



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
MÉRIDA ESTADO MÉRIDA

---

“El tensor relativista  $T_{ij}$  de energía impulso como precursor sísmico no convencional usado en la predicción de grandes terremotos”.

[Una Propuesta Experimental]

---

Trabajo Especial de Grado como requisito para optar al  
Título de Licenciado en Física

**Autor:** Br. Ignacio Andrés Agustí Córdoba

**Tutor:** Dr. Misael D. Rosales

*A mi familia, especialmente a mis padres y mi hermana menor, sin su apoyo, este proyecto hubiera sido imposible.*

*Al profesor Misael, por su infinita paciencia y oportunidad de trabajar en este proyecto como mi primera aproximación a la investigación científica.*

*A mi amigo Matias, que me acompaña y motivo toda la carrera de física.*

*A mi novia, Nathaly.*

*A todos los colegas que se interesaron el proyecto y dieron sus correcciones para hacer de este un mejor trabajo.*

---

**El tensor relativista  $T_{ij}$  de energía impulso  
como precursor sísmico no convencional  
usado en la predicción de grandes terremotos  
[ Una propuesta experimental ]**

Los dos seminarios de tesis fueron realizados en forma virtual a través de una presentación grabada, estas presentaciones fueron enviadas al jurado junto con el documento de la tesis, debido a que la pandemia generada por el COVID-19 no permitió cumplir con el protocolo de presentación estándar que exige el Departamento de Física de la Universidad de los Andes.

Primer seminario: Discusión sobre precursores sísmicos.

Enlace: <https://youtu.be/hXliAecEicY>

Segundo seminario: Propuesta y metodología a un precursor sísmico no convencional.

Enlace: [https://youtu.be/\\_J1YCQqZxL0](https://youtu.be/_J1YCQqZxL0)

Repositorio de github: <https://github.com/IgnacioAgusti/Tesis>

Vídeo de la defensa de tesis: <https://youtu.be/vEdkWgwPoa8>

**Jurados:**

Prof. Martin Rengifo

martinrgf@gmail.com

Prof. Juan Carlos Villegas

vjuanc.b@gmail.com

**Jurado suplente:**

Prof. Jhon Ferreira

jdferreira1@protonmail.com

---

# Resumen

Los Sistemas de Alerta Temprana en terremotos conforman hoy día un gran reto científico y tecnológico, las exigencias en cuanto a reproducibilidad y robustez de éstos disminuye abruptamente el número de precursores estándares válidos. El planteamiento general sobre el tema de nuevos precursores ó *Precursores Sísmicos no convencionales*, debe estar orientado a estudiar por ejemplo, la posibilidad potencial de evidenciar alguna correlación entre las variaciones locales del campo geomagnético terrestre y la ocurrencia temprana de un episodio sísmico. Dado que las variaciones locales de las componentes del campo antes, durante y después de un episodio sísmico se enmascaran con el ruido instrumental y urbano medido por las sondas electromagnéticas (magnetómetros), con lo que se hace imposible rescatar alguna señal precursora aceptable, hecho éste demostrado por un gran número de instituciones, quienes ven cada vez menos probable la idea de usar este procedimiento en el ámbito de predicción sísmica. Sin embargo, en esta investigación se plantea retomar esta metodología ahora desde un punto de vista relativista. La transformación relativista de los campos eléctricos y magnéticos a un sistema de referencia inercial que se mueve a velocidades cercanas a la velocidad de la luz, ofrece una ventaja cuantitativa que se manifiesta no solo con una magnificación de los efectos locales dependientes del factor  $\gamma$  de Lorentz, sino que además ofrece la posibilidad de combinar éstos en una estructura matemática única. Proponiendo utilizar las componentes del tensor de energía impulso  $T_{ij}$  como un precursor sísmico plausible, basándonos en una validación "off line" de eventos sísmicos ya ocurridos. Las bases conceptuales y metodológicas se sustentan pues en interpretar y medir las componentes de  $T_{ij}$  como cantidades físicas medibles, tales como la velocidad de arrastre de partículas cargadas y la presión de radiación, a partir de mediciones experimentales de campo geomagnético llevadas a cabo por la red mundial INTERMAGNET de medición de campo geomagnético. En este trabajo se estudiaron las siguientes regiones: Japón, Europa, Norteamérica, Rusia y Perú, usando un total de 11 estaciones geomagnéticas y analizando aproximadamente 50 años de datos entre todas las estaciones geomagnéticas, se usaron curvas ROC para analizar la capacidad del precursor propuesto en esta investigación para predecir un evento y determinar si existe algún grado de correlación entre la señal precursora y grandes eventos sísmicos ( $>6M$ ) ubicados en las cercanías de las estaciones ( $<1200\ km$ ), se encontró una razón de verdaderos positivos del  $(60 \pm 3)\%$  RVP y una razón de falsos positivos del  $(40 \pm 4)\%$  RFP para un umbral para  $(> 3\sigma)$  con respecto a la desviación estándar de los resultados, con un índice AUC promedio de 0.67 AUC usando ventana de 120 días antes de los eventos sísmicos para realizar el estudio.

**Palabras claves:** Precursor sísmico, terremotos, predicción, muones, relatividad especial.

# Abstract

Early Warning Systems in earthquakes today constitute a great scientific and technological challenge, the demands in terms of reproducibility and robustness of these abruptly decrease the number of valid standard precursors. The general approach on the subject of new precursors or *Unconventional Seismic Precursors* should be aimed at studying, the possibility of showing some correlation between the local variations of the geomagnetic field and the occurrence of a seismic event. Since the local variations of the field components before, during and after a seismic episode are masked by the instrumental and urban noise measured by the electromagnetic probes (magnetometers), it is difficult to rescue any acceptable precursor signal, this fact is hinted by institutions specialized in the subject, who see the idea of using this procedure in the field of seismic prediction less and less likely. However, in this research, it is proposed to return to this methodology but this time from a relativistic point of view. The relativistic transformation of electric and magnetic fields to an inertial reference frame moving at speeds close to the speed of light, offers a quantitative advantage that manifests itself not only with a magnification of the local effects dependent on the Lorentz factor ( $\gamma$ ), it also offers the possibility of combining these into a single mathematical structure. We propose to use the components of the impulse energy tensor  $T_{ij}$  as a plausible seismic precursor, based on an offline validation of already occurred seismic events. The conceptual and methodological bases are therefore based on interpreting and measuring the components of  $T_{ij}$  as measurable physical quantities, such as the drift speed of charged particles (based on its relationship with the Poyting vector) and the pressure of radiation, from experimental measurements of the geomagnetic field carried out by the worldwide INTERMAGNET geomagnetic field measurement network. In this work the following regions were studied: Japan, Europe, North America, Russia and Peru, using a total of 11 geomagnetic stations and analyzing approximately 50 years of data, ROC curves were used to analyze the ability of the precursor proposed in this research to predict an event and determine if there is any degree of connection between the precursor signal and large seismic events ( $>6M$ ) located in the vicinity of the stations ( $<1200\ km$ ), we found a ratio of true positives of  $(60 \pm 3)\%$  TPR and a false positives ratio of  $(40 \pm 4)\%$  TNR for a threshold at ( $> 3\sigma$ ) with respect to the standard deviation, with an average AUC index of 0.67 AUC using a window of 120 days before the seismic events to carry out the study.

**Keywords:** Seismic precursor, earthquakes, prediction, muons, special relativity.

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>4</b>
<b>Índice general</b>	<b>6</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>8</b>
<b>1. Planteamiento del problema</b>	<b>12</b>
1.0.1. Objetivos generales y específicos. . . . .	13
1.1. Preliminares y antecedentes. . . . .	13
1.1.1. Estado del arte: antecedentes generales. . . . .	13
1.1.2. Revisión general sobre precursores. . . . .	15
1.2. El campo magnético terrestre. . . . .	17
1.2.1. Mediciones típicas del campo magnético terrestre. . . . .	18
<b>2. Marco teórico</b>	<b>20</b>
2.1. Definiciones pertinentes. . . . .	21
2.1.1. La relatividad especial y los campos electromagnéticos. . . . .	21
2.1.2. El tensor energía impulso. . . . .	23
2.1.3. Radiación cósmica. . . . .	25
2.1.4. La velocidad de arrastre. . . . .	27
2.1.5. Precursores basados en flujo de partículas cargadas (muones). . . . .	28
2.1.6. Muones como detectores de campos electromagnéticos locales. . . . .	30
2.2. Construcción de la señal precursora. . . . .	31
2.2.1. Contribución del vector de Poynting y la velocidad de arrastre. . . . .	32
2.2.2. Contribución de la magnitud sísmica a la señal precursora. . . . .	33
2.2.3. Contribución al precursor debido a la distancia sismo-estación. . . . .	35
2.2.4. Contribución total a la señal precursora relativista. . . . .	36
2.2.5. Señales no correlacionadas con la señal precursora. . . . .	37
2.2.6. Discusión sobre la señal precursora relativista. . . . .	38
2.3. El disparador relativista sísmico. . . . .	42
2.4. Probabilidad de ocurrencia. . . . .	43
<b>3. Metodología general</b>	<b>45</b>
3.1. Detección y sustitución de espurios. . . . .	47
3.1.1. Criterio para la normalización de datos. . . . .	48
3.1.2. Discusión sobre el filtrado de datos. . . . .	49
3.2. Ruido sistemático asociado a la contribución solar al campo geomagnético. . . . .	49
3.3. Procesamiento de datos y descripción del algoritmo. . . . .	51
3.3.1. Procesamiento de datos. . . . .	51

3.3.2. Fase de calibración. . . . .	54
3.3.3. Fase de producción. . . . .	58
3.4. Procesos relacionados al análisis de resultados. . . . .	60
3.4.1. Curva ROC (Receiver Operating Characteristic Curve). . . . .	60
3.4.2. Eficiencia del precursor contra un precursor aleatorio. . . . .	63
<b>4. Resultados</b>	<b>65</b>
4.1. Europa, zona silente sísmica . . . . .	66
4.1.1. Revisión de silencio en el precursor vía calibración aleatoria. . . . .	68
4.1.2. Revisión de control, vía calibración y producción aleatoria. . . . .	69
4.2. Gran terremoto de Japón oriental . . . . .	73
4.2.1. Datos de entrada y parámetros del análisis. . . . .	73
4.2.2. Resultados del precursor. . . . .	76
4.2.3. Curva ROC y otros resultados estadísticos. . . . .	78
4.3. Norteamérica . . . . .	82
4.3.1. Datos de entrada y parámetros del análisis. . . . .	82
4.3.2. Resultados del precursor. . . . .	84
4.3.3. Curva ROC y otros resultados estadísticos . . . . .	88
4.4. Perú. . . . .	91
4.4.1. Datos de entrada y parámetros del análisis. . . . .	91
4.4.2. Resultados del precursor. . . . .	92
4.4.3. Curva ROC y otros resultados estadísticos . . . . .	95
4.5. Rusia, cerca del Mar de Ojotsk, estación PET. . . . .	98
4.5.1. Datos de entrada y parámetros del análisis. . . . .	98
4.5.2. Resultados del precursor. . . . .	100
4.5.3. Curva ROC y otros resultados estadísticos . . . . .	102
4.6. Japón, estación KAK. . . . .	103
4.6.1. Resultados del precursor. . . . .	103
4.6.2. Curva ROC y otros resultados estadísticos. . . . .	105
4.7. Resultados de todas las zonas. . . . .	106
<b>Conclusiones</b>	<b>112</b>
<b>Discusiones</b>	<b>116</b>
4.7.1. Recomendaciones. . . . .	118
4.7.2. Investigaciones futuras. . . . .	118
4.8. Glosario . . . . .	119
4.9. Abreviaturas . . . . .	119
<b>A. Estaciones INTERMAGNET</b>	<b>123</b>
<b>B. Programas utilizados en MATLAB.</b>	<b>128</b>
B.1. Lee Data INTERMAGNET. . . . .	128
B.1.1. Limpia espurios . . . . .	129
B.1.2. Corrige saltos en los datos . . . . .	131
B.1.3. Porcentaje indices malos. . . . .	131
B.2. Estaciones INTERMAGNET. . . . .	131
B.3. Verifica Eficiencia para varios parámetros. . . . .	136
B.3.1. Data Geomagnética. . . . .	146
B.3.2. Programa General Precursores Relativistas. . . . .	147

B.3.3. Encuentra sismos sincronizados . . . . .	156
<b>B.4. Visualiza resultados . . . . .</b>	<b>158</b>
B.4.1. Tiempos óptimos de calibración . . . . .	158
B.4.2. Revisión de producción . . . . .	161
B.4.3. Visualización de calibración y producción . . . . .	164
B.4.4. Cálculo y visualización de curvas ROC . . . . .	170

# Índice de figuras

1.1.	Líneas de campo magnético en un material con imperfecciones.	17
1.2.	Histograma de las componentes de campo geomagnéticos y diagrama de componentes.	19
2.1.	Relaciones entre energía y velocidad respecto al factor de Lorentz.	21
2.2.	Interpretación usual de las componentes contravariantes del tensor energía-impulso.	23
2.3.	Presión y tensión en campos electromagnéticos.	24
2.4.	Flujo en función de la energía de los rayos cósmicos que llegan a la Tierra.	25
2.5.	Muones como detectores de anomalías geomagnéticas.	26
2.6.	Velocidad de arrastre en función de campos electromagnéticos.	27
2.7.	Propuesta esquemática de cambios en la variación de flujo local de muones.	29
2.8.	Esquema del montaje experimental para medir variación del flujo de muones.	29
2.9.	Suma acumulada de muones verticales en la región Mérida-Venezuela.	30
2.10.	Ejemplo de distintas distribuciones de curvas y sus áreas.	35
2.11.	Región de influencia electromagnética.	36
2.12.	Sistema de coordenadas general, estación geomagnética y evento sísmico.	37
2.13.	Componentes geomagnéticas sin procesar.	38
2.14.	Definición de la fase entre componentes $B_x, B_y, B_z$ .	39
2.15.	Señal precursora relativista con ondas simuladas $B_x, B_y, B_z$ .	40
2.16.	Derivadas parciales de señal precursora relativista.	41
2.17.	Derivadas parciales de señal precursora relativista.	41
2.18.	Relaciones entre la magnitud y umbral de medición.	43
3.1.	Mapamundi marcando la localización de las estaciones INTERMAGNET.	45
3.2.	Histograma de datos obtenidos de la plataforma IRIS.	46
3.3.	Ejemplo de histogramas y datos geomagnéticos (MMB).	47
3.4.	Muestra de datos de la estación Memambetsu(MMB).	48
3.5.	Tipos de variaciones del campo geomagnético al aplicar un análisis de serie temporal.	50
3.6.	Visualización 2D horaria en función del día del campo magnético y transformación.	52
3.7.	Metodología para crear un mapa horario de activación de la señal precursora.	53
3.8.	Metodología para crear un mapa binario y transformarlo vía kurtosis.	54
3.9.	Ejemplo de cálculo del precursor para una estación.	55
3.10.	Precursor para una zona horaria fija, ejemplo.	55
3.11.	Precursor para una zona horaria fija sin positivos.	56
3.12.	Precursor para una zona horaria fija.	56
3.13.	Eficiencia horaria para la fase de calibración.	57
3.14.	Señal precursora relativista por intervalo horario.	58
3.15.	Regiones horarias de activación para las estaciones KAK-KNY-MMB.	59
3.16.	Regiones horarias de activación para estaciones KAK-KNY-MMB combinadas.	59
3.17.	Ejemplo de creación de curva ROC.	61

3.18. Ejemplo de clasificación de señales para un umbral de discriminación arbitrario. . . . .	62
3.19. Ejemplo de curva ROC, calculada para la zona de Japón. . . . .	63
3.20. Comparación entre la PPV de la señal precursora y una PPV de una señal aleatoria. . . . .	64
 4.1. Mapamundi marcando la localización las regiones de estudio. . . . .	65
4.2. Localización geográfica de la zona, estaciones DOU, MAB y WNG. . . . .	66
4.3. Datos geomagnéticos de las estaciones DOU, MAB y WNG. . . . .	67
4.4. Señal precursora para varias gammas en zona silente Europea. . . . .	68
4.5. Señal precursora horaria zona Europea un gamma. . . . .	69
4.6. Señal precursora zona Europea. . . . .	70
4.7. Curva ROC, zona Europea. . . . .	71
4.8. Curva ROC, zona Europea. . . . .	71
4.9. Señal precursora comparada con aleatoria en Europa. . . . .	72
4.10. Densidad de energía en función de la magnitud en Europa. . . . .	72
4.11. Mapa sísmico de la zona Japón con las estaciones marcadas (KAK, KNY y MMB). . . . .	74
4.12. Histogramas de magnitud, año, distancia, etc., de sismos en la zona de Japón. . . . .	75
4.13. Datos geomagnéticos de las estaciones KAK, KNY y MMB. . . . .	76
4.14. Señal precursora, varios gammas, para la zona de Japón. . . . .	77
4.15. Amplitud del precursor para la zona de Japón en función del gamma. . . . .	77
4.16. Estudio del precursor antes y después del terremoto M9.1 en Japón. . . . .	78
4.17. Curvas ROC e índices AUC para Japón estudio señal precursora, 2004 - 2016. . . . .	79
4.18. Índice positivo de predicción (PPV) para las estaciones japonesas. . . . .	80
4.19. Comparación de precursor real y un precursor aleatorio para la región Japonesa. . . . .	81
4.20. $Q$ en función de la magnitud para la zona Japonesa. . . . .	81
4.21. Localización geográfica de las estaciones en Norteamérica y sismos cercanos. . . . .	82
4.22. Histogramas de la región Norteamericana. . . . .	83
4.23. Datos geomagnéticos de las estaciones NEW, SIT y VIC. . . . .	84
4.24. Señal resultante de las estaciones NEW, SIT y VIC. . . . .	85
4.25. Señal resultante de las estaciones NEW, SIT y VIC aislando 200 días antes y después. . . . .	86
4.26. Señal precursora en función del tiempo para las estaciones NEW, SIT y VIC. . . . .	86
4.27. Amplitud del precursor para la zona de Norteamérica en función del gamma. . . . .	87
4.28. Media de la señal precursora de estaciones NEW, SIT y VIC para varios gammas. . . . .	87
4.29. Curva ROC para el resultado Norteamericano y su respectivo índice AUC asociado. . . . .	88
4.30. Filtrado de magnitudes y días antes de la región de Norteamérica. . . . .	89
4.31. Comparación de precursor real y un precursor aleatorio para la región Norteamericana. . . . .	90
4.32. Densidad de energía en función de la magnitud para la región Norteamericana. . . . .	90
4.33. Mapa de los sismos en la región de estudio Perú, del 2002 al 2011. . . . .	91
4.34. Histogramas sísmicos (magnitud, año, distancia y profundidad) de la zona peruana. . . . .	92
4.35. Datos geomagnéticos de la estación HUA 2002-2011. . . . .	92
4.36. Señal precursora en la estación HUA, región peruana. . . . .	93
4.37. Señal precursora, Perú 2002-2011 y terremoto 8M. . . . .	94
4.38. Señal precursora relativista de estación HUA, antes y después del terremoto 8M. . . . .	94
4.39. Curvas ROC para Perú 2002-2011. . . . .	95
4.40. Varias curvas ROC e índices AUC para Perú 2002-2011. . . . .	96
4.41. Comparación de precursor real y un precursor aleatorio para la región peruana. . . . .	97
4.42. Índice de predicción positivo y porcentaje de sismos detectados para HUA. . . . .	97
4.43. Relación $Q$ en función de la magnitud para la región de Perú. . . . .	98
4.44. Mapa de la sismicidad adyacente a la estación PET. . . . .	99
4.45. Histogramas sísmicos (magnitud, año, distancia y profundidad) de cercanías a PET. . . . .	99

4.46. Datos geomagnéticos de la estación PET . . . . .	100
4.47. Señal precursora relativista para estación PET. . . . .	100
4.48. Señal precursora de la estación PET, centrada en evento aislado. . . . .	101
4.49. Amplitud del precursor para las cercanías a PET en función del gamma. . . . .	101
4.50. Curva ROC e índices AUC para estación PET. . . . .	102
4.51. Índice positivo de predicción para la estación PET. . . . .	102
4.52. Comparación de precursor real y un precursor aleatorio para estación PET. . . . .	103
4.53. Mapa de la proximidad a la estación KAK. . . . .	104
4.54. Resultados del precursor estación KAK. . . . .	104
4.55. Curva ROC para estación KAK. . . . .	105
4.56. Comparación de eficiencia real contra aleatoria en KAK. . . . .	106
4.57. Relación $Q(m)$ en función de la magnitud para todas las zonas estudiadas. . . . .	106
4.58. Curvas ROC e índice AUC de las mejores curvas ROC por región estudiada. . . . .	107
4.59. Amplitud del precursor en función del gamma a lo largo del tiempo para Japón. . . . .	107
4.60. Amplitud del precursor en función del gamma a lo largo del tiempo para Norteamérica. . . . .	108
4.61. Amplitud del precursor en función del gamma a lo largo del tiempo para la región de Perú. . . . .	108
4.62. Amplitud del precursor en función del gamma a lo largo del tiempo para PET. . . . .	109
4.63. Amplitud del precursor en función del gamma a lo largo del tiempo para KAK. . . . .	109
4.64. Probabilidad de activación en función del intervalo horario. . . . .	110
4.65. Media de las curvas ROC calculadas y comparación con zona de calibración Europea. . . . .	110
4.66. Valores AUC registrados de curvas ROC en función del gamma y comparación. . . . .	111

# Capítulo 1

## Planteamiento del problema

Los terremotos son fenómenos naturales que causan catástrofes. En el caso de los fenómenos de carácter climatológico, gracias a la predicción, el impacto se ha reducido considerablemente, en la meteorología al igual que en la sismología se ven involucrados gran cantidad de parámetros que dificultan la tarea de hallar un método fiable para predecir, con cierta precisión, fenómenos extremos. Sismos de clase 6M suceden en promedio 1 vez cada 2 días, en alguna parte del mundo, probablemente cerca del llamado Cinturón de Fuego. Mientras que terremotos catastróficos suelen ser en promedio uno al año. Estos últimos, siendo devastadores cuando suceden cerca de grandes ciudades, dejando miles de muertos, daños estructurales importantes y desestabilizando la economía mundial. Por eso se vuelve fundamental desarrollar un método para prevenir estos desastres. Sistemas modernos por ejemplo en Japón, permiten detectar la onda mecánica antes de impactar, dando algunos segundos para apagar las redes eléctricas o los trenes. Sin embargo los terremotos más grandes suelen pasar 1 vez cada 500 años y actualmente solo se tiene unos segundos de anticipación en zonas altamente instrumentadas.

*“La predicción sísmica, entendida como conocimiento del instante de ocurrencia de un terremoto, ha sido considerada como uno de los desafíos imposibles de la sismología, un mito del pasado y una utopía de la ciencia.”* (Alonso, 2012).

La predicción sísmica, entendida como un conocimiento previo al instante de ocurrencia de un terremoto es descrita por muchos como algo imposible, esta clase de investigaciones lleva más de 100 años en desarrollo, instituciones como QuakeFinder buscaron durante años precursores sísmicos relacionados a algún fenómeno electromagnético y no lograron concretar ningún resultado que pudiera ser considerado alentador, concluyendo que con la tecnología y técnicas actuales, no es posible plantear un precursor sísmico confiable que pudiera hacer predicciones significativas (Kappler et al. [15]).

*“Como fenómeno físico, regido por las leyes de la naturaleza, los terremotos deben de ser hasta cierto punto predecibles”* (Wyss, 2001).

La complejidad y el desconocimiento incrementan la dificultad para encontrar modelos fiables de predicción. El fenómeno sísmico es muy complejo, heterogéneo y altamente no lineal. En un trabajo publicado en el 2012 <sup>1</sup>, se propone la posibilidad de usar muones verticales como sondas geomagnéticas sensibles a perturbaciones locales en el campo, ubicando un detector, el cual es un tanque Cherenkov para estudiar el flujo de partículas a nivel del suelo. El trabajo muestra alteraciones en el flujo de muones con más de 2 GeV antes de un sismo de 4.2M en la localidad de Tucaní, el

---

<sup>1</sup>Villegas et al. [1]; Rosales et al. [2]; Padra et al. [3]

sismo ocurre a 32 km del detector. El trabajo también pone a prueba un modelo teórico para explicar dichas anomalías, usando la plataforma Geant4 para realizar una simulación del experimento, permitiendo reproducir condiciones del experimento y estudiar el efecto de distintas anomalías geomagnéticas sobre partículas cargadas, lanzadas desde una altura de 15 km, verticalmente, sobre el detector. Entre los resultados destaca que anomalías magnéticas del orden de los 40 nT causarían deflexiones medibles y que dichas deflexiones provocarían un cambio en la densidad de partículas en el suelo. Todo esto parece señalar a que el uso de partículas de altas energías, que interaccionan con el campo magnético terrestre, exaltan ciertos estados del campo geomagnético, los cuales, con la calibración adecuada, pueden sintonizarse para estudiar indirectamente variaciones magnéticas asociadas al estrés acumulado en una zona antes, durante y después de un evento sísmico.

### 1.0.1. Objetivos generales y específicos.

**Objetivo general:** Generar una metodología para transformar las componentes del tensor energía impulso  $T_{ij}$  en un potencial precursor no convencional que permita predecir grandes terremotos basándose en una validación “off line” de eventos sísmicos ya ocurridos.

#### Objetivos específicos:

- Seleccionar las mejores zonas para este estudio basándonos en criterios, tales como: sismicidad pronunciada, presencia de estaciones geomagnéticas y calidad de los datos.
- Descargar y filtrar datos sísmicos, por medio de la plataforma IRIS.
- Descargar, procesar y filtrar datos geomagnéticos locales usando la plataforma INTERMAG-NET.
- Estudiar la contribución de factores ambientales a la señal precursora.
- Estudiar la metodología propuesta en distintas zonas geográficas.
- Validar el precursor no convencional probando su eficiencia en generar predicciones estadísticamente útiles usando para ello la curva ROC.

## 1.1. Preliminares y antecedentes.

Los terremotos son fenómenos de la naturaleza, son la principal causa de cambios en el terreno en el planeta Tierra, sin embargo, a diferencia de otros fenómenos de la naturaleza, la investigación de precursor sísmicos tiene una especie de manto de misterio. Muchos expertos concuerdan en que la dificultad principal para predecir terremotos, es que a diferencia de otros fenómenos naturales como el clima o los volcanes, no podemos medir las presiones y tensiones que se acumulan en la roca y llevan al fenómeno sísmico, el acceso al sistema el cual se quiere estudiar para predecir un terremoto, es decir, la falla, es limitado, eso sin mencionar a las dimensiones físicas del problema, por eso tenemos que recurrir a procesos indirectos como la detección de gases radón, cambios en el campo magnético local o detecciones de anomalías de señales infrarrojas captadas desde satélites.

### 1.1.1. Estado del arte: antecedentes generales.

Un terremoto es la liberación repentina de tensión en el suelo. El Departamento de Sismología de la Universidad de Chile define un sismo como el proceso de generación de ondas y su posterior

propagación por el interior de la Tierra. El objetivo principal de la predicción y el estudio de los precursores sísmicos radica en minimizar el daño que dichos fenómenos repentinos puedan causar en zonas pobladas. La predicción de terremotos ha sido llamado el “Santo Grial” <sup>2</sup> de la sismología durante muchos años, investigaciones que mostraron cierto éxito en los últimos 100 años se han enfocado en el aspecto de la predicción de terremotos a través de diversos mecanismos, mientras que la predicción es el objetivo de estas investigaciones, el precursor es el “Grial”. La predicción de sismos es un estudio muy fenomenológico, el conocimiento y entendimiento empieza con el estudio del fenómeno mismo, la observación de las perturbaciones del campo magnético y su atribución al proceso de fallamiento asociado a los terremotos se remontan al Gran Terremoto de Lisboa de 1755 (aunque luego descartado dada las características de los instrumentos que detectaron la anomalía), desde entonces, diversos fenómenos eléctricos, eléctrico-resistivos y magnéticos se han atribuido a los cambios precursores en materia de esfuerzos que preceden a los terremotos. En una revisión histórica realizada por Geller [7] en el área de predicción de terremotos, se muestran y citan un amplio conjunto de investigaciones que revelan el espectro de éxitos y fracasos en la búsqueda de métodos y mecanismos relacionados con el área. Desde el casi polémico reporte de Masood (1995) donde afirma predecir de forma correcta la magnitud, localización y el momento de 3 terremotos, hasta algunas de las conclusiones de la revisión de Geller [7] el cual afirma que luego de 120 años de investigación falta un método empíricamente verificable que pueda ser catalogado como precursor antes de un terremoto importante. Enfoques más actuales (Conti et al. [34]) han señalado cierto éxito en el estudio de precursores como una técnica sofisticada en la predicción de terremotos, algunos revisados por Hough [9] donde se aclara que es un hecho que algunos sismos son de hecho predecibles, por ejemplo cuando se detecta un terremoto la réplica es bastante predecible, sin embargo, predecir cada uno de las siguientes réplicas sigue siendo tan complejo como lo es predecir el primer terremoto mencionado. Diversos equipos en varias partes del mundo como , por ejemplo, en Japón han detectado cierta regularidad en sismos de magnitudes 4.8-4.9 al noroeste de Japón, otras investigaciones más recientes encuentran cierto éxito detectando terremotos de magnitudes 5-6 sobre ciertas fallas en los océanos. Seguidamente, Hough [9] cataloga diferentes tipos de precursores que se siguen estudiando hasta el día de hoy, clasificándolos en algunas categorías generales

- Cambios hidrológicos o hidrogeoquímicos.
- Señales electromagnéticas.
- Cambios en las propiedades de la corteza terrestre.
- Cambios en los patrones de pequeños y medianos terremotos.
- Deformación anómala de la corteza.
- Anomalías en liberaciones de gas o calor en la falla.

