

Universidad de Alcalá

Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería Electrónica y Automática Industrial



Trabajo Fin de Grado

Puesta en funcionamiento de un magnetómetro incluyendo estudio de ubicación, control de ruido electromagnético e influencia de la temperatura para su posterior instalación

ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR

Autor: Emilio Dominguez Dominguez

Tutor/es: Antonio Guerrero Ortega

2019

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería Electrónica y Automática Industrial

Trabajo Fin de Grado

Puesta en funcionamiento de un magnetómetro incluyendo estudio de ubicación, control de ruido electromagnético e influencia de la temperatura para su posterior instalación

Autor: Emilio Domínguez Domínguez

Tutor: Antonio Guerrero Ortega

TRIBUNAL :

Presidente: Consuelo Cid Tortuero

Vocal 1º: Elena Saiz Villanueva

Vocal 2º: Francisco José Álvarez García

Septiembre de 2019

Agradecimientos

Me gustaría dedicar esta sección a agradecer a todas las personas que me han acompañado y apoyado durante estos años de mi etapa universitaria.

A mi familia, porque son el pilar principal en todos los aspectos de la vida, más allá de los estudios, y sin ellos no habría llegado hasta este momento, en especial a mi abuelo Cipriano que seguro estaría orgulloso de mi.

A mis hermanas, porque son el mejor ejemplo a seguir que se puede tener en la vida.

A mis amigos con los que llevo toda la vida compartiendo momentos irrepetibles y a los que me llevo de la universidad, que seguro serán para siempre por todos esos largos y duros días de estudio, que sin duda se hacían más llevaderos por los buenos momentos de diversión.

A todos los profesores que me han ayudado a adquirir los conocimientos que serán la base en mi vida profesional y también personal.

A todos los miembros del “Space Weather Group”, que me han hecho sentir a gusto en todo momento, en especial a Antonio y Consuelo por ayudarme y confiar en mí.

Resumen

Este trabajo fin de grado tiene como objetivo servir como comienzo y como guía teórica para el montaje y la construcción de una estación geomagnética que, a través de un magnetómetro fluxgate, registre la variación del vector de campo magnético terrestre, con el principal objetivo de conseguir una calidad de los datos suficiente para labores de investigación en el ámbito de la Meteorología Espacial. El trabajo se integra en las actividades del Grupo de Meteorología Espacial (Space Weather Group, SWE) de la Universidad de Alcalá. Se lleva a cabo el montaje del instrumental y se comienza a medir en una ubicación de pruebas dentro del campus universitario de la UAH, donde se analiza el error y el ruido presente en los datos obtenidos que tienen su origen principalmente en perturbaciones electromagnéticas de origen artificial y en la deriva con la temperatura. Además, se realiza un análisis de la ubicación ideal y de la calibración del instrumental como parte inicial de las siguientes etapas en el desarrollo de la estación geomagnética.

Palabras clave: Geomagnetismo, Magnetómetro, Fluxgate, Meteorología Espacial

Abstract

This final degree project aims to serve as the starting point and theoretical guide for the assembly and construction of a geomagnetic station that, using a fluxgate magnetometer, records the variation of the earth's magnetic field vector. The focus is to get data with sufficient quality for research in the field of Space Weather. This project forms part of the activities carried out by the Space Weather Group (SWE) of the University of Alcalá (UAH). It has been carried out the assembly of the instruments and the first measurements in a test location within the UAH university campus. It is also analyzed the error and the noise present in the data which has been identified to originate mainly from temperature drift and from electromagnetic disturbances, respectively. In addition, an analysis of the ideal location and calibration of the instruments is performed as an initial part of the following stages in the development of the geomagnetic station.

Keywords: Geomagnetism, Magnetometer, Fluxgate, Space Weather

Resumen Extendido

En este trabajo fin de grado (TFG) se pretende la puesta en marcha de un magnetómetro fluxgate, y establecer de manera teórica las bases para la articulación de una estación geomagnética, desde el montaje y la calibración del instrumental hasta el análisis de la ubicación y la instalación idónea para la obtención de datos de calidad suficiente para su uso en el ámbito de la Meteorología Espacial, analizando los posibles errores y ruido en la medida. Se tratarán tanto los errores introducidos por los componentes electrónicos utilizados en la medición y en la adquisición como el ruido provocados por fenómenos electromagnéticos artificiales ajenos al campo magnético terrestre que puedan interferir en los datos obtenidos por el magnetómetro, debidos sobre todo a la actividad del ser humano en núcleos de población, así como el error introducido por la deriva con la temperatura del sensor.

En los capítulos 1 y 2 se expone de manera breve un poco de historia e ideas de base sobre las observaciones geomagnéticas y se introduce al lector en los conceptos básicos sobre la naturaleza y el origen del campo magnético de la Tierra, así como los fenómenos naturales objeto de estudio de la Meteorología Espacial a través de las mediciones en la superficie de la Tierra de la variación del vector de campo geomagnético mediante el uso de magnetómetros, que motivan el desarrollo de este proyecto.

Se ha dividido el proyecto en tres fases que se describen en el capítulo 1.2, la primera de ellas lleva a cabo la puesta en marcha y estudio de errores en la ubicación de pruebas, se ha realizado de manera teórica y práctica, y las fases 2 y 3 tratan de la calibración y ubicación definitiva, respectivamente. Estas dos últimas fases quedan realizadas de forma teórica a falta de su implementación práctica.

El trabajo comienza con el análisis y el montaje en el laboratorio de cada uno de los instrumentos que forman parte del sistema electrónico de medición. Este sistema está formado por el magnetómetro fluxgate LEMI-031 que proporciona una señal eléctrica proporcional a la variación del campo magnético, un convertidor analógico-digital ObsDAQ de 24 bits para la digitalización de la señal analógica proporcionada por el sensor y una computadora MAGREC-4B con el software MAGLIN para el almacenamiento, visualización, transmisión de los datos en formato IAGA-2002 y la configuración de otros instrumentos. Las características de cada uno de estos componentes y su montaje se detallan en el capítulo 4.

Una vez que los sistemas han sido cableados y se ha comprobado su funcionamiento y la correcta comunicación entre ellos, se comienza con las primeras tomas de datos dentro del laboratorio con una disposición del sensor aproximada. El sistema se traslada entonces a una ubicación de pruebas más propicia para analizar los datos obtenidos, más alejada de grandes construcciones y con una menor influencia de fuentes electromagnéticas artificiales propias de un entorno de oficinas y/o laboratorios. El sensor de campo se sitúa por tanto en el exterior, en un contenedor de material aislante térmico, nivelado y orientado, alejado de los

sistemas de adquisición y monitoreo y de las fuentes de alimentación. Es en este punto donde comienzan a analizarse los primeros datos y el ruido que en ellos aparece, tratando de detectar las diferentes fuentes de ruido que pueden afectar a la medida (capítulo 4). Se realiza además un análisis de las diferencias con las medidas oficiales en el observatorio geomagnético más cercano tomado como referencia, el de San Pablo de los Montes, en Toledo, que servirá como mecanismo de comparación, validación y calibración. La calibración con esta estación de referencia se corresponde con la segunda fase del proyecto, siendo necesario realizar diversas comprobaciones y recoger datos con los instrumentos a calibrar en la misma ubicación y en las mismas condiciones durante un periodo de tiempo suficiente. Este proceso de calibración se presenta de manera teórica en el capítulo 5.

Finalmente se establecen las bases principales para determinar la ubicación definitiva de la estación, valiéndose de la propia experiencia adquirida en estos meses de trabajo junto con las recomendaciones de organismos internacionales con décadas de experiencia en la medición del campo magnético de la Tierra como la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía, IAGA por sus siglas en inglés. Se establecen por tanto consideraciones para un montaje óptimo, tratando de reducir al máximo los efectos externos y de los instrumentos en la medida, y/o reducir el ruido presente en los datos mediante la aplicación de filtros y algoritmos en el post-procesado digital de los datos obtenidos. El objetivo final es conseguir así datos válidos para su uso en investigaciones científicas de Meteorología Espacial. Estas tareas se corresponden con la tercera fase del proyecto, descrito en profundidad en el capítulo 6.

Contenido

| | |
|--|----|
| Agradecimientos..... | 3 |
| Resumen..... | 5 |
| Abstract | 7 |
| Resumen Extendido | 9 |
| Índice de Imágenes | 13 |
| Índice de tablas | 17 |
| Capítulo 1. Introducción..... | 19 |
| 1.1 Marco Histórico y estado del arte | 20 |
| 1.2 Fases del proyecto..... | 22 |
| 1.3 Objetivos | 23 |
| Capítulo 2. El Geomagnetismo..... | 25 |
| 2.1 El campo magnético de La Tierra | 25 |
| 2.2 Perturbaciones geomagnéticas. Interacción Sol-Tierra: La Magnetosfera..... | 29 |
| Capítulo 3. Motivación y campo de estudio | 33 |
| 3.1 El Geomagnetismo en España..... | 36 |
| Capítulo 4. Fase 1: Montaje, puesta en marcha y análisis de errores..... | 37 |
| 4.1 Descripción del equipo..... | 37 |
| 4.1.1 Magnetómetro de saturación o fluxgate LEMI-031 | 37 |
| 4.1.2 Convertidor A/D ObsDAQ 5.6..... | 40 |
| 4.1.3 Computadora MAGREC-4B..... | 43 |
| 4.2 Montaje y configuración del equipo | 45 |
| 4.2.1 Conexión del LEMI-031 con el ObsDAQ..... | 46 |
| 4.2.2 Conexión del ObsDAQ con MAGREC-4B..... | 49 |
| 4.2.3 Configuración del software del sistema MAGREC-4B..... | 50 |
| 4.3 Instalación en ubicación de prueba y análisis de errores..... | 51 |
| 4.3.1 Ubicación e instalación | 51 |
| 4.3.2 Errores del instrumental | 54 |
| 4.3.3 Errores y Ruido externo..... | 57 |
| 4.3.4 Métodos de corrección | 67 |
| 4.4 Visualización de datos geomagnéticos en formato IAGA-2002..... | 70 |

| | |
|---|-----|
| 4.5 Ejemplos de medidas en Fase 1..... | 70 |
| Capítulo 5. Fase 2: Calibración con estación de referencia..... | 87 |
| Capítulo 6. Fase 3: Análisis de la ubicación y el montaje definitivo..... | 89 |
| 6.1 Aspectos generales sobre la ubicación y la instalación..... | 89 |
| 6.2 Propuesta de ubicación..... | 93 |
| Capítulo 7. Futuro del proyecto..... | 97 |
| Capítulo 8. Conclusiones..... | 99 |
| Bibliografía..... | 101 |
| Agradecimientos a ilustraciones y datos..... | 103 |
| Anexo I..... | 105 |

Índice de Imágenes

| | |
|--|----|
| IMAGEN 1 – OBSERVATORIOS GEOMAGNÉTICOS DESDE EL AÑO 1830 HASTA 1990 (JANKOWSKI, 1996)..... | 20 |
| IMAGEN 2 – DISTRIBUCIÓN DE LOS OBSERVATORIOS GEOMAGNÉTICOS EN EL AÑO 1994 (JANKOWSKI, 1996)..... | 20 |
| IMAGEN 3 – RED DE OBSERVATORIOS GEOMAGNÉTICOS PERTENECIENTES A INTERMAGNET EN EL AÑO 2019..... | 21 |
| IMAGEN 4 – REPRESENTACIÓN EN 3D DEL INTERIOR DE LA TIERRA Y LAS LÍNEAS DE CAMPO. EL EJE VERDE REPRESENTA EL EJE DE ROTACIÓN DE LA TIERRA Y EL EJE BLANCO EL DE LA GEODINAMO..... | 26 |
| IMAGEN 5 – IMAGEN DEL PRIMER MODELO TRIDIMENSIONAL Y DEPENDIENTE DEL TIEMPO, CONSISTENTE CON LAS ECUACIONES MAGNETOHIDRODINÁMICAS DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE DE GLATZMAIER Y ROBERTS (1995)..... | 27 |
| IMAGEN 6 – DESCOMPOSICIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE, F..... | 27 |
| IMAGEN 7 – UNA EYECCIÓN DE MASA COROLAR EL 27 DE FEBRERO DE 2000 TOMADA POR SOHO LASCO C2 Y C3. UN CME DISPARA AL ESPACIO MILLONES DE TONELADAS DE PARTÍCULAS QUE VIAJAN A MILLONES DE MILLAS POR HORA. FUENTE: ESA Y NASA / SOHO. | 29 |
| IMAGEN 8 – REPRESENTACIÓN ARTÍSTICA DE LA INTERACCIÓN SOL–TIERRA DONDE SE CONFORMA LA MAGNETOSFERA..... | 31 |
| IMAGEN 9 – UNA SORPRENDENTE EYECCIÓN DE GAS CALIENTE Y PARTÍCULAS ESTALLA Y SE ELEVA DESDE EL SOL, GUIADA POR UN BUCLE GIGANTE DE CAMPO MAGNÉTICO INTENSO. IMAGEN TOMADA EL 27 DE JULIO DE 1999 POR EL OBSERVATORIO HELIOSFÉRICO Y SOLAR (SOHO). LA TIERRA SE SUPERPONE PARA FACILITAR LA COMPARACIÓN, LA PROMINENCIA MIDE DE EXTREMO A EXTREMO UNAS 35 VECES EL DIÁMETRO DE NUESTRO PLANETA. | 31 |
| IMAGEN 10 – FULGURACIÓN SOLAR CAPTADA POR EL SATÉLITE SDO VISTA EN DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA. FUENTE: NASA, NATIONAL AERO SPACE AGENCY. | 32 |
| IMAGEN 11 – INFRAESTRUCTURAS AFECTADAS POR FENÓMENOS DE METEOROLOGÍA ESPACIAL. FUENTE: NASA..... | 34 |
| IMAGEN 12 – ESCALA DE CLASIFICACIÓN DE TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS SEGÚN NOAA (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION)..... | 35 |
| IMAGEN 13 – ESTACIONES GEOMAGNÉTICAS Y DE REPETICIÓN EN LA PENÍNSULA IBÉRICA. FUENTE: INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL, IGN..... | 36 |
| IMAGEN 14 – ASPECTO DEL MAGNETÓMETRO LEMI-031 Y LA CAJA ELECTRÓNICA. | 38 |
| IMAGEN 15 – DIAGRAMA FUNCIONAL DEL MAGNETÓMETRO LEMI-031..... | 39 |
| IMAGEN 16 – ASPECTO DEL MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE DATOS OBSDAQ 5.6 DE MINGEO..... | 40 |
| IMAGEN 17 – ESQUEMA MODULAR DE UN CONVERTIDOR DELTA -SIGMA GENÉRICO..... | 41 |
| IMAGEN 18 – ESPECTRO DEL RUIDO DE CUANTIFICACIÓN DE UN CONVERTIDOR DELTA-SIGMA Y SU ELIMINACIÓN MEDIANTE UN FILTRO ANALÓGICO..... | 41 |
| IMAGEN 19 – RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL OBSDAQ EN CASO DE FCLK = 9.8304 MHz Y DRATE = 128 SPS, EN EL RANGO DE 1 Hz A 1KHz. EL ANCHO DE BANDA DE -3 dB PARA ESTA CONFIGURACIÓN ES 57 Hz..... | 43 |
| IMAGEN 20 – ASPECTO DE LA COMPUTADORA MAGREC-4B..... | 44 |
| IMAGEN 21 – ESQUEMA MODULAR Y DE CONEXIONES DEL MAGREC-4B..... | 45 |
| IMAGEN 22 – DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA..... | 46 |
| IMAGEN 23 – ESQUEMA Y PINES DE CONEXIÓN DE LA CAJA ELECTRÓNICA DEL SENSOR LEMI-031..... | 47 |
| IMAGEN 24 – ENTRADA DE LOS CANALES DE LOS CANALES DE 24B DE OBSDAQ DONDE SE CONECTAN LAS SALIDAS DEL MAGNETÓMETRO..... | 47 |
| IMAGEN 25 – ESQUEMA DE CONEXIÓN ENTRE EL MÓDULO A/D OBSDAQ Y EL MAGNETÓMETRO LEMI-031..... | 48 |
| IMAGEN 26 – PUERTO RS485 DEL MÓDULO OBSDAQ..... | 49 |
| IMAGEN 27 – PUERTO DE CONEXIÓN RS485 (COM 3) DEL MAGREC-4B..... | 49 |
| IMAGEN 28 – ESQUEMA DE CONEXIÓN DEL MAGREC-4B (RS485) Y EL OBSDAQ (MINI-JACK)..... | 50 |
| IMAGEN 29 – VISTA AÉREA DE LA UBICACIÓN DE PRUEBAS EN EL REAL JARDÍN BOTÁNICO JUAN CARLOS I..... | 51 |
| IMAGEN 30 – A LA IZQUIERDA QUIPO EN EL INTERIOR DE LA CASETA: MAGREC-4B, MÓDULO OBSDAQ Y FUENTES DE ALIMENTACIÓN. A LA DERECHA CAJA DE CORCHO DONDE SE SITÚA EL SENSOR Y LA BASE MÓVIL..... | 52 |
| IMAGEN 31 – CAJA CONTENEDORA DEL SENSOR EN LA SITUACIÓN 1..... | 53 |

| | |
|--|----|
| IMAGEN 32 – CAJA CONTENEDORA DEL SENSOR EN LA SITUACIÓN 2 | 53 |
| IMAGEN 33 – EJEMPLO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LA UBICACIÓN DE PRUEBAS DONDE SE APRECIA RUIDO EN LAS TRES COMPONENTES, ESPECIALMENTE EN LA VERTICAL | 58 |
| IMAGEN 34 – VISTA AÉREA DE LA UBICACIÓN DE PRUEBAS Y SU ENTORNO, DONDE SE MARCAN CON CAPAS DEL IGN Y SÍMBOLOS (VER LEYENDA EN ESQUINA SUPERIOR DERECHA DE LA IMAGEN) LAS POSIBLES FUENTES DE RUIDO | 59 |
| IMAGEN 35 – EJEMPLO DE RUIDO EN LAS COMPONENTES X, Y Y Z DEL OBSERVATORIO DE TANGERANG DONDE SE APRECIAN CLARAMENTE PERIODOS SIN RUIDO EN LAS TRES COMPONENTES, COINCIDIENDO CON PERIODOS DE INACTIVIDAD DEL TRANSPORTE FERROVIARIO | 61 |
| IMAGEN 36 – RESULTADOS DEL ESTUDIO EN LA ESTACIÓN DE BROFELDE DONDE SE DEMUESTRA LA RELACIÓN ENTRE LA CORRIENTE/POTENCIA QUE CIRCULA POR LA LÍNEA Y LAS DIFERENCIA EN LAS MEDICIONES RESPECTO A UN OBSERVATORIO DE REFERENCIA | 63 |
| IMAGEN 37 – EJEMPLO DE RUIDO EN LAS COMPONENTES X E Y OBTENIDAS EN LA UBICACIÓN DE PRUEBAS EN LA SITUACIÓN 2. SE PUEDE APRECIAR DOS PERTURBACIONES DE FORMA CUADRADA DE GRAN INTENSIDAD | 64 |
| IMAGEN 38 – VISTA AÉREA DEL ENTORNO CERCANO A LA CASETA EN LA UBICACIÓN DE PRUEBAS | 65 |
| IMAGEN 39 – COMPARATIVA DE LA COMPONENTE X EN UN DÍA “TRANQUILO” | 71 |
| IMAGEN 40 – COMPARATIVA DE LA COMPONENTE Y EN UN DÍA “TRANQUILO” | 72 |
| IMAGEN 41 – EJEMPLO DE RUIDO EN LA COMPONENTE X | 73 |
| IMAGEN 42 – EJEMPLO DE NIVEL DE RUIDO EN LA COMPONENTE Y | 74 |
| IMAGEN 43 – COMPARATIVA DEL RUIDO EN LA COMPONENTE Z EN LA SITUACIÓN 1, PANEL INFERIOR, Y EN LA SITUACIÓN 2, PANEL SUPERIOR | 75 |
| IMAGEN 44 – PERIODO DE 4 HORAS, DONDE SE OBSERVA UN PERIODO CON RUIDO MÍNIMO DE 2,5 H DESDE EL COMIENZO DEL DÍA ... | 76 |
| IMAGEN 45 – EJEMPLO DE PERIODO DE SILENCIO EN LA COMPONENTE Y. SE MUESTRAN 5H EN LOS QUE SE OBSERVA UN PERIODO DE 2,5 H SIN RUIDO DESDE EL COMIENZO DEL DÍA | 76 |
| IMAGEN 46 – COMPARACIÓN DE LA COMPONENTE X DURANTE UNA TORMENTA SOLAR EL DÍA 5 DE AGOSTO DE 2019, CON UNA VARIACIÓN DE MÁS DE 100 nT. EL PANEL SUPERIOR SE CORRESPONDE CON LOS DATOS DEL OBSERVATORIO DE SAN PABLO Y EL INFERIOR CON LOS OBTENIDOS EN LA UBICACIÓN DE PRUEBAS | 77 |
| IMAGEN 47 – COMPARACIÓN DE LA COMPONENTE Y DURANTE UNA TORMENTA SOLAR EL DÍA 5 DE AGOSTO DE 2019 CON UNA VARIACIÓN DE 100 nT. EL PANEL SUPERIOR SE CORRESPONDE CON LOS DATOS DEL OBSERVATORIO DE SAN PABLO Y EL INFERIOR CON LOS OBTENIDOS EN LA UBICACIÓN DE PRUEBAS | 78 |
| IMAGEN 48 – VARIACIÓN DE LA COMPONENTE X DURANTE LA TORMENTA GEOMAGNÉTICA PROVOCADA POR UN AGUJERO COROLAR EL DÍA 31 DE AGOSTO DE 2019. EL PANEL SUPERIOR SE CORRESPONDE CON LOS DATOS DEL OBSERVATORIO DE SAN PABLO Y EL INFERIOR CON LOS OBTENIDOS EN LA UBICACIÓN DE PRUEBAS | 79 |
| IMAGEN 49 – VARIACIÓN DE LA COMPONENTE Y DURANTE LA TORMENTA GEOMAGNÉTICA PROVOCADA POR UN AGUJERO COROLAR EL DÍA 31 DE AGOSTO DE 2019. EL PANEL SUPERIOR SE CORRESPONDE CON LOS DATOS DEL OBSERVATORIO DE SAN PABLO Y EL INFERIOR CON LOS OBTENIDOS EN LA UBICACIÓN DE PRUEBAS | 80 |
| IMAGEN 50 – VARIACIÓN DE LA COMPONENTE X DURANTE LA TORMENTA GEOMAGNÉTICA PROVOCADA POR UN AGUJERO COROLAR EL DÍA 1 DE SEPTIEMBRE DE 2019. EL PANEL SUPERIOR SE CORRESPONDE CON LOS DATOS DEL OBSERVATORIO DE SAN PABLO Y EL INFERIOR CON LOS OBTENIDOS EN LA UBICACIÓN DE PRUEBAS | 81 |
| IMAGEN 51 – VARIACIÓN DE LA COMPONENTE Y DURANTE LA TORMENTA GEOMAGNÉTICA PROVOCADA POR UN AGUJERO COROLAR EL DÍA 1 DE SEPTIEMBRE DE 2019. EL PANEL SUPERIOR SE CORRESPONDE CON LOS DATOS DEL OBSERVATORIO DE SAN PABLO Y EL INFERIOR CON LOS OBTENIDOS EN LA UBICACIÓN DE PRUEBAS | 82 |
| IMAGEN 52 – RESULTADOS ANTES (ROJO) Y DESPUÉS (AZUL) DE APLICAR UN FILTRO DE VENTANA MÓVIL A LA COMPONENTE X REGISTRADA EN LA UBICACIÓN DE PRUEBA, CON UN VALOR DE VENTANA DE 180 SEGUNDOS | 83 |
| IMAGEN 53 – RESULTADOS ANTES (ROJO) Y DESPUÉS (AZUL) DE APLICAR UN FILTRO DE VENTANA MÓVIL A LA COMPONENTE Y REGISTRADA EN LA UBICACIÓN DE PRUEBA, CON UN VALOR DE VENTANA DE 180 SEGUNDOS | 84 |
| IMAGEN 54 – RESULTADOS ANTES (ROJO) Y DESPUÉS (AZUL) DE APLICAR UN FILTRO DE VENTANA MÓVIL A LA COMPONENTE X REGISTRADA EN LA UBICACIÓN DE PRUEBA, CON UN VALOR DE VENTANA DE 240 SEGUNDOS | 85 |
| IMAGEN 55 – RESULTADOS ANTES (ROJO) Y DESPUÉS (AZUL) DE APLICAR UN FILTRO DE VENTANA MÓVIL A LA COMPONENTE Y REGISTRADA EN LA UBICACIÓN DE PRUEBA, CON UN VALOR DE VENTANA DE 240 SEGUNDOS | 86 |

| | |
|---|----|
| IMAGEN 56 – ESQUEMA DE LA DISTRIBUCIÓN RECOMENDADA POR IAGA PARA UNA ESTACIÓN GEOMAGNÉTICA..... | 91 |
| IMAGEN 57 – VISTA AÉREA DE LA UBICACIÓN PROPUESTA Y SU ENTORNO, DONDE SE MARCAN CON CAPAS DEL IGN Y SÍMBOLOS (VER LEYENDA EN ESQUINA SUPERIOR DERECHA DE LA IMAGEN) LAS POSIBLES FUENTES DE RUIDO. | 94 |
| IMAGEN 58 – REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA A MANO ALZADA DE LA CONSTRUCCIÓN PROPUESTA, CON ALGUNOS MATERIALES A MODO DE EJEMPLO..... | 96 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| TABLA 1 – TABLA DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MAGNETÓMETRO LEMI-031 PROPORCIONADAS POR EL FABRICANTE | 39 |
| TABLA 2 – ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MÓDULO OBSDAQ PROPORCIONADAS POR EL FABRICANTE..... | 42 |
| TABLA 3 – ERRORES ASOCIADOS AL MAGNETÓMETRO LEMI-031 PROPORCIONADOS POR EL FABRICANTE..... | 54 |
| TABLA 4 – ERRORES ASOCIADOS AL MÓDULO OBSDAQ PROPORCIONADOS POR EL FABRICANTE | 56 |
| TABLA 5 – ERRORES MÁXIMOS DE SENSIBILIDAD Y DE OFFSET EN LA MEDIDA DEBIDOS AL LEMI-031 Y EL MÓDULO OBSDAQ | 57 |

Capítulo 1. Introducción

Las observaciones geomagnéticas han existido desde hace más de 500 años y han sido de los primeros experimentos científicos que han monitorizado un cambio a nivel global en nuestro planeta. El objetivo de un observatorio geomagnético es registrar de una manera continua y prolongada en el tiempo, la variación de las componentes del campo magnético terrestre y el campo total con fines, principalmente, científicos manteniendo unos estándares de precisión absoluta determinados.

Una tarea global importante es monitorear la variación secular del campo magnético en todo el mundo, ya que la variación secular es la única forma conocida de estudiar los movimientos del fluido conductor en el núcleo externo de la Tierra, que es la principal fuente del campo magnético de la Tierra y cuya variación es muy lenta en el tiempo, es por esto por lo que se le llama variación secular. También se necesita una red global suficientemente densa para la calibración y el control de satélites de levantamiento magnético, Los datos geomagnéticos también son necesario para fenómenos de Meteorología Espacial como el estudio del Sol y las tormentas solares que a través de su interacción con la Tierra provocan tormentas geomagnéticas que pueden llegar a tener consecuencia para la vida en La Tierra. Así como la creación, actualización y el perfeccionamiento de modelos del campo magnético terrestre como el modelo de campo geomagnético internacional de referencia o IGRF por sus siglas en inglés, que permite calcular el valor de campo en cualquier parte del planeta y que es revisado cada 5 años por expertos del IAGA. Tareas que viene haciendo desde hace años en la asociación internacional de geomagnetismo y aeronomía, IAGA por sus siglas en inglés, a través de sus 6 divisiones, en concreto la V división, que tiene como labor la estandarización de los sistemas de adquisición de datos geomagnéticos, la programación de levantamientos, de los índices geomagnéticos y de los análisis de las observaciones geomagnéticas en términos generales.

1.1 Marco Histórico y estado del arte

Henry Gillebrand, Graham, Celsius, Gauss o Von Humboldt, fueron algunos de los principales precursores de la medición del campo magnético terrestre y su comparación en diferentes partes del planeta, descubriendo, con el paso de los años y las mejoras en los instrumentales primitivos y en las teorías sobre electromagnetismo, variaciones en la declinación y la inclinación del vector de campo magnético, confirmado variaciones simultaneas globales y la variación con el tiempo, así como variaciones en la intensidad de cada una de las componentes del campo magnético en diferentes posiciones del globo.

A mediados de la década de los 80 hasta 50 observatorios participaban de las mediciones magnéticas en todo el mundo, Gauss desarrollo su “teoría general del geomagnetismo” y demostró que casi todo el campo magnético observado en la superficie de la Tierra se origina en su interior.

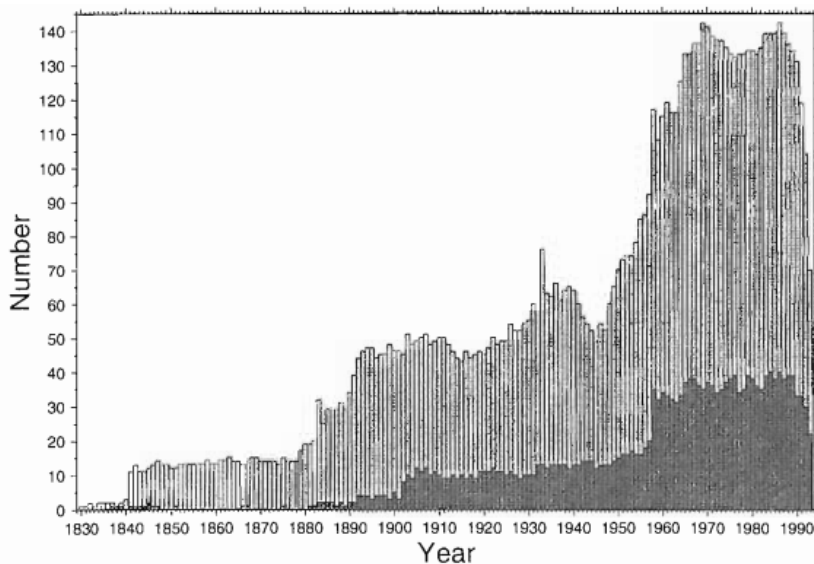


Imagen 1 - observatorios geomagnéticos desde el año 1830 hasta 1990 (Jankowski, 1996)



Imagen 2 - Distribución de los observatorios geomagnéticos en el año 1994 (Jankowski, 1996)

Hace más de una década a raíz de las reuniones internacionales sobre instrumentos y de comparación de resultados en 1986-87, se creó INTERMAGNET, una red a nivel global de observatorios geomagnéticos, con el objetivo de proporcionar datos de manera constantes en tiempo real o cuasi-real con cobertura geográfica sobre el campo geomagnético, importantes para las investigaciones sobre geomagnetismo. Además de establecer estándares sobre instrumentación, para la medición, el procesamiento y la transmisión de datos y asesorar a observatorios para lograr su inclusión en la red. El primer nodo de información geomagnética y el primer CD-ROM/DVD fueron publicados en 1991. En la actualidad hay alrededor de 180 observatorios, de los cuales 150 pertenecen a la red de INTERMAGNET (ver Imagen 3) y su papel en la supervisión del campo magnético terrestre es esencial no solo para la ciencia sino también para usos comerciales y gubernamentales, y aún existen necesidades a niveles mundiales, locales y regionales.



Imagen 3 – Red de observatorios geomagnéticos pertenecientes a INTERMAGNET en el año 2019.

Hoy en día, existen muchas zonas sin mediciones y la uniformidad en la distribución de los observatorios, relacionada con la distribución de los océanos y los continentes y que además, tiene una asimetría entre el norte y el sur del planeta, lo que denota un cierto componente económico, es bastante mejorable. Las mediciones en zonas oceánicas son aún un problema debido a la complejidad de la correcta instalación de magnetómetros en fondos marinos.

También son necesarios nuevos observatorios por otros motivos que se conocen como ruido cultural, como pueden ser nuevas vías férreas, carreteras, edificios, vallas metálicas u otras construcciones que pueden hacer que la localización de algunos observatorios no sean los ideales por sus efectos en los sensibles instrumentos de medición. El avance de la tecnología de los sensores de campo magnético y los instrumentales electrónicos para la adquisición de datos facilitan hoy en día, el registro de datos geomagnéticos en ubicaciones y condiciones adecuadas respecto a unas décadas atrás. Por lo tanto, ahora uno de los mayores problemas reside en la habilidad para juzgar la exactitud de los datos.

1.2 Fases del proyecto

Para facilitar el desarrollo del proyecto a medio o largo plazo se ha estructurado en tres fases con el objetivo de que, tras la implantación de la fase 3 el magnetómetro se encuentre tomando datos con suficiente precisión como para poder llevar a cabo una validación de los mismo y poder ser usados para la investigación científica en el Space Weather Group de la UAH (SWE). Las tres fases se han desarrollado al menos de manera teórica. La fase 1, además se ha llevado a cabo de manera práctica.

- **Fase 1: Montaje, puesta marcha y análisis de errores.**

En esta primera fase del proyecto se analiza el instrumental que se va a utilizar para tomar las medidas de las componentes del campo: el sensor y los sistemas electrónicos para adquirir, representar y almacenar la información proporcionada por el sensor. Se analiza el tipo de alimentación, los tipos de señales que se van a tratar, los protocolos de comunicación y los buses necesarios para conectar los diferentes componentes, así como las características internas de cada uno de ellos y la información de los fabricantes para su montaje y para determinar los errores que introducen en la media. Una vez realizado el conexionado se instala el sistema en una ubicación donde pruebas donde se puedan analizar los datos obtenidos y diferentes perturbaciones de origen artificial que se manifiestan en los datos en forma de ruido.

- **Fase 2: Calibración con estación de referencia.**

Una vez que el magnetómetro está midiendo, se han ajustado los parámetros y se ha comprobado la correcta comunicación entre los diferentes componentes es necesario realizar una calibración con una estación de referencia. Para ello se debe instalar el sistema en el observatorio geomagnético con datos validados más cercano que sirva como estación de referencia para realizar la calibración, esta consistirá en conseguir datos durante un periodo de tiempo suficiente como para cruzar los datos tomados por el sensor de referencia y el sensor a calibrar y obtener unos valores de ganancia y offset que ajusten la información obtenida del sensor a calibrar.

- **Fase 3: Análisis de la ubicación y el montaje definitivos.**

En la tercera fase del proyecto se estudia las condiciones y el montaje ideal del sistema para la grabación de datos geomagnéticos con el fin de determinar la mejor ubicación posible para la instalación sistema ya validado y calibrado con el fin de disponer de datos válidos para su uso en el ámbito de la meteorología espacial tras la finalización de esta tercera fase del proyecto.

