


Figura 87: Evolución temporal del índice K local final durante la tormenta geomagnética de octubre de 2024, calculado a partir de la serie al minuto. Se evidencia una fase principal de alta actividad geomagnética con valores máximos de $K = 8$, seguida de una disminución progresiva del índice durante la fase de recuperación. El símbolo $\times$ indica un bloque inválido.

La Figura 87 presenta la evolución temporal del índice K local durante la tormenta de octubre de 2024. De manera general, se identifican condiciones de actividad geomagnética moderada a alta, con un valor medio de $K = 4{,}38$ y una desviación estándar $\sigma = 1{,}98$, lo que indica una variabilidad importante a lo largo del evento. Durante la fase inicial predominan valores moderados a altos, y la fase principal alcanza un valor máximo de $K = 8$ a las 18:00 UT del 10 de octubre, indicando condiciones de tormenta severa. Por su parte, en la fase de recuperación se observa una disminución progresiva de la actividad hacia valores bajos a moderados ($K = 1$–4), indicando el restablecimiento gradual de condiciones geomagnéticas más estables.

Desde el punto de vista estadístico, el 61.54 % de los intervalos presentan valores de $K \geq 4$, el 34.62 % alcanzan $K \geq 5$ y el 30.77 % presentan $K \geq 6$, lo que evidencia que una fracción importante del evento se desarrolló bajo condiciones intensas.

4.4.3. Comparación del índice K local con Kp histórico

Con la finalidad de evaluar la consistencia del índice K local estimado en el observatorio de Fúquene (FUQ), se realizó una comparación con el índice planetario K_p reportado por Helmholtz Centre for Geosciences (GFZ), tanto a escala histórica como durante eventos de tormentas geomagnéticas. Esta comparación se llevó a cabo mediante el análisis de la correlación lineal, el error cuadrático medio (RMSE) y el sesgo (bias), permitiendo cuantificar el grado de concordancia entre ambos índices.

Es importante destacar que el índice planetario K_p constituye uno de los principales indicadores globales de la actividad geomagnética, calculado a partir de los valores K locales de 13

observatorios distribuidos en latitudes subaurorales, es decir, entre los 40° y 55° de latitud geomagnética corregida (CGM), lo que le confiere un carácter planetario y representativo de las perturbaciones a gran escala del campo magnético (Matzka et al. 2021; Geosciences - GFZ s.f.). Debido a su estandarización, continuidad temporal y amplia aceptación en la comunidad científica, el índice K_p se utiliza como referencia para evaluar el desempeño del índice K local estimado para FUQ.

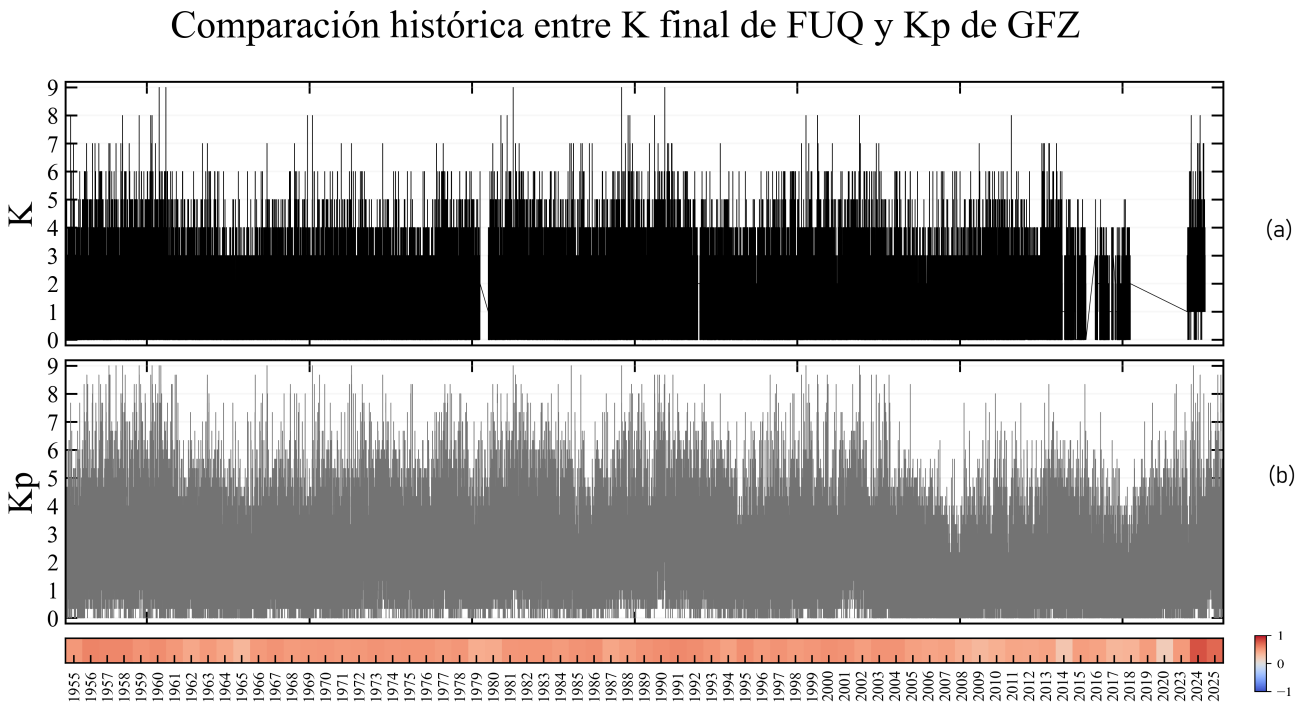


Figura 88: Mapa de calor de la correlación anual entre el índice K local de FUQ y el índice planetario K_p de GFZ para el periodo 1955–2025. Se observa una correlación moderada en la mayoría de los años, con valores típicos entre 0.42 y 0.60, evidenciando limitaciones asociadas al uso de datos horarios. En años recientes, se identifican incrementos en la correlación, asociados al uso de datos de mayor resolución temporal.

La Figura 92 presenta la comparación global entre el índice K de FUQ y el índice planetario K_p de GFZ, evidenciando patrones relacionados con la resolución temporal de los datos. Considerando los registros horarios a lo largo de todo el periodo histórico disponible (1955–2025), la correlación promedio anual se mantiene relativamente baja, con valores típicos entre 42 y 60 %, reflejando que las variaciones de alta frecuencia y los eventos de corta duración tienden a atenuarse en los promedios horarios. En contraste, el análisis realizado con registros al minuto muestra que la correlación entre el índice K local y K_p aumenta de manera abrupta, alcanzando valores de hasta 85 %, lo que indica que la resolución fina captura de forma más precisa la dinámica de las perturbaciones geomagnéticas.

Este comportamiento resalta la importancia de emplear series temporales de alta resolución para la validación y calibración del índice K local frente a un referente global estandarizado como K_p, y sugiere que los promedios horarios pueden subestimar la intensidad y frecuencia de los eventos de tormenta.

4.4.3.1 Comparación durante eventos de tormenta geomagnética

Con el fin de complementar la comparación global entre el índice K local de FUQ y el índice K_p de GFZ, se realizó un análisis específico durante cuatro tormentas geomagnéticas representativas. Este análisis permite evaluar la capacidad del índice local para reproducir la evolución temporal, la magnitud de los picos de actividad y las discrepancias respecto al índice planetario en condiciones extremas.

Tormenta del 26 de mayo de 1967

Durante la tormenta del 26 de mayo de 1967, se obtuvo una correlación de $r = 0{,}6697$, lo que indica una concordancia moderada entre el índice K local y el índice K_p. El RMSE fue de 1.57 unidades de K, evidenciando discrepancias relevantes en la magnitud de las perturbaciones, mientras que el sesgo negativo (bias $= -0{,}77$) indica una tendencia sistemática del índice local a subestimar los valores de K_p. Estas diferencias pueden atribuirse a la respuesta regional del campo geomagnético, así como a limitaciones en la estimación de la curva de variación solar regular ocasionada por la resolución horaria de los datos.

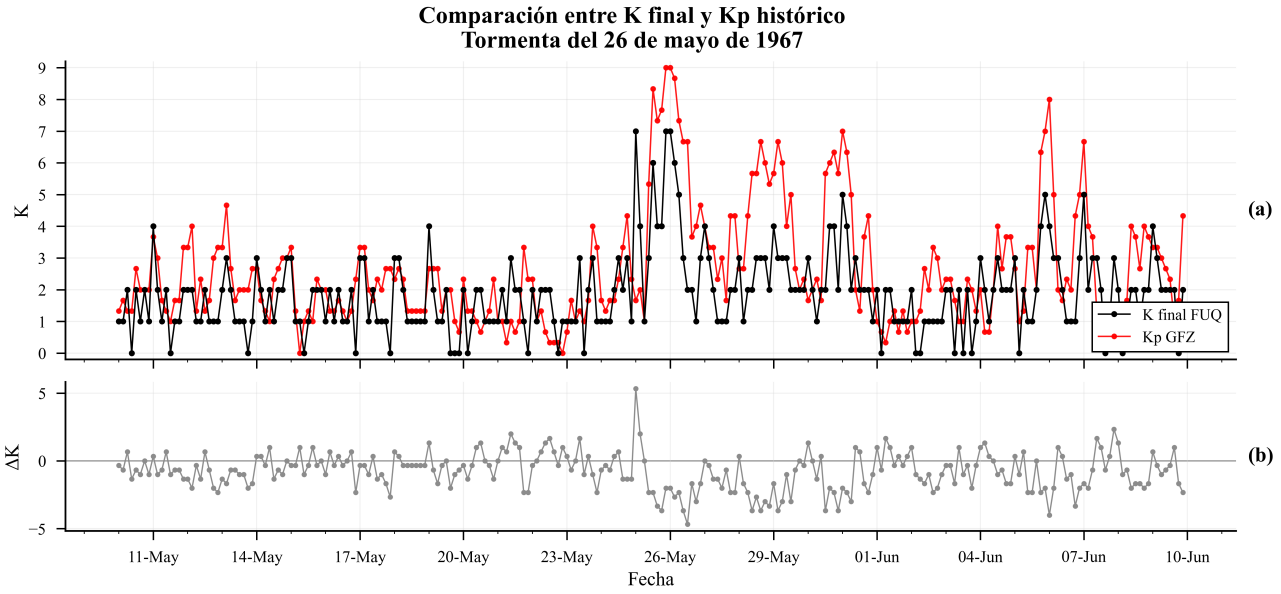


Figura 89: Comparación temporal entre el índice K local de FUQ y el índice K_p de GFZ durante la tormenta geomagnética del 26 de mayo de 1967. Se observa una concordancia moderada en la evolución del evento, aunque con una subestimación sistemática del índice local durante los picos de actividad geomagnética.

Tormenta de agosto de 1972

Para la tormenta de agosto de 1972, se obtuvo una correlación de $r = 0{,}6728$, similar a la observada en el evento de 1967, lo que sugiere una moderada capacidad del índice local para reproducir la variabilidad global. El RMSE de 1.64 unidades refleja discrepancias en la amplitud de las perturbaciones, mientras que el sesgo negativo (bias $= -0{,}86$) confirma una subestimación sistemática del índice K local respecto a K_p. Este comportamiento es consistente con la

mayor intensidad de este evento, donde los índices globales tienden a reflejar perturbaciones más extremas que las observadas localmente.

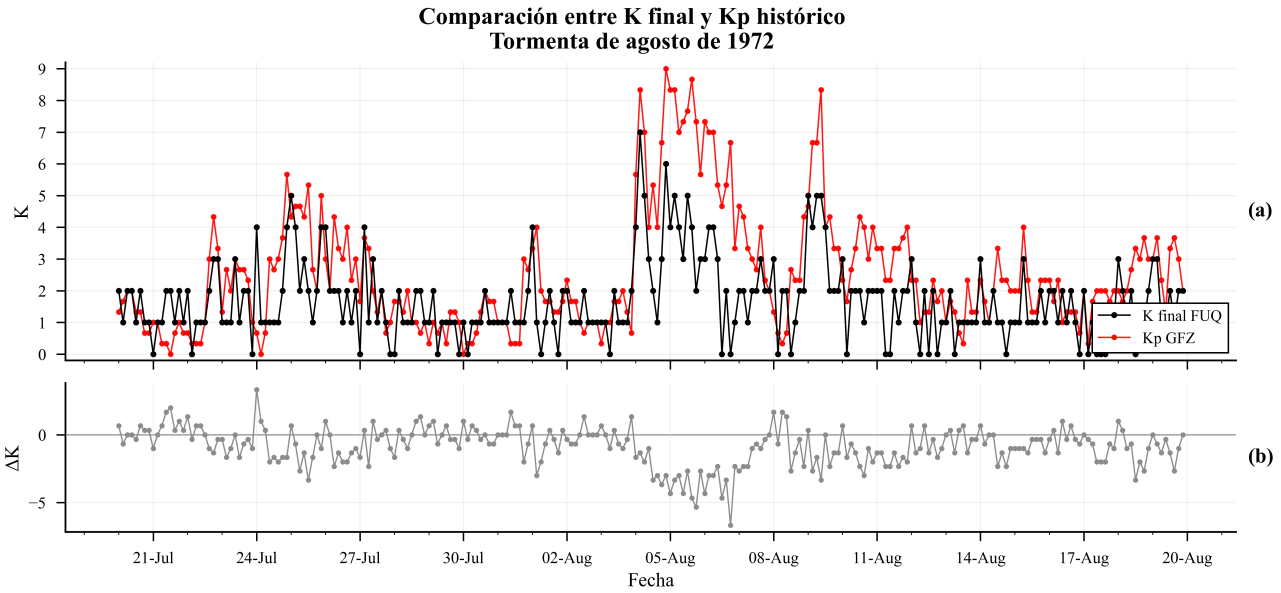


Figura 90: Comparación entre el índice K local de FUQ y el índice K_p de GFZ durante la tormenta geomagnética de agosto de 1972. Se evidencia una correspondencia general en la evolución temporal, con discrepancias en la magnitud de las perturbaciones, particularmente durante la fase principal del evento.

Tormenta de octubre de 2003

En la tormenta de octubre de 2003, se obtuvo una correlación de $r = 0{,}7283$, indicando una mejora en la correspondencia entre ambos índices a diferencia de eventos anteriores. No obstante, el RMSE alcanzó un valor de 1.81, el más alto entre los eventos analizados, evidenciando diferencias significativas en la magnitud de las perturbaciones. El sesgo negativo (bias $= -1{,}13$) indica una subestimación del índice local, particularmente durante los picos de mayor actividad geomagnética. Este resultado sugiere que, en eventos extremos, el índice K_p captura con mayor intensidad las perturbaciones globales, mientras que el índice local presenta una respuesta más atenuada.

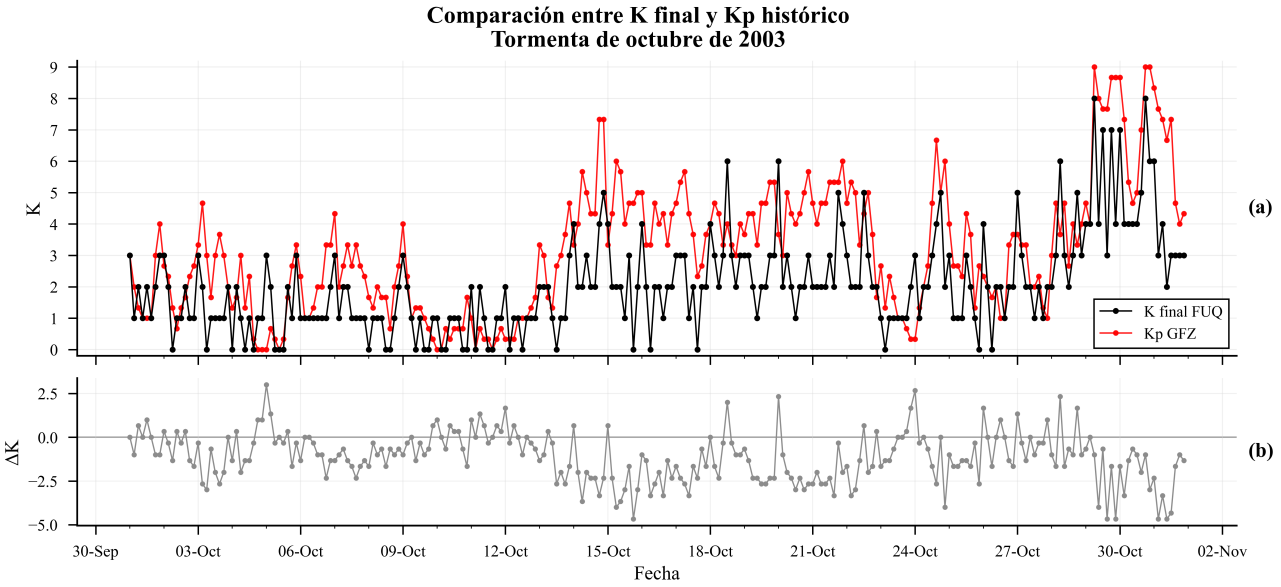


Figura 91: Comparación entre el índice K local de FUQ y el índice K_p de GFZ durante la tormenta geomagnética de octubre de 2003 (Halloween Storm). Se observa una buena correspondencia en la dinámica del evento, aunque con diferencias significativas en la intensidad de los máximos, evidenciando una subestimación del índice local durante condiciones extremas.

Tormenta de octubre de 2024

En contraste con los eventos históricos, la tormenta de octubre de 2024 presenta una correlación alta de $r = 0{,}8483$, evidenciando una fuerte concordancia entre el índice K local y el índice K_p. El RMSE se reduce a 1.02 unidades, indicando una mejora significativa en la estimación de la magnitud de las perturbaciones. Adicionalmente, el sesgo positivo (bias = 0,50) sugiere una ligera sobreestimación del índice local respecto a K_p, en contraste con los eventos históricos analizados. Este comportamiento puede estar asociado a la disponibilidad de datos de mayor resolución temporal lo que permite una representación más precisa de la actividad geomagnética local.

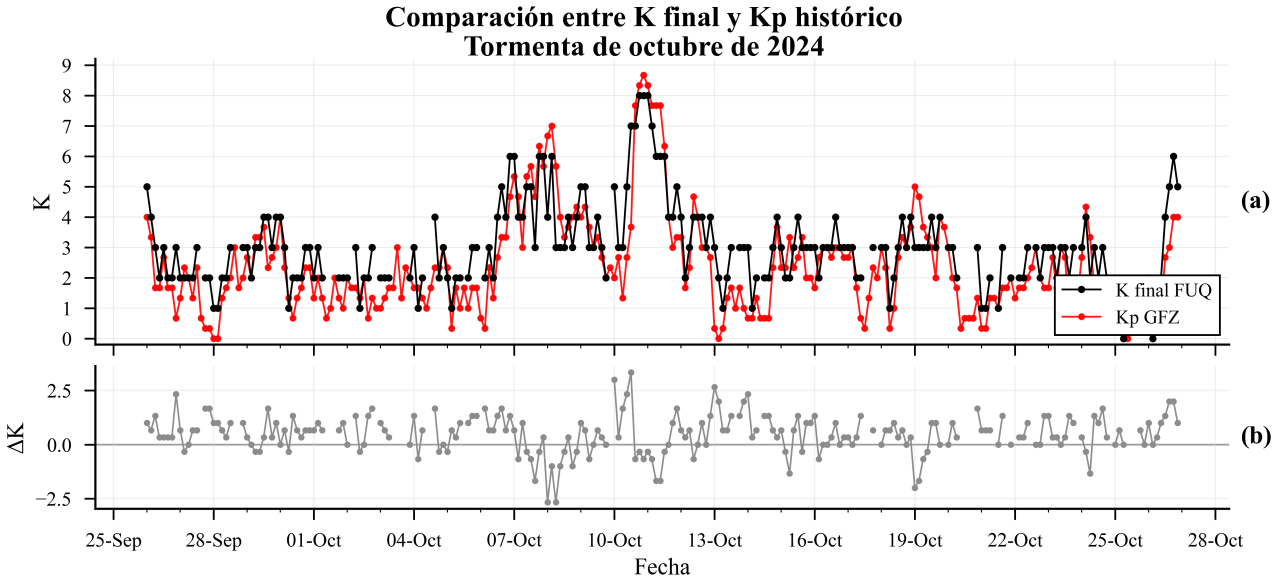


Figura 92: Comparación entre el índice K local de FUQ y el índice K_p de GFZ durante la tormenta geomagnética de octubre de 2024. Se evidencia una alta concordancia entre ambos índices, tanto en la evolución temporal como en la magnitud de los valores, reflejando una mejora significativa asociada al uso de datos de alta resolución temporal.

4.5. Resultados del índice K en NRT

Para la validación de los resultados del índice K en tiempo casi real (NRT) para el observatorio geomagnético de Fúquene (FUQ), se realizó una comparación con el índice planetario K_p reportado por el Helmholtz Centre for Geosciences (GFZ). Este análisis se llevó a cabo utilizando datos de alta resolución temporal, permitiendo evaluar la capacidad del sistema NRT para reproducir el comportamiento de la actividad geomagnética durante condiciones tanto tranquilas como de tormenta. Los valores obtenidos se analizaron en función de su correspondencia temporal y magnitud frente al índice, considerando eventos geomagnéticos recientes en los cuales se dispone de información.

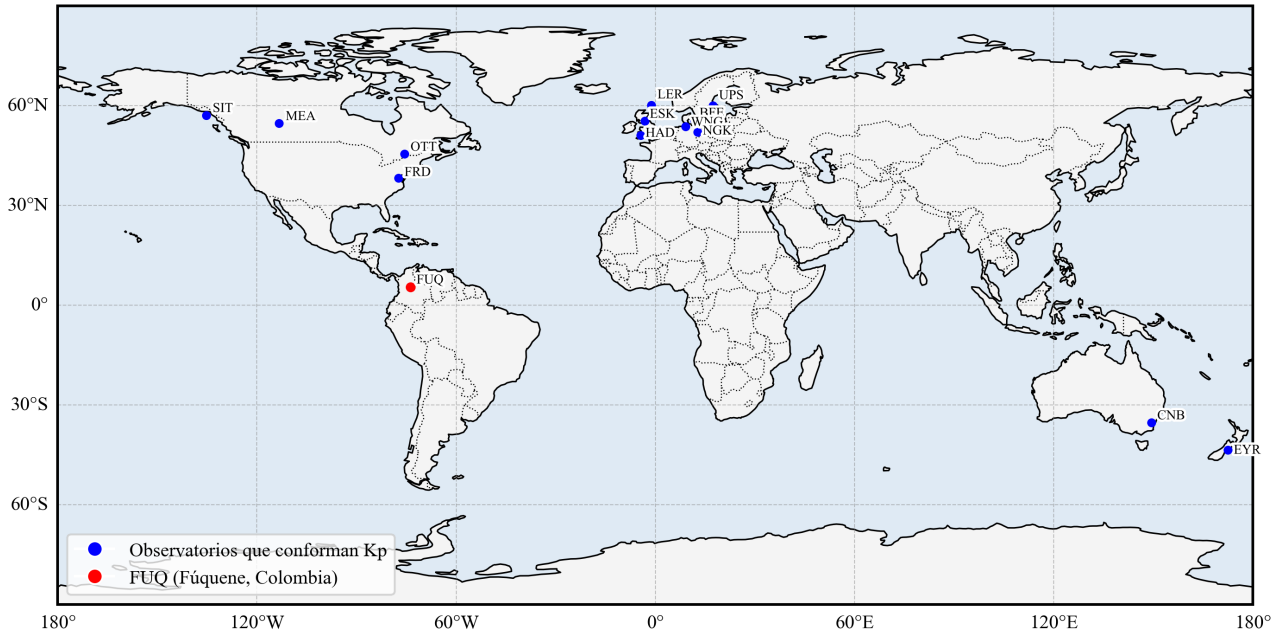


Figura 93: Distribución global de los observatorios geomagnéticos que conforman el índice planetario K_p y ubicación del observatorio geomagnético de Fúquene (FUQ). Los puntos de color azul representan los observatorios EYR (Eyrewell), CNB (Canberra), UPS (Uppsala), BFE (Brorfelde), WNG (Wingst), NGK (Niemegk), LER (Lerwick), ESK (Eskdalemuir), HAD (Hartland), OTT (Ottawa), MEA (Meanook), FRD (Fredericksburg) y SIT (Sitka), empleados en la determinación del índice K_p. El punto de color rojo indica la ubicación del observatorio geomagnético de Fúquene (FUQ), en Colombia.

4.5.1. Tormenta del 20 de enero de 2026

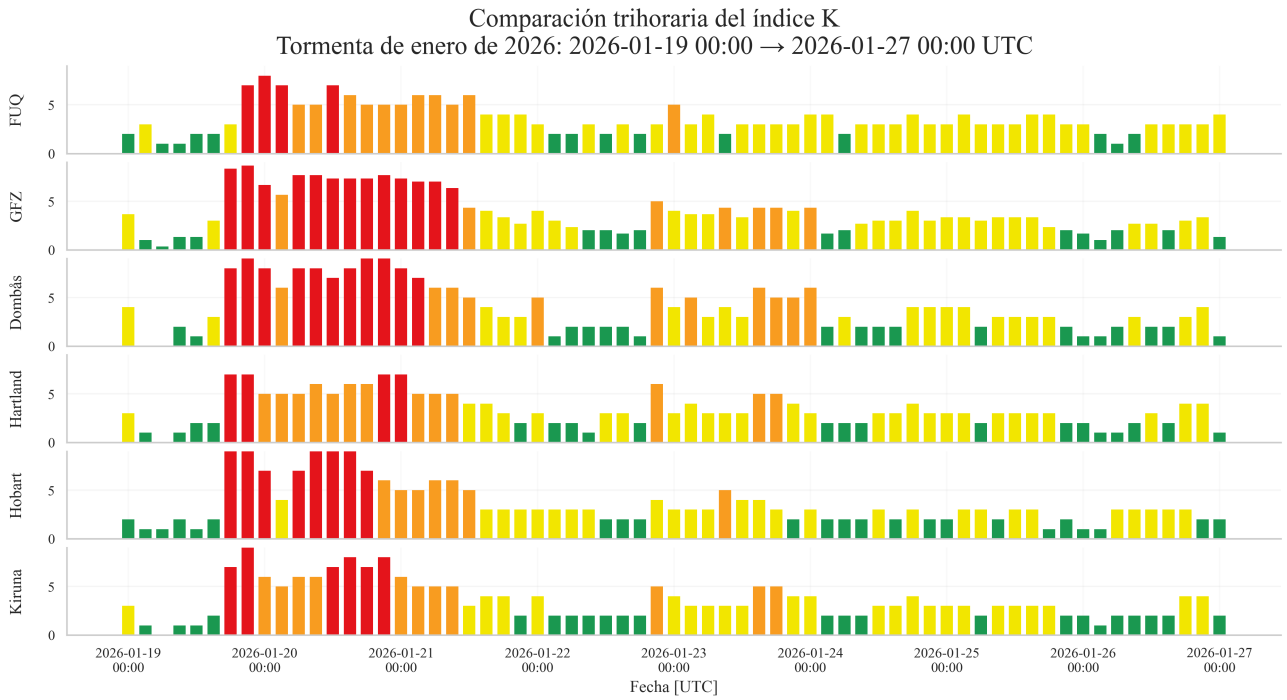


Figura 94: Comparación trihoraria del índice K entre FUQ y los observatorios de referencia durante la tormenta de enero de 2026. Se observa una buena correspondencia temporal en la fase principal y en la recuperación del evento.

La Figura 94 muestra el evento de tormenta geomagnética ocurrido entre el 19 y el 27 de enero de 2026, donde se evidencia que corresponde a un evento de alta intensidad, caracterizado por valores del índice K que alcanzan niveles de hasta $K = 7$–8 en varios observatorios. En la serie de FUQ se observa una respuesta coherente con la fase principal de la tormenta, con un incremento marcado seguido de una recuperación progresiva, lo cual resulta consistente con la evolución típica de este tipo de eventos. Visualmente, se aprecia una buena correspondencia en la secuencia de incremento, pico y recuperación frente a los observatorios de referencia.