Para hablar de predicción sísmica es indispensable definir primero con claridad el término predicción. Una definición demasiado estricta puede llevar a conclusiones drásticas que nos lleven a abandonar las metas que nos estamos planteando. Geller [7] utilizaron una definición que implicaba una ventana temporal demasiado estrecha, conduciéndoles a argumentos concluyentes que demostraban la imposibilidad de una predicción en esos términos debido al elemento de aleatoriedad que acompaña al fenómeno sísmico. Su afirmación “*los terremotos no son predecibles*” es consecuencia directa de su definición de predictibilidad. La cuestión que se plantea no es si los terremotos son o

---

<sup>2</sup>Santo Grial: Se conoce como Santo Grial al vaso místico o cáliz sagrado que fue utilizado por Jesucristo en la última Cena. El término grial es de origen latín gradalis o gratalis que significa ‘vaso’.

no predecibles, sino con cuanta precisión somos capaces de predecirlos (Wyss, 2001). La definición usada generalmente es la que sigue: se debe especificar la localización, el tamaño y el momento en el que tendrá lugar el evento, todos estos parámetros con una ventana de error y la probabilidad de que ocurra (Allen, 1976). Además, se debe estimar la probabilidad de que el evento ocurra por casualidad, para establecer que no se trata de una predicción trivial (Wyss, 2001). Por todo ello, negar rotundamente la posibilidad de una predicción sin aclarar el tipo de predicción que se pretende parece fatuo. Debemos distinguir predictibilidad intrínseca del sistema, esto es, hasta qué punto la ocurrencia futura de un evento puede ser desvelada a partir del comportamiento previo del sistema; de una predicción científica, una hipótesis con base científica, expuesta habitualmente en términos probabilistas, de la localización, el momento y la magnitud del evento, y cuáles de estas hipótesis son de utilidad a la hora de alertar de un evento potencialmente destructivo con suficiente precisión espacio temporal para prevenir y minorar el desastre. El primer paso para una predicción científica es la identificación de uno o varios elementos precursores que puedan proveer información acerca de la localización, el momento y la magnitud de un terremoto futuro, que la relación entre los precursores y el evento predicho tenga una sólida base física y que estos precursores puedan ser verificados mediante experimentos independientes, para probar la hipótesis. El problema es que una comprobación en retrospectiva no es suficiente. La validación depende de la ocurrencia de un terremoto suficientemente grande cerca de una zona bien instrumentada y documentada, y estos terremotos no son demasiado habituales. Podrían pasar décadas antes de que un precursor propuesto se valide de forma fehaciente. Una visión un poco más moderna y complementaria está en estudios de dinámicas no-lineales donde los terremotos son fenómenos altamente sensibles a condiciones iniciales, esto podría dar una nueva luz en como el fenómeno tiene condiciones iniciales que primero tienen que ser identificadas y luego poder ser medidas de manera correcta, algunas predicciones notorias han sido:

- La predicción del terremoto de Haicheng de 1975 (Whitham et al. [12]; Ward [13]).
- El sismo de Kobe 1995, detectado por Fujinawa and Takahashi (1995); Hayakawa et al. (1996); Maeda (1996); Okamoto et al. (1996); Yamada and Oike (1996); Kushida y Cusida (1997).
- Micropulsaciones en el observatorio magnético de Teoloyucan antes, durante y después del sismo de junio de 1999, de magnitud  $M_s 7.0$  a las 20:42 GMT con epicentro ( $-97.5^{\circ}, 18.18'$ ) a una profundidad de 69 km en México.

### 1.1.2. Revisión general sobre precursores.

Existen dos grandes criterios en la identificación de precursores de terremotos. El primer criterio es reconocer evidencia creíble científica sobre las anomalías observadas antes de un terremoto. Una medición o detección exitosa de algún fenómeno o conjunto de fenómenos anormales medidos previos a un terremoto usualmente depende de la suerte de tener buenos equipos de medición operando en el área antes, durante y después del terremoto, además de una técnica adecuada que permita establecer una definición clara de que es la anomalía (Hough [9]). El segundo criterio es que exista un modelo físico aceptado para explicar la existencia de dicho precursor, por más de 100 años uno de los modelos físicos más estudiados busca la generación de algún tipo de señal electromagnética principalmente generada por estrés mecánico  $\sigma(t)$  al que estaban expuestas las rocas antes y durante un episodio sísmico modificando su permeabilidad electromagnética  $\mu(\sigma)$  al generarse micro-fracturas en éstas, sin embargo, por la falta de control en las pruebas, siendo esta una consecuencia intrínseca al fenómeno de la predicción de un sismo, es difícil probar de manera estricta que el mecanismo físico es efectivamente el que genera el precursor y evidencia estadística

para encontrar correlación entre las causa-efecto no es concluyente. Algunos investigadores toman la existencia de los precursores como un hecho. La IASPEI (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior) dio algunos lineamientos generales para clasificar un precursor sísmico que se usarán como guías durante el desarrollo de nuestro precursor (Geller [7]):

1. **Criterios de validación:** (1) *La anomalía observada debe tener una relación con el esfuerzo, la deformación o algún mecanismo que conduzca a los terremotos.* (2) *La anomalía debe ser observada simultáneamente en más de un instrumento o en más de un sitio.* (3) *La amplitud de la anomalía debe guardar relación con la distancia desde el eventual choque principal.*
2. **Datos:** *Debe haber una demostración convincente de que se conoce la calibración del instrumento y que el instrumento está midiendo una señal tectónica.*
3. **Detección:** *Las definiciones de anomalías deben ser precisas.*
4. **Asociación de anomalías con terremotos posteriores:** *Se indicarán con precisión las reglas para asociar una anomalía con un terremoto. La definición de anomalía y la regla de asociación deben derivarse de un conjunto de datos distinto de aquel para el que se alega una anomalía precursora.*

Estos criterios reflejan varios aspectos importantes en la búsqueda de precursores sísmicos, dichos criterios son compartidos a lo largo de gran parte de la literatura en el tema y coincide en: El mecanismo físico que origina la señal precursora tiene que ser postulado y claro, la definiciones de cualquier búsqueda de anomalías tiene que ser precisa y pide cierto grado de consistencia entre las relaciones precursor-sismo que debe ser producto de los resultados del análisis de los datos.

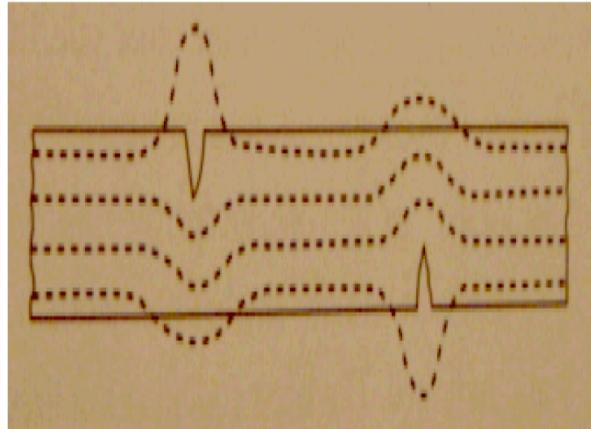
## Precensores convencionales.

Varias mediciones en diversos laboratorios han demostrado de manera conclusiva que potenciales, cambios en la resistividad y magnetización son afectados por estrés en la roca (Park et al. [16]; Suárez-Ántola [11]) sin embargo, el mecanismo físico exacto y las variaciones observadas en los experimentos en el campo suelen diferir de manera sustancial con respecto a lo que estos laboratorios indican. La detección de perturbaciones antes de la ruptura de un material por una falla ha sido un tema propuesto múltiples veces a lo largo de la historia como una manera barata de monitorizar el estado de estrés en ciertas zonas. Específicamente para esta investigación, se asume que una perturbación magnética local surgirá antes de un sismo a causa de la fractura y cambios mecánicos en las rocas antes de su fractura. Algunos estudios que sugieren que ésta puede ser una herramienta adecuada para entender el mecanismo físico tras la anomalía magnética antes de un sismo serían: (Fujinawa et al., 1992 ; Fenoglio et al., 1995; Utada, 1993). Quienes señalan como mecanismos a la generación de campos magnéticos entre otros a: deformación de la corteza, piezomagnetismo, estrés/conductividad, efectos electrocinéticos, procesos de generación de carga, efectos hidrodinámicos y remagnetización por efectos termales.

- Efectos del estrés en roca seca. La dependencia entre el estrés y la resistividad eléctrica en rocas secas se ha demostrado en diversos laboratorios, encontrado que depende de la porosidad en la rocas cristalinas. Una relación entre el estrés y la resistividad con una forma escalar es:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \approx K_r\sigma$$

Para un material homogéneo, donde  $\rho$  es resistividad,  $K_r$  es una constante y  $\sigma$  es el estrés (Johnston [6]). La tierra sin embargo no es homogénea, y la no-linealidad podría ser una parte importante en la comprensión del fenómeno y sin mencionar posibles comportamientos emergentes.



**Figura 1.1:** Líneas de campo magnético en un material con imperfecciones (Suárez-Ántola [11]).

### Sobre la vinculación de perturbaciones geomagnéticas con actividad pre-sísmica.

En una investigación publicada en el 2015 por Stanica et al. [14] se investigan posibles correlaciones de efectos electromagnéticos y el terremoto M9 que el 11 marzo 2011 sacudió las costas de Japón, el estudio fue realizado de manera retrospectiva analizando data geomagnética de tres estaciones localizadas en Japón (Memambetsu, Kakioka) y Romania (Provincia de Sus), esta investigación analizó frecuencias ultras bajas (0.001-0.016 Hz) usando un análisis FFT, además de estudios en la componente  $B_z$  magnética, detectando una anomalía significativa 32 días antes con un pico de 2.5-STDEV posiblemente relacionado con el terremoto M9 (Stanica et al. [14]). Sin embargo, también es crucial destacar el análisis no contempla ninguna capacidad de predicción de ningún parámetro como para llamarlo ni un método de predicción como un precursor sísmico. En un artículo publicado en el 2019 (Li et al. [18]) estudian el terremoto de M8 del 12 de mayo del 2008 haciendo énfasis en cambios atmosféricos en forma de anomalías que alcanzan su máxima intensidad el día del terremoto. Además de lo anterior, también reportan anomalías en la componente  $B_z$  en estaciones geomagnéticas cercanas. Este artículo, podría señalar que el fenómeno es multidimensional y estudios completos que tengan en cuenta varias dimensiones puede ayudar a diferenciar fenómenos relacionados y no relacionados. Otro artículo llamado *Large Earthquake Prediction Methods* publicado en enero del 2019 (Kachakhidze et al. [19]) a través de data suministrada por INFREP desarrolla un método para predecir epicentro, magnitud y tiempo de ocurrencia del terremoto entrante a través del análisis de señales electromagnéticas, resultando en uno de los artículos más modernos en el tema y a la vez tratando de estimar las 3 cantidades (posición, magnitud y tiempo) de manera simultánea.

## 1.2. El campo magnético terrestre.

El campo magnético de la Tierra, también conocido como campo geomagnético, es el campo magnético que se extiende desde el interior de la Tierra hacia el espacio, donde interactúa con el viento solar, una corriente de partículas cargadas que emana del Sol. El campo magnético es

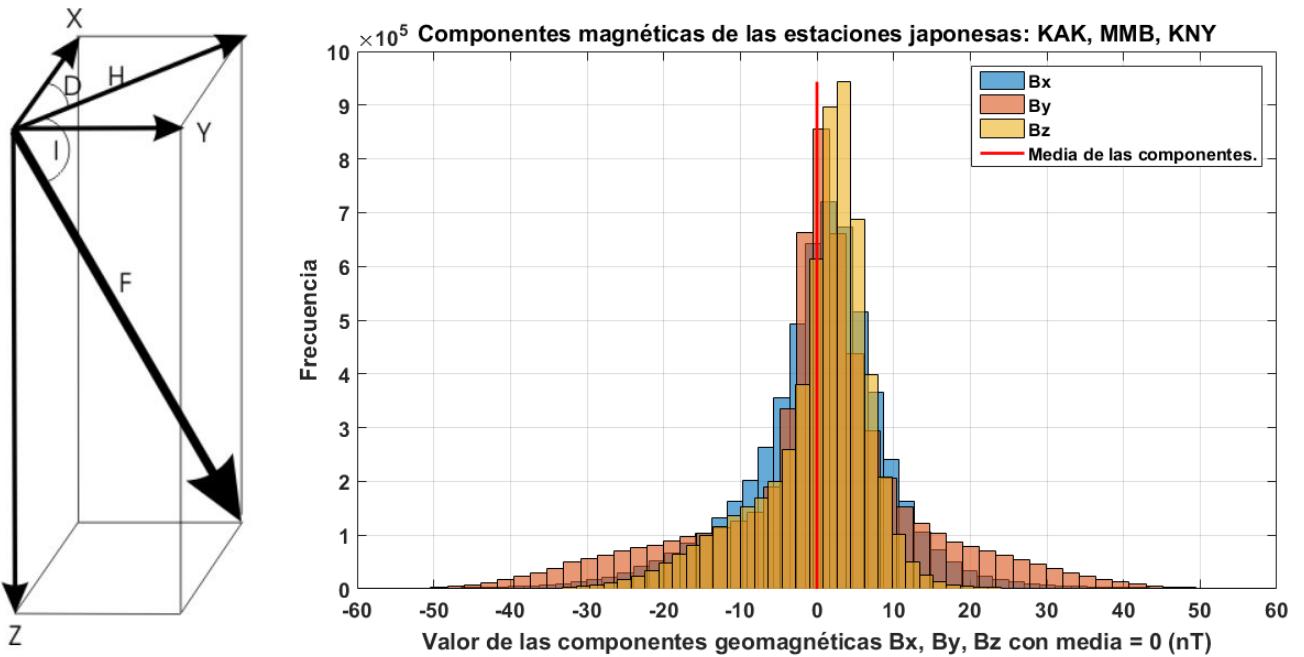
generado por corrientes eléctricas debido al movimiento de las corrientes de convección de una mezcla de hierro fundido y níquel en el núcleo exterior de la Tierra: estas corrientes de convección son causadas por el calor que escapa del núcleo, un proceso natural llamado geodinamo. La magnitud del campo magnético de la Tierra en su superficie varía de 25 a 65 microteslas (0,25 a 0,65 gauss). Como aproximación, está representado por un campo de un dipolo magnético actualmente inclinado en un ángulo de unos 11 grados con respecto al eje de rotación de la Tierra, como si hubiera una enorme barra magnética colocada en ese ángulo a través del centro de la Tierra. El polo geomagnético norte, que estaba ubicado en 2015 en la isla de Ellesmere, Nunavut, Canadá, en el hemisferio norte, es en realidad el polo sur del campo magnético de la Tierra y viceversa. El campo magnético terrestre es causado de manera prevalente por corrientes eléctricas en la parte líquida del núcleo. La convección de hierro fundido dentro del núcleo líquido exterior, junto con un efecto Coriolis causado por la rotación planetaria general, tiende a organizar estas corrientes eléctricas en líneas de flujo alineados a lo largo del eje polar norte-sur. Cuando un fluido conductor fluye a través de un campo magnético existente, se inducen corrientes eléctricas, lo que a su vez crea otro campo magnético. Cuando este campo magnético refuerza el campo magnético original, se crea una dinamo que se sostiene a sí misma. Esto se llama la teoría del dinamo y explica cómo se mantiene el campo magnético de la Tierra.

### 1.2.1. Mediciones típicas del campo magnético terrestre.

En la superficie de la Tierra, la densidad de flujo magnético puede variar desde 30 microteslas (0.3 gauss) en zonas como Sur América y Sur África hasta 60 microteslas (0.6 gauss) cerca de los polos al norte de Cánada y el Sur de Australia. La media del campo magnético terrestre en núcleo exterior de la Tierra se mide en los 26 Gauss, 50 veces más que el campo magnético de la superficie. Este campo magnético es similar al de una barra magnetizada. Otra característica que distingue magnéticamente a la Tierra de un imán de barra es su magnetósfera. A grandes distancias del planeta, este domina el campo magnético de la superficie. Las corrientes eléctricas inducidas en la ionósfera también generan campos magnéticos. Este campo siempre se genera cerca de donde la atmósfera está más cerca del Sol, lo que causa alteraciones diarias que pueden desviar los campos magnéticos de la superficie hasta en un grado. Las variaciones diarias típicas de la intensidad de campo son de aproximadamente 25 nanoteslas (nT) (es decir, 1: 2000), con variaciones durante unos pocos segundos de alrededor de 1 nT (es decir, 1: 50.000). El campo magnético terrestre es una cantidad vectorial; asignando a cada punto del espacio un vector el cual tiene una magnitud y una dirección. Para describirlo necesitamos 3 cantidades

- tres cantidades ortogonales (**X**, **Y** y **Z**).
- la fuerza total y sus 2 ángulos (**F**, **D**, **I**).
- 2 componentes de fuerza y un angulo (**H**, **Z**, **D**).

Las relaciones entre estos 7 elementos se muestra en el diagrama mostrado en la figura 1.2. Siendo *D* y *I* teniendo unidades en grados. Todas las demás cantidades son medidas en nanoteslas (*nT*;  $1nT = 10^{-9}$  Tesla). Para nuestra investigación, se usó una serie de estaciones geomagnéticas a lo largo del mundo, por ejemplo para las estaciones KAK, MMB y KNY se pueden visualizar las distribuciones mostradas en la figura 1.2 en las componentes de campo a lo largo de las tres estaciones.



**Figura 1.2:** A la izquierda un esquema visual de las diferentes componentes magnéticas, a la derecha histograma de recurrencia a las componentes de campo geomagnético obtenidos de las estaciones en la zona Japón.

**Cuadro 1.1:** Descripción de cada magnitud y dirección relacionada al campo geomagnético terrestre.

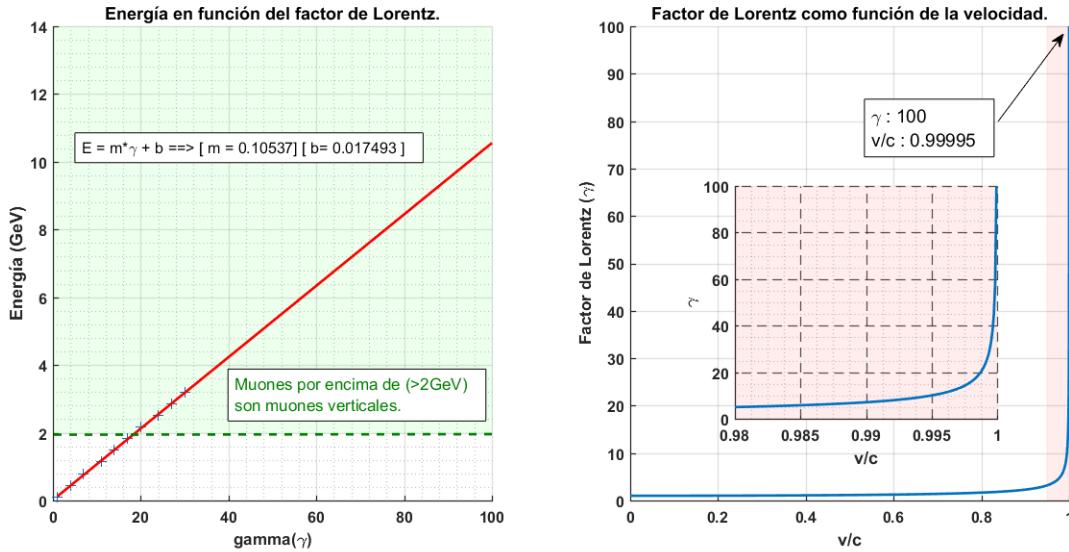
Componente	Descripción
F	Intensidad total del vector de campo magnético
H	Intensidad horizontal del campo magnético
Z	Componente vertical del campo magnético; por convención Z es positivo hacia abajo
X	Componente Norte del campo magnético; X es positivo hacia el norte
Y	Componente este del campo magnético; Y es positivo hacia el este
D	Declinación magnética, definida como el ángulo entre el norte geográfico y el norte magnético (el campo horizontal) . D es positivo al este del norte verdadero.
I	Inclinación magnética, definido como el ángulo medido entre el plano horizontal al vector del campo magnético; hacia abajo es positivo.

# Capítulo 2

## Marco teórico

Cuando se parte del hecho de que el estrés mecánico  $\sigma(t)$  al que estaban expuestas las rocas antes, durante y después un episodio sísmico, modifica su permeabilidad magnética  $\mu(\sigma)$  al generarse micro-fracturas en estas, estableciéndose por tanto “fugas” del flujo geomagnético y suponiendo que esta modificación local cambia la magnitud y/o dirección del campo geomagnético de una forma medible en la localidad, entonces antes del evento sísmico, que representa la fractura de la roca, debería observarse una variación importante en la “fuga” del campo geomagnético y esta anomalía podría ser detectada al tener un tren de datos a lo largo del tiempo que identifique dicho comportamiento anómalo antes y durante del evento sísmico. Las teorías convencionales denominadas modernamente como “climatología sísmica” proponen entonces estudios multifactoriales de correlación entre el proceso sísmico y cambios en el campo electromagnético antes, durante y después de un sismo. Uno de los principales desafíos en determinar la correlación entre estos dos factores, es que la magnitud de la fluctuación geomagnética generada por cambios físicos relacionados al estrés mecánico son difíciles de distinguir del ruido local. La experiencia mostrada en el trabajo (Villegas et al. [1]; Rosales et al. [2] ; Padra et al. [3]) muestra posible relaciones entre cambios del flujo de muones antes, durante y después de un evento sísmico, esta no es la única experiencia que apunta a cambios físicos locales relacionados con fenómenos electromagnéticos en la zona donde se está presuntamente acumulando energía antes, durante y después de un terremoto, pero sin duda será el principal antecedente que conducirá a proponer un enfoque relativista que permita estudiar el campo geomagnético generado por la Tierra desde el sistema de referencia en movimiento de la partícula cargada que interactúa con dicho campo. Así, dado que las velocidades de estas partículas están cercanas a la velocidad de la luz, será necesario un enfoque que aplique conceptos extraídos de relatividad especial. Para tratar de revelar pequeñas fluctuaciones locales sobre áreas que presenten cambios físicos relacionados con el estrés mecánico, se propone un “efecto de magnificador relativista”, el cual ocurre cuando partículas de altas energías interactúan con campos electromagnéticos. La propuesta principal de esta investigación es la posibilidad de introducir la transformación por medio del tensor  $T_{ij}$  en un sistema de referencia  $S$ , donde el campo electromagnético ( $\vec{E}, \vec{B}$ ) son medidos y transformados a sus respectivas componentes  $T'_{ij}$  en un sistema de referencia  $S'$  como un posible precursor sísmico. Esta propuesta apunta a evidenciar cierta correlación entre cambios locales en el campo magnético de la Tierra que estén relacionados con un evento sísmico usando una transformación de los campos electromagnéticos locales a un sistema de referencia inercial que se mueva cerca de la velocidad de la luz, dando como resultado un efecto amplificador en la señal  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  que va a depender del factor de Lorentz ( $\gamma$ ) (figura 2.1) expresado como:

$$\gamma \equiv \frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.1)$$



**Figura 2.1:** Energía y velocidad ( $v/c$ ) en función del factor de Lorentz( $\gamma$ ). A partir de ( $>2\text{GeV}$ ) se detectan muones verticales (Villegas et al. [1]) para un detector en tierra.

## 2.1. Definiciones pertinentes.

### 2.1.1. La relatividad especial y los campos electromagnéticos.

Antes de que hubiera una Teoría de la Relatividad, ya había una teoría matemática del electromagnetismo en la cual se inspiró Albert Einstein, a grado tal que su primera publicación se tituló “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”. Estudiar los orígenes de las ideas de Einstein invariablemente lleva a cualquiera a estudiar los tratados del matemático James Clerk Maxwell basado en la tesis de que en los fenómenos electromagnéticos lo que importa es el movimiento relativo de las cargas eléctricas y los campos eléctricos en movimiento. Para desarrollar la Teoría Especial de la Relatividad, Einstein se inspiró en la teoría del electromagnetismo de Maxwell, en la cual tampoco hay observadores privilegiados capaces de poder detectar el movimiento absoluto. Siendo así, no debe extrañar que las ecuaciones de campo del electromagnetismo sean invariantes bajo las transformaciones de Lorentz. Si se descompone los campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  en sus componentes paralelas y perpendiculares al eje del movimiento relativo entre los marcos de referencia  $S$  y  $S'$ , entonces se puede escribir <sup>1</sup>:

$$\begin{aligned}\vec{E}' &= \vec{E}'_{||} + \vec{E}'_{\perp} \\ \vec{B}' &= \vec{B}'_{||} + \vec{B}'_{\perp}\end{aligned}\tag{2.2}$$

Inspeccionando las relaciones, se puede generalizarlas para escribir las siguientes relaciones vectoriales válidas para el campo eléctrico:

$$\begin{aligned}\vec{E}'_{||} &= \vec{E}_{||} \\ \vec{E}'_{\perp} &= \gamma \left( \vec{E}_{\perp} + \frac{1}{c} \vec{v} \times \vec{B}_{\perp} \right)\end{aligned}\tag{2.3}$$

Para el campo magnético también tenemos relaciones similares, las cuales difieren de las del campo eléctrico mediante un simple intercambio de un signo dentro del paréntesis además del intercambio

<sup>1</sup>Se recurrirá aquí a la comilla en lugar de la barra horizontal superior para denotar los vectores en el marco de referencia  $S'$  con el fin de que no se pueda confundir la barra horizontal superior con la flecha puesta también encima para simbolizar la naturaleza vectorial de cada campo

de las literales  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$ :

$$\begin{aligned}\vec{B}'_{\parallel} &= \vec{B}_{\parallel} \\ \vec{B}'_{\perp} &= \gamma \left( \vec{B}_{\perp} - \frac{1}{c} \vec{v} \times \vec{E}_{\perp} \right)\end{aligned}\tag{2.4}$$

Estos resultados indican que el campo eléctrico y el campo magnético no pueden tener una existencia independiente el uno del otro. Un campo eléctrico puro  $\vec{E}$  (sin la presencia de campo magnético alguno) en el sistema de referencia S se transforma en campos eléctrico y magnético en el sistema de referencia S'. Pero no existe velocidad alguna menor que la velocidad de la luz que permita la existencia de un campo magnético puro  $\vec{B}$  en el sistema de referencia S'. En pocas palabras, si existe un marco de referencia Lorentziano en el cual el campo sea completamente eléctrico, es imposible encontrar otro marco de referencia Lorentziano en el cual el campo sea completamente magnético. De este modo, así como el espacio y el tiempo han dejado de tener una existencia independiente el uno del otro (matemáticamente hablando) y han sido unificados en un 4-vector como un solo concepto, el del espacio-tiempo, del mismo modo el campo eléctrico y el campo magnético tampoco tienen una existencia independiente el uno del otro, habiendo sido unificados bajo el tensor de Faraday. Esta es a fin de cuentas la razón de ser del tensor de Faraday, el llevar a cabo a su máximo la unificación de las leyes del electromagnetismo. Sumando vectorialmente las componentes paralelas y perpendiculares de cada campo y simplificando, podemos demostrar que la transformación general de los campos eléctrico y magnético está dada por las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}\vec{E}' &= \gamma(\vec{E} + \vec{\beta} \times \vec{B}) - \frac{\gamma^2}{\gamma + 1} \vec{\beta}(\vec{\beta} \cdot \vec{E}) \\ \vec{B}' &= \gamma(\vec{B} - \vec{\beta} \times \vec{E}) - \frac{\gamma^2}{\gamma + 1} \vec{\beta}(\vec{\beta} \cdot \vec{B})\end{aligned}\tag{2.5}$$

Nuevamente, estas relaciones demuestran que  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  no tienen existencia independiente. Un campo puramente eléctrico o puramente magnético en un sistema de referencia aparecerá como una mezcla de ambos en cualquier otro sistema de referencia. De este modo, en vez de hablar separadamente del campo eléctrico  $\vec{E}$  y del campo magnético  $\vec{B}$ , más apropiadamente se debe hablar del campo electromagnético  $F^{\alpha\beta}$ . El significado físico de los tensores relacionados con relatividad especial, está asociado a transformaciones entre marcos de referencia inerciales. Esto significa que pueden existir cuatro tipos de transformaciones: transformaciones de coordenadas, rotaciones, paridad y transformaciones de Lorentz. Las leyes físicas solo requieren un comportamiento tensorial bajo transformaciones entre distintos marcos de referencia inercial y las leyes de la física requieren exhibir un comportamiento tensorial ante las transformaciones no singulares de coordenadas. Si se quiere saber cómo un campo electromagnético puede producir una curvatura en el espacio-tiempo, todo lo que hay que hacer es sustituirlo en las ecuaciones de campo de la Relatividad General. Si el tensor energía-tensión T en cierta región del espacio-tiempo tiene como únicas componentes las que corresponden al campo producido por un campo electromagnético en el espacio libre, siendo por lo tanto, el tensor electromagnético energía-tensión, entonces las ecuaciones de campo de Einstein son conocidas como las ecuaciones Einstein-Maxwell. El tensor energía-tensión T de las ecuaciones de campo de la Relatividad General es extraordinario en el sentido de que incluye todas las energías posibles habidas y por haber: la energía equivalente de una masa, la energía térmica, la energía de rotación, la energía de movimiento lineal, la energía de enlace entre dos átomos, la energía de enlace nuclear; y desde luego, la energía electromagnética. Y si la energía que se estudia es energía electromagnética pura, el tensor que se emplea para estos casos es el tensor electromagnético energía-tensión o tensor electromagnético energía-momentum, el cual puede ser

definido de la siguiente manera:

$$T^{\alpha\beta} = \frac{1}{4\pi} \left[ g^{\alpha\mu} F_{\mu\lambda} F^{\lambda\beta} + \frac{1}{4} g^{\alpha\beta} F_{\mu\lambda} F^{\mu\lambda} \right] \quad (2.6)$$

Una ligera variante de la fórmula se obtiene llevando a cabo la subida del índice  $\mu$  como lo indica la contracción de  $F_{\mu\lambda}$  con el tensor  $g^{\mu\mu}$ , aunque esto resulta en la pérdida de la simetría que exhiben los dos términos dentro del paréntesis:

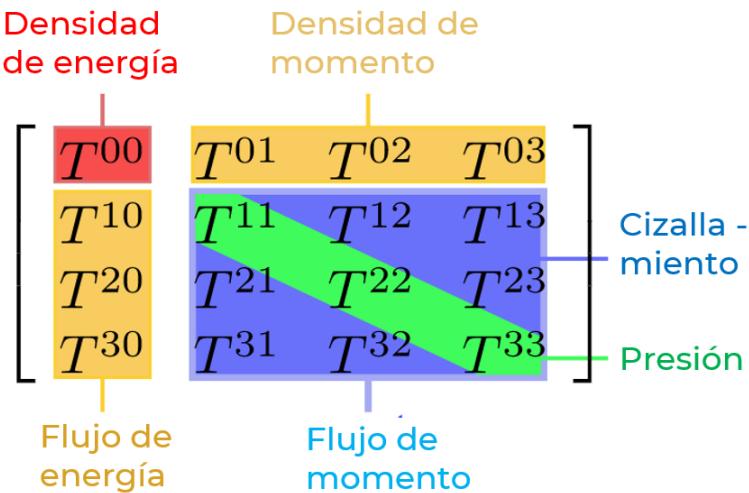
$$T^{\alpha\beta} = \frac{1}{4\pi} \left[ F_\lambda^\alpha F^{\lambda\beta} + \frac{1}{4} g^{\alpha\beta} F_{\mu\lambda} F^{\mu\lambda} \right] \quad (2.7)$$

Esta definición está basada en el tensor de Faraday  $F$ , y en el tensor métrico conjugado  $g^{-1} = (g^{\mu\nu})$  para el espacio-tiempo Lorentziano definido aquí como ya se ha visto previamente:

$$\begin{aligned} g^{11} &= 1 & g^{22} &= g^{33} = g^{44} = -1 \\ g^{ij} &= 0 & \text{para } i \neq j \end{aligned}$$

### 2.1.2. El tensor energía impulso.

En física relativista, el tensor de energía-impulso electromagnético (EIE) es la contribución al tensor de energía-impulso debido al campo electromagnético, existen diversas formas no equivalentes de definir el tensor para la materia ordinaria. Entre las más comunes se encuentra energía-impulso de Hilbert, el tensor energía-impulso canónico y el tensor energía-impulso de Belinfante-Rosenfelder. El tensor de energía-impulso electromagnético describe el flujo de energía y momento electromagnético en espacio-tiempo. Las componentes que interactúan para una visión general de la interpretación física del tensor se tiene lo mostrado en la figura 2.2.