1.3 Objetivos

El desarrollo de este trabajo fin de grado (TFG) tiene tres objetivos, tanto a nivel teórico como a nivel práctico, que justifican, a entender de su autor, la división del proyecto en las 3 fases anteriormente comentadas.

- Montaje y puesta en funcionamiento de un sensor fluxgate que mida la variación de las componentes del campo magnético en la superficie de la Tierra para posteriormente ser digitalizadas, tratadas y almacenadas.
- Realizar un estudio de las diferentes fuentes de error y ruido que afecten a la medida, debidas, tanto a los instrumentos electrónicos, como a diferentes fenómenos electromagnéticos de origen no natural, debidos principalmente a la actividad humana y la temperatura. Tratando de identificar el origen del ruido.
- Desarrollar un planteamiento teórico para la calibración con una estación geomagnética de referencia y para, en base a la experiencia adquirida y a recomendaciones de instituciones de referencia a en mediciones geomagnéticas como IAGA o INTERMAGNET, determinar las condiciones ideales para su ubicación y su instalación definitiva.

Capítulo 2. El Geomagnetismo

El geomagnetismo es la ciencia multidisciplinar que estudia el campo magnético de La Tierra, su origen, las propiedades y las variaciones de este a lo largo del tiempo causadas por fenómenos como el viento solar o las tormentas solares, cuyo camino está estrechamente relacionado con la organización científica internacional. Es una de las disciplinas científicas más antiguas y que sigue en constante evolución valiéndose de las mejoras en la tecnología instrumental, de las técnicas de computación y los avances en la exploración espacial.

2.1 El campo magnético de La Tierra

Hace varios siglos que los chinos descubrieron que ciertos minerales magnéticos, llamados lodestones, se orientaban de manera aproximada en la dirección Norte-Sur. Sin embargo, la razón de este efecto no se conocería hasta que en el año 1600 Gilbert publicó "Le Magnete" donde describió el campo magnético de la Tierra como un imán gigante con forma esférica uniformemente magnetizado, siendo esta la primera teoría propuesta para solucionar el problema del origen del campo magnético de la Tierra. Rechazada tras, entre otros factores, conocer las altas temperaturas del interior de la Tierra, que impedían la magnetización permanente. En 1919 Joseph Larmor propuso que el movimiento del hierro fundido del núcleo externo de la Tierra actuaría como una dinamo produciendo el campo magnético de la Tierra. El paleomagnetismo nos proporciona evidencias de su existencia desde hace alrededor de 3.000 millones de años, lo que implica que el sistema generador de campo debe de estar mantenido continuamente. Debido a esto, la fuente originaria de campo magnético principal es conocida como la dinamo del núcleo autoinducida o geodinamo, por analogía con la tecnología que produce energía eléctrica en un conductor el cual gira en presencia de un campo magnético, producida por la rotación de la Tierra y los movimientos de materiales con propiedades de fluidez importantes, baja viscosidad y densidad y alta conductividad, que representa más del 90% del campo magnético observado. Los avances más importantes en el estudio de la dinamo nuclear vienen de la mano de la consecución de soluciones numéricas para las ecuaciones magnetohidrodinámicas (MHD) que describen la convección térmica y la generación de campo magnético en un fluido que rota en una capa esférica con un núcleo interno sólido y conductor.

Se dice fuente principal ya que el campo magnético de la Tierra tiene dos orígenes, uno interno y otro externo. El campo de origen interno es por tanto semejante a un dipolo magnético situado en el centro de la Tierra con una inclinación de $11,5^\circ$ respecto a su eje de rotación, donde las líneas de campo emanan y mueren en los polos geomagnéticos, contrarios a los polos geográficos, y el ecuador magnético es el plano perpendicular a su eje (ver Imagen 4). Este campo interno no es uniforme y es variable en tiempo de manera muy lenta, lo que se conoce como variación secular.

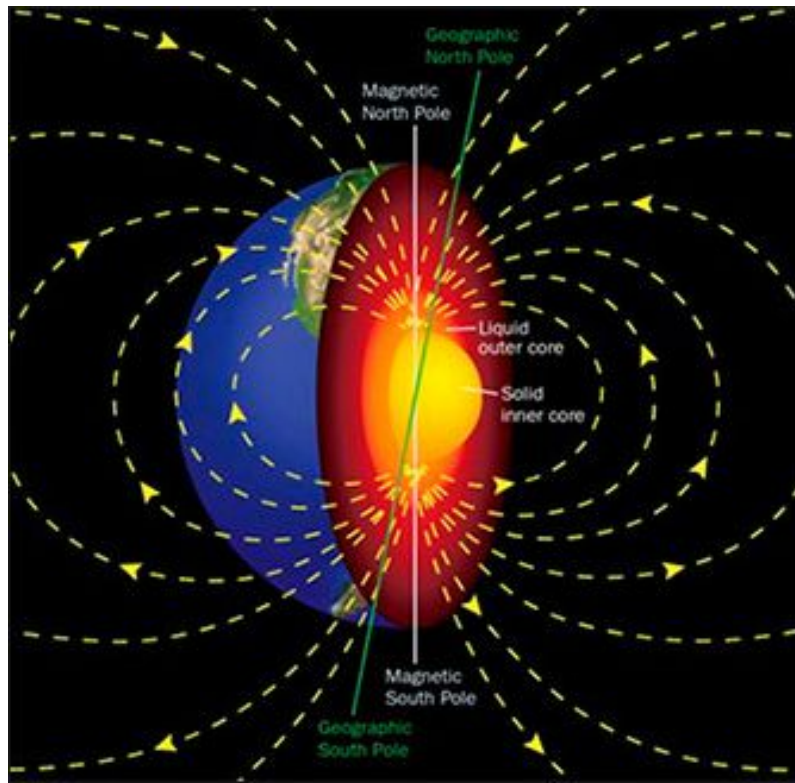


Imagen 4 – Representación en 3D del interior de la Tierra y las líneas de campo. El eje verde representa el eje de rotación de La Tierra y el eje blanco el de la geodinamo

El campo de origen externo se debe principalmente a la actividad del sol y su interacción con dos partes del entorno terrestre; la ionosfera, capa de la atmosfera con una gran cantidad de particular cargadas comprendida desde los 60-80 km hasta los 1000km aproximadamente y la magnetosfera, zona de influencia del campo magnético de la Tierra.

El campo magnético de la Tierra se debe en más del 90% al campo interno y que es posible modelar mediante componentes armónicas esféricas de manera sencilla (Miguel Herraiz et al., 2014).

$$V_i = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (a/r)^{n+1} P_n^m(\cos \theta) [g_n^m \cos m\mu + h_n^m \sin m\mu]$$

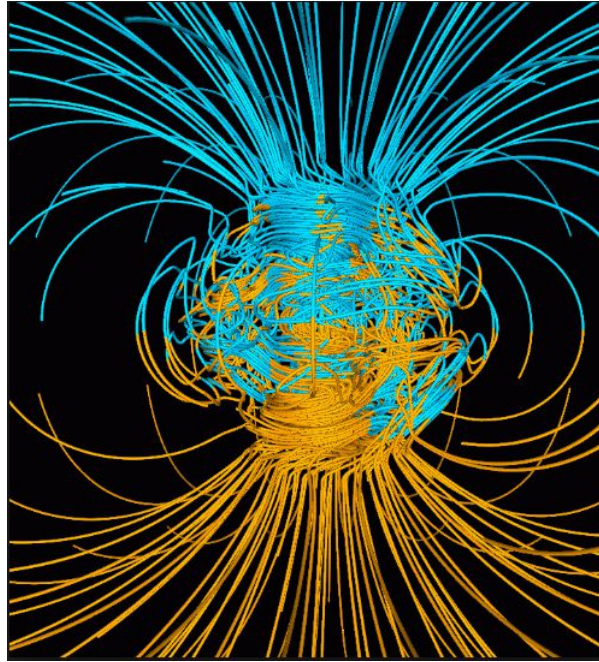


Imagen 5 – Imagen del primer modelo tridimensional y dependiente del tiempo, consistente con las ecuaciones magnetohidrodinámicas del campo magnético terrestre de Glatzmaier y Roberts (1995)

El campo magnético de la Tierra, observado en todo el planeta, es una magnitud vectorial y como tal se caracteriza por su módulo, su dirección y su sentido. Al módulo, F , se le denomina fuerza total o intensidad total. Para estudiar sus componentes se toma como referencia un punto en la superficie de la Tierra y un sistema cartesiano de coordenadas XYZ de ejes en dirección N-S, E-O y vertical, respectivamente. Se necesitan tres componentes del vector F para describir el campo. Las componentes utilizadas o medidas habitualmente se muestran en la imagen inferior.

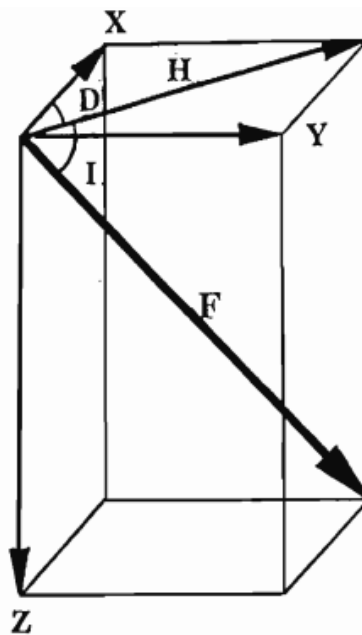


Imagen 6 – Descomposición del campo magnético terrestre, F .

Donde X es la componente norte del vector, Y la componente este del vector y Z la componente vertical (positiva hacia abajo). H representa la intensidad horizontal o componente horizontal del vector, siendo siempre positivo, D es la declinación magnética o el ángulo (positivo hacia el este) entre la dirección del norte geográfico y el magnético (Ángulo entre X y H), la I representa la inclinación magnética o el ángulo entre el vector de intensidad horizontal, H, y la dirección del vector de campo magnético, representado como F en la

Imagen 6.

Según las componentes descritas anteriormente, para expresar el campo magnético en un punto se pueden utilizar algunas de las siguientes ternas: X-Y-Z, H-D-Z, o F-D-I.

La magnitud del campo magnético se mide en Teslas, representado como T (se define como la inducción de un campo magnético que ejerce una fuerza de 1 N (newton) sobre una carga de 1 C (culombio) que se mueve a velocidad de 1 m/s dentro del campo y perpendicularmente a las líneas de inducción magnética) nombrada así en 1960, en honor Nikola Tesla. Esta unidad es demasiado grande por lo que se utiliza un submúltiplo, el nanotesla, nT (1 nT = 10^{-9} Tesla)

Las siguientes ecuaciones muestran la relación matemática entre las diferentes componentes:

$$F^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 = H^2 + Z^2$$

$$H^2 = X^2 + Y^2$$

$$X = H \cos(D)$$

$$Y = H \sin(D) = X \tan(D)$$

$$Z = F \sin I = H \tan I$$

$$D = \arctan(Y/X)$$

$$I = \arctan(Z/H)$$

2.2 Perturbaciones geomagnéticas. Interacción Sol-Tierra: La Magnetosfera

El campo magnético de la Tierra sufre perturbaciones por diferentes fenómenos. El Sol, la estrella más cercana a la Tierra es la causa principal que provoca las variaciones en el campo magnético terrestre. En condiciones de “tiempo de calma” el sol emite un flujo continuo de plasma, formado principalmente por protones, electrones y partículas alfa, conocido como viento solar. Este, interacciona con el campo magnético terrestre y produce lo que se conoce como magnetosfera. Además, el Sol emite radiación electromagnética de forma continua y ésta es capaz de ionizar la capa más alta de la atmósfera terrestre en la cara de día. Estas partículas ionizadas interaccionan a su vez con el campo magnético terrestre y generan lo que se conoce como variaciones diarias del campo magnético terrestre.

Pero además del estado de calma en el Sol ocurren eventos de diferente índole. En su estructura magnética y el plasma que lo forma se producen de manera esporádica fenómenos explosivos y tremendamente violentos que originan diferentes tipos de eventos solares como fulguraciones, prominencias, emisiones de masa corolar, manchas solares, etc. En los que se libera cantidades enormes de energía, del orden de 10^{25} J (que equivaldrían a 40.000 millones de las bombas atómicas lanzadas en Hiroshima), y campo magnético que viaja por el espacio interplanetario (espacio comprendido entre el Sol y la Tierra), es lo que se conoce como tormentas solares. La frecuencia con las que se producen está relacionada con ciertos periodos de actividad en el sol, lo que se denomina “ciclo solar”, de unos 11 años de duración. Estos ciclos se numeran sucesivamente a iniciativa de Wolf, que asignó el número 1 al periodo comprendido entre 1755 y 1766, actualmente nos encontramos en el número 24.

Si estas tormentas solares son lo suficientemente energéticas y se producen en dirección a la Tierra se pueden producir cambios considerables a todas las escalas del entorno terrestre: magnetosfera, ionosfera, campo geomagnético, etc. Es lo que se conoce como tormentas geomagnéticas.

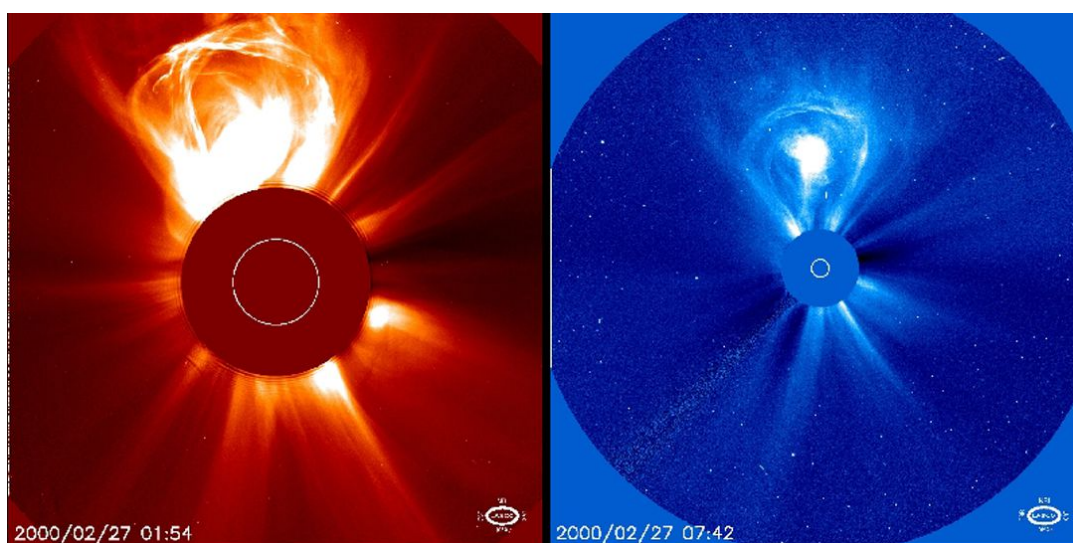


Imagen 7 – Una eyección de masa corolar el 27 de febrero de 2000 tomada por SOHO LASCO C2 y C3. Un CME dispara al espacio millones de toneladas de partículas que viajan a millones de millas por hora.

Fuente: ESA Y NASA / SOHO.

La interacción conduce a un sistema complicado de movimientos de convección de plasma y corrientes eléctricas que producen la estructura que adquiere la magnetosfera terrestre, donde el campo magnético dominante es el campo magnético de la Tierra, en lugar del campo magnético del espacio interplanetario. La magnetosfera es comprimida por el lado diurno provocando que se intensifique la acción del campo geomagnético para incrementar su presión sobre el viento solar y alcanzar una nueva situación de equilibrio, por el lado nocturno se estira.

Pueden distinguirse diferentes zonas de interacción. A unos 12 RT (RT hace referencia al radio de la Tierra, unos 6.400 km) en el lado diurno se encuentra el frente de choque, que es el límite entre la magnetosfera y el medio interplanetario, este puede variar dependiendo de la intensidad del plasma de viento solar. Mas próximo a la Tierra se encuentran los cinturones de Van Allen, formados por partículas atrapadas en las líneas de campo magnético (entre 1,15 – 10 RT). Otro elemento es el anillo de corriente. Estas partículas atrapadas experimentan derivas provocando que los iones y los electrones se muevan en sentidos contrarios, dando lugar a los que se conoce como corriente eléctrica neta del anillo. La magnetocola, se encuentra en el lado nocturno de la magnetosfera, extendiéndose por acción del viento solar más allá de los 300 RT, donde se producen fenómenos de reconexión magnética cuando el campo procedente del sol y el terrestre tiene sentidos contrarios. En las zonas polares se encuentran las zonas más desprotegidas que responden rápidamente a las perturbaciones del viento y las tormentas solares y a través de las cuales penetran partículas provocando fenómenos como las auroras boreales, las llamadas cúspides polares. En la zona de la atmosfera terrestre se encuentra la ionosfera (comprendida entre los 60-80 hasta los 1.000 km por encima de la superficie) donde debido a su gran conductividad de producen sistemas de corrientes como los electrojets, que debido a las interacciones con los fenómenos solares su grado de ionización aumenta y se produce un aumento de estas corrientes (del orden de millones de Amperios). Por último, en la superficie terrestre también aparecen corrientes eléctricas inducidas. Estas tormentas geomagnéticas pueden afectar de una manera considerable a la vida de los seres humanos e incluso a los organismos biológicos (Elena Saiz, Consuelo Cid y Yolanda Cerrato, SWE).

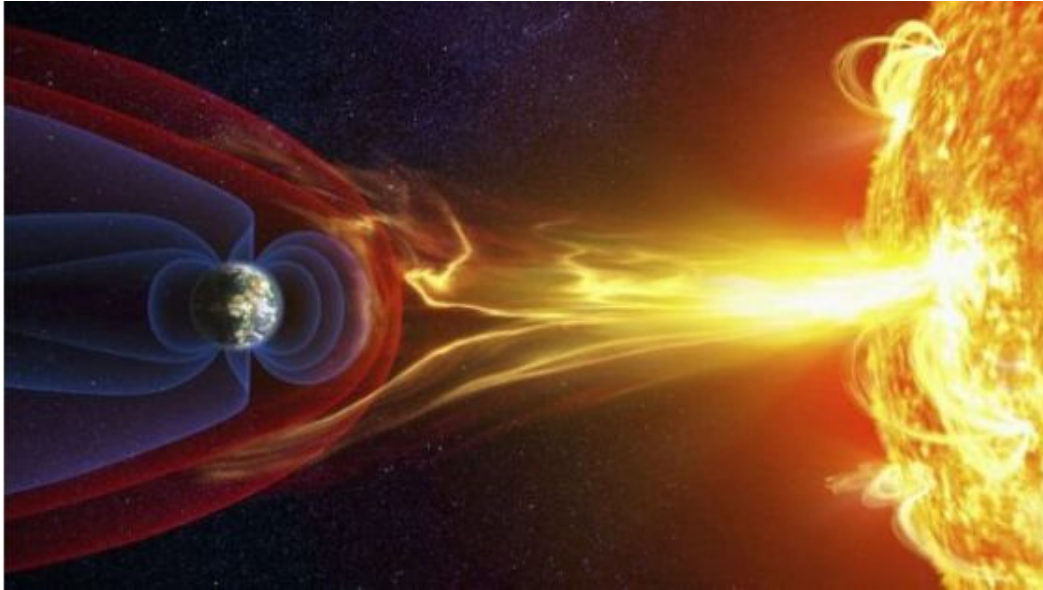


Imagen 8 – Representación artística de la interacción SOL-Tierra donde se conforma la Magnetosfera.

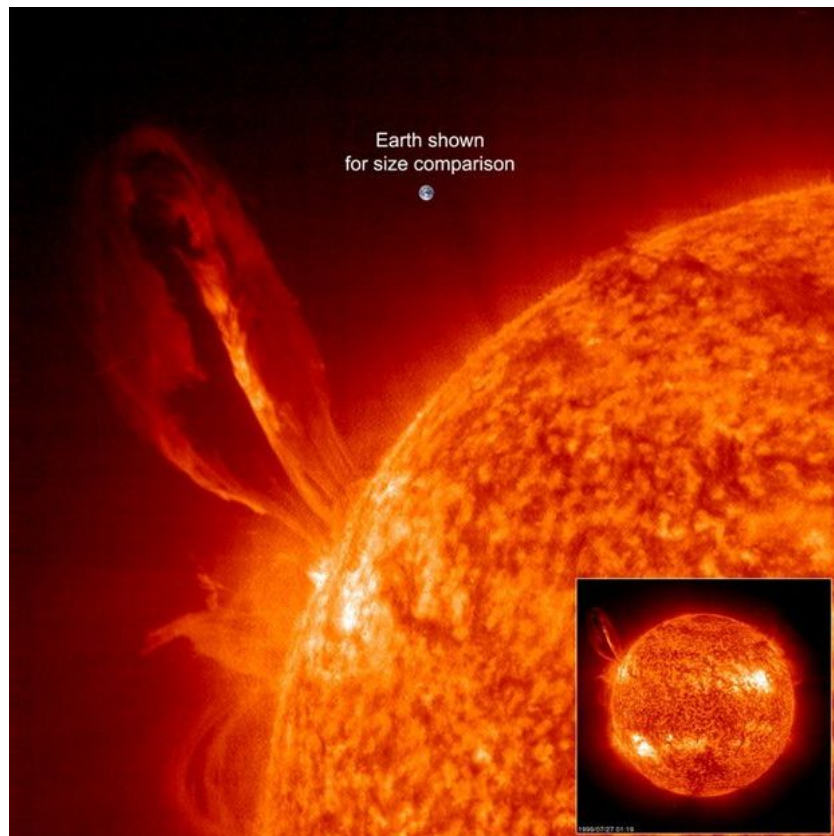


Imagen 9 – Una sorprendente eyección de gas caliente y partículas estalla y se eleva desde el Sol, guiada por un bucle gigante de campo magnético intenso. Imagen tomada el 27 de Julio de 1999 por el observatorio Heliosférico y Solar (SOHO). La Tierra se superpone para facilitar la comparación, la prominencia mide de extremo a extremo unas 35 veces el diámetro de nuestro planeta.

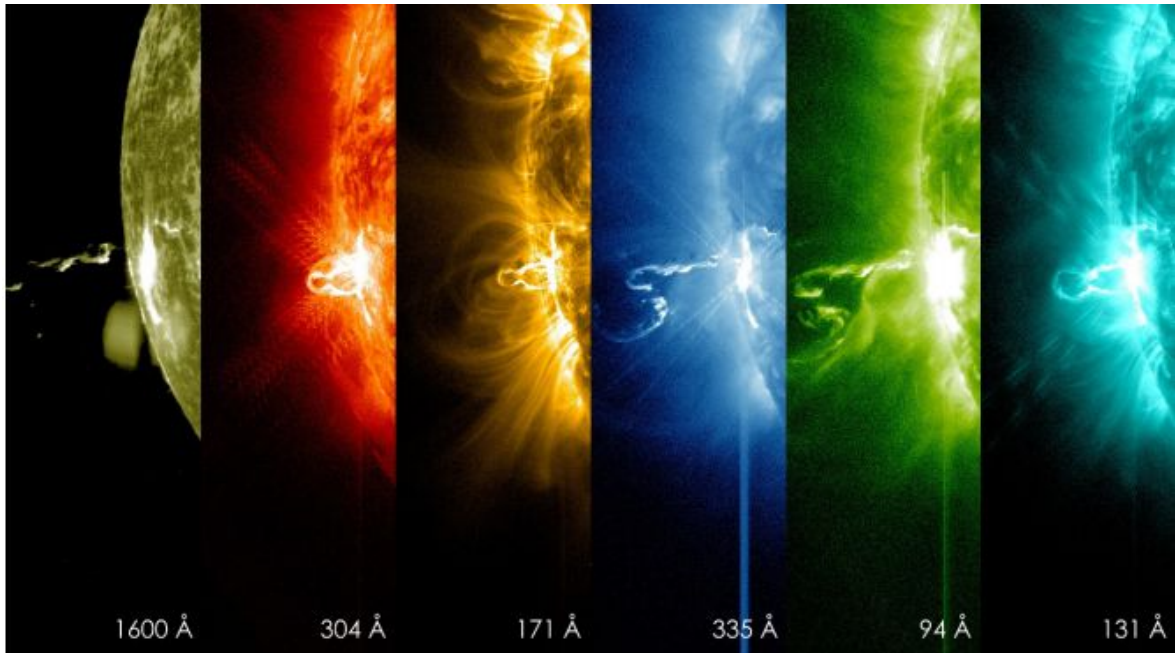


Imagen 10 – Fulguración solar captada por el satélite SDO vista en diferentes longitudes de onda.
Fuente: NASA, National Aero Space Agency

Capítulo 3. Motivación y campo de estudio

La mayoría de las tormentas geomagnéticas son de pequeña magnitud y no causan grandes daños, pero también se pueden producir y se han producido tormentas geomagnéticas con efectos significativos en la vida cotidiana y la actividad humana. En los días 1 y 2 de septiembre de 1859 se produjo una gran fulguración solar que provocó la tormenta geomagnética más importante de la que se tiene constancia, conocida como “evento de Carrington” en honor al astrónomo que la observó y la relacionó con la tormenta geomagnética que le acaeció. Las auroras que provocó llegaron a ser visibles desde la Península Ibérica y provocó daños en los sistemas de telegrafía de la época llegando incluso a incendiarse. Siendo esta la primera vez que un fenómeno de este tipo afectaba a la vida y la tecnología de las personas.

Hoy en día los recursos tecnológicos y la dependencia que el ser humano tiene de ellos son mucho mayor, por lo que los efectos que una tormenta de esa magnitud produciría serían tremendamente superiores. Los más directamente perjudicados serían los satélites, las redes de distribución eléctrica, los gaseoductos, los oleoductos y el transporte por ferrocarril y aéreo. Esto se traduciría en fallos de sistemas de comunicación, posicionamiento, navegación, seguridad, provocaría el colapso del tráfico aéreo y marítimo. Corrientes inducidas geomagnéticamente con efectos más o menos graves en los suministros eléctricos provocando fallos en sistemas vitales como hospitales, centros de depuración de aguas o centrales eléctricas, incluso en los aparatos eléctricos de una casa. También pueden afectar a los seres vivos y a procesos biológicos básicos. Algunos países como Estados Unidos o Inglaterra incluyeron esta amenaza entre los riesgos naturales ya hace varios años (Miguel Herraiz et al. 2014), y España lo ha hecho recientemente.

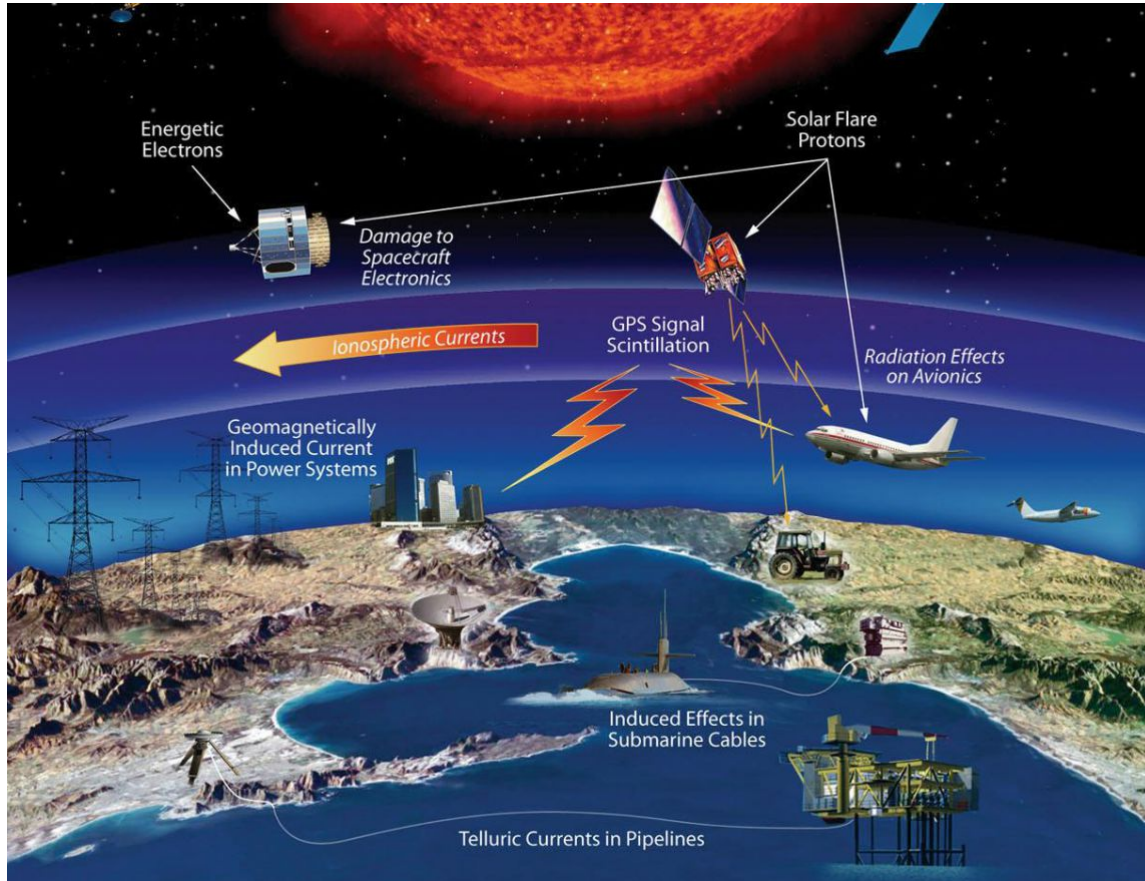


Imagen 11 – Infraestructuras afectadas por fenómenos de meteorología espacial. Fuente: NASA

Desde la superficie de la Tierra las tormentas geomagnéticas se detectan mediante los magnetómetros y el adecuado procesado de los datos, registrando los cambios provocados en el vector de campo, en observatorios repartidos por todo el globo.

Estos datos registrados por los magnetómetros, junto con los datos proporcionados por satélites de observación del Sol como el SOHO (Solar and Heliospheric Observatory Homepage), que detectan y toman datos del viento solar y/o eventos solares sirven para el estudio de las tormentas geomagnéticas, así como para predecirlas y diseñar sistemas de alerta temprana. Además, se han establecido índices que miden y clasifican su magnitud, como el índice k , que indica la perturbación del campo magnético a nivel local, tomando como referencia la variación diaria de un día en calma del observatorio geomagnético en el que se mide. A nivel planetario se define el índice K_p que se obtiene por la media ponderada de los índices k observados en una red específica de magnetómetros.

| Scale | Description | Effect | Physical measure | Average Frequency (1 cycle = 11 years) |
|-------|-----------------|--|------------------------------|---|
| G 5 | Extreme | Power systems: Widespread voltage control problems and protective system problems can occur, some grid systems may experience complete collapse or blackouts. Transformers may experience damage. Spacecraft operations: May experience extensive surface charging, problems with orientation, uplink/downlink and tracking satellites. Other systems: Pipeline currents can reach hundreds of amps, HF (high frequency) radio propagation may be impossible in many areas for one to two days, satellite navigation may be degraded for days, low-frequency radio navigation can be out for hours, and aurora has been seen as low as Florida and southern Texas (typically 40° geomagnetic lat.). | Kp = 9 | 4 per cycle (4 days per cycle) |
| G 4 | Severe | Power systems: Possible widespread voltage control problems and some protective systems will mistakenly trip out key assets from the grid. Spacecraft operations: May experience surface charging and tracking problems, corrections may be needed for orientation problems. Other systems: Induced pipeline currents affect preventive measures, HF radio propagation sporadic, satellite navigation degraded for hours, low-frequency radio navigation disrupted, and aurora has been seen as low as Alabama and northern California (typically 45° geomagnetic lat.). | Kp = 8, including a 9- | 100 per cycle (60 days per cycle) |
| G 3 | Strong | Power systems: Voltage corrections may be required, false alarms triggered on some protection devices. Spacecraft operations: Surface charging may occur on satellite components, drag may increase on low-Earth-orbit satellites, and corrections may be needed for orientation problems. Other systems: Intermittent satellite navigation and low-frequency radio navigation problems may occur, HF radio may be intermittent, and aurora has been seen as low as Illinois and Oregon (typically 50° geomagnetic lat.). | Kp = 7 | 200 per cycle (130 days per cycle) |
| G 2 | Moderate | Power systems: High-latitude power systems may experience voltage alarms, long-duration storms may cause transformer damage. Spacecraft operations: Corrective actions to orientation may be required by ground control; possible changes in drag affect orbit predictions. Other systems: HF radio propagation can fade at higher latitudes, and aurora has been seen as low as New York and Idaho (typically 55° geomagnetic lat.). | Kp = 6 | 600 per cycle (360 days per cycle) |
| G 1 | Minor | Power systems: Weak power grid fluctuations can occur. Spacecraft operations: Minor impact on satellite operations possible. Other systems: Migratory animals are affected at this and higher levels; aurora is commonly visible at high latitudes (northern Michigan and Maine). | Kp = 5 | 1700 per cycle (900 days per cycle) |

Imagen 12 – Escala de clasificación de tormentas geomagnéticas según NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)

Estas son algunas de las labores desarrolladas por el geomagnetismo en el ámbito de la meteorología espacial (Space Weather), disciplina surgida al inicio de la década de los 90, que estudia las condiciones del sol y el viento solar, la magnetosfera, la ionosfera y la termosfera, que pueden afectar a sistemas tecnológicos como los antes mencionados. Básicamente abarca tres ámbitos: el sol y su atmósfera (origen de energía), el espacio interplanetario (medio de propagación) y la magnetosfera, la ionosfera y la superficie terrestres (zonas afectadas). Este, es el campo de estudio del Grupo de Meteorología Espacial de la universidad de Alcalá (Space Weather Group) grupo con el cual se ha desarrollado este proyecto.

3.1 El Geomagnetismo en España

En España hay cuatro observatorios operativos en la actualidad: San Pablo de los Montes, (Toledo), Güümar (Tenerife) que dependen del Instituto Geográfico Nacional (IGN), San Fernando (Cádiz) perteneciente al Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA), y el Observatorio del Ebro (Tarragona) coordinado por una institución multi-institucional de carácter científico que le da el nombre. Además, el Observatorio del Ebro se ocupa del mantenimiento del observatorio situado en la Antártida, en Isla de Livingston, desde el año 1996. Los observatorios de San Pablo de los Montes y Güümar pertenecen a la red INTERMAGNET desde el año 1997, cumpliendo los requisitos establecidos.

Además, el IGN cuenta con una red de 42 estaciones de repetición, 39 situadas en la península y 3 en las Islas Baleares para aumentar la densidad de datos geomagnéticos con un menor coste, aunque con menos calidad de los datos, tanto a nivel nacional como internacional.



Imagen 13 – Estaciones geomagnéticas y de repetición en la península ibérica.
 Fuente: Instituto Geográfico Nacional, IGN.

Los datos tomados por estas estaciones están disponibles en la página web del IGN y además de servir a nivel nacional para realizar magnetogramas, anuarios, cartografía geomagnéticos, etc., se envían a proyectos internacionales como MagNet, Red Europea de Estaciones seculares Magnéticas, y al WDC (Wold Data Center) donde sirven para estudios y modelos científicos.