En el análisis estadístico, la comparación con el índice de referencia de GFZ muestra una correlación alta ($\rho = 0{,}740$, $R^2 = 54{,}7\,\%$), lo que indica una adecuada capacidad de la derivación del índice local para representar la dinámica global del evento. Sin embargo, el observatorio de Kiruna también mostró un desempeño destacado, con $\rho = 0{,}732$, $R^2 = 53{,}6\,\%$, $RMSE = 1{,}30$ y $MAE = 0{,}95$, incluso menores que los obtenidos frente a GFZ ($RMSE = 1{,}42$, $MAE = 1{,}06$). En términos de sesgo, GFZ y Dombås presentaron valores negativos ($bias = -0{,}25$ y $bias = -0{,}37$, respectivamente), lo que sugiere una ligera subestimación de FUQ frente a estas referencias, mientras que Kiruna, Hobart y Hartland presentaron sesgos pequeños y positivos.

Por otro lado, los porcentajes de coincidencia exacta fueron moderados, pero la concordancia dentro de ± 1 unidad fue alta en todos los casos, alcanzando $76{,}9\,\%$ con Kiruna y $75{,}4\,\%$ con Hobart y Hartland. Esto indica que existen discrepancias puntuales en la asignación exacta

del índice; sin embargo, la respuesta del índice K local en FUQ conserva una consistencia importante para describir la evolución general de la tormenta.

Tabla 11: Resumen estadístico de la comparación entre el índice K de FUQ y los observatorios de referencia durante la tormenta de enero de 2026.

Obs	**Nombre**	ρ	R^2 (%)	**RMSE**	**Bias**	**MAE**	**N**
Kp_GFZ_ref	GFZ	0.740	54.7	1.42	-0.25	1.06	65
K_Kiruna	Kiruna	0.732	53.6	1.30	0.06	0.95	65
K_Dombas	Dombås	0.709	50.2	1.74	-0.37	1.35	65
K_Hobart	Hobart	0.684	46.8	1.56	0.05	1.12	65
K_Hartland	Hartland	0.663	44.0	1.33	0.20	0.94	65

4.5.2. Tormenta del 20 de marzo de 2026

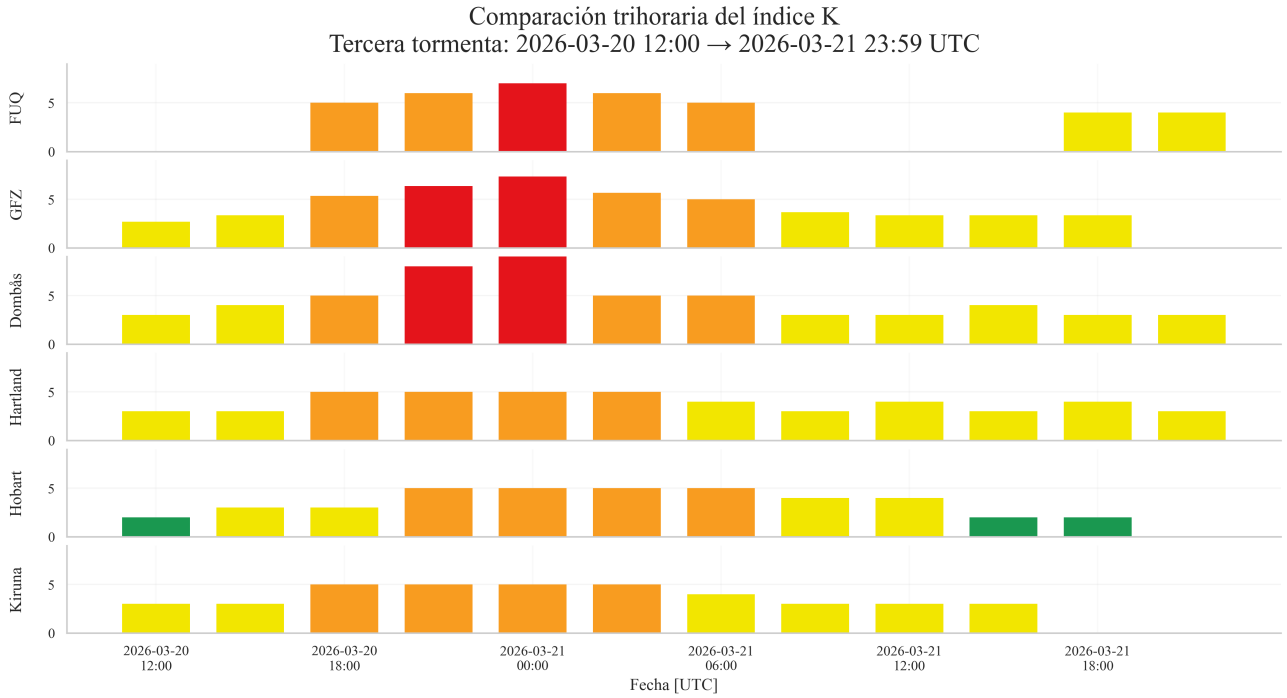


Figura 95: Comparación trihoraria del índice K entre FUQ y los observatorios de referencia durante la tercera tormenta analizada. A pesar de su corta duración, se observa una buena correspondencia en el pico principal del evento.

La tercera tormenta, evaluada entre el 20 y el 21 de marzo de 2026, corresponde al evento más corto de los analizados, pero presenta una fase principal bien definida y de respuesta intensa. En la comparación trihoraria del índice K, FUQ describe de manera adecuada el máximo principal del evento y su posterior descenso. A pesar del número reducido de observaciones, la similitud visual entre las series es clara, especialmente en los intervalos de mayor actividad.

En términos estadísticos, este fue el evento con el mejor desempeño global frente a GFZ, alcanzando una correlación de $\rho = 0{,}968$ y un coeficiente de determinación de $R^2 = 93{,}8\,\%$,

junto con los errores más bajos de todos los casos analizados ($RMSE = 0{,}38$, $MAE = 0{,}33$, $bias = 0{,}00$). Estos resultados muestran una correspondencia prácticamente directa entre ambas series y ausencia de sesgo sistemático. Dombås también presentó un ajuste muy alto, con $\rho = 0{,}921$ y $R^2 = 84{,}9\,\%$, aunque con errores mayores ($RMSE = 1{,}25$, $MAE = 1{,}00$). En contraste, Kiruna registró el menor ajuste del evento, con $\rho = 0{,}535$ y $R^2 = 28{,}6\,\%$; sin embargo, es importante mencionar que presentó un bajo número de muestras, con $N = 5$.

En relación con la concordancia categórica, GFZ volvió a mostrar el mejor comportamiento, con un 100 % de acuerdo dentro de ± 1, mientras que Dombås y Hartland también presentaron resultados favorables. Hobart y Hartland tuvieron correlaciones iguales ($\rho = 0{,}789$), aunque Hobart mostró errores y sesgo más altos ($RMSE = 1{,}53$, $bias = 1{,}33$), lo que sugiere una mayor sobreestimación relativa. En conjunto, esta tormenta confirma que el índice K local en FUQ puede describir de manera adecuada eventos cortos e intensos.

Tabla 12: Resumen estadístico de la comparación entre el índice K de FUQ y los observatorios de referencia durante la tercera tormenta analizada.

Obs	**Nombre**	ρ	R^2 (%)	**RMSE**	**Bias**	**MAE**	**N**
Kp_GFZ_ref	GFZ	0.968	93.8	0.38	0.00	0.33	6
K_Dombas	Dombås	0.921	84.9	1.25	-0.14	1.00	7
K_Hobart	Hobart	0.789	62.3	1.53	1.33	1.33	6
K_Hartland	Hartland	0.789	62.2	1.07	0.86	0.86	7
K_Kiruna	Kiruna	0.535	28.6	1.18	1.00	1.00	5

4.5.3. Tormenta del 4 de abril de 2026

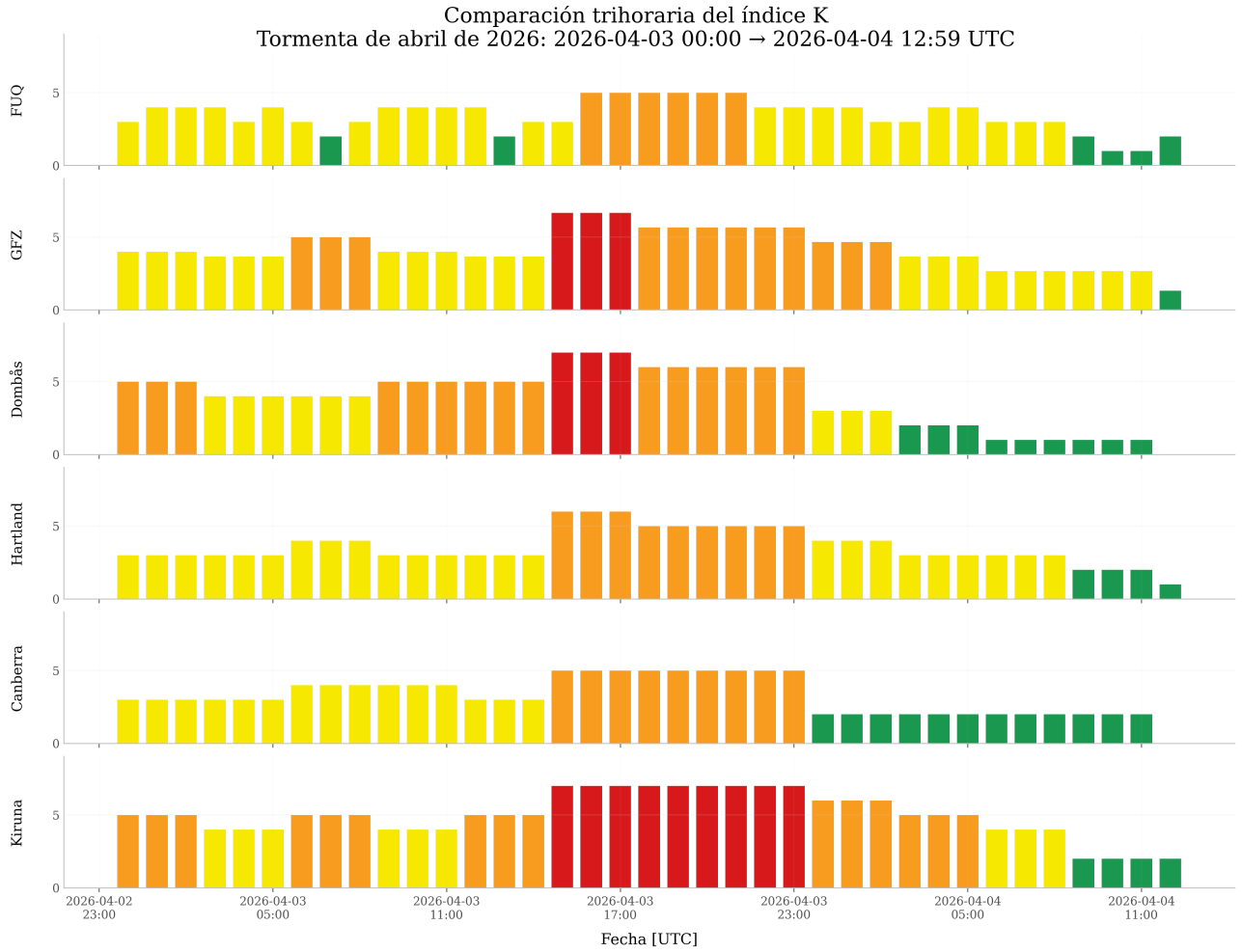


Figura 96: Comparación trihoraria del índice K entre FUQ y los observatorios de referencia durante la tormenta de abril de 2026. Se observa una buena correspondencia temporal en la fase principal y en la recuperación del evento.

La tormenta de abril de 2026, evaluada entre el 03 de abril de 2026 a las 00:00 UTC y el 04 de abril de 2026 a las 12:59 UTC, presenta una fase principal bien definida y una evolución temporal clara del índice K. En la comparación trihoraria, FUQ reproduce de manera adecuada el incremento progresivo del evento, su máximo principal y la posterior recuperación. Aunque se observan diferencias en la magnitud exacta del índice respecto a algunos observatorios de referencia, la similitud visual entre las series es consistente, especialmente durante los intervalos de mayor actividad geomagnética.

En términos estadísticos, el mejor ajuste del evento se obtuvo frente a Kiruna, con una correlación de $\rho = 0{,}716$ y un coeficiente de determinación de $R^2 = 51{,}2\,\%$. Sin embargo, esta comparación también presentó los mayores errores del conjunto ($RMSE = 1{,}80$, $MAE = 1{,}38$) y un sesgo negativo importante ($bias = -1{,}38$), lo que indica que FUQ tiende a subestimar la intensidad del evento respecto a esta estación. Dombås mostró igualmente una correspondencia

alta, con $\rho = 0{,}679$ y $R^2 = 46{,}2\,\%$, aunque con errores también elevados ($RMSE = 1{,}66$, $MAE = 1{,}38$) y un sesgo moderadamente negativo ($bias = -0{,}31$). Este comportamiento es consistente con la mayor sensibilidad de los observatorios de latitudes altas frente a perturbaciones geomagnéticas intensas.

Por su parte, Canberra presentó una correlación moderada de $\rho = 0{,}664$ y un $R^2 = 44{,}0\,\%$, con errores intermedios ($RMSE = 1{,}14$, $MAE = 0{,}85$) y un sesgo positivo ($bias = 0{,}38$), lo que sugiere una ligera sobreestimación de FUQ frente a esta estación. En el caso de GFZ, se obtuvo una correlación de $\rho = 0{,}600$ y un $R^2 = 36{,}1\,\%$, con $RMSE = 1{,}29$, $MAE = 0{,}90$ y $bias = -0{,}64$, indicando una subestimación leve del índice local respecto a esta referencia global. Finalmente, Hartland presentó la menor correlación del conjunto ($\rho = 0{,}598$, $R^2 = 35{,}7\,\%$), aunque mostró los errores más bajos ($RMSE = 1{,}04$, $MAE = 0{,}62$) y un sesgo nulo ($bias = 0{,}00$), lo que evidencia una muy buena correspondencia en magnitud, aunque con una relación temporal ligeramente menor. En conjunto, esta tormenta confirma que el índice K local en FUQ describe de manera adecuada la dinámica general del evento, aunque su grado de concordancia depende de la latitud geomagnética y de la intensidad relativa registrada en cada observatorio.

Tabla 13: Resumen estadístico de la comparación entre el índice K de FUQ y los observatorios de referencia durante la tormenta de abril de 2026.

Obs	**Nombre**	ρ	R^2 (%)	**RMSE**	**Bias**	**MAE**	**N**
K_Kiruna	Kiruna	0.716	51.2	1.80	-1.38	1.38	13
K_Dombas	Dombås	0.679	46.2	1.66	-0.31	1.38	13
K_Canberra	Canberra	0.664	44.0	1.14	0.38	0.85	13
Kp_GFZ_ref	GFZ	0.600	36.1	1.29	-0.64	0.90	13
K_Hartland	Hartland	0.598	35.7	1.04	0.00	0.62	13

4.6. Resultado de la plataforma web de visualización

La plataforma SIAPV inicio a registrar datos de manera intermitente desde diciembre de 2025 y de manera continua desde finales de marzo de 2026. Está habilitada mediante la dirección https://rt.fuqcollector.space, disponible para la mayoría de los navegadores.



Figura 97: Panel de la página web SIAPV, en donde se puede observar la componente X de color azul, la componente Y de color amarillo, la componente Z de color naranja, la componente H de color morado, la componente D de color verde opaco, el campo interno I de color verde, el campo externo E de color rojo, la variación solar quieta Sq de color verde claro y la componente F y ΔF de color turquesa.

La Figura 97 presenta la sección de datos en tiempo real, que se actualiza con una cadencia de un segundo para las componentes X, Y, Z, H,D y F del campo magnético expresado en nanoteslas (nT). Por otro lado, se encuentran las series derivadas I, E y Sq bajo una cadencia temporal de un minuto y una ventana de 7 días para generar la vista de los datos, facilitando el análisis de la tendencia y su comportamiento.A partir de la información de esta sección, se genera el panel de índices geomagnéticos.



Figura 98: Panel de la página web SIAPV, en donde se puede observar los índices geomagnéticos *Dist* de color azul, *Dlat* de color rosa y *K* de color verde. En la parte inferior se puede observar dos velocímetros que para el caso de *Dlat* estima la intensidad de la tormenta bajo lo mencionado por Gonzalez et al. (1994), por parte del índice *K* determina la intensidad bajo lo estipulado por la NOAA.

En la Figura 98 se presenta la sección de índices geomagnéticos. Se observa las series de los índices temporales de *Dist* y *Dlat* con una cadencia de actualización al minuto, mientras que se observa el índice *K* con una resolución trihoraria en forma de barras. Los 3 índices son calculados mediante las metodologías descritas en la sección 3.3.2 y 3.4.4.



Figura 99: Panel de la página web SIAPV, en donde se puede descargar las componentes e índices geomagnéticos disponibles a lo largo del periodo de funcionamiento del sistema.

En la Figura 99 se observa el panel de descargas, el cual permite la exportación de cualquier variable registra bajo tres formatos: CSV, JSON e IAGA-2002. Se permite seleccionar el periodo de interés y la capacidad de obtener vista previa de la información que resulta ser un promedio de los datos, debido a que la captura de 10 muestras por segundo acumula millones de datos a la semana.

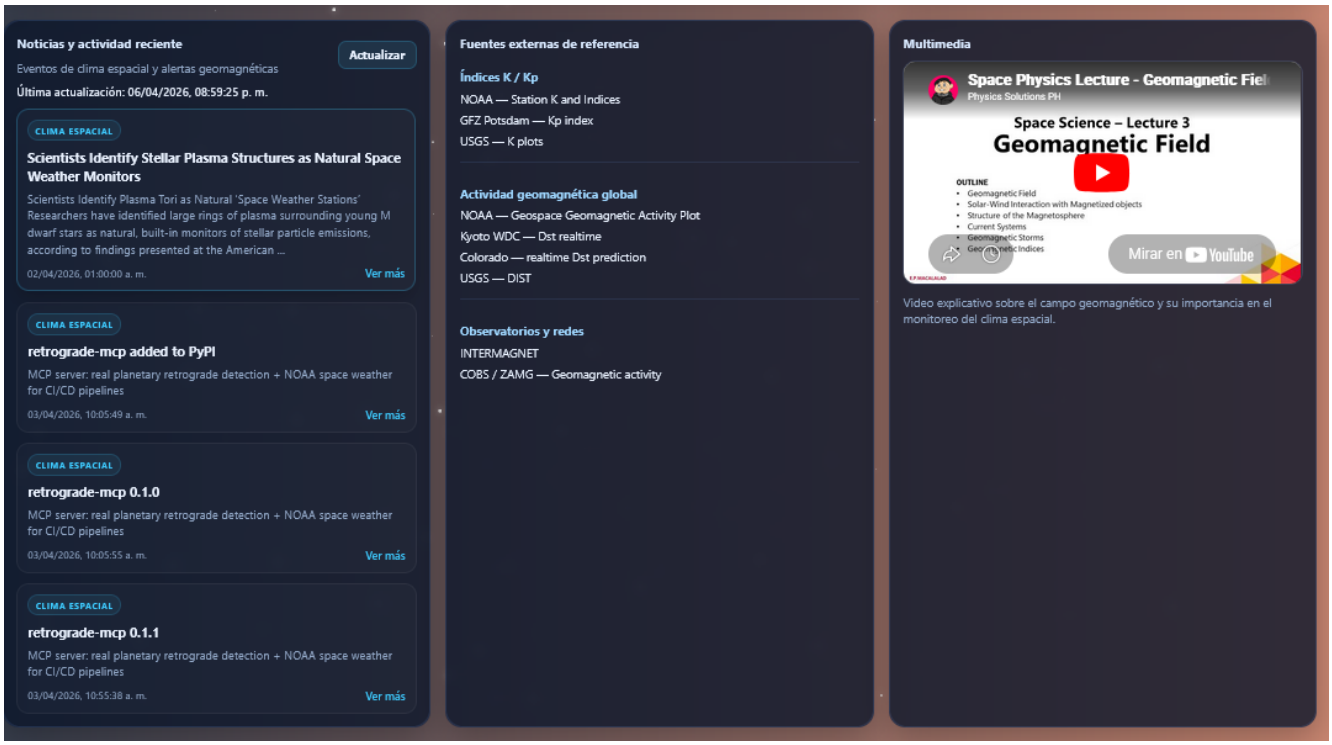


Figura 100: Panel de la página web SIAPV, donde se encuentran noticias, fuentes externas y un apartado multimedia apartado

El ultimo apartado se puede observar en la figura 100, integra 3 paneles que contienen noticias de clima espacial, las cuales se consultan en fuentes internacionales de manera automática, filtrando y clasificando por relevancia temática. Se incluye otro panel con enlaces directos a fuentes de organizaciones externas que calculan los índices en distintas resoluciones temporales. Por último, la selección multimedia presenta contenido educativo sobre el campo geomagnético y el clima espacial.

Adicionalmente se integró un bot en la plataforma de mensajería Telegram, el cual permite implementar funciones para supervisar el sistema, analizar los datos en tiempo real y generar alertas ante tormentas geomagnéticas, garantizando el acceso oportuno a la información por parte de los usuarios.

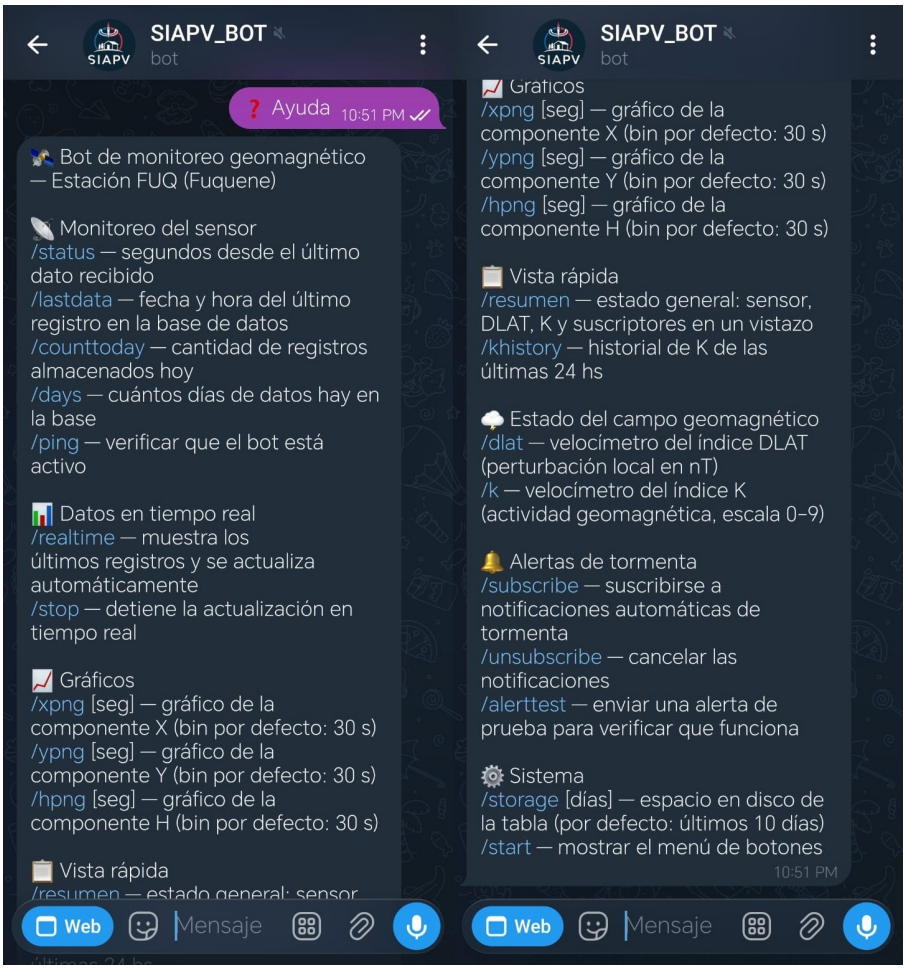


Figura 101: Menú de opciones disponibles a la fecha de la escritura de este documento, para el bot con el nombre `@SIAPV_BOT` de la aplicación de mensajería Telegram.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos evidencian que la implementación del sistema de adquisición de datos en tiempo real es un paso fundamental en la modernización del Observatorio Geomagnético de Fúquene. Mientras que gran parte del tiempo el observatorio dependía de análisis manuales de magnetogramas análogos, la arquitectura implementada en la actualidad basada en los módulos MARTAS Y MARCOS, permiten establecer un flujo de transmisión datos de manera continua y estable, lo que contribuye a un mayor reconocimiento del observatorio y facilita la eventual incorporación a la red de INTERMAGNET, garantizando él envió de datos estables y en tiempo real a través de sus servidores. Por otra parte beneficia tanto a la comunidad científica como al público en general, estableciendo las bases para el monitoreo continuo del clima espacial en Colombia y el calculo automatizado de los índices.

Así mismo, la implementación de la plataforma web para FUQ permitió integrar de manera efectiva y óptima la adquisición, el procesamiento en tiempo casi real y la visualización de variables geomagnéticas en un entorno de fácil acceso. El sistema desarrollado, basado en

una arquitectura cliente-servidor, demostró capacidad para procesar, almacenar y desplegar información correspondiente a índices, componentes magnéticas y cálculos derivados de manera eficiente.

Se sugiere la implementación de nuevos métodos para la estimación de la línea base preliminar, con el objetivo de no depender de manera constante de los archivos mensuales `.blv`. Además, se recomienda ampliar las funcionalidades de la plataforma mediante la incorporación de herramientas de análisis, comparación automática con índices de referencia, generación de reportes de eventos, entre otras. Por último, se recomienda explorar las funcionalidades descritas en el software MagPy, tales como la transmisión de datos en tiempo casi real hacia INTERMAGNET, la implementación de sistemas de alerta de mayor complejidad y otras capacidades orientadas al fortalecimiento operativo de la plataforma.

Por otro lado, el cálculo del índice *Dlat* histórico mediante registros del observatorio demuestra una viabilidad y precisión respecto a la caracterización de tormentas geomagnéticas locales. Al evaluar los dos enfoques utilizados, se evidencia que el enfoque A, fundamentado en un filtro multi-banda presenta mejores valores de correlación y RMSE, lo que sugiere que se logró aislar de manera efectiva los armónicos diurnos frente al enfoque B, el cual al emplear un umbral adaptativo deja contaminar en ciertos tramos la señal, generando un mayor error en sus estadísticas. Durante la comparación de los resultados frente al índice Dst oficial de Kyoto, el enfoque A obtuvo mejores resultados, confirmando que la sustracción selectiva en el dominio de la frecuencia presenta valores mas robustos, frente a la generación de un umbral adaptativo que puede excluir mayor energía de la señal original, teniendo como resultado una mayor sobreestimación en la magnitud de la perturbación.

La implementación de una metodología operativa del índice Dlat es el reflejo de una respuesta tecnológica a un sistema de alertas y vigilancia continua. La adaptación de este procesamiento, surge gracias a la ventana deslizante que permite estar recalculando los valores continuamente, obteniendo altos valores de correlación frente a observatorios que presentan valores más cercanos de latitud magnética, así como un sesgo bias que cambia de signo en función de la longitud del observatorio, lo que confirma que durante un evento de tormenta geomagnética los valores no se van a distribuir uniformemente, sino que tendrá mayor intensidad en ciertos sectores, donde predomina la latitud del observatorio.

En consecuencia se puede afirmar, que un observatorio que este ubicado en Colombia no tendrá los mismos registros de perturbación que un observatorio localizado en Guam o Hawái en un mismo instante. Esto se debe a que se encuentran en un sector de tiempo local distinto, obteniendo una fracción diferente de la corriente asimétrica.

Se recomienda para la optimización del índice operacional *Dlat*, tener riguroso control en la determinación y actualización de la línea base, debido a que la estimación de las perturbaciones geomagnéticas depende de aislar el campo externo del campo principal. El uso de datos preliminares puede generar sesgos significativos en el cálculo de la línea base, que pueden resultar en la propagación de errores y en consecuencia alterar la magnitud real del evento geomagnético.

En el caso del desarrollo del índice K local, se evidenció que este reproduce de manera coherente la evolución física de las tormentas geomagnéticas, mostrando correspondencia entre la separación de la señal respecto a la curva SR, el incremento de las amplitudes trihorarias y la asignación final de valores elevados del índice.

Adicionalmente, se observó que las componentes horizontales X y Y no responden de manera equivalente frente a las perturbaciones geomagnéticas, siendo la componente X la que generalmente presenta una mayor variabilidad durante eventos de tormenta. Este comportamiento respalda el uso del enfoque mixto en la asignación final del índice K, al ofrecer una representación más robusta de la intensidad del evento; sin embargo, dicho enfoque puede resultar contraproducente para la estimación correcta de los valores de las amplitudes trihorarias.