**Figura 2.2:** Interpretación usual de las componentes contravariantes del tensor energía-impulso, figura tomada de Crowell [24].

El tensor tendría la forma explícita mostrada en la ecuación 2.8

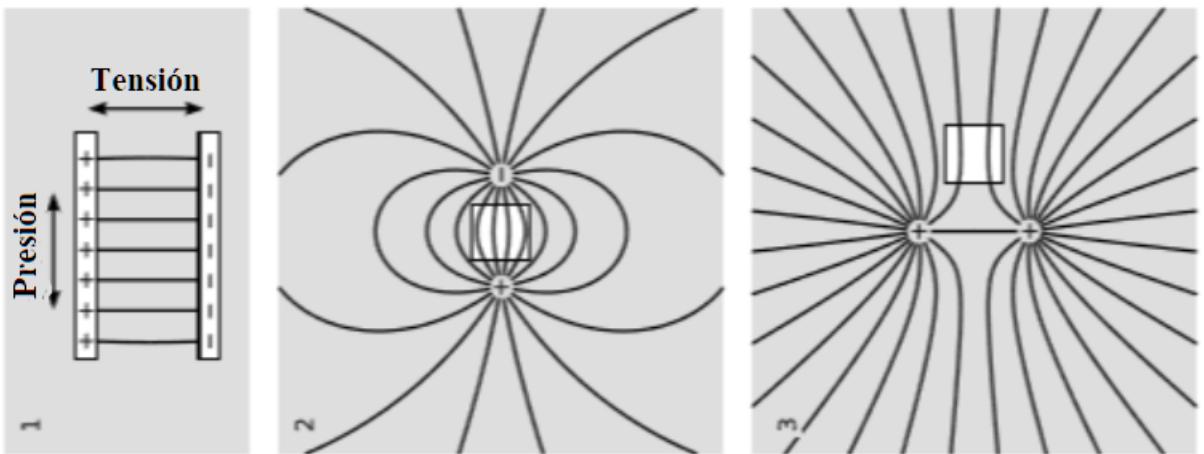
$$T^{\mu\nu} = \begin{bmatrix} U & S_x & S_y & S_z \\ S_x & -\sigma_{xx} & -\sigma_{xy} & -\sigma_{xz} \\ S_y & -\sigma_{yx} & -\sigma_{yy} & -\sigma_{yz} \\ S_z & -\sigma_{zx} & -\sigma_{zy} & -\sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Donde las cantidades  $\sigma_{ij}$  conforman el tensor de Maxwell o tensor de tensiones de Maxwell, el cual es un tensor de segundo rango utilizado en electromagnetismo clásico para representar la interacción entre las fuerzas eléctrica/magnética y el impulso mecánico. Está definido como:

$$\sigma_{ij} = \epsilon_0 \left( E_i E_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} E^2 \right) + \frac{1}{\mu_0} \left( B_i B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} B^2 \right) \quad (2.9)$$

La matriz 2.8 contiene una densidad de energía asociada, descrita por  $U = (E^2 + B^2)/8\pi k$  y una densidad de momento  $\vec{S} = (\vec{E} \times \vec{B})/4\pi k$  (con unidades de  $c = 1$ , y  $k$  siendo la constante de Coulomb). Siendo claramente el último, una forma de expresar el flujo de energía debido a un campo electromagnético. Esto significa que las componentes del tensor para una columna y una fila serían:

$$T^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} U_x & S_x & S_y & S_z \\ S_x & S_x & \boxed{\sigma_{ij}} \\ S_y & S_y & S_z \\ S_z & S_z & S_x \end{pmatrix} \quad (2.10)$$



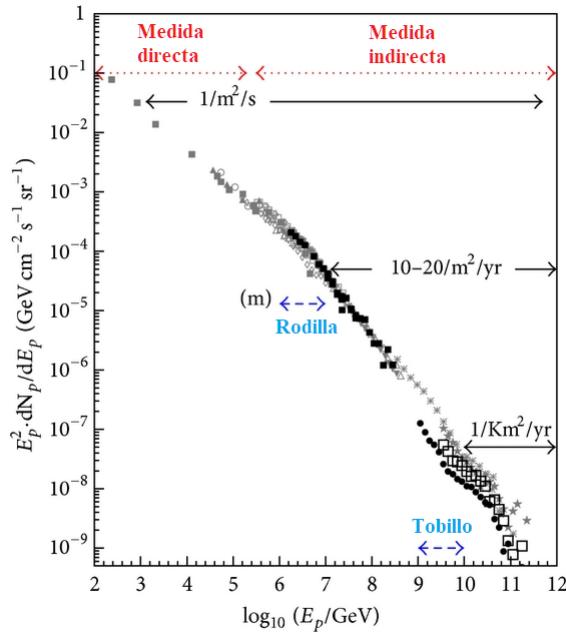
**Figura 2.3:** Presión y tensión en campos electromagnéticos (Crowell [24]).

Si describiéramos las componentes  $T^{xx}, T^{yy}, T^{zz}$  encontraríamos interpretaciones muy relacionadas con presiones o tensiones dependiendo del signo. En la figura 2.3 (1) se muestra un capacitor de placas, cada placa quiere colapsar hacia la otra en la dirección  $y$ , pero al mismo tiempo, la repulsión interna de cada placa hace que quiera expandirse en la dirección  $x$  (Crowell [24]). Si el capacitor es construido de materiales que mantienen su forma, entonces su tensión electromagnética  $T^{yy} < 0$  es cancelada por la presión  $T^{yy} > 0$  en el material, mientras que la presión electromagnética  $T^{xx} > 0$  es cancelada por la tensión del material  $T^{xx} < 0$ . Teniendo estos resultados, la relatividad requiere que la energía-impulso esté bien definida para cada punto en el que el campo exista, entonces expandiendo las conclusiones y revisando la figura 2.3 (2) y la figura 2.3 (3), donde cuadros blancos son dibujados en regiones donde el campo total es fuerte y los campos están interactuando intensamente. En la figura 2.3 (2), existe una tensión en la dirección  $x$  y una presión en la  $y$ ; la tensión puede ser pensada como la contribución de la atracción entre cargas opuestas. En la (3), también existe una tensión en la dirección  $x$  y una presión en la dirección  $y$ ; la presión viniendo de las cargas repeliéndose (Crowell [24]). Para hacer esto más cuantitativo, considere una discontinuidad en  $E_y$  en una de las placas mostradas en la figura 2.3 (1). El campo cambia abruptamente de 0 afuera del capacitor a un valor  $\mathbf{E}$  entre las placas. Por ley de Gauss, la carga por unidad de área de las placas debe ser  $\sigma = E/4\pi k$ . La media del campo experimentado por la

carga en esa placa entonces será  $\bar{E} = (0 + E)/2 = E/2$ , tal que la fuerza por unidad de área, es decir, la tensión del campo, sea  $\sigma\bar{E} = E^2/8\pi k$ . Por lo tanto, se espera que  $T^{yy} = -E^2/8\pi k$  si  $E$  si esta a lo largo del eje  $y$  (Crowell [24]).

### 2.1.3. Radiación cósmica.

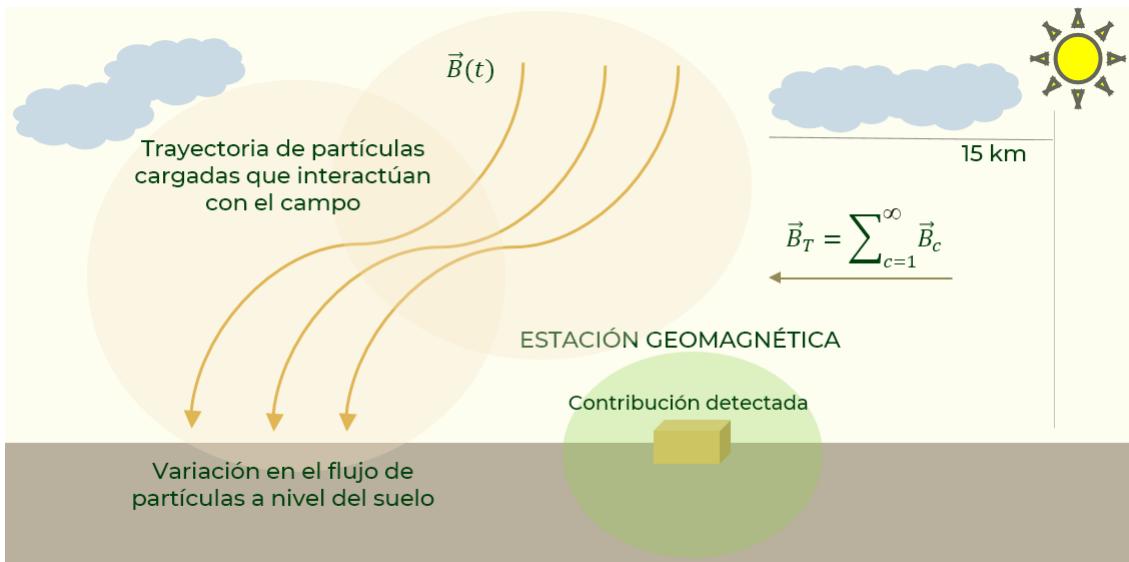
Los rayos cósmicos son las partículas más energéticas que han sido observadas. Descubrir su origen ha apasionado a varias generaciones de físicos. Los rayos cósmicos son partículas que llegan de afuera del sistema solar y llegan en un rango muy amplio de energía, desde  $10^9 eV$  hasta  $10^{20} eV$ , su espectro empinado, decae en forma de exponencial como  $E^{-3}$ , el origen de muchas de las partículas que son detectadas tienen un origen galáctico (Basu [28]) y suelen contarse más o menos 1 partícula por metro cuadrado por segundo, estas partículas normalmente se suelen detectar en satélites o en la estación espacial, en estas estaciones se suele identificar la carga, la masa, de cada partícula que llega, mientras que para altas energías, esta identificación no es posible debido a que el flujo de rayos cósmicos disminuye fuertemente con el aumento de la energía de las partículas (figura 2.4). Para estas partículas de alta energía, se contaría 1 partícula por kilómetro cuadrado por año, así la detección se tiene que hacer de modo indirecto a través de la cascada de partículas secundarias que desarrolla el rayo cósmico primario cuando llega a la atmósfera, entre algunos famosos detectores en tierra están el ICECUBE, Hawc, TA y Auger (figura 2.4). La figura 2.4 muestra un quiebre en la curva ubicada cerca de los  $5 * 10^{15} eV$  este quiebre suele ser referenciado o nombrado como la rodilla del espectro y en  $5 * 10^{18} eV$  hay otro quiebre que se suele ser llamado como el tobillo, este último seguido de una caída muy notoria cuando nos acercamos a  $10^{20} eV$ . Usualmente este tipo de referencias se usan para guiar cual es el rango de energías del que se este hablando en un determinado trabajo, un ejemplo de como se usan estas referencias es que por debajo de la rodilla ( $10^{20} eV$ ), los rayos cósmicos son solamente de origen galáctico, mientras que por encima del tobillo ( $5 * 10^{18} eV$ ) son de origen extra galáctico.



**Figura 2.4:** Espectro de rayos cósmicos y conteo de partículas tierra en función de la energía para varias estaciones en tierra, el espectro de rayos cósmicos sigue una secuencia de 3 en leyes de potencia. Los dos primeros están separados por la “rodilla”, el segundo y el tercero por el “tobillo”(Halzen y Katz [26]).

Aunque se conocen bien los rayos cósmicos de baja energía, los orígenes de los rayos cósmicos de

alta energía han sido un enigma científico durante más de cien años. A medida que se analiza las propiedades de los rayos cósmicos de alta energía, las investigaciones actuales esperan aprender más acerca de sus fuentes y sobre los procesos físicos que permiten a la naturaleza acelerar partículas a energías un millón de veces superiores a las alcanzadas por los aceleradores de partículas construidos por el ser humano. Al llegar a la Tierra, los rayos cósmicos menos energéticos son absorbidos por las capas altas de la atmósfera, mientras que los más energéticos penetran en nuestra atmósfera interaccionando con sus átomos, produciendo lo que se denominan cascadas. En este fenómeno se excitan los átomos y se generan nuevas partículas. Estas, a su vez, colisionan contra otras y provocan una serie de reacciones nucleares, que originan nuevas partículas que repiten el proceso en cascada. Así puede formarse una cascada de más de  $10^{11}$  nuevas partículas. Los corpúsculos integrantes de las cascadas se pueden medir con distintos tipos de detectores de partículas, generalmente basados en la ionización de la materia o en el efecto Cherenkov.



**Figura 2.5:** Diferencias en la forma en la que los muones generados en la atmósfera interactúan con el campo geomagnético y una estación en tierra mide el promedio del campo geomagnético en una zona.

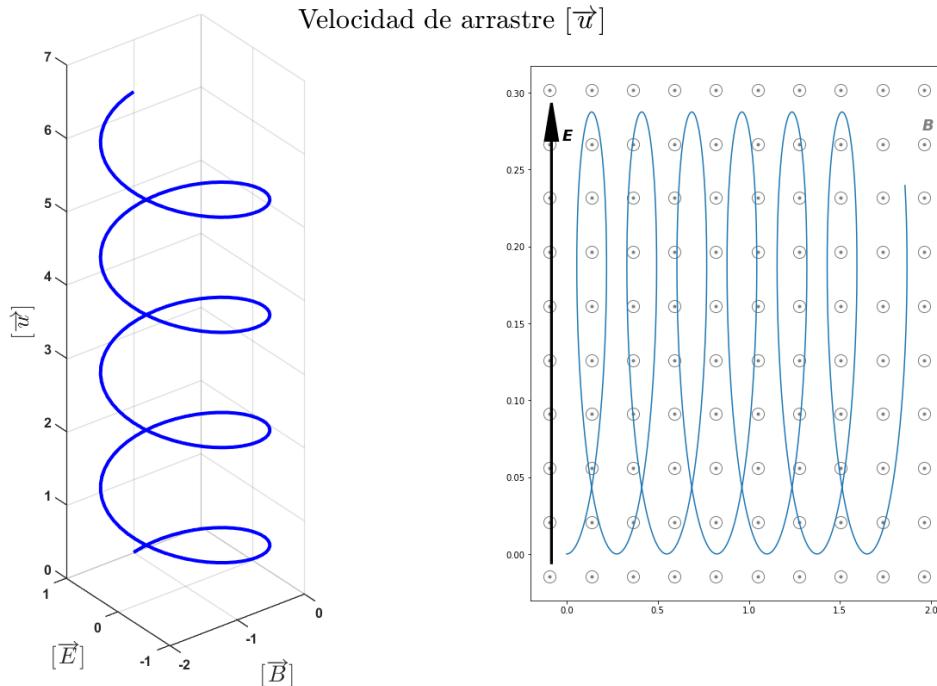
Volviendo a al problema de generar un precursor sísmico, los muones son partículas que interactúan de manera fugaz con el campo geomagnético terrestre; mientras que el campo que se mide en tierra por medio de estaciones geomagnéticas, es la suma de todas las contribuciones a dicho campo en un cierto espacio, aquí se tiene una gran diferencia en como los muones y un instrumento en tierra interactúan con el campo, las estaciones en tierra recogen la media de la señal geomagnética de una región local, mientras que los muones recogen información de todo el campo que atraviesan, por eso, los muones recogen información a lo largo de todo su recorrido, mientras que las estaciones geomagnéticas solo toman el promedio del campo de una cierta zona. Que los muones sean desviados por el campo geomagnético nos da la posibilidad de usarlos como sondas geomagnéticas que recolecten información del campo que atraviesan y por la forma única con la que interactúan con el campo, sean más sensibles a señales electromagnéticas locales, un esquema de esto se muestra en la figura 2.5. Con la calibración y modelo adecuados, esto se podría utilizar para estudiar solamente ciertas velocidades de incidencia que resalten efectos anómalos causados por la acumulación de estrés antes de un terremoto. Para ello, se busca una expresión que funcione como selector de velocidades para un cierto campo electromagnético, de esta manera, se recurre a la velocidad de arrastre.

## 2.1.4. La velocidad de arrastre.

La definición más usual de velocidad de arrastre, está relacionada con campos electromagnéticos que se aplican a materiales conductores, los electrones son acelerados por el campo y esta energía cinética es inmediatamente disipada por los choques con los iones de la red. El resultado neto de esta aceleración y disipación es una velocidad de equilibrio muy baja denominada velocidad de arrastre, la velocidad de arrastre es directamente proporcional a la densidad de corriente e inversamente proporcional a la densidad electrónica (Gómez et al. [22]). Suponga entonces existe un campo electromagnético en un cierto volumen, entonces  $\vec{u}$  será la velocidad de arrastre que experimentará una partícula cargada que interactúe con dicho campo electromagnético y esta se puede relacionar directamente con el flujo de energía electromagnética que existe en un volumen y la densidad de campo magnético para el mismo volumen.

$$\vec{u} = c \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\|\vec{B}\|^2} \Rightarrow \vec{u} = c \frac{\vec{S}}{\|\vec{B}\|^2} \quad (2.11)$$

Esta cantidad es importante, ya que en el sistema de referencia S se tiene una medición del campo magnético  $\vec{B}$  y se puede usar las expresiones 2.3 para inferir parte de  $\vec{B}'$  y  $\vec{E}'$ . Debido a la velocidad de la partícula y tiempo de vida medio, esta interactuará con los campos electromagnéticos de manera puntual, a pesar de interactuar por más de 30 km (medidos desde el sistema de referencia S) la velocidad y el tiempo de interacción son tan cortos que la partícula solo puede presenciar un momento del campo electromagnético, recolectando información de un momento puntual, posteriormente esa información del campo será reflejada en la densidad de flujo de partículas en tierra para una determinada área.



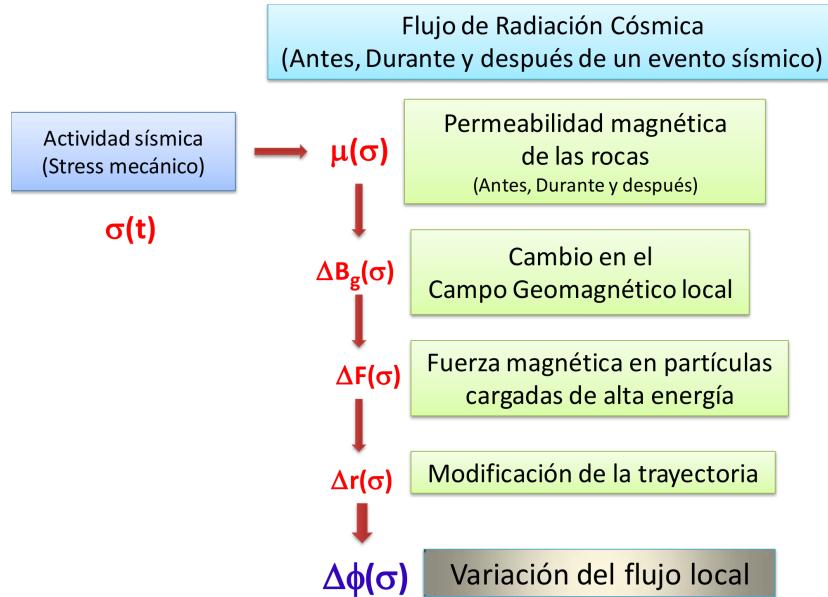
**Figura 2.6:** Partícula que incide en una región con campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  (unidades normalizadas), en la figura de la izquierda el eje horizontal (z) está en unidades de longitud normalizadas también se muestra como la interacción de  $\vec{E}$  sobre la partícula la desplaza en la dirección horizontal y  $\vec{B}$  hace que la partícula rote, en la figura de la derecha se muestra el campo  $\vec{B}$  perpendicular a la página dando otra perspectiva del mismo sistema de la izquierda, en ambas figuras se muestra que la combinación de campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  determina el avance de la partícula dando como resultado el efecto que se ve manifiesto en la velocidad de arrastre.

Esta propuesta no tiene acceso al conteo de partículas cargadas (por ejemplo muones) en tierra, pero si tiene acceso a la información otorgada por estaciones geomagnéticas en varios lugares del mundo, esto permite proponer un enfoque más orientado a estudiar  $\vec{u}$  a lo largo del tiempo en varias estaciones geomagnéticas, la interpretación entonces de la cantidad  $\vec{u}$  estaría más relacionada con una velocidad media, alcanzada por partículas cargadas debido a un cierto estado del campo electromagnético para un momento determinado. Considerando todo lo mencionado anteriormente, se puede generalizar a una cantidad  $\vec{u}$  (ecuación 2.6) de tal manera que contenga el vector de Poynting y la magnitud del campo magnético de una zona. En un sistema de referencia S, no se tendría ninguna cantidad relacionada con el campo eléctrico para poder calcular la ecuación 2.11, pero debido al enfoque relativista que se tiene en esta investigación, se pueden usar los campos  $\vec{E}'$  vistos desde el sistema de referencia  $S'$ , los cuales serán una composición de los campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  en el sistema de referencia S. Esta velocidad de arrastre tiene como cualidad, que será sensible a perturbaciones tanto del campo  $\vec{B}$ , como del campo  $\vec{E}$ . En la figura 2.6 se muestra como a lo largo del tiempo, la velocidad de arrastre cambia dependiendo de los valores de  $\vec{B}$  y  $\vec{E}$ , la partícula cargada, interactúa puntualmente con los campos geomagnéticos, y por lo tanto, se puede asociar una velocidad de arrastre para un cierto momento en función de los campos electromagnéticos en el sistema S, estudiando esta variación a lo largo del tiempo, se podrían determinar si existen anomalías que puedan ser relacionadas a la acumulación de energía que termine en un terremoto.

### 2.1.5. Precursores basados en flujo de partículas cargadas (muones).

Los Muones son Leptones masivos de segunda generación, poseen una carga igual al electrón ( $-1e$ ) y una masa en reposo de 105, 7Mev. En el trabajo *Influencia de anomalías geomagnéticas locales en la variación del flujo de muones generados en la atmósfera por radiación cósmica* (Villegas et al. [1]), en las mediciones realizadas durante 8 años se detectan fluctuaciones significativas en el flujo de muones verticales antes y durante una serie de sismos M4 y M4.2 ocurridos a ( $<35$  km) del detector, en la zona de Mérida-Venezuela; en la figura 2.7 (Villegas et al. [1]) se esquematiza parte de la propuesta conceptual. Dicho trabajo, plantea la posibilidad de usar muones como sondas geomagnéticas sensibles a perturbaciones locales en el campo, la calibración correcta permite la identificación clara entre la señal, el ruido y la anomalía para una posterior detección, los resultados sugieren que dicha anomalía proviene de perturbaciones no relacionadas con fenómenos sistemáticos no correlacionados a los eventos sísmicos y parece indicar una fuerte correlación con el fenómeno sísmico. En el mismo trabajo, se sugiere un modelo ampliado de predicción, el cual sea capaz de detectar estas anomalías electromagnéticas con mayor precisión y establecer una relación estadística más significativa. Se sostiene la idea de un precursor a mediano plazo (más o menos 15 días antes de los eventos), se exploró la posibilidad de generar un modelo teórico-experimental el cual logra demostrar que variaciones dentro de los 20 nT pueden generar cambios detectables en el flujo de muones y dichas señales pueden ser interpretadas en un contexto global dentro de los parámetros de la zona. Un resultado importante de ese trabajo es el mostrado en la figura 2.9 que pareciera indicar una relación entre las alteraciones del flujo, y una anomalía electromagnética causada por la acumulación de energía propia de la ocurrencia de un sismo futuro. El montaje experimental propuesto en los trabajos (Villegas et al. [1]; Rosales et al. [4]) y mostrado en forma de esquema en la figura 2.8, consiste en un detector en forma de un tanque Cherenkov y un fotomultiplicador (Padra et al. [3]). Un tanque de plástico de 3mm de espesor, recubierto en su totalidad por 3 capas de polietileno cuyo objetivo fue evitar la radiación lumínica. El detector se ubicó en el interior de un cilindro de concreto de 22 m de profundidad (figura 2.8), este cilindro posee un radio interno de 80 cm y radio externo de 120 cm (columna hueca), toda la estructura que rodea el cilindro utiliza concreto reforzado, adicionalmente en la parte superior de la columna, se encuentra un filtro de partículas de baja energía o de actividad sistemática del Sol, este filtro está conformado por un

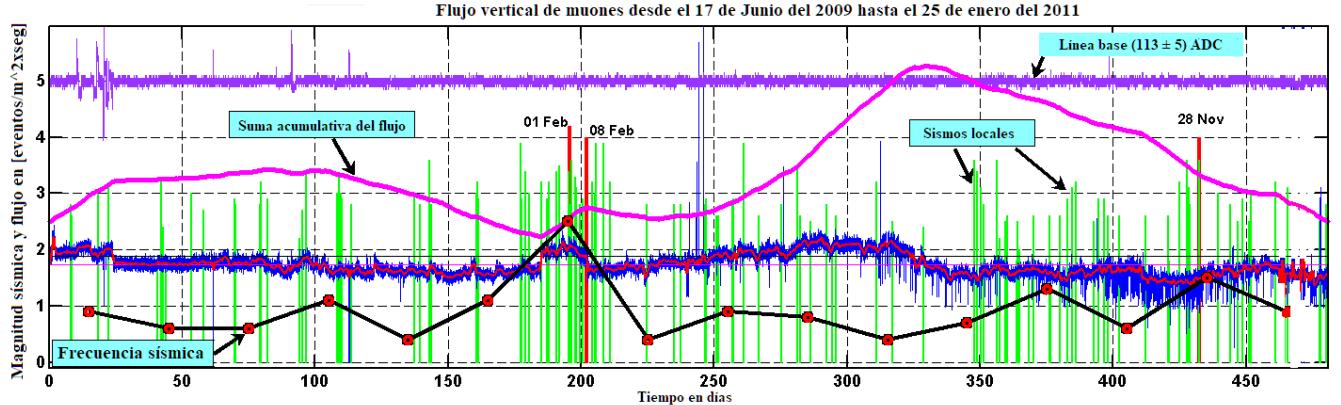
tanque de plástico repleto de agua de 1 metro de altura y 80 centímetros de diámetro, para filtrar en gran parte de las partículas de baja energía ( $E < 1\text{GeV}$ ) (Villegas et al. [1]). Por la localización geográfica en un valle, rodeada por dos cordilleras de montañas de aproximadamente 4600 m de altura, la mayoría de las partículas detectadas serán de origen vertical.