Capítulo 4. Fase 1: Montaje, puesta en marcha y análisis de errores

En este capítulo se tratará la primera fase del proyecto, donde se realiza el montaje y la puesta en marcha del sistema, y tras comprobar su correcto funcionamiento, se traslada a una ubicación de pruebas donde se analizan los errores y fuentes de ruido que puedan afectar a los datos captados por el magnetómetro, del instrumental y sobre todo del entorno.

Los diferentes componentes son analizados individualmente para conocer sus características de funcionamiento, su alimentación, la naturaleza de las señales que proporcionan, sus métodos y medios de comunicación con otros componentes y se realiza un estudio de la información que proporcionan los fabricantes acerca de los errores intrínsecos que puedan afectar al sistema completo y a la precisión de los datos obtenidos.

Una vez que se conocen los diferentes componentes por separado se realiza el conexionado de los mismos, para lo que es necesario preparar los buses de comunicación en función de los protocolos y de los tipos de conectores de los que dispone cada uno de los dispositivos. Así como la adecuación de una caja contenedora para el magnetómetro.

Por último, se realiza un estudio de todas las posibles fuentes de ruido electromagnético, tanto detectadas en los datos tras la puesta en marcha del sistema de medición como los que, pese a no ser detectados con claridad en los datos, fueran susceptibles de estar afectando a la veracidad de los datos medidos por el sensor, así como, los proporcionados por el fabricante, que atienden a la naturaleza electrónica de los componentes utilizados. Se propondrán además algunas técnicas que podrían usarse para reducir o eliminar el ruido.

4.1 Descripción del equipo

El sistema de medida está formado por un magnetómetro, un convertidor analógico/digital y una computadora, descritos a continuación.

4.1.1 Magnetómetro de saturación o fluxgate LEMI-031

El sensor es el principal elemento del sistema. Provee una señal eléctrica que es proporcional a la variación del vector de campo geomagnético en sus tres componentes (X, Y, Z) por lo que se denomina “variómetro”. El sensor utilizado es un LEMI-031 del “LVIV centro del instituto de investigación espacial de Ucrania”, un sensor fluxgate de muy bajo consumo. Se denomina sensor fluxgate o de saturación, ya que se basa en la no linealidad de la magnetización de materiales magnéticos “blandos”, fácilmente saturables. Estos materiales, de alta permeabilidad forman el núcleo, alrededor del cual se sitúan dos devanados: una bobina de excitación y una bobina de recepción/realimentación.

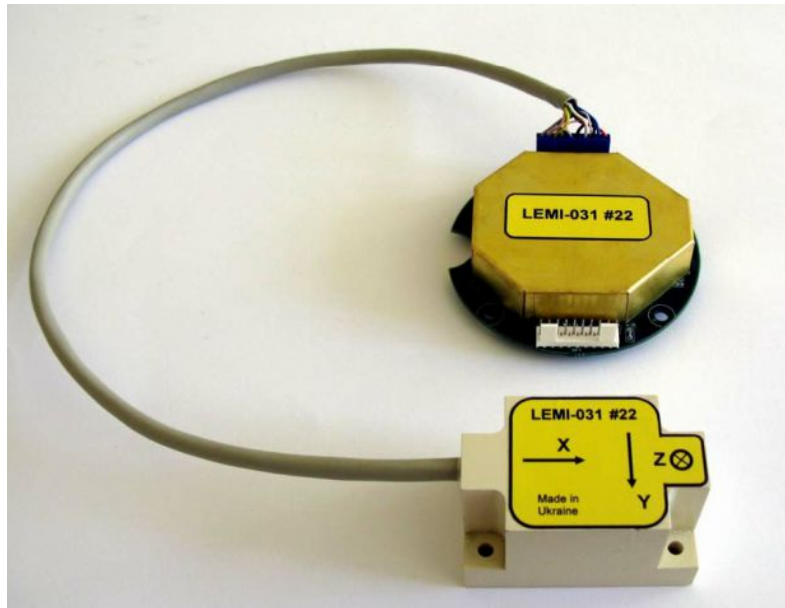


Imagen 14 – Aspecto del magnetómetro LEMI-031 y la caja electrónica.

A través de los devanados de saturación, que están conectados en serie, se introduce una señal alterna de frecuencia conocida, en este caso una señal de frecuencia igual a 5KHz. Ésta satura el núcleo de una manera determinada y conocida, si existe un campo magnético de fondo, por ejemplo, se produce una señal en la bobina de recepción que contiene además otras componentes frecuenciales que son sensibles a la intensidad del campo, el segundo armónico es directamente proporcional al campo. La señal de la bobina de recepción es conducida por un circuito de medición de 3 canales que a través del tratamiento de la señal se obtiene el segundo armónico que es proporcional al campo magnético y de esta manera poder proporcionar en la salida una señal directamente proporcional al campo magnético medido con una sensibilidad determinada. Este proceso, descrito de una manera muy simple, se ilustra a través del diagrama funcional de la Imagen 15. A la salida, se introduce un filtro RC para eliminar el rizado y las componentes de alta frecuencia acopladas en las señales de salida.

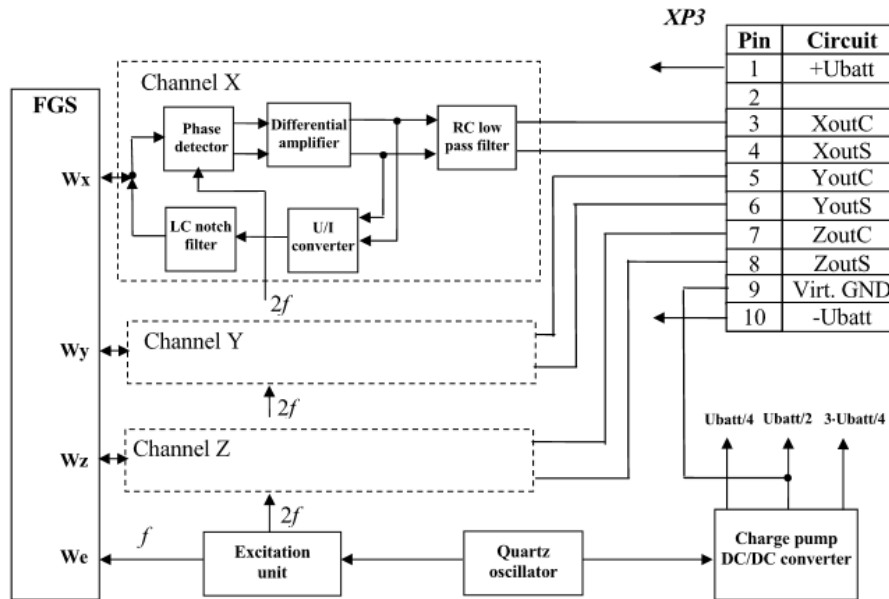


Imagen 15 – Diagrama funcional del magnetómetro LEMI-031.

El fabricante proporciona las siguientes características técnicas:

| | |
|--|-------------------------|
| Número de canales de medida | 3 |
| Rango de medida | ± 53.000 nT |
| Sensibilidad en salida simple, S | 30 $\mu\text{V/nT}$ |
| Sensibilidad en salida diferencial, Sd | 60 $\mu\text{V/nT}$ |
| Banda de frecuencia de la señal de entrada | DC - 10Hz |
| Alimentación | (3,3-3,7) V, Max = 4,2V |
| Consumo | $\leq 10\text{mW}$ |
| Rango de temperatura de funcionamiento | 0 a 70°C |
| Dimensiones del sensor | 62x38x38 mm |
| Dimensiones de la caja electrónica | D=84mm, H=22mm |
| Masa del sensor | $\leq 100\text{g}$ |
| Masa de la caja electrónica | $\leq 100\text{g}$ |

Tabla 1 – Tabla de características técnicas del magnetómetro LEMI-031 proporcionadas por el fabricante.

El sensor tiene un consumo muy bajo, menos de 10 mW, especialmente diseñado para su alimentación mediante baterías. La naturaleza de la señal que proporciona es eléctrica y analógica por lo que es necesario digitalizarla con un convertidor analógico-digital de gran resolución para posteriormente aplicarle filtros digitales y ser almacenada. La opción de una salida de la señal diferencial facilita su conexión con un ADC (Analog to Digital Converter).

4.1.2 Convertidor A/D ObsDAQ 5.6

Para realizar la conversión de la señal analógica proporcionada por el sensor a una señal digital que pueda ser tratada, almacenada y visualizada se ha utilizado un módulo de conversión analógico - digital (ADC) "ObsDAQ" (versión 5.6) de 24 bits especialmente diseñado para la conversión de señales de magnetómetros con salida analógica, desarrollado por "MinGeo Environmental Geophysics".



Imagen 16 – Aspecto del módulo de adquisición de datos ObsDAQ 5.6 de MinGeo.

ObsDAQ es un sistema de adquisición de datos con un convertidor ADC de bajo consumo, basado en un convertidor delta-sigma que permite la codificación de la señal utilizando un único bit que indica si el valor de la amplitud actual es mayor o menor que la anterior para asignar así los 24 bits de la codificación correspondiente (el esquema de modulación de un convertidor delta sigma se muestra en la Imagen 17). Es especialmente eficaz reduciendo el ruido con técnicas de sobre muestreo seguidas de un filtrado digital gracias a que la distribución espectral del ruido que presenta no es plana como se muestra en la Imagen 18.

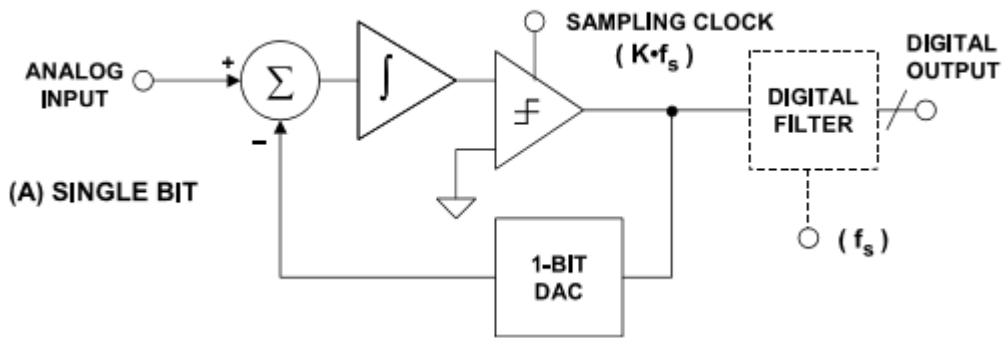


Imagen 17 – Esquema modular de un convertidor delta -sigma genérico.

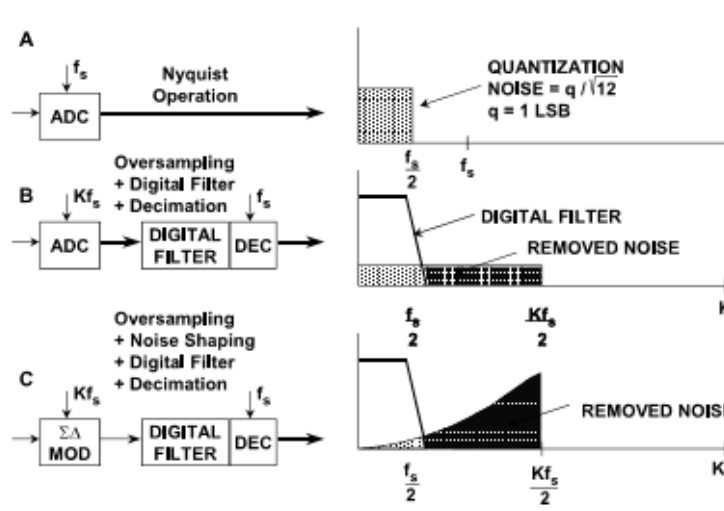


Imagen 18 – Espectro del ruido de cuantificación de un convertidor delta-sigma y su eliminación mediante un filtro analógico.

Dispone de 3 canales con conversión simultánea de entrada mini USB de 24 bits de gran resolución para la conversión de la señal de la variación de cada una de las componentes proporcionadas por el magnetómetro fluxgate y, adicionalmente, dispone de otra entrada mini USB con 5 canales de conversión multiplexados para por ejemplo monitorear la temperatura de la sala y del sensor. Cuenta con entrada de señal de antena GPS para la sincronización de salida y guardado de las muestras y de transmisión de los datos con precisiones mejores que 0,1 ms. También dispone de modos de calibración manual y automática para obtener una ganancia y un offset de calibración para cada uno de los canales de 24 bits.

El módulo ObsDAQ presenta las siguientes especificaciones técnicas:

| | |
|---|---|
| 3 canales | 24 bits |
| 5 canales | 15 bits |
| Rango de entrada | $\pm 10V, \pm 5V, \pm 2,5V$ |
| Impedancia de entrada | 170Kohm |
| Alimentación típica | 12Vdc |
| Alimentación mínima | 3,1Vdc experimental |
| Consumo a 12Vdc | 90mA, max=200mA |
| Filtros paso bajo optimizados | |
| Entrada de disparo (GPS-PPS) | 3,3V nivel alto, T _{min} = 2us |
| Puertos de entrada aislados ópticamente | |
| Puerto combinado | |
| Modos de muestreo | Muestreo continuado |
| | Muestreo por señal de disparo |
| | Una muestra por petición |
| Frecuencia de muestreo | Min=19,2Hz, max=640Hz; función del modo |
| Memoria EEPROM | 64 bytes |
| Comunicaciones | RS-485 |
| | USB |
| | TRS Mini Jack (3,5 mm) |
| | Puerto combinado |
| | |
| Protocolos de comunicación | Comandos y respuestas: ASCII |
| | Almacenamiento: ASCII y binario |

Tabla 2 – Especificaciones técnicas del módulo ObsDAQ proporcionadas por el fabricante.

La respuesta en frecuencia del filtro digital paso bajo incorporado es un producto de dos etapas: un filtro sinc de quinto orden fijo y un filtro sinc de primer orden programable. La respuesta general viene dada por la siguiente ecuación:

$$|H(f)| = \left| \frac{\sin\left(\frac{256\pi \cdot f}{f_{CLK}}\right)}{64 \cdot \sin\left(\frac{4\pi \cdot f}{f_{CLK}}\right)} \right|^5 \cdot \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot f}{d_{rate}}\right)}{\frac{f_{CLK}}{256 \cdot d_{rate}} \cdot \sin\left(\frac{256\pi \cdot f}{f_{CLK}}\right)} \right|$$

donde f es la frecuencia, f_{CLK} es la frecuencia del cristal de cuarzo (9,8304 MHz por defecto) a bordo del ObsDAQ y la tasa o velocidad de salida de datos programada. En la respuesta del filtro, calculada a modo de ejemplo (ver Imagen 19), se pueden observar ceros a la frecuencia de salida de datos y sus múltiplos, una respuesta en respuesta típica de un filtro digital sinc.

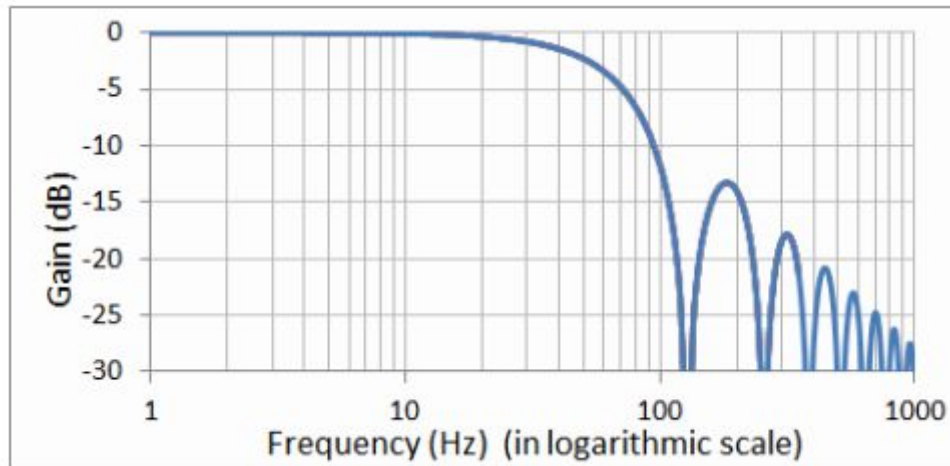


Imagen 19 - Respuesta en frecuencia del ObsDAQ en caso de $F_{clk} = 9.8304$ MHz y $drate = 128$ SPS, en el rango de 1 Hz a 1KHz. El ancho de banda de -3 dB para esta configuración es 57 Hz.

este módulo de adquisición está especialmente diseñado para su comunicación con software de control como MAGLIN a través de puertos de comunicación serie a través del estándar ASCII.

4.1.3 Computadora MAGREC-4B

Magrec-4B es una computadora pequeña de recolección de datos basada en una computadora industrial Intel Atom dual-core con el sistema operativo Linux, de baja potencia especialmente diseñada para la adquisición de datos geomagnéticos sin supervisión. Cuenta con las siguientes características:

- Procesador Intel Atom N2600 dual-core 1,60GHz, Intel NM10 Express chipset con 2 GB DDR3 de memoria RAM
- Unidad SSD mSATA tipo SLC de grado industrial de 4 GB o más, que contiene el sistema operativo Linux
- Ethernet 10/100/1000 Mbps, 4x USB 2.0, 1x puerto serie RS-232, 2x puertos serie RS 232 / RS-422 / RS-485 (seleccionados en BIOS) con control de flujo automático y aislamiento para el puerto RS-485.
- Módulo PalmAcq incorporado con un módulo GPS para sincronización horaria y activación basada en PPS, y puertos esclavos periféricos 1 × RS-232 y 1 × RS-485 adicionales.



Imagen 20 – Aspecto de la computadora MAGREC-4B

El computador lleva preinstalada en una memoria inter SSD flash disk el sistema MagLinux, un sistema operativo configurado para adquisición de datos basado en el sistema operativo libre Debian que necesita muy pocos requisitos de cómputo y almacenamiento. Este sistema se utiliza para modificar algunas características del PC optimizándolo así para la adquisición de datos. También lleva preinstalado el software MAGLIN, un software de pocos requisitos para el almacenamiento y monitoreo de datos provenientes de sensores geomagnéticos donde podemos visualizar la información proporcionada por el convertor A/D proveniente del magnetómetro en diferentes formatos y con diferentes resoluciones temporales.

Podremos visualizar en tiempo real los datos de la variación de las tres componentes del campo magnético captadas por el sensor en nT. A través de este software también podemos monitorear los voltajes de alimentación y la temperatura de los instrumentos que están conectados si estos cuentan con esta información. También proporciona un panel de reporte de errores e información acerca del funcionamiento del sistema y del estado de los aparatos conectados.

A través de MAGLIN podemos gobernar y configurar el sistema de adquisición de datos (especialmente diseñado para convertidores A/D ObsDAQ) y realizar el registro del tiempo utilizando el reloj del sistema o la antena GPS PPS del sistema palmAcq para una mayor precisión. Conjuntamente, el sistema almacena y proporciona los datos en diferentes formatos: ASCII, CSV, binario comprimido y en IAGA-2002. Se utiliza este último ya que es el último estándar para almacenamiento de datos proporcionado por IAGA.

Los datos pueden ser descargados en el formato seleccionado en la configuración a través de USB o pueden ser enviados a través de ftp, sftp incluso se puede instalar un programa de transferencia de datos por email para que lo envíe a través de correo electrónico. El sistema, asimismo, cuenta con la posibilidad de conexión por VTC para el control remoto del PC a través de un servidor.

MAGREC-4B computer
 with **LINUX, MAGLIN** and built-in **PalmAcq**

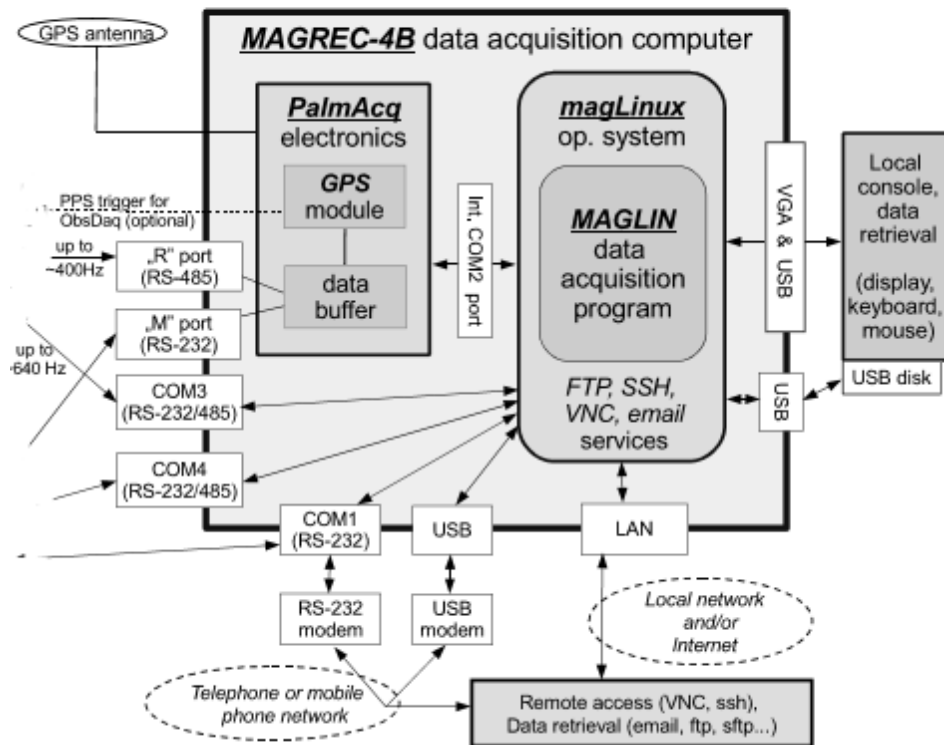


Imagen 21 – Esquema modular y de conexiones del MAGREC-4B.

4.2 Montaje y configuración del equipo

El montaje y la configuración del equipo se ha llevado a cabo en el laboratorio de espacio de la Facultad de Ciencias de la UAH, donde se ha montado el cableado, comprobado el correcto funcionamiento de los diferentes instrumentos y su correcto conexionado, comprobando que la comunicación entre ellos se realiza de una manera correcta y configurando el sistema MagLinux y el software MAGLIN para la correcta recepción y escalado de los datos del magnetómetro.

El siguiente diagrama de bloques muestra el sistema completo formado por el magnetómetro fluxgate, el convertido ADC ObsDAQ y el computador MAGREC-4B, así como el flujo y las vías de transmisión de la información:

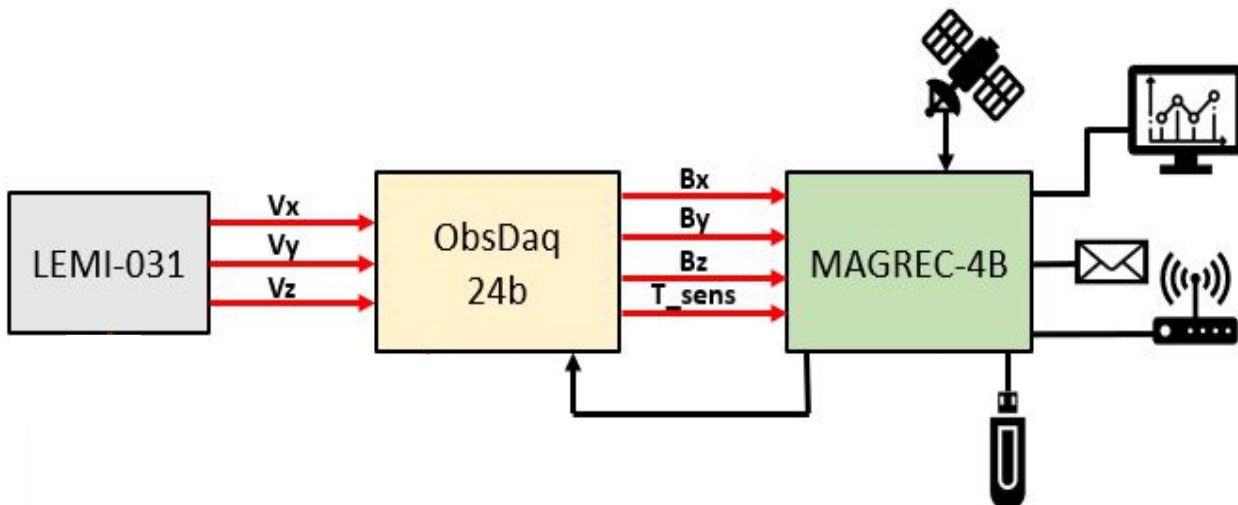


Imagen 22 – Diagrama de bloques del sistema

4.2.1 Conexión del LEMI-031 con el ObsDAQ

Para la comunicación del sensor con el sistema de adquisición de datos se ha utilizado un bus de comunicación de 12 hilos de cobre de 0,5 mm, de unos 10 metros de longitud con aislamiento anti-interferencias electromagnéticas, del que se han utilizado 9 cables: 6 para la medida diferencial de cada componente del campo (3 salidas Xout, Yout y Zout), dos para la alimentación del magnetómetro y uno para la masa común a las tres salidas diferenciales.

En el lado del magnetómetro las conexiones se realizan con una clema de 10 pines que se encuentra a la salida de la caja electrónica de la etapa de acondicionamiento, como se muestra en la Imagen 23, donde se conecta la alimentación positiva, U_{bat+} , y negativa, U_{bat-} , del magnetómetro, la masa, virt. GND y las salidas diferenciales de cada una de las 3 componentes. El esquema de conexión se muestra en la Imagen 25. Por error de interpretación de la nomenclatura del fabricante (C para referirse a la polaridad negativa y S a la positiva) se ha conectado la polaridad de las salidas diferenciales de cada componente al contrario de cómo debería ser, por lo que es necesario invertir los datos antes de visualizarlos y analizarlos. También es posible cambiar la posición de los cables en la clema para lo que sería necesario manipular el revestimiento aislante que protege la conexión con los pines de la clema.

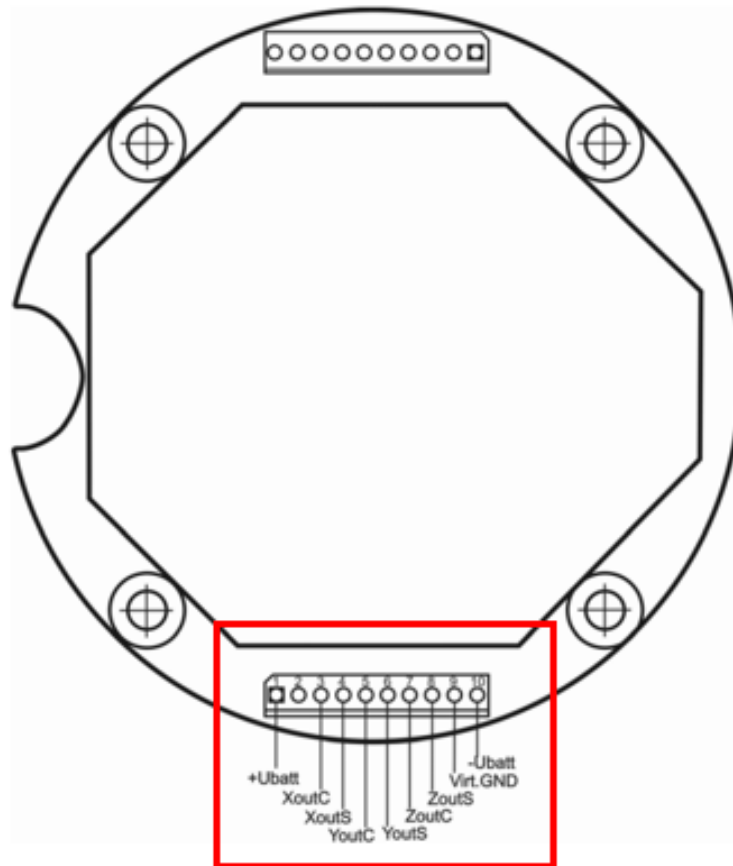


Imagen 23 - Esquema y pines de conexión de la caja electrónica del sensor LEMI-031

En el lado del ObsDAQ las entradas de cada uno de los canales de 24 bits donde se conectan las salidas del sensor son de tipo mini USB, donde se debe conectar Vin+, Vin- y masa como se muestra en la Imagen 24.



Imagen 24 - Entrada de los canales de los canales de 24b de ObsDAQ donde se conectan las salidas del magnetómetro

Para ello se han utilizado tres cables USB a mini-USB, uno para cada canal, quedándonos solo con el cabezal mini. Los cables USB llevan 4 cables, dos de datos, uno de alimentación y otro para la masa. Se deben utilizar 3 por cada canal: data+ (cable verde), data- (cable blanco) y masa (cable negro). Se conecta cada cable de datos con su correspondiente de la salida del magnetómetro y las tres masas, una de cada canal, con la masa de la salida del magnetómetro, en el lado de este último. El esquema de conexión se muestra en la siguiente imagen:

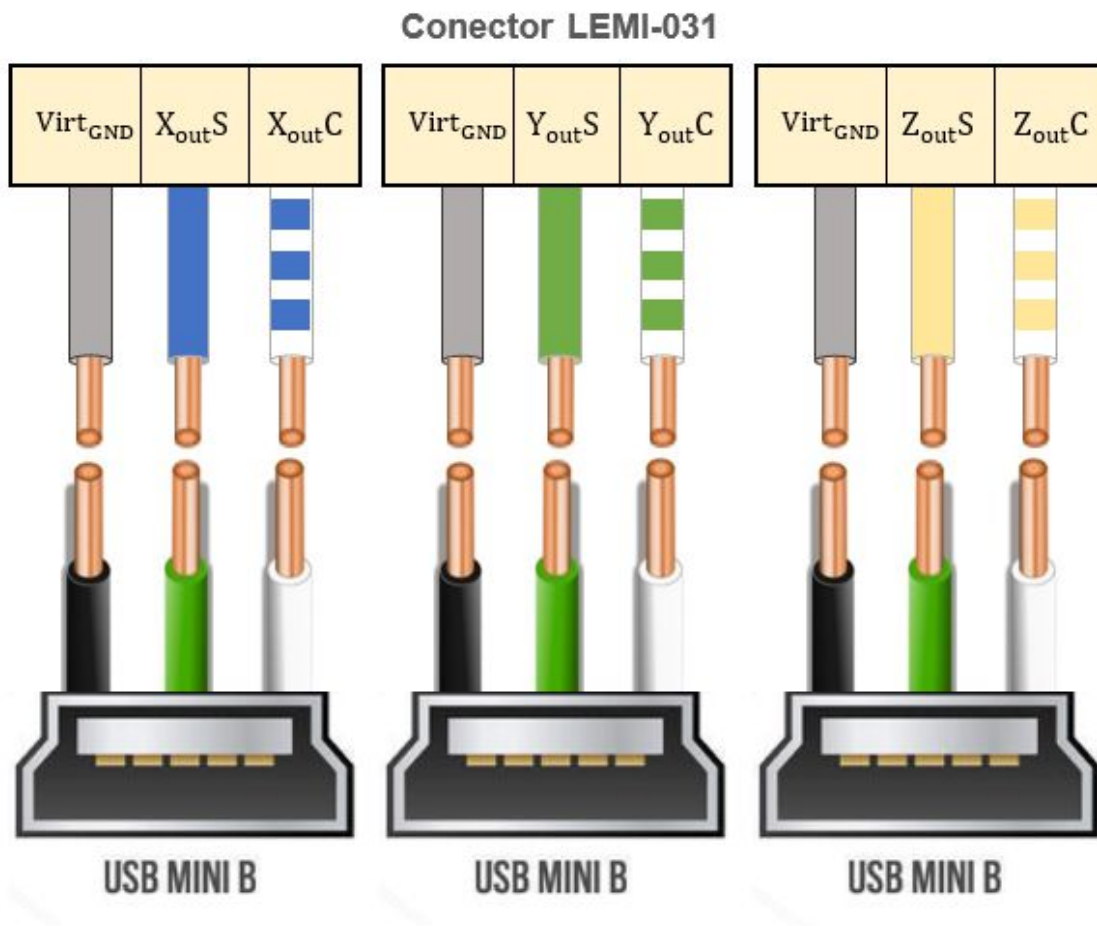


Imagen 25 - Esquema de conexión entre el módulo A/D ObsDaq y el magnetómetro LEMI-031

4.2.2 Conexión del ObsDAQ con MAGREC-4B

Existen diferentes posibilidades para la comunicación entre el conversor analógico digital y el PC MAGREC-4B, todas ellas por comunicación serie. Se han elegido los conectores recomendados por el fabricante, el puerto COM3, que se ha seleccionado en la BIOS de la máquina para funcionar con RS-485 con auto control del flujo de datos ya que no venía por defecto seleccionada. Ambas vías de comunicación se encuentran internamente aisladas.



Imagen 26 – Puerto RS485 del módulo ObsDaq



Imagen 27 – Puerto de conexión RS485 (COM 3) del MAGREC-4B

En el lado del ObsDAQ se utiliza un cabezal mini-Jack y en lado del PC el puerto COM3 usa un cabezal RS-485. Por lo que es necesario fabricar un cable con cabezales mini-jack y RS-485 machos uniendo cada uno de los cables correspondientes. Únicamente son necesarios los cables de datos, que en el RS-485 se corresponden con el pin 1 (Data -, cable marrón) y el pin 2 (Data +, cable rojo) del cabezal macho. En esta versión del ObsDAQ la conexión de la masa no es necesaria.