Se recomienda conservar el enfoque mixto para la estimación oficial del índice K; no obstante, se sugiere complementar este análisis con la estimación del índice K local derivado del estudio individual de las dos componentes horizontales, con la finalidad de observar el comportamiento particular de K en cada una. Asimismo, se recomienda evaluar la implementación de otras metodologías propuestas por la IAGA que no dependan esencialmente de la variación regular estimada a través de medias horarias, de manera que no afecten la estimación de la curva SR y, por consiguiente, la derivación de los índices K durante picos de mayor intensidad, como ocurre con el *Adaptive Smoothing Method* (KASM).

En el caso del índice operativo K en el análisis de las tres tormentas evaluadas, se determina que el índice K local estimado para FUQ presenta una alta capacidad para describir la variabilidad temporal de la actividad geomagnética observada en estaciones de referencia. En los tres eventos se evidenció una buena correspondencia en las diferentes fases de la tormenta. Estadísticamente, la comparación con el índice de referencia Kp de GFZ mostró de manera consistente los mejores resultados, alcanzando correlaciones altas a muy altas (ρ entre 0.740 y 0.968) y coeficientes de determinación de hasta 93,8 %. Asimismo, los valores de error ($RMSE$ y MAE) fueron bajos, particularmente en eventos de menor duración, lo que indica una adecuada estimación de la intensidad del índice. Por otra parte, la implementación demostró que es posible traslada la lógica del cálculo historia a un sistema operativo en tiempo real, a partir de reemplazar los valores de las curva SR por la estimación de la QDC.

Se recomienda continuar con la calibración del índice K local mediante el ajuste de los umbrales de escala, particularmente del valor de $K9$, con la finalidad de mejorar su comportamiento en eventos de tormenta de alta intensidad, donde generalmente se observaron valores de K subestimados. Así mismo, se recomienda ampliar el análisis a un mayor número de eventos geomagnéticos con diferentes niveles de intensidad, con el propósito de evaluar el desempeño del índice bajo distintas condiciones. Finalmente, se sugiere comparar el índice K local con otros índices, particularmente con índices

Referencias

Akasofu, S. -i., P. D. Perreault y S. Yoshida (ago. de 1969). "The geomagnetic and cosmic-ray storm of May 25/26, 1967". En: *Solar Physics* 8.2, págs. 464-476. DOI: 10.1007/bf00155393. URL: https://doi.org/10.1007/bf00155393.

Alejandra, B. P. D. y R. V. E. Stiven (2018). *Metodología para la aplicación del índice k para el observatorio geomagnético de Fúquene, Colombia*. URL: http://hdl.handle.net/11349/13783.

Alldredge, L. R. (1960). "A proposed automatic standard magnetic observatory". En: *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 65.11, págs. 3777-3786. DOI: 10.1029/jz065i011p03777.

Alva Carmona, Maria Rosa et al. (2025). "The Fúquene National Geomagnetic Observatory: A journey through its past, present, and future". En: *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, págs. 146-162. DOI: 10.18257/raccefyn.3166.

Angenheister, Gustav H. (ene. de 1939). "Zeitschrift für Geophysik 15". En: *Geo-Leo e-docs (Deutsche Initiative für Netzwerkinformation)*. DOI: 10.23689/fidgeo-3179. URL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?gldocs-11858/7493.

Bartels, J. (1949). *Appendix B of IATME Bulletin No. 12b: The standardised index Ks and the planetary index Kp*. DOI: 10.25577/xkjt-w404.

— (ene. de 1957a). *The geomagnetic measures for the time-variations of solar corpuscular radiation, described for use in correlation studies in other geophysical fields*, págs. 227-236. DOI: 10.1016/b978-1-4832-1304-0.50007-5. URL: https://doi.org/10.1016/b978-1-4832-1304-0.50007-5.

— (ene. de 1957b). *The technique of scaling indices k and q of geomagnetic activity*, págs. 215-226. DOI: 10.1016/b978-1-4832-1304-0.50006-3. URL: https://doi.org/10.1016/b978-1-4832-1304-0.50006-3.

Bartels, J., N. H. Heck y H. F. Johnston (dic. de 1939). "The three-hour-range index measuring geomagnetic activity". En: *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity* 44.4, págs. 411-454. DOI: 10.1029/te044i004p00411. URL: https://doi.org/10.1029/te044i004p00411.

— (1940). "Geomagnetic three-hour-range indices for the years 1938 and 1939". En: *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity* 45.3, págs. 309-337. DOI: 10.1029/te045i003p00309.

Blackledget, Jonathan M. (ene. de 2006). *Digital Filtering in the Time Domain*, págs. 522-540. DOI: 10.1533/9780857099457.4.522. URL: https://doi.org/10.1533/9780857099457.4.522.

Brace, L. H. et al. (dic. de 1974). "Deformation of the night side plasmasphere and ionosphere during the August 1972 geomagnetic storm". En: *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 79.34, págs. 5211-5218. DOI: 10.1029/ja079i034p05211. URL: https://doi.org/10.1029/ja079i034p05211.

Campbell, W. H. (1989). "The regular geomagnetic-field variations during quiet solar conditions". En: *Geomagnetism, Volume 3*. Ed. por J. A. Jacobs. London: Academic Press, págs. 385-460.

Choi, K. C. et al. (dic. de 2005). "Near Real-Time Estimation of Geomagnetic Local K Index from Gyeongju Magnetometer". En: *Journal of Astronomy & Space Sciences* 22.4, págs. 431-440. DOI: 10.5140/jass.2005.22.4.431. URL: https://doi.org/10.5140/jass.2005.22.4.431.

Clua de Gonzalez, A. L. et al. (1993). "Periodic variation in the geomagnetic activity: A study based on the Ap index". En: *Journal of Geophysical Research* 98, págs. 9215-9231.

Conte, S. D. y C. de Boor (1980). *Elementary Numerical Analysis*. New York: McGraw-Hill Book Company.

Corona-Romero, P. et al. (2024). "The Geomagnetic Stations Network of Mexico (REGMEX): The initial steps towards a real-time monitoring of geomagnetic activity in Mexico". En: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 256, pág. 106204. DOI: 10.1016/j.jastp.2024.106204.

Cortés Rojas, E. (2025). "Sistema de corriente Sq en el Observatorio Geomagnético de Fúquene y su relación con el modelo DIFI-7". Trabajo de grado. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Courtillot, Vincent y Jean Louis Le Mouël (1988). "Time Variations of the Earth's Magnetic Field: From Daily to Secular". En: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 16, págs. 389-476. DOI: 10.1146/annurev.ea.16.050188.002133.

Cowley, S. W. H. (1995). "The Earth's magnetosphere: A brief beginner's guide". En: *Eos* 76.51, págs. 525-529. DOI: 10.1029/95eo00322.

Curto, J. J., T. Araki y L. F. Alberca (2007). "Evolution of the concept of Sudden Storm Commencements and their operative identification". En: *Earth Planets and Space* 59.11, págs. i-xii. DOI: 10.1186/bf03352059.

Daglis, I. A. et al. (1999). "The terrestrial ring current: Origin, formation, and decay". En: *Reviews of Geophysics* 37.4, págs. 407-438. DOI: 10.1029/1999rg900009.

Davis, T. N. y M. Sugiura (1966). "Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations". En: *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 71.3, págs. 785-801. DOI: 10.1029/jz071i003p00785.

Elamir, Elsayed (jul. de 2012). "Mean Absolute Deviation about Median as a Tool of Explanatory Data Analysis". En: *Int J Res Rev Appl Sci* 11.

Frøystein, I. y M. G. Johnsen (2025). "A critical review and presentation of the complete, historic series of K indices as determined at Norwegian magnetic observatories since 1939". En: *Annales Geophysicae* 43.1, págs. 241-269. DOI: 10.5194/angeo-43-241-2025. URL: https://angeo.copernicus.org/articles/43/241/2025/.

Fuquen, J. y J. Osorno (2005). *Geología de la plancha 190 - Chiquinquirá*. URL: https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010024376/mapa/pdf/0101243761300006.pdf.

Gannon, J. et al. (2011). *U.S. Geological Survey near Real-Time DST index*. Inf. téc. U.S. Geological Survey. DOI: 10.3133/ofr20111030.

Ganushkina, N. Y., M. W. Liemohn y S. Dubyagin (2018). "Current Systems in the Earth's Magnetosphere". En: *Reviews of Geophysics* 56.2, págs. 309-332. DOI: 10.1002/2017rg000590.

Geosciences - GFZ, Helmholtz Centre for (s.f.). *About Kp - Kp index*. URL: https://kp.gfz.de/en/about-kp.

Gonzalez, W. D. et al. (1994). "What is a geomagnetic storm?" En: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 99, págs. 5771-5792. DOI: 10.1029/93JA02867.

Harris, Charles R. et al. (2020). "Array programming with NumPy". En: *Nature* 585, págs. 357-367. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.

Hopgood, P. A. (1986). "On the computer generation of geomagnetic K-indices from digital data". En: *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity* 38.9, págs. 861-871. DOI: 10.5636/JGG.38.861.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC (mar. de 2026). *En nuestro Observatorio Geomagnético de Fúquene pasamos de registrar un dato por hora a 10 datos por segundo*. [Video]. Facebook. URL: https://www.facebook.com/watch/?v=721759270931804.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2020). *Geomagnetismo*. Consultado el 2 de abril de 2026. URL: https://antiguo.igac.gov.co/es/contenido/areas-estrategicas/geomagnetismo.

Jackson, A. y C. Finlay (2015). "Geomagnetic Secular Variation and Its Applications to the Core". En: *Treatise on Geophysics*. Ed. por G. Schubert. 2.ª ed. Vol. 5. Amsterdam: Elsevier, págs. 137-184. DOI: 10.1016/B978-0-444-53802-4.00099-3.

Langel, R. A. y W. J. Hinze (1998). *The Magnetic Field of the Earth's Lithosphere*. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/cbo9780511629549.

Lanza, R. y A. Meloni (2006). *The Earth's Magnetism*. Springer. DOI: 10.1007/978-3-540-27980-8.

Laranja, S. R., L. Freire y L. Benyosef (2017). "A Geomagnetic and Geological Study in the South Atlantic Islands". En: *SBGF* 52, págs. 1689-1693. DOI: 10.1190/sbgf2017-330.

Leonhardt, R. et al. (2025). *MARTAS: MagPys Automated Real Time Acquisition System*. DOI: 10.5281/zenodo.17937902. URL: https://github.com/geomagpy/MARTAS.

— (2026). *MARTAS: MagPy's Automated Real Time Acquisition System*. DOI: 10.5281/zenodo.17937902. URL: https://github.com/geomagpy/MARTAS.

St-Louis, B., I. O. Committee e I. E. Council (2024). *INTERMAGNET Technical Reference Manual, Version 5.1.1*. Inf. téc. GFZpublic. DOI: 10.48440/intermagnet.2024.001.

Love, J. J. y J. L. Gannon (2009). "Revised Dst and the epicycles of magnetic disturbance: 1958–2007". En: *Annales Geophysicae* 27.8, págs. 3101-3131. DOI: 10.5194/angeo-27-3101-2009.

Lubanovic, Bill (nov. de 2023). *Fastapi*.

Macmillan, S. y A. Droujinina (2007). "Long-term trends in geomagnetic daily activity". En: *Earth Planets Space* 59, págs. 391-395.

Malakhov, V. V. et al. (2022). "Magnetic field in the inner near-Earth space". En: *Physics-Uspekhi* 66.10, págs. 967-986. DOI: 10.3367/ufne.2022.12.039293.

Manrique, C. y Sánchez (2017). "Recopilación, análisis y diagnóstico de la información digital y análoga de la red geomagnética nacional". Tesis de pregrado. Universidad de Cundinamarca.

Mara Ribeiro, Silvana y Cristiano Castro (oct. de 2022). "Missing Data in Time Series: A Review of Imputation Methods and Case Study". En: *Learning and Nonlinear Models* 20, págs. 31-46. DOI: 10.21528/lnlm-vol20-no1-art3.

Matzka, J. et al. (2021). "The Geomagnetic Kp Index and Derived Indices of Geomagnetic Activity". En: *Space Weather* 19.5. e2020SW002641 2020SW002641, e2020SW002641. DOI: https://doi.org/10.1029/2020SW002641. eprint: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2020SW002641. URL: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020SW002641.

Mayaud, P. N. (1980). *Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices*. Geophysical Monograph. American Geophysical Union. DOI: 10.1029/gm022.

Melo, R. T. (2012). "Estratigrafía y ambientes de depósito de la arenisca de Chiquinquirá en los alrededores de la localidad tipo". En: *Boletín de Geología* 34.2, págs. 55-72. URL: https://scienti.colciencias.gov.co/publindex/download.file?tpoArchivo=ART&cod_fasciculo=14&cod_articulo=168&cod_revista=161.

Menvielle, M. et al. (dic. de 1995). "Computer production of K indices: review and comparison of methods". En: *Geophysical Journal International* 123.3, págs. 866-886. DOI: 10.1111/j.1365-246x.1995.tb06895.x. URL: https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1995.tb06895.x.

Menvielle, M. et al. (2010). "Geomagnetic indices". En: *Geomagnetic Observations and Models*. Dordrecht: Springer, págs. 183-228. DOI: 10.1007/978-90-481-9858-0_8.

Menvielle, M. et al. (2011). "Geomagnetic Indices". En: *Geomagnetic Observations and Models*. Ed. por M. Mandea y M. Korte. Vol. 5. IAGA Special Sopron Book Series. Dordrecht: Springer. DOI: 10.1007/978-90-481-9858-0_8.

NOAA (2025). *Five historically huge solar events*. URL: https://www.noaa.gov/heritage/stories/five-historically-huge-solar-events.

Noor, M.N. et al. (dic. de 2013). "Filling Missing Data Using Interpolation Methods: Study on the Effect of Fitting Distribution". En: *Key engineering materials* 594-595, págs. 889-895. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.594-595.889. URL: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.594-595.889.

Nowożyński, Krzysztof, Tomasz Ernst y Jerzy Jankowski (ene. de 1991). "Adaptive Smoothing Method For Computer Derivation of K-Indices". En: *Geophysical Journal International* 104.1, págs. 85-93. DOI: 10.1111/j.1365-246x.1991.tb02495.x. URL: https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1991.tb02495.x.

Oracle (2026). *Arm-Based Compute*. https://www.oracle.com/latam/cloud/compute/arm/#performance. Oracle Cloud Infrastructure, consultado el 3 de abril de 2026.

Pearson, Ronald K. et al. (ago. de 2016). "Generalized Hampel filters". En: *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2016.1. DOI: 10.1186/s13634-016-0383-6. URL: https://doi.org/10.1186/s13634-016-0383-6.

Pierrard, Viviane et al. (mar. de 2025). "Effects of the Geomagnetic Superstorms of 10–11 May 2024 and 7–11 October 2024 on the Ionosphere and Plasmasphere". En: *Atmosphere* 16.3, pág. 299. DOI: 10.3390/atmos16030299. URL: https://doi.org/10.3390/atmos16030299.

Pinzon, S., S. Vargas y N. Gomez (2022). *Solar activity influence on perturbations over the geomagnetic field based on data of the Geomagnetic Observatory of Fuquene, Colombia*.

Pinzon-Cortes, S., N. Gómez-Pérez y S. V. Domínguez (2025). "Ring current local time dependence during geomagnetic storms using equatorial Dst-proxies". En: *Acta Geodaetica et Geophysica* 60.1, págs. 97-114. DOI: 10.1007/s40328-024-00459-6.

Pirjola, Risto et al. (2005). "Space weather risk". En: *Space Weather* 3.2. DOI: https://doi.org/10.1029/2004SW000112. eprint: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2004SW000112. URL: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2004SW000112.

Press, W. H. et al. (1992). *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. 2.ª ed. Cambridge: Cambridge University Press.

Purucker, M. E. y K. A. Whaler (2007). "Crustal magnetism". En: *Treatise on Geophysics, Volume 5: Geomagnetism*. Ed. por M. Kono. New York: Elsevier Science, págs. 195-235.

Rostoker, Gordon (1972). "Geomagnetic indices". En: *Reviews of Geophysics* 10.4, págs. 935-950. DOI: https://doi.org/10.1029/RG010i004p00935. eprint: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/RG010i004p00935. URL: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/RG010i004p00935.

Russell, C. (2000). "The solar wind interaction with the Earth's magnetosphere: a tutorial". En: *IEEE Transactions on Plasma Science* 28.6, págs. 1818-1830. DOI: 10.1109/27.902211.

Russell, C. T. (2011). "Solar Wind and Interplanetary Magnetic Field: A Tutorial". En: *Geophysical Monograph*, págs. 73-89. DOI: 10.1029/gm125p0073.

Sabaka, Terence J., Lars Tøffner-Clausen y Nils Olsen (nov. de 2013). "Use of the Comprehensive Inversion method for Swarm satellite data analysis". En: *Earth Planets and Space* 65.11,

págs. 1201-1222. DOI: 10.5047/eps.2013.09.007. URL: https://doi.org/10.5047/eps.2013.09.007.

Siebert, M y J Meyer (1996). *The Upper Atmosphere (Herausgeber: Eds. W. Dieminger et al.): Geomagnetic Activity Indices*.

Smith, Steven W. (ene. de 2003). *Moving average filters*, págs. 277-284. DOI: 10.1016/b978-0-7506-7444-7/50052-2. URL: https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-7444-7/50052-2.

Stankov, Stanimir, K. Stegen y René Warnant (oct. de 2010). *Local Operational Geomagnetic Index K Calculation (K-LOGIC) from digital ground-based magnetic measurements*.

Sucksdorff, C., R. Pirjola y L. Häkkinen (1991). "Computer production of K-indices based on linear elimination". En: *Geophysical Transactions* 36.3–4, págs. 335-345.

Sugiura, M. (1963). *Hourly values of equatorial Dst for the IGY*. Inf. téc. NASA Technical Reports Server. URL: http://hdl.handle.net/2060/19650020355.

Takahashi, Kazue, Bruce A. Toth y John V. Olson (2001). "An automated procedure for near-real-time Kp estimates". En: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 106.A10, págs. 21017-21032. DOI: https://doi.org/10.1029/2000JA000218. eprint: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2000JA000218. URL: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2000JA000218.

Thébault, E. et al. (2015). "International Geomagnetic Reference Field: the twelfth generation". En: *Earth, Planets and Space* 67.1, pág. 79. DOI: 10.1186/s40623-015-0228-9.

Van Wijk, A. y D. Nagtegaal (1977). "K measurements by computer". En: *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 39.11–12, págs. 1447-1450. DOI: 10.1016/0021-9169(77)90102-7.

Vargas-Domínguez, Santiago et al. (2026). "Actividad solar y clima espacial: desafíos científicos y oportunidades para el desarrollo en Colombia". En: *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 50.194, págs. 191-212. DOI: 10.18257/raccefyn.3286.

Vestine, E. H. (1947). *The geomagnetic field, its description and analysis*. URL: http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA21930139.

Voorhies, Coerte V. (1995). "Time-varying fluid flow at the top of Earth's core derived from geomagnetic field models". En: *Journal of Geophysical Research* 100, págs. 10029-10039.

Wu, Chin-Chun et al. (sep. de 2005). "Flare-generated shock evolution and geomagnetic storms during the "Halloween 2003 epoch": 29 October to 2 November". En: *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 110.A9. DOI: 10.1029/2005ja011011. URL: https://doi.org/10.1029/2005ja011011.

Wu, Xiaomin (2024). *FastAPI as a backend framework*. URL: https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2024051512082.

Yamazaki, Y. y A. Maute (sep. de 2016). "Sq and EEJ—A Review on the Daily Variation of the Geomagnetic Field Caused by Ionospheric Dynamo Currents". En: *Space Science Reviews* 206.1-4, págs. 299-405. DOI: 10.1007/s11214-016-0282-z. URL: https://doi.org/10.1007/s11214-016-0282-z.

Zhang, Tianshan y Adam Schultz (ene. de 1990). "Exorcise—an algorithm for detection of spurious values and prediction of missing data". En: *Computers Geosciences* 16.8, págs. 1027-1065. DOI: 10.1016/0098-3004(90)90048-x. URL: https://doi.org/10.1016/0098-3004(90)90048-x.

Apéndice A
Anexo: Datos y Fuentes

MANUAL DE CONEXIÓN MARTAS Y MARCOS CON FUQ

En primera medida es necesario instalar la extensión de Anaconda, con la finalidad de crear el entorno virtual de marcos y la instalación del paquete MARTAS-develop.

1. Instalación de Anaconda

Descargar instalador del repositorio de Anaconda: https://repo.anaconda.com/archive/Anaconda3-2025.06-1-Linux-x86_64.sh

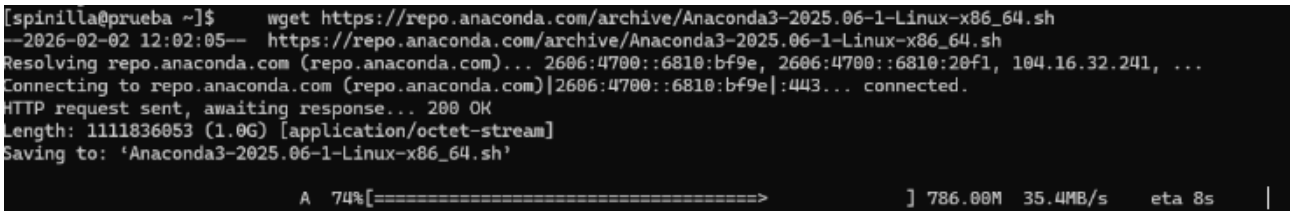


Figura A.1: Descarga de instalador de repositorio de Anaconda.

Ejecutar instalador de Anaconda, para proceder con la descarga: bash Anaconda3-2025.06-1-Linux-x86_64.sh

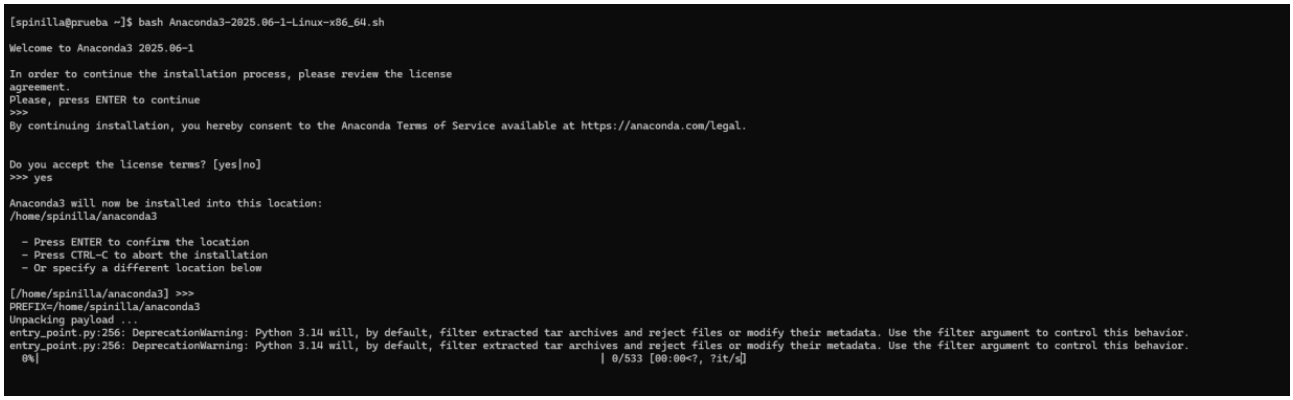


Figura A.2: Ejecutar instalador de Anaconda.

Recargar el SHELL para poder cargarlo en el path con el comando `exec bash`

Reiniciar la terminal para verificar la instalación y versión de Anaconda: `conda --version`

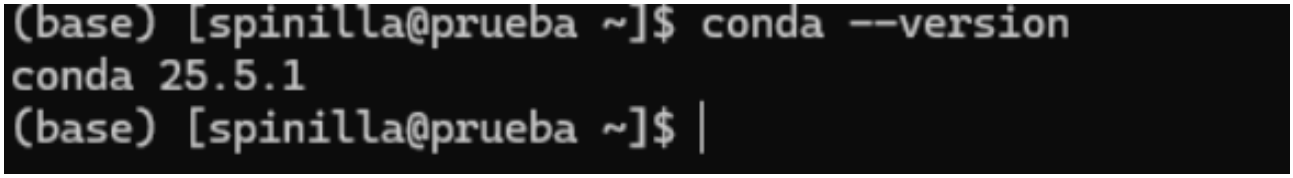


Figura A.3: Versión de Anaconda.

Crear environment de marcos en Anaconda:

- `conda deactivate`
- `conda create -n marcos python=3.11`
- `conda activate marcos`

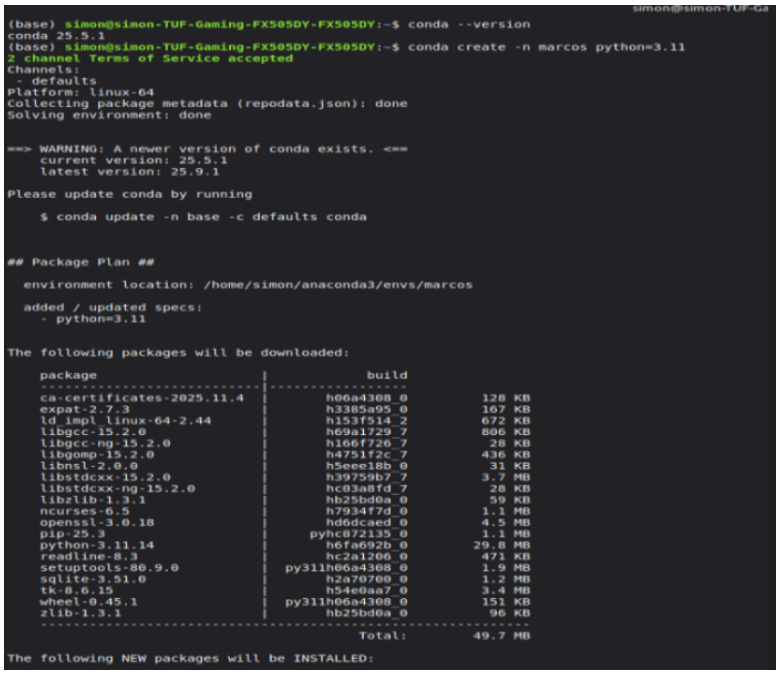


Figura A.4: Creación de Environment de Marcos.

2. Instalación del repositorio de Git

Instalación de las bibliotecas de git: `sudo dnf install git -y`

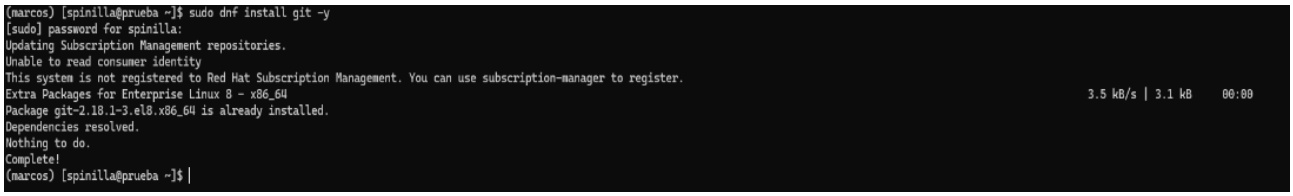


Figura A.5: Instalación de las bibliotecas de git.