**Figura 2.7:** Planteamiento esquemático del modelo que explica la relación entre la actividad sísmica y el cambio en el flujo de muones (Villegas et al. [1]).



**Figura 2.8:** Montaje experimental, estructura del detector y filtro solar para filtrar partículas de baja energía ( $E > 2\text{GeV}$ ) (Villegas et al. [1]; Rosales et al. [4]; Rosales [5]).



**Figura 2.9:** Flujo muónico vertical ( $E > 2\text{GeV}$ ) antes, durante y después de un evento sísmico en la ciudad de Mérida-Venezuela (la línea azul representa el flujo de muones, la roja la media de dichos datos, la línea base está representada en morado, la suma acumulada de eventos en magenta, las líneas verticales verdes representan sismos, cuya magnitud está dada por la altura de la línea, y las líneas verticales rojas representan los sismos mayores a M4 (Villegas et al. [1]; Rosales et al. [4]; Rosales [5]).

## 2.1.6. Muones como detectores de campos electromagnéticos locales.

Inspirados en las investigaciones realizadas anteriormente estudiando flujo de muones (Padra et al. [3]) verticales como un posible precursor sísmico (Villegas et al. [1]; Rosales et al. [2]) se propone como solución a la medición de pequeños cambios en el campo magnético de forma local ( $\sim 100$  km de radio alrededor de la zona donde se ubica el epicentro) una transformación basada en un “efecto de magnificador relativista” el cual ocurre cuando partículas cargadas con altas energías interactúan con un campo electromagnético. El muón recogerá información del campo al cual fue sometido a lo largo de su trayectoria, si la existencia de una perturbación en el campo geomagnético terrestre fuera el resultado de la acumulación de estrés y dicha acumulación tiene el potencial de manifestarse como un evento sísmico, entonces en el sistema de referencia  $S'$  dicha anomalía se verá amplificada. Históricamente, el problema de generar una señal precursora a un sismo, es que la relación señal/ruido es ( $<< 1$ ), pero con la propuesta de estudiar los efectos generados por el campo electromagnético medidos en el sistema de referencia de la partícula podemos generar señales moduladas por el factor de Lorentz, que hace se pueda sintonizar un valor de gamma el cual permite una relación señal/ruido ( $>> 1$ ) que permite hacer predicciones significativas. En este caso, los efectos generados por el campo electromagnético son medidos en el sistema de referencia de la partícula, dando como resultado un cambio en su trayectoria que finalmente puede ser medido como una fluctuación del flujo de dichas partículas en la superficie de la Tierra.

### Caso de muones verticales.

Considerando un muón vertical con velocidad  $V(0, 0, v)$  que interactúa con un campo electromagnético  $E(E_x, E_y, E_z)$  y  $B(B_x, B_y, B_z)$ , dados en un sistema de coordenadas fijo  $r(x, y, z)$  el muón percibe un campo  $E'(E'_x, E'_y, E'_z)$  y  $B'(B'_x, B'_y, B'_z)$  en su sistema de coordenadas  $r'(x', y', z')$ , dado por:

$$E'_x = \gamma(E_x - \beta B_y), E'_y = \gamma(E_y + \beta B_x), E'_z = E_z \quad (2.12)$$

$$B'_x = \gamma(B_x + \beta E_y), B'_y = \gamma(B_y - \beta E_x), B'_z = B_z \quad (2.13)$$

Donde el factor de Lorentz  $\gamma$  es dado por:  $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$  y  $\beta = (v/c)^2$ ,  $c$  es la velocidad de la luz y  $v$  la velocidad del muón, se tienen dos factores en consideración:

- Que esta investigación se concentra en la relación entre el campo magnético terrestre con los eventos sísmicos.
- Que existen muy pocas estaciones que brinden data pública sobre medidas del campo eléctrico a lo largo del globo terráqueo.

Se tomarán las componentes del campo eléctrico como:  $E(0, 0, 0)$  y que las componentes de campo magnético en las estaciones son  $B(B_x, B_y, B_z)$ . En ese caso, las transformaciones relativistas a los campos, serían:

$$E'_x = -\gamma\beta B_y, E'_y = \gamma\beta B_x, E'_z = 0 \quad (2.14)$$

$$B'_x = \gamma B_x, B'_y = \gamma B_y, B'_z = B_z \quad (2.15)$$

En el sistema de coordenadas del muón  $r'(x', y', z')$  este interactúa con un campo  $E'(E'_x, E'_y, E'_z)$  dado por (2.14) y un campo magnético  $B'(B'_x, B'_y, B'_z)$  dado por (2.15), estos dependen únicamente de  $B(B_x, B_y, B_z)$  en un sistema coordinado  $r(x, y, z)$ . Esto es importante, ya que puede ser usado para explicar por qué el flujo vertical de muones en la superficie de la Tierra puede ser estudiado usando cambios en las fluctuaciones geomagnéticas, antes, durante y después de un evento sísmico, con el factor de Lorentz  $\gamma$  que amplifican las anomalías geomagnéticas en el lugar del evento.

## 2.2. Construcción de la señal precursora.

Mostrado en secciones anteriores como se pueden extraer cantidades físicas medibles del tensor  $T_{ij}$  se puede plantear una primera generalización de los resultados obtenidos en el trabajo (Villegas et al. [1]), se propone entonces el cambio del flujo  $\Phi(t)$  como foco de estudio para detectar pequeñas variaciones en las señales electromagnéticas de una zona.

$$\Phi(\vec{E}(t), \vec{B}(t)) = \phi_{r'}\phi_{m'}T_{ij} \quad (2.16)$$

La matriz  $T_{ij}$  contiene varios elementos que podrían estudiarse como cantidades medibles que podrían revelar comportamientos anómalos antes de un evento sísmico. Esta investigación estará centrada en las componentes asociadas al flujo de energía  $\vec{S}$  relacionándolo con la velocidad de arrastre de dicho flujo, usando el vector Poynting y la velocidad de arrastre como cantidades medibles en un sistema de referencia S. Se propone que el flujo local  $\Phi(t)$  estará definido por una combinación de tres factores, uno relacionado con la distancia estación-evento  $\phi_{r'}$ , otra relacionada con la magnitud  $\phi_{m'}$  y otro relacionado con la velocidad de arrastre experimentada en el marco de referencia de la partícula  $\phi_{u'}$  extraíble del tensor  $T_{ij}$ .

$$\Phi_T(E(t), B(t), r, m, v) = \phi_{r'}\phi_{m'}\phi_{u'} \quad (2.17)$$

La ecuación 2.17 describe una cantidad  $\Phi(t)$  que varía en el tiempo,  $E(t)$  representa los campos eléctricos locales,  $B(t)$  los campos magnéticos locales,  $r$  la distancia entre los instrumentos de medición y el epicentro de un proceso sísmico,  $m$  la magnitud que se desarrolla en dicho suceso sísmico y  $v$  la velocidad de la partícula, los factores del lado derecho representan cantidades medibles en el sistema de referencia en reposo. El estudio de estas cantidades, a través de la transformación propuesta en 2.17, permitirá discriminar comportamientos anómalos en la zona que posiblemente estén relacionados con el proceso sísmico. Por la importante restricción de no conocer los campos  $\vec{E}$  por razones de no poseer el equipamiento en la zona, no se considerará la contribución del campo eléctrico, no quiere decir que no pueda ser importante, solo que no se dispone de estas mediciones para este experimento.

### 2.2.1. Contribución del vector de Poynting y la velocidad de arrastre.

Dado  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  para un sistema de referencia S, se pueden usar las transformaciones 2.12 y 2.13, para obtener las cantidades  $\vec{E}'$  y  $\vec{B}'$  para un sistema inercial de referencia  $S'$ , se define entonces, la contribución  $\Phi_{u'}$  como:

$$\Phi_{u'}(t) = \vec{k} \cdot \vec{u}' \quad (2.18)$$

Que también puede ser escrito como:

$$\Phi_{u'}(t) = ck_i \frac{\vec{S}'_i}{\|\vec{B}'\|^2} \quad (2.19)$$

Donde  $k_i$  representa una proporción o conteo de partículas en determinada dirección, las componentes del vector de Poynting  $\vec{S}'_i$ , que representan las contribuciones del vector desde un marco de referencia  $S'$  y la magnitud del campo magnético en ese marco  $B'$ . Entonces, la cantidad  $\vec{S}'_i$  será:

$$\vec{S}'_i = \vec{E}' \times \vec{B}' \quad (2.20)$$

Usando las transformaciones 2.12 y 2.13 tenemos:

$$\begin{aligned} \vec{S}'_i &= \gamma [B_z E_y + \beta B_x B_z - B_y E_z + \beta E_x E_z] \hat{i} - \gamma [E_x B_z - \beta B_y B_z - B_x E_z + \beta E_z E_y] \hat{j} \\ &\quad + \gamma^2 [E_x B_y - \beta E_x^2 - \beta B_y^2 + \beta^2 B_y E_x - E_y B_x - \beta E_y^2 - \beta B_x^2 - \beta^2 E_y] \hat{k} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Por otra parte, la cantidad  $\|\vec{B}'\|^2$  sería:

$$\|\vec{B}'\|^2 = \gamma^2 [B_x^2 + 2\beta B_x E_y + \beta^2 E_y^2 + B_y^2 - 2\beta B_y E_x + \beta^2 E_x^2 + \gamma^{-2} B_z^2] \quad (2.22)$$

Dejando  $\Phi_{u'}$  explícitamente como:

$$\begin{aligned} \Phi_{u'} &= ck_x \frac{B_z E_y + \beta B_x B_z - B_y E_z + \beta E_x E_z}{B_x^2 + 2\beta B_x E_y + \beta^2 E_y^2 + B_y^2 - 2\beta B_y E_x + \beta^2 E_x^2 + \gamma^{-2} B_z^2} + \\ &\quad ck_y \frac{E_x B_z - \beta B_y B_z - B_x E_z + \beta E_z E_y}{B_x^2 + 2\beta B_x E_y + \beta^2 E_y^2 + B_y^2 - 2\beta B_y E_x + \beta^2 E_x^2 + \gamma^{-2} B_z^2} + \\ &\quad ck_z \frac{E_x B_y - \beta E_x^2 - \beta B_y^2 + \beta^2 B_y E_x - E_y B_x - \beta E_y^2 - \beta B_x^2 - \beta^2 E_y}{B_x^2 + 2\beta B_x E_y + \beta^2 E_y^2 + B_y^2 - 2\beta B_y E_x + \beta^2 E_x^2 + \gamma^{-2} B_z^2} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Asumiendo solo la contribución de los muones verticales tal como se hizo en el trabajo (Villegas et al. [1]), el resultado del trabajo es una prueba experimental que permite fijar los índices  $k_i$  como  $k_x = k_y = 0$  y  $k_z = 1$ , representando que todas las partículas vienen en la dirección vertical. Este hecho es válido para muones verticales de alta energía ( $E > 2\text{GeV}$ ) que es el caso de estudio, así que esta aproximación es válida y haciendo uso de los resultados experimentales esto permite la siguiente aproximación:

$$\Phi_{u'} \simeq \Phi_{u'_z} \quad (2.24)$$

Que deja la ecuación 2.23 como:

$$\Phi_{u'_z} = ck_z \frac{E_x B_y - \beta E_x^2 - \beta B_y^2 + \beta^2 B_y E_x - E_y B_x - \beta E_y^2 - \beta B_x^2 - \beta^2 E_y}{B_x^2 + 2\beta B_x E_y + \beta^2 E_y^2 + B_y^2 - 2\beta B_y E_x + \beta^2 E_x^2 + \gamma^{-2} B_z^2} \quad (2.25)$$

La ecuación 2.25, representa el caso general de flujo vertical influenciado por la presencia de  $(\vec{E}, \vec{B})$ , de disponer de mediciones  $\vec{E}$ , esta sería la ecuación que debería ser aplicada como la contribución del flujo asociado a la velocidad de arrastre a la señal precursora  $\Phi_T$  en la expresión 2.17.

**Caso  $\vec{E} = 0$ :** Si se hacen las componentes del campo eléctrico en el sistema de referencia S  $E_{x,y,z} = 0$ , esto permite reescribir la expresión 2.25 en la forma simplificada:

$$\boxed{\Phi_{u_z'} = -ck_z\beta \frac{B_x^2(t) + B_y^2(t)}{B_x^2(t) + B_y^2(t) + B_z^2(t)\gamma^{-2}}} \quad (2.26)$$

Esto representa una forma equivalente de expresar las componentes  $B_i$  haciendo uso de la velocidad de arrastre.

## 2.2.2. Contribución de la magnitud sísmica a la señal precursora.

Si se parte de la existencia de una señal electromagnética generada por el estrés mecánico al que están expuestas las rocas antes y durante un episodio sísmico, entonces se puede encontrar una relación proporcional entre la energía liberada al momento del sismo y la magnitud registrada, dicha relación está estudiada por varias investigaciones (Okal [31]; Gutenberg y Richter [30]), por lo tanto, partiendo de la hipótesis de que existe una señal precursora medible, esta señal debe contener una variable que dependa de la magnitud del evento. Es bien conocida la relación (Das y Meneses [23]) entre la energía liberada  $E$  y la magnitud  $m$  de un sismo:

$$m = a \log(E) + b \quad (2.27)$$

Donde  $a, b$  son constantes, haciendo  $a = 1$  y  $b = 0$  se puede reescribir 2.27 como:

$$m \propto \log(E) \quad (2.28)$$

Otra aproximación también muy usada y ampliamente referenciada (Bath y Duda [17]; Tsuboi [32]; Okal [31]; Gutenberg y Richter [30]) es entre el volumen de la roca involucrada por el sismo de magnitud  $m$ , la relación entre la magnitud y el volumen suele crecer proporcional a la energía, por lo que:

$$m \propto \log(V) \quad (2.29)$$

La transformación del diferencial de volumen para el sistema de referencia  $S'$  tendrá la forma de  $\Delta V' = \gamma^{-1} \Delta x \Delta y \Delta z$ , la relación expresada la ecuación 2.29 parte de que el volumen de ruptura de roca involucrado en el sismo y la energía asociada a este volumen deben crecer a ritmos proporcionales, cualquier interpretación relacionada con esto último debe contemplar la parte de la energía 2.28, esto nos lleva directamente a estudiar la densidad de energía medida desde un sistema de referencia  $S'$ . En un sistema de referencia S, se podría proponer una densidad de energía asociada a un sismo como:

$$\log(\Delta E / \Delta V) \approx C tte \quad (2.30)$$

Esto presenta un desafío para la teoría debido a que en un marco de referencia  $S'$  la proporcionalidad entre  $E$  y  $V$  no puede cumplirse, es decir  $\log(E) \neq \log(\gamma^{-1}V)$  para  $\gamma > 1$ , señalando la posibilidad de usar la densidad de energía en marcos de referencia donde  $\gamma > 1$ , para este propósito entonces la densidad de energía  $\rho$  como:

$$\rho = \log(\Delta E / \Delta V) \quad (2.31)$$

En un sistema de referencia  $S'$ , sería:

$$\rho' = \log(\gamma) + \rho \quad (2.32)$$

Se puede definir una nueva cantidad  $\mathbf{M}'$  que es la magnitud por la densidad de energía en un sistema de referencia  $S'$  como:

$$\mathbf{M}' = m\rho' \quad (2.33)$$

Que sustituyendo 2.32 nos permite escribir:

$$\mathbf{M}' = m(\log(\gamma) + \rho) \quad (2.34)$$

De la expresión 2.34 se puede observar que cuando  $\rho = ctte$  y  $\gamma = 1$ , la densidad de energía es igual en ambos sistemas de referencia. Para gammas superiores a uno, en el sistema de referencia  $S'$  se observa una cantidad  $\mathbf{M}'$  que va en función de gamma. Seguidamente, se propone la cantidad  $\phi_m$  como factor a la contribución total al flujo observado desde una estación geomagnética, proponiendo:

$$\phi_m = \alpha e^{\mu \mathbf{M}'} \quad (2.35)$$

Donde  $\alpha$  corresponde a la línea base en la contribución del flujo y debido a una magnitud  $m = 0$ , siendo un coeficiente positivo que puede ser obtenido de datos experimentales y podría tener en cuenta características geográficas de la zona, las unidades de  $\alpha = [\text{partículas}/\text{m}^2/\text{s}]$  y  $\mu = [\text{m}^3/\text{J}]$ . Si  $\gamma = 1$  entonces estamos en el régimen no relativista, donde la magnitud registrada en ambos sistemas es la misma, conforme  $\gamma$  crece, también cambia la cantidad  $\mathbf{M}'$  registrada en el sistema  $S'$ . Al sustituir tendríamos la contribución por la magnitud al flujo en la superficie de la Tierra:

$$\boxed{\phi_{m'} = \alpha e^{m\mu(\log(\gamma)+\rho)}} \quad (2.36)$$

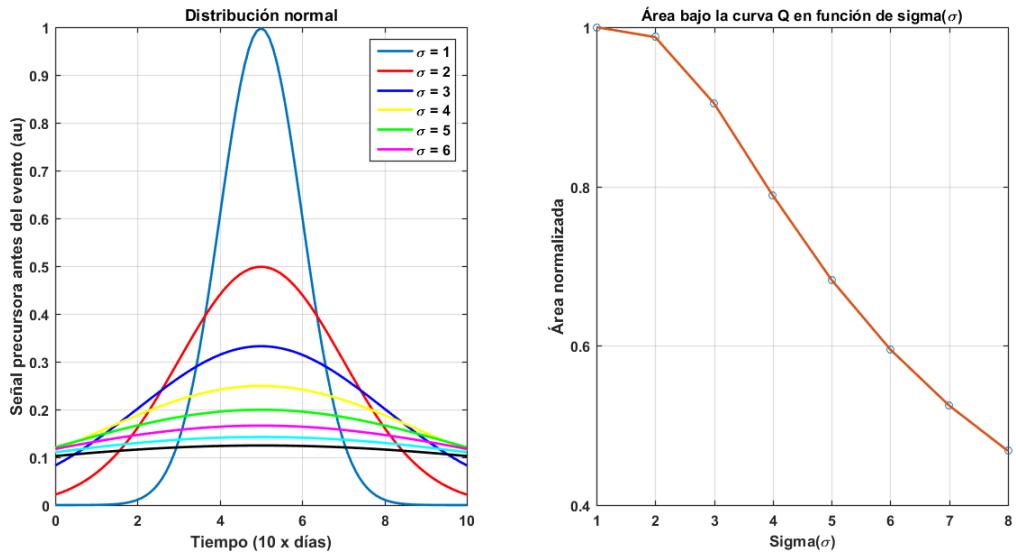
**Estimación de la magnitud sísmica a partir de la densidad de energía de la señal precursora.** En una región influenciada por un evento sísmico, se puede estudiar la dependencia temporal de la variable  $\phi_T(t)$  2.17 para encontrar relaciones entre la forma de la curva y la magnitud del evento sísmico. Resultados experimentales mostrados en este trabajo, indican que la señal incrementa significativamente en el tiempo antes de la ocurrencia del evento sísmico. Una revisión cuantitativa del fenómeno, podría arrojar una relación experimental entre la densidad de energía  $Q$  y la magnitud  $m$ . Definiendo  $Q$  como:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \phi_T dt \quad (2.37)$$

Donde  $t_1$  y  $t_2$  marcan el tiempo en el cual se desea medir el área bajo la curva de la señal  $\phi_T$ , y la cantidad  $Q$  debería ser proporcional a la magnitud del evento sísmico  $m$ , suponiendo la cantidad  $\phi_T$  tenga la distribución normal:

$$\phi_T \sim \mathcal{N}(\mu) \quad (2.38)$$

donde  $\sigma$  representa el ancho temporal de la señal precursora, en la figura 2.10, se muestra que la forma de la distribución tiene una relación directa la cantidad  $Q$ .



**Figura 2.10:** A la izquierda, algunas distribuciones normales para  $\sigma = 1, 2, 3$  a la derecha el área bajo la curva de dichas curvas.

### 2.2.3. Contribución al precursor debido a la distancia sismo-estación.

Suponiendo que la anomalía electromagnética generada por un evento sísmico tenga la máxima contribución en el epicentro del mismo, se propone que la contribución al flujo total por parte de esa anomalía sea:

$$\phi_r = \alpha_1 e^{-(r_i - r_j)^2 / 2\sigma^2} \quad (2.39)$$

La expresión 2.39 propone que dicha anomalía  $\phi_r$  decae simétricamente a partir del epicentro donde ocurre el sismo en función de la distancia  $\Delta r_{ij}$  que es la distancia entre la estación  $r_i$  y el sismo  $r_j$ ,  $\alpha_1$  es una constante para fijar una línea base en la señal y puede ser determinada por medio de resultados experimentales, mientras que  $\sigma$  será denominada como la región de influencia sísmica, y se define como la región en el entorno del epicentro sísmico y que denota el límite donde es posible captar alguna señal precursora discernible del ruido instrumental (Herraiz et al. [10]), así se define:

$$\sigma = \eta m^\lambda \quad (2.40)$$

La relación 2.40 es una relación experimental donde  $m$  es la magnitud del sismo en un sistema de referencia en reposo  $\mathbf{S}$ ,  $\eta$  es una constante que da la línea base de ruido electromagnético,  $\lambda$  es una exponente que depende de parámetros sísmicos, geográficos y geológicos definidos por la región y sus valores están en el rango de  $[-2, 2]$ , siendo valores negativos las regiones que presentan poca influencia electromagnética y valores positivos regiones de gran influencia electromagnética mientras que un valor  $\lambda = 0$  implicaría una no dependencia electromagnética con respecto a la magnitud sísmica, usando la ecuación 2.34 y sustituyéndola en 2.40, se obtiene la ecuación 2.41 y se puede observar su efecto en la figura 2.11.

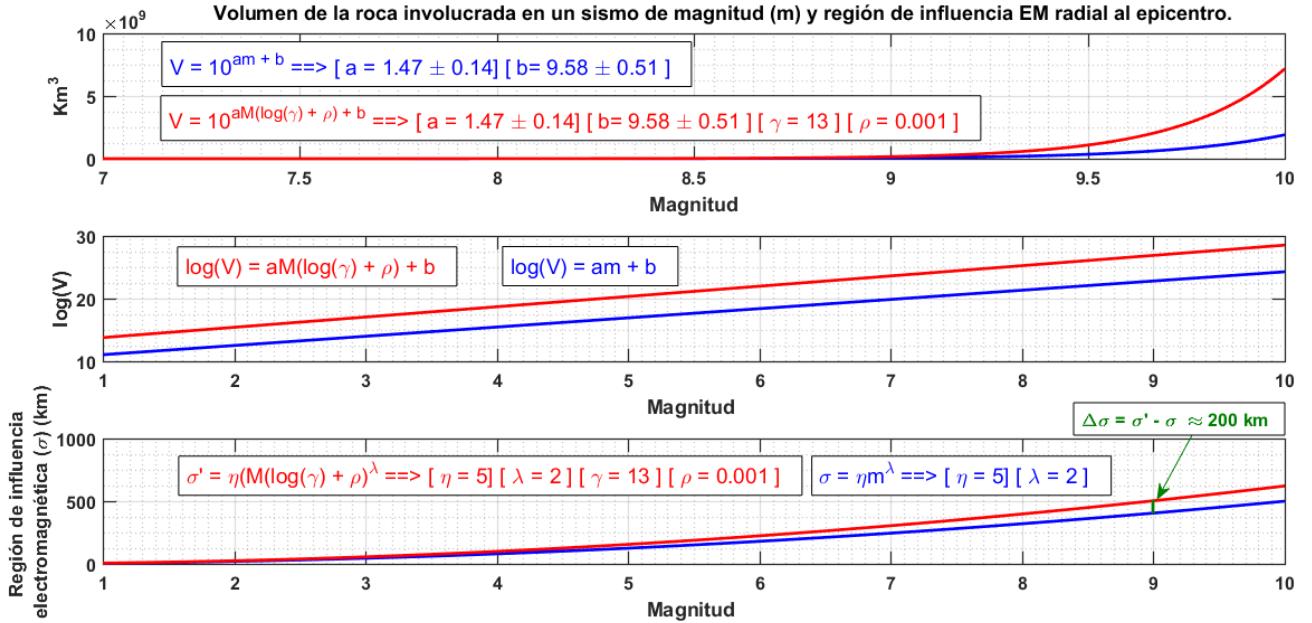
$$\sigma t = \eta(M(\log(\gamma) + \rho))^\lambda \quad (2.41)$$

La distancia  $\Delta r'_{ij}$  es dada por:

$$\Delta r'_{ij} = |r'_i - r'_j| = (\Delta x'^2_{ij} + \Delta y'^2_{ij} + \Delta z'^2_{ij})^{1/2} \quad (2.42)$$

Por lo tanto, se sigue que la cantidad  $\phi_{r'}$  que es la contribución a la señal debido a la geometría estación-evento, queda:

$$\phi_{r'} = \alpha_1 e^{-\Delta r_{ij}^2/2\sigma^2} \quad (2.43)$$



**Figura 2.11:** Región de influencia electromagnética corregida y no corregida para  $\gamma = 1$  (azul) y  $\gamma = 13$  (rojo), relación entre el volumen involucrado en un sismo de magnitud ( $m$ ) (Gutenberg y Richter [30]).

## 2.2.4. Contribución total a la señal precursora relativista.

Dada la cantidad:

$$\Phi_T(E(t), B(t), r, m, v) = \phi_{r'} \phi_{m'} \phi_{u'} \quad (2.44)$$

Y usando la aproximación discutida antes para flujos verticales:

$$\Phi_{u'} \simeq \Phi_{u'_z} \quad (2.45)$$

Dejando:

$$\Phi_T = \phi_{r'} \phi_{m'} \phi_{u'_z} \quad (2.46)$$

Y sustituyendo las cantidades  $\phi_{r'}$  de 2.43,  $\phi_{m'}$  de 2.36 y  $\phi_{u'}$  de 2.26, se obtiene la función:

$$\Phi_T(t) = -c\beta\alpha e^{[(\log(\gamma)+\rho)m-\Delta r_{ij}^2/2\sigma^2]} \left( \frac{B_x^2(t) + B_y^2(t)}{B_x^2(t) + B_y^2(t) + B_z^2(t)\gamma^{-2}} \right) \quad (2.47)$$

La función 2.47 representa una forma de medir de manera indirecta las fluctuaciones temporales en las componentes del campo geomagnético, condicionadas por: La magnitud sísmica  $m$ , la configuración espacial sismo-estación geomagnética ( $r_{ij}$ ), la región de influencia sísmica ( $\sigma$ ) y la combinación no lineal de las componentes de campo geomagnético, que están moduladas por el factor gamma de Lorentz. En principio, para un estudio “offline” se conocen todos estos parámetros experimentales, así que se debe suponer la región de influencia sísmica dentro de un rango de valores, y algunos otros parámetros serán fijados a 1, lo que no perjudica en nada esta propuesta.

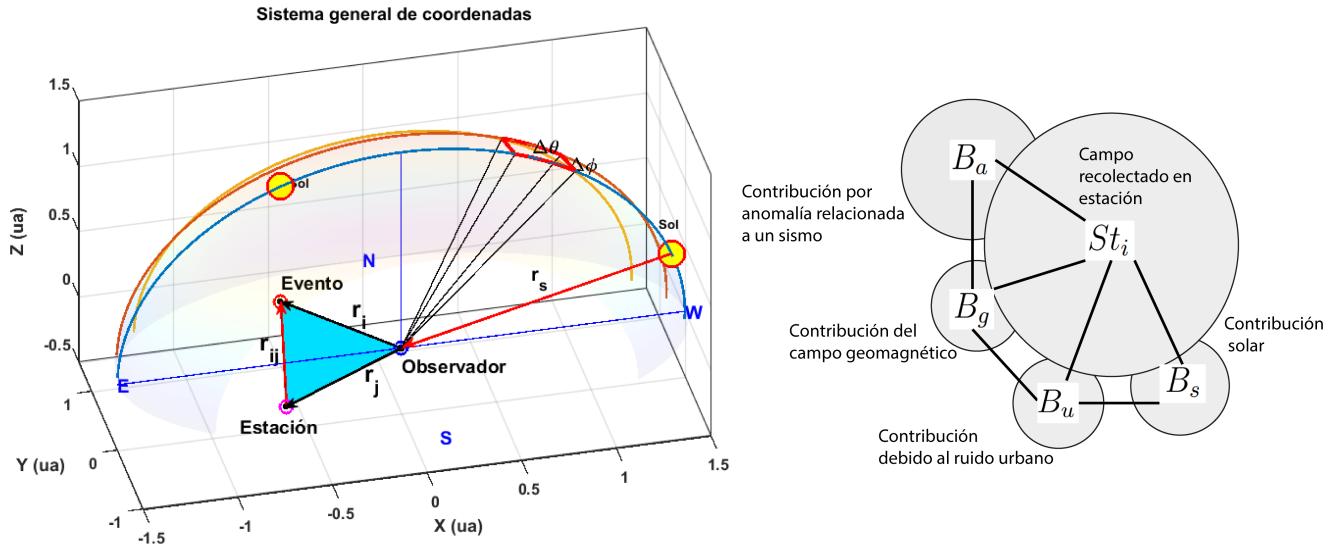
Comportamientos irregulares en plazos de tiempos que varían desde días hasta meses podrían ser detectados e identificados con el análisis correcto, se propone entonces realizar registros a largo del tiempo de la cantidad  $\Phi_T$  y de sus primeras derivadas, dicho estudio nos permitirá detectar, analizar y etiquetar anomalías en la señal precursora, sin embargo, la detección de una señal anómala antes de un terremoto importante, no es suficiente, por lo que se realizarán varios estudios para determinar si verdaderamente existe algún grado de correlación entre la anomalía detectada en la señal precursora y el evento sísmico.