El esquema de conexión es el que se muestra a continuación:

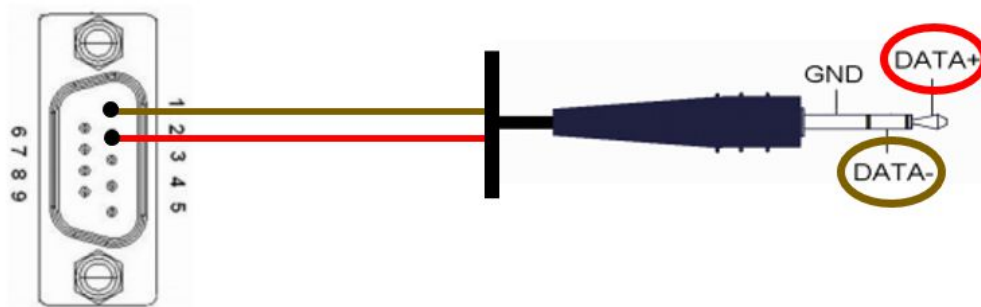


Imagen 28 – Esquema de conexión del MAGREC-4B (RS485) y el ObsDaq (mini-jack)

4.2.3 Configuración del software del sistema MAGREC-4B

A través de MAGREC-4B se puede configurar los propios parámetros del sistema (MagLinux), la configuración del software MAGLIN y otros componentes que este conectados al PC, como en este caso, el módulo ObsDaq. Clicando en el botón derecho en la pantalla principal, se despliega un panel con diferentes opciones, donde a través de “Edit sistem configuration” y “Edit MAGLIN configuration” podemos configurar las opciones básicas (la primera vez se debe ingresar la contraseña *magroot* el resto de las veces, al estar el modo sin contraseña por defecto, no se solicita). Para modificar otros parámetros es necesario acceder a al BIOS o modificando ciertas variables del código fuente del sistema (para información detallada ver el manual del fabricante del PC MAGREC-4B y el sistema MAGLIN en el USB de descarga de datos proporcionado por el fabricante). Para el desarrollo de este trabajo se ha establecido la siguiente configuración:

En la BIOS del sistema: se ha seleccionado el modo RS-485 en el puerto COM3 con control de flujo automático de la siguiente manera: entrar en la BIOS pulsando repetidamente la tecla <F2> -> en el menú *Advanced* -> *SCH3106 Second Super IO Configuration* -> submenú *Change serial port 3* -> seleccionar en *SIO2 COM3 Mode* el modo *RS-485* -> establecer *Enable* para *Auto Flow control*

En la ventana “Edit MAGLIN configuration”:

- Salida de datos en formato IAGA-2002
- Datos de la estación para el fichero IAGA.2002: Nombre, coordenadas, orientación del sensor, etc.
- Factores de escala para cada componente: se pide en nT/V, por lo que se ha introducido la inversa de la sensibilidad diferencial del sensor ($S_d=60\mu\text{V/nT}$) en voltios.
- Se selecciona como conversor A/D el ObsDaq v5 y se configuran sus parámetros:
 - Conexión a puerto COM3.
 - Fondo de escala = $\pm 10\text{V}$ (modo optimo según el fabricante).
 - Frecuencia de conversión = 640Hz.
 - Modo de calibración = Automática con 5 ciclos. (ver sección 4.3.2).
 - Tipo de filtros para obtener datos de 1H = Gaussian standard.

4.3 Instalación en ubicación de prueba y análisis de errores

Una vez que el sistema se ha cableado y se ha comprobado su funcionamiento en el laboratorio, éste se traslada buscando una ubicación más conveniente para poder analizar los datos obtenidos por el magnetómetro y determinar la idoneidad o no del entorno del campus externo de la Universidad de Alcalá para el registro de datos del campo geomagnético. El sensor tiene que ser ubicado en el exterior, a cierta distancia del sistema de adquisición y del PC, y se pueda determinar si esta localización es válida para la obtención de datos de variación del campo geomagnético con suficiente precisión para su uso en estudios o aplicaciones de Meteorología Espacial.

4.3.1 Ubicación e instalación

El sistema se traslada al Real Jardín Botánico Juan Carlos I, situado dentro del campus externo de la universidad de Alcalá, donde se dispone de un extenso terreno. Por la necesidad de disponer de acceso a la red eléctrica para alimentar los equipos, se ha instalado en una caseta utilizada por el personal del parque, situada en el límite Norte del jardín botánico.

El sistema de adquisición ObsDAQ y el PC MAGREC-4B se sitúan dentro de la caseta, donde la temperatura se mantiene más o menos estable a lo largo del día. Se conectan al PC un ratón, un teclado, y un monitor para facilitar su manejo. Sendos equipos se alimentan mediante transformadores a través de la red eléctrica convencional de la que dispone la caseta. El magnetómetro se sitúa en el exterior, alejado del resto del equipo y ciertos aparatos eléctricos que se encuentran dentro de la caseta, alimentado mediante una fuente de alimentación de pruebas de laboratorio situada en el interior, a través del cable de 10 m que lo conecta con el convertidor A/D.

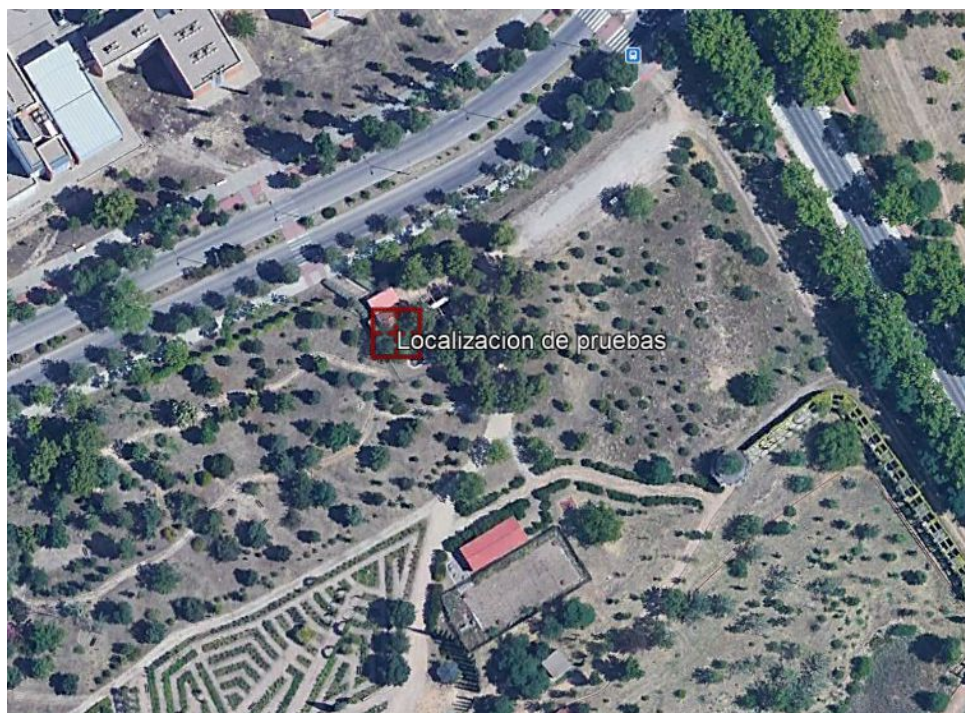


Imagen 29 – Vista aérea de la ubicación de pruebas en el Real Jardín Botánico Juan Carlos I

Latitud: 40° 30' 27.00" N

Longitud: 3° 20' 37.47 O

El magnetómetro se instala en el interior de una caja de corcho para tratar de aislarlo térmicamente y reducir en la medida de lo posible la variación de temperatura en su interior. Dentro de la caja de corcho se ha construido una base móvil de madera, donde se ha fijado el magnetómetro. Esta base facilita rotar para orientar el sensor en las tres dimensiones espaciales, permite rotar sobre el plano horizontal facilitando la orientación hacia el norte magnético, independientemente de la orientación de la caja contenedora y también rotando sobre el eje X y sobre el eje Y para nivelarlo correctamente respecto al plano horizontal con la ayuda de un nivel de burbuja, ya que no se cuenta con una base totalmente estable como sería necesario en una ubicación final (las condiciones ideales para la instalación del sistema se tratan en el capítulo 6). Con ayuda de las marcas en el magnetómetro LEMI-031 se orienta el sensor con el eje X apuntando a Norte y el Eje Y, al Este.

Como la caja se encuentra a la intemperie y no es totalmente impermeable, esta se ha forrado con plástico para sellarla e impedir que el agua alcance el magnetómetro o la electrónica pudiendo destruirlo y dificultando la entrada de insectos que puedan romper el cableado.



Imagen 30 – A la izquierda quipo en el interior de la caseta: MAGREC-4B, Módulo ObsDag y fuentes de alimentación. A la derecha caja de corcho donde se sitúa el sensor y la base móvil.

Durante las pruebas la caja contenedora se ha situado en dos disposiciones diferentes, una a nivel del suelo y otra elevada a 1,5 m:

Situación 1: Debido a que el exterior de la caseta es de Tierra, la caja contenedora se situó sobre una trampilla de plástico a una distancia de 7 metros de la caseta, para conseguir más estabilidad en el tiempo de la orientación en el espacio del magnetómetro ya que, el suelo de Tierra, al mojarse con la climatología sufre modificaciones en mayor o menor medida que se

transmitirían al sensor, modificando, principalmente, su alineación con el plano horizontal. El sensor se cubre con una tapa de plástico que lo protege del Sol directo.



Imagen 31 -Caja contenedora del sensor en la situación 1

Situación 2: para evitar posibles efectos inductivos de corrientes sobre conductos de agua que, con una alta probabilidad, pasan por debajo del suelo en el exterior de la caseta, y provoquen perturbaciones magnéticas en el sensor, la caja pasa a situarse a una altura de 1,5 metros sobre una mesa de madera que se fija en un árbol mediante cuerdas para evitar su caída a causa del viento y se protege del Sol mediante una saca de plástico para, de esta manera, aumentar la estabilidad térmica del magnetómetro. Esta situación cuenta con el inconveniente de la inestabilidad del terreno ante lluvias intensas.



Imagen 32 -Caja contenedora del sensor en la situación 2

Ambas disposiciones del sensor tienen sus ventajas y sus inconvenientes referentes a efectos que pueden producir ruidos en la medida, que se tratarán en detalle en el apartado 4.4.3.

4.3.2 Errores del instrumental

El equipo utilizado está especialmente diseñado para la toma de datos geomagnéticos, no obstante, todos los circuitos electrónicos tienen unos errores asociados que afectarán a los datos de salida, aunque se trate de minimizarlos en sus diseños y en los procesos de fabricación. Por ellos se ha realizado un análisis de los errores que proporciona los fabricantes de los instrumentos en sus guías y hojas de características, con la intención de dar sus aportaciones máximas, de offset y de sensibilidad, en el resultado de la medida proporcionada por el magnetómetro.

Magnetómetro LEMI-031

| | |
|--|--------------------------------------|
| Coeficiente de error de transformación | $\leq 5 \%$ |
| Error de ortogonalidad | $\leq 2 \%$ |
| Deriva con la temperatura | $\leq 1,5 \text{ nT/}^\circ\text{C}$ |
| Nivel de ruido a 1Hz | $25 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ |

Tabla 3 – Errores asociados al magnetómetro LEMI-031 proporcionados por el fabricante.

- Coeficiente de error de transformación

Representa el error en la equivalencia de la magnitud medida y la señal proporcionada por el sensor, es decir, entre la tensión medida en los bobinados del magnetómetro y el valor de campo que lo genera. Al ser directamente proporcional a la variable que se está midiendo, es un error de sensibilidad.

Con un coeficiente $\leq 5 \%$ el error máximo debido a este coeficiente será de:

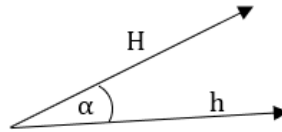
$$E_t = \pm 50.000 \text{ ppm}$$

Debido a que el objetivo es registrar la variación del campo y éstas son bastante menores que las magnitudes que mide el sensor, este efecto se puede despreciar a la hora de analizar la variación de las componentes de vector de campo magnético.

- Error de ortogonalidad

Modela el error en la disposición de los devanados de detección de cada uno de los tres ejes, que no son perfectamente perpendiculares entre sí. También representa un error de sensibilidad en el sistema. Para dar una magnitud de este error se realiza el siguiente análisis simplificado: suponiendo que el sensor está perfectamente alineado con el Este geomagnético (el eje Y del sensor colocado paralelo al eje Y geomagnético para la localización del sensor) y sin tener en cuenta ningún tipo de variación externa del campo geomagnético, el eje X mediría

el valor de H en el devanado Bx (puesto que no existiría aportación en el eje Y), pero si introducimos el error de ortogonalidad, obtendríamos un valor, h, diferente del ideal:



Luego si llamamos H al valor ideal y h al valor real teniendo en cuenta el error de ortogonalidad solo en la componente X del sensor, el error vendría dado por la siguiente expresión

$$\Delta B_{Hh} = H - (H \cdot \cos \alpha)$$

El fabricante ofrece un valor de α máximo de 2°. Por tanto:

$$\Delta B_{Hh} = 0.000609 H = 609 \text{ ppm}$$

Para un valor típico de H en la Península Ibérica de 26.000 nT, se registraría una variación debida al error de ortogonalidad de los ejes de:

$$\Delta B_{Hh} = 15,84 \text{ nT}$$

- Deriva con la temperatura

Error de offset que cuantifica la variación de la magnitud que se mide en función de la variación de temperatura. Éste es de 1,5 nT/°C, valor importante a tener en cuenta que implica el uso de buenos materiales aislantes y/o el uso de un sistema de control térmico del sensor o de corrección de la medida. En la situación 1 se ha detectado la mayor variación de temperatura diaria, unos 15°C, por lo que los efectos de la temperatura sobre los datos serán considerables:

$$\Delta B_{\Delta T} = CT \cdot \Delta T = 1,5 \cdot 15 = \pm 22,5 \text{ nT}$$

Donde CT es el coeficiente de temperatura del magnetómetro y ΔT la variación de temperatura.

- Nivel de ruido a 1 Hz

El fabricante proporciona una expresión del ruido en unidades de la medida en función de la frecuencia, del ancho de banda del sensor. A falta de información de la forma del ruido en este magnetómetro, se supone una distribución del ruido plana y como ancho de banda 15 Hz (en pequeña señal, ps):

El ruido, según el fabricante, sigue la siguiente expresión $R_t = 25 \frac{\text{pT}}{\sqrt{BW_{eq}}}$

El ancho de banda equivalente para una distribución de ruido plano $BW_{eq} = BW_{ps} \cdot \frac{\pi}{2}$

Luego de esta manera, el ruido total será $R_t = 25 \frac{\text{pT}}{\sqrt{BW_{eq}}} \cdot \sqrt{BW_{ps} \cdot \frac{\pi}{2}} = \pm 121,35 \text{ pT}$

Esto representa una incertidumbre que se representa de manera estadística como una variable aleatoria, σ . Se puede expresar la incertidumbre expandida, con un factor de cobertura de 2 para un nivel de confianza del 95%:

$$I_{Rt}(95\%) = Rt \cdot 2,56 = \pm 0,31 nT$$

Módulo de conversión A/D ObsDAQ

| | |
|--|--|
| No linealidad integral, NLI | $\pm 0,0015$ % del fondo de escala, FS |
| Deriva de cero con la temperatura | $\sim 3-12 \mu V/^{\circ}C$ |
| Deriva de la ganancia con la temperatura | $\pm 2 ppm/^{\circ}C$ |

Tabla 4 – Errores asociados al módulo ObsDAQ proporcionados por el fabricante.

- No linealidad integral

Cuantifica de manera general diferentes errores asociados a la conversión A/D. para el fondo de escala utilizado, $\pm 10 V$, se tiene:

$$E_{NLI_max} = \frac{NLI \cdot FS}{Sd} = \frac{0.0015/100 \cdot 10 V}{60 \cdot 10^{-6} \frac{V}{nT}} = \pm 2,5 nT$$

Donde NLI es la no linealidad integral, FS el fondo de escala y Sd la sensibilidad diferencial del sistema.

Deriva de cero con la temperatura

Este parámetro representa el offset introducido por el conversor A/D a consecuencia de variaciones de temperatura, suponiendo una variación de la temperatura de $5^{\circ}C$ en el interior de la caseta se tiene:

$$E_{offset_max} = 12 \mu V/^{\circ}C \cdot \Delta T \cdot Sd^{-1} = 12 \mu V/^{\circ}C \cdot 5^{\circ}C \cdot 60^{-1} nT/\mu V = \pm 1 nT$$

Deriva de la ganancia con la temperatura

Representa la variación de la ganancia con la temperatura, para una variación de temperatura de $5^{\circ}C$, se tendría un error máximo de:

$$E_{s_max} = 2 ppm/^{\circ}C \cdot \Delta T = 2 ppm/^{\circ}C \cdot 5^{\circ}C = \pm 10 ppm$$

El módulo ObsDAQ cuenta con sistemas calibración de offset y ganancia, que se puede realizar de manera automático o manual, para compensar estas derivas con la temperatura. Como se

ha comentado en el apartado 4.2.3, a través del MAGREC-4B se ha configurado para la calibración automática cada vez que se encienda el dispositivo.

Error de cuantificación

El error de cuantificación se define como:

$$Eq = \frac{q}{2} = \frac{FS/2^n}{2} = \frac{10V/2^{24}}{2} = \downarrow\downarrow$$

Donde q es el escalón de cuantificación y FS el fondo de escala. Debido a la gran resolución del convertidor, 24 bits, este error es despreciable.

Resumen de errores

En la siguiente tabla se muestran todos los errores, de sensibilidad y de offset en la medida asociados al instrumental.

| | Sensibilidad | Offset |
|-----------------|---|--|
| LEMI-031 | $E_t = \pm 50.000 \text{ ppm}$ $\Delta B_{Hh} = \pm 609 \text{ ppm}$ | $I_{Rt} (95\%) = \pm 0,31 \text{ nT}$ $\Delta B_{\Delta T} = \pm 1,5 \cdot \Delta T \text{ nT}$ |
| ObsDaq | $E_{s_max} = \pm 10 \text{ ppm}$ | $E_{offset_max} = \pm 1 \text{ nT}$ $E_{NLI_max} = \pm 2,5 \text{ nT}$ |

Tabla 5 – Errores máximos de sensibilidad y de offset en la medida debidos al sensor LEMI-031 y el módulo ObsDAQ

4.3.3 Errores y Ruido externo

El principal problema para la obtención de datos de la variación del campo geomagnético de calidad suficiente con fines de meteorología espacial, u otros fines con mayores requisitos es el entorno electromagnético de origen no natural de la localización de la estación o el observatorio, que pueden mezclarse con la variación natural del campo magnético terrestre captada por los sensores, invalidándolos, ocultando o falseando dicha variación natural que se manifiesta en los datos recabados en forma de ruido. Este es un problema al que se enfrentan en numerosos observatorios en todo el mundo incluso provocando, en algunos casos, su traslado.

La gran mayoría de las causas de ruido en grabaciones geomagnéticas tienen su origen en la actividad humana y está directamente relacionado con el avance de la tecnología, como el crecimiento de los núcleos urbanos o el progreso de la industria. Las redes y estaciones de suministro eléctrico de alta tensión o medios de transporte electrificados como las vías

férreas son las dos principales causas de contaminación de datos geomagnéticos, que, ocupando grandes extensiones de terreno en todo el mundo, pueden afectar a docenas de kilómetros del lugar donde se encuentran los sensores. Otras fuentes de contaminación son las carreteras, la maquinaria pesada, objetos metálicos conductores como vallas, aparatos tecnológicos de uso cotidiano, o las propias personas andando o en bicicleta a algunos metros del lugar de medición. Es evidente el efecto de algunos de estos factores en los datos tomados en la localización donde se han realizado las pruebas (ver apartado 4.3.1), en los meses de junio, julio y agosto de 2019 como se puede ver en la Imagen 33, donde se aprecia ruido en todas las componentes, especialmente en la componente vertical.

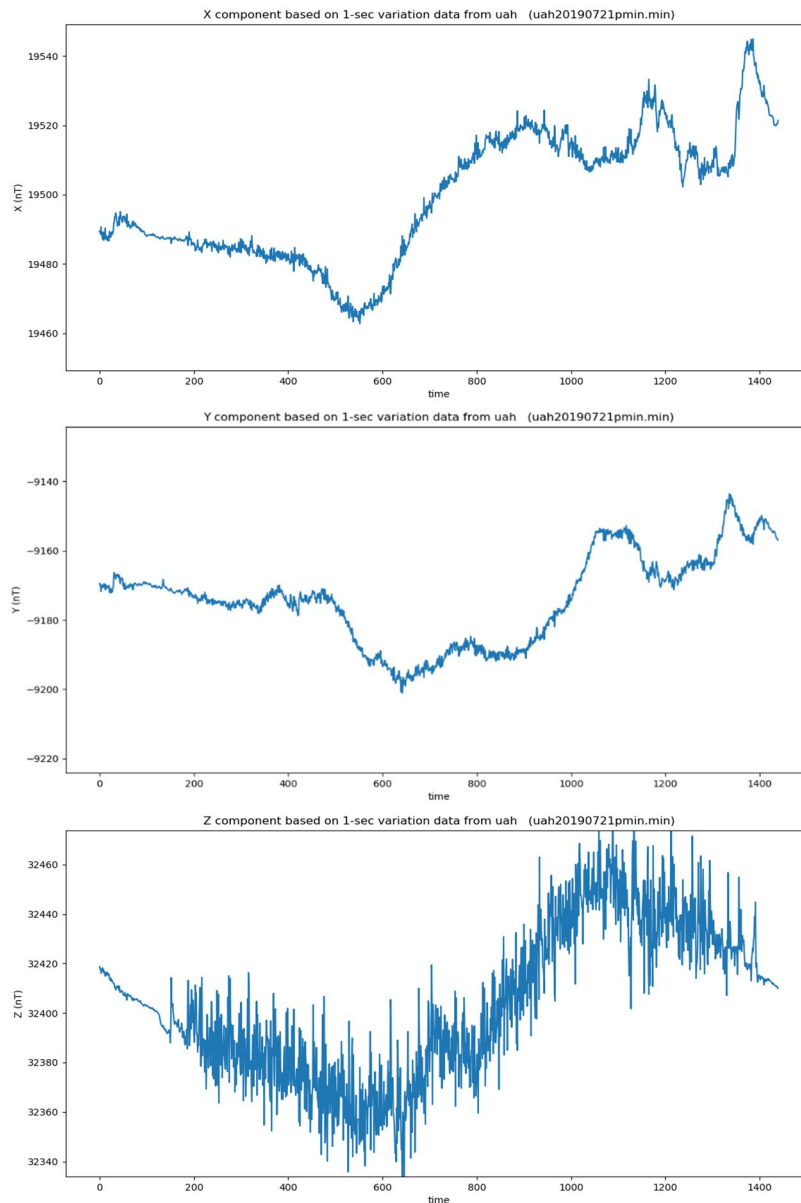


Imagen 33 – Ejemplo de los datos obtenidos en la ubicación de pruebas donde se aprecia ruido en las tres componentes, especialmente en la vertical.

En esta sección se realiza un estudio del ruido presente en las mediciones, tratando de determinar su origen y exponiendo algunos filtros, algoritmos o métodos para reducirlo o eliminarlo en la medida de lo posible, así como de errores debidos a la instalación del sensor, como la nivelación y la deriva de la temperatura. Se realizará una comparación de los datos obtenidos con los datos de la estación de San Pablo con el objetivo de determinar la precisión con la que el sensor capta la variación del campo en la ubicación de pruebas.

En la Imagen 34 se muestra un análisis del entorno de varios km alrededor de la ubicación de pruebas, donde se marcan posibles focos de perturbaciones. Se tratará por separado cada uno de ellos analizando su posible efecto en los datos recabados.

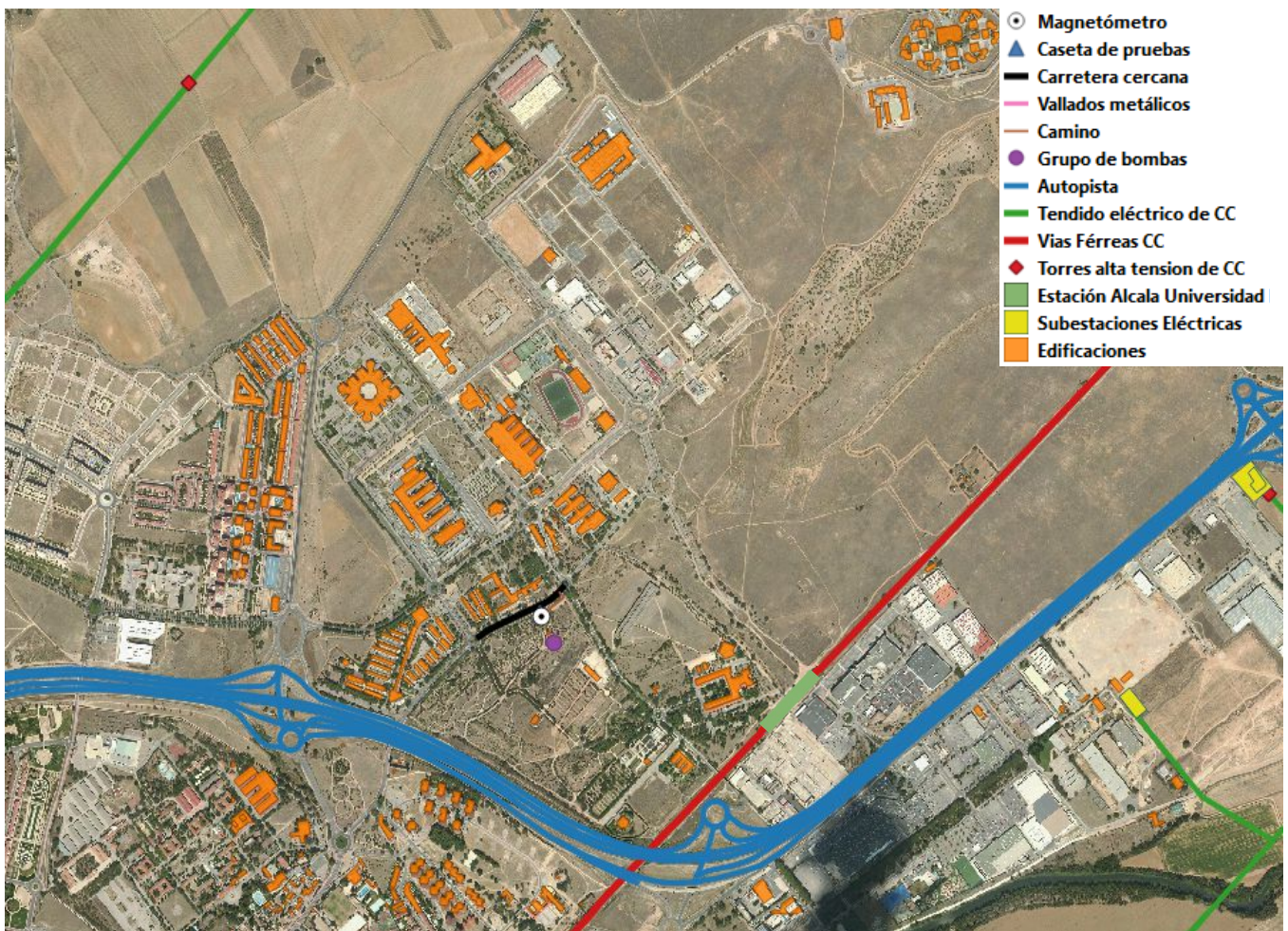


Imagen 34 – Vista aérea de la ubicación de pruebas y su entorno, donde se marcan con capas del IGN y símbolos (ver leyenda en esquina superior derecha de la imagen) las posibles fuentes de ruido

Vías ferroviarias electrificadas con CC.

Está comprobado que las vías férreas electrificadas provocan perturbaciones electromagnéticas considerables en observatorios situados a una distancia de 10 de km o más, debido no solo al campo magnético generado por las corrientes de tracción que circulan por las vías de alimentación (de cientos a 1000 A) que predominan a distancias cercanas a la estación, sino también por corrientes de fuga que derivan a Tierra a través de uno de los raíles, por donde se produce el camino de regreso de la corriente a la subestación que la proporciona o a través de puestas a Tierra de seguridad. Estas corrientes pueden propagarse a largas distancias, dependiendo, en parte, de la estructura geológica del suelo y de su conductividad (Georgescu et al., 2002; Risto Pirjola et al., 2007; F.J Lowes, 2009; Lucia Santarelli et al., 2013).

En la ubicación de pruebas, las vías de la estación de Alcalá de Henares Universidad pasan, en su punto más cercano, a una distancia de 680 metros. La distancia de seguridad recomendada para situar un observatorio o una estación geomagnética con respecto a una vía férrea es de algunos km y si es electrificada y además de corriente continua, decenas de kilómetros (Jankowski y Sucksdorff, IAGA, 1996).

La influencia del tren en los datos recabados en esta ubicación (ver Imagen 34) es prácticamente segura y afecta a las tres componentes debido a su cercanía, sobre todo en la componente vertical, especialmente afectada por las corrientes inducidas en el suelo. Existen algunos factores que podrían demostrar el efecto del tren en los datos y que se comentan a continuación. Como se puede ver en la Imagen 33, que muestra la variación de las componentes X, Y, Z a lo largo de un día con resolución de 1 minuto, se puede apreciar picos de ruido en las tres componentes, especialmente en la componente vertical donde son de gran amplitud (alrededor de 40 nT). Al comienzo de la gráfica (representado en tiempo universal, UT) se aprecia con claridad, sobre todo en la componente Z, un período de entre 2,5 y 3 horas en el que el nivel de ruido tiene valores mínimos, hecho que se repite en el tiempo a lo largo de los 3 meses en los que se han tomado datos, comenzando aproximadamente en el mismo momento cada día, alrededor de las 23h. Este hecho puede estar relacionado con periodos de inactividad, o de mantenimiento de las vías, que coinciden aproximadamente con el fin de los servicios de cercanías (alrededor de las 23.30h) pero que no se ha podido comprobar con información oficial de Adif, la empresa encargada de la gestión de las vías ferroviarias en España.

Este fenómeno ha sido observado en los observatorios de L'Aquila, en Italia, donde estudiando el ruido (cercano a 1 nT) presente en sus datos de variación, sobre todo en la componente vertical, detectan periodos sin ruido de unas 3 o 4h que relacionan con que el ferrocarril más cercano, a una distancia de 40km, no está en funcionamiento (Lucia Santarelli et al., 2013). Otro caso en el observatorio de Tangerang (TNG), en Indonesia, donde también analizaron el ruido presente en sus medidas de variación del campo y de la misma manera observan coincidencias en periodos de tiempo sin ruido y periodos de inactividad del tren que pasa por la ciudad, como se muestra en las gráficas de la

Imagen 35 (Mahmud Yasuf, 2011) donde se observan periodos de silencio que guardan grandes coincidencias con los datos recabados.

Es por esto, por la cercanía (680m) y por los antecedentes de otros observatorios con fenómenos de ruido análogos, que se puede afirmar la influencia del tren en las mediciones de variación de campo magnético registradas en la ubicación de pruebas y además de una manera predominante sobre el resto.

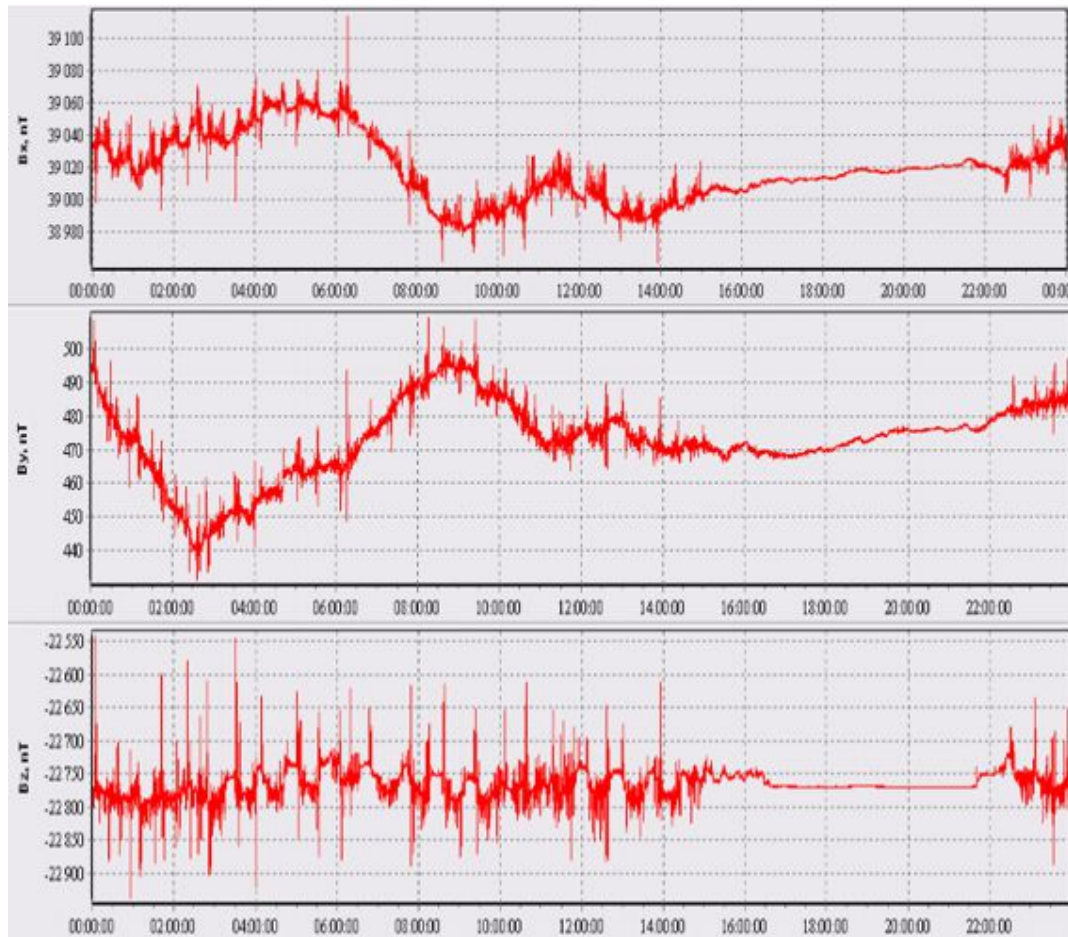


Imagen 35 – Ejemplo de ruido en las componentes X, Y y Z del observatorio de Tangerang donde se aprecian claramente periodos sin ruido en las tres componentes, coincidiendo con periodos de inactividad del transporte ferroviario

Existen métodos en el dominio de la frecuencia que se podrían usar para confirmar o descartar la influencia de las vías del tren electrificadas en los datos grabados en la ubicación de prueba o en otra ubicación, pero este tema no es objeto de estudio de este documento (Wiese 1962; Anne Neska et al., 2013).

Líneas aéreas de alta tensión CC

Las líneas aéreas de suministro eléctrico de alta tensión que son de corriente continua (CC) también pueden ser una fuente importante de ruido en estaciones geomagnéticas si pasan a distancias de incluso docenas de kilómetros (Jankowski y Sucksdorff, IAGA, 1996). Estas líneas pueden transportar corrientes del orden de 1000 Amperios con tensiones de docenas incluso centenares de kV. Los tendidos suelen ser de dos cables, uno para la ida y otro para el regreso de la corriente, una disposición favorable para el registro de datos geomagnéticos ya que el campo generado por un alambre se anula en gran medida con el generado por el otro al ser las corrientes de sentidos contrarios, pero también puede ser de un único cable donde el regreso se realiza por otra localización por lo que el campo generado no se anula. A parte de este efecto las líneas de alta tensión tienen tomas de Tierra al menos en cada apoyo, por lo que al igual que sucede con las vías férreas electrificadas, pueden inducir corrientes en el suelo que viajan a largas distancias.

En la localización de pruebas existe una línea de alta tensión que pasa a 1,75 km al Norte y una subestación de suministro a 1,9 km al Sureste de la ubicación, como se puede ver en la Imagen 34, por lo que la posibilidad de ser también fuente de ruido en los datos es bastante probable.