Clonar el repositorio de GitHub, rama de desarrollador: https://github.com/geomagpy/MARTAS.git

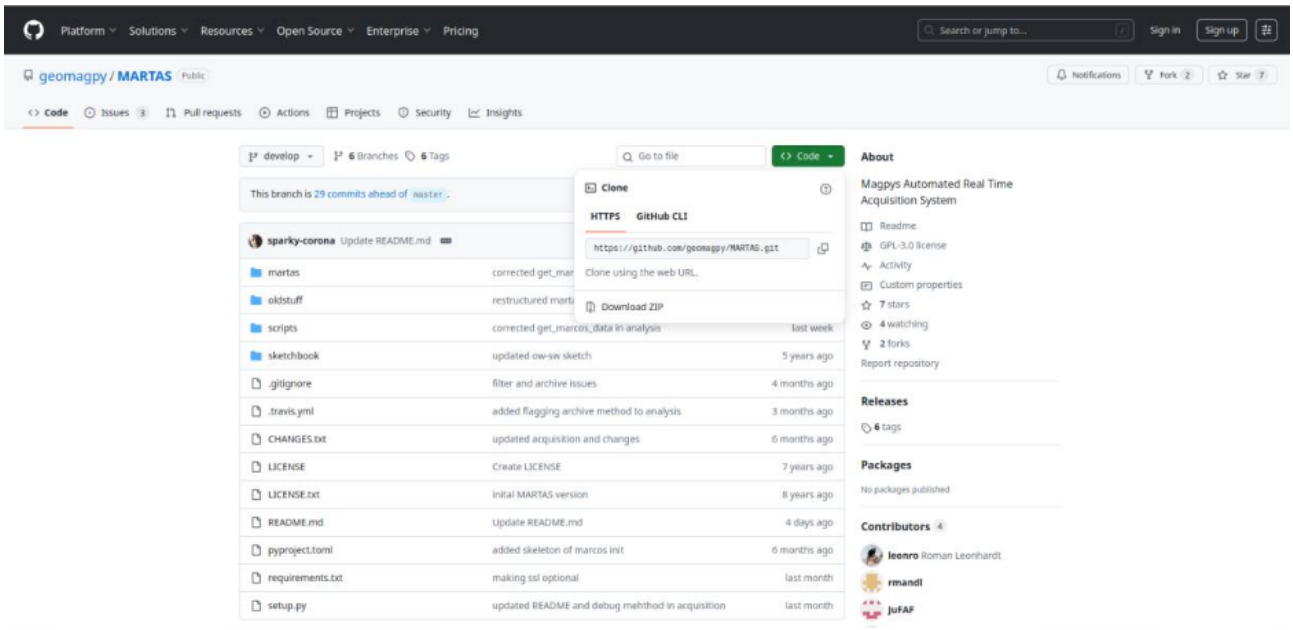


Figura A.6: Repositorio GitHub de Dr. Roman Leonhart MARTAS y MARCOS.

3. Instalación de MARTAS – develop

Acceder a la carpeta clonada e instalar requerimientos de MARTAS – develop:
- `cd MARTAS`
- `pip install -r requirements.txt`
- `python setup.py install --user`

```
(marcos) [spinilla@prueba ~]$ cd MARTAS
(marcos) [spinilla@prueba MARTAS]$ pip install -r requirements.txt
Collecting paho-mqtt (from -r requirements.txt (line 1))
  Downloading paho_mqtt-2.1.0-py3-none-any.whl.metadata (23 kB)
Collecting pyserial (from -r requirements.txt (line 2))
  Downloading pyserial-3.5-py2.py3-none-any.whl.metadata (1.6 kB)
Collecting numpy (from -r requirements.txt (line 3))
  Downloading numpy-2.4.2-cp311-cp311-manylinux_2_27_x86_64.manylinux_2_28_x86_64.whl.metadata (6.6 kB)
Collecting scipy (from -r requirements.txt (line 4))
  Downloading scipy-1.17.0-cp311-cp311-manylinux_2_27_x86_64.manylinux_2_28_x86_64.whl.metadata (62 kB)
Collecting geomagpy (from -r requirements.txt (line 5))
  Downloading geomagpy-2.0.1.tar.gz (16.2 MB)
     ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 16.2/16.2 MB 10.2 MB/s  0:00:01
```

Figura A.7: Instalación de requerimientos de MARTAS - develop.

4. Instalación de Martas y Marcos

Realizar la instalación de Martas y Marcos:
- `which martas_init`
- `cd ~/.local/bin`
- `martas_init`

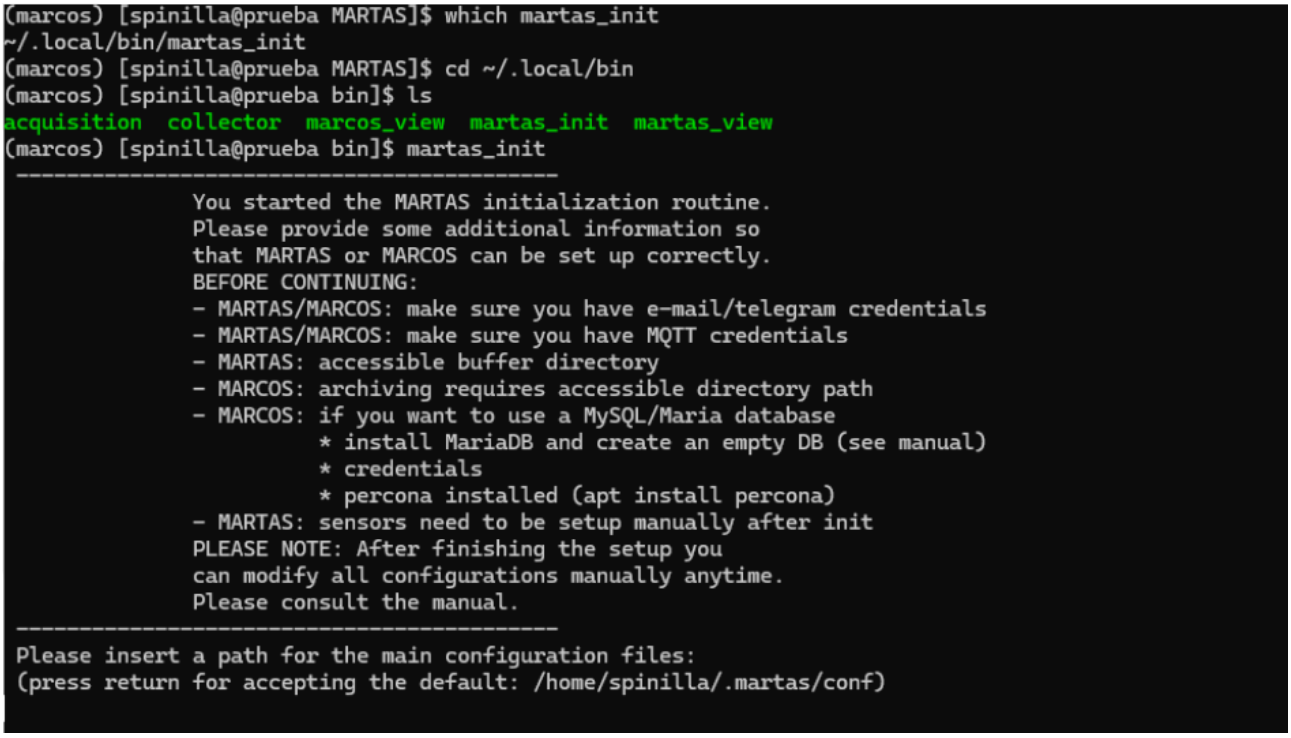


Figura A.8: Búsqueda del archivo de instalación.

Definimos los parametros de martas_init:

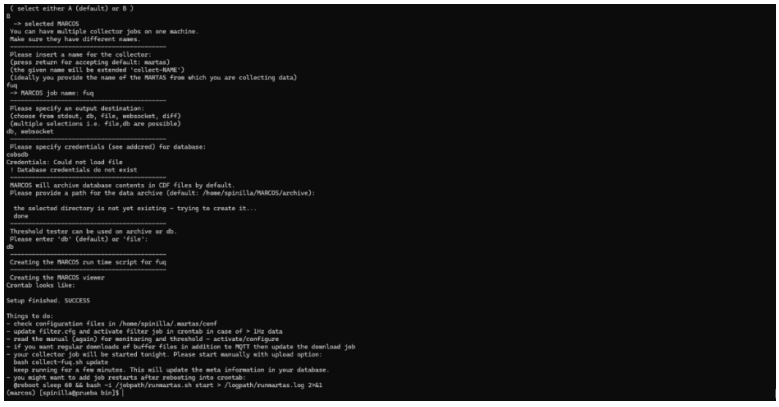


Figura A.9: Instalación de martas_init.

5. Instalación de la base de datos:

Instalamos las bibliotecas de mariadb, antes de ello se tiene que tener la subscipcion a red hat para las dependencias de las bibliotecas

- `sudo subscription-manager register`
- `sudo dnf install mariadb-server mariadb -y`
- `sudo systemctl start mariadb`
- `sudo systemctl status mariadb`
- `sudo systemctl enable mariadb`

- sudo mysql_secure_installation
- sudo mysql -u root -p

```
(marcos) [spinilla@prueba .martas]$ sudo systemctl start mariadb
Job for mariadb.service failed because a fatal signal was delivered causing the control process to dump core.
See "systemctl status mariadb.service" and "journalctl -xe" for details.
(marcos) [spinilla@prueba .martas]$ sudo systemctl status mariadb
● mariadb.service - MariaDB 10.3 database server
   Loaded: loaded (/usr/lib/systemd/system/mariadb.service; disabled; vendor preset: disabled)
   Active: active (running) since Mon 2026-02-02 13:23:54 -05; 19s ago
     Docs: man:mysqld(8)
           https://mariadb.com/kb/en/library/systemd/
  Process: 1143 ExecStartPost=/usr/libexec/mysql-check-upgrade (code=exited, status=0/SUCCESS)
  Process: 1070 ExecStartPre=/usr/libexec/mysql-prepare-db-dir mariadb.service (code=exited, status=0/SUCCESS)
  Process: 1043 ExecStartPre=/usr/libexec/mysql-check-socket (code=exited, status=0/SUCCESS)
 Main PID: 1109 (mysqld)
   Status: "Taking your SQL requests now..."
    Tasks: 30 (limit: 26213)
   Memory: 74.6M
   CGroup: /system.slice/mariadb.service
           └─1109 /usr/libexec/mysqld --basedir=/usr
```

Figura A.10: Instalación de mariadb.

6. Creacion y configuracion de archivo tablas.py:

```
Credentials: Could not load credentials file - creating it ...
Credentials: Added entry for  cobsdb
Credentials: Now containing entries for ['cobsdb']
(marcos) [spinilla@prueba .martas]$ addcred -v
Credentials: Overview of existing credentials:
['cobsdb', {'user': 'marcos', 'passwd': 'MTIz', 'db': 'cobsdb', 'host': 'localhost'}]
(marcos) [spinilla@prueba .martas]$
```

Figura A.11: Creación de la base de datos y privilegios.

Entrar al nano del archivo tablas.py y definir los siguientes parámetros

- nano tablas.py
- Copiar esto en el nano ————

```python
from magpy.core import database

db = database.DataBank(
    "localhost",         # host
    "marcos",            # usuario de MariaDB
    "Mi_constrasenya",   # contrasena
    "cobsdb"             # nombre de la base de datos
)

print("Inicializando base de datos MagPy/MARTAS en 'FUQdb' ...")
db.dbinit()   # crea todas las tablas necesarias si no existen
db.alter()    # ajusta/actualiza estructura si hace falta
print("Listo. Estructura creada/actualizada.")
print("\nResumen de la base de datos:")
db.info('stdout')
```

- python tablas.py

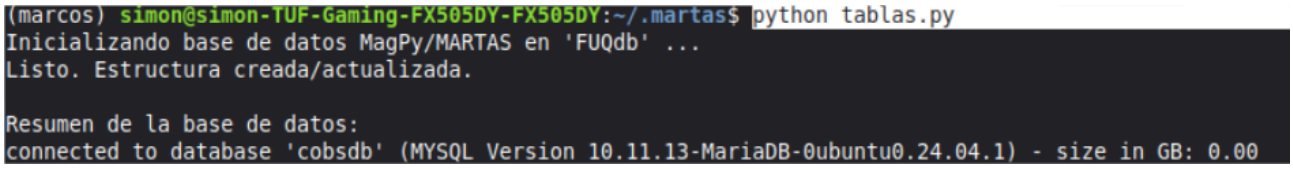


Figura A.12: Correr tablas.py.

INICIAR COLLECTOR DE MARCOS Y VISUALIZAR DATOS:

Entrar en funcionamiento el collector de marcos, se quedá bloqueada la terminal por el funcionamiento (en el caso de querar salir crtl+c)

- `bash collect-fuq.sh start`

Se abre nueva terminal para acceder a la visualización de datos:

- `cd /.martas/`
- `bash marcos`$_{v}iew$

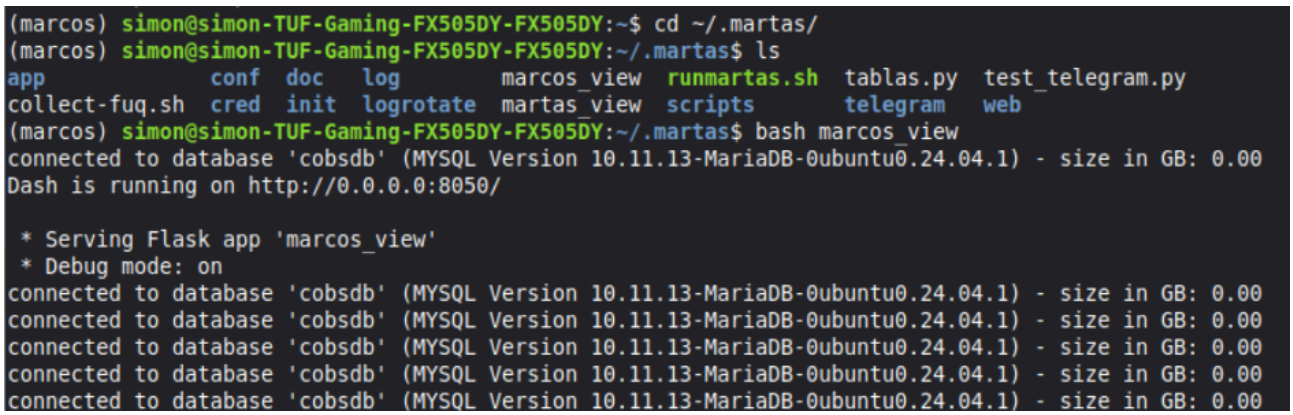


Figura A.13: Output de recolección de datos de FUQ

Abrir localhost en buscador para visualizar los datos en tiempo real:

- `Para visualizar MARTAS 2 de deber entrar al puerto 8050:/`http://localhost:8050/

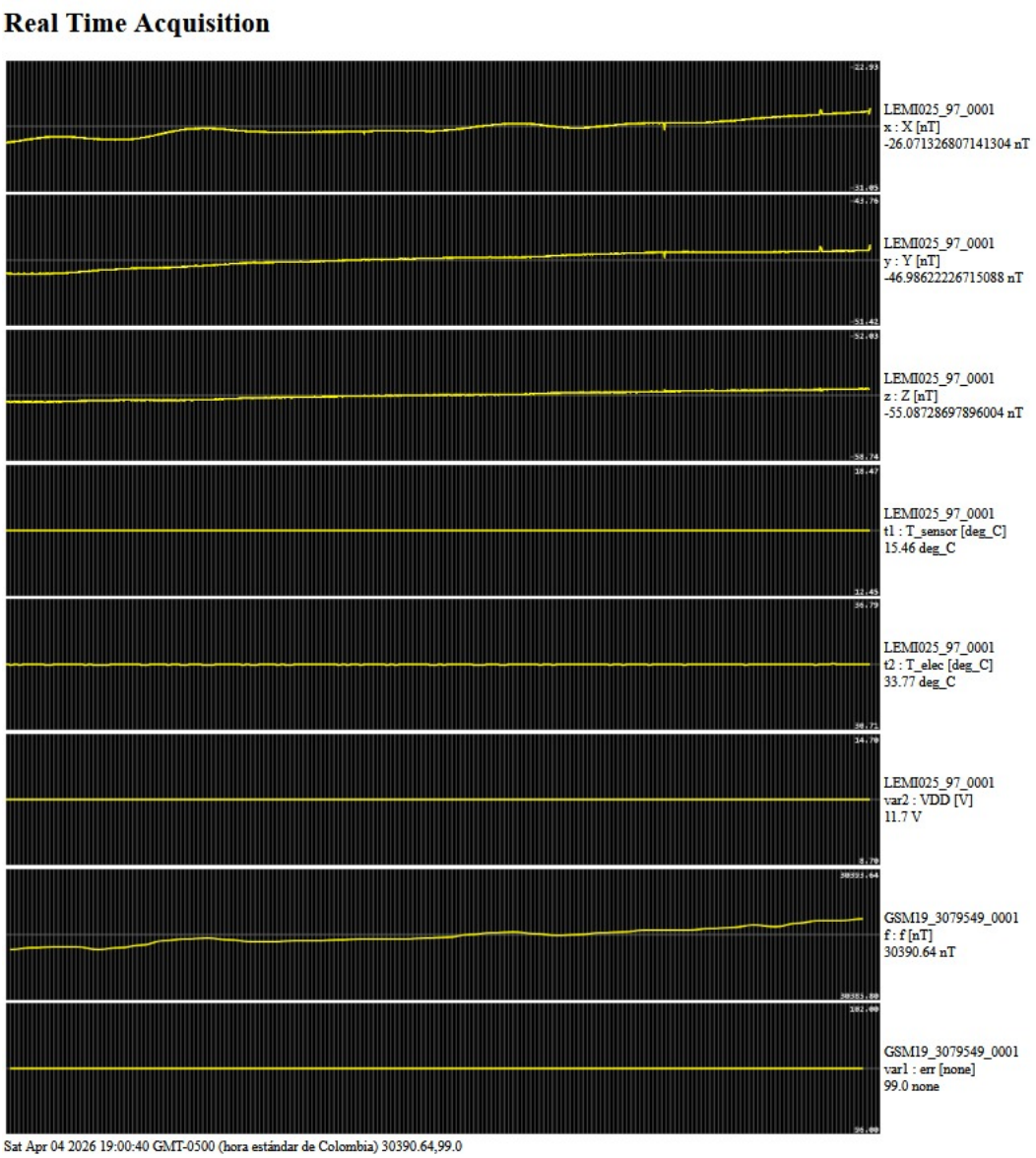


Figura A.14: Visualización de MARTAS.

- Para visualizar las series de tiempo de los sensores, entrar al puerto 8080:/http://localhost:8080/

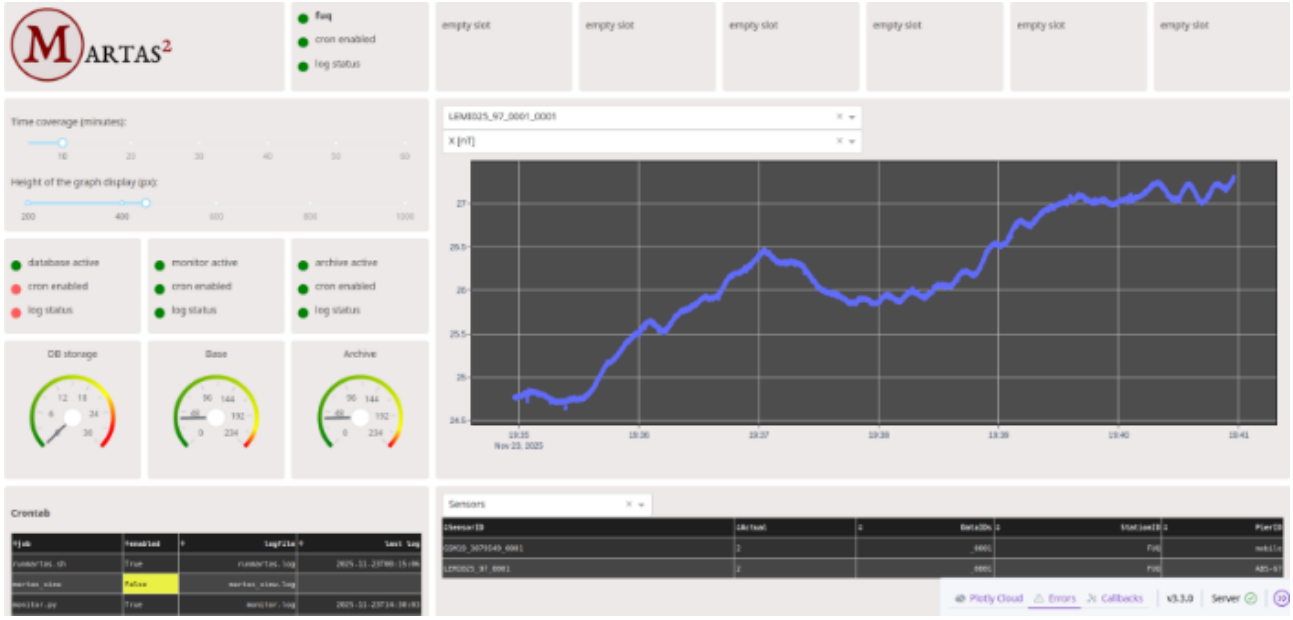


Figura A.15: Visualización de MARCOS.

4. Abrir base de datos y visualizar los datos en mysql

Abrir nuevo terminal, desactivar enviroment base y activar enviroment de Anaconda de marcos:

- conda deactivate
- conda activate marcos
- cd /.martas/
- mysql -u marcos -p

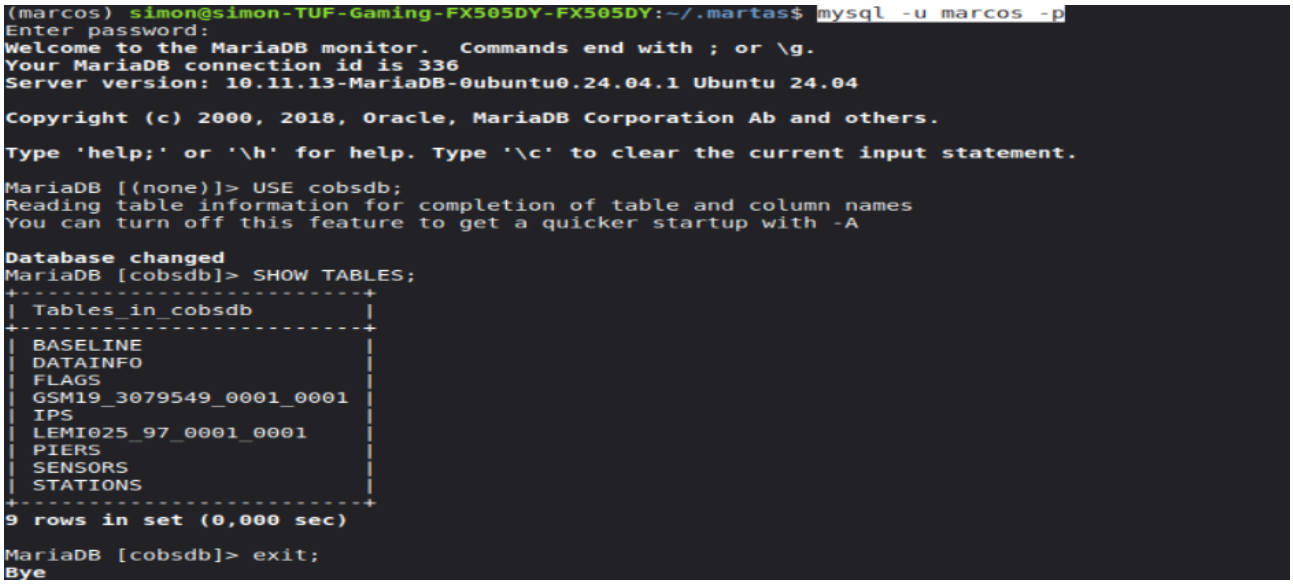


Figura A.16: Tablas de la base de datos.

Manual de Requisitos del Servidor con Volumetría

Guía práctica para dimensionamiento de infraestructura.

1. Alcance y objetivos

Este manual está encaminado a definir los requisitos técnicos necesarios para la operación del servidor basado en volumetría, teniendo en cuenta las necesidades en términos de capacidad, rendimiento, disponibilidad y seguridad de un servidor destinado a la recolección, preprocesamiento y visualización de los datos geomagnéticos en tiempo real, adquiridos por el observatorio geomagnético de FUQ. Por otro lado, el objetivo es proveer lineamientos reproducibles para seleccionar las características necesarias de CPU, memoria RAM, almacenamiento, red y sistema operativo.

2. Información del servicio / aplicación

◦ Sistema Monitoreo en Tiempo Real FUQ

◦ Desarrollo: *Environments* Conda

◦ Modelo de despliegue basado en microservicios, en el cual los componentes MARCOS (adquisición y almacenamiento geomagnéticos) y MARTAS_API (servicios de exposición de datos mediante API), que se ejecutan como servicios independientes. Utiliza un enfoque *Bare-Metal* en infraestructura Linux y con gestión independiente mediante *environments* Conda.

◦ Base de datos geomagnéticos, logs, caché, almacenamiento de objetos.

3. Supuestos de volumetría (entradas)

Teniendo en cuenta el volumen de usuarios concurrentes, se estima un promedio de 250 usuarios simultáneos, con picos de hasta 800 usuarios, pertenecientes a diferentes áreas como telecomunicaciones, comunidad científica y operadores de sistemas UAS, entre otros. En este contexto de uso, se proyecta una carga promedio de aproximadamente 2.000 transacciones por segundo, asociadas al consumo y procesamiento de información especializada.

Cada transacción involucra un peso promedio de solicitud de 30 MB, correspondiente a datos geomagnéticos. Como resultado, el volumen de información generado y procesado alcanza un estimado de 0,07 GB diarios, lo cual debe ser considerado en el dimensionamiento de la infraestructura, particularmente en términos de capacidad de red, almacenamiento y rendimiento del sistema, garantizando niveles adecuados de disponibilidad y tiempos de respuesta acordes a los requisitos operativos.

Métrica	**Promedio**	**Pico**	**Notas**
Usuarios concurrentes	250	800	Jornada laboral
RPS/TPS	750	1250	p95 $\leq$ 300 ms
Payload (KB)	30	60	REST/JSON
Datos nuevos (GB/día)	0.07	0.1	Logs excluidos

Tabla 14: Supuestos de volumetría.

4. Criterios de dimensionamiento

4.1 CPU

Actualmente se tiene en máquina de pruebas:

```
(marcos) [spinilla@santiago .martas]$ lscpu
Arquitectura:                       x86_64
modo(s) de operación de las CPUs:   32-bit, 64-bit
Orden de los bytes:                 Little Endian
CPU(s):                             2
Lista de la(s) CPU(s) en línea:     0,1
Hilo(s) de procesamiento por núcleo: 1
Núcleo(s) por «socket»:             2
«Socket(s)»                         1
Modo(s) NUMA:                       1
ID de fabricante:                   GenuineIntel
Familia de CPU:                     6
Modelo:                             55
Nombre del modelo:                  Intel(R) Celeron(R) CPU  N2840  @ 2.16GHz
Revisión:                           8
CPU MHz:                            966.270
CPU MHz máx.:                       2582,3000
CPU MHz mín.:                       499,8000
BogoMIPS:                           4331.60
Virtualización:                     VT-x
Caché L1d:                          24K
Caché L1i:                          32K
Caché L2:                           1024K
CPU(s) del nodo NUMA 0:             0,1
```

Figura A.17: Salida del comando `lscpu` en la máquina de pruebas. Elaboración propia.

Se establece un mínimo de 8 núcleos de CPU y un valor recomendado de 16 núcleos, dado que la plataforma opera con una ventana de procesamiento de 1 segundo, orientada a la adquisición, procesamiento y actualización de datos en tiempo casi real.

En cada ciclo de ejecución se realizan de forma concurrente las siguientes tareas:

- Adquisición de datos mediante MARTAS y mensajería MQTT.
- Operaciones de base de datos, incluyendo inserciones y consultas en MariaDB.
- Preprocesamiento y generación de productos científicos a través de MARCOS (control de calidad, cálculo de *baseline* y generación de productos).
- Servicios web, visualización y alertas, incluyendo API REST (FastAPI), *dashboards* y notificaciones.

La disponibilidad de 8 a 16 núcleos de CPU permite mantener la utilización dentro de un umbral objetivo del 60–70 %, absorber picos de carga y garantizar que el ciclo de procesamiento de 1 segundo no acumule retrasos durante eventos geomagnéticos o incrementos temporales en la demanda.

4.2 Memoria

Se solicitan 16 GB de memoria RAM para escenarios de carga alta, considerando que la plataforma ejecutará múltiples procesos en simultáneo, tales como la base de datos, tareas de procesamiento con periodicidad de 1 segundo y la capa de API.

De acuerdo con criterios de dimensionamiento y margen operativo, se establece un rango recomendado de 8 a 16 GB de RAM, donde 8 GB corresponde al mínimo funcional aceptable, y 16 GB permite disponer de holgura suficiente para absorber picos de carga, evitar presión de memoria y garantizar una estabilidad operacional continua 24/7.