## 2.2.5. Señales no correlacionadas con la señal precursora.

Cualquier estudio a potenciales precursores sísmicos basados en señales electromagnéticas recogidas por estaciones en tierra debe tener en cuenta el ruido presente en el sistema, durante esta investigación se identificaron algunas de esas fuentes de ruido (Rosales et al. [8]), en especial las que serán medidas en una estación geomagnética y no están relacionadas con la actividad sísmica de la zona, el campo magnético terrestre registrado en una estación, es la media local de todas las contribuciones al campo en una determinada zona, es decir, si  $\vec{B}_{St}$  es el campo magnético registrado en un determinado punto de la Tierra:

$$\vec{B}_{St} = \vec{B}_g + \vec{B}_s + \vec{B}_{sd} + \vec{B}_u + \dots \quad (2.48)$$

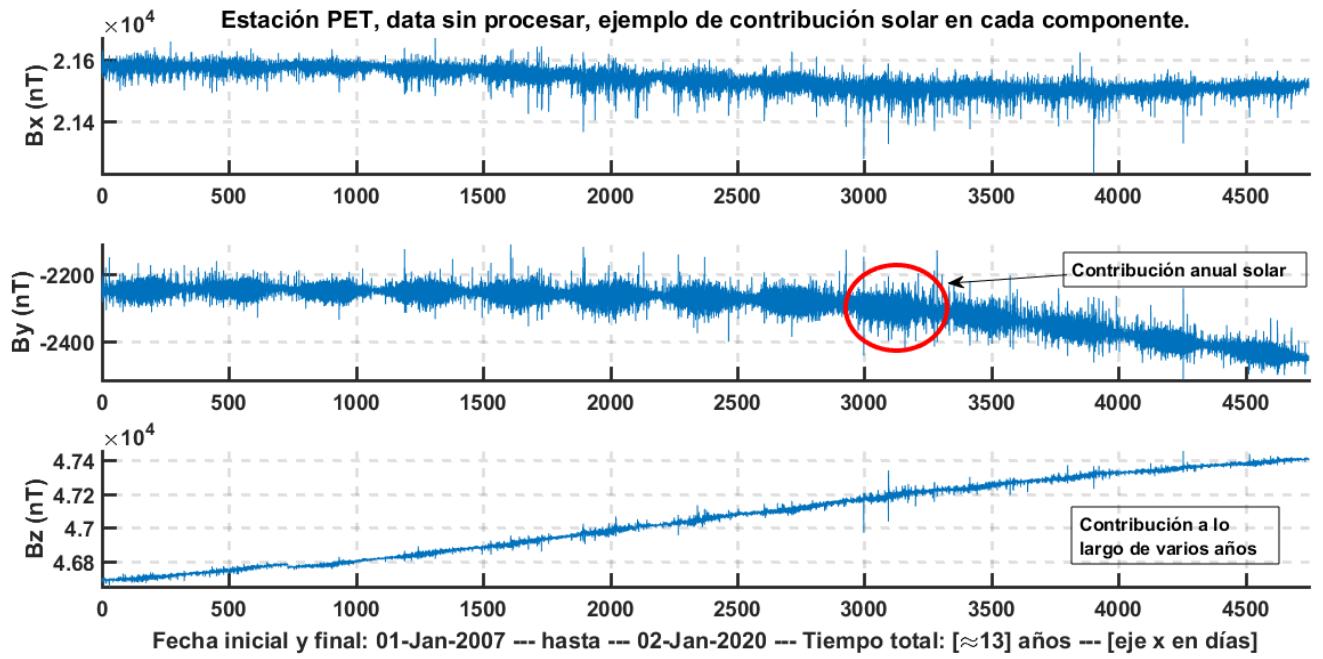
En la ecuación 2.48,  $\vec{B}_g$  es el campo generado por la Tierra debido a procesos naturales no relacionados con la acumulación de estrés en la roca,  $\vec{B}_s$  es la contribución debido a actividad solar a largo plazo,  $\vec{B}_{sd}$  es la contribución debido a la actividad solar diaria y  $\vec{B}_u$  es el ruido ambiental presente en la zona.  $r$  correspondiente a esos años de datos.



**Figura 2.12:** Sistema de coordenadas general, a la izquierda se muestra la posición aparente solar ( $\Delta\theta, \Delta\phi, r_s$ ) a lo largo de distintos días conforme pasa el año, la posición de una estación geomagnética  $r_j$ , el evento sísmico  $r_i$ , la distancia estación-evento  $r_{ij}$ , la posición. A la derecha se muestra el carácter multifactorial de las distintas contribuciones recogidas por una estación geomagnética.

Todos los elementos mostrados en la ecuación 2.48 y en la figura 2.12 deben ser tomados en cuenta para un estudio correlacional de la señal  $\Phi_T$  con el fenómeno sísmico. Entonces, en un sistema como el ilustrado en la figura 2.12 y considerando que en la mayoría de las investigaciones modernas sobre precursores sísmicos (Kappler et al. [15]), se ha llegado al consenso de que remover o minimizar contribuciones externas es fundamental y saludable para la obtención de resultados que puedan

ser creíbles. Un ejemplo directo de como la contribución  $\vec{B}_s$  se manifiesta en los datos se puede observar en la figura 2.13, donde se observa la contribución anual solar y una contribución más larga probablemente asociada al ciclo sola



**Figura 2.13:** Componentes  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  directamente extraídas de INTERMAGNET (estación PET) donde se visualiza el impacto de la contribución solar a lo largo de varios años.

## 2.2.6. Discusión sobre la señal precursora relativista.

La cantidad precursora  $\Phi_T$  tiene el potencial de reflejar cambios a lo largo del tiempo antes, durante y después de un terremoto. Esto debido a la forma en que la función  $\Phi_T$  transforma las componentes de campo magnético a una señal precursora, se procede a normalizar todas las componentes geomagnéticas a ( $\sigma = 1$ ) y media ( $\mu = 0$ ), esto es relativamente común en investigaciones que requieran comparar conjuntos de datos medidos por instrumentos distintos o incluso laboratorios independientes, permite una comparación más directa entre cada componente geomagnética de estación a estación y de esa manera garantizar que las componentes de distintas estaciones, con distintos instrumentos de medición sean comparables. En las siguientes secciones se estudiará con más detalles sobre algunas de las ventajas de usar la transformación 2.47, revisando la forma funcional relacionada con los campos geomagnéticos en la expresión 2.47 con la intención de tener una aproximación bastante precisa del comportamiento de la función ante diferentes situaciones, si se hace una primera generalización:

$$\phi_t(t) = A \left( \frac{B_x^2(t) + B_y^2(t)}{B_x^2(t) + B_y^2(t) + B_z^2(t) \gamma^{-2}} \right) \quad (2.49)$$

Donde  $A$  sería:

$$A = -c\beta\alpha e^{[(\log(\gamma)+\rho)m-\Delta r_{ij}^2/2\sigma^2]} \quad (2.50)$$

El factor  $A$  mostrado en la ecuación 2.50, tiene en cuenta factores como:

1. Las características de la zona.

2. Geometría estación-sismos.
3. El factor gamma, magnitud del evento sísmico, región de influencia sísmica, entre otras.

Si se estudia el gradiente de 2.49 y como ya se determinó  $\sigma = 1$  para todas las componentes, eso dejará tres elementos importantes que trabajan en conjunto para generar la señal precursora.

1. La fase de la componente  $B_z$ .
2. Las fases de las componentes  $B_x$  y  $B_y$ .
3. El factor  $\gamma$ .

Antes de proceder a discutir sobre cada uno de estos elementos y explicar su importancia en la construcción de la señal precursora. Es necesario definir brevemente la fase de la señal geomagnética.

**La fase de la señal geomagnética.** Se define la fase entre dos señales como el ángulo entre ellas, es decir, que para las componentes del campo geomagnético se pueden tener tres ángulos que expresan sus fases relativas, definidas así:

$$\xi(t) = \arctan(B_x(t)/B_y(t)) \quad (2.51)$$

$$\beta(t) = \arctan(B_z(t)/B_y(t)) \quad (2.52)$$

$$\omega(t) = \arctan(B_z(t)/B_x(t)) \quad (2.53)$$

Estos ángulos están definidos para el sistema mostrado en la figura 1.2 (izquierda) y 2.14. Estas fases son una función del tiempo, dado que los campos también lo son.

**La importancia de la fase en la componente  $B_z$  para el precursor relativista.** La componente  $B_z$  es una componente importante en el estudio de las señales geomagnéticas que estudian precursores a eventos sísmicos, se hace mucho énfasis en la componente  $B_z$  que es catalogado como un campo secundario y su existencia es un indicador de inhomogeneidad lateral en la roca (Stanica et al. [14]), en la figura 2.16, se muestra como reacciona la derivada parcial del precursor con respecto a  $B_z$ , se muestra como la señal es sensible a perturbaciones en la componente  $B_z$  y como esta interactúa con el factor  $\gamma$  el cual acompaña de manera única a  $B_z$  en la expresión 2.49.

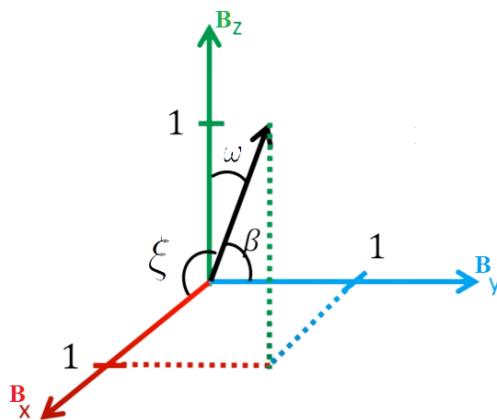
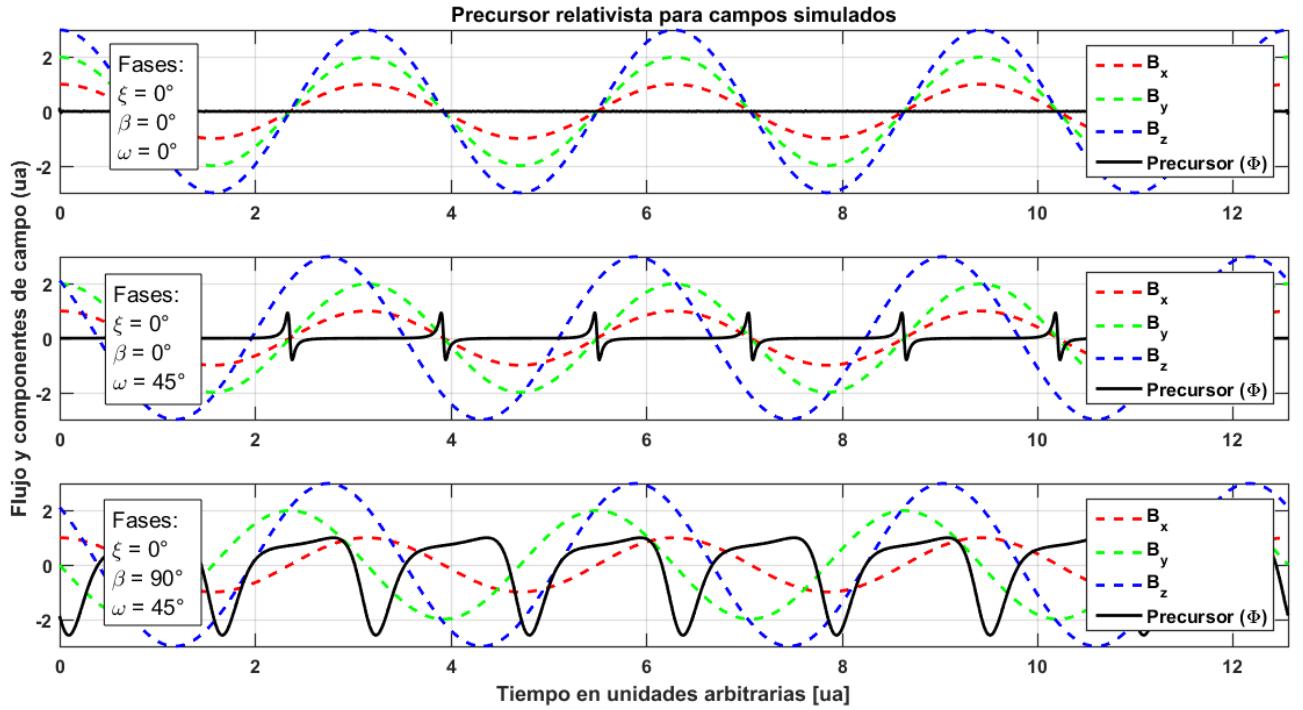


Figura 2.14: Representación de la fase entre componentes  $B_x, B_y, B_z$ .

**La importancia de las fases de las componentes  $B_x$  y  $B_y$ .** En la figura 2.15, se procede a simular las componentes de  $\vec{B}$  y calcular el precursor. Uno de los aspectos que se pueden apreciar de la figura, es que existen picos en la señal precursora relativista para ciertos estados del campo geomagnético, esto es importante debido a que muestra que existe una asociación directa entre la fase de las componentes de  $\vec{B}$  y la amplitud de  $\nabla\phi$ .

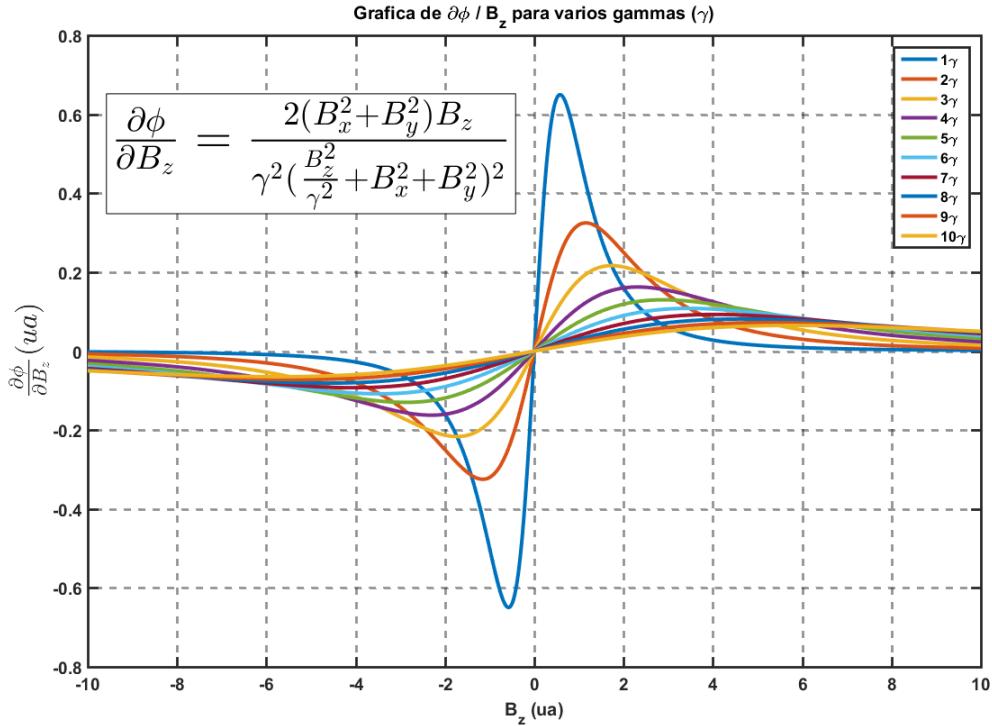


**Figura 2.15:** Ejemplo de señal precursora relativista  $\nabla\Phi_T(t)$  con curva de color negro y simulación de ondas  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ , con curvas rojas, verdes y azul respectivamente, gamma fijado a un valor arbitrario.

Si se supone la condición ideal en la cantidad A nombrada en 2.49, donde  $\Delta r_{ij} = 0$  y  $m_j = 0$ , esto implicaría que se tiene un instrumento directamente encima del epicentro del terremoto y que se está estudiando solo la contribución asociada a los campos  $\vec{B}$  en una determinada zona, la fase en las componentes de  $\vec{B}$ , es bastante robusta a ruido, en el peor de los casos, seguiremos teniendo activaciones claras cuando ciertas componentes del campo geomagnético se aproximen a cero, este hecho, señala que a la hora de procesar los datos relacionados con el campo  $\vec{B}$  es necesario hacerlo sin afectar la fase de la señal, si se introdujera un procedimiento que en principio reduzca el ruido, pero termine afectando la fase en las componentes geomagnéticas se podría estar destruyendo activaciones (picos y valles) en el precursor relativista y, por lo tanto, enmascarando aún más la perturbación relacionada con la acumulación de estrés antes, durante y después de un terremoto que se esté preparando en la zona.

**La importancia del factor  $\gamma$ .** El factor gamma afecta tanto los elementos relacionados con el campo  $B_z$  como algunos elementos del factor  $A$  (ec 2.50), dejaremos las interacciones entre el factor gamma ( $\gamma$ ) y  $A$  para un estudio más completo en la siguiente sección. Ya en la figura 2.16, se asomó una de esas interacciones, en la figura 2.15 se visualiza las derivadas parciales con respecto a gamma  $\partial\Phi_T/\partial\gamma$  y  $\partial\Phi_T/\partial B_z$  en ambas se muestra como existe un punto crítico en los alrededores de  $B_x = 0$  y que el factor gamma tiene el potencial de resaltar interacciones únicas en la combinación de valores que se puedan obtener de las componentes de  $B$ . En la figura 2.17, se calculó dos derivadas parciales para estudiar el efecto de gamma sobre la señal precursora,

primero ( $\partial\Phi_T/\partial B_z$ ) debido a la importancia de esta componente en investigaciones relacionadas con precursores sísmicos, segundo ( $\partial\Phi_T/\partial\gamma$ ) debido a que es importante determinar como dicho factor podría estar afectando el precursor.

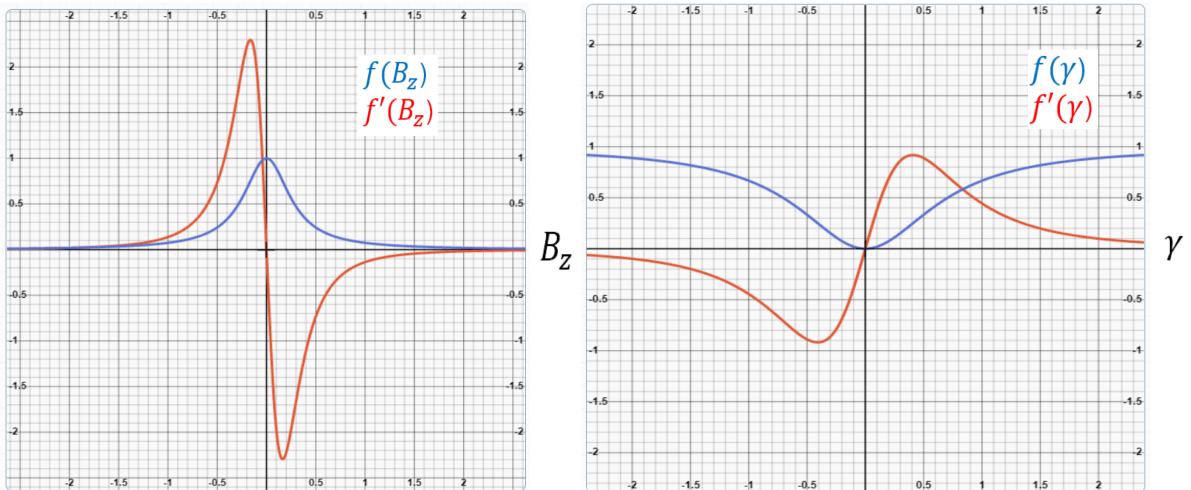


**Figura 2.16:** Forma de  $\partial\Phi_T/\partial B_z$  para varios gammas, se puede apreciar claramente el punto crítico para  $B_z = 0$  independiente del factor gamma.

Derivadas parciales respecto al precursor.

$$\frac{\partial\phi_T}{\partial B_z} = \frac{\partial}{\partial B_z} \left( \frac{B_x^2 + B_y^2}{B_x^2 + B_y^2 + \frac{B_z^2}{\gamma^2}} \right) = -\frac{2(B_x^2 + B_y^2)B_z}{\gamma^2 \left( \frac{B_z^2}{\gamma^2} + B_x^2 + B_y^2 \right)^2}$$

$$\frac{\partial\phi_T}{\partial\gamma} = \frac{\partial}{\partial\gamma} \left( \frac{B_x^2 + B_y^2}{B_x^2 + B_y^2 + \frac{B_z^2}{\gamma^2}} \right) = \frac{2(B_x^2 + B_y^2)B_z^2}{\left( \frac{B_z^2}{\gamma^2} + B_x^2 + B_y^2 \right)^2 \gamma^3}$$



**Figura 2.17:** Figuras muestran expresión funcional del precursor sísmico (en azul), a la izquierda derivada parcial de la señal precursora  $\Phi_T(t)$  con respecto a  $B_z$  (en rojo), a la derecha derivada parcial de la señal precursora  $\Phi_T(t)$  con respecto a  $\gamma$  (en rojo).

Ambas parciales presentan un punto crítico ( $\partial\Phi_T/\partial\gamma = 0$  y  $\partial\Phi_T/\partial B_z = 0$ ), sin embargo, el valor  $\gamma = 0$  no existe (ni tiene sentido físico) para la forma en que está definida ( $\gamma$ ) en la ecuación 2.1, se muestra como para  $\gamma > 1$  la señal precursora se ve potencialmente afectada por “el efecto magnificador relativista” y este nos podría potencialmente permitir realizar una predicción sobre un sismo, esta relación, será estudiada con mayor profundidad en la siguiente sección.

## 2.3. El disparador relativista sísmico.

Con el propósito de tener una calibración exitosa, se puede usar un registro de eventos que ya hayan ocurrido y cuyos parámetros ya se conozcan de una determinada zona. Esto permitiría calibrar un disparador relativista sísmico, que determine cuál señal es anómala con respecto a la serie de datos anteriores. Buscando separar la línea base de la señal lo más posible de las señales que puedan ser asociadas a una anomalía en función de un gamma óptimo que se puede obtener exigiendo la condición  $\partial\phi_T/\partial\gamma = 0$  se tendrían máximos y mínimos que dependen únicamente de los parámetros sísmicos como la magnitud  $m$ , la distancia relativa entre el sismo y la estación geomagnética ( $\Delta r'_{ij}$ ) la región espacial de influencia sísmica que son características de la zona  $\eta, \lambda$  y el factor de Lorentz  $\gamma$ . Para la contribución  $\phi_{r'}$  se asumirá que la anomalía geomagnética sucede justo en donde los instrumentos de la estación están ubicados, eso es  $\Delta r_{ij} = 0$ , también se puede revisar la contribución debido a la cantidad 2.26, esta se hace independiente del tiempo cuando  $B_z = 0$ . Eso deja  $\partial\phi_T/\partial\gamma = \partial\phi_{m'}/\partial\gamma = 0$  para  $B_z = 0$  y  $\Delta r_{ij} = 0$ , se sigue revisando la cantidad  $\phi_{m'}$ :

$$\phi_{m'} = e^{m\mu(\log(\gamma)+\rho)} \quad (2.54)$$

Entonces, para determinar  $\partial\phi_z/\partial\gamma$  se muestra que:

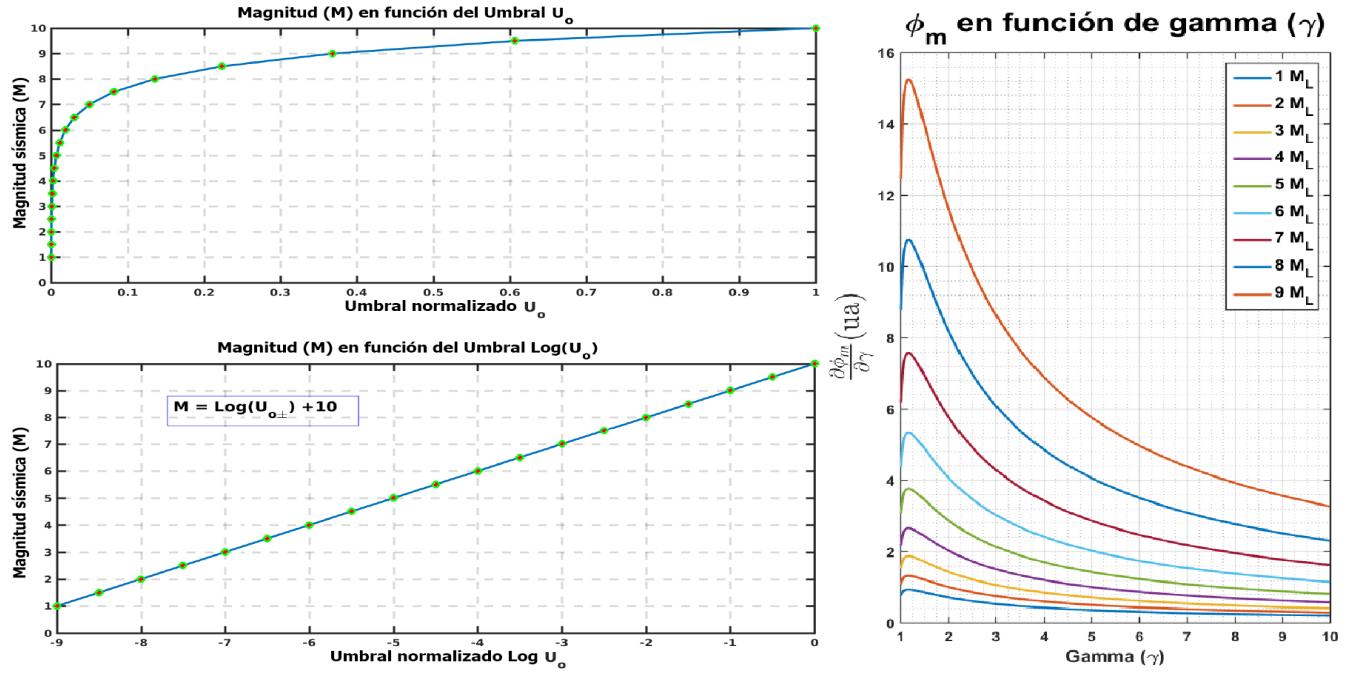
$$\frac{\partial\phi_{m'}}{\partial\gamma} = \frac{m\mu}{\gamma} e^{m\mu(\log(\gamma)+\rho)} \quad (2.55)$$

La ecuación 2.55, es una función exponencial y representa la tasa de cambio respecto a la variable gamma, dicho cambio estará modulado por las cantidades  $\mu$  que es una constante que nos permite determinar la forma del decaimiento de la señal y sus valores están ubicados entre ( $0.01 < \mu < 0.1$ ) y los valores de gamma  $\gamma$  correspondientes a energías entre (2 y 10 GeV) que corresponde con los valores de gamma ( $19 < \gamma < 100$ ). Se procede a reescribir la ecuación 2.55 a una forma equivalente.

$$\frac{\partial\phi_{m'}}{\partial\gamma} = \frac{m\mu}{\gamma} e^{m\mu(\log(\gamma+\gamma_0)+\rho)} \quad (2.56)$$

Donde la cantidad  $\gamma_0$  representa un desplazamiento local en torno a gamma ( $\gamma$ ) que permitirá estudiar un entorno de gammas desde  $\gamma$  hasta  $\gamma + \gamma_0$ , ajustando  $\gamma_0 = -1$  se obtiene lo mostrado en la figura 2.18, donde se muestra que el gamma exalta la señal precursora para valores de gammas mayores a uno. El máximo exacto de la expresión 2.56 dependerá directamente del  $\mu$  y la magnitud  $m$  que dependen de la zona de estudio. Una vez determinado que cada magnitud tendrá una curva característica, se puede proceder a identificar un umbral de clasificación para cada magnitud. Para generar un umbral que tome en cuenta los máximos y mínimos de la señal, se necesita introducir el valor umbral  $U_{o\pm}$  que es el umbral de detección normalizado respecto al máximo y mínimo de dicha señal, suponiendo un registro de la cantidad  $\phi_{m'}$  se denominará como  $m_\pm$  como las magnitudes máximas y mínimas usadas en un determinado registro, usando (+) para representar el valor más alto y (-) para representar el valor más bajo, usando la misma lógica para el valor y  $\mu_\pm$ , definiendo la cantidad  $U_{o\pm}$  como se muestra en la ecuación 2.57, esta cantidad adimensional dependerá directamente del valor gamma  $\gamma$  y tendrá valores entre  $\left[\frac{u_o}{u_{o+}}, 1\right]$ , esto también se ve expresado en la figura 2.18.

$$U_{o\pm} = \frac{u_o}{u_{o\pm}} = \frac{e^{m\mu(\log(\gamma+\gamma_0)+\rho)}}{e^{m\pm(\mu\pm\log(\gamma+\gamma_0)+\rho)\mu\pm}} \quad (2.57)$$



**Figura 2.18:** A la izquierda relaciones entre la magnitud registrada y el umbral de medición. A la derecha flujo sin normalizar para  $M = 1$  al 9 en función del gamma.