Las corrientes/potencias de las líneas pueden ser variables, incluso interrumpir su suministro dependiendo de la demanda a lo largo del tiempo. Si se tuviera conocimiento de las variaciones de potencia o corriente (si se supone la tensión constante, pueden suponerse proporcionales corriente y potencia) se podría comparar con la diferencia de los datos recabados en la localización de pruebas y los datos del mismo periodo del observatorio de referencia, de manera que se pueda extraer una relación entre las variaciones de la corriente que circula por las líneas y las diferencias en las variaciones registradas en las componentes del campo magnético. Como ejemplo se muestran los resultados de un estudio (ver Imagen 36 recuadro azul) sobre el efecto de una línea simple de alta tensión que pasa a 27 km del observatorio de Brofelde (BFE), en Dinamarca, donde se aprecia una clara relación entre la variación de corriente y la variación de las componentes Z y H, mostrando una relación de proporcionalidad entre la corriente/potencia por las líneas y la perturbación (Catherine Fox Maule et al., 2009).

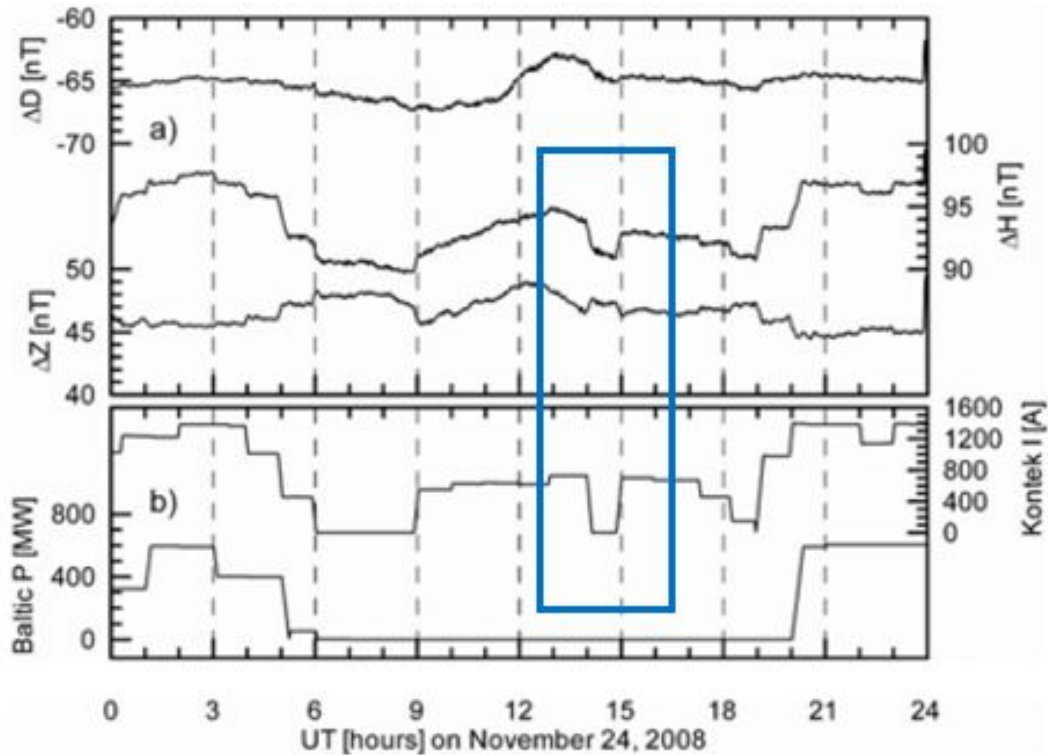


Imagen 36 – Resultados del estudio en la estación de Brofelde donde se demuestra la relación entre la corriente/potencia que circula por la línea y las diferencias en las mediciones respecto a un observatorio de referencia

En el panel a) de la imagen superior se muestran los datos de la diferencia entre las estaciones en las tres componentes H, D y Z. En el panel b) se observa la variación de la corriente y de la tensión en sendos cables. (Catherine Fox Maule et al., 2009)

Como se aprecia en las gráficas de arriba, la forma de las perturbaciones sigue patrones de formas cuadradas. Se han observado perturbaciones parecidas en los datos recabados que podrían estar relacionados con la línea de alta tensión que pasa cerca de la ubicación de pruebas. Un ejemplo se observa en la imagen del comienzo de la página siguiente, donde se puede ver una perturbación cuadrada en las componentes X e Y afectando de manera inversa a cada una de ellas, con amplitud de 30 y 35 nT en las componentes X e Y respectivamente. La componente Z no muestra una afección especial en ese periodo. De cualquier modo, al no conocer información sobre la actividad en las líneas de alta tensión no se pueden relacionar con exactitud con las distorsiones de este tipo.

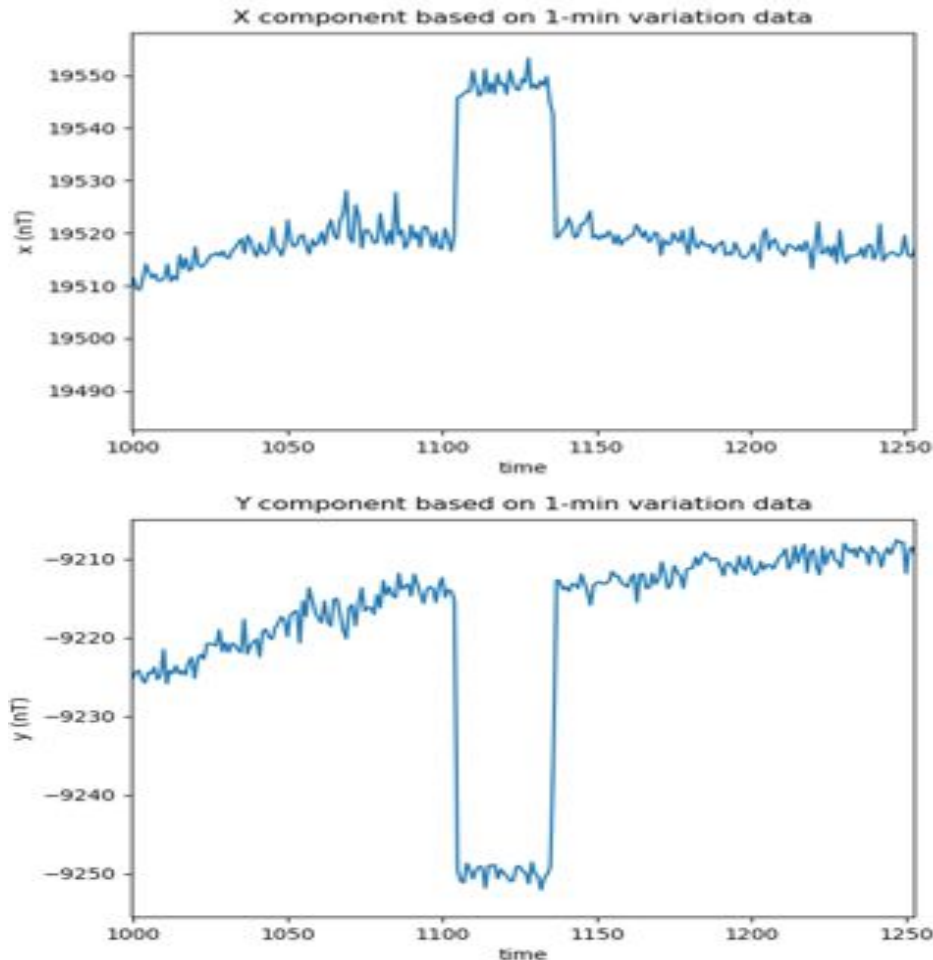


Imagen 37 – Ejemplo de ruido en las componentes X e Y obtenidas en la ubicación de pruebas en la situación 2. Se puede apreciar dos perturbaciones de forma cuadrada de gran intensidad

Estabilidad en el tiempo de la nivelación del sensor

El magnetómetro debe de estar correctamente orientado hacia el norte magnético y nivelado respecto al plano horizontal, y esta estabilidad debe mantenerse constante a largo plazo. En la ubicación de pruebas el magnetómetro se sitúa en dos situaciones diferentes (revisar capítulo 4.3.1), en la primera ubicación se sitúa en una trampilla de plástico que da acceso a una caja de llaves de paso de agua, donde se nivela con ayuda de la base instalada, buscando estabilidad ya que la trampilla parece más estable que el propio suelo de Tierra. En la situación segunda se coloca sobre una mesa de madera para tomar datos a una distancia del suelo y de los conductos de agua subterráneos. El suelo de Tierra presenta el problema de que, ante lluvias abundantes puede volverse menos compacto y modificar su forma, transmitiendo esta variación a la mesa y asimismo a la caja y al sensor, introduciendo cierto error en la orientación y sobre todo en la nivelación del sensor.

Este hecho puede generar un error en la medida de la variación del campo magnético en las tres componentes, que se ha tratado de corregir mediante revisiones esporádicas de la caja del sensor. No se puede tener constancia de en qué momentos se produce este desplazamiento del sensor para poder relacionarlos con cambios en los datos obtenidos.

Entorno del sensor

Ciertos objetos y materiales conductores, incluso el propio cuerpo humano, deben mantenerse a ciertas distancias de los sensores de campo magnético, en especial los variómetros, ya que, en función de su material, forma y orientación puede generar fenómenos de inducción magnética durante tormentas magnéticas perturbando las mediciones. También objetos de este tipo pueden generar perturbaciones si se desplazan a cierta velocidad dentro del campo geomagnético debido a corrientes inducidas en estos y que a su vez generan campos magnéticos. Estos efectos son difíciles de modelar y de corregir. Es posible determinar de manera experimental el efecto que un objeto produce en los datos acercándolo al sensor y desplazándolo lentamente, comprobando de manera visual la perturbación que este provoca ((Jankowski y Sucksdorff, IAGA, 1996))

En el caso de la ubicación de pruebas, existen vallados metálicos de 2 metros de altura situados a 3 y 10 metros del magnetómetro y un techado metálico cubre parte del porche lateral de la caseta a 10 metros de sensor, además, personal del jardín botánico se desplaza caminando y en ocasiones en vehículos en los alrededores del sensor, en principio, a distancia de al menos 10 metros (ver esquema en la imagen inferior). También circulan vehículos por una vía de doble sentido de dos carriles con tránsito medio de vehículos a 20 metros del magnetómetro y el edificio grande más cercano, una residencia universitaria de 3 plantas está a una distancia de 70 metros. Estas perturbaciones, no son las de mayor intensidad, pero deben tenerse presentes a la hora de analizar o valorar los resultados obtenidos.



Imagen 38 – Vista aérea del entorno cercano a la caseta en la ubicación de pruebas

Grupos de bombas y sistemas de riego

Se tiene constancia que en el jardín botánico cuentan con un grupo de bombeo, que seguramente sea utilizado para extraer agua de un pozo de sondeo y almacenar el agua en albercas que alimenten el sistema de riego que recorre gran parte de la extensión del jardín. Este sistema está situado muy cerca de la caseta donde está instalado el magnetómetro, únicamente 50 metros. Estos sistemas también pueden producir perturbaciones electromagnéticas y cuentan con tomas de Tierra de seguridad por donde pueden derivarse corrientes de fugas de docenas de Amperios.

No se tiene información de este sistema de bombeo, únicamente se ha observado que los conductos de salida del sistema son de unos 20 cm de diámetro por lo que las bombas deben de ser de una potencia considerable. Tampoco se cuenta con información de la frecuencia ni de los periodos de funcionamiento de las bombas para intentar relacionarlo con picos de ruido en las mediciones o fenómenos como el mostrado en la Imagen 37, que también podrían ser causados por el funcionamiento de los sistemas de bombeo.

Además, los conductos de riego subterráneos pueden generar perturbaciones ya que el agua, al ser conductor de la electricidad, puede producir fenómenos de inducción magnética. No se conoce con seguridad si pasan cerca de la ubicación del sensor.

Deriva de la temperatura

La variación de la temperatura a la que se encuentra el sensor es un factor clave en la precisión de la media, ya que, como se ha tratado en la sección 4.3.2, según datos del fabricante la deriva con la temperatura del sensor se establece en $1,5 \text{ nT}/^{\circ}\text{C}$ un valor que, aun siendo bueno, es un tanto elevado en comparación con otros magnetómetros utilizados en estaciones y observatorios con datos validados, por lo que el control de la temperatura es un factor clave para obtener datos de calidad. El control de la temperatura se trata con más detalle en el capítulo 6.

En la localización de pruebas únicamente se ha protegido el sensor con una caja de corcho y recubrimientos de plástico para evitar la entrada de agua en la situación 1 y adicionalmente con una saca de plástico que resguarda el sensor del contacto directo de los rayos de sol en la situación 2. En estas condiciones la temperatura del sensor se ha registrado en momentos puntuales durante el periodo de medida, registrándose variaciones de temperatura excesivas, de hasta 15°C en un único día y el sensor ha estado cerca de los regímenes de temperatura de operación proporcionados por el fabricante, estando cerca de 0°C en los meses de invierno.

En los días, o en los periodos, en los que la variación de la temperatura es alta y la variación en los datos, provocada por la deriva con la temperatura del sensor ($1,5 \text{ nT}/^{\circ}\text{C}$), por consiguiente, también es alta. Esto puede provocar, que, en días tranquilos en los que el rango de variación natural diaria del campo es bajo, predomine el efecto de la temperatura, enmascarando dicha variación natural. Y, por el contrario, los días en los que las variaciones diarias son más elevadas y más rápidas, por ejemplo, durante una tormenta, la variación

natural predomina sobre la provocada por la temperatura. En el apartado 4.5 de este capítulo se exponen algunos ejemplos de este efecto.

En base a lo expuesto anteriormente, el error producido por la deriva temporal del sensor LEMI-031 es factor importante en los datos obtenidos, asumido en la localización de pruebas, pero un elemento que se debe tener en cuenta en el futuro. Así se tendrá en cuenta a la hora de su instalación en una ubicación definitiva durante el desarrollo de la fase 3 del proyecto, abordado únicamente de manera teórica, en el capítulo 6.

4.3.4 Métodos de corrección

Existen métodos para tratar de reducir o eliminar el ruido de las mediciones geomagnéticas, de manera que es posible que un observatorio pueda convivir con una fuente de perturbaciones que afecte a sus datos o que una localización no sea descartada para instalar una estación o un observatorio por la existencia de una fuente de perturbaciones si no se dispone de un lugar libre de cualquier tipo de fuente de ruido. Existen diferentes casos de observatorios que conviven con ruidos en sus mediciones por diferentes motivos (principalmente vías ferroviarias electrificadas y redes eléctricas de corriente continua con menor antigüedad que el observatorio o la estación) y que proponen métodos para reducir su efecto. En esta sección se van a describir algunos de ellos y se propondrán otros que se podrían aplicar a las mediciones tomadas en la ubicación de pruebas. No se pretende en este trabajo analizar en profundidad la elección del mejor método o los mejores parámetros para realizar una corrección efectiva del ruido, únicamente se tiene la intención de presentar algunas ideas que pongan de manifiesto la posibilidad de realizar estos arreglos en los datos que presenten ruido.

Filtro de ventana móvil

El filtro de ventana móvil es uno de los filtros digitales de paso bajo más simples y más utilizados para reducir el ruido aleatorio en señales digitalizadas en el dominio del tiempo. Este filtro realiza el promediado de un número determinado de muestras (ancho de ventana) de la señal de entrada para determinar el valor correspondiente de salida.

Seleccionar un valor para el ancho de ventana utilizado no es trivial, sino que debe realizarse con cuidado, ya que un valor demasiado pequeño puede hacer que el ruido no se elimine de manera significativa y si es demasiado grande puede enmascarar variaciones naturales del campo geomagnético, eliminándose información relevante.

Este filtro ha sido aplicado a los datos recabados en la localización de prueba con diferentes anchos de ventana a modo de ejemplo y con el fin de demostrar de una manera simple que es posible reducir el ruido, sin entrar en detalle en el análisis de los resultados. Los resultados se muestran en el apartado 4.5 de este capítulo.

Algoritmo para detectar picos

Es posible desarrollar un algoritmo para eliminar variaciones de cierta amplitud en un corto periodo de tiempo con el fin de reducir el ruido en las medidas. El proceso consistiría en evaluar sobre los datos en bruto, antes de obtener los datos con resoluciones de segundo o minuto, las muestras obtenidas, detectando aquellas que difieran del valor de la muestra anterior cierto valor de tolerancia T , desechando un número de muestras, N , posteriores a la muestra en la que se ha detectado la variación. Posteriormente se obtendrían los valores promediados con la resolución deseada.

La elección del valor de tolerancia (T) y del número de muestras que se desechan (N) debe realizarse con precaución, ya que, se podrían eliminar variaciones rápidas del campo geomagnético o podrían no eliminarse perturbaciones prolongadas en el tiempo. Este algoritmo, con valores conservadores se podría utilizar para eliminar picos de gran amplitud bastante presentes en las mediciones sin riesgo de eliminar variaciones de naturales.

Análisis de mínimos cuadrados

Si se conoce la fuente de la perturbación y se puede demostrar la proporcionalidad entre la magnitud que la provoca y la variación en los datos registrados en alguna de las componentes del campo magnético medido, como sucede en el ejemplo comentado en el apartado anterior en la estación de Brofelde (BFE) con las líneas de alta tensión de CC (ver Imagen 36). Se puede aplicar un análisis de mínimos cuadrados para tratar de relacionar las variaciones originadas por la perturbación, obtenidas de hacer la diferencia entre los datos medidos y los datos de una estación de referencia, y la fuente de la perturbación (Catherine Fox Maule et al. 2009). De esta manera podemos obtener una relación entre la fuente de ruido y las variaciones que provoca. Esta variación se puede describir según la siguiente ecuación, dada, por ejemplo, para la componente X :

$$\Delta X = \alpha + \beta \cdot P + r$$

Donde ΔX es la variación sufrida, α representa un offset, β el factor de proporcionalidad con la magnitud que origina la perturbación, P , y r el término residual.

La no estacionalidad de los residuos en la ecuación anterior presenta un problema que se puede solventar aplicando técnicas de pre-blanqueo (Catherine Fox Maule et al. 2009), tomando la diferencia entre valores vecinos de los datos de partida y usar periodos “tranquilos” para realizar el análisis. De esta manera a partir de la ecuación anterior se obtiene:

$$\Delta X_i = \alpha + \beta \cdot P_i + r_i$$

$$\Delta X_{i+1} = \alpha + \beta \cdot P_{i+1} + r_{i+1}$$

y realizando la diferencia

$$(\Delta X_{i+1} - \Delta X_i) = +\beta \cdot (P_{i+1} - P_i) + (r_{i+1} - r_i)$$

Para poder realizar este análisis se debe de contar con el sistema bien calibrado con la estación de referencia para minimizar otras fuentes de error en las medidas y, además, la perturbación estudiada o al menos predominar ampliamente sobre las otras y se deben conocer datos precisos sobre la variación de la magnitud que la genera. Si existieran otras fuentes de ruido considerables, este método no sería apropiado ya que, en las variaciones obtenidas por comparación con la estación de referencia contendrían, además de las variaciones de la fuente con la que se realiza el análisis, variaciones de esas otras fuentes, invalidando los resultados y las posteriores correcciones.

Por tanto, este análisis no es aplicable en la estación de referencia si consideramos que aparte de la fuente de perturbación principal, el tren, está afectando otras fuentes como las tratadas en el apartado anterior. Además, se desconocen datos oficiales de las fuentes de ruido consideradas.

Análisis en el dominio de la frecuencia

Existen métodos en el dominio de la frecuencia para corregir los datos con ruido, independientemente del tipo y de la fuente que sea. Éstos se basan en conocer datos de una estación de referencia partiendo de datos con resolución de 1 segundo de las componentes horizontales. Es preferible operar con funciones de transferencia en el dominio de la frecuencia, las series temporales se someten a la Transformada de Fourier (FT). A partir de estos, podemos considerar los datos recabados (O) como una composición de datos en variaciones naturales (nat) y variaciones de origen artificial (art):

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix}^O (w) = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix}^{nat} (w) + \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix}^{art} (w)$$

Donde la señal de variaciones naturales se puede representar a partir de los datos de la estación de referencia mediante una función de transferencia llamada horizontal magnetic tensor (HMT) o función de transferencia inter-estacion.

Con $\begin{pmatrix} MHT_{xx} & MHT_{xy} \\ MHT_{yx} & MHT_{yy} \end{pmatrix} (w)$ podemos escribir la variación natural como sigue:

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix}^{nat} (w) = \begin{pmatrix} MHT_{xx} & MHT_{xy} \\ MHT_{yx} & MHT_{yy} \end{pmatrix} (w) + \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix}^R (w)$$

Donde $\begin{pmatrix} MHT_{xx} & MHT_{xy} \\ MHT_{yx} & MHT_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (B_x^R \cdot B_x^R) & (B_x^R \cdot B_y^R) \\ (B_y^R \cdot B_x^R) & (B_y^R \cdot B_y^R) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} (B_x^R \cdot B_x^O) & (B_x^R \cdot B_y^O) \\ (B_y^R \cdot B_x^O) & (B_y^R \cdot B_y^O) \end{pmatrix}$

Resolviendo las ecuaciones para el mayor número de coeficientes posible para la misma frecuencia, partiendo de la condición de que la parte incorrelada se ha minimizado, y volviendo al dominio del tiempo obtenemos la señal corregida (método propuesto en Anne Neska et al., 2013).

4.4 Visualización de datos geomagnéticos en formato IAGA-2002

La representación gráfica y el tratamiento de los datos geomagnéticos no es algo trivial, y herramientas oficiales a disposición pública para ello no son fáciles de encontrar o no es fácil hacer que funcionen en el PC o con los datos propios, y adaptarlos, puede ser una tarea algo complicada. Por ello, se ha decidido desarrollar un programa en lenguaje de programación Python para la lectura, tratamiento, representación gráfica, filtrado y almacenamiento de datos geomagnéticos en formato IAGA-2002 de datos XYZ, tanto con resolución de minuto como con resolución de segundo. En este último se permite aplicar un filtro de ventana móvil para eliminar el ruido de los datos. Además de las componentes X, Y, Z extraídas del fichero se calcula la componente H.

El programa solicita la ruta de la carpeta donde se encuentra los archivos. min o .sec que se desean tratar y pide al usuario que seleccione un modo de funcionamiento, a elegir entre 3: solo visualizar, solo almacenar y visualización y almacenamiento. Si se selecciona un modo que realice la función de guardado se solicitara una ruta donde almacenar las gráficas en formato png, estas se almacenaran con el nombre que identifica la componente, el observatorio y la fecha de manera automática (componente_observatorio_fecha.png). Según el modo seleccionado. Se solicitan al usuario una serie de parámetros para configurar el procesado y representación gráfica de los datos. El programa permite:

- Visualizar las componentes X, Y, Z y H.
- Almacenar las gráficas.
- Invertir los datos.
- Introducir un offset a cada componente.
- Si se detectan ficheros .sec: aplicar un filtro de ventana móvil con un parámetro de ventana específico para cada componente.
- Promediar ficheros de resolución de segundo a minuto.
- Comparar datos filtrados con datos en bruto.
- Seleccionar la resolución del eje Y.

El código del programa se encuentra en el Anexo I.

4.5 Ejemplos de medidas en Fase 1

En esta sección se presentan algunos ejemplos de los resultados obtenidos durante el desarrollo de la fase 1 en la ubicación de pruebas, principalmente en la situación 2, ya que es en la disposición donde se han alcanzado los mejores resultados, comparándolos con los datos del observatorio de San Pablo de los Montes, tomado como referencia. Todos los resultados se muestran con resolución de 1 minuto respecto al tiempo universal (UT), y con un rango fijo en el eje Y de 100nT, 50 por encima y 50 por debajo de la media de los valores de cada gráfico, para analizar mejor las comparaciones. los resultados propios se muestran en color azul y los de San Pablo, en verde:

En las siguientes graficas se muestran datos de un día más o menos tranquilo, sin mucho rango de variación, tanto de la componente X como de la Y:

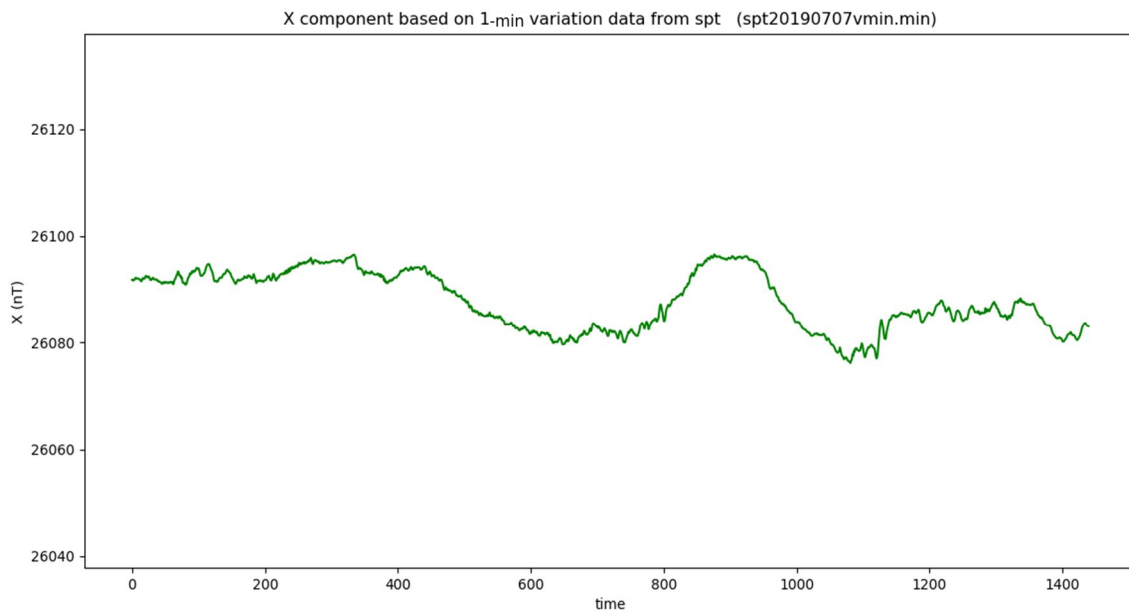
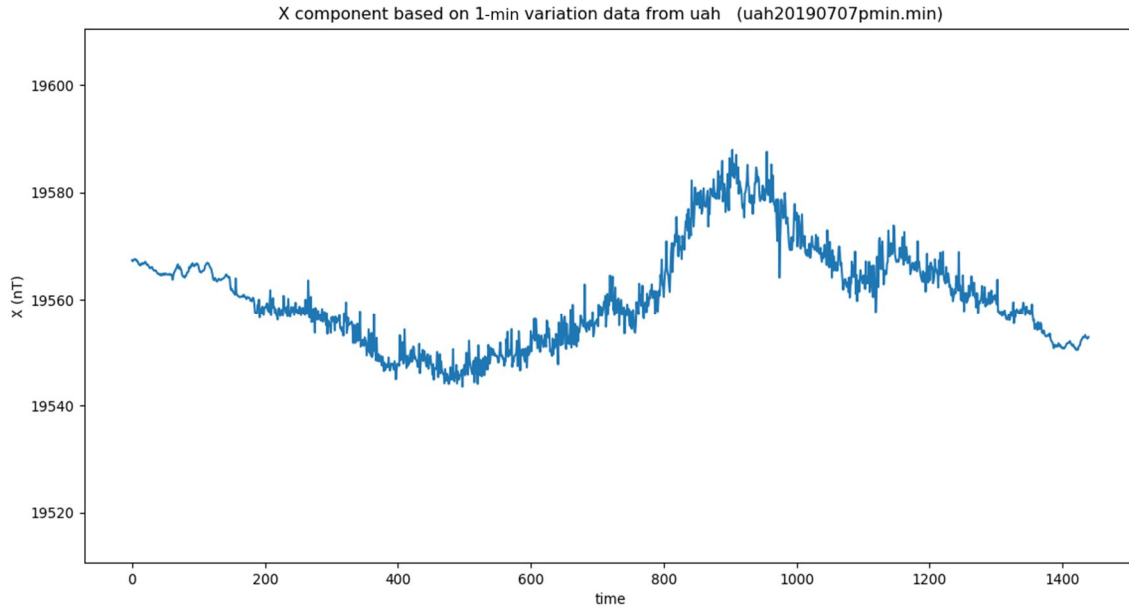


Imagen 39 – Comparativa de la componente X en un día “tranquilo”

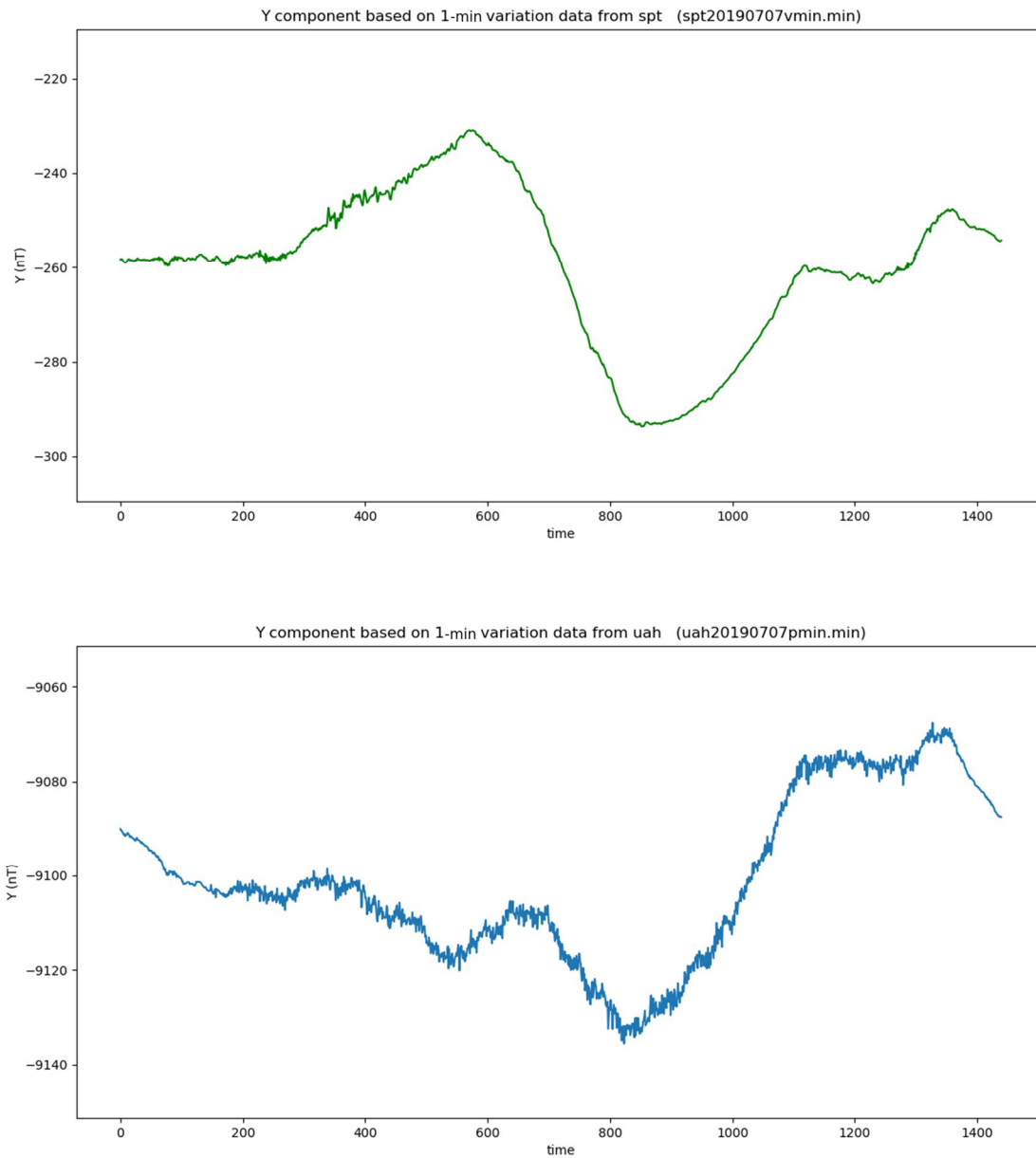


Imagen 40 - Comparativa de la componente Y en un día "tranquilo"

Se pueden apreciar diferencias, sobre todo en los momentos centrales del día, donde el efecto de la temperatura se acentúa, ya que se alcanzan las temperaturas más altas del día y predomina sobre la variación natural.

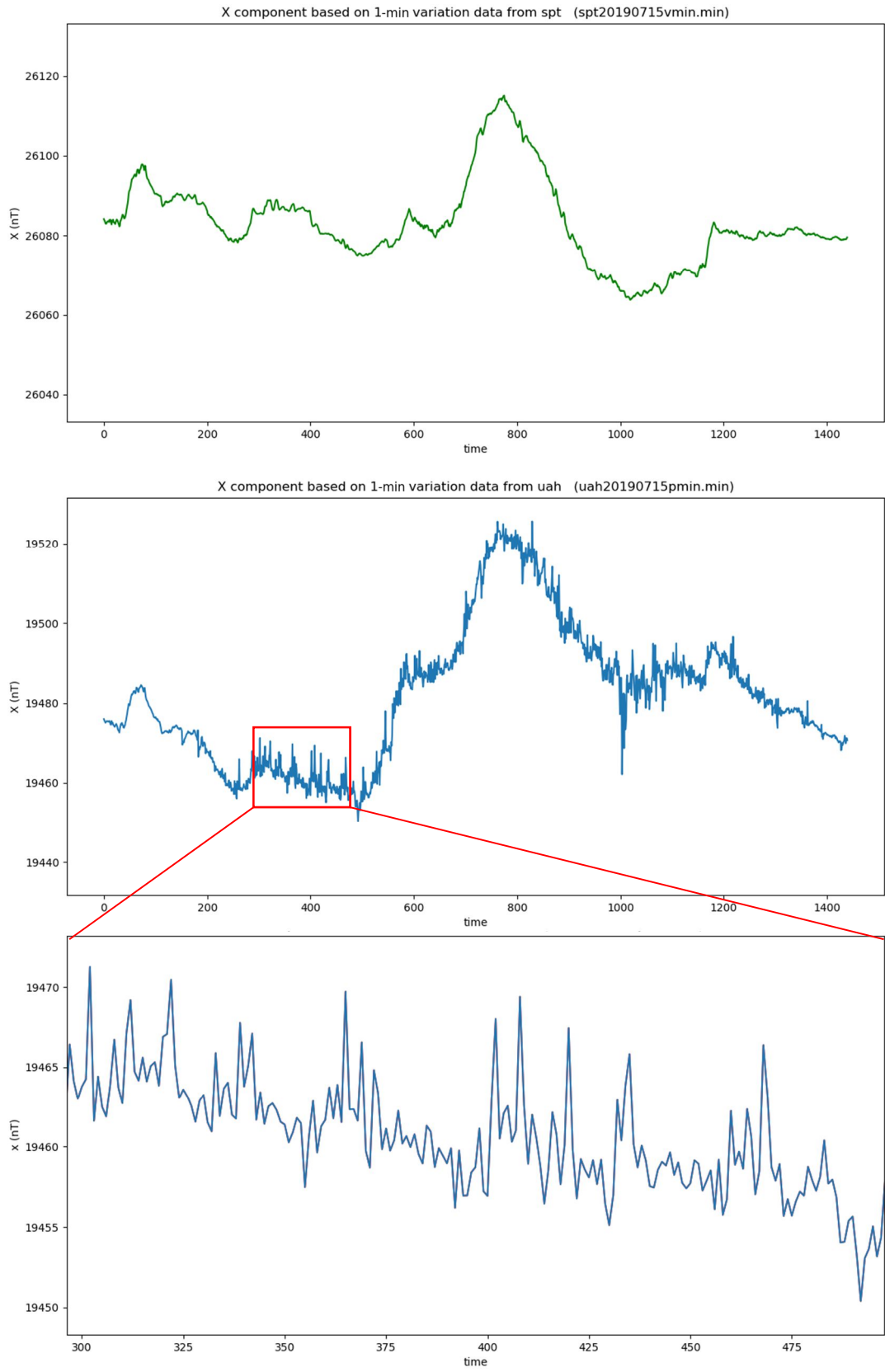


Imagen 41 – Ejemplo de ruido en la componente X

El nivel de ruido medio en la componente X, como se muestra en la imagen superior para un periodo de 2h de un día al azar, es de alrededor de 5 nT.