4.3 Almacenamiento

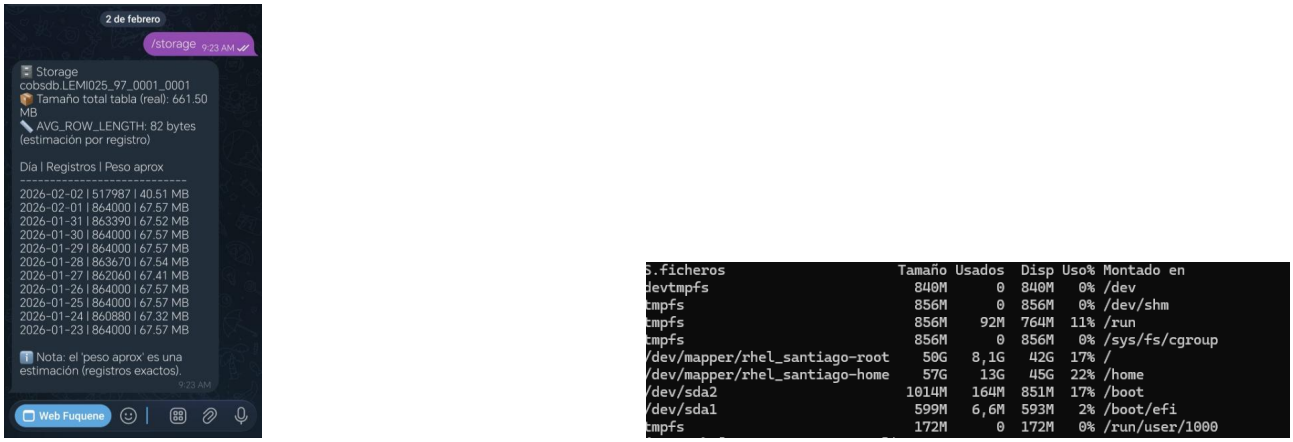


Figura A.18: Volumetría real de almacenamiento: registros diarios y uso de disco (`df -h`). Elaboración propia.

La plataforma de monitoreo de datos geomagnéticos realiza una adquisición continua de los datos con un muestreo de 10 Hz, generando un total de 846.000 registros diarios. A partir de esto se puede estimar un crecimiento promedio entre 65–70 MB por día, considerando otros factores como datos crudos, índices y sobrecarga del motor de la base de datos, se plantean los siguientes requerimientos:

- Crecimiento anual estimado ≈ 40 GB/año.
- Proyección a 5 años ≈ 200 GB/año.
- Factores adicionales considerados:
  - Índices de base de datos (30–50 %).
  - Productos derivados (K local, Dst local, Sq, detección de eventos).
  - Metadatos, logs del sistema y del motor de base de datos.
  - Almacenamiento temporal y márgenes operativos.

Se plantea una capacidad de 1 TB para 5 años, con estos valores se garantiza un crecimiento a futuro, cubriendo un margen de seguridad más el almacenamiento histórico y continuidad operativa.

4.4 Red

El ancho de banda requerido para la plataforma se estima a partir del pico de solicitudes al *backend* (RPS) y del tamaño promedio de las respuestas REST/JSON generadas por los servicios de exposición de datos.

Se recomienda un enlace de red mínimo de 0.5 Gbps, el cual garantiza:

◦ Estabilidad operativa bajo carga promedio y escenarios de pico.
◦ Soporte para múltiples usuarios concurrentes.
◦ Margen suficiente ante incrementos temporales en la demanda de consultas.
◦ Capacidad de crecimiento para la transferencia de productos históricos, sincronización de datos, respaldos y mantenimiento remoto del sistema.

Este ancho de banda permite mantener niveles adecuados de latencia y asegurar la continuidad del servicio sin degradación perceptible para los usuarios finales.

4.5 SO y plataforma

El servidor se ejecuta sobre un sistema operativo Linux con distribución Red Hat (RHEL) en la versión 8.0, aunque se aconseja tener la versión más reciente. También es importante aclarar que la infraestructura no utiliza hipervisores ni plataformas de virtualización en la nube; el acceso y la exposición de los servicios se realiza mediante un túnel seguro de Cloudflare.

◦ Compatibilidad de librerías y *runtime*: `paho-mqtt, pyserial, numpy, scipy, geomagpy, twisted, psutil, plotly, dash, dash_daq, paramiko, pexpect, requests, python-crontab, numba`.

5. Alta disponibilidad y resiliencia

◦ Topología: N+1, activo-activo, activo-pasivo.
◦ Balanceo de carga y afinidad de sesión.
◦ RPO/RTO requeridos y estrategia de *backup/restore*.
◦ Zonas/centros de datos separados (multi-AZ).

6. Seguridad

◦ Cifrado en tránsito (TLS 1.2+) y en reposo.
◦ Gestión de secretos (no *hardcodear* credenciales).
◦ Parches y *baseline* endurecido.
◦ Control de acceso y registro/auditoría.

7. Monitorización y pruebas de carga

◦ Métricas: CPU, memoria, disco (latencia/IOPS), red, errores 4xx/5xx, latencias p95/p99.
◦ Pruebas de humo y estrés antes de producción.
◦ Umbrales y alertas automáticas.

8. Plantilla de especificación de servidor (salida)

Parámetro	**Especificación**
Rol del servidor	Procesamiento científico de Python; Persistencia de datos (MariaDB/MySQL); Visualización y *dashboards* (Dash/Plotly).
vCPU (núcleos)	8–16 vCPU (recomendado 16).
RAM (GB)	16 GB.
Almacenamiento	1 TB útil en SSD NVMe, 2 × 1 TB en RAID 1, orientado a rendimiento, disponibilidad y resiliencia.
IOPS / latencia objetivo	IOPS sostenidos: $\geq$ 10.000; Latencia lectura: $\leq$ 2 ms; Latencia escritura: $\leq$ 5 ms.
Ancho de banda	0.5 Gbps.
Sistema operativo	Red Hat (versión soportada vigente).
Software / *Runtime*	MariaDB / MySQL; MARTAS / MARCOS; FastAPI (Uvicorn/Gunicorn); MQTT broker; Python (pandas, numpy, scipy, magpy); Nginx/Apache (opcional); Cloudflared; paho-mqtt, pyserial, geomagpy, twisted, psutil, plotly, dash, dash_daq, paramiko, pexpect, requests, python-crontab, numba.
Alta disponibilidad	Activo – Pasivo (N + 1).
Backups y retención	De acuerdo con las políticas de la entidad.
Seguridad	Datos sensibles solo por red privada. Métricas y administración fuera de internet. Controles de red (defensa en profundidad).
Monitoreo	Monitoreo de CPU, RAM, disco, red, base de datos y API con alertas automáticas.

Tabla 15: Plantilla de especificación del servidor.

9. Ejemplo de dimensionamiento rápido

Supuestos: 400 RPS pico, tamaño respuesta 30 KB, crecimiento 5 GB/día con 180 días de retención, utilización objetivo CPU 60 %. Resultado sugerido: 8–12 vCPU, 24–32 GB RAM, SSD NVMe 2×1 TB en RAID1, 1 Gbps (mínimo) con margen, y monitoreo de p95 $<$ 300 ms.

Apéndice B
Anexo: Índice Dst

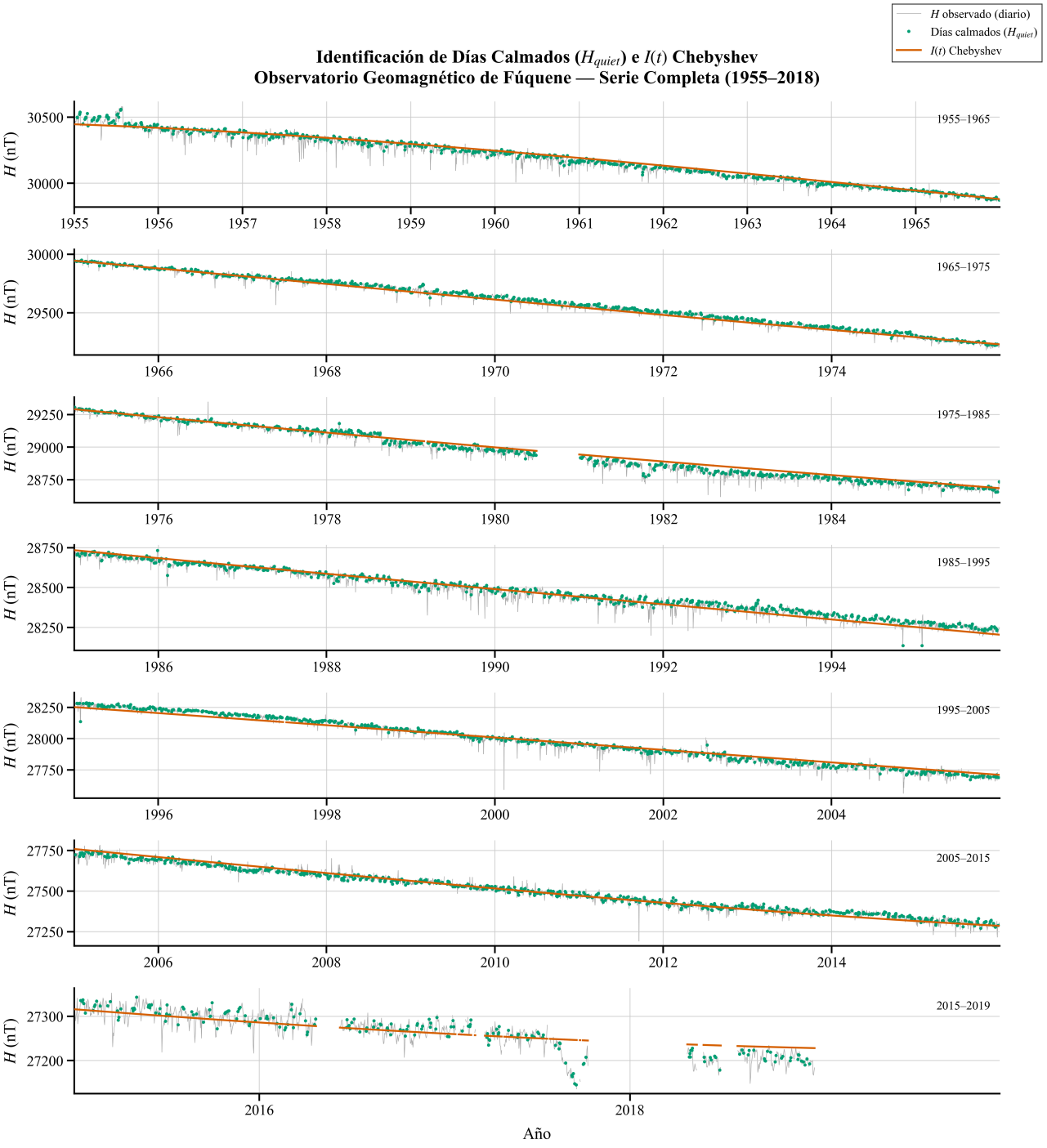


Figura B.1: Serie de la componente horizontal, campo interno y días calmados para el observatorio geomagnético de Fúquene entre el periodo de 1955-2018.

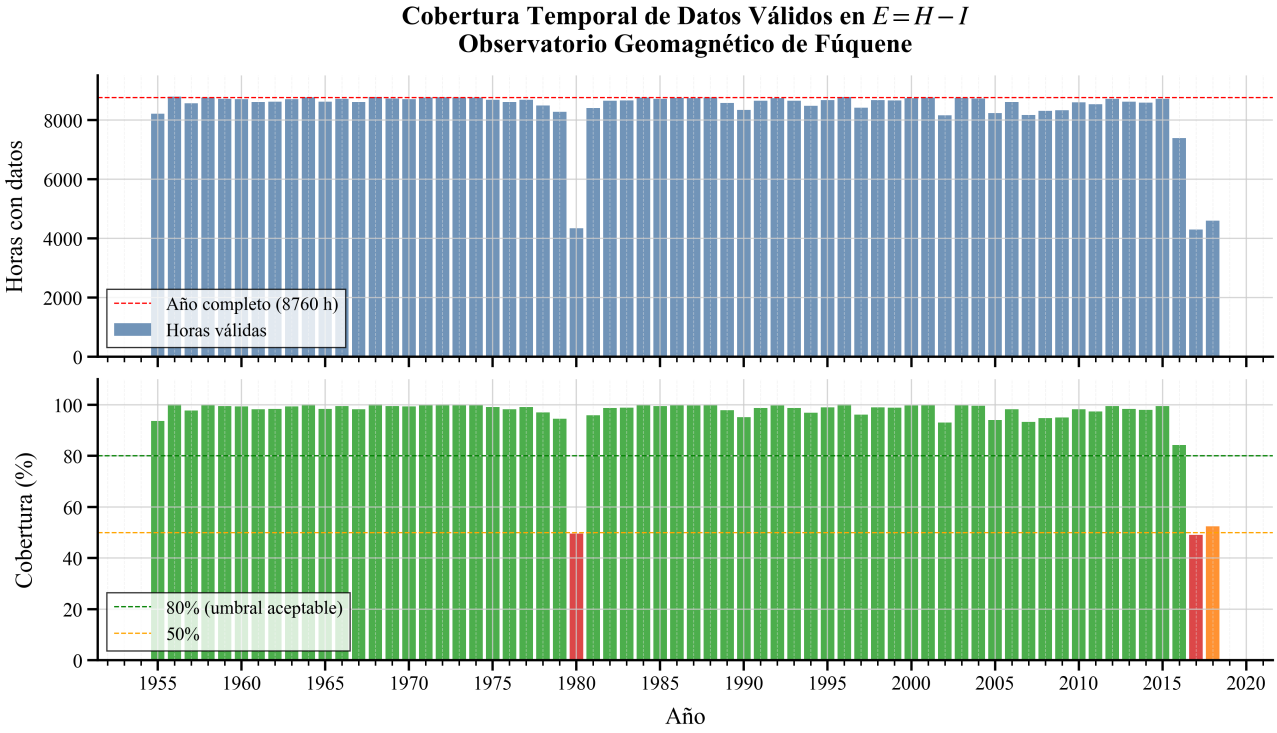


Figura B.2: Cobertura de los datos de la serie del campo externo para el observatorio geomagnético de Fúquene entre el periodo de 1955-2018.

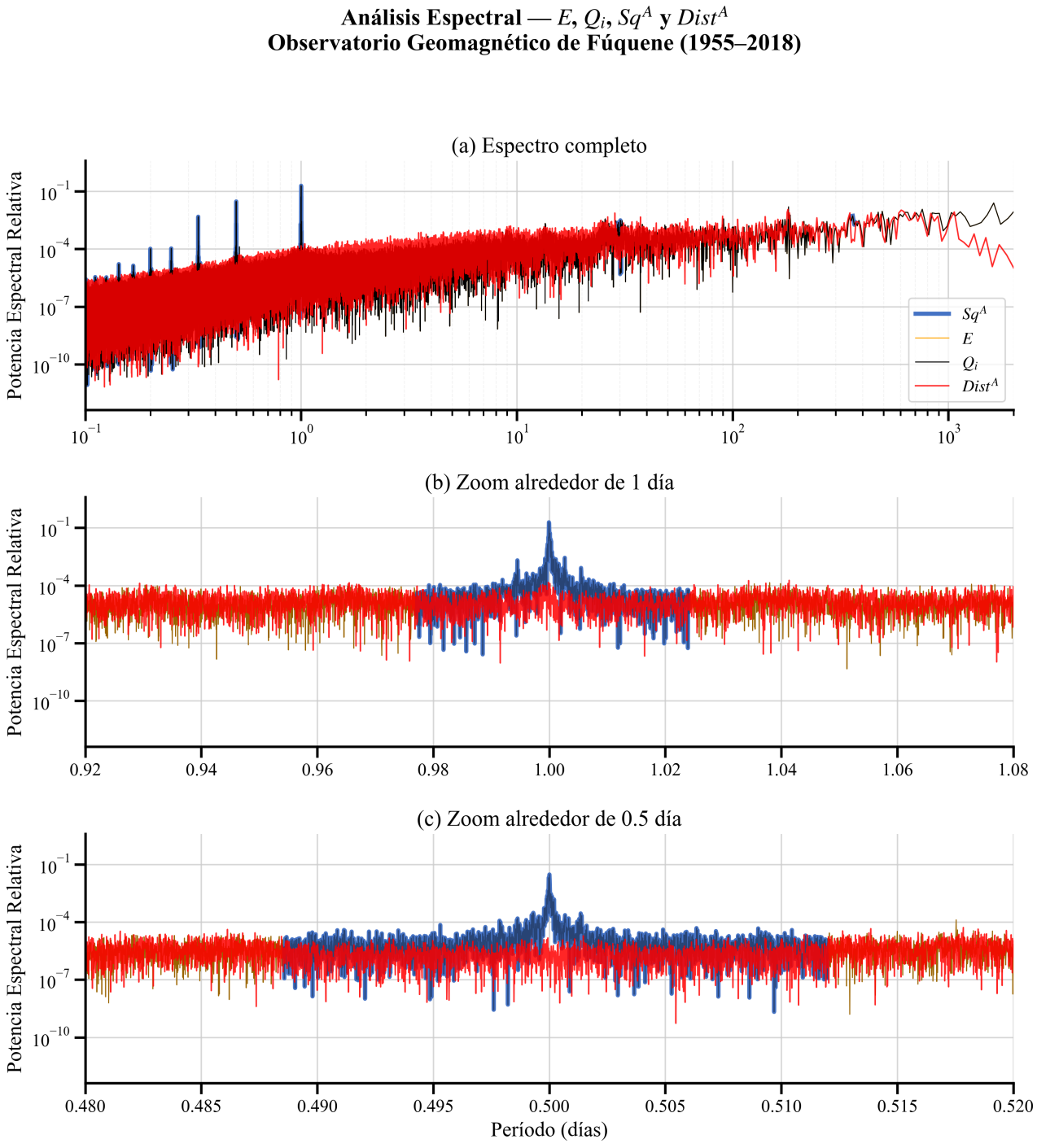


Figura B.3: Análisis espectral de las componentes Sq, E, Q y Dist del enfoque A para el observatorio geomagnético de Fúquene entre el periodo de 1955-2018.

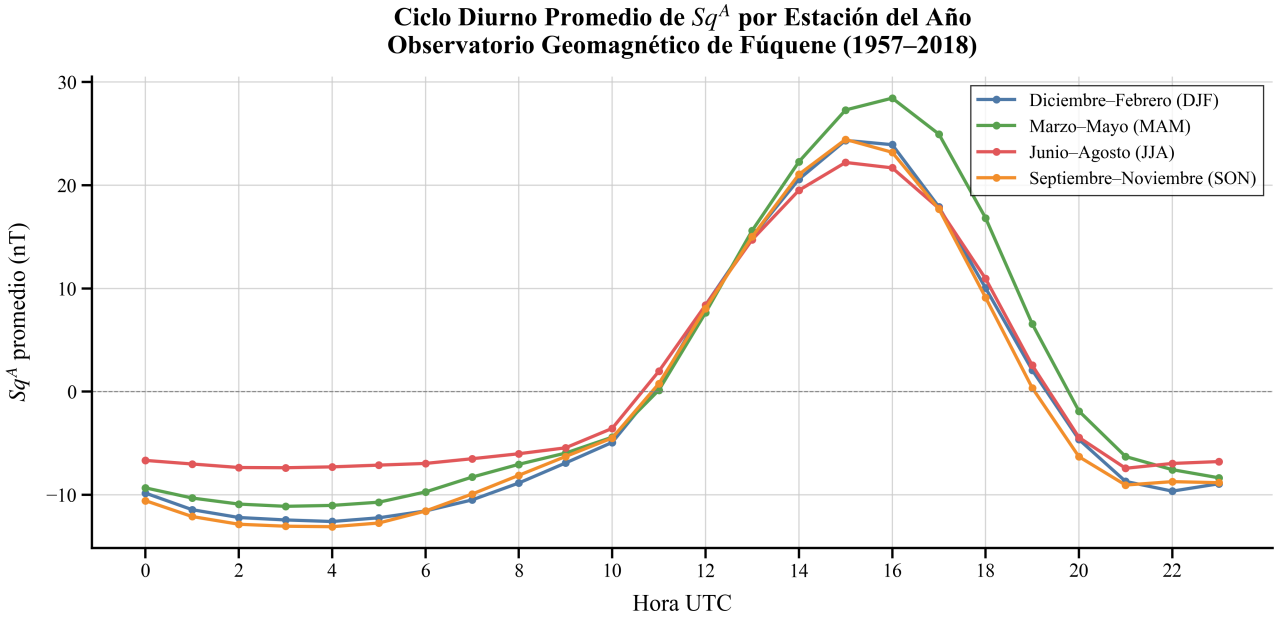


Figura B.4: Comportamiento horario de la componente Sq calculada en el enfoque A para el observatorio geomagnético de Fúquene entre el periodo de 1955-2018.

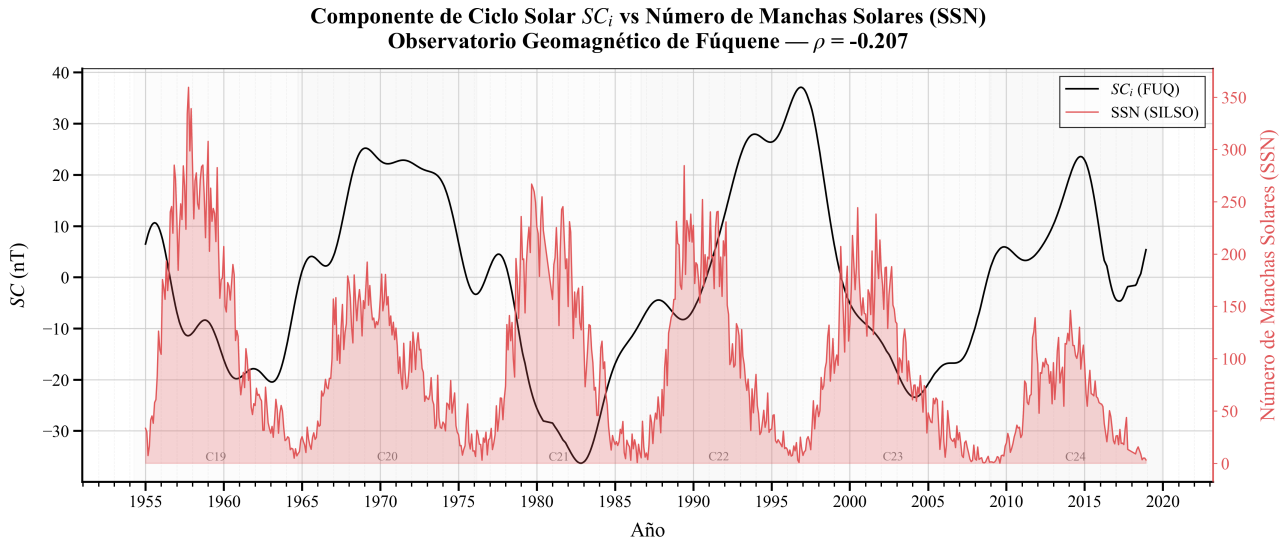


Figura B.5: Comportamiento del ciclo solar respecto al número de manchas solares para el observatorio geomagnético de Fúquene entre el periodo de 1955-2018.

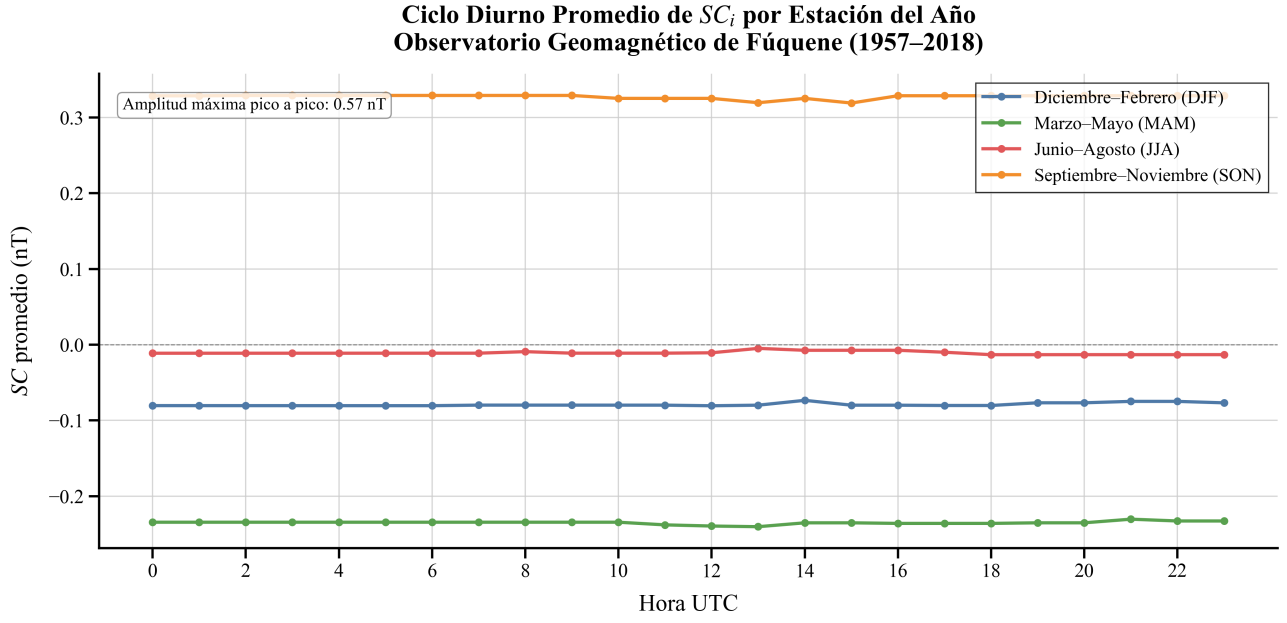


Figura B.6: Comportamiento horario del ciclo solar para el observatorio geomagnético de Fúquene entre el periodo de 1955-2018.

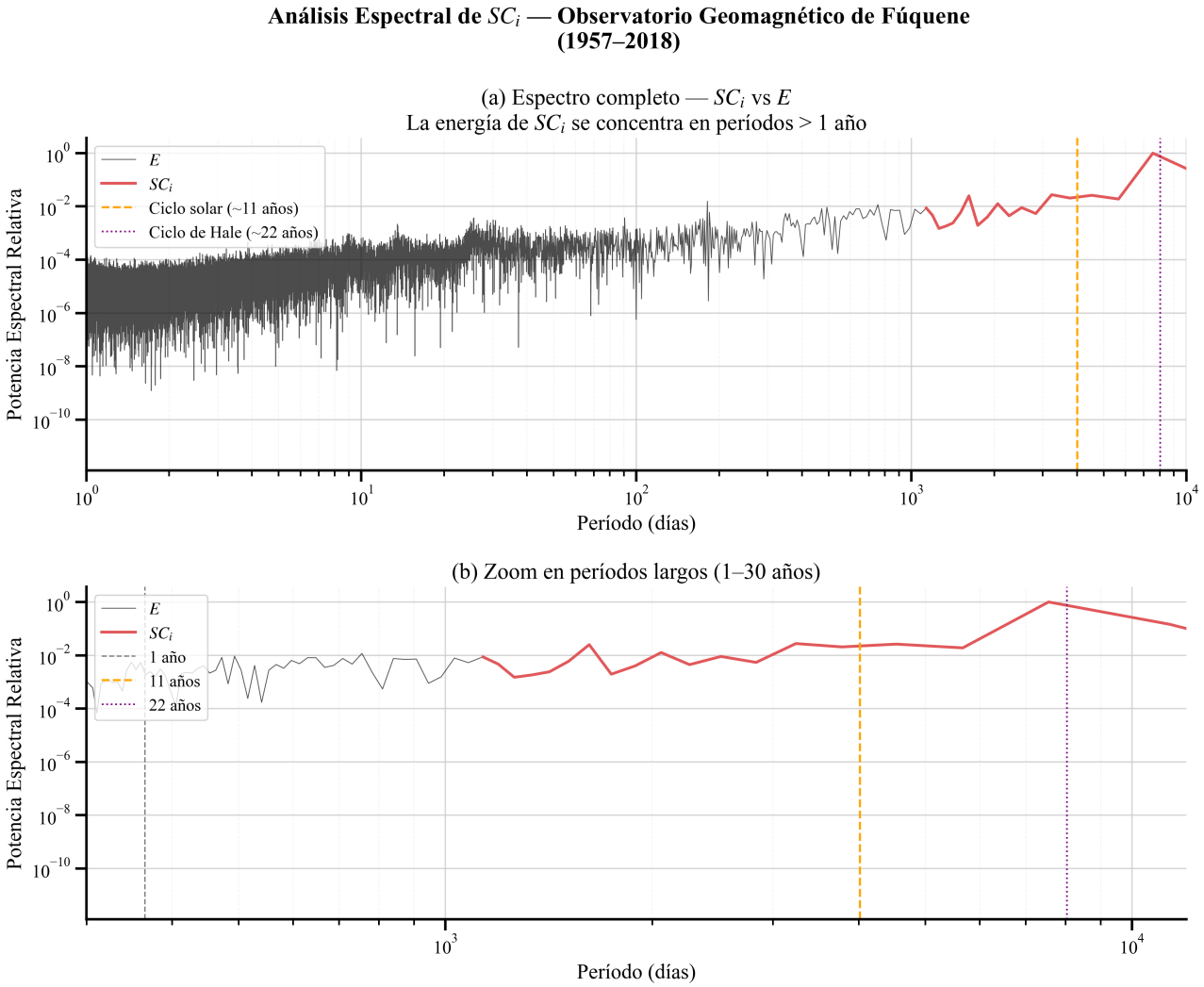


Figura B.7: Análisis espectral del ciclo solar para el observatorio geomagnético de Fúquene entre el periodo de 1955-2018.