## 2.4. Probabilidad de ocurrencia.

Sea el espacio probabilístico  $(H, \mathbb{B})$ , siendo  $H$  el conjunto de posibles eventos,  $B$  el conjunto de probabilidades,  $M$  el evento precursor y  $O$  la ocurrencia de un sismo ( $M, O \in H$ ), la probabilidad de que pase un evento precursor siempre existe  $B(M) > 0$  y la probabilidad de que tiemble en esa región geográfica también se cumple  $B(M) > 0$ . Entonces, la probabilidad condicional de  $O$  dado  $M$  se define:

$$B(M | O) = \frac{B(M \cap O)}{B(O)}$$

Tenemos que  $B(M | O)$  se interpreta como: Si  $O$  ocurre, la porción condicional  $M$  se debe cumplir.

- Se puede presentar que el precursor  $M$  asociado a otros fenómenos naturales que no están relacionados con la actividad sísmica es grande.
- Si un evento precursor ocurriera, la probabilidad condicional de que tiemble existe.
- Existe una alta probabilidad de que se presente un sismo sin que se presente el precursor  $O$ .

La probabilidad de que un evento sísmico ocurra debe tener en cuenta 3 factores importantes (1) La localización del epicentro del evento sísmico (2) La localización temporal del evento (3) La magnitud esperada. Estos tres factores se propone sean determinados de la siguiente manera: (1) La estimación espacial tendrá en cuenta la localización de la estación geomagnética, así que se considerarán las proximidades de la estación geomagnética como la zona más probable de ocurrencia, las cantidades exactas y las probabilidades serán determinados por estudios “offline” previos que

permitan caracterizar la zona. (2) La probabilidad de ocurrencia en un momento del tiempo puede ser determinada debido a una señal que alcanza un máximo, el cual supera un umbral catalogando dicha señal como anómala y, por lo tanto, generando una alerta temprana. (3) La probabilidad asociada a la magnitud esperada puede determinarse estudiando el área bajo la curva una vez la señal ha sido catalogada como anómala. Entonces, la probabilidad de ocurrencia espacio temporal de que un evento de magnitud ( $m$ ) ocurra estará condicionada por tres términos, a saber: (1ero) el asociado a la magnitud esperada ( $(P_{m_o})$ ) (2do) el asociado la probabilidad temporal ( $(P_{t_o})$ ) (3ero) el asociado a la probabilidad espacial ( $(P_{r_o})$ ). Las tres probabilidades combinadas forman una probabilidad condicionada  $P_{(r_o, m_o, t_o)}$  definida como:

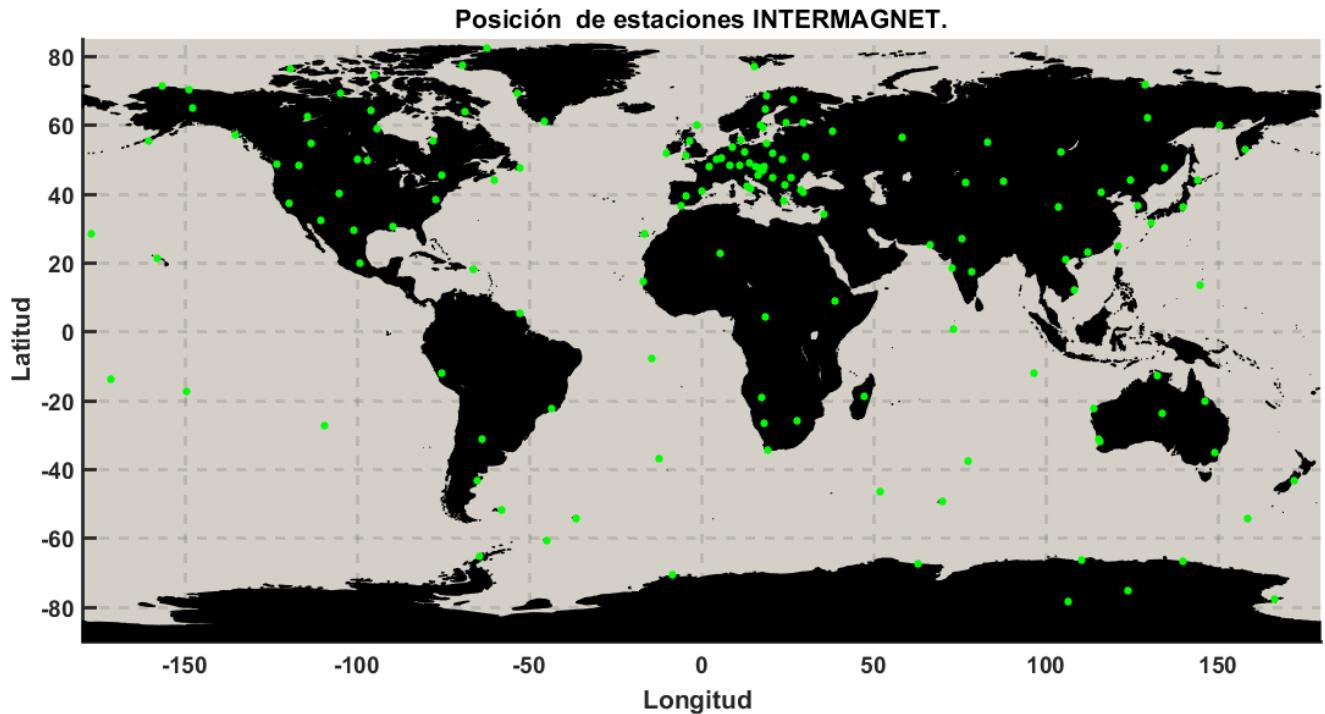
$$P_{(\Delta r_o, \Delta m_o, \Delta t_o)} = P_{r_o} \times P_{m_o} \times P_{t_o} \quad (2.58)$$

Esta ecuación expresa la complejidad multifactorial en la predicción de un terremoto.

# Capítulo 3

## Metodología general

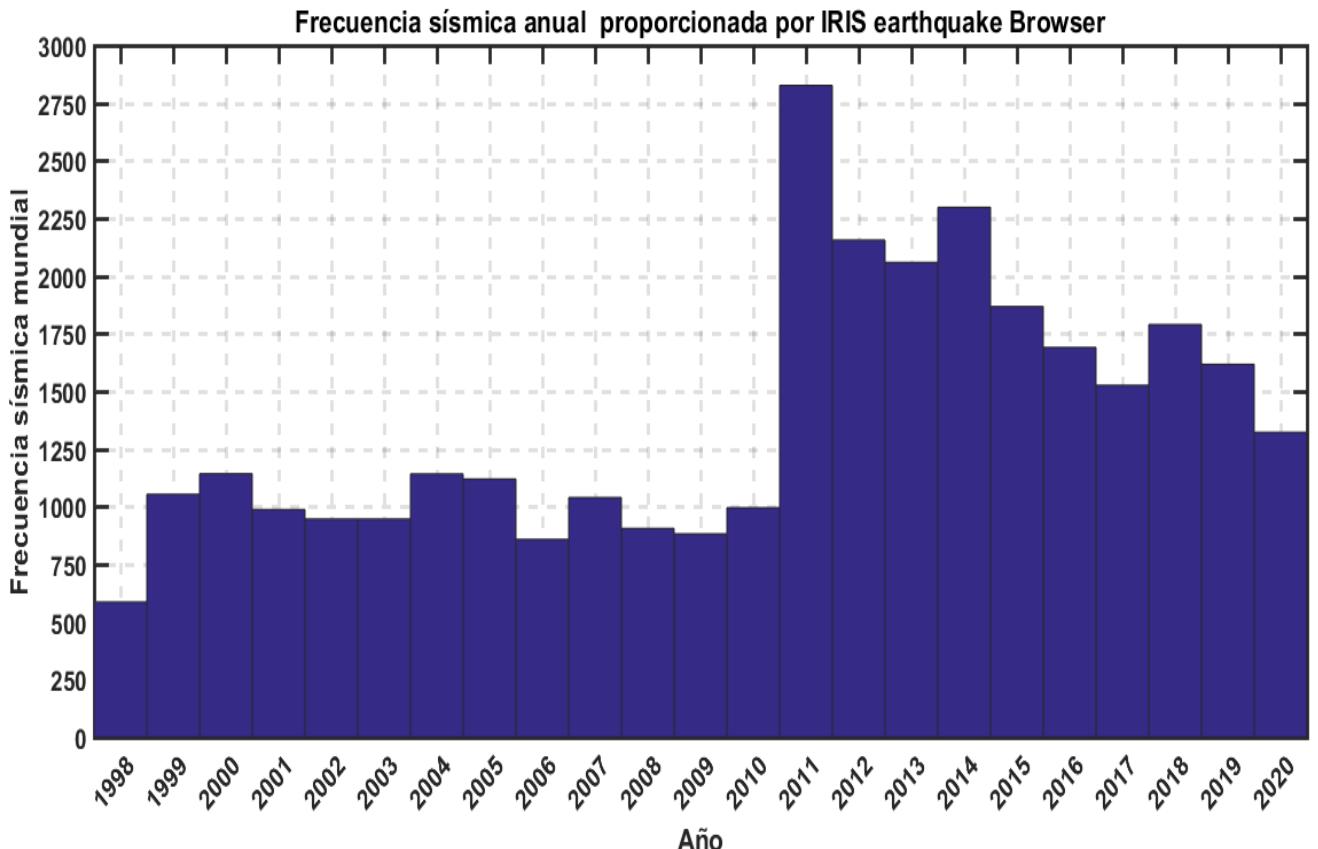
En investigaciones que relacionan actividad sísmica y campos electromagnéticos, se presenta el gran problema de obtener datos confiables que sean lo suficientemente precisos para poder extraer predicciones útiles de ellos. Por ello, este capítulo, empezará analizando la metodología de obtención de datos, los criterios, los algoritmos y la metodología general que se empleará para minimizar variaciones sistemáticas a mediano y largo plazo, antes, durante y después de un evento sísmico. Para esta investigación fue fundamental el trabajo de INTERMAGNET (figura 3.1), los cuales brindan de manera libre datos de aproximadamente 140 estaciones. INTERMAGNET presenta la oportunidad de analizar durante varios años diversas regiones del mundo, para su data en formato definitivo teniendo errores de  $\pm 5nT$  y resoluciones de  $0.1nT$  (Coles y House [25]).



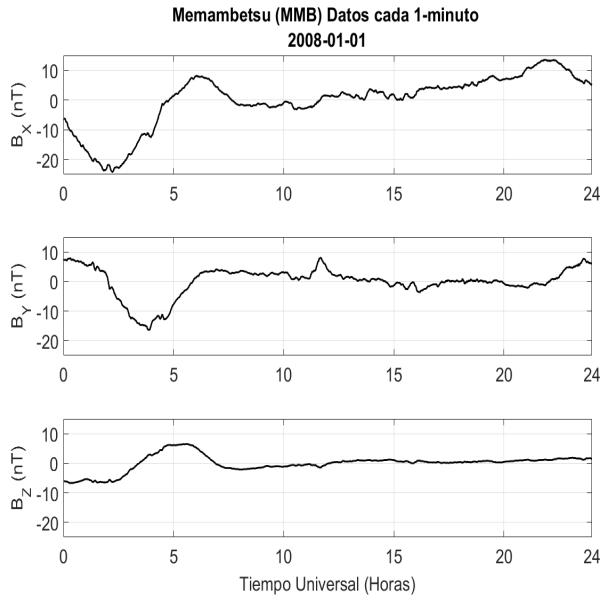
**Figura 3.1:** Mapa mundial, puntos verdes representan localización de las estaciones INTERMAGNET disponibles.

En este capítulo también se detallarán aspectos generales en la selección de estaciones y eventos sísmicos, se discutirá la metodología general que posteriormente será utilizada en cada zona de estudio, el procedimiento tiene como objetivo detectar anomalías y caracterizar apropiadamente la señal. Uno de los principales productos de un observatorio geomagnético son los datos de los parámetros geomagnéticos dados en promedios cada minuto, hora, diario, mensual y anual expresados

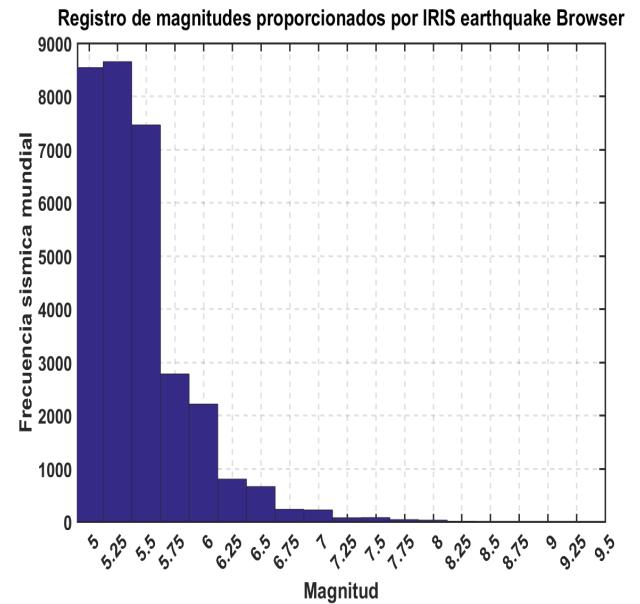
en valores absolutos, además del índice de actividad magnética (índice K). Para ubicar la señal precursora con los datos obtenidos de dichas estaciones se necesita primero obtener una fuente de datos adecuada, para eso se usó la red de estaciones INTERMAGNET que permite el acceso a un numeroso conjunto de datos sobre el estado de las componentes de campo magnético terrestre en diversas estaciones. De dichas estaciones se extraen las componentes ( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ ) (figura 3.3 (a)) de cada estación y se asocian en grupos de tres estaciones para así tener nueve medidas de datos en tres estaciones relativamente cercanas ( $\sim 1000\text{km}$ ) en los mismos días. Esto es importante dado que permitirá luego distinguir entre variaciones locales debido a procesos no relacionados y variaciones locales que puedan asociarse como un precursor a un evento sísmico. La distribución de estaciones favorece mejores resultados en zonas donde la densidad de estaciones es alta, se identifican tres zonas de estudio: El este de Asia, Europa y América del Norte. Cada zona tiene su actividad sísmica única y durante la investigación se determinó que cada zona tenía características que las hacen únicas para su estudio, la distancia entre estaciones, la calidad de los datos que estén disponibles, la cantidad de terremotos en la zona y la prominencia de la modulación solar sobre las componentes de campo magnético terrestre. Para esta investigación, se recolectó un conjunto de más de 30000 sismos registrados en la plataforma digital de IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology), la cual proporciona datos importantes sobre los sismos como: fechas, magnitudes, profundidades y otros elementos importantes que permiten realizar la investigación con una gran cantidad de sismos en los cuales probar el precursor propuesto (algunos histogramas extraídos de IRIS se visualizan en las figuras 3.3 (b) y 3.2). Esta investigación deliberadamente no se enfocó de manera profunda en sismos de magnitud menor a seis, pero se consideró valioso tenerlos en cuenta en la base de datos, ya que nos permite entender mejor la sismicidad de las zonas que se estudiarán.



**Figura 3.2:** Histograma de datos obtenidos de la plataforma IRIS mostrando la distribución temporal de la magnitud sísmica a lo largo de los datos, para sismos de magnitud mayores a 5.



(a) Datos de la estación Memambetsu(MMB) del día 01/01/2008 con un muestreo realizado cada minuto. Se muestra la variación estacionaria en los datos.



(b) Base de datos usada de sismos.

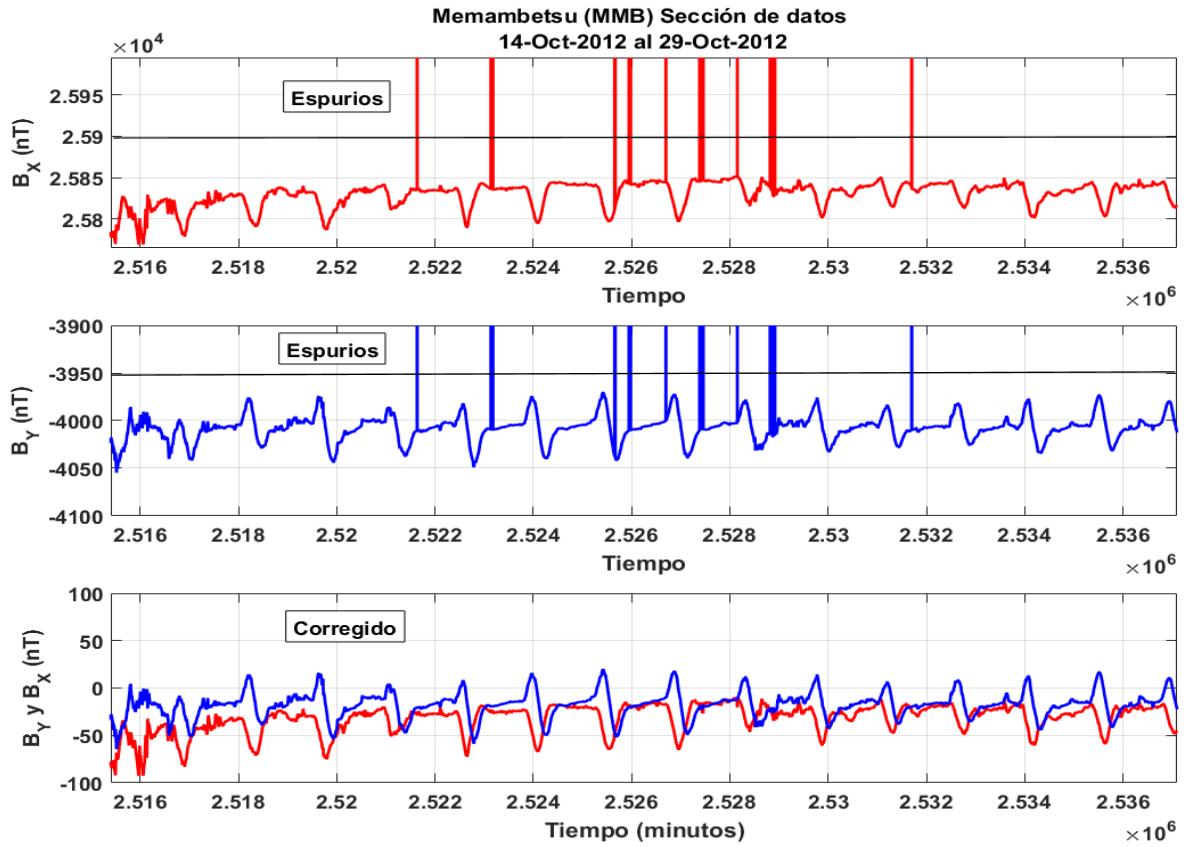
**Figura 3.3:** Datos de la estación Memambetsu(MMB) del día 01/01/2008 e histograma de magnitudes a nivel mundial de la base de datos usada.

### 3.1. Detección y sustitución de espurios.

La definición de espurio en un conjunto de datos es un problema muy estudiado en diversas ramas de la física, se definirá espurio como un dato que esté marcado previamente por la estación de la cual se extraen los datos, dicha marca será una etiqueta asociada a el índice correspondiente al dato espurio, la cual, estará definida como un dato cuyo valor esta cientos de veces por encima de la media de todo el conjunto de datos a procesar, para sustituir ese dato, se usará el siguiente criterio o regla de sustitución:

1. Si el dato espurio tiene contigo dos datos no espurios entonces se sustituirá el dato espurio por la media de los datos no espurios. Este planteamiento esta fundado en el entendido de que los campos magnéticos terrestres presentan comportamientos continuos y cambios muy leves de minuto a minuto.
2. Si se presenta más de un dato espurio de manera continuada en un tren de datos, se sustituye esa zona por la misma zona (temporal) del día anterior. Este procedimiento es vigilado de manera cuidadosa durante el proceso para que, en caso de que presentarán varios días de data ausente se tenga en cuenta a la hora de ver los resultados de un posterior análisis de esa región temporal (figura 3.4).

Además, durante todo el procedimiento, se llevará un registro del porcentaje de datos sustituidos sobre el total de datos para tener una idea de cuántos datos fueron sustituidos durante todo el procedimiento (cuadro 3.1), además de los índices asociados para poder verificar que las señales precursoras buscadas no sean generadas en los mismos índices que son sustituidos.



**Figura 3.4:** Datos ( $B_x, B_y$ ) de la estación Memambetsu(MMB), muestra espurios en los datos y corrección realizada.

**Cuadro 3.1:** Porcentaje de datos espurios corregidos por región de estudio

Región de estudio:	Japón	Norteamérica	Perú	Rusia	Norte de Europa zona silente
Media del porcentaje de datos corregidos:	0.012 %	2.28 %	0 %	0 %	0.0191 %

### 3.1.1. Criterio para la normalización de datos.

Para preparar el conjunto de datos luego de que ha sido debidamente limpiado de espurios y la media del conjunto de datos de cada componente se llevó a cero, se procede a normalizar los datos al dividir cada componente por su desviación relativa al conjunto. La normalización entendida como la transformación de los datos para escalarlos con la intención de que datos normalizados permitan realizar comparaciones entre conjuntos que en un principio tenían diferentes escalas. Esto permite también asegurar una contribución similar para cada componente de cada estación sin importar algunos efectos de influencias locales. En términos de niveles de medida, tales proporciones solo tienen sentido para medidas de proporción, tomando los datos  $B_i$  con  $i = x, y, z$  proporcionado por una estación  $j$ , entonces los datos normalizados  $B_{ij}^n$  tendrán  $\mu = 0$  y  $\sigma = 1$  y pueden ser escritos como:

$$B_{ij}^{n_1}(t) = \frac{B_{ij}(t) - \bar{B}_{ij}}{\sigma_{ij}} \quad (3.1)$$

Por otra parte, si se usan múltiples estaciones geomagnéticas de manera simultánea, entonces concatenamos las componentes ( $i$ ) de todas las estaciones ( $j$ ) para cada componente de la siguiente

manera:

$$B_i^{n_4}(t) = \frac{\Pi_j B_{ij}^{n_2}(t) - \overline{\Pi_j B_{ij}^{n_2}(t)}}{\Pi_j \sigma_i^{n_2}} \quad (3.2)$$

con  $j = 1, 2, 3, \dots, n_s$ ,  $n_s$  es el número de estaciones geomagnéticas usadas, y  $i = x, y, z$ . El operador  $\Pi_j B_{ij}^{n_2}(t) = [B_{i1}^{n_2}(t), B_{i2}^{n_2}(t), B_{i3}^{n_2}(t), \dots, B_{ij}^{n_2}(t)]$  es un arreglo unidimensional que contiene la ( $i$ -ésima) componente de  $B_{ij}^{n_2}$  de todas las estaciones geomagnéticas ( $j$ ) y  $\Pi_j \sigma_i^{n_2}$  es otro arreglo unidimensional que contiene las desviaciones estándar para la ( $i$ -ésima) componente para todas las estaciones geomagnéticas ( $j$ ). La cantidad  $\overline{\Pi_j B_{ij}^{n_2}(t)}$  es la media del valor  $\Pi_j B_{ij}^{n_2}(t)$ , esta normalización estará estandarizada a  $\mu = 0$  y  $\sigma = 1$ .

### 3.1.2. Discusión sobre el filtrado de datos.

Un posible método de reducción del ruido se realiza usando la suavización o *smoothing*, en el suavizado, los puntos de datos de una señal se modifican de modo que los puntos individuales que son más altos que los puntos inmediatamente adyacentes (presumiblemente debido al ruido) se reducen y se aumentan los puntos que son más bajos que los puntos adyacentes. Esto naturalmente conduce a una señal más suave (y una respuesta de paso más lenta a los cambios de señal). Siempre que la verdadera señal subyacente sea realmente suave, la verdadera señal no se distorsionará mucho por el suavizado, pero el ruido de alta frecuencia se reducirá. En términos de las componentes de frecuencia de una señal, una operación de suavizado actúa como un filtro de paso bajo, reduciendo los componentes de alta frecuencia y pasando los componentes de baja frecuencia con pocos cambios. Si la señal y el ruido se miden en todas las frecuencias, la relación señal/ruido se mejorará mediante el suavizado, en una cantidad que depende de la distribución de las frecuencias del ruido.

## 3.2. Ruido sistemático asociado a la contribución solar al campo geomagnético.

El campo magnético varía con el tiempo. Sus variaciones son diversas y se usarán algunas de las definiciones planteadas por otros investigadores, eso es definir variaciones temporales en función de su duración, intensidad y frecuencia. Según Rosales et al. [8] la señal geomagnética se puede caracterizar y clasificar por una combinación de tipos de señales que contiene: Micropulsaciones geomagnéticas, variaciones estacionarias o variaciones periódicas, variaciones cíclicas, variaciones no periódicas, variaciones seculares e inversiones geomagnéticas. Para reducir la contribución generada por el viento solar se estudiaron varios protocolos y técnicas que varían desde: ajustes de un polinomio a la media de los datos a lo largo del tiempo, compresiones lineales de la señal a partir de ciertos umbrales relativos a la media de la señal, filtros de Fourier, normalización de los datos adquiridos por diferentes estaciones y PCA (Principal Component Analysis).

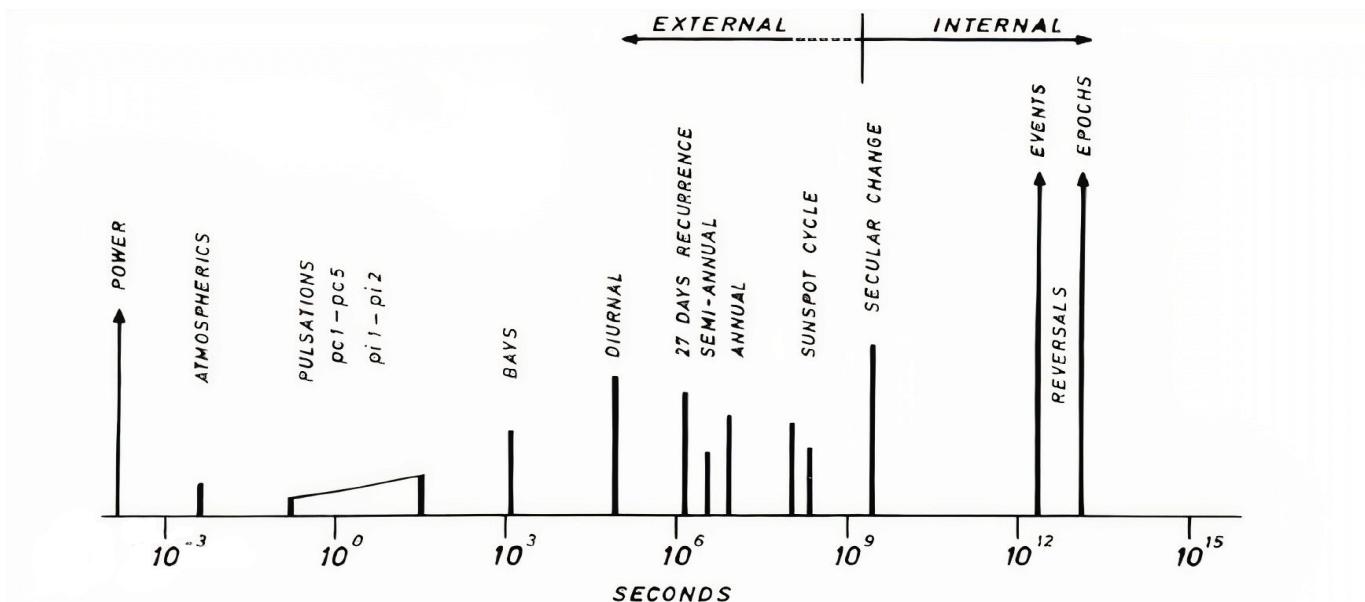
- **Polinomio a la media de los datos:** Para remover la tendencia de la señal observada a lo largo del tiempo, se propuso calcular un ajuste lineal por mínimos cuadrados de una línea recta (o una composición de líneas rectas) a los datos y se sustrae el resultado para remover la tendencia con la intención de remover el ciclo solar más extenso en los datos (el cual se manifiesta año tras año durante varias décadas). En caso de que el conjunto de datos presentara muchas irregularidades que no permitiera de manera precisa el ajuste lineal, se procede a restar la media de cada día para dejar la media en cero que es funcionalmente similar. Esto permitió tomar hasta 15 años de datos de algunas estaciones que han tenido varios cambios en los instrumentos y por lo tanto los datos originales presentaban saltos

significativos o discontinuidades en los datos formando una suerte de escalera donde cada escalón mantenía su rango relativo dentro del conjunto pero tiene un nivel de referencia distinta a otras secciones.

- **Compresión del rango de los datos:** Se propuso la creación de filtros compresores, que reducen linealmente la señal a partir de ciertos umbrales, esta técnica es importante en estaciones donde los espurios en los datos no estén miles de veces por encima de la media de los datos pero claramente sean discontinuidades tan repentinasy tan severas que perjudican los pasos posteriores de normalización de los datos como conjunto, ya que dichos espurios si se preservaran de manera fiel minimizarían la importancia relativa de los otros elementos que presuntamente contienen señales precursoras de un evento sísmico.
- **Filtros de bajas frecuencias (Pasa altos) y PCA:** Como estrategia para tratar de remover las contribuciones anuales solares a los datos, se estudio la posibilidad de usar filtros pasa altos en el espectro de frecuencia de la señal y combinarlo con técnicas de reconstrucción de señales PCA. Los filtros permitirían remover frecuencias más bajas en la señal, las cuales supuestamente estarían asociadas a una modulación solar anual en los datos.