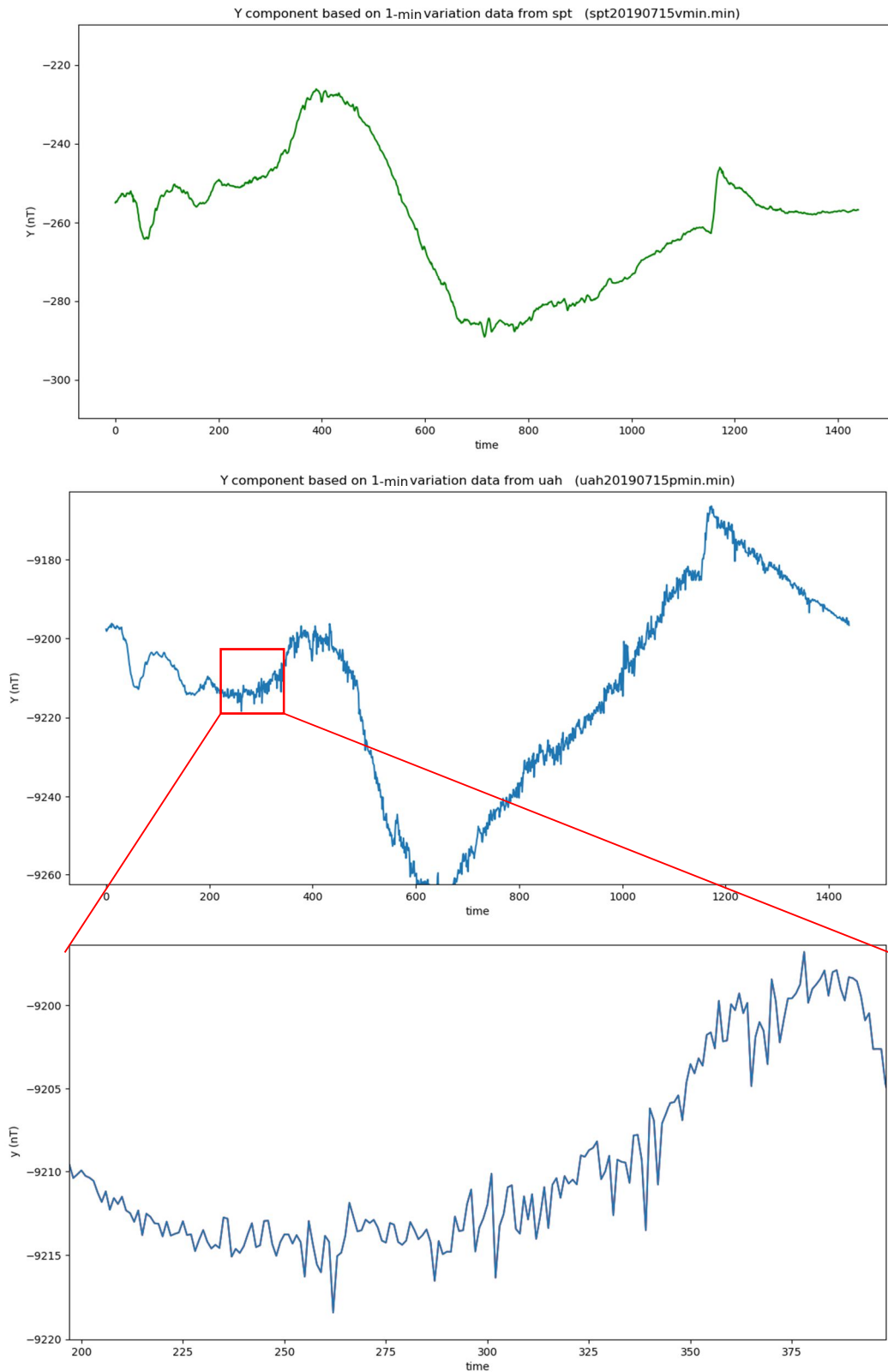


Imagen 42 – Ejemplo de nivel de ruido en la componente Y

En la imagen superior, se puede ver que el nivel de ruido medio en la componente Y tiene valores muy similares a los de la componente X, alrededor de 5 nT. Ambas se ven afectadas del mismo modo por el ruido ambiental en la ubicación de pruebas.

La componente vertical es la más afectada por el ruido, tanto en la situación 1 como en la situación 2, si bien el ruido se reduce en la situación 2, al separar el sensor del suelo, sigue siendo tomando valores excesivamente altos que enmascaran ampliamente la variación natural. En a la siguiente imagen se muestra una comparación de la componente Z en la situación 1 y en la 2, a fin de dar un ejemplo del ruido en cada una de ellas:

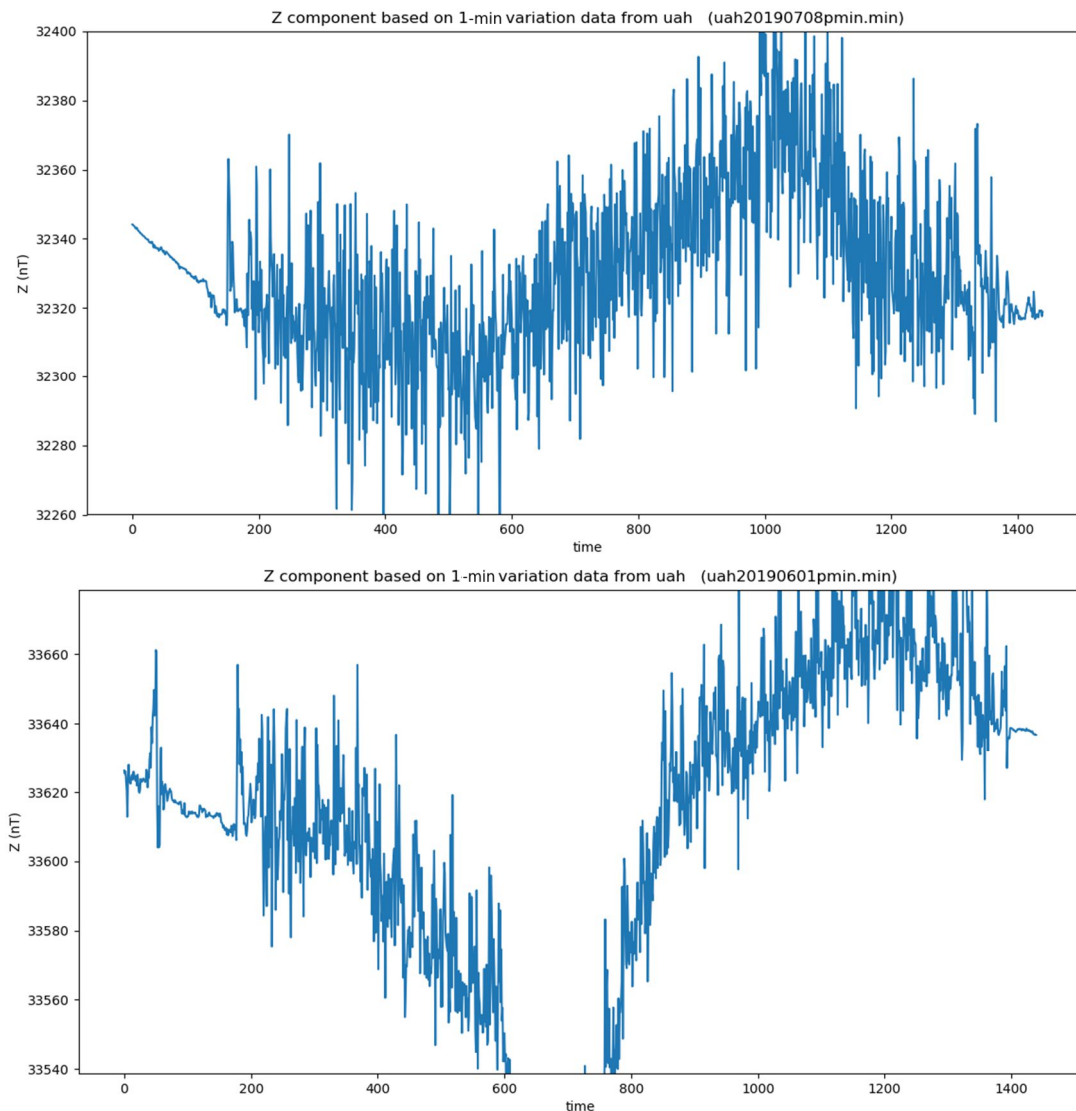


Imagen 43 – Comparativa del ruido en la componente Z en la situación 1, panel inferior, y en la situación 2, panel superior.

El ruido en la situación 1 alcanza valores de alrededor de 40 nT y en la situación 2, de 30nT.

En todos los ejemplos mostrados antes, se aprecia claramente los momentos de “silencio” en los que el ruido alcanza valores mínimos, a los que se hacía referencia en el apartado 4.3.3

como posible causa de la inactividad o mantenimiento del tren. Estos momentos sin ruido o en los que es mínimo, se observan en todas las componentes y destaca en la componente Z ya que se pasa de periodos con apenas ruido, a picos de varias decenas de nT como se puede apreciar en las gráficas dadas como ejemplo en la Imagen 43.

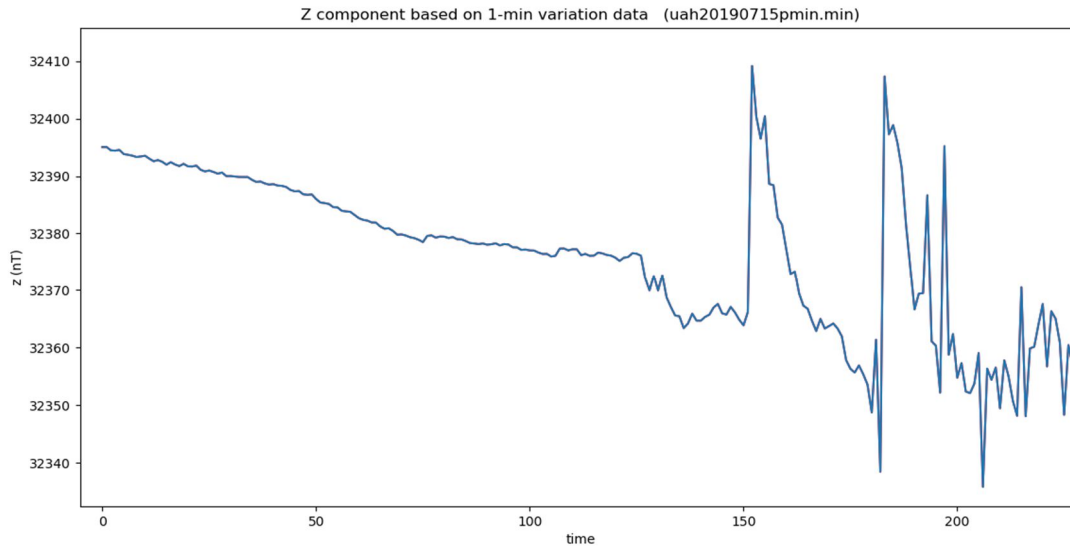


Imagen 44 – Periodo de 4 horas, donde se observa un periodo con ruido mínimo de 2,5 h desde el comienzo del día.

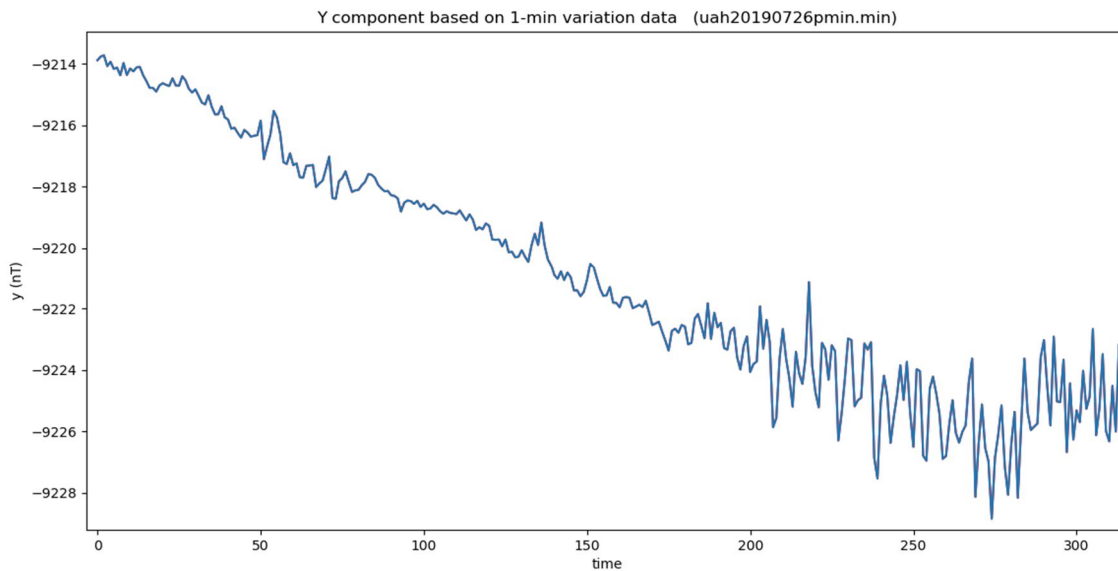


Imagen 45 – Ejemplo de periodo de silencio en la componente Y. se muestran 5h en los que se observa un periodo de 2,5 h sin ruido desde el comienzo del día.

A continuación, se muestran algunos resultados registrados durante días con tormentas magnéticas, donde los resultados obtenidos muestra la variación del campo geomagnético en las componentes horizontales con bastante precisión.

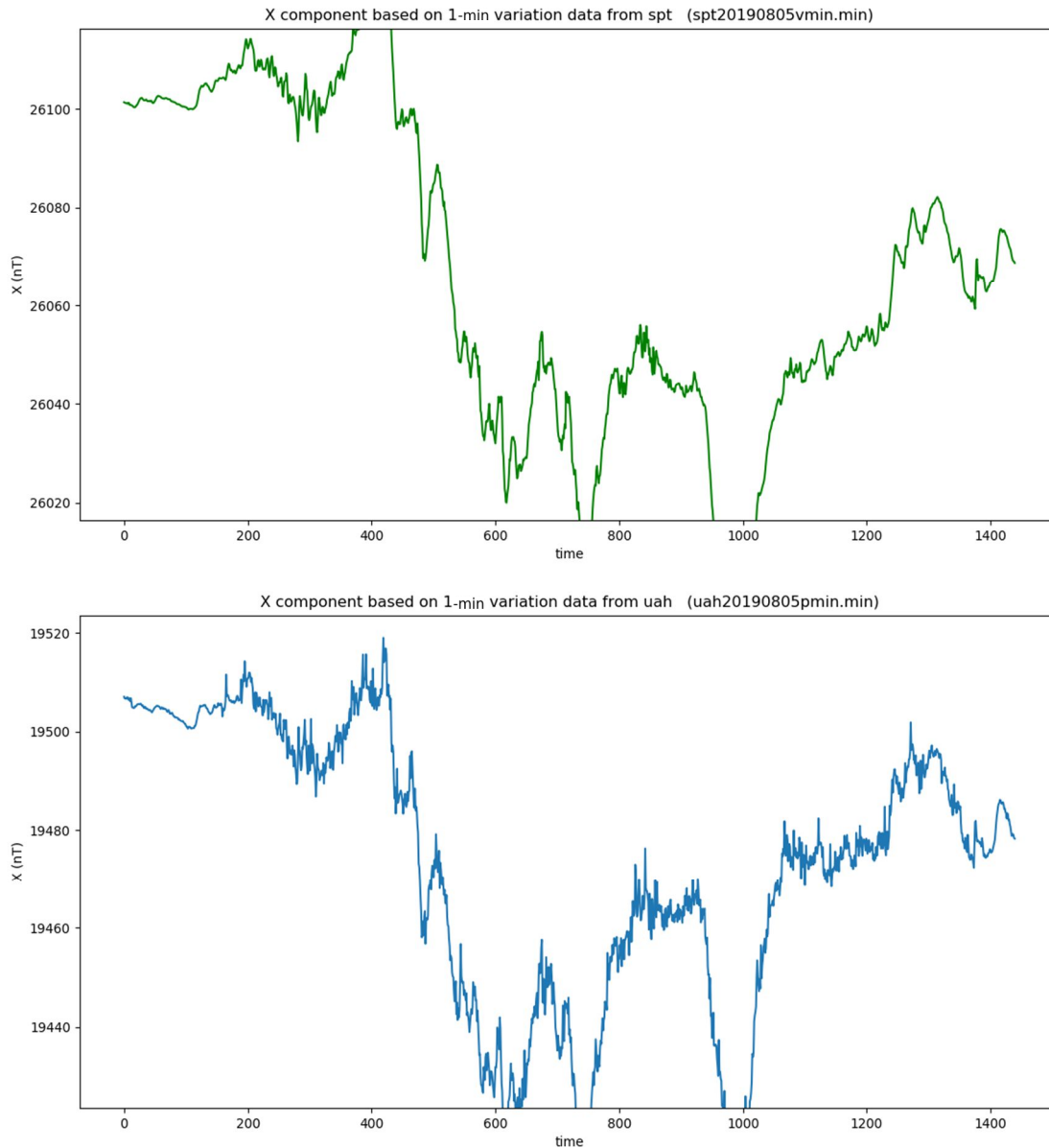


Imagen 46 – Comparación de la componente X durante una tormenta solar el día 5 de agosto de 2019, con una variación de más de 100 nT. El panel superior se corresponde con los datos del observatorio de San Pablo y el inferior con los obtenidos en la ubicación de pruebas.

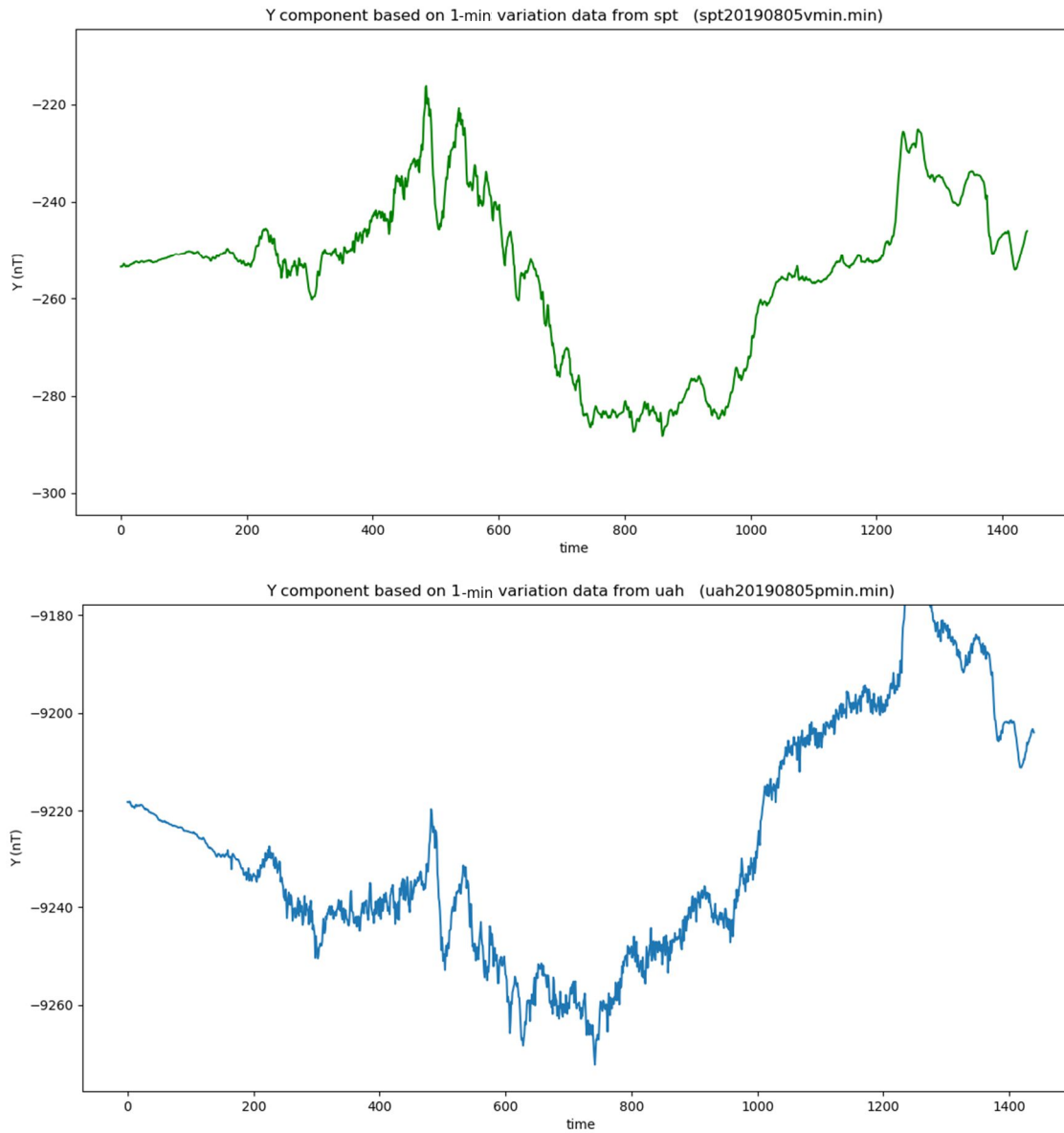


Imagen 47 - Comparación de la componente Y durante una tormenta solar el día 5 de agosto de 2019 con una variación de 100 nT. El panel superior se corresponde con los datos del observatorio de San Pablo y el inferior con los obtenidos en la ubicación de pruebas

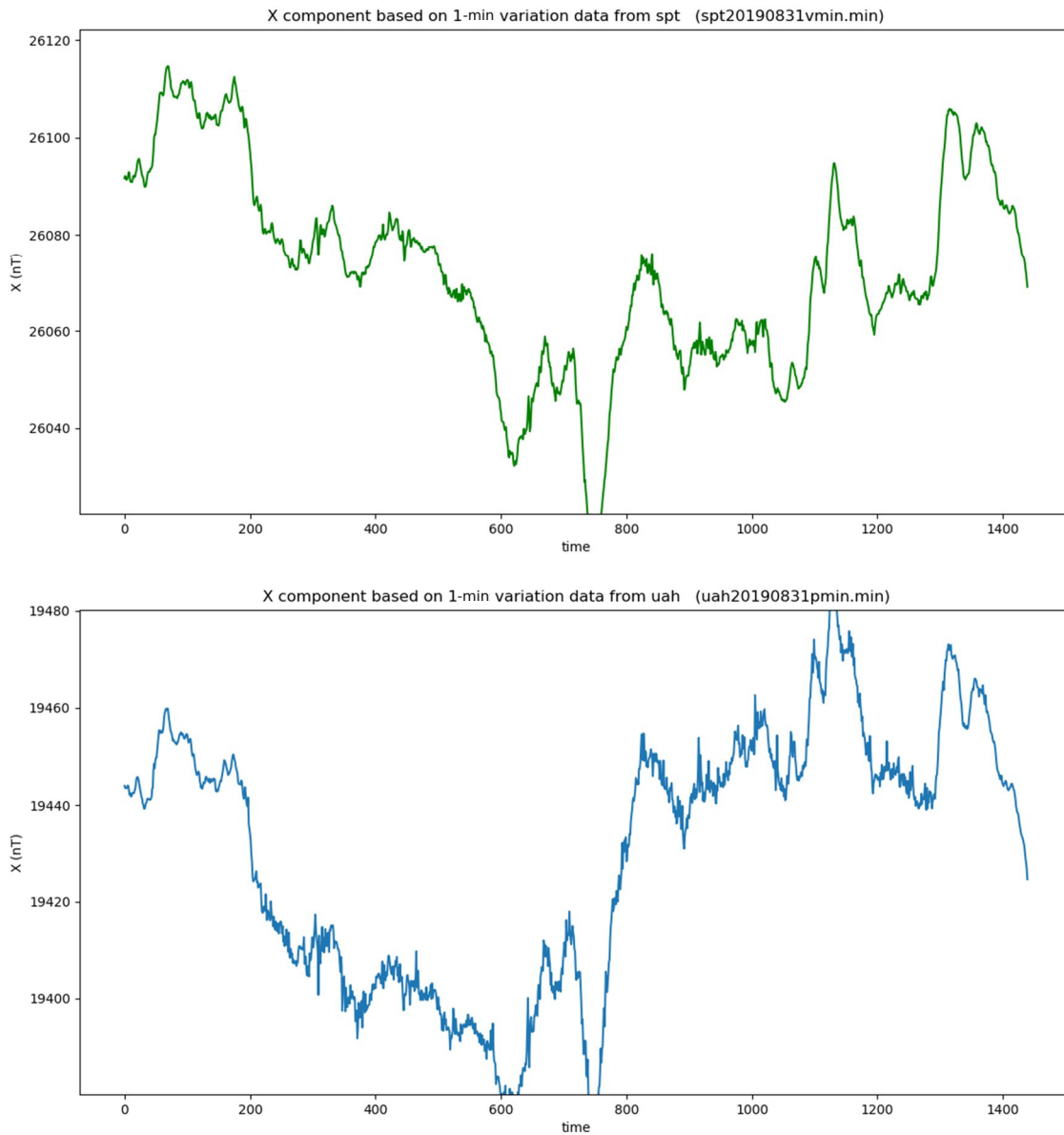


Imagen 48 – Variación de la componente X durante la tormenta geomagnética provocada por un Agujero Corolar el día 31 de agosto de 2019. El panel superior se corresponde con los datos del observatorio de San Pablo y el inferior con los obtenidos en la ubicación de pruebas

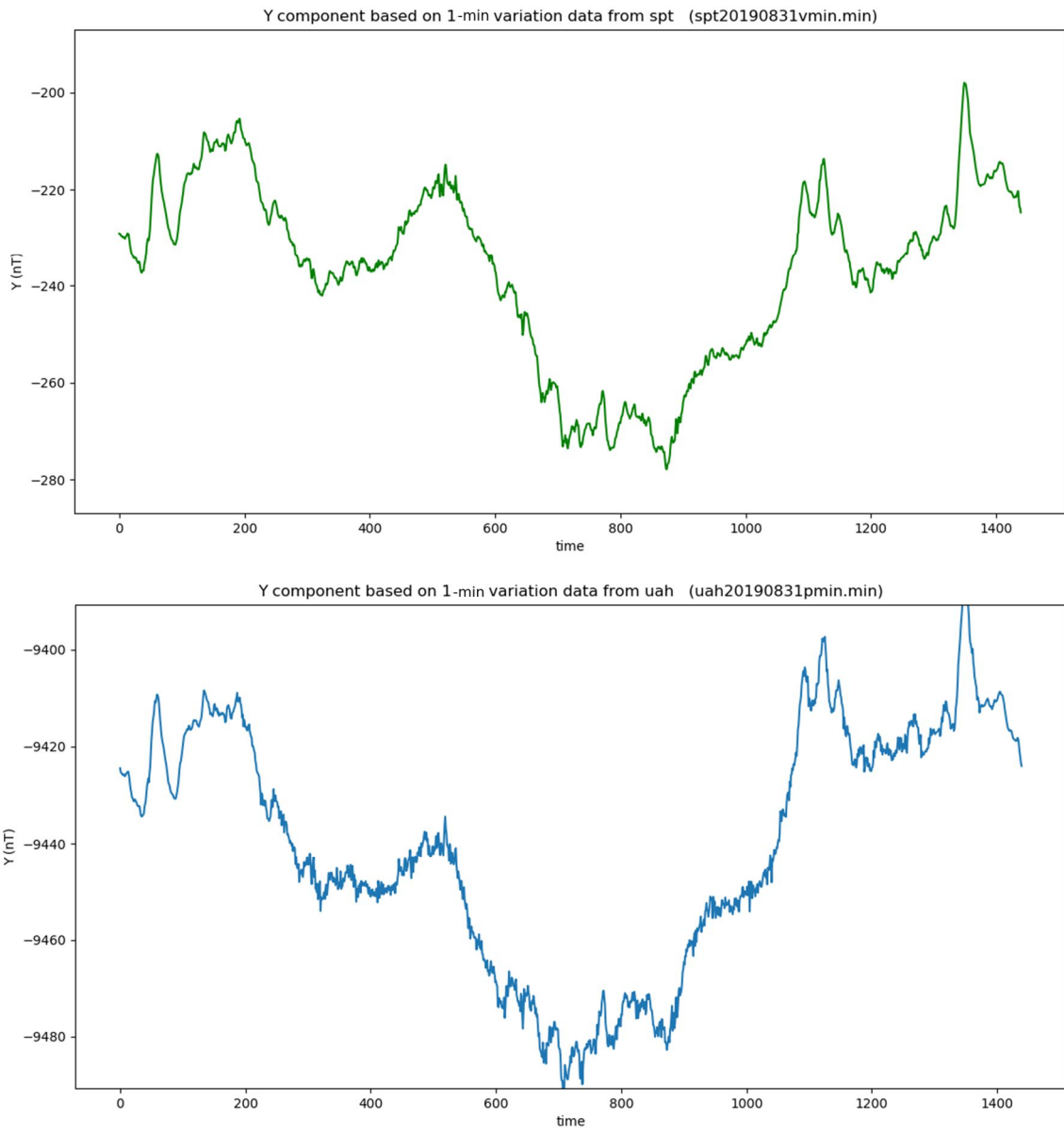


Imagen 49 - Variación de la componente Y durante la tormenta geomagnética provocada por un Agujero Corolar el día 31 de agosto de 2019. El panel superior se corresponde con los datos del observatorio de San Pablo y el inferior con los obtenidos en la ubicación de pruebas

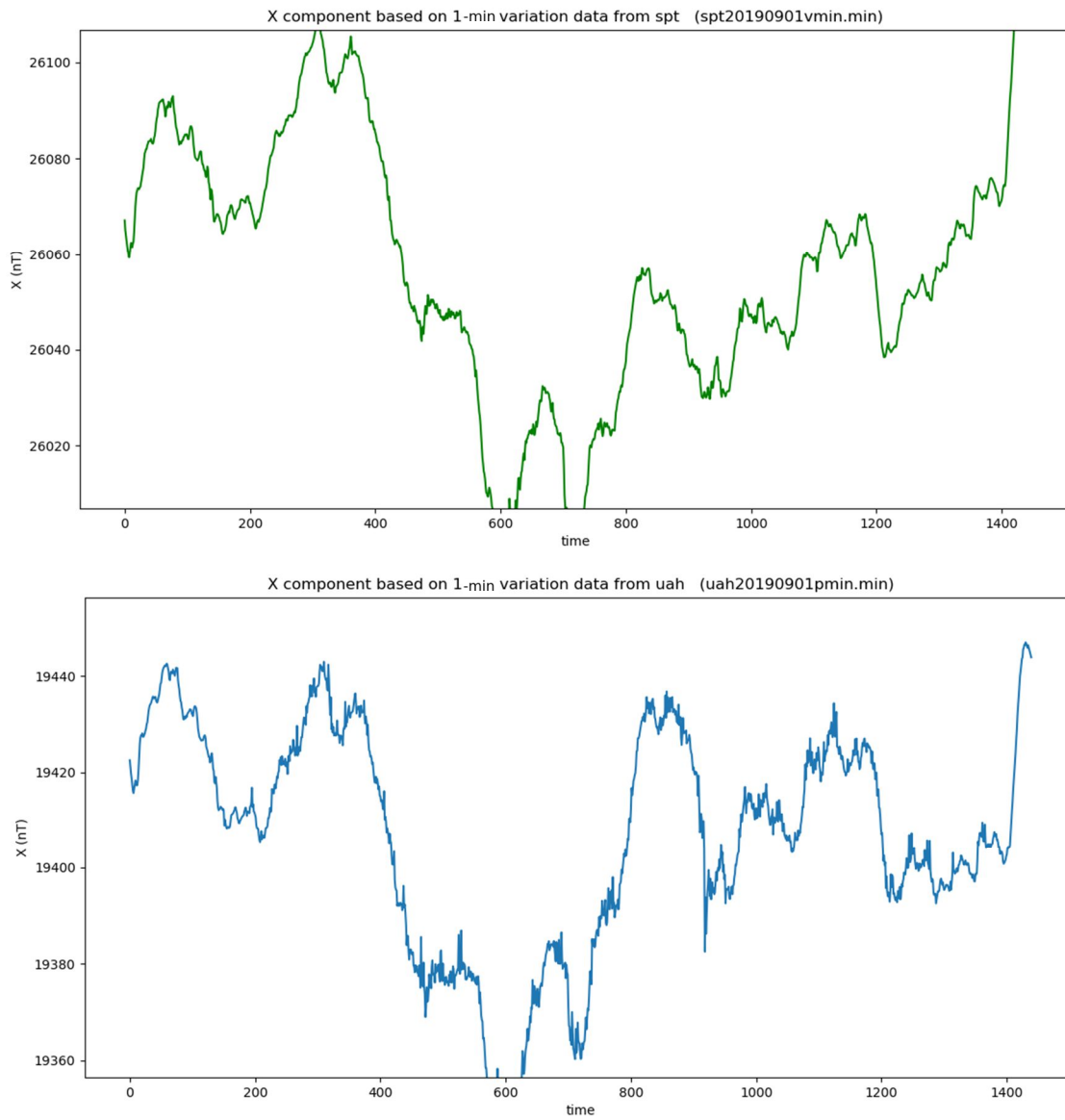


Imagen 50 - Variación de la componente X durante la tormenta geomagnética provocada por un Agujero Corolar el día 1 de septiembre de 2019. El panel superior se corresponde con los datos del observatorio de San Pablo y el inferior con los obtenidos en la ubicación de pruebas

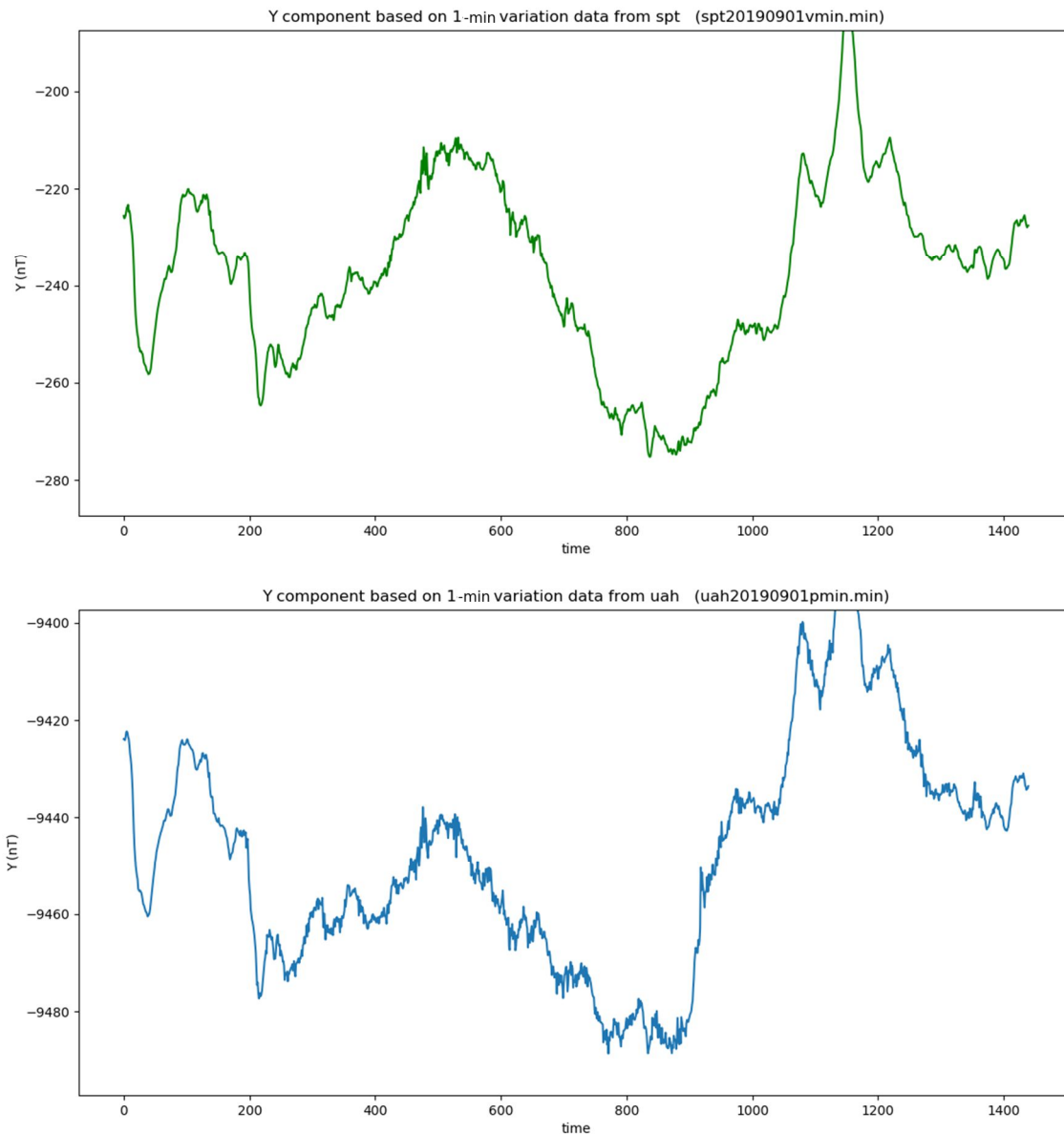


Imagen 51 - Variación de la componente Y durante la tormenta geomagnética provocada por un Agujero Corolar el día 1 de septiembre de 2019. El panel superior se corresponde con los datos del observatorio de San Pablo y el inferior con los obtenidos en la ubicación de pruebas

Durante los periodos con perturbaciones geomagnéticas, el magnetómetro capta la variación natural del campo de una manera bastante precisa en comparación con días más en calma con variaciones de menor magnitud y mucho más lentas, en las que el efecto de la temperatura sobre los datos predomina frente a la variación natural.