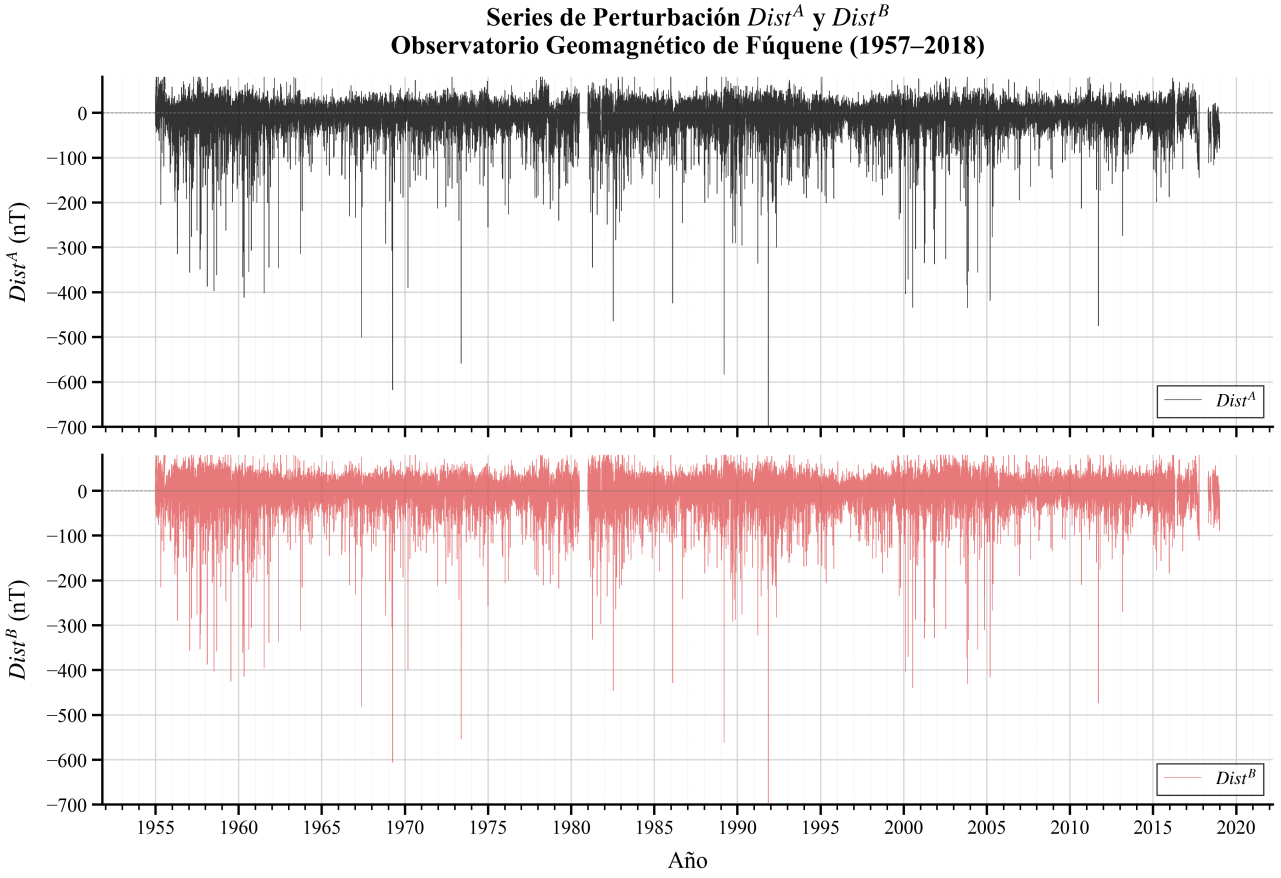


Figura B.8: Serie de perturbación calculada bajo el enfoque A y el enfoque B para el observatorio geomagnético de Fúquene entre el periodo de 1955-2018.

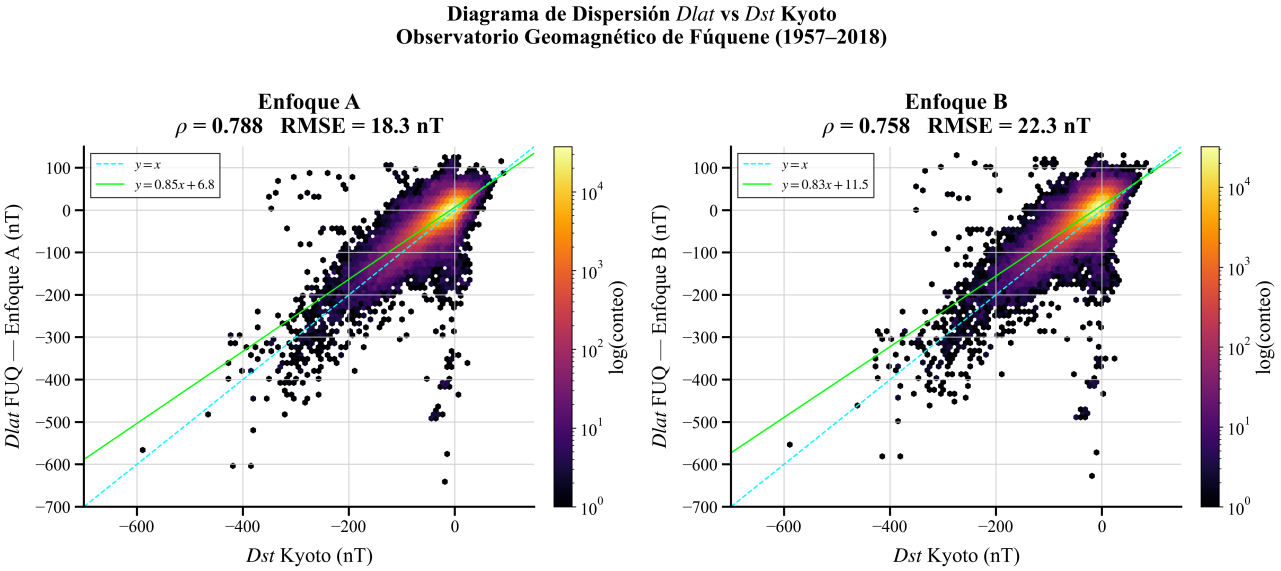


Figura B.9: Diagrama de dispersión del índice Dlat del enfoque A y el enfoque B, respecto al índice Dst de Kyoto para el observatorio geomagnético de Fúquene entre el periodo de 1957-2018.

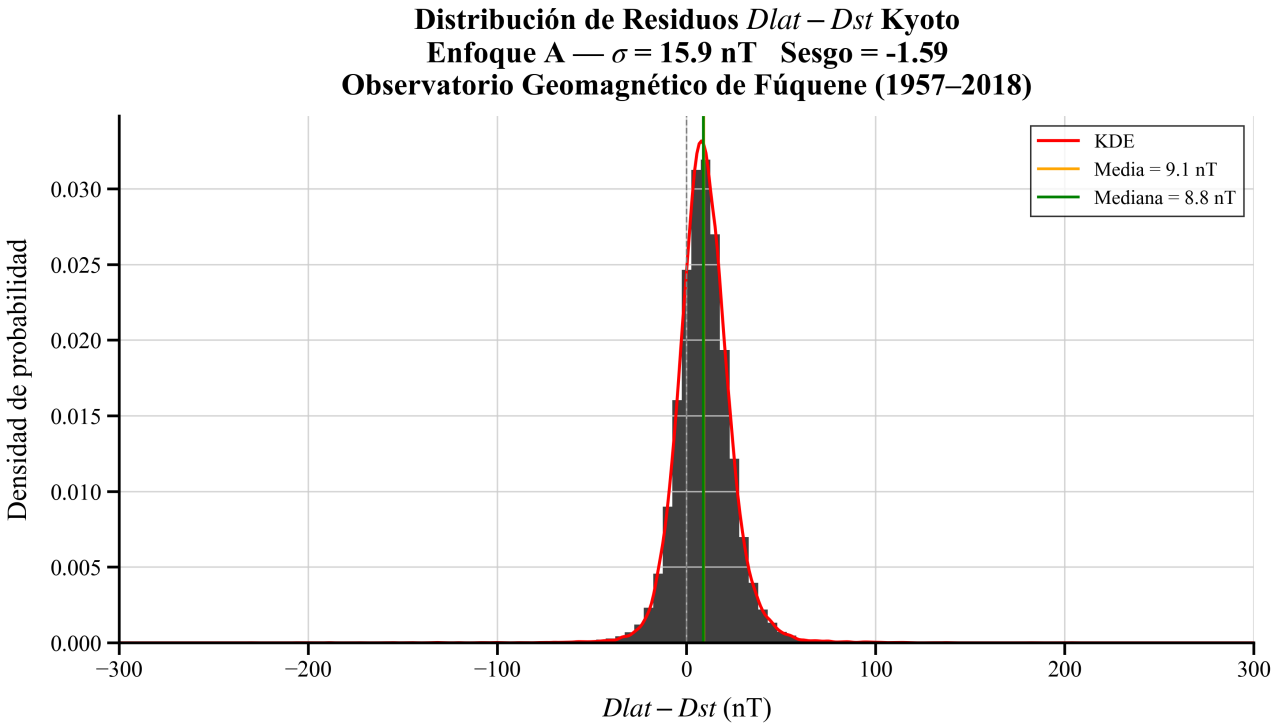


Figura B.10: Distribución del índice Dlat del enfoque A respecto al índice Dst de Kyoto para el observatorio geomagnético de Fúquene entre el periodo de 1957-2018.

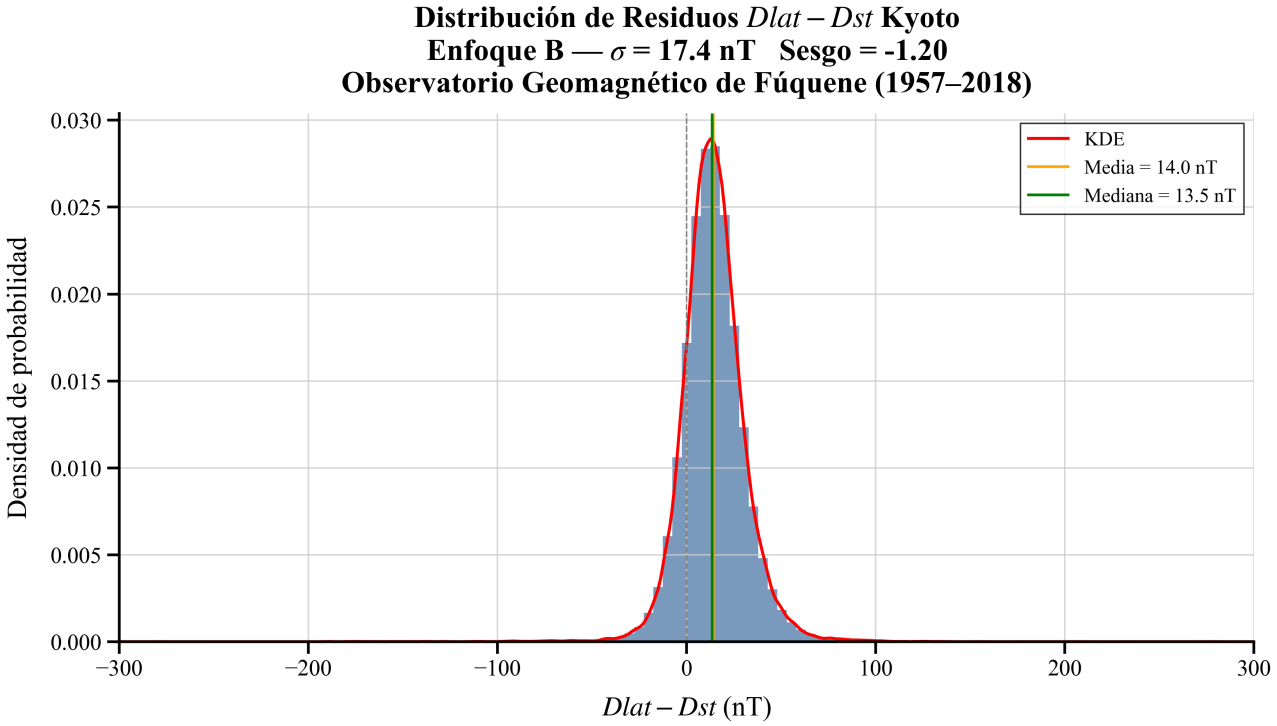


Figura B.11: Distribución del índice Dlat del enfoque B respecto al índice Dst de Kyoto para el observatorio geomagnético de Fúquene entre el periodo de 1957-2018.

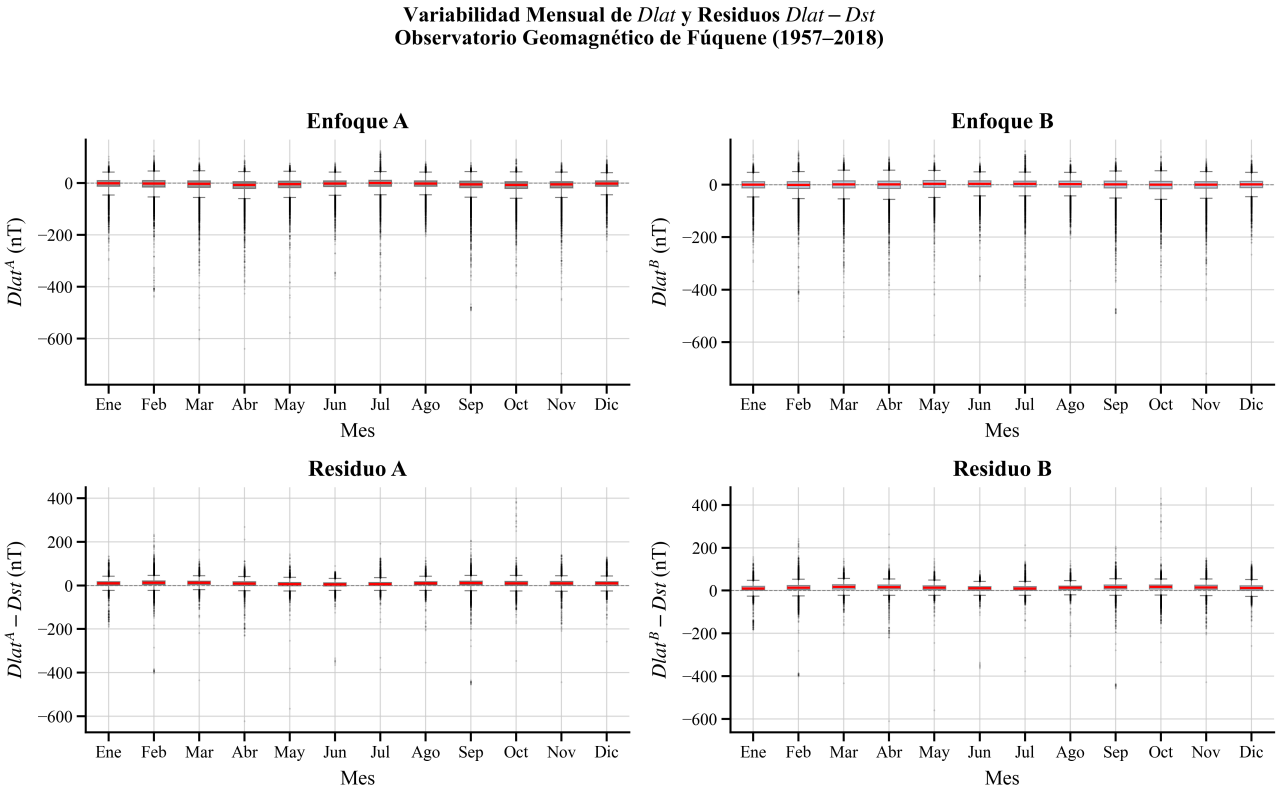


Figura B.12: Variabilidad mensual del índice Dlat del enfoque A y el enfoque B, respecto al índice Dst de Kyoto para el observatorio geomagnético de Fúquene entre el periodo de 1957-2018.

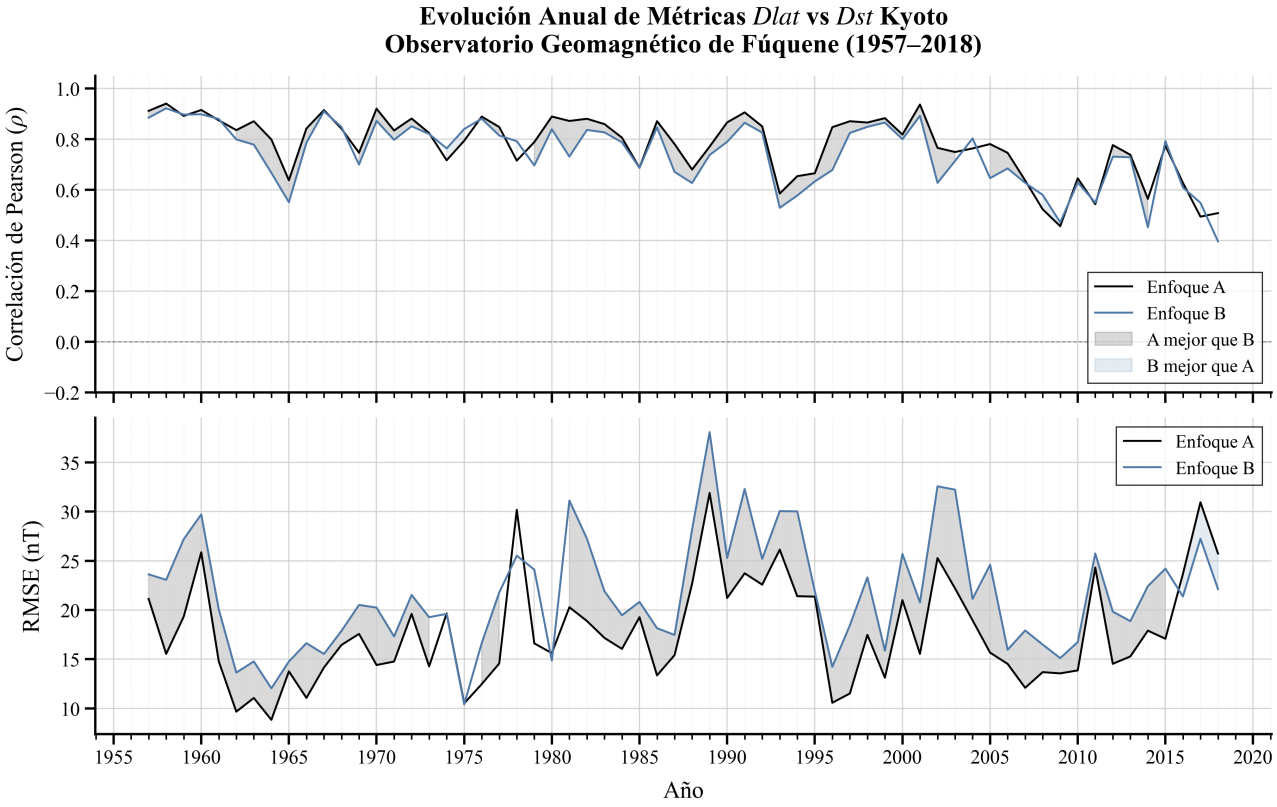


Figura B.13: Desempeño anual del índice Dlat del enfoque A y el enfoque B, respecto al índice Dst de Kyoto para el observatorio geomagnético de Fúquene entre el periodo de 1957-2018.

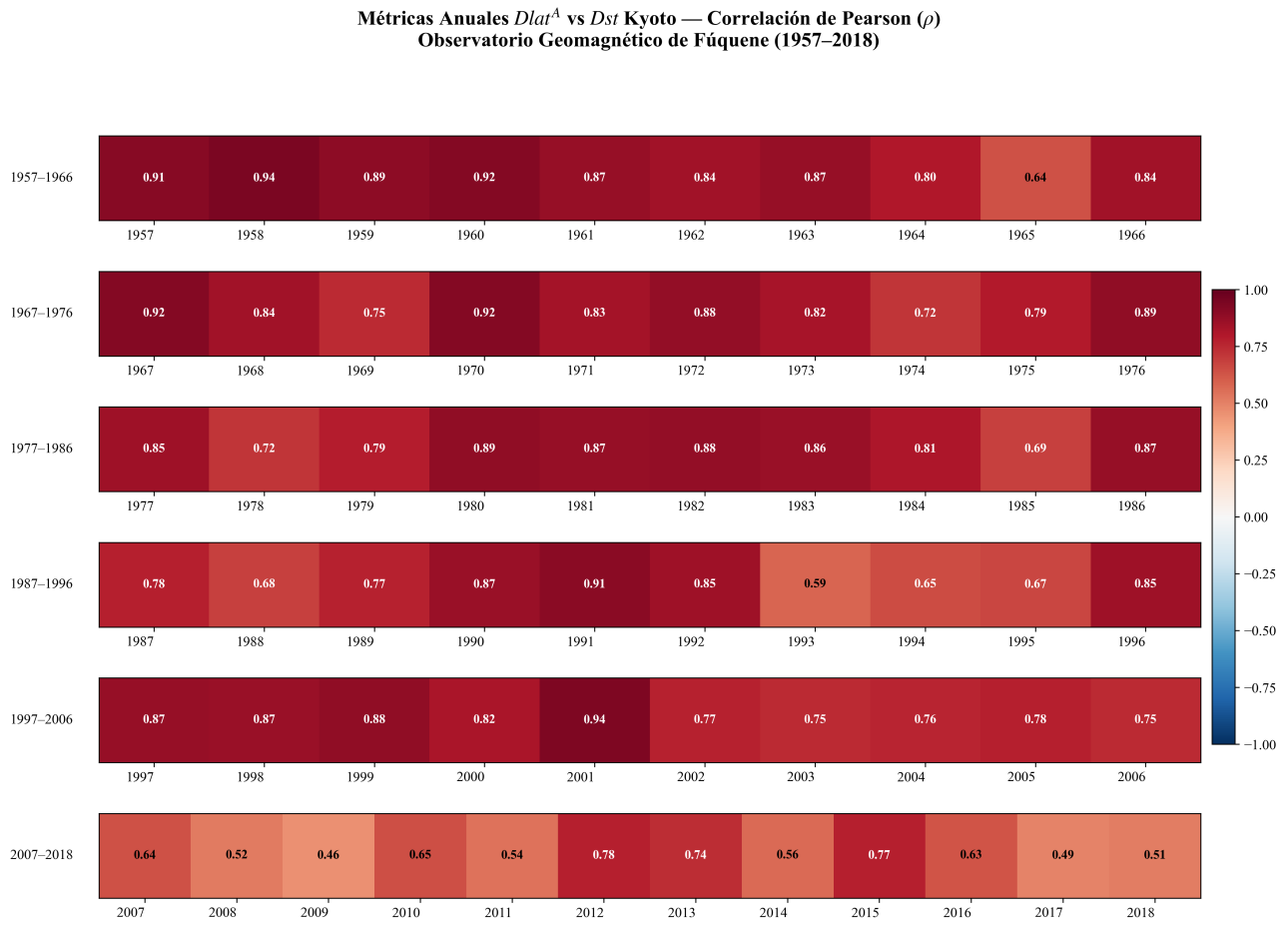


Figura B.14: Correlación del índice Dlat del enfoque A respecto al índice Dst de Kyoto para el observatorio geomagnético de Fúquene entre el periodo de 1957-2018.

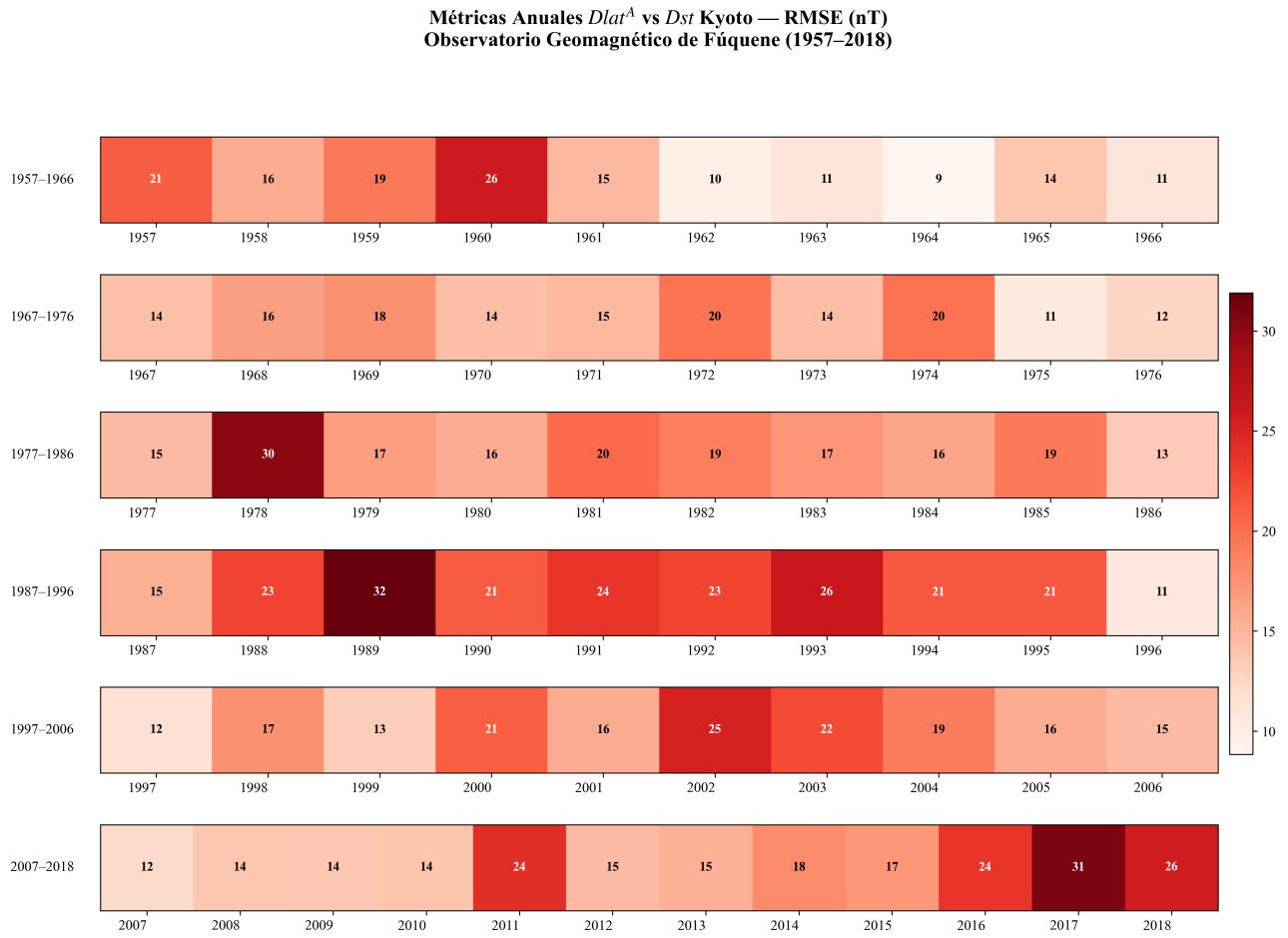


Figura B.15: Error medio cuadrático del índice Dlat del enfoque A respecto al índice Dst de Kyoto para el observatorio geomagnético de Fúquene entre el periodo de 1957-2018.