Sin embargo, dos argumentos se presentaron para no usar este tipo de filtros:

1. Muchos estudios señalan que en caso de existir una señal precursora electromagnética se ha reportado que las emisiones de la señal podrían cubrir un rango de 0.001 Hz a MHz (Petraki et al. [20]). Si se aplicaría un filtro de frecuencias a la señal para bajas frecuencias, se podría estar filtrando la posible señal precursora que se trata preservar.
2. Dicho filtro modificaba severamente la fase del conjunto de datos geomagnéticos de manera irregular durante todo el conjunto, lo cual va directamente en contra de las suposiciones de que: de existir una señal precursora determinada detectable a partir de la búsqueda de cambios locales en el flujo de partículas cargadas entonces dicha señal es sensible a cambios en la fase de la onda y por lo tanto se debe evitar procedimientos que modifiquen la fase de la señal.



**Figura 3.5:** Figura extraída de (Rosales et al. [8]); Para determinar los distintos tipos de variaciones del campo geomagnético se aplica un análisis de serie temporal a los distintos tipos de datos registrados, lo que comprende filtro por bandas y Análisis espectral.

Por estas razones, se introdujeron procedimientos al algoritmo principal, que toman en cuenta la hora en la cual una señal anómala es detectada, permitiendo contrastarlo con el resto de los datos. Esta clase de procesos no afectan la señal directamente y a la vez, permiten un estudio especializado por zona geográfica.

### 3.3. Procesamiento de datos y descripción del algoritmo.

El principal objetivo del procesamiento de datos es la obtención de información. En esta sección se discutirá el proceso por el cual pasan los datos los cuales tienen que transformar de componentes magnéticas  $B_x, B_y, B_z$  a una señal  $\Phi_T$ , la forma de la transformación explícita se mostró en el capítulo 2, dicha señal podrá o no estar relacionada con actividad sísmica, antes, durante y después del evento sísmico. Usando la información de la zona (estudio sísmico histórico y mediciones de estaciones geomagnéticas adyacentes con datos disponibles), se fija un espectro de gammas, discretos, de tal manera que cubran una ventana lo suficientemente amplia<sup>1</sup>, se especifica el tipo de precursor que se desea calcular<sup>2</sup>, en esta investigación, se usan en las componentes relacionadas al vector de Poynting. El algoritmo de procesamiento de los datos, tiene una representación esquemática en los anexos de esta investigación, además, el código usado para reproducir los resultados también se encuentra en los anexos, se podría decir que el algoritmo tiene 2 partes importantes, una fase de **calibración** y otra de **producción**. Esto es común en varios experimentos relacionados a fenómenos en la naturaleza, la señal que se busca solo puede ser catalogada como anormal con respecto a otro conjunto de datos previamente estudiados. La fase de **calibración** tiene como filosofía, trabajar con una parte de todos los datos disponibles, es decir, el algoritmo se alimenta de la información sísmica histórica y activamente busca zonas horarias óptimas de medición del precursor para determinado registro sísmico. Mientras que la fase de **producción**, tendrá todos los datos de la señal del campo magnético, pero sin acceso al registro sísmico de la zona. Esto como un intento de minimizar una inclinación artificial estadística inducida a lo largo de todos los resultados. Si por ejemplo dentro de un intervalo de tiempo  $t$  sucede un evento sísmico en un momento determinado  $t'$  y esto genere un cambio medible en la cantidad  $\Phi_T$ , entonces si, la cantidad  $\Phi_T$  depende de las cantidades  $B_x, B_y, B_z$ , debería ser posible desarrollar un procedimiento para la revisión sistemática del cambio en la cantidad  $\Phi_T$  caracterizando la señal en base al fenómeno sísmico que ocurre en un tiempo  $t'$ .

#### 3.3.1. Procesamiento de datos.

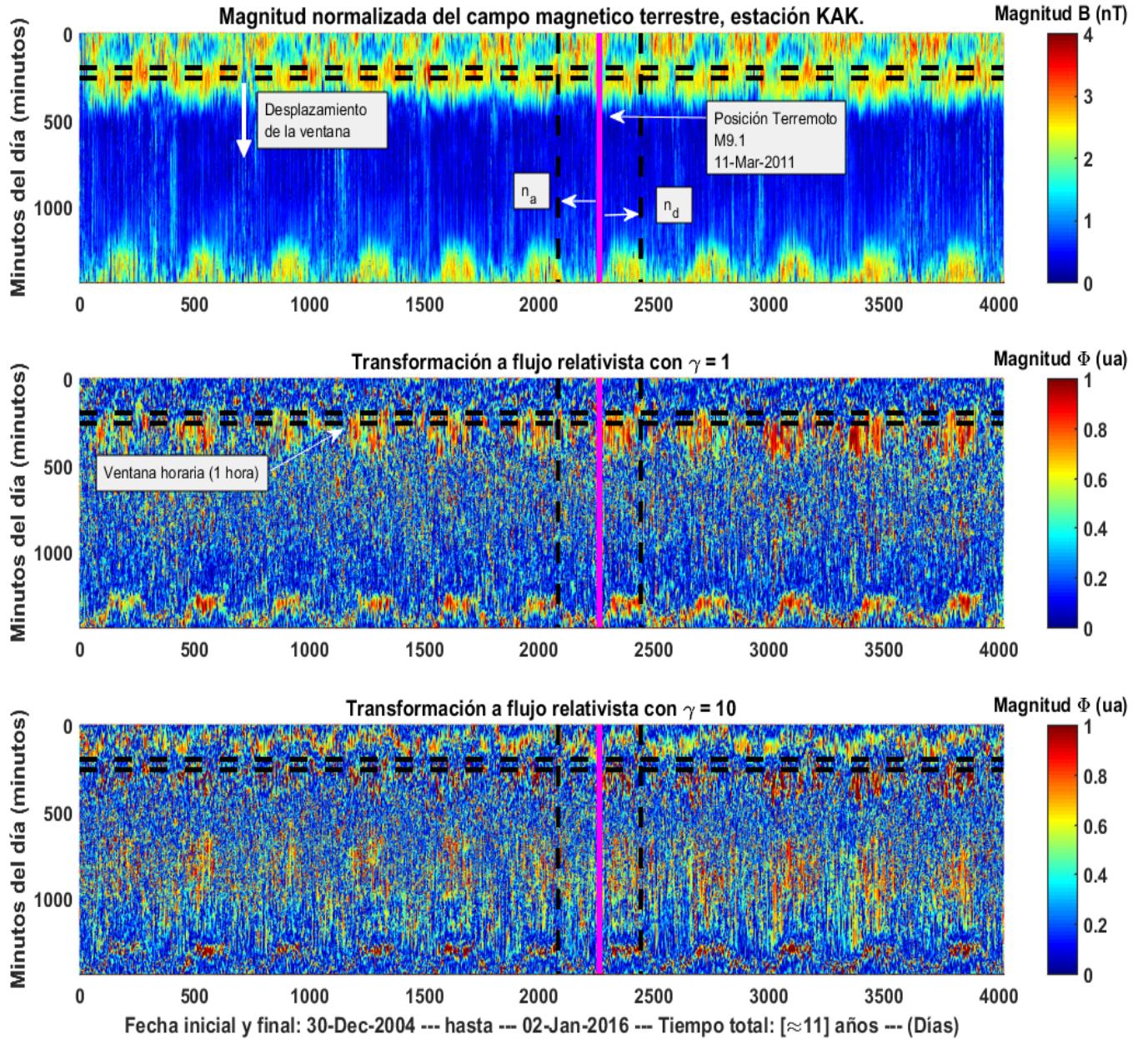
Seguidamente al proceso de normalización, se toman  $n$  días de datos los cuales van a ser analizados, dividiendo la ventana de días totales en 2 partes, los días antes al evento  $n_a$  y los días después del evento  $n_d$ , si un evento hipotético dentro de esta ventana de tiempo, sucede en un tiempo  $t'$  se puede analizar el comportamiento de la cantidad  $\Phi_T$  estudiando las anomalías antes, durante y después de dicho evento pero dentro de la ventana temporal asignada. Adicionalmente, se segmenta cada día de datos en zonas horarias separando en 24 horas del día para cada día, se usa el valor promedio para el conjunto de cada componente por hora de tal manera que se tienen los  $n$  días separados en 24 franjas las cuales corresponden a el valor de campo que se obtuvo durante los  $n$  días durante todo el día. Es decir, se crea una matriz de [24 horas x  $n$  días x componente x estación] donde sí se examina solo una franja horaria sería [1 hora x  $n$  días x componente 1 x estación 1] correspondería a la media de la componente magnética  $B_i$  ( $i = x, y, z$ )

---

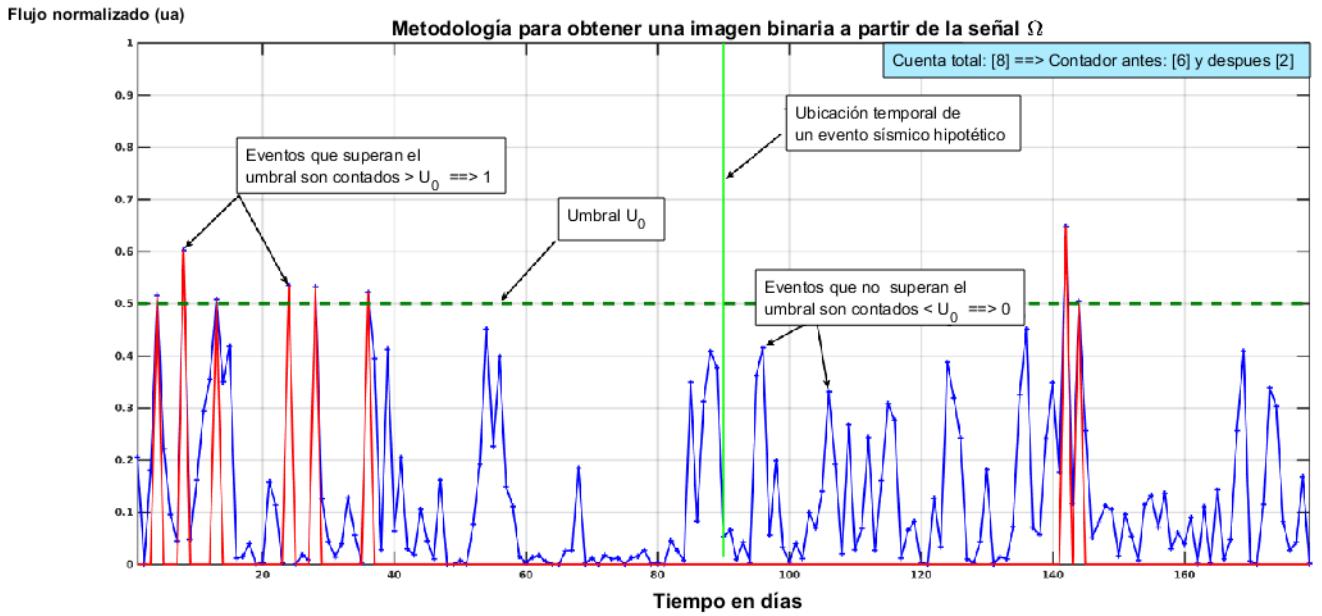
<sup>1</sup>Esto con el fin de encontrar comportamientos interesantes para ciertos valores de gamma que resalten algún conjunto de señales.

<sup>2</sup>Se podría proponer usar otras componentes del tensor  $T_{ij}$ .

de una hora de las mediciones hechas por la estación  $E_j$  con  $j = 1, 2, 3, \dots$ . Esta matriz es generada cada vez que la ventana es desplazada, del procedimiento decanta en una matriz [24 horas x n días x componente x estación x Posición Ventana deslizante dx]. Seguidamente se transforma esa matriz usando la transformación 2.47 correspondiente a cada componente ( $B_x, B_y, B_z$ ) para tener una magnitud de flujo asociada por cada día por cada estación por cada sección horaria de los días de estudio, se muestra un ejemplo de esto en la figura 3.6. Esto con la intención de generar un mapa binario que identifique zonas horarias de activación o de silencio, antes, durante y después de un sismo hipotético.



**Figura 3.6:** Visualización de los datos geomagnéticos en forma 2D para una estación ubicada en Japón (KAK) ordenada en dos dimensiones, con una ventana horaria deslizante de una hora; en rosado se muestra como referencia el terremoto de M9.1 sucedido en 11 de marzo del 2011 en la región de Japón, además se visualiza, la transformación funcional expresada en la ecuación 2.49 para  $\gamma = 1$  y  $\gamma = 10$  para la misma estación.

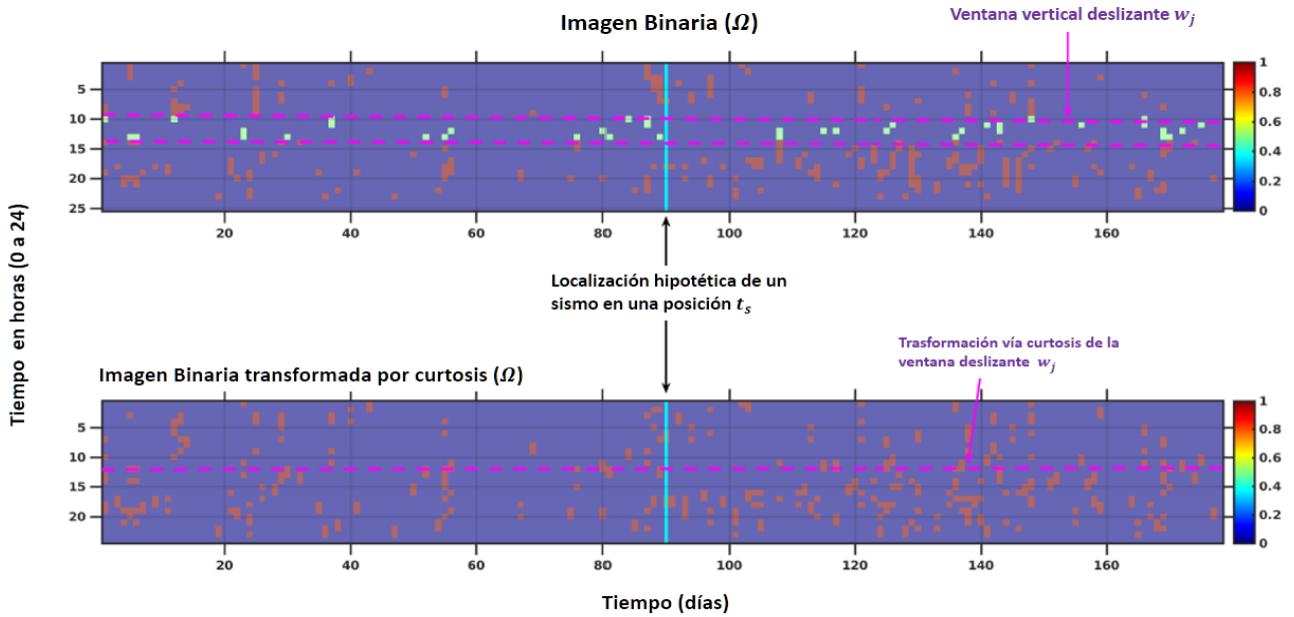


**Figura 3.7:** Metodología para crear un mapa horario de activación de la señal precursora por encima de un umbral  $U_o$ .

Para analizar que región temporal genera la máxima contribución se pueden usar distintos momentos estadísticos, para esta investigación, se usará la media de la señal obtenida de la transformación, al contar cada activación antes y después del evento, permite tener un mapa de activación horario. Dicho mapa binario, puede ser generado umbralizando la señal como se muestra en la figura 3.7. Por ahora, se puede resumir el procedimiento más general a:

- 0. Empieza la fase de calibración, se alimenta el algoritmo de los datos sísmicos de la zona y la mitad de los datos de las estaciones geomagnéticas.
- 1. Representar los datos de una estación en forma 2D Fig 3.6, ubicando todos los datos en un plano, de tal manera que el eje X represente una componente temporal (2160 días por ejemplo) y el eje Y represente intervalos horarios dentro de esos días.
- 2. Generar una ventana deslizante vertical de tamaño  $t_k$  con un evento hipotético ubicado en la mitad de la ventana, grabar la media de cada componente dentro de esa ventana de cada intervalo horario del tren de días adyacentes.
- 3. Usando los valores registrados de las medias de cada componente se calcula la contribución al flujo ( $\phi_x$ ;  $\phi_y$ ;  $\phi_z$ ) y su magnitud total  $\Phi_t$  ver fig 3.7. Con lo cual se tiene  $n$  valores de  $\Phi_t$  asociados a  $n$  ventanas horarias.
- 4. Para cada vector de  $\Phi_t$  asociado a cada franja  $t_k$  Se genera un límite que discrimina que señales pasan a marcar un 1 o un 0 bajo la siguiente regla:

$$\Omega(t)^k = \begin{cases} 1 & \text{si } \bar{\Phi}(t)^k \geq U_o \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (3.3)$$

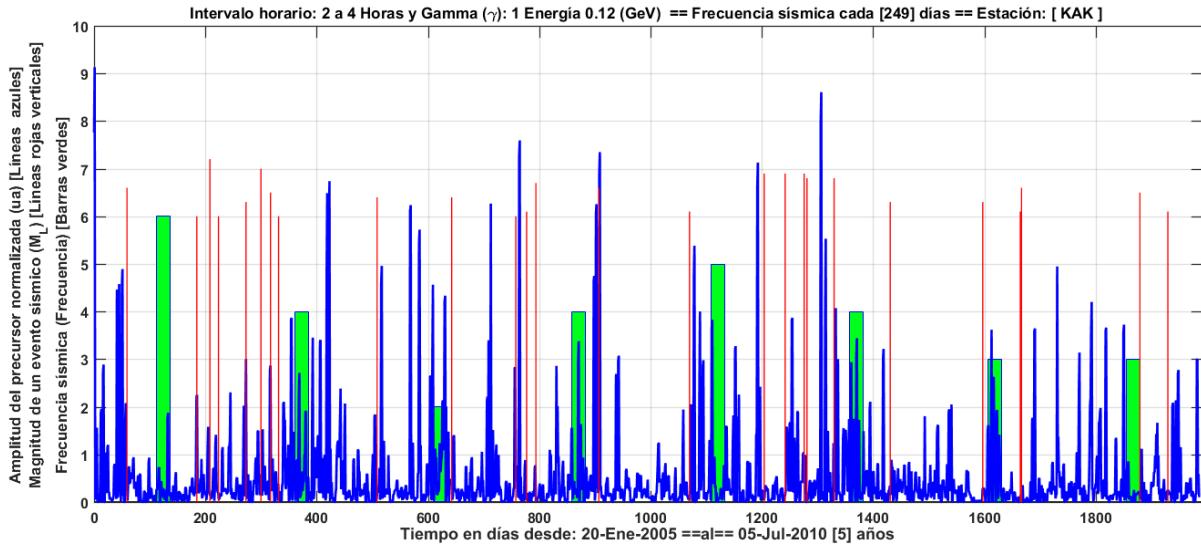


**Figura 3.8:** Metodología para crear un mapa binario y transformarlo vía kurtosis. Arriba, representación binaria de la transformación del precursor para una ventana deslizante  $w_j$ , abajo, la transformación de la señal usando la kurtosis como ejemplo.

- 5. El mapa binario mostrado en la fig 3.8 permite el análisis de zonas de mayor y menor eficiencia en la detección del evento hipotético para las distintas zonas horarias. Lo cual permite filtrar el mapa binario  $\Omega(t)^k \Rightarrow \Omega'(t)^k$ . a las ventanas horarias  $t_k$  más eficientes para la detección.
- 6. Se realiza un conteo de cada valor en  $\Omega'(t)^k$  antes y después del evento ficticio, calculando probabilidades de activación por ventana horaria.
- 7. Empieza la fase de producción, se le ofrece al algoritmo todos los datos geomagnéticos de las estaciones, pero se le niega datos nuevos de la sismología de la zona. Se repiten los pasos del 2 al 6.
- 8. Termina el proceso, se procede a el análisis directo de todos los resultados.

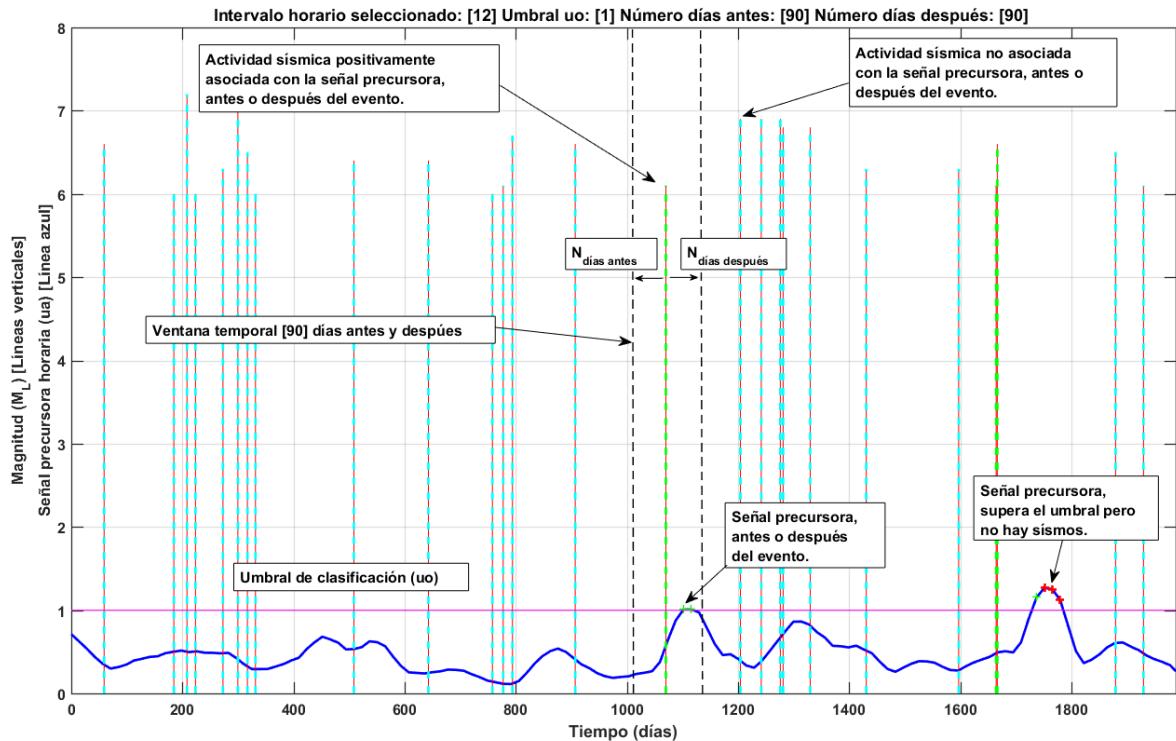
### 3.3.2. Fase de calibración.

Seguidamente al cargar el algoritmo de los datos magnéticos de la zona temporal designada para la calibración, se procede a calcular la eficiencia horaria por estación cargada, el procedimiento general para determinar dicha eficiencia será crucial. Una vez seleccionada la zona de estudio, los gammas, los datos del campo magnético de la zona y el tipo de precursor al que se le hará el estudio, se obtendría en la terminal de Matlab la confirmación de esto. Se encontrará una primera aproximación a la eficiencia horaria por estación y la eficiencia horaria de la combinación de todas las estaciones para varios gammas, pero con solo una parte de los datos geomagnéticos, durante esta investigación por lo general se usó la mitad de los datos totales para esta fase. La eficiencia horaria estará definida por la detección discreta de señales presuntamente precursoras sobre un umbral ( $u_0$ ) respecto a la desviación estándar de la señal precursora para un determinado intervalo horario.

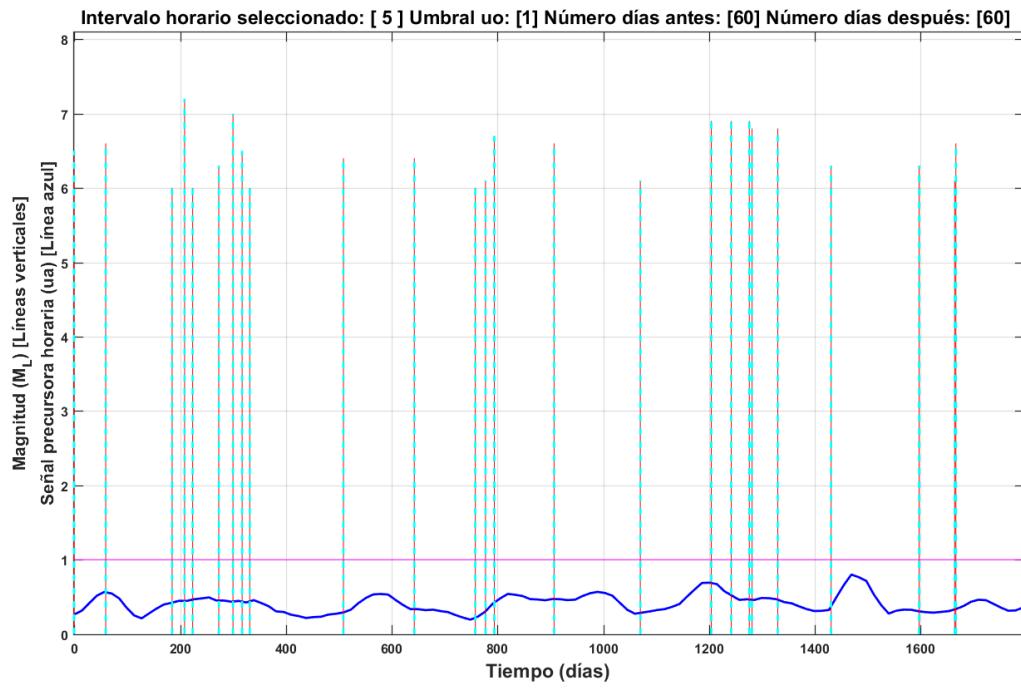


**Figura 3.9:** Ejemplo de calculo del precursor para una zona horaria, gamma fijas. La linea azul, es la señal precursora relativista para el intervalo horario especificado, las líneas verticales rojas son los sismos con los que se calibra el algoritmo y las barras verdes la frecuencia sísmica cada aproximadamente 250 días.

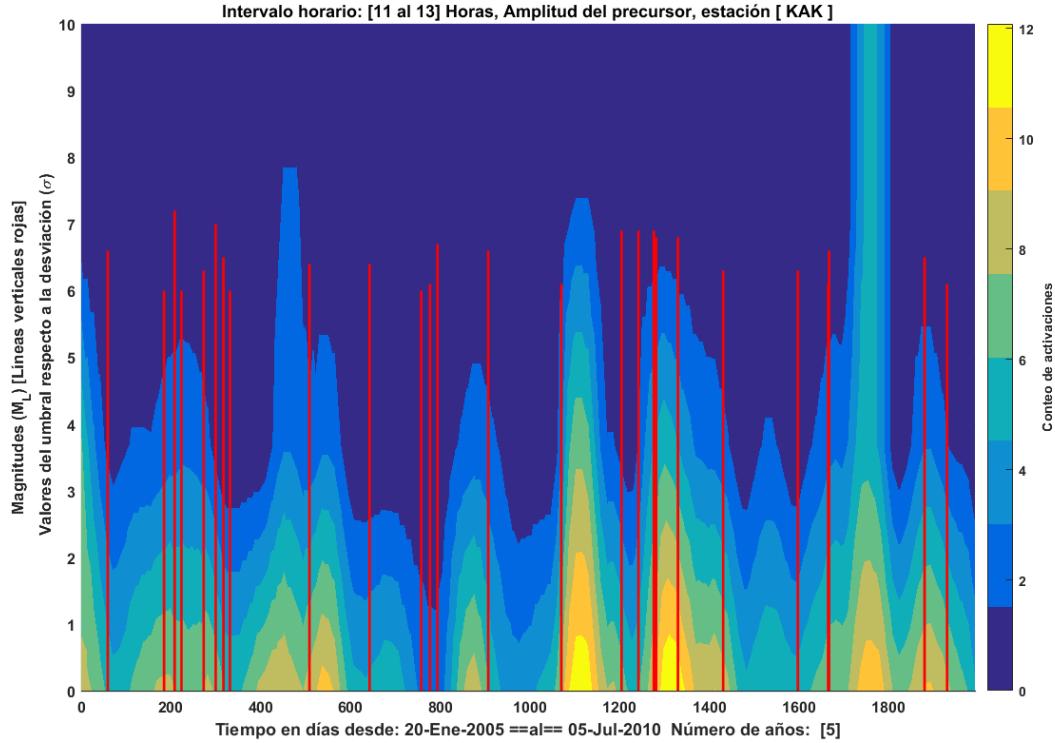
En la figura 3.9 se visualiza el resultado del precursor de la estación KAK, para el intervalo horario mostrado (de 2 a 4 de la mañana), esto muestra como transforman las componentes de campo magnético de una determinada estación a matrices de [datos x minuto x estación] lo cual permite el estudio progresivo de la señal.



**Figura 3.10:** Zona horaria con detecciones positivas y negativas para un intervalo horario y gamma fijo. Barras verticales verdes con rojo son los sismos con los que se calibra el algoritmo, la curva azul representa  $\Omega'(t)^k$ , el cual permite realizar el conteo antes, durante y después de cada evento sísmico.



**Figura 3.11:** Zona horaria sin detecciones positivas de la señal precursora para intervalo horario y gamma específico. Barras verticales verdes con rojo son los sismos con los que se calibra el algoritmo, la curva azul representa  $\Omega'(t)^k$ , el cual permite realizar el conteo antes, durante y después de cada evento sísmico.