En las siguientes imágenes se muestran los resultados de aplicar un filtro de ventana móvil a los datos obtenidos con resolución de 1 segundo para posteriormente promediarlos para obtener una resolución de 1 minuto, comparándolos con los datos en bruto y los de San Pablo:

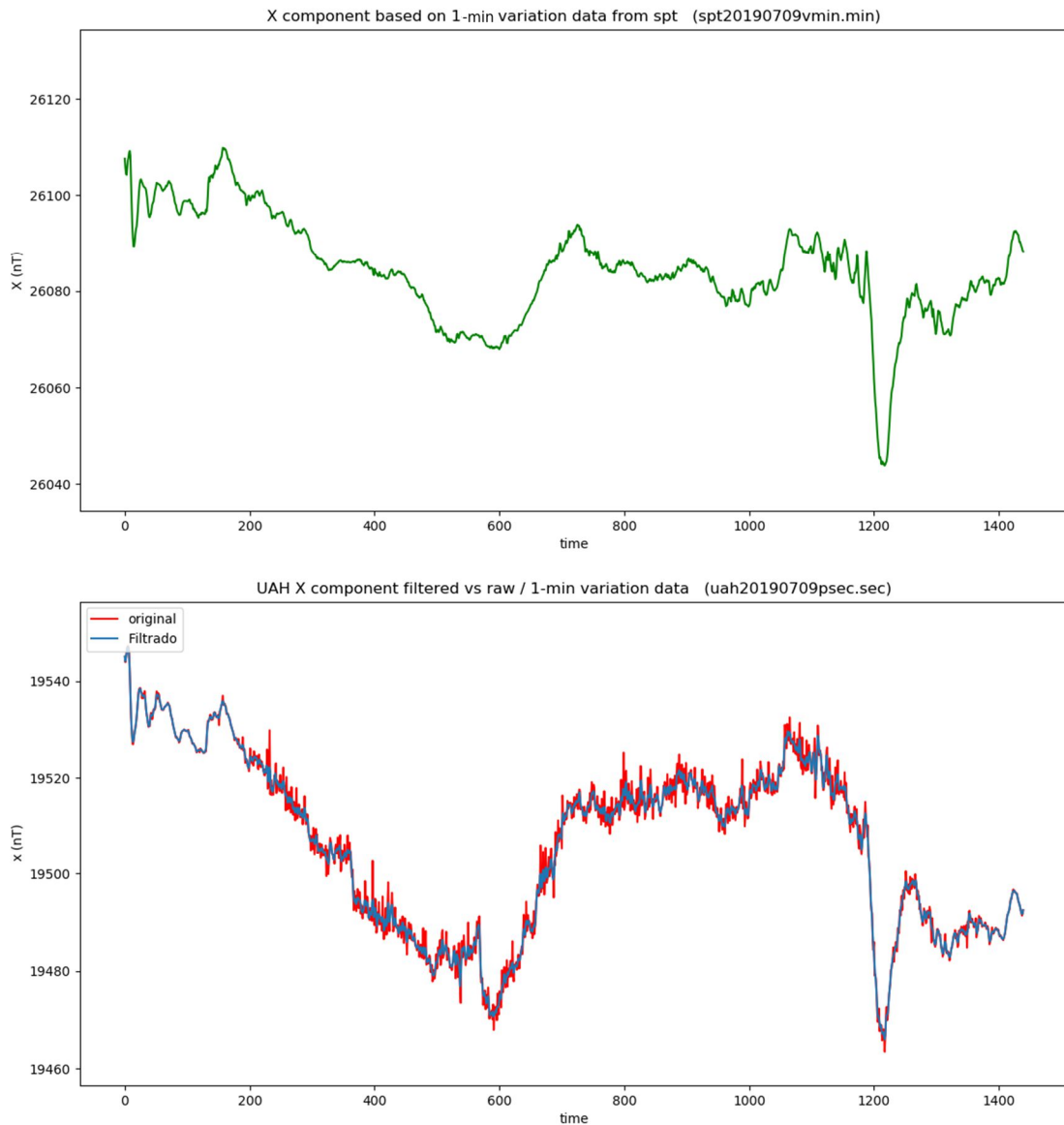


Imagen 52 - Resultados antes (rojo) y después (azul) de aplicar un filtro de ventana móvil a la componente X registrada en la ubicación de prueba, con un valor de ventana de 180 segundos

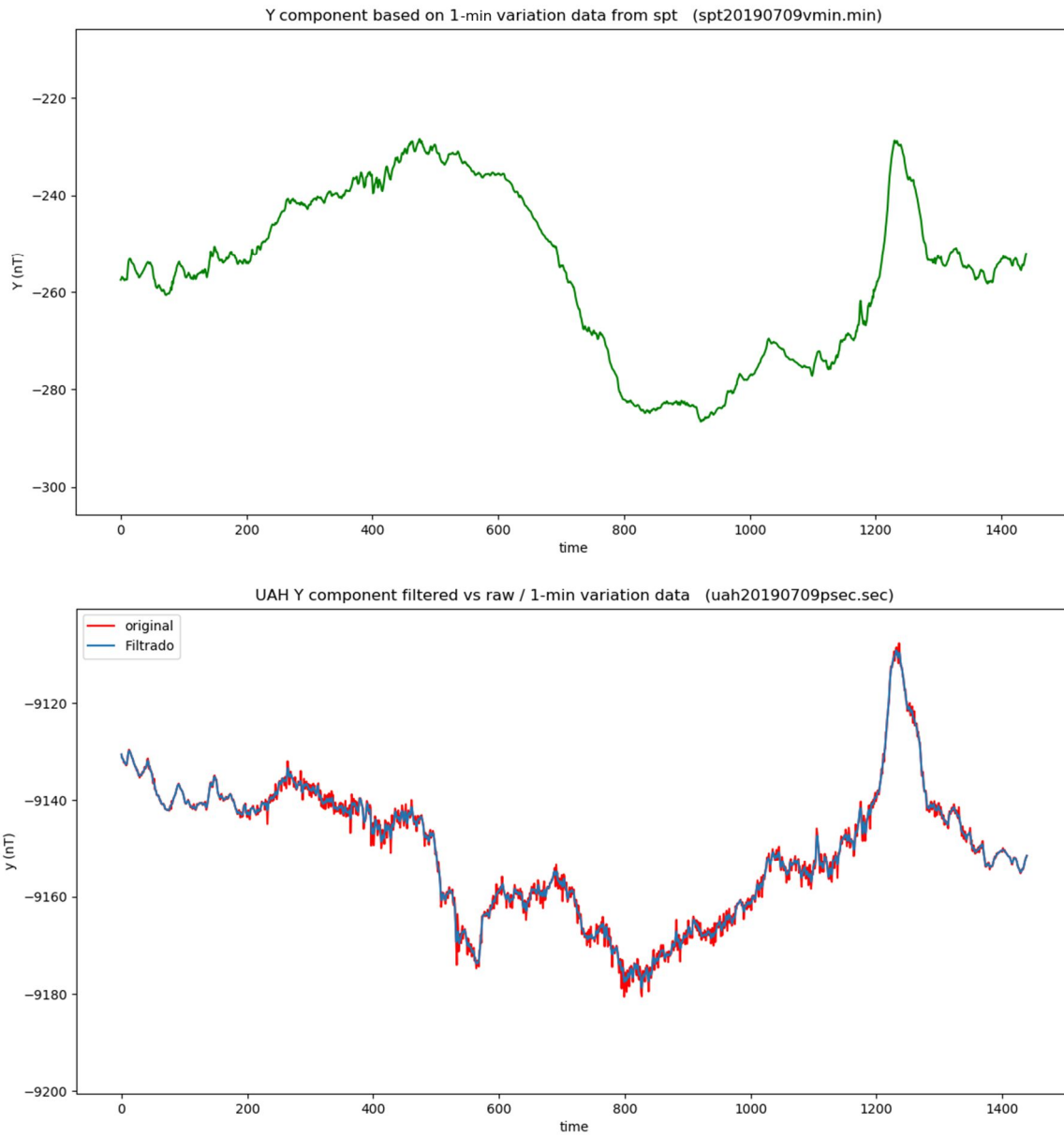


Imagen 53 – Resultados antes (rojo) y después (azul) de aplicar un filtro de ventana móvil a la componente Y registrada en la ubicación de prueba, con un valor de ventana de 180 segundos

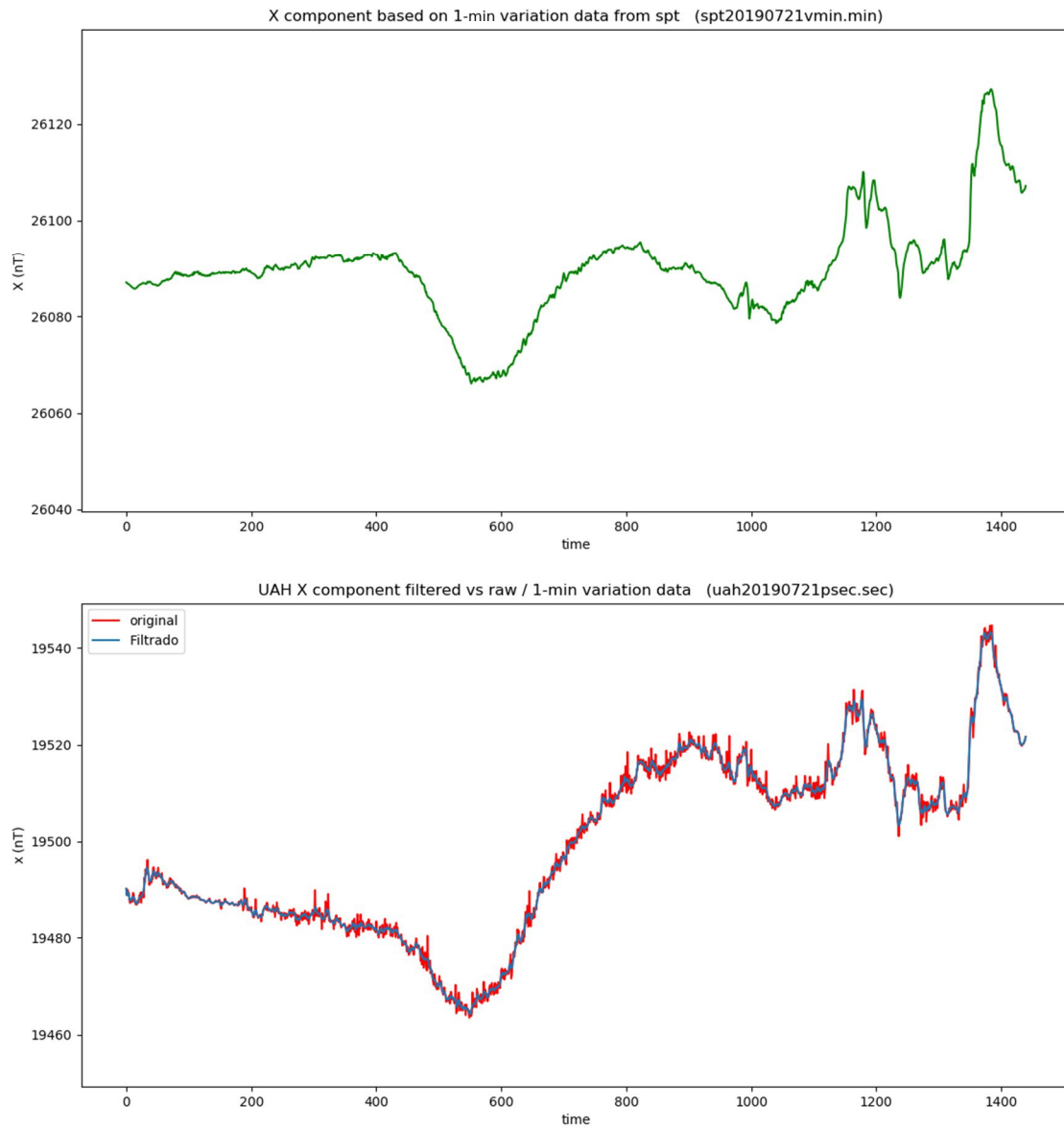


Imagen 54 - Resultados antes (rojo) y después (azul) de aplicar un filtro de ventana móvil a la componente X registrada en la ubicación de prueba, con un valor de ventana de 240 segundos

Como se muestra en las imágenes, aplicando el filtro más sencillo de los propuestos en el apartado 4.3.4, se consigue eliminar gran parte del ruido en las componentes horizontales, donde se alcanzan mejores resultados aplicado un valor de ventana de 240 segundos (Imagen 52 e Imagen 53) frente al de 180 segundos (Imagen 54 e Imagen 55), sin que aparentemente (no se ha entrado en un análisis detallado) se eliminen variaciones naturales. En la componente vertical este método no es efectivo debido a la gran cantidad de ruido.

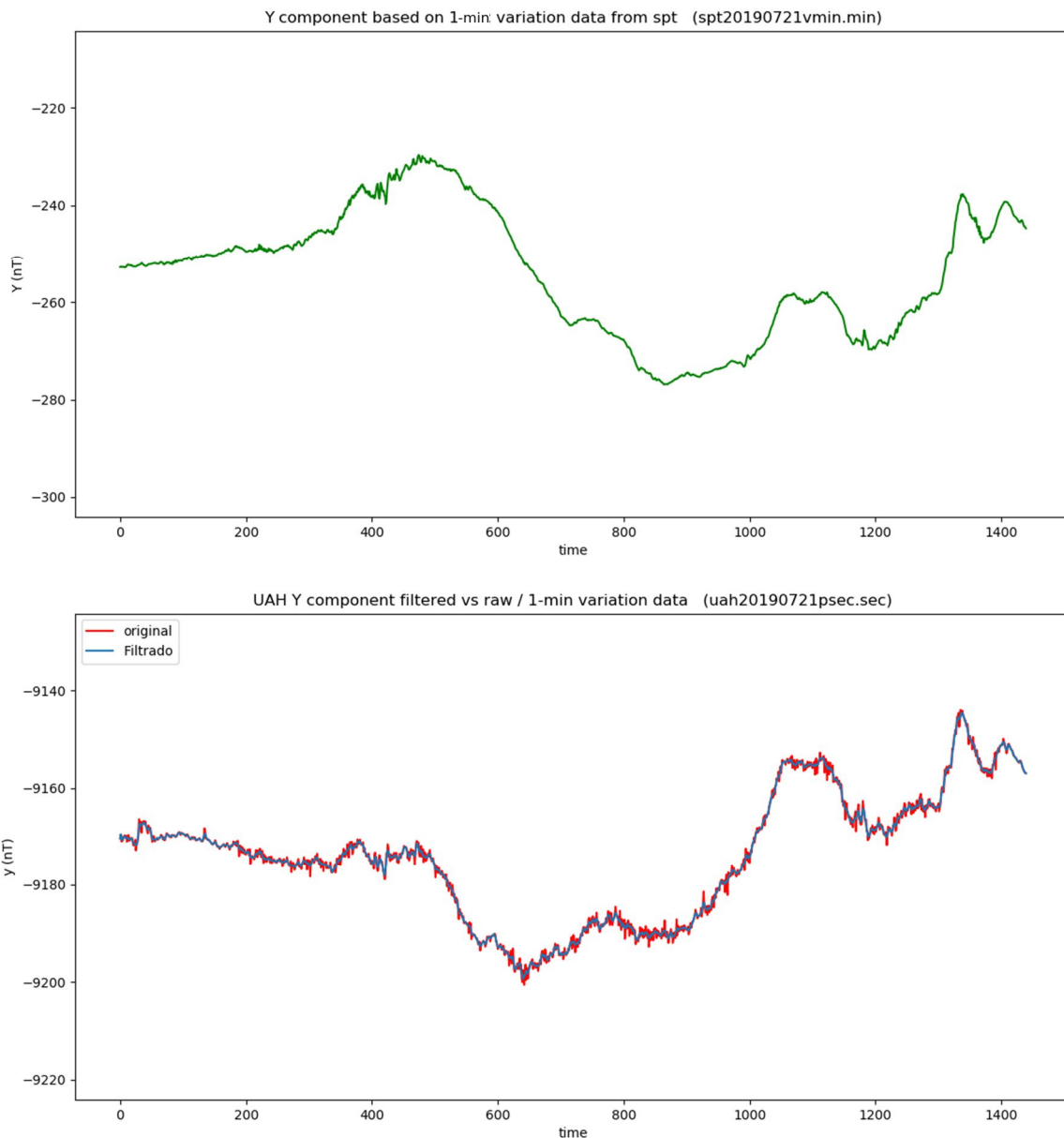


Imagen 55 - Resultados antes (rojo) y después (azul) de aplicar un filtro de ventana móvil a la componente Y registrada en la ubicación de prueba, con un valor de ventana de 240 segundos

Capítulo 5. Fase 2: Calibración con estación de referencia

En esta segunda fase del proyecto se pretende realizar una calibración del magnetómetro LEMI-031 con el magnetómetro instalado en el observatorio de San Pablo de los Montes (Toledo) del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y perteneciente a INTERMAGNET, elegido como observatorio de referencia. Se han iniciado los contactos para ello a través del grupo de meteorología espacial (SWE) de la UAH, pero sin llegar a ejecutarse durante el periodo de desarrollo de este trabajo.

Latitud: 39° 32′ 50″ N

Longitud: 4° 20′ 55 O

La calibración con una estación de referencia que cuente con una calidad de los datos validados por organismos como INTERMAGNET o IAGA que establecen los criterios de precisión en los datos recogidos por variómetros, se hace necesaria para comprobar las condiciones de funcionamiento y los parámetros proporcionados por el fabricante del sensor evaluado y asegurar una precisión en la magnitud en los datos registrados por cada una de las componentes a través de un análisis de correlación entre el sensor evaluado y el sensor de referencia. También se podría realizar mediante el uso de sensor de medidas absolutas si se dispone de él. Como en el momento de desarrollo de este trabajo no se disponía de uno de ellos por su elevado coste económico esta parte de la calibración se ha centrado en el método de la correlación con una estación de referencia.

Pese a tener datos sobre los principales parámetros proporcionados por el fabricante del magnetómetro, IAGA recomienda comprobar estos parámetros en la sala de variómetro de un observatorio de referencia perteneciente a la red de INTERMAGNET. Parámetros como la sensibilidad, la deriva con la temperatura, ortogonalidad de los ejes, etc. Deben de ser comprobados mediante pruebas y comparaciones entre los sensores. El sensor evaluado debe de situarse en las mismas condiciones que el sensor de referencia. Normalmente las estaciones geomagnéticas cuentan con pilares de calibración en la sala donde está situado el magnetómetro para realizar este tipo de tareas y la experiencia y los mecanismos necesarios para llevarlas a cabo de manera correcta. Se recomienda solicitar un certificado de calibración al observatorio donde se han realizado las pruebas (Jankowski y Sucksdorff, IAGA, 1996).

Tras recabar datos durante periodos de tiempo de entre 1 y 3 meses con el magnetómetro evaluado en las mismas condiciones que el de referencia se debe realizar un proceso de calibración de sensibilidad a través de un proceso de correlación entre los datos de ambos sensores para cada una de las componentes mediante un análisis de mínimos cuadrados. El proceso se debe de llevar a cabo seleccionando datos de al menos a 5 días “tranquilos” en el

periodo registrado, y ajustando los valores de ganancia y de offset del sensor con los parámetros resultantes del análisis (Denardini et al., 2018).

Con el sensor calibrado, se pueden realizar comparaciones de los datos recabados o de los índices k obtenidos con los de la estación de referencia para poder evaluar el nivel de ruido en una localización de pruebas que se esté evaluando como candidata a ser una ubicación definitiva o realizar procesos de corrección como algunos de los comentados en el capítulo anterior.

Tras completarse esta fase del proyecto el magnetómetro estará listo para situarlo, junto con el resto del sistema, en una localización definitiva.

Capítulo 6. Fase 3: Análisis de la ubicación y el montaje definitivo

Una vez que el funcionamiento del sistema ha sido comprobado y se ha llevado a cabo la calibración con la estación de referencia es necesario analizar las condiciones ideales para la localización definitiva del magnetómetro y las condiciones para su instalación ideal, y en base a estas y las posibilidades reales para tener acceso a un espacio que las cumpla en mayor o menor medida, se deben de realizar los trámites necesario con las autoridades competentes para conseguir el permiso que asegure el desarrollo de esta actividad y así poder diseñar y ejecutar un plan para su instalación. Estas tareas corresponden a la fase 3 del proyecto y se analizaran desde un enfoque teórico e introductorio en este capítulo.

Elegir la localización donde instalar una estación o un observatorio no es algo trivial como se ha comprobado en la fase 1 del proyecto, donde se ha analizado y comprobados diversos factores que pueden suponer una fuente considerable de error y ruido en el resultado de la medida, pudiendo llegar a ser demasiado significativos para tratar de corregirlos y obtener datos útiles.

En este capítulo se tratarán los aspectos principales a tener en cuenta a la hora de buscar una localización donde tomar datos de variación del campo geomagnético y la instalación del sistema en base a las recomendaciones de IAGA e INTERMAGNET y a la experiencia compartida de otros observatorios. Se propondrá una localización en el entorno del campus de la universidad de Alcalá para el desarrollo práctico de esta tercera fase en el futuro, facilitando el llevar a cabo su instalación y suponiendo un lugar cómodo y accesible para su mantenimiento.

6.1 Aspectos generales sobre la ubicación y la instalación

La zona donde se va a realizar la instalación debe encontrarse en un ambiente magnético estable, analizando mediante mapas geomagnéticos, si se dispone de ellos, o realizando medidas geomagnéticas sobre la zona alrededor de varios kilómetros. Grandes anomalías magnéticas, del orden de cientos de nT no son aceptables en la zona de alrededor de la estación y en el entorno más cercano a la ubicación del sensor solo se debe haber variaciones de algunos nT. Se debe descartar la presencia de cuerpos geológicos susceptibles de ser magnetizados.

La conductividad del suelo también puede ser sujeto de estudio, la conductividad del terreno debe ser homogénea, además, un terreno de una conductividad por encima de lo normal puede favorecer la inducción natural de corrientes en el suelo o la propagación de corrientes de origen artificial, que pueden provocar perturbaciones en los datos registrados de la variación natural del campo geomagnético. El efecto de la conductividad o las inhomogeneidades en la

conductividad del terreno es un caso difícil de estudiar y del que pocos estudios han sido realizados al respecto.

La actividad humana es el principal enemigo de los datos geomagnéticos. Las principales causas por las que una ubicación puede no ser factible para situar una estación (si la calidad necesaria para el uso de los datos es alta o se busca obtener datos válidos para pertenecer a una red internacional como INTERMAGNET) es la actividad humana, principalmente industrias y medios de transporte electrificados, como el tren, con el que se debe de mantener una distancia de docenas de kilómetros si están alimentados por corriente continua.

A pesar de que es difícil predecir el crecimiento o la tendencia en el crecimiento de una población o de las zonas industriales en años o incluso en décadas, es necesaria hacer una investigación o una previsión de este factor a la hora de elegir el terreno donde se va a establecer la estación, de manera que, en un largo periodo de tiempo, se asegure el funcionamiento de la estación sin perturbaciones artificiales o donde estas sean mínimas dentro de las posibilidades. Normalmente los observatorios se sitúan alejados de grandes núcleos urbanos, pero lo suficientemente cerca y comunicado para que no suponga un problema para el personal encargado del mantenimiento, que deba desplazarse hasta el a diario o cada cierto periodo de tiempo. Como se ha tratado en el capítulo 4, existen métodos para corregir errores que pueden permitir la convivencia de una estación con una fuente de perturbación magnética de cierta intensidad obteniéndose datos útiles.

Una vez que se ha seleccionado un terreno válido y se cuenta con los permisos de las autoridades competentes que permiten y garantizan el desarrollo de esta actividad, se debe planificar la disposición donde se va a instalar cada una de las partes que conforman el sistema: el lugar de medidas absolutas, el lugar medidas de variación, la sala de control y la instalación eléctrica. La sala de medidas absolutas no se tratará ya que no es parte de este proyecto la toma de medidas absolutas del campo geomagnético al mismo tiempo que no son esenciales para un uso en Meteorología Espacial.

El lugar de medidas de variación debe de estar alejado de la sala de control donde se encuentra el resto del sistema de medida y de la instalación eléctrica. Se recomiendan distancias de docenas de metros entre ellos. En la imagen de abajo se muestra un esquema de la distribución de las salas recomendada por IAGA.

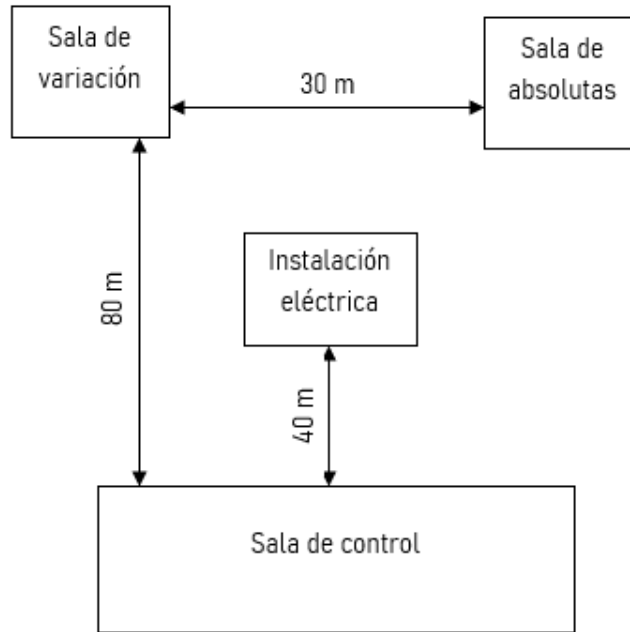


Imagen 56 – Esquema de la distribución recomendada por IAGA para una estación geomagnética

Lugar de medidas de variación

El lugar donde se instale el magnetómetro debe de cumplir tres condiciones principales: debe de tener un pilar o una plataforma perfectamente nivelada y completamente estable, debe de tener una temperatura constante y los materiales que lo conformen deben de ser no magnéticos. Debido a que los magnetómetros modernos tienen un tamaño bastante reducido y que no necesitan prácticamente ningún mantenimiento rutinario tras su instalación, no es necesario la construcción de una pequeña edificación como en los antiguos observatorios, con una pequeña caseta, armario o incluso una caja puede ser suficiente, incluso favorable para aspectos como la estabilidad térmica.

La estabilidad se consigue con la construcción de un pilar, preferiblemente construido sobre un suelo rocoso, para favorecer la estabilidad, o bien lo suficientemente profundo. Si se construyen dos pilares para un segundo magnetómetro o para realizar calibraciones es recomendable que este unidos por abajo para aumentar la estabilidad. El agua de la lluvia y las heladas son un problema común, por lo que a la hora de realizar la construcción se debe planificar sistemas de drenaje en los alrededores del pilar y dejar que el agua pueda fluir libremente alejándose de la construcción. Se recomienda que estas tareas sean realizadas por personal cualificado. Sobre la base construida se fijará el magnetómetro con algún material adherente no magnético (pegamento, silicona, etc.) para evitar que se mueva por accidente. Es recomendable realizar marcas en las direcciones N-S y E-O sobre el pilar, en la base donde se va a fijar el magnetómetro para facilitar su orientación. Pese a poner todo el empeño en construir el pilar, conseguir que este sea totalmente estable en algunas zonas, dependiendo de la naturaleza del terreno, puede ser una tarea difícil o incluso imposible, por

lo que a menudo se opta por instalar magnetómetros suspendidos, que cuentan con sistemas de control de la estabilidad mediante sensores de inclinación y mecanismos no magnéticos que actúen sobre la base del magnetómetro para estabilizarla en tiempo real mostrando muy buenos resultados, como el sistema Danés (Rasmussen and Kring Lauridsen, 1990) o el Canadiense (Trigg and Olson, 1990).

En cuanto a cómo conseguir la estabilidad térmica, recomendada frente a la corrección de las medidas digitalmente, va en función de la climatología de la zona donde se va a situar la estación. Puede ser suficiente el uso de materiales aislantes, como por ejemplo el poliuretano, combinado con madera para tratar de evitar que las variaciones de temperatura del exterior se transmitan al magnetómetro, o puede ser necesario instalar un sistema de control de temperatura mediante calentadores no magnéticos controlados por un termostato que permita elevar la temperatura de la sala con una precisión de hasta 0,5 °C. En cualquier caso, la solución óptima es la combinación de ambos. En el caso de instalar un sistema de calefacción, debe elegirse uno con materiales no magnéticos y que no produzca interferencias electromagnéticas y elegir su disposición ideal. El termostato, que suele ser de materiales magnéticos debe situarse lejos del sensor, preferiblemente en la sala de control o junto a la instalación eléctrica. La temperatura de control elegida debe estar siempre por encima de la temperatura media en el exterior, de manera que siempre sea posible alcanzarla elevando la temperatura, y debe ajustarse a la época del año, elevándola en tiempos de calor y bajándola en tiempos de frío, evitando así el uso excesivo del sistema de calefacción y reduciendo el consumo de energía, importante si se utilizan sistemas de energía solar.

Se debe tener especial cuidado en que todos los materiales utilizados sean no magnéticos, si se tiene dudas de alguno, se puede realizar una comprobación acercando un pequeño bloque de material al magnetómetro y comprobando si provoca alguna perturbación en la medida. En términos generales si a una distancia de 0,5 m del sensor se produce una variación de menos de 1 nT es válido.

Sala de control

La sala de control donde se sitúa el resto del equipo, principalmente un conversor A/D y un PC, debe ser un lugar fácilmente accesible para la persona o las personas encargadas de controlar el correcto funcionamiento del sistema o llevar a cabo diferentes tareas. Puede ser una construcción o simplemente una pequeña caseta. Debe estar protegida de la intemperie y con cierto control térmico, ya que el equipo puede tener afecciones por la deriva de la temperatura, aunque estas suelen ser menores que las de los variómetros, por lo que el uso de materiales aislantes incluso de sistemas de control de la temperatura puede ser necesario. Se recomienda que la distancia con la sala de variómetros sea de docenas de metros.

Instalación eléctrica

Todos los equipos involucrados en el sistema necesitan su correspondiente alimentación, por lo que la disponibilidad de un punto de acceso a la red eléctrica es un hándicap importante a la hora de seleccionar la ubicación. No solo se debe de alimentar debidamente los equipos, sino que, se debe de asegurar la continuidad en la adquisición de los datos, por lo que, si se depende únicamente del sistema eléctrico, la continuidad en las grabaciones está ligada al suministro de energía. Por este motivo, o si no se dispone de acceso a la red eléctrica, un sistema basado en placas solares y baterías puede ser una solución, incluso ventajoso para no depender del suministro de una empresa eléctrica. La combinación de ambos medios de obtención de energía eléctrica puede ser una solución ideal, de manera que, si se produce un corte en el suministro eléctrico, el sistema de placas solares actúe como suministro secundario, asegurando la continuidad en la toma de datos. Si se opta por la alimentación solar, las placas y las baterías se deben diseñar realizando un análisis de la potencia requerida por el equipo.