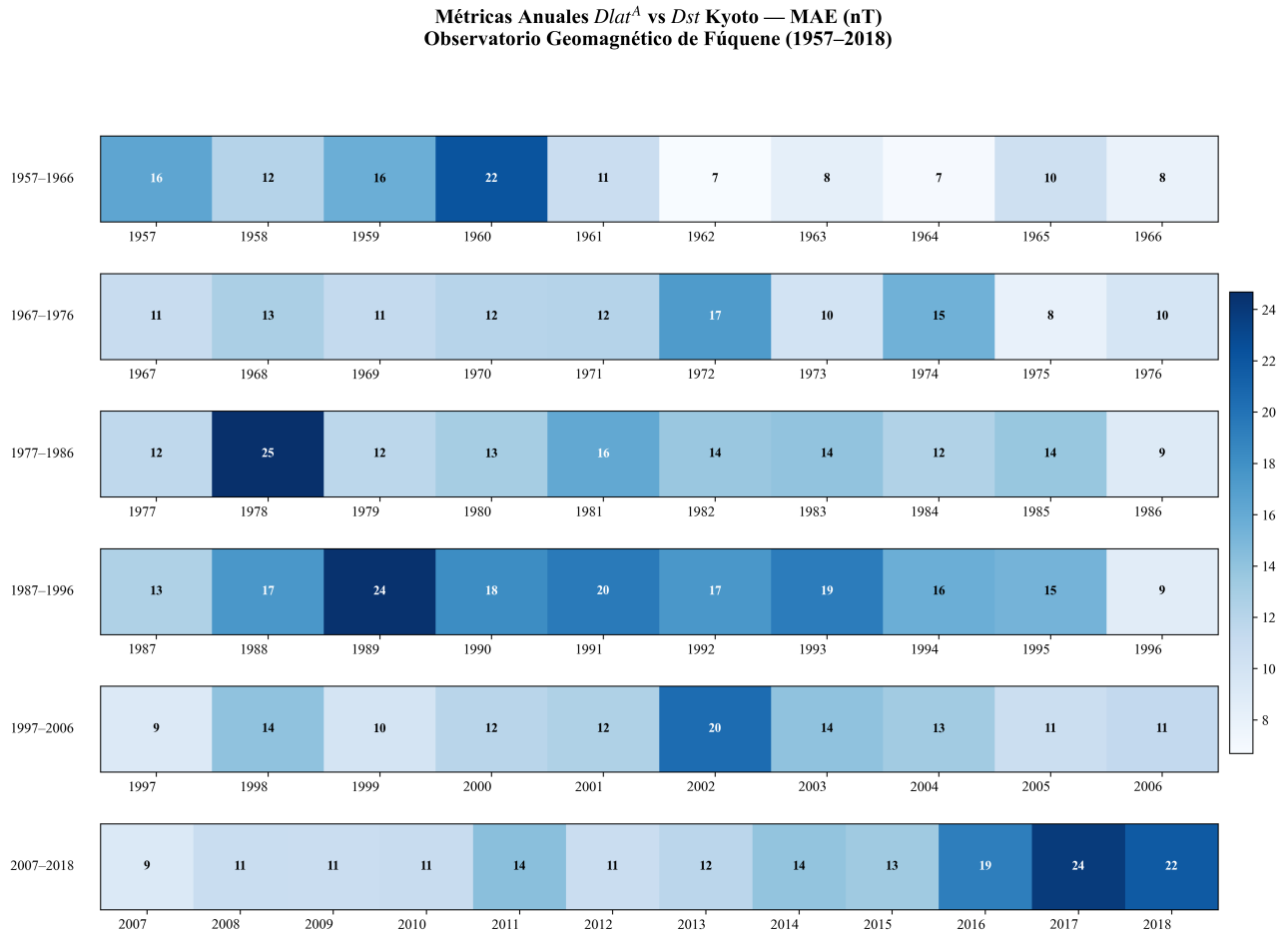


Figura B.16: Error medio absoluto del índice Dlat del enfoque A respecto al índice Dst de Kyoto para el observatorio geomagnético de Fúquene entre el periodo de 1957-2018.

Apéndice C

Anexo: Índice K

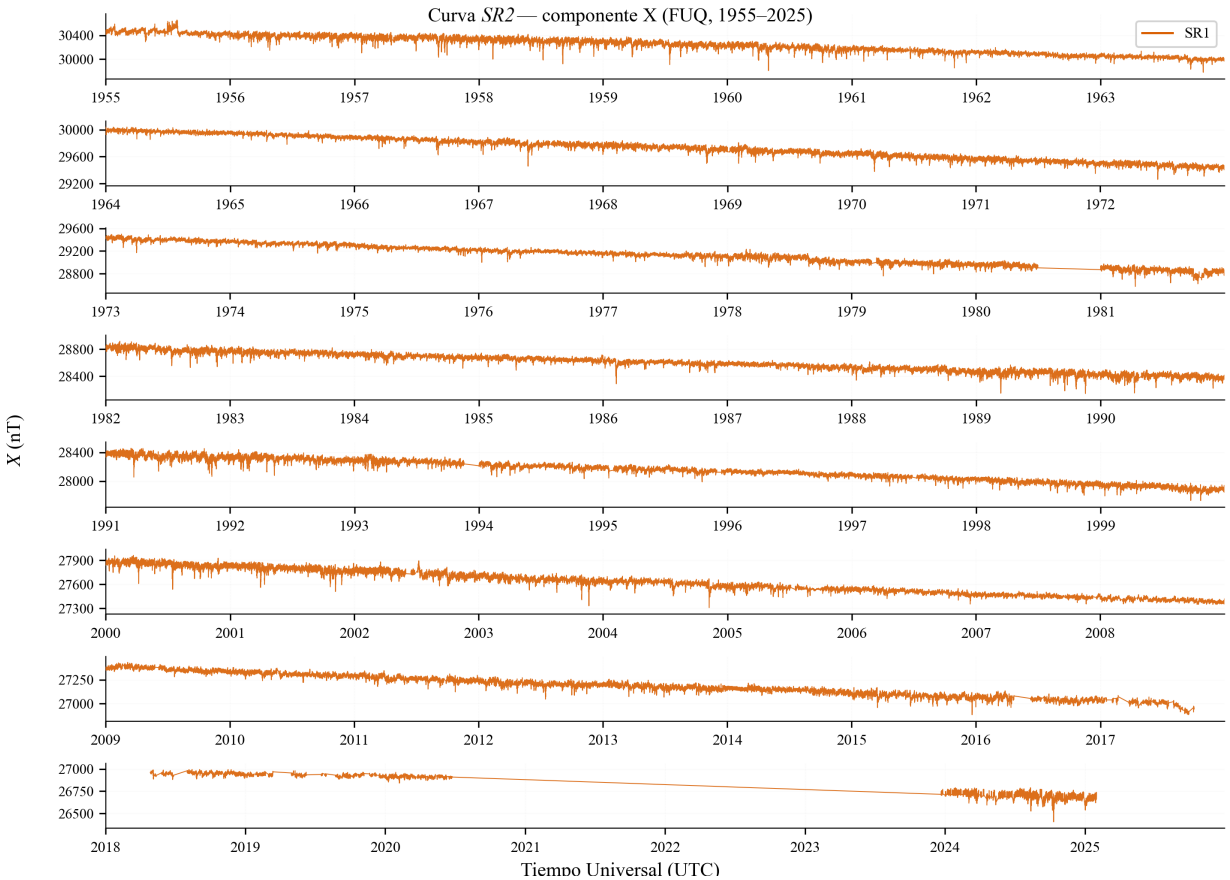


Figura B.17: Curva de variación regular diaria SR1 de la componente X del campo geomagnético en el Observatorio de Fúquene (FUQ), para el periodo 1955–2025.

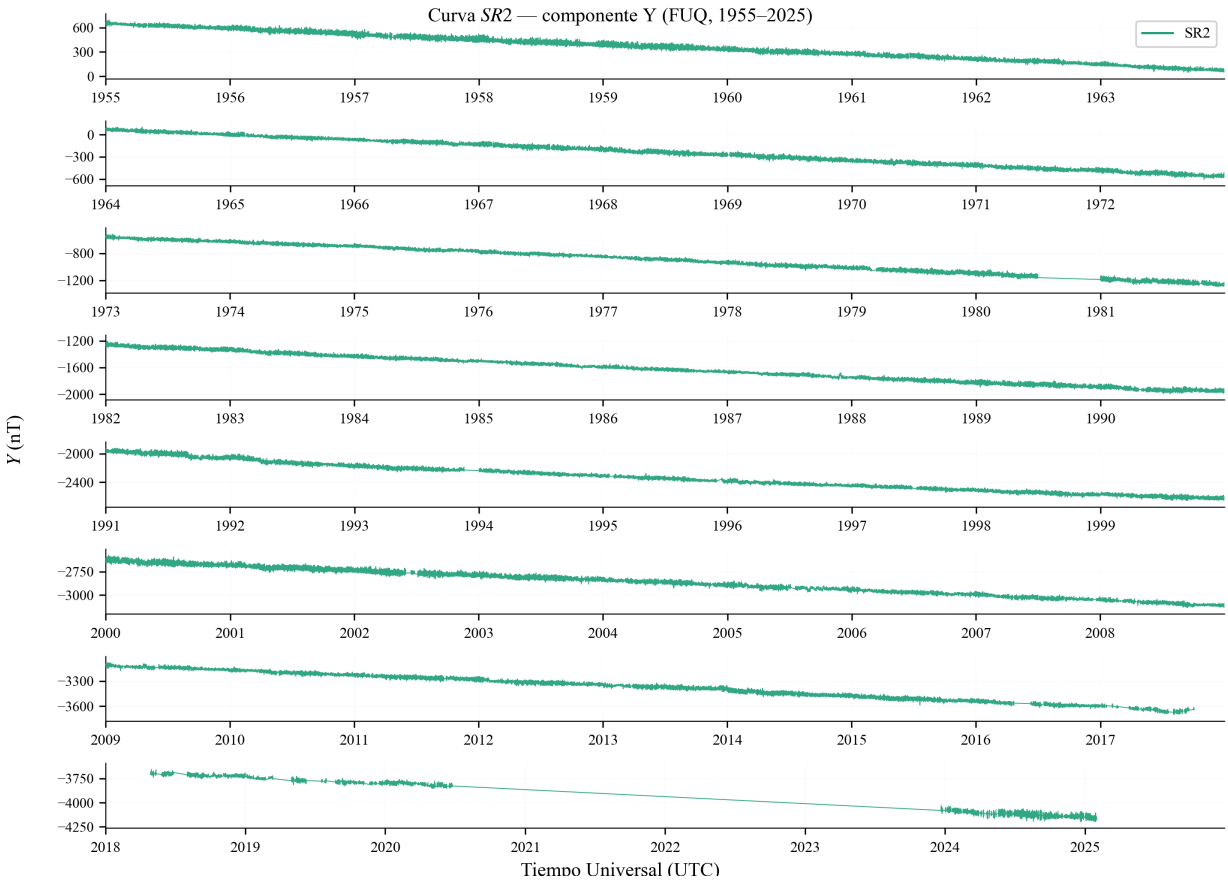


Figura B.18: Curva de variación regular diaria SR2 de la componente X del campo geomagnético en el Observatorio de Fúquene (FUQ), para el periodo 1955–2025.

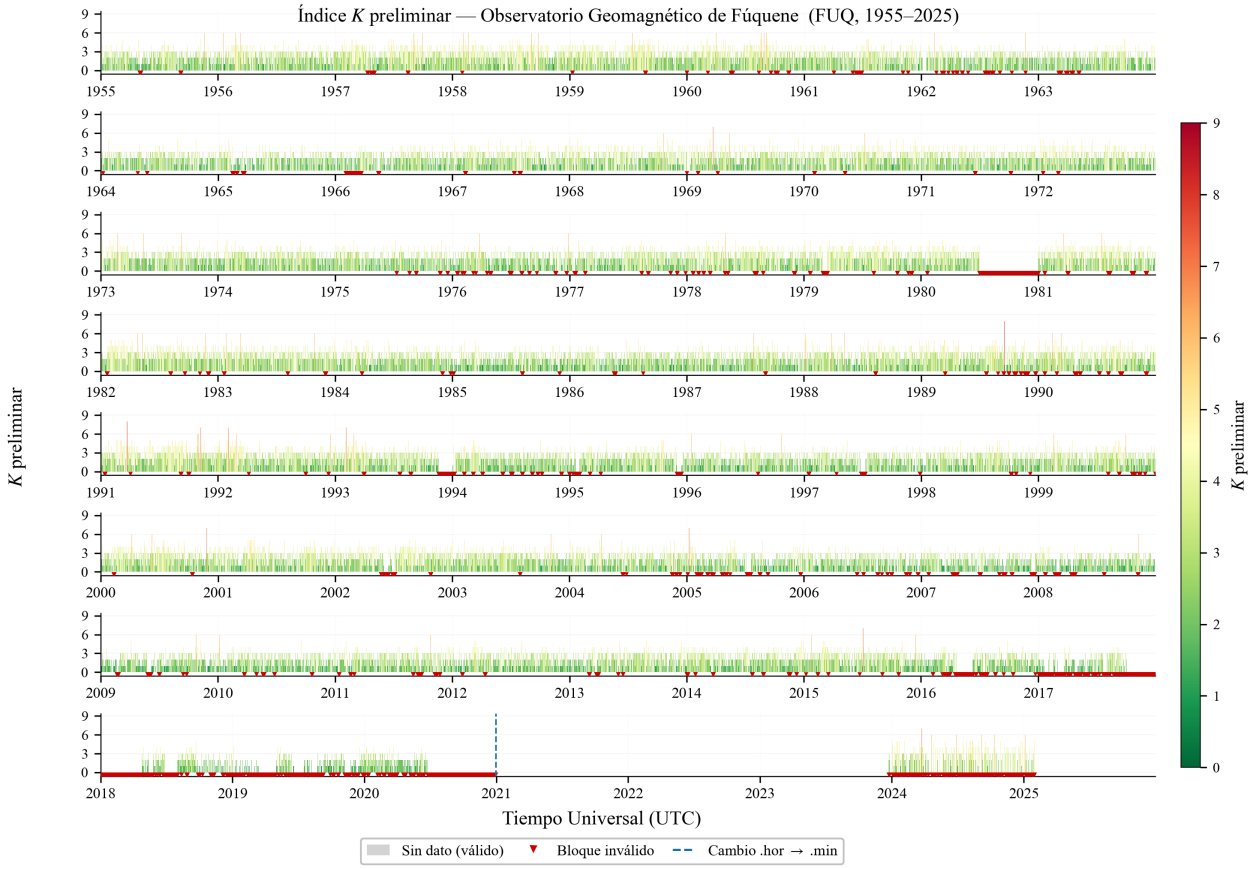


Figura B.19: Serie temporal del índice K preliminar en el Observatorio de Fúquene (FUQ), periodo 1955–2025.

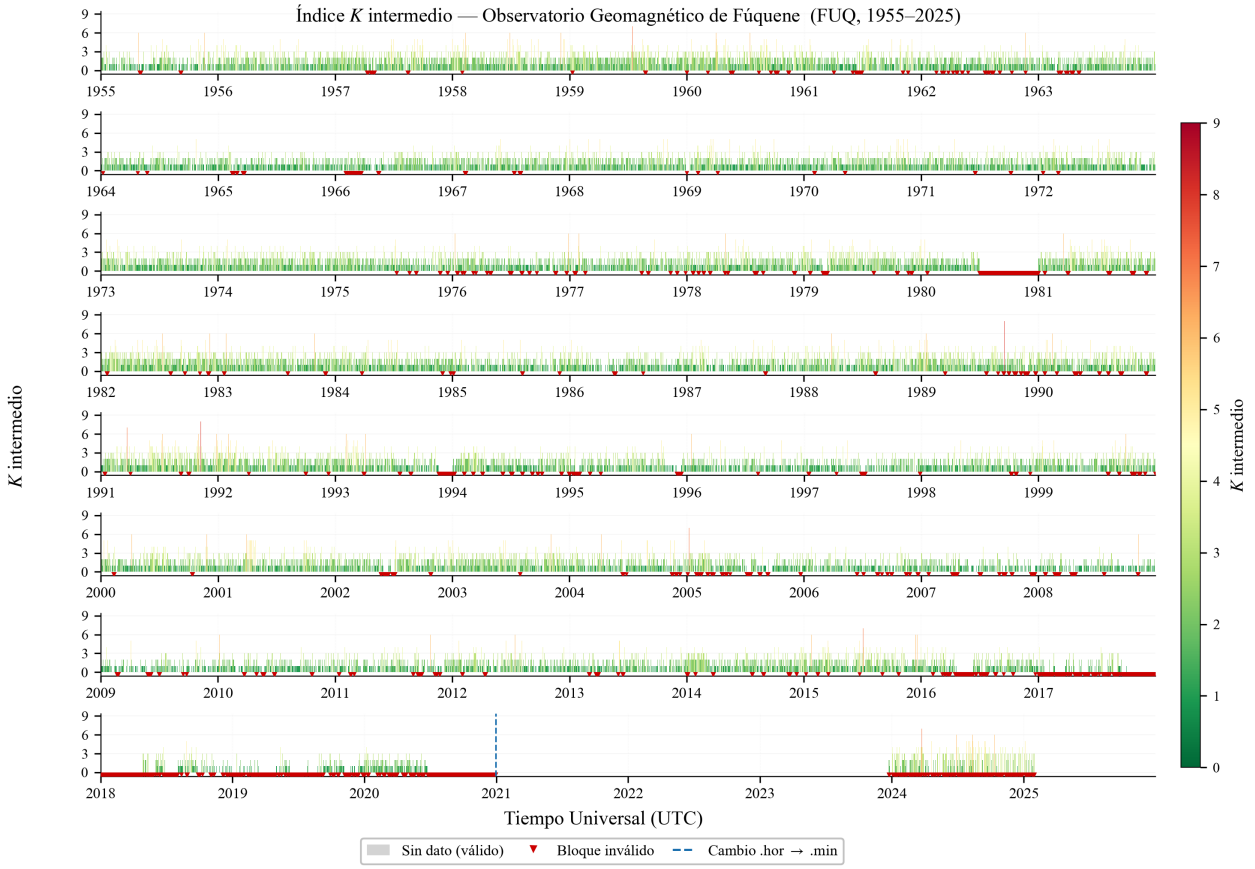


Figura B.20: Serie temporal del índice K intermedio para la componente horizontal del campo geomagnético en el Observatorio de Fúquene (FUQ), periodo 1955–2025.

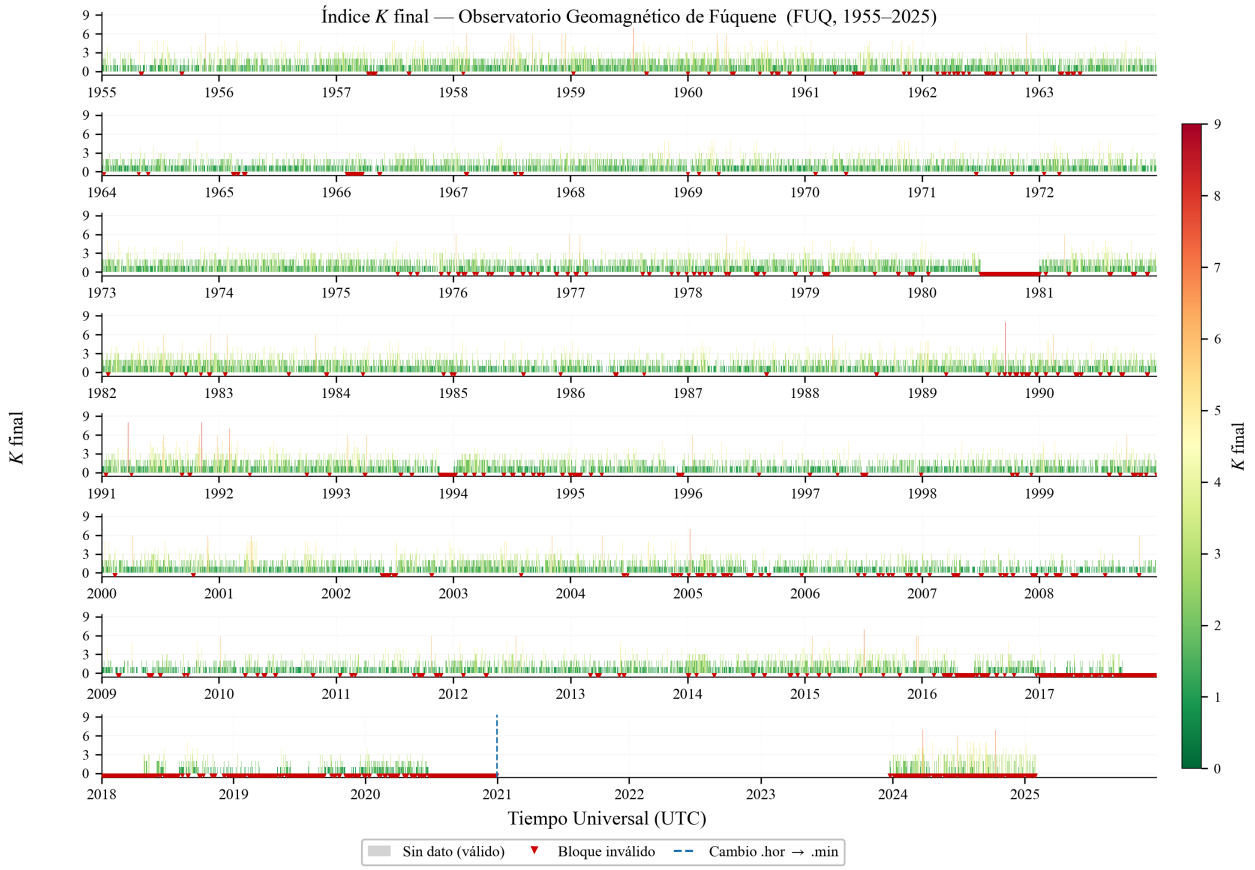


Figura B.21: Serie temporal del índice K final en el Observatorio de Fúquene (FUQ), periodo 1955–2025.

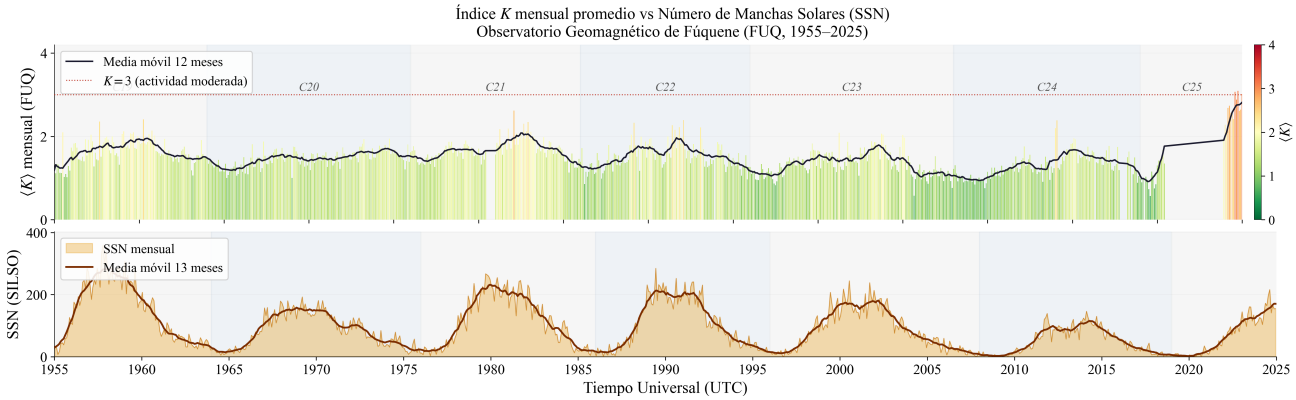


Figura B.22: Comparación entre el índice K mensual promedio en el Observatorio Geomagnético de Fúquene (FUQ) y el número de manchas solares (SSN) para el periodo 1955–2025. En el panel superior se muestra la evolución del índice K. En el panel inferior se presenta el SSN mensual junto con su media móvil de 13 meses. Se destacan los ciclos solares (C20–C25), evidenciando la correspondencia entre la variabilidad geomagnética y la actividad solar.

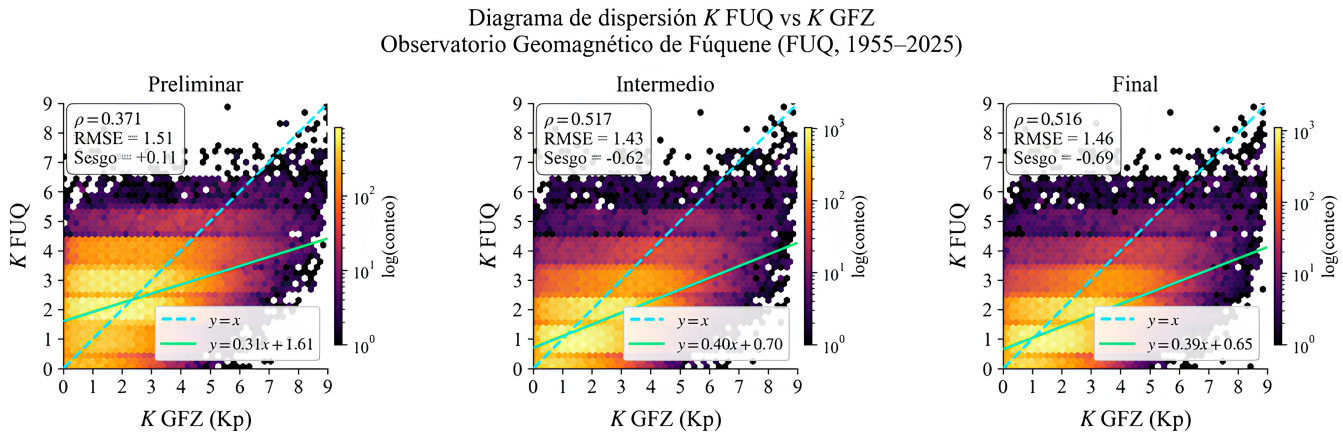


Figura B.23: Diagrama de dispersión entre el índice K estimado en el Observatorio de Fúquene (FUQ) y el índice Kp de referencia (GFZ) para el periodo 1955–2025. Cada panel muestra la densidad de ocurrencias mediante binning hexagonal, junto con la línea de referencia $y = x$ y el ajuste lineal correspondiente. Se incluyen métricas coeficiente de correlación ρ, error cuadrático medio RMSE y sesgo), evidenciando una mejora sustancial entre la estimación preliminar y las versiones refinadas.

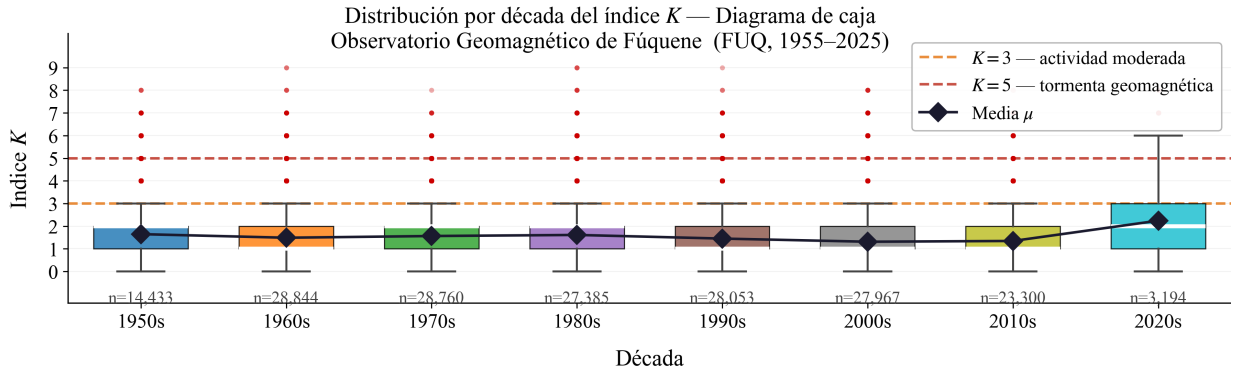
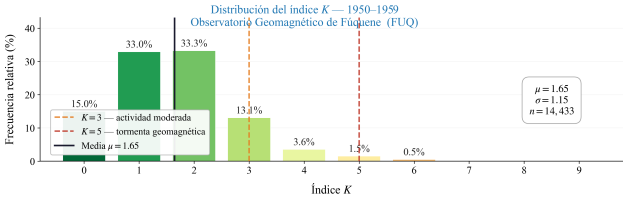
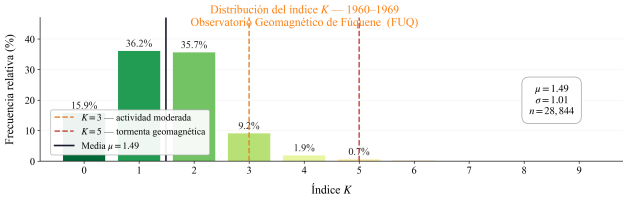


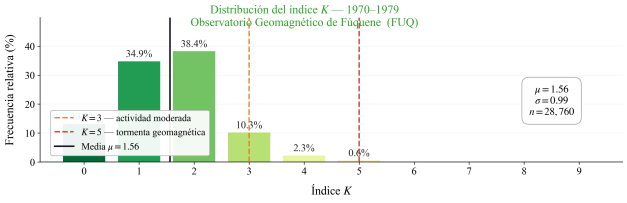
Figura B.24: Distribución del índice K por décadas en el observatorio FUQ (1955–2025). Se muestran mediana, dispersión y valores extremos, junto con los umbrales de actividad moderada ($K = 3$) y tormenta geomagnética ($K = 5$).