De cualquier modo, la instalación eléctrica se debe situar lo suficientemente alejada del magnetómetro y de la sala principal (ver Imagen 56)

6.2 Propuesta de ubicación

En base a todos los aspectos desarrollados en este capítulo y en los anteriores, en este apartado se realiza una propuesta de donde y como, tras llevar a cabo de manera practica la fase 2, instalar el magnetómetro y el resto del sistema de manera definitiva, preparando la ubicación y la instalación en base a los conceptos que se han ido exponiendo en este capítulo de una manera teórica.

La ubicación elegida para realizar esta propuesta es un terreno de alrededor de 47 hectáreas, situado entre el parque tecnológico del campus y el centro penitenciario de Meco ya que, por pertenecer al entorno de la Universidad de Alcalá, podría facilitar los trámites entre el grupo Space Weather (SWE), y la Universidad de Alcalá, de la que depende, para la disposición de una parte del terreno donde instalar el sistema. Además, el mantenimiento estaría facilitado por su cercanía a la facultad de ciencias, donde el grupo desarrolla su actividad.

Latitud: 40°31'9.66" N
Longitud: 3°20'11.07" O

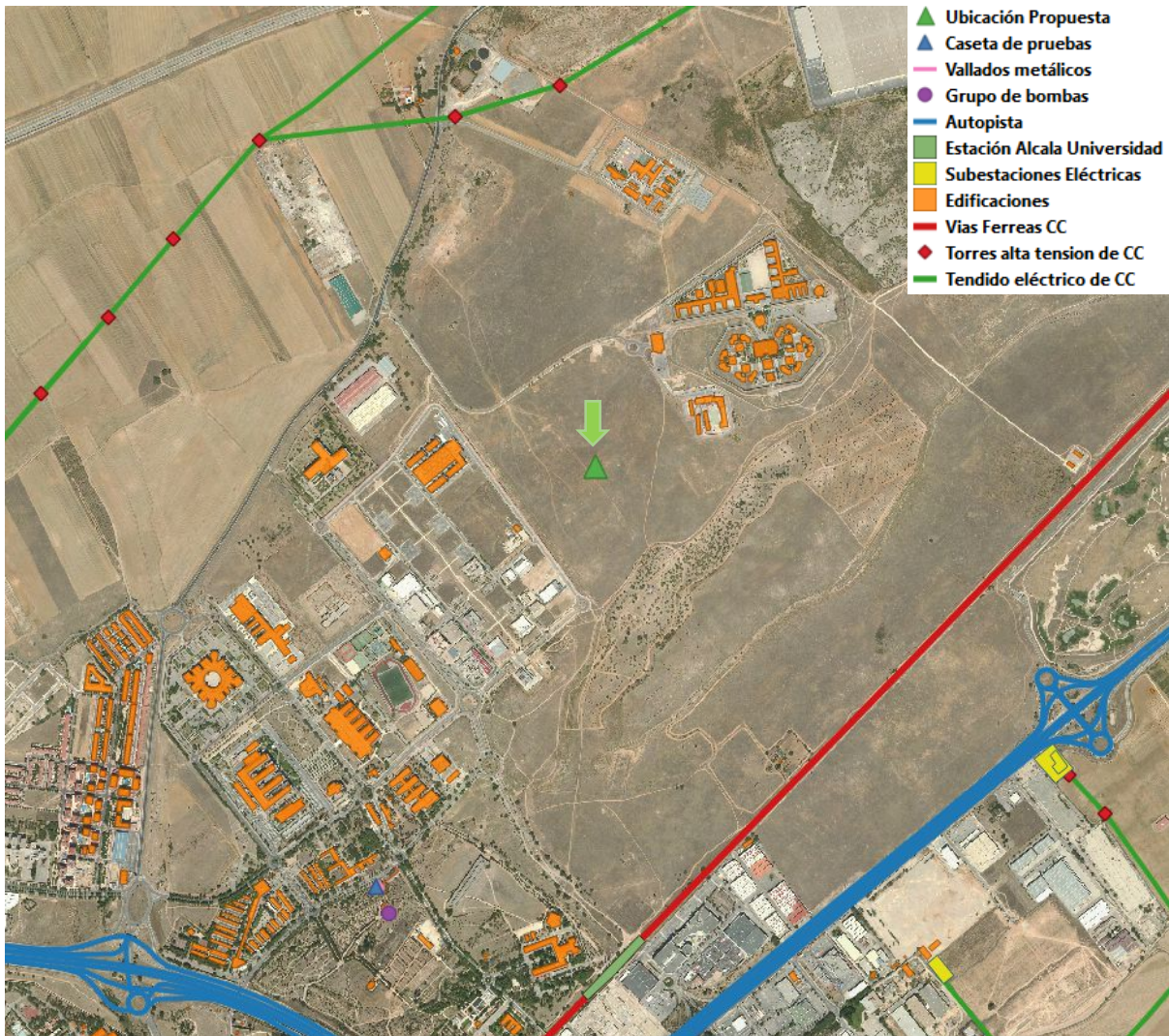


Imagen 57 - Vista aérea de la ubicación propuesta y su entorno, donde se marcan con capas del IGN y símbolos (ver leyenda en esquina superior derecha de la imagen) las posibles fuentes de ruido.

Esta ubicación presenta, a priori, mejores condiciones respecto a la distancia con el tren y con la línea de alta tensión señaladas como principales fuentes de ruido en la ubicación de pruebas durante el desarrollo de la fase 1. La distancia con el tren es de 1.2 km, el doble de distancia que, en la ubicación de pruebas, y con la línea de alta tensión es de 1,15 km, algo menor que en la situación de pruebas. Además, se mantiene un radio de 400m sin edificaciones y sin circulación de vehículos ni tránsito de personas.

Pese a que la ubicación no proporciona las mejores condiciones, ya que sería preferible situar el sistema a una distancia mayor de vías ferroviarias electrificadas y líneas de alta tensión de corriente continua, que aseguren un ambiente totalmente libre de ruido, puede ser una localización donde obtener datos con menor nivel de ruido y con una calidad suficiente para su uso en trabajos de Meteorología Espacial, con la comodidad de estar en el entorno de la Universidad.

Es necesario realizar pruebas de una manera similar a las que se han llevado a cabo en la fase 1 para determinar si se pueden obtener datos de suficiente calidad en esa localización o en su defecto, estudiar en profundidad si el nivel de ruido es suficientemente bajo como para aplicar algún método de reducción de ruido como, por ejemplo, los comentados en el capítulo 4, que haga válidos los datos.

Para la instalación del sistema se propone la siguiente construcción, en base a un equilibrio entre alcanzar las mejores condiciones para la toma de datos geomagnéticos y la inversión económica necesaria:

Realizar una cavidad en el suelo de entre 1 y 2 metros de profundidad y recubrir las paredes con cemento u otro material no magnético con una capa de cierto grosor que asegure estabilidad mecánica y añadiendo un recubrimiento de material aislante térmico en la base y en las paredes para reducir la transferencia de temperatura por contacto con el suelo. Construir un pequeño pilar en el centro, con una base de madera perfectamente nivelada donde poder fijar el sensor y marcando en esta las direcciones N-S para facilitar la orientación del sensor. Para cubrir y sellar la cavidad se puede construir una tapa de madera forrada con materiales aislante de suficiente grosor que ajuste con las paredes de la cavidad. Para proteger la cavidad del sol directo, el agua de la lluvia y de la transmisión de temperatura con el aire por convección se puede situar cubriendo la cavidad una pequeña caseta prefabricada de madera o resina, o construirla con madera u otro material, cubierta con material aislante por las paredes, el techo y el suelo que permita el acceso a la cavidad. Se debe asegurar que agua a los alrededores pueda fluir alejándose, evitando que quede estancada y se filtren grandes cantidades de agua a la Tierra limítrofe con la estructura de la cavidad. Si fuese necesario, instalar un sistema no magnético de calefacción tras un análisis de su localización ideal para que este sea efectivo y no afectar al sensor, situando el termostato o el sistema de acción junto con el resto del equipo que se debería de situar a 10m o más, en un lugar que lo proteja de la intemperie y proporcione cierto aislamiento térmico, por ejemplo, un armario de resina o de madera debidamente recubierto con material aislante (ver Imagen 58).

Se desconoce si existe en el terreno algún punto de acceso a la red eléctrica disponible para su uso, por lo que es posible que el uso de un sistema de alimentación mediante placas solares sea necesario en esta ubicación. No se entrará en el detalle de su diseño. Este sistema junto con los transformadores correspondientes para adecuar la potencia necesaria por cada instrumento debería estar situado a una distancia de al menos 10 metros del magnetómetro.

Este planteamiento solo pretende aportar una idea o ejemplo sobre la instalación, que siempre deberá adaptarse a las condiciones del terreno y al presupuesto económico para llevarlo a cabo, en esta o en cualquier otra localización.

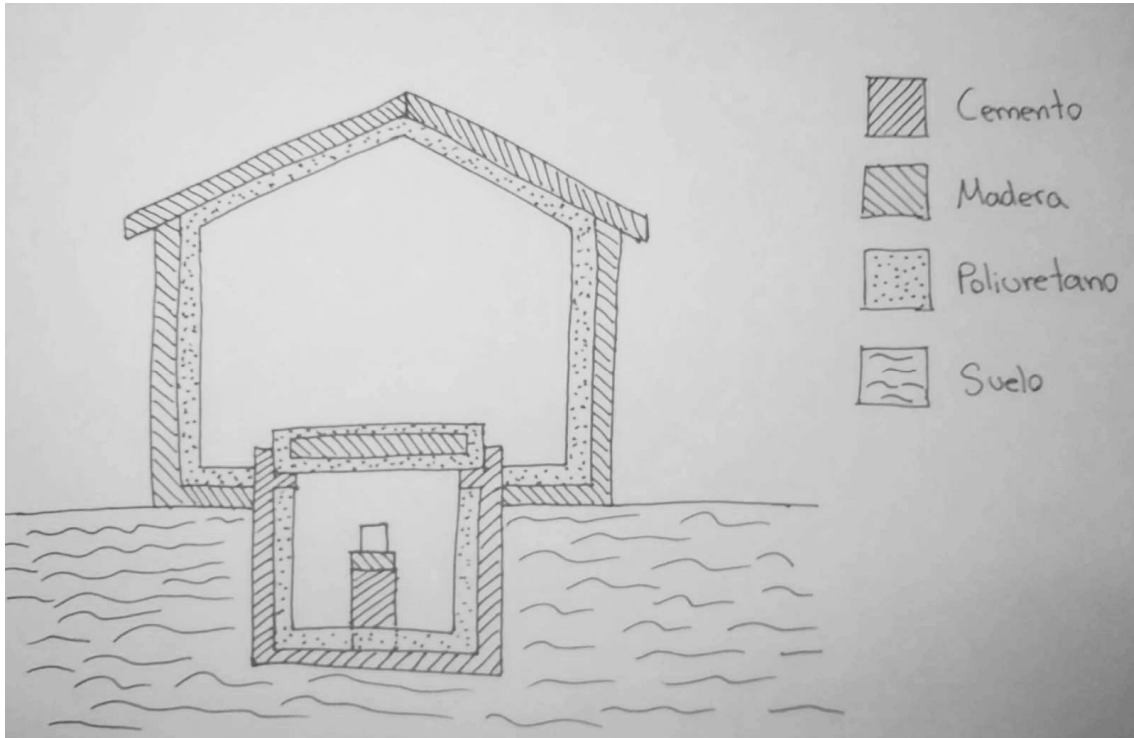


Imagen 58 – Representación esquemática a mano alzada de la construcción propuesta, con algunos materiales a modo de ejemplo.

Capítulo 7. Futuro del proyecto

Tras finalizarse el desarrollo e implementación de la fase 1, el futuro del proyecto pasa por completar de manera práctica las fases 2 y 3 en base a lo expuesto de manera teórica en los capítulos 5 y 6 del presente documento.

Incluso tras finalizar la fase 3, algunos aspectos o mejoras que no se han tratado en este proyecto quedan pendientes por realizar como son los que a continuación se nombran:

- La transmisión de datos de manera automática, de manera que no sea necesario desplazarse hasta la ubicación del equipo para descargar los datos de manera manual y se pueda disponer de los datos registrados por el magnetómetro en tiempo cuasi real con algunos de los métodos con los que cuenta el PC MAGREC-4B, que precisan de conexión a internet o mediante módulos de transmisión vía radio gobernados mediante un microcontrolador.
- Una mejora interesante es trazar una línea paralela de investigación sobre la manera de hacer la estación totalmente autónoma, algo en lo que ya trabajan otras instituciones especializadas en geomagnetismo. De esta manera las estaciones son completamente autónomas y se dispone de datos válidos, sin la necesidad de intervención humana. Estos son requeridos para comprobar que, por ejemplo, el sistema mantiene la orientación y la nivelación. Esto se podría realizar a través de un sistema de control diseñado en función de las condiciones ideales para tomar medidas (orientación, nivelación, temperatura, etc.) y con diferentes sensores que detecten estas variables de manera que pueda actuar sobre ellas de manera automática cuando sea necesario para mantenerlas en todo momento dentro de unos valores predeterminados.
- Otro aspecto interesante es diseñar software que evalúe de manera continuada los valores obtenidos para, por ejemplo, detectar posibles errores en el equipo o el sistema de control, detectar ruido puntual en las medidas o realizar alertas de tormentas en tiempo real. Estas tareas forman parte de la evolución en la toma de datos geomagnéticos que surgen de la mano del avance del conocimiento y la técnica y tecnología.

Capítulo 8. Conclusiones

Pese a quedar aún trabajo por delante para tener la estación geomagnética en funcionamiento ordinario, los resultados de este proyecto y en especial a través del desarrollo de la fase 1 del mismo, dejan constancia de la validez del sensor para medir la variación de campo geomagnético para su uso en Meteorología Espacial y específicamente para su uso por parte del grupo Space Weather (SWE) de la UAH.

Además, se ha puesto de manifiesto la importancia de un entorno electromagnético “limpio”, libre de perturbaciones que, principalmente, tienen su origen en la actividad humana, y de la importancia que tiene un control más exhaustivo de la variación de la temperatura del magnetómetro. Esto ha llevado a la conclusión de que la localización de pruebas, el Real Jardín Botánico Juan Carlos I, no es una localización adecuada para la estación geomagnética. En dicha localización se han registrado datos con ruido de gran amplitud en la componente vertical principalmente, aunque también en cierta medida en las horizontales. El ruido se debe principalmente a su cercanía al ferrocarril impulsado por corriente continua.

Pese a esto, los buenos resultados registrando una tormenta geomagnética provocada por agujero coronal en los últimos días de Agosto y primeros de Septiembre de 2019 junto con el hecho de observar periodos de “silencio del ruido” en los datos, demuestran la capacidad del sistema y motivan la continuación del proyecto para la implementación de las fases 2 y 3 del mismo. Para estos trabajos futuros se espera que lo expuesto de una manera teórica en este trabajo, sea de gran utilidad para su implementación final.

Bibliografía

- Cid Tortuero, C., Saiz Villanueva, E., Guerrero Ortega, A., Palacios Hernández, J., & Cerrato Montalbán, Y. (2015). A Carrington-like geomagnetic storm observed in the 21st century.
- Chandrasekhar, N. P., Potharaju, S. V. K., Arora, K., Kasuba, C. S. R., Rakhlin, L., Tymoshyn, S., ... & Khomutov, S. (2017). One second vector and scalar magnetic measurements at the low-latitude Choutuppall (CPL) magnetic observatory. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 6(2), 547.
- Denardini, C. M., Da Silva, M. R., Gende, M. A., Chen, S. S., Fagundes, P. R., Schuch, N. J., & Sant'Anna, N. (2015). The initial steps for developing the South American K index from the Embrace Magnetometer Network. *Brazilian Journal of Geophysics*, 33(1), 79-88.
- Denardini, C. M., Chen, S. S., Resende, L. C. A., Moro, J., Bilibio, A. V., Fagundes, P. R. & Schuch, N. J. (2018). The embrace magnetometer network for South America: First scientific results. *Radio Science*, 53(3), 379-393.
- INTERMAGNET (2012). Technical Reference Manual. Versión 4.6
- Jankowski, J., & Sucksdorff, C. (1996). *Guide for magnetic measurements and observatory practice* (p. 235). Warsaw: International Association of Geomagnetism and Aeronomy.
- Khomutov, S. Y., Mandrikova, O. V., Budilova, E. A., Arora, K., & Manjula, L. (2017). Noise in raw data from magnetic observatories. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 6(2), 329-343.
- Korepanov, V., & Berkman, R. (1999). Fluxgate magnetometer noise: theoretic and experimental study Measurements for a Sustainable Future. In *Proc. 3rd Biennial Conf. MSA99 (Sydney, Australia)* (pp. 41-4).
- Lowes, F. J. (2009). DC railways and the magnetic fields they produce - the geomagnetic context. *Earth, planets and space*, 61(8), i-xv.
- Margiono, R., & Yusuf, M. (2014). On the influence of dc railway noise on variation data from tangerang geomagnetic observatories. In *International Conference On Applied Electromagnetic Technology*.
- Maule, C. F., Thejll, P., Neska, A., Matzka, J., Pedersen, L. W., & Nilsson, A. (2009). Analyzing and correcting for contaminating magnetic fields at the Brorfelde geomagnetic observatory due to high voltage DC power lines. *Earth, planets and space*, 61(11), 1233-1241.
- Miguel Herraiz, Benito A. de la Morena, Joan Miquel Torta, Manuel Catalán, Juan José Curt, Alicia García, José Manuel Martínez Solares, Isabel Socías, Juan José Villalain. (2014). Libro blanco. Geomagnetismo y aeronomía. INTA. *Catálogo general de publicaciones oficiales*.

- Neska, A, Reda, J., Neska, M., & Sumaruk, Y. (2013). On the influence of DC railway noise on variation data from Belsk and Lviv geomagnetic observatories. *Acta Geophysica*, 61(2), 385-403.
- Newitt, L R., Barton, C. E., & Bitterly, J. (1996). *Guide for magnetic repeat station surveys* (Vol. 325). Boulder, CO: International Association of Geomagnetism and Aeronomy.
- Newitt, L R., Barton, C. E., & Bitterly, J. (1996). *Guide for magnetic repeat station surveys* (Vol. 325). Boulder, CO: International Association of Geomagnetism and Aeronomy.
- Pirjola, R., Newitt, L., Boteler, D., Trichtchenko, L., Fernberg, P., McKee, L., ... & Van Beek, G. J. (2007). Modelling the disturbance caused by a dc-electrified railway to geomagnetic measurements. *Earth, planets and space*, 59(8), 943-949.
- Santarelli, L., Palangio, P., & De Lauretis, M. (2014). Electromagnetic background noise at L'Aquila geomagnetic observatory. *Annals of Geophysics*, 57(2), 0211.
- Sarachaga, M. H., Caderot, G. R., Bouza, M. R., Bilbao, I. R., Dulcet, F. S., Monge, B. M., ... & Menéndez, J. E. (2014). Estudio de las tormentas geomagnéticas y evaluación de su impacto en el ámbito de las tecnologías e infraestructuras en España y Portugal Riesgos naturales. *Riesgos naturales seguridad y medio ambiente* (133).
- Torta, J. M. (2011). Una visión sobre el estado actual de la investigación en Geomagnetismo. *Revista Española de Física*, 17(6).
- Torta, J. M. (2010). *Geomagnetismo Tendencias actuales y retos futuros*. UCM.
- Villante, U., Vellante, M., Piancatelli, A., Di Cienzo, A., Zhang, T. L., Magnes, W., ... & Meloni, A. (2004, April). Some aspects of man-made contamination on ULF measurements. In *Annales Geophysicae* (Vol. 22, No. 4, pp. 1335-1345).
- Villanueva, E. S., Tortuero, C. C., & Montalbán, Y. C. (2007). La meteorología espacial. *Física y sociedad*, (18), 35-38.
- Wienert, K. A. (1970). Notes on geomagnetic observatory and survey practice. *UNESCO Earth Sciences*, 5.

Agradecimientos a ilustraciones y datos

Se ha usado información obtenida de National Aero Space Agency, NASA. (Agosto de 2019).
Solar Storms and Space Weather.

https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/spaceweather/index.html#q13

Se han usado ilustraciones obtenidas de National Aero Space Agency, NASA. (Agosto de 2019).

<https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/index.html>

Se han usado ilustraciones e información obtenidas de Space Weather Prediction Center-
National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA. (Julio de 2019). *Curren space
weather conditions on NOAA Scales.* swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation

Se han usado ilustraciones e información obtenidas de Instituto Geografico Nacional, IGN
(Junio de 2019). *Geomagnetismo y gravimetría.*

<https://www.ign.es/web/ign/portal/gmt-area-geomagnetismo>

Anexo I

```

1  import numpy as np
2  from pylab import *
3  from astropy.convolution import convolve, Box1DKernel
4  import os
5  cont = 'si'
6  g = 0
7  print("Este programa permite procesar, visualizar, almacenar y filtrar datos
8  geomagnéticos en formato IAGA-2002, con resolución de minuto o segundo.")
9  path = input("introduce la dirección de la carpeta de datos: ")
10 print("seleccione un modo escribiendo a, b o c: ")
11 print("a - Visualización de los datos")
12 print("b - Guardar datos")
13 print("c - Visualizar y guardar los datos")
14 modo = input("modo: ")
15 if modo=='b' or modo=='c':
16     out_graficas = input("introduce dirección de la carpeta de salida: ")
17     out_dir = str(out_graficas) + 'barra'
18     out_dir = out_dir.replace("barra", "\\--")
19     out_dir = out_dir.replace("--", "")
20 elif modo != 'a':
21     print("modo no valido")
22     modo = input("modo: ")
23 T = int(input("introduce el rango a mostrar en el eje Y (nT): "))
24 T=T/2
25 archivos = sorted(f for f in os.listdir(path))
26 obs = input("introduce las siglas del observatorio: ")
27 if obs == 'uah':
28     init_data_line = 16
29 elif obs == 'spt':
30     init_data_line = 20
31 else:
32     init_data_line = int(input("observatorio no registrado. Introduce el número de
33     línea donde comienza la cabecera de los datos: "))
34 inv = input("¿desea invertir los datos? (si/no): ")
35 if inv == 'si':
36     inversion = True
37 else:
38     inversion = False
39 offset_x = 0.0
40 offset_y = 0.0
41 offset_z = 0.0
42 of = input("desea introducir offset en las componentes? (si/no): ")
43 if of == 'si':
44     offset_x = float(input("offset X: "))
45     offset_y = float(input("offset Y: "))
46     offset_z = float(input("offset Z: "))
47 if archivos[0][16:19] == 'sec':
48     fil = input("¿desea aplicar filtro de ventana móvil a los datos y promediar a
49     resolución de 1 minuto? (si/no): ")
50 if fil == 'si':
51     filtrar = True
52 else:
53     filtrar = False
54 if filtrar == True:
55     wx = int(input("introduce el valor de ventana de la componente X (s): "))
56     wy = int(input("introduce el valor de ventana de la componente Y (s): "))
57     wz = int(input("introduce el valor de ventana de la componente Z (s): "))
58 else:
59     wx=wy=wz='No aplica'
60 print("##### INFORMACION DEL PROCESO #####")
61 print()
62 print("modo: ", modo)
63 print("archivo de entrada: ", data)
64 print("inversion de datos: ", inv)

```

```

69     print("offset en la componente X: ", offset_x)
70     print("offset en la componente Y: ", offset_y)
71     print("offset en la componente Z: ", offset_z)
72     print("valor de ventada para componente X: ", wx)
73     print("valor de ventada para componente Y: ", wy)
74     print("valor de ventada para componente Z: ", wz)
75     print()
76     print("Procesando...")
77     ##### adaptar fichero de entrada #####
78     doc = open(data, 'r')
79     lineas = doc.readlines()
80     doc.close()
81     data_edit = open('edit_' + archivos[g], "w")
82     line = '0'
83     for i in range(len(lineas)):
84         if i >= init_data_line:
85             data_edit.write(lineas[i])
86
87     data_edit.close()
88     data = 'edit_' + archivos[g]
89     del line
90     del lineas
91     ##### extraer valores de X, Y, Z del fichero de entrada #####
92     document = open(data, 'r')
93     array=[]
94     line='0'
95     for line in document:
96         array.append(line.split())
97
98     document.close()
99     a=np.array(array)
100    b=np.array([np.array(xi) for xi in a])
101    x=[]
102    y=[]
103    z=[]
104    for i in range(len(b)):
105        x.append(b[i][3])
106        y.append(b[i][4])
107        z.append(b[i][5])
108    ##### invertir datos #####
109    for i in range(len(x)):
110        if inversion == True:
111            x[i]=(-x[i].astype(float))+offset_x
112            y[i]=(-y[i].astype(float))+offset_y
113            z[i]=(-z[i].astype(float))+offset_z
114        else:
115            x[i]=x[i].astype(float)+offset_x
116            y[i]=y[i].astype(float)+offset_y
117            z[i]=z[i].astype(float)+offset_z
118    h=[]
119    for i in range(len(x)):
120        h.append(math.sqrt((x[i]**2)+(y[i]**2)))
121    time = [i for i in range(len(x))]
122    ##### moving average filter #####
123    if filtrar == True:
124        print()
125        print("Aplicando filtro...")
126        zf = convolve(z,kernel=Box1DKernel(int(wz)))
127        xf = convolve(x,kernel=Box1DKernel(int(wx)))
128        yf = convolve(y,kernel=Box1DKernel(int(wy)))
129        xf[0:120]=x[0:120]
130        xf[len(xf)-120:len(xf)]=x[len(x)-120:len(xf)]
131        yf[0:120]=y[0:120]
132        yf[len(yf)-120:len(yf)]=y[len(x)-120:len(yf)]
133        zf[0:120]=z[0:120]
134        zf[len(z)-120:len(z)]=z[len(z)-120:len(z)]
135    ##### promediado de minuto de datos filtrados #####
136    ini=0
137    fin=60
138    suma=0
139    x_m=[]

```

```

140     y_m=[]
141     z_m=[]
142     f=1
143     for i in range(f*60*24):
144         gr = xf[ini:fin]
145         suma=0
146         for elemento in gr:
147             suma+=elemento
148         promedio=suma/60
149         x_m.append(promedio)
150         ini=ini+60
151         fin=fin+60
152     ini=0
153     fin=60
154     suma=0
155     for i in range(f*60*24):
156         gr = yf[ini:fin]
157         suma=0
158         for elemento in gr:
159             suma+=elemento
160         promedio=suma/60
161         y_m.append(promedio)
162         ini=ini+60
163         fin=fin+60
164     ini=0
165     fin=60
166     suma=0
167     for i in range(f*60*24):
168         gr = zf[ini:fin]
169         suma=0
170         for elemento in gr:
171             suma+=elemento
172         promedio=suma/60
173         z_m.append(promedio)
174         ini=ini+60
175         fin=fin+60
176     h_m=[]
177     i=0
178     for i in range(len(x_m)):
179         h_m.append(math.sqrt((x_m[i]**2)+(y_m[i]**2)))
180     ##### promediado de minuto de datos para comparar #####
181     ini=0
182     fin=60
183     suma=0
184     xm=[]
185     ym=[]
186     zm=[]
187     f=1
188     for i in range(f*60*24):
189         gr = x[ini:fin]
190         suma=0
191         for elemento in gr:
192             suma+=elemento
193         promedio=suma/60
194         xm.append(promedio)
195         ini=ini+60
196         fin=fin+60
197     ini=0
198     fin=60
199     suma=0
200     for i in range(f*60*24):
201         gr = y[ini:fin]
202         suma=0
203         for elemento in gr:
204             suma+=elemento
205         promedio=suma/60
206         ym.append(promedio)
207         ini=ini+60
208         fin=fin+60
209     ini=0
210     fin=60

```

```

211     suma=0
212     for i in range(f*60*24):
213         gr = z[ini:fin]
214         suma=0
215         for elemento in gr:
216             suma+=elemento
217         promedio=suma/60
218         zm.append(promedio)
219         ini=ini+60
220         fin=fin+60
221     hm=[]
222     for i in range(len(xm)):
223         hm.append(math.sqrt((xm[i]**2)+(ym[i]**2)))
224 ##### obtener media de cada componente para rango de eje Y #####
225     suma_x = suma_y = suma_z = suma_h = 0
226     for i in range(len(x)):
227         suma_x = suma_x + x[i]
228         suma_y = suma_y + y[i]
229         suma_z = suma_z + z[i]
230         suma_h = suma_h + h[i]
231     media_x = suma_x/len(x)
232     media_y = suma_y/len(x)
233     media_z = suma_z/len(x)
234     media_h = suma_h/len(x)
235 ##### mostrar resultados #####
236     if filtrar == True:
237         time = [i for i in range(len(xm))]
238         figure(1)
239         plot(time, xm, 'r-', label='original')
240         plot(time, x_m, '-', label='Filtrado')
241         xlabel('time')
242         ylabel('x (nT)')
243         title('X component filtered vs raw / 1-min variation data')
244         legend(loc='upper left')
245         ylim((media_x-T,media_x+T))
246         figure(2)
247         plot(time, ym, 'r-', label='original')
248         plot(time, y_m, '-', label='Filtrado')
249         xlabel('time')
250         ylabel('y (nT)')
251         title('Y component filtered vs raw / 1-min variation data')
252         legend(loc='upper left')
253         ylim((media_y-T,media_y+T))
254         figure(3)
255         plot(time, zm, 'r-', label='original')
256         plot(time, z_m, '-', label='Filtrado')
257         xlabel('time')
258         ylabel('z (nT)')
259         title('Z component filtered / 1-min variation data from')
260         legend(loc='upper left')
261         ylim((media_z-T,media_z+T))
262         figure(4)
263         plot(time, x_m, '-')
264         xlabel('time')
265         ylabel('X (nT)')
266         title('X component filtered based on 1-min variation data')
267         ylim((media_x-T,media_x+T))
268         figure(5)
269         plot(time, y_m, '-')
270         xlabel('time')
271         ylabel('Y (nT)')
272         title('Y component filtered based on 1-min variation data')
273         ylim((media_y-T,media_y+T))
274         figure(6)
275         plot(time, z_m, '-')
276         xlabel('time')
277         ylabel('Z (nT)')
278         title('Z component filtered based on 1-min variation data from')
279         ylim((media_z-T,media_z+T))
280         figure(7)
281         plot(time, hm, 'r-', label='original')

```

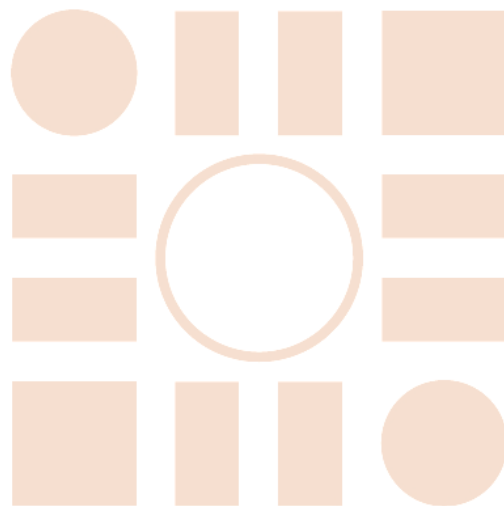
```

282     plot(time, h_m, '- ', label='filtrado')
283     xlabel('time')
284     ylabel('H (nT)')
285     title('H component filtered / 1-min variation data from')
286     legend(loc='upper left')
287     ylim((media_h-T,media_h+T))
288     figure(8)
289     plot(time, h_m, '- ')
290     xlabel('time')
291     ylabel('H (nT)')
292     title('H component filtered based on 1-sec variation data from')
293     ylim((media_h-T,media_h+T))
294
295     if modo == 'b' or modo == 'c':
296         figure(1).set_size_inches(8, 6)
297         plt.savefig(out_dir + "X_comp" + str(archivos[g][0:11]) + ".png", dpi =
150)
298         figure(2).set_size_inches(8, 6)
299         plt.savefig(out_dir + "Y_comp_" + str(archivos[g][0:11]) + ".png", dpi =
150)
300         figure(3).set_size_inches(8, 6)
301         plt.savefig(out_dir + "Z_comp" + str(archivos[g][0:11]) + ".png", dpi =
150)
302         figure(4).set_size_inches(8, 6)
303         plt.savefig(out_dir + "X_filtered_" + str(archivos[g][0:11]) + ".png",
dpi = 150)
304         figure(5).set_size_inches(8, 6)
305         plt.savefig(out_dir + "Y_filtered_" + str(archivos[g][0:11]) + ".png",
dpi = 150)
306         figure(6).set_size_inches(8, 6)
307         plt.savefig(out_dir + "Z_filtered_" + str(archivos[g][0:11]) + ".png",
dpi = 150)
308         figure(7).set_size_inches(8, 6)
309         plt.savefig(out_dir + "H_comp" + str(archivos[g][0:11]) + ".png", dpi =
150)
310         figure(8).set_size_inches(8, 6)
311         plt.savefig(out_dir + "H_filtered_" + str(archivos[g][0:11]) + ".png",
dpi = 150)
312     if modo == 'a' or modo == 'c':
313         show()
314     elif filtrar == False:
315         figure(1)
316         plot(time, x, '- ')
317         xlabel('time')
318         ylabel('X (nT)')
319         title('X component based on 1-min variation data from'+ ' '+ obs + " (" +
archivos[g] + ")")
320         ylim((media_x-T,media_x+T))
321         figure(2)
322         plot(time, y, '- ')
323         xlabel('time')
324         ylabel('Y (nT)')
325         title('Y component based on 1-min variation data from'+ ' '+ obs + " (" +
archivos[g] + ")")
326         ylim((media_y-T,media_y+T))
327         figure(3)
328         plot(time, z, '- ')
329         xlabel('time')
330         ylabel('Z (nT)')
331         title('Z component based on 1-min variation data from'+ ' '+ obs + " (" +
archivos[g] + ")")
332         ylim((media_z-T,media_z+T))
333         figure(4)
334         plot(time, h, '- ')
335         xlabel('time')
336         ylabel('H (nT)')
337         title('H component based on 1-sec variation data from'+ ' '+ obs + " (" +
archivos[g] + ")")
338         ylim((media_h-T,media_h+T))
339
340     if modo == 'b' or modo == 'c':

```

```
341         figure(1).set_size_inches(8, 6)
342         plt.savefig(out_dir + "X_" + str(archivos[g][0:11]) + ".png", dpi = 150)
343         figure(2).set_size_inches(8, 6)
344         plt.savefig(out_dir + "Y_" + str(archivos[g][0:11]) + ".png", dpi = 150)
345         figure(3).set_size_inches(8, 6)
346         plt.savefig(out_dir + "Z_" + str(archivos[g][0:11]) + ".png", dpi = 150)
347         figure(4).set_size_inches(8, 6)
348         plt.savefig(out_dir + "H_" + str(archivos[g][0:11]) + ".png", dpi =
150)
349     if modo == 'a' or modo == 'c':
350         show()
351
352     print("##### FIN DEL PROCESO #####")
353     print("archivo tratado: ", archivos[g])
354
355     g=g+1
356     if g == (len(archivos)):
357         cont = 'no'
358         print("<< desarrollado por Emilio Dominguez >>")
359         print(".....2019.....")
360     else:
361         cont = 'si'
362
363
```

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR



Universidad
de Alcalá