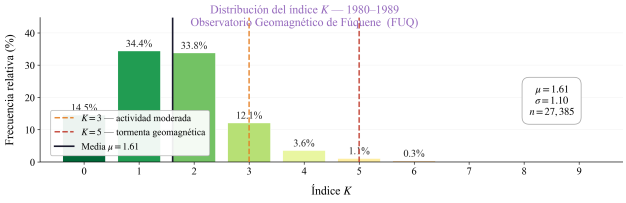
((a)) 1950–1959



((b)) 1960–1969

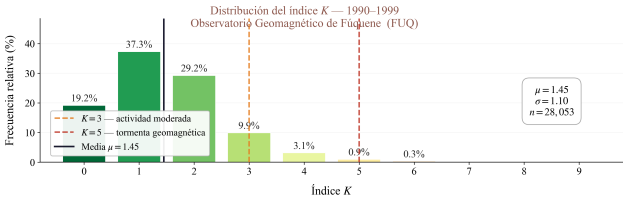


((c)) 1970–1979

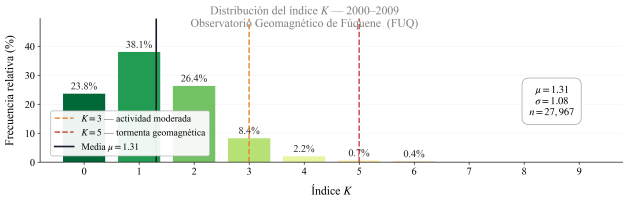


((d)) 1980–1989

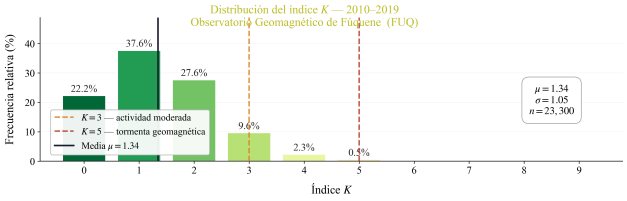
Figura B.25: Distribución del índice K por década (1950–1989).



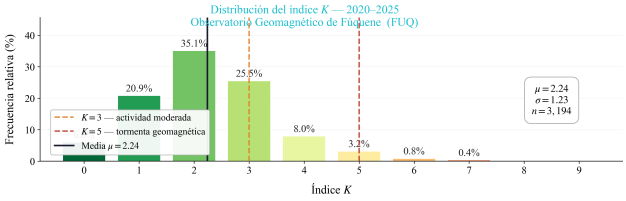
((a)) 1990–1999



((b)) 2000–2009



((c)) 2010–2019



((d)) 2020–2025

Figura B.26: Distribución del índice K por década (1990–2025).

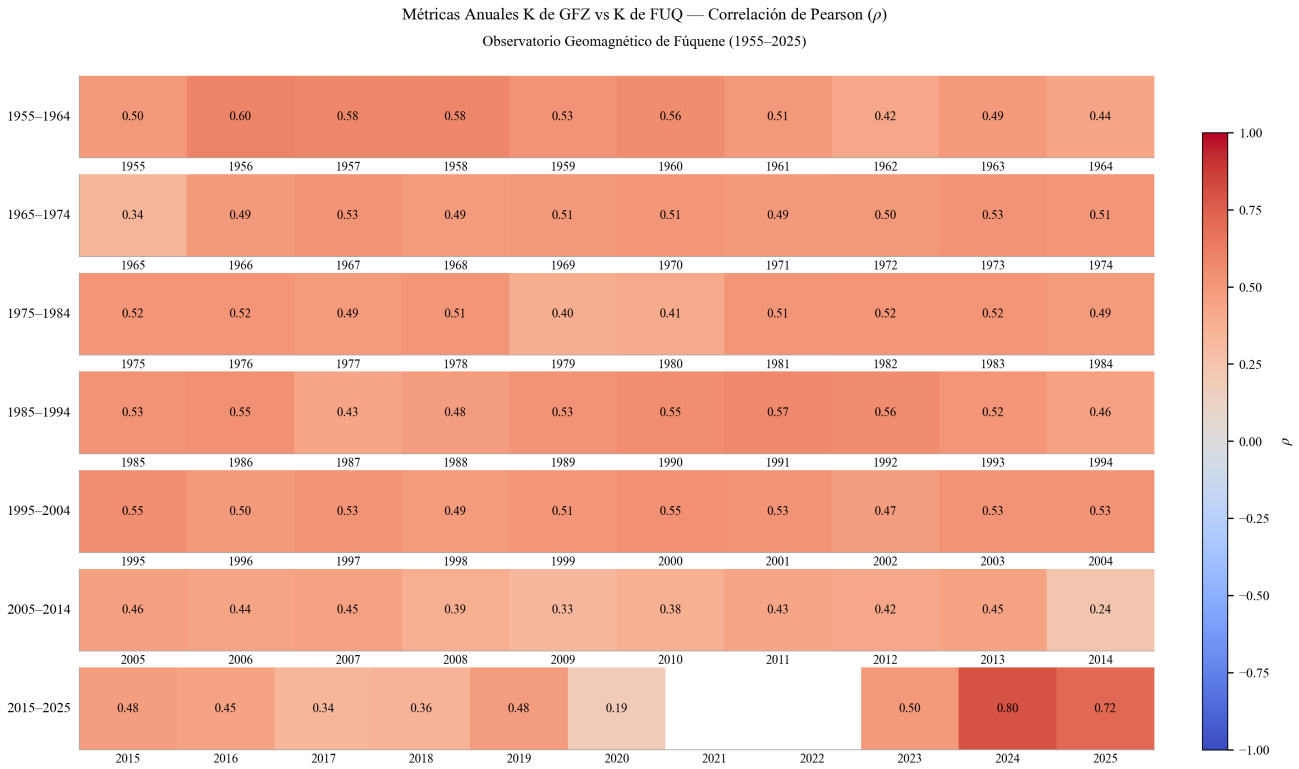


Figura B.27: Correlación anual de Pearson (ρ) entre K_{FUQ} y K_{GFZ} (1955–2025). Se observa consistencia moderada a lo largo del periodo.

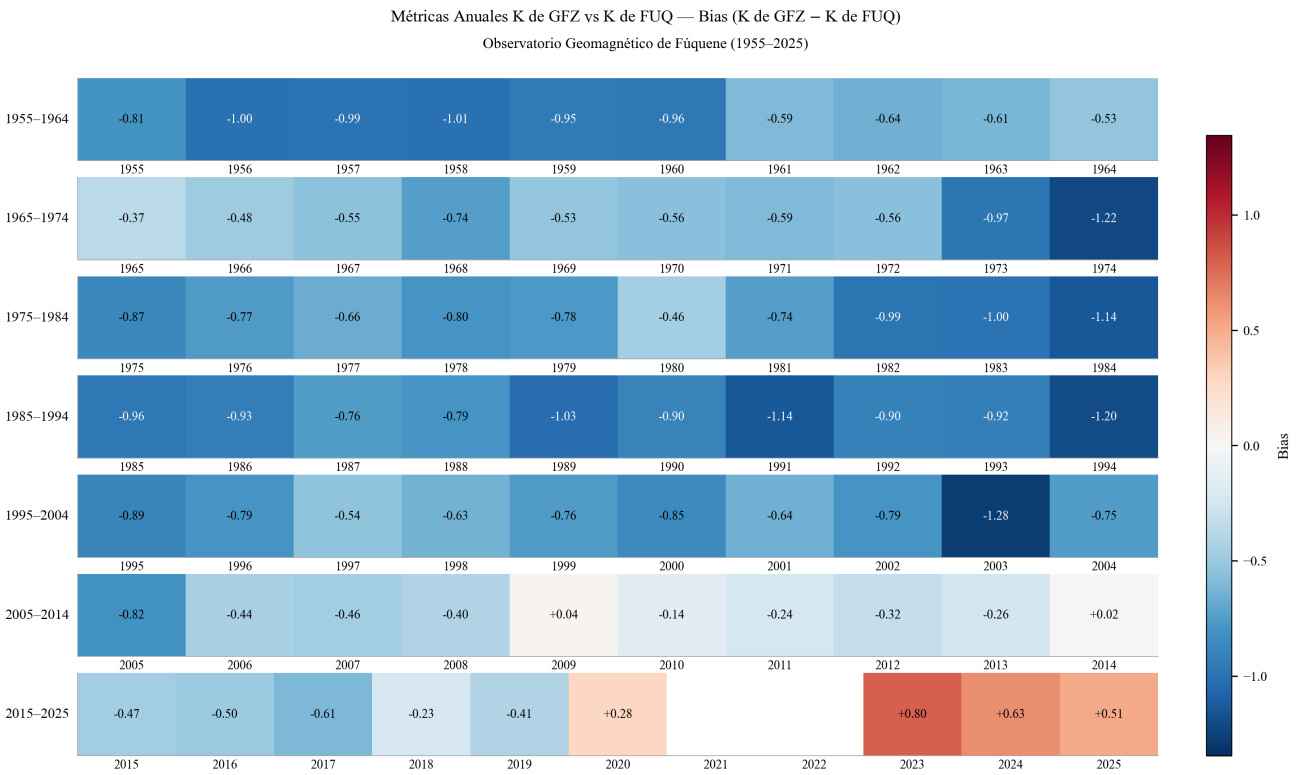


Figura B.28: Sesgo anual (bias) entre K_{GFZ} y K_{FUQ} (1955–2025). Valores negativos indican subestimación sistemática de FUQ respecto a GFZ.

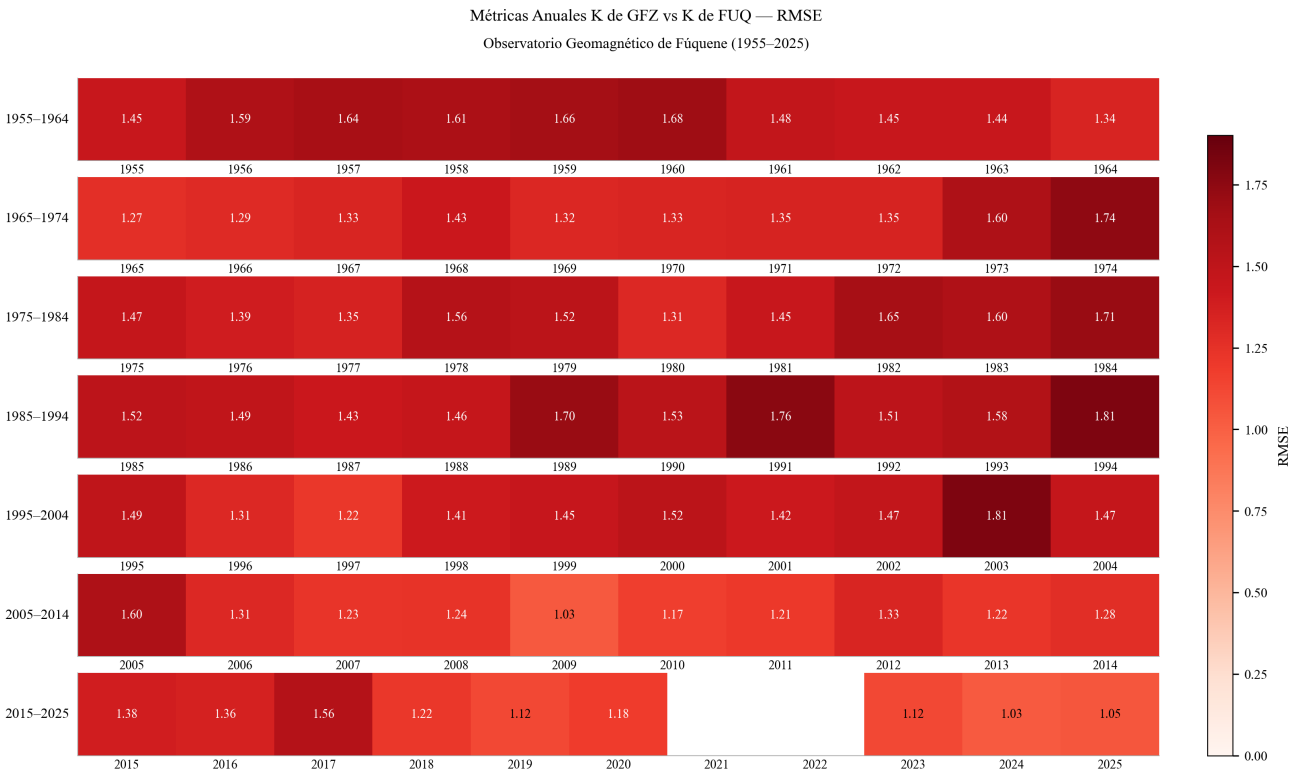


Figura B.29: Error cuadrático medio (RMSE) anual entre K_{FUQ} y K_{GFZ} (1955–2025), indicando la magnitud del error en la estimación del índice local.

Apéndice D

Anexo: Plataforma Web de Visualización

MANUAL DEL MÓDULO DE DESCARGA DE DATOS

El SIAPV en su página web `rt.fuqcollector.space` dispone de un módulo de **Descarga de Datos**, diseñado para exportar las series temporales disponibles del observatorio en distintos formatos. Este panel permite seleccionar la **variable**, el **formato de salida** y el **intervalo temporal** mediante los campos *Desde* y *Hasta*. Una vez definidos estos parámetros, el usuario puede utilizar la opción **Vista previa** como un módulo de visualización de la serie antes de descargarla, o bien seleccionar **Descargar** para obtener el archivo.

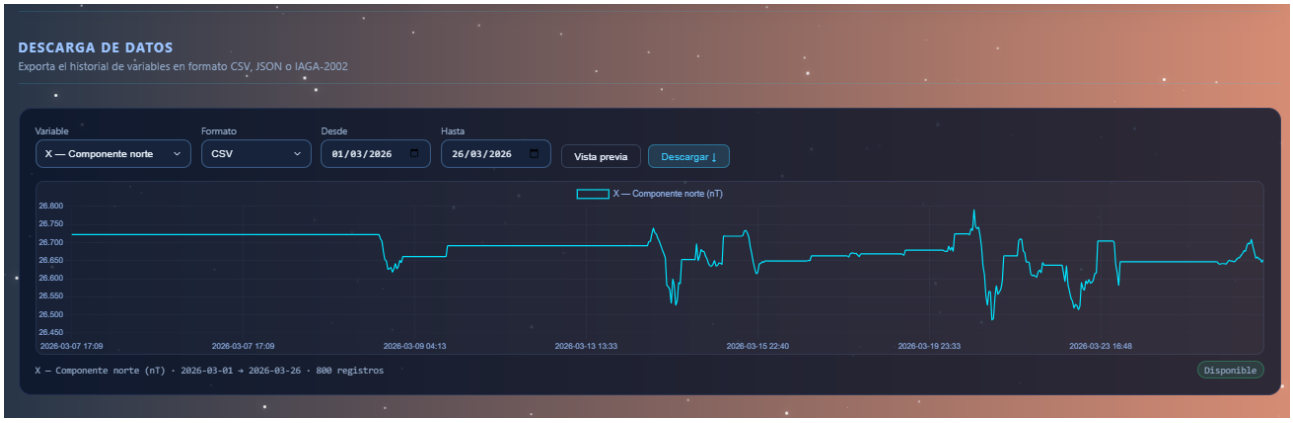


Figura C.1: Modulo de descarga de datos y vista previa de la serie temporal seleccionada en el rango definido.

Las variables disponibles incluyen las componentes geomagnéticas **X**, **Y** y **Z**, así como parámetros derivados e índices calculados como **H** (intensidad horizontal), **D** (declinación), **I** (inclinación), **F** (intensidad total), **DLAT** (perturbación local), **K** (índice *K* operativo), **Sq** (variación solar quieta) y **E** (campo externo). En particular, la componente **X** corresponde a la **componente norte del campo geomagnético**, expresada en nanoteslas (nT).



Figura C.2: Selección de variable geomagnética para exportación de datos.

El sistema ofrece tres formatos de exportación: **JSON**, **CSV** e **IAGA-2002**. El formato **JSON** se emplea principalmente para la **vista previa**, ya que devuelve una versión resumida de la serie. Por su parte, el formato **CSV** genera un archivo tabulado con columnas de tiempo y valor, adecuado para análisis en hojas de cálculo. Finalmente, la opción **IAGA-2002** produce un archivo de texto con encabezado estandarizado por IAGA, útil para interoperabilidad con herramientas y flujos de trabajo geomagnéticos.



Figura C.3: Opciones de formato disponibles para la descarga de datos (CSV, JSON, IAGA-2002).

MANUAL DE USO TELEGRAM BOT

Como complemento a la plataforma web, se desarrolló un **bot de Telegram** integrado al sistema SIAPV, el cual tiene como propósito permitir el acceso rápido a la información geomagnética en tiempo real, así como la generación de alertas de manera automática ante eventos de tormenta. El bot opera como una interfaz de consulta que consume directamente los servicios del API, permitiendo visualizar el estado del sensor, consultar variables geomagnéticas y recibir notificaciones sin necesidad de acceder a la plataforma web.

Monitoreo del sistema

El bot incluye comandos orientados a verificar el estado operativo del sistema y la disponibilidad de datos:

- `/status`: muestra el tiempo transcurrido desde el último dato recibido.
- `/lastdata`: retorna la fecha y hora del último registro almacenado.
- `/counttoday`: indica la cantidad de registros capturados en el día.
- `/days`: número total de días disponibles en la base de datos.
- `/ping`: verifica la conectividad y disponibilidad del bot.

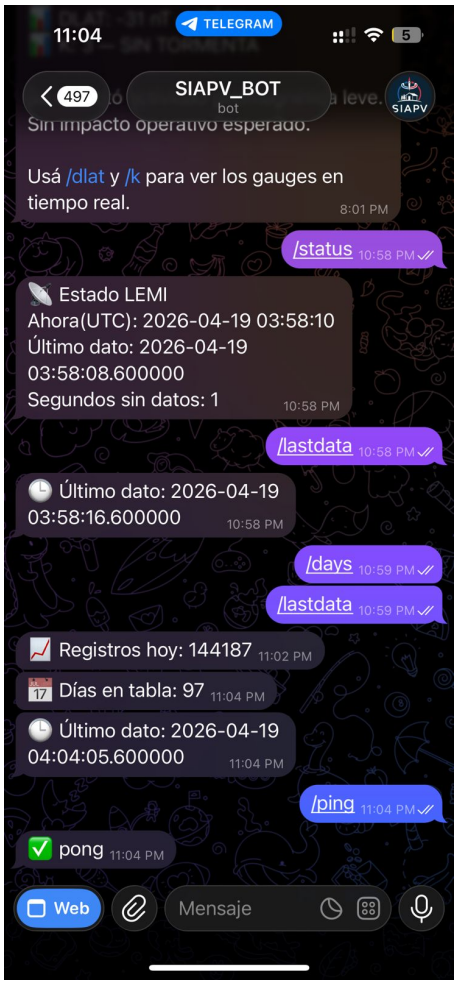


Figura C.4: Comandos de monitoreo del sistema.

Estos comandos permiten validar el correcto funcionamiento del sistema de adquisición en tiempo real.

Consulta de datos en tiempo real

Por otro lado, para la visualización de datos recientes, el bot dispone de:

- `/realtime`: muestra los últimos registros disponibles y se actualiza automáticamente.
- `/stop`: detiene la actualización en tiempo real.

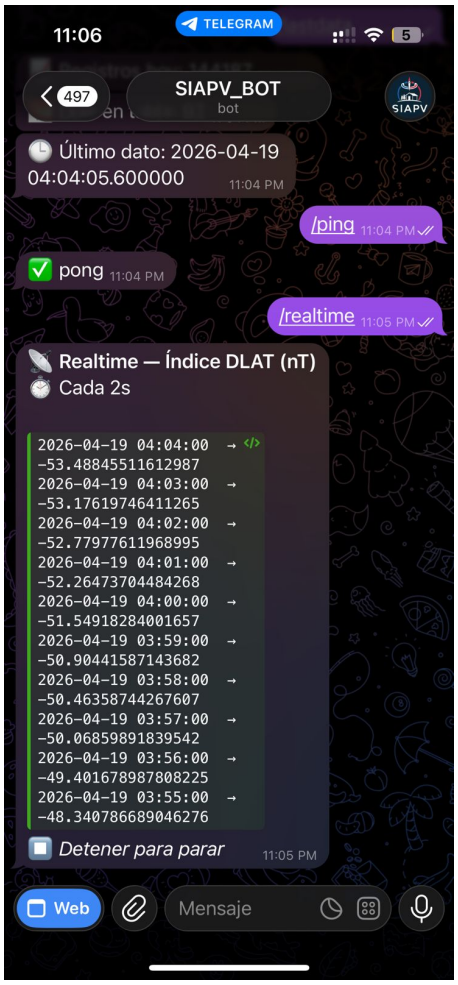


Figura C.5: Consulta de datos en tiempo real.

Esta funcionalidad permite un seguimiento continuo del comportamiento del campo geomagnético sin intervención manual.

Generación de gráficos

El bot permite generar gráficos rápidos de las componentes geomagnéticas mediante los comandos:

- `/xpng [seg]`: gráfico de la componente X (norte).
- `/ypng [seg]`: gráfico de la componente Y (este).
- `/hpng [seg]`: gráfico de la componente H (intensidad horizontal).



Figura C.6: Generación de gráficos de las componentes geomagnéticas.

El parámetro opcional `[seg]` define la resolución temporal que por defecto es de30 segundos, permitiendo ajustar el nivel de detalle.

Estado geomagnético

El sistema incluye herramientas de consulta directa del estado del campo geomagnético:

- `/dlat`: muestra el valor actual del índice DLAT, asociado a la perturbación local en nT.
- `/k`: presenta el índice K estimado en tiempo real (escala 0–9).

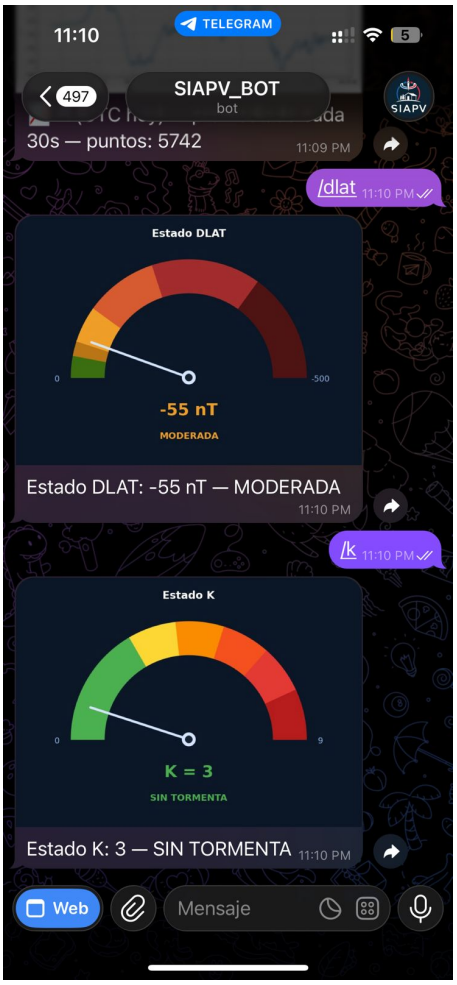


Figura C.7: Consulta del estado geomagnético.

Estas variables permiten evaluar de manera rápida y simple el nivel de actividad geomagnética en la estación FUQ.

Vista resumida

Para una consulta general del estado del sistema, el comando:

- `/resumen`: integra información del sensor, índices geomagnéticos (DLAT y K) y estado general en un solo mensaje.
- `/khistory`: presenta el comportamiento reciente del índice K en las últimas 24 horas.



Figura C.8: Vista resumida del sistema.

Sistema de alertas

El bot incorpora un sistema de notificaciones automáticas basado en umbrales de actividad geomagnética:

- `/subscribe`: activa la suscripción a alertas de tormenta.
- `/unsubscribe`: cancela la suscripción.
- `/alerttest`: envía una alerta de prueba.

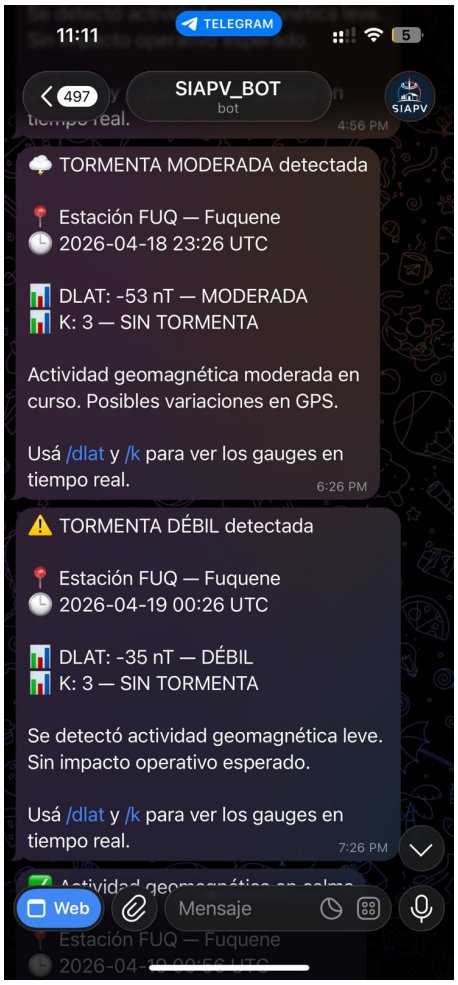


Figura C.9: Alertas automáticas de actividad geomagnética.

Cuando se detecta un incremento significativo en la actividad geomagnética, el sistema envía mensajes automáticos indicando el nivel de perturbación, el valor de DLAT y el índice K, junto con una interpretación cualitativa del evento (por ejemplo, actividad débil o moderada).

Funciones del sistema

Finalmente, el bot incluye herramientas de control y configuración:

- `/storage [días]`: consulta el almacenamiento disponible en la base de datos.
- `/start`: despliega el menú interactivo de opciones.

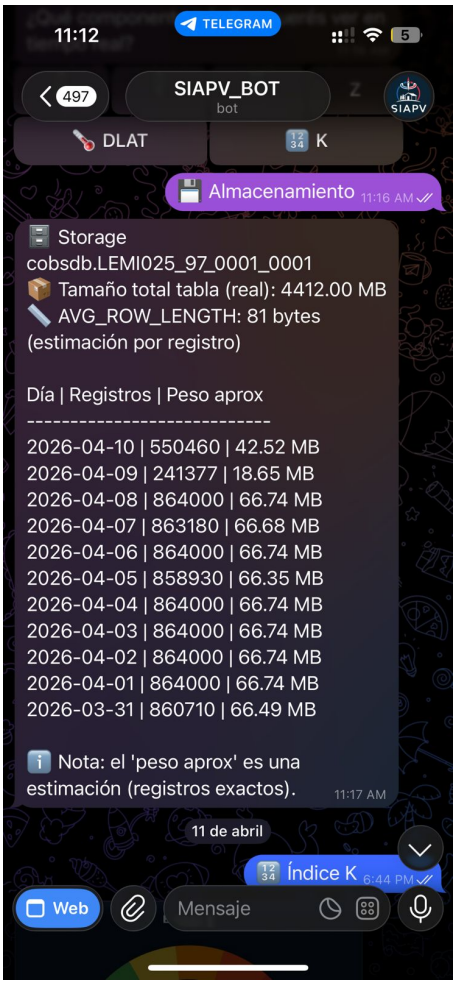


Figura C.10: Consulta de almacenamiento y otras funciones del bot.

Integración con el sistema SIAPV-FUQ

El bot se encuentra completamente integrado con la API del sistema, lo que permite consultar en tiempo real los datos adquiridos por el sensor LEMI-025, así como los productos derivados (DLAT, índice K, entre otros). Esta integración garantiza que la información entregada al usuario sea consistente con la visualizada en la plataforma web.