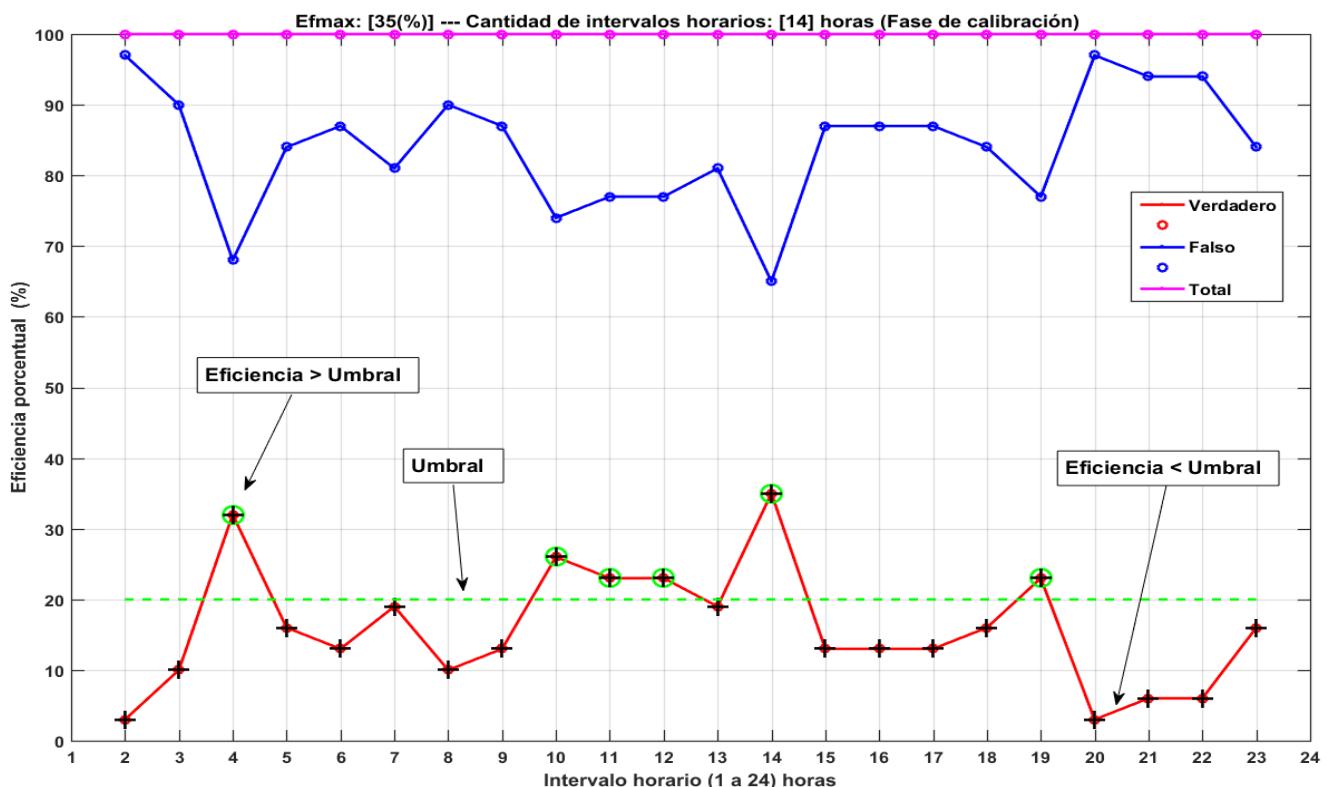


**Figura 3.12:** Figura muestra como el precursor se comporta para una determinada zona horaria en términos de la desviación estándar de la señal.

En la serie de figuras 3.10, 3.11, 3.12 se muestra, que la selección de la hora parece un elemento

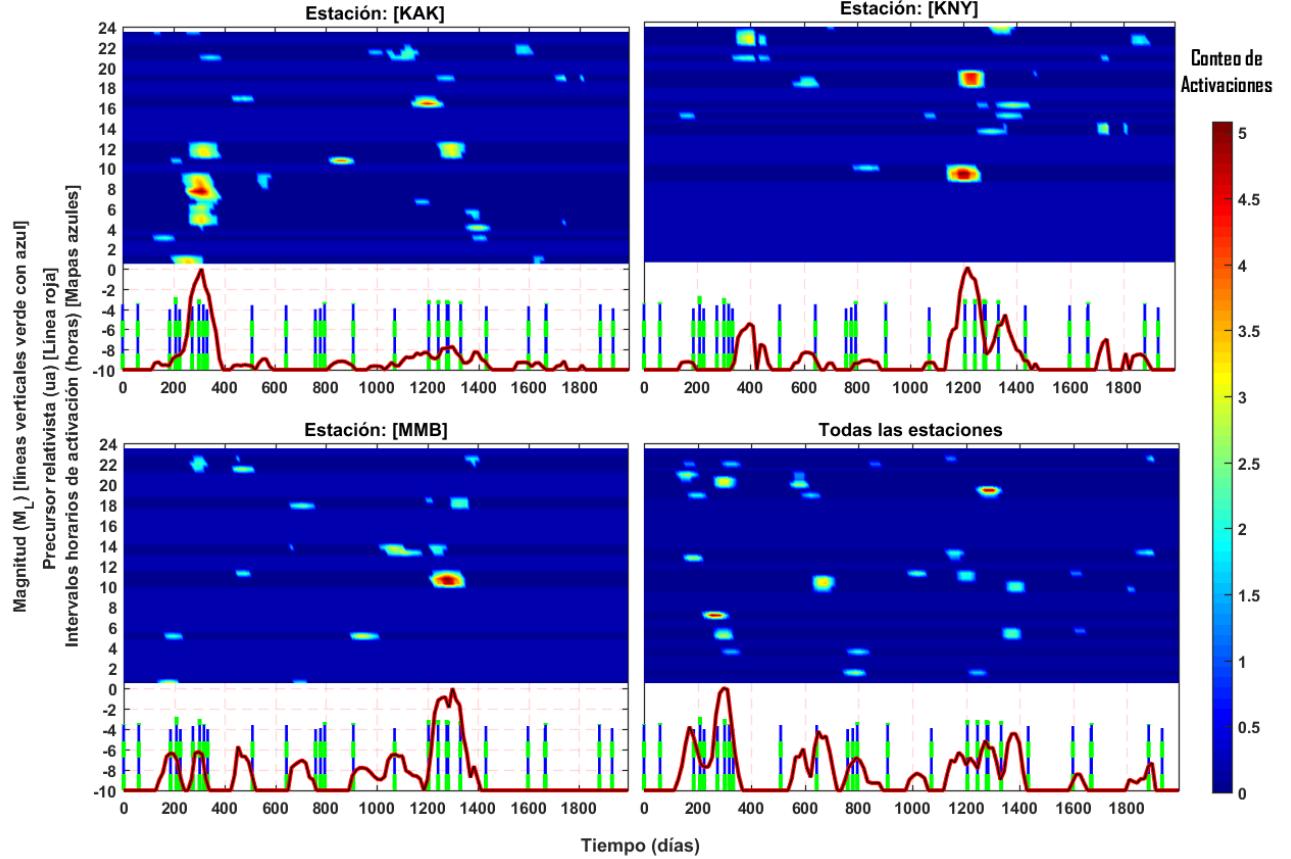
importante en la calibración del algoritmo, esto acompañado de la normalización en los datos de forma que todas las componentes magnéticas que intervienen tengan la misma relevancia estadística, permite un análisis de cambios a mediano y largo plazo del comportamiento del campo, una vez terminado el análisis para todas las horas de una sección de los datos (por ejemplo como se muestra en la figura 3.12 del 2005 al 2010) y todos los gammas, se tienen *zonas horarias óptimas*. En la figura 3.13, se muestra la variación de la eficiencia por intervalo horario para un determinado conjunto de datos. La selección del *Umbral de eficiencia* durante gran parte del estudio se trabajó como un valor arbitrario dado por el investigador, pero el concepto se podría automatizar obligando a usar umbrales tantas veces por encima de la eficiencia media como se desee. Este planteamiento de ventanas horarias permite dejar ciertas zonas horarias por fuera, permitiendo la reconstrucción de la señal con lo que consideramos, es una señal posiblemente más asociada al fenómeno sísmico y no a una contribución de la dinámica del campo geomagnético provenientes de actividad solar o a fenómenos locales sistemáticos.

Recapitulando, la fase de *Calibración* del algoritmo propuesto, permite el estudio progresivo y con todos los datos a disposición (es decir, el algoritmo tiene en cuenta *cuando* va a suceder un evento sísmico y beneficia los intervalos horarios (figura 3.13<sup>3</sup>) que superen con mayor densidad cierto umbral *antes, durante o después* de un evento sísmico. El algoritmo permite trabajar todas las estaciones relacionadas geográficamente con la zona de estudio y permite analizar las estaciones en conjunto usando la media de las señales geomagnéticas de las demás estaciones, resultando en la contribución de todas tal como se muestra en las figuras 3.14.



**Figura 3.13:** Eficiencia horaria para la fase de calibración, línea verde horizontal punteada es el umbral de probabilidad. Solo las zonas horarias marcadas en verde se usan para reconstruir la señal.

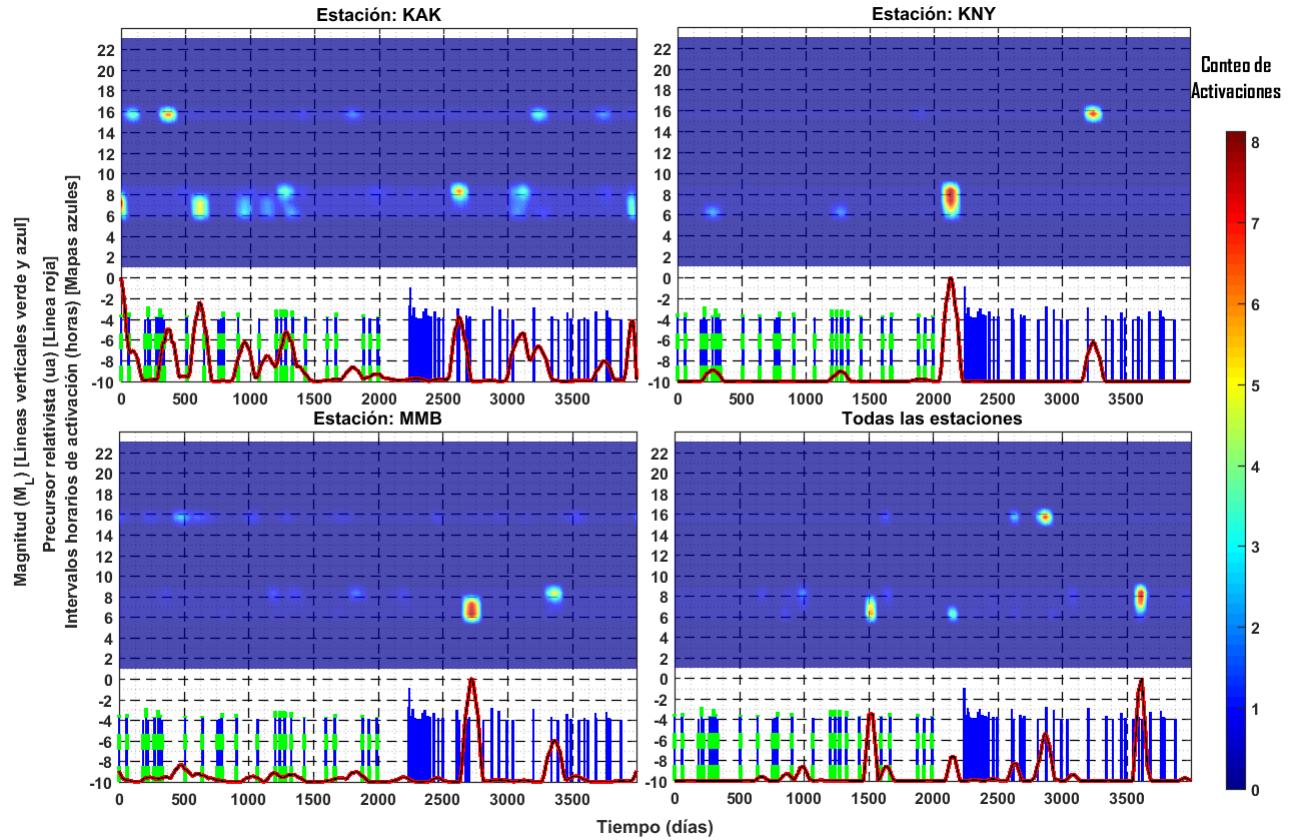
<sup>3</sup>En esta figura la eficiencia porcentual se refiere al número de eventos sísmicos que son catalogados como aciertos usando este intervalo horario.



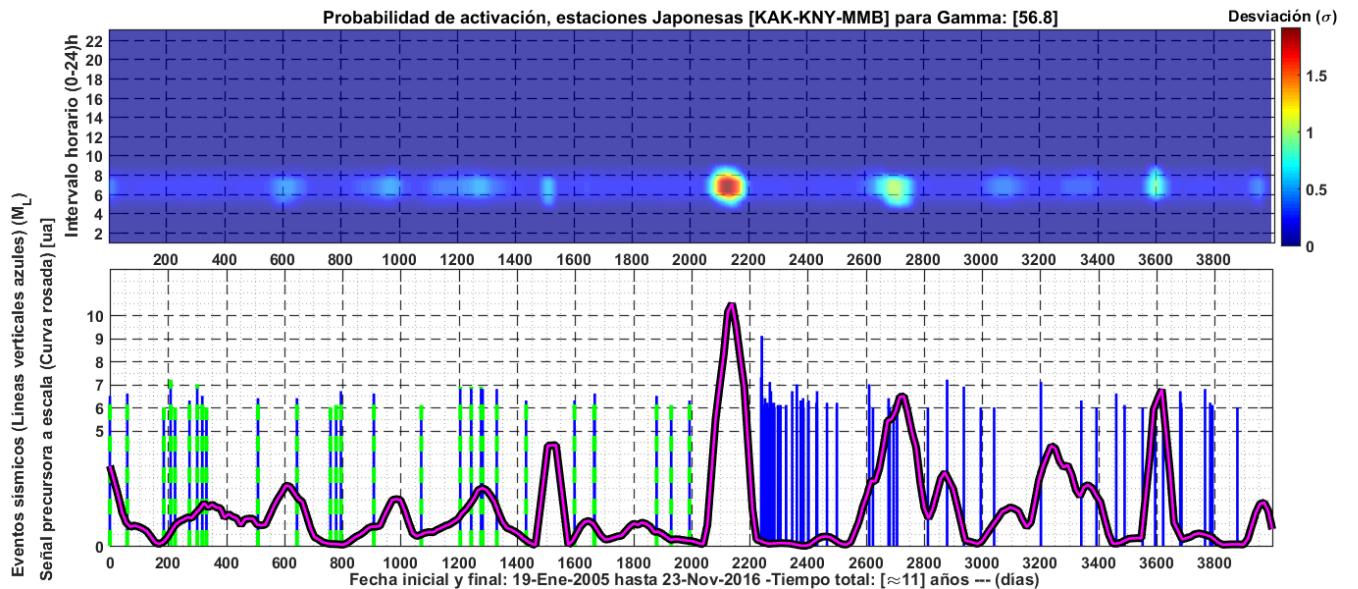
**Figura 3.14:** Señal de las 3 estaciones japonesas (KAK, KNY, MMB y la contribución de todas las estaciones) las contribuciones por hora forman la señal precursora se muestran en los mapas, con zonas rojas iluminando las contribuciones horarias más importantes en la señal.

### 3.3.3. Fase de producción.

La fase de producción del algoritmo, tiene como entradas los datos sísmicos asignados en la fase de calibración, con el objetivo de conseguir zonas horarias de medición óptimas que presenten comportamientos anómalos antes, durante y después de distintos eventos sísmicos en una determinada zona alrededor de alguna estación geomagnética. Cuando se empieza el estudio de los datos, se repite el procedimiento general de esta investigación pero sin los datos sísmicos de la zona durante el proceso. Esta manera se puede probar si la metodología de filtrado por intervalos horarios es o no efectiva en esta clase de problemas bajo las transformaciones planteadas. Las salidas de la fase de producción, serán las transformaciones  $\nabla\Phi_T$  (el potencial precursor relativista sísmico) de todo el conjunto de datos  $B_x, B_y, B_z$  de todas las estaciones en una determinada zona de estudio. Una vez obtenido  $\Omega'(t)^k$  por los métodos descritos en las secciones anteriores, se procede a un análisis de esas activaciones en el tiempo. Este procedimiento consiste en registrar tanto el número del conteo por ventana temporal  $t_k$  como la suma en magnitud de dichos conteos a cada lado del evento sísmico ficticio. Dicho procedimiento se realiza para cada ventana horaria  $t_k$ , generando una función de conteos en función de la ventana horaria, ésto es importante ya que permite identificar las zonas horarias de mayor o menor activación para el precursor sísmico y para así determinar el nivel de activación con respecto a esos conteos en un determinado tiempo, se muestra un ejemplo de esto en las figuras 3.15 y 3.16.



**Figura 3.15:** Regiones horarias de activación para las estaciones KAK-KNY-MMB y la combinación para un gamma arbitrario, datos desde el 19-Ene-2005 hasta el 23-Nov-2016. Sismos usados para calibración mostrados con líneas verticales verde segmentadas, sismos usados para producción como líneas verticales azules.



**Figura 3.16:** En la parte superior de la figura, se muestra la zona horaria de activación para intervalos entre las 6:00 am y las 8:00 am, en la parte inferior, línea rosada muestra precursor para el gamma mostrado (56.84), líneas verticales corresponden a sismos usados para la calibración y la producción.

## 3.4. Procesos relacionados al análisis de resultados.

A continuación se describirán los procesos relacionados con el análisis de los resultados. Esto incluye:

- Curvas ROC para comparar distintos resultados y determinación del umbral óptimo de discriminación.
- Estudio de diversos factores que influyen en la eficiencia de la señal para detectar exitosamente un sismo.
- Estudio de la densidad de energía bajo la curva (Q) en función de la magnitud de un sismo.

### 3.4.1. Curva ROC (Receiver Operating Characteristic Curve).

La curva ROC es una herramienta estadística utilizada en el análisis de la capacidad discriminante de una prueba diagnóstica dicotómica. Es decir, una prueba basada en una variable de decisión, cuyo objetivo es clasificar a los individuos de una población en dos grupos: uno que presente un evento de interés y otro que no (Benavides [21]). En este caso, el grupo de interés estará conformado por aquellas señales que puedan estar correlacionadas con la actividad sísmica, y el otro, el conjunto de señales que no corresponda a actividad sísmica. Esta capacidad discriminante está sujeta al valor umbral elegido de entre todos los posibles resultados de la variable de decisión, es decir, la variable por cuya resultado se clasifica a cada individuo en un grupo u otro. La curva es el gráfico resultante de representar, para cada valor umbral, las medidas de sensibilidad y especificidad de la prueba diagnóstica (Benavides [21]). La curva ROC comprende de varios parámetros, entre ellos: True Positive Rate (TPR) también denominado como sensibilidad, es una proporción de los verdaderos positivos a todos los positivos y va de 0 a 1. Cuantifica la proporción de individuos que presenta el evento de interés y que son clasificados por la prueba como portadores de dicho evento. El índice (FPR) (False Positive Rate) o especificidad es una medida de la frecuencia con la que hay clasificaciones incorrectas de la clase positiva. Por otro lado, la especificidad cuantifica la proporción de individuos que no lo presentan y son clasificados por la prueba como tal. Las ventajas del uso de la curva ROC es que proporciona una representación de la sensibilidad y especificidad para cada valor umbral, y esta proporción es invariante mediante transformaciones monótonas a los datos de la variable de decisión y que permite comparar dos o más clasificadores en función de su capacidad discriminante. Por esto último, se considera ideal el uso de la curva para tener una comparación cuantitativa entre varias señales precursoras.

#### Reglas para el discriminante.

Suponga una señal a lo largo del tiempo  $\phi_j(t)$  que será la señal de estudio, con el índice  $j$  correspondiendo a cada gamma calculado contándolos de manera discreta. Con eventos ubicados en una cantidad  $t_s$  con  $s = 1, 2, 3...n$  donde  $n$  es el número de eventos sísmicos que están ubicados temporalmente dentro de la señal. Ahora considere un umbral discriminante  $\tau_u$ , el cual será un conjunto conformado por los valores  $\tau_u \in \{\min(\phi_j), \min(\phi_j) + 1, \min(\phi_j) + 2, \dots, \max(\phi_j)\}$ . Entonces, en un instante de tiempo cualquiera  $t_m \geq 0$ , podemos clasificar una señal  $\phi_j(t_m)$  de tal manera que:

$$\phi_j(t) = \begin{cases} \phi_j(t_m) \geq \tau_u \Rightarrow \phi_j(t_m) = P_m \wedge N_m = 0 \\ \phi_j(t_m) < \tau_u \Rightarrow \phi_j(t_m) = N_m \wedge P_m = 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

A partir de la ecuación 3.4, se puede clasificar señales positivas  $P_m$  o negativas  $N_m$  asociadas a un instante de tiempo  $t_m$ , posteriormente, se necesita clasificar si la señal positiva o negativa se puede

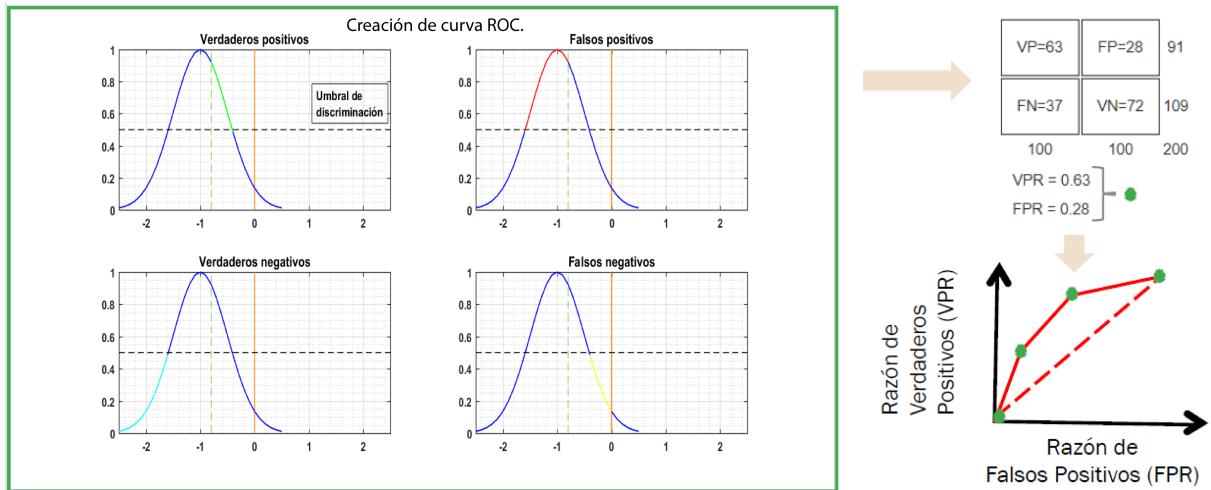
asociar verdaderamente o no a un evento sísmico ubicado en  $t_s$ , para eso se definen unos intervalos de tiempo anteriores  $\Delta t_a$  y posteriores  $\Delta t_d$  a los eventos sísmicos. Clasificando entonces:

$$P_m = \begin{cases} t_s - \Delta t_a \leq P_m \leq t_s + \Delta t_d \Rightarrow VP_m = 1 \wedge FP_m, VN_m, FN_m = 0 \\ t_s - \Delta t_a > P_m < t_s + \Delta t_d \Rightarrow FP_m = 1 \wedge VP_m, VN_m, FN_m = 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$N_m = \begin{cases} t_s - \Delta t_a < N_m < t_s + \Delta t_d \Rightarrow FN_m = 1 \wedge VP_m, VN_m, FP_m = 0 \\ t_s - \Delta t_a \geq N_m \leq t_s + \Delta t_d \Rightarrow VN_m = 1 \wedge VP_m, FP_m, FN_m = 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

Con esto, tenemos los valores necesarios para calcular la razón de verdaderos positivos y la razón de falsos positivos para tener cada punto de la curva ROC, si se desea calcular la curva ROC para la combinación de las señales gammas, para cualquier instante de tiempo  $t_o$  arbitrario mayor a cero, la señal  $\phi_j(t_o)$  necesita ser reconstruida de manera que  $\phi_j(t_o) = \max\{\phi_j(t_o), \phi_{j+1}(t_o), \phi_{j+2}(t_o), \dots, \phi_n(t_o)\}$ . Para luego proceder al procedimiento de discriminación expresado en las ecuaciones 3.4, 3.5, 3.6. Todo esto se traduce a definiciones estrictas las cuales pueden ser expresadas como:

- **Verdaderos positivos (VP):** El precursor supera el umbral de discriminación y existe dentro de la ventana antes o después de un evento sísmico.
- **Verdaderos negativos (VN):** El precursor no supera el umbral de discriminación y no existe dentro de la ventana antes o después de un evento sísmico.
- **Falsos positivos (FP):** El precursor supera el umbral de discriminación y no existe dentro de la ventana antes o después de un evento sísmico.
- **Falsos negativos (FN):** El precursor no supera el umbral de discriminación y existe dentro de la ventana antes o después de un evento sísmico.



**Figura 3.17:** Ejemplo clasificación de VP, FP, FN y VN generando así un punto verde en la curva ROC asociado a un umbral de clasificación.

Esto último puede ser visualizado en un ejemplo mostrado en la figura 3.17 la curva ROC entonces puede calcularse de tal manera que la razón de verdaderos positivos y la razón de falsos positivos sean calculadas para cada valor  $\tau$  disponible. La razón de verdaderos positivos  $RVP(\tau)$  y la razón de falsos positivos  $RFP(\tau)$  serán entonces definidas como:

$$RVP(\tau) = \frac{VP(\tau)}{VP(\tau) + FN(\tau)} \quad (3.7)$$

$$RFP(\tau) = \frac{FP(\tau)}{FP(\tau) + VP(\tau)} \quad (3.8)$$

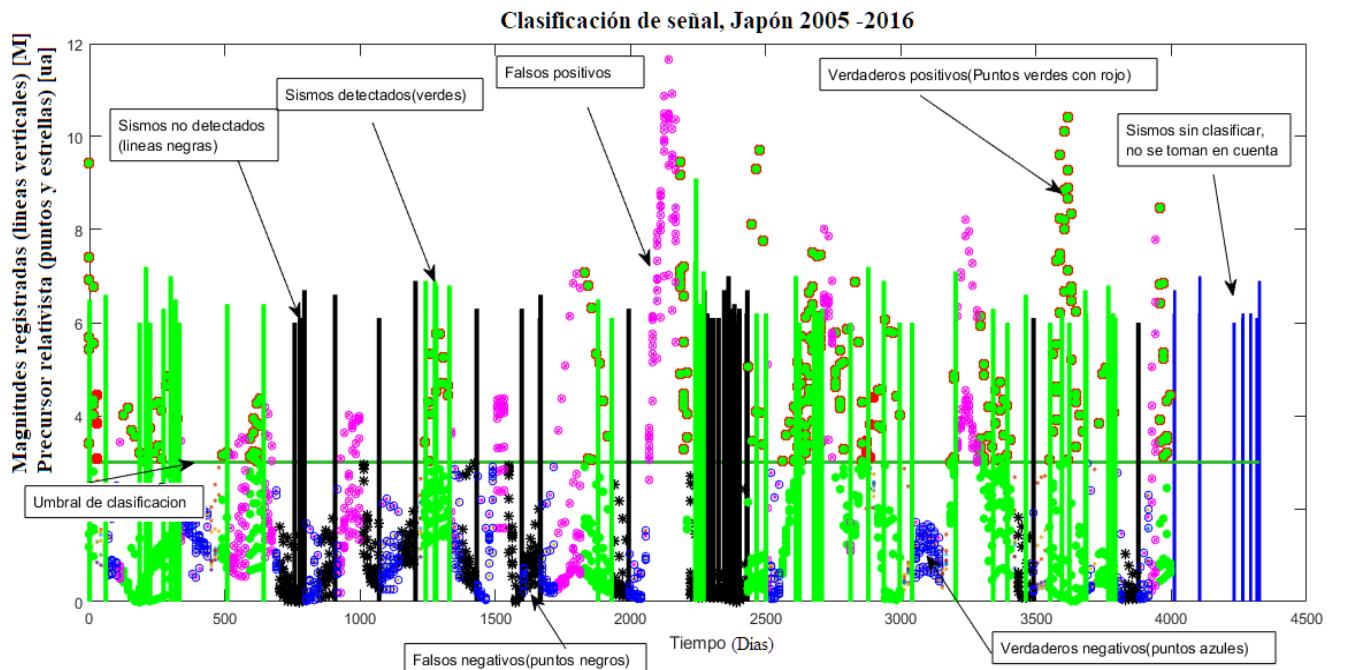
Por otra parte, para comparar múltiples curvas ROC, se cuenta con el índice **AUC** (Area Under the Curve) significa "Área bajo la curva ROC". Es decir, AUC mide el área bajo la curva ROC de (0, 0) a (1, 1), la AUC es una herramienta estadística que se utiliza para medir el acierto en la predicción de eventos binarios y simultáneamente proporciona una medida de rendimiento en todos los umbrales de clasificación posibles. Una forma de interpretar AUC es como la probabilidad de que el modelo clasifique un ejemplo positivo aleatorio más alto que un ejemplo negativo aleatorio.

### Ejemplo de creación de curva ROC para una señal precursora.

Supongamos se desea estudiar una señal  $\phi_j(t)$  generada por un conjunto de estaciones geomagnéticas, aplicando el procedimiento descrito anteriormente, se ajustarán los parámetros como:

- Ventana de tiempo antes: 120 días.
- Ventana de tiempo después: 0 días.
- Región de estudio: Japón
- Estaciones geomagnéticas: KAK-KNY-MMB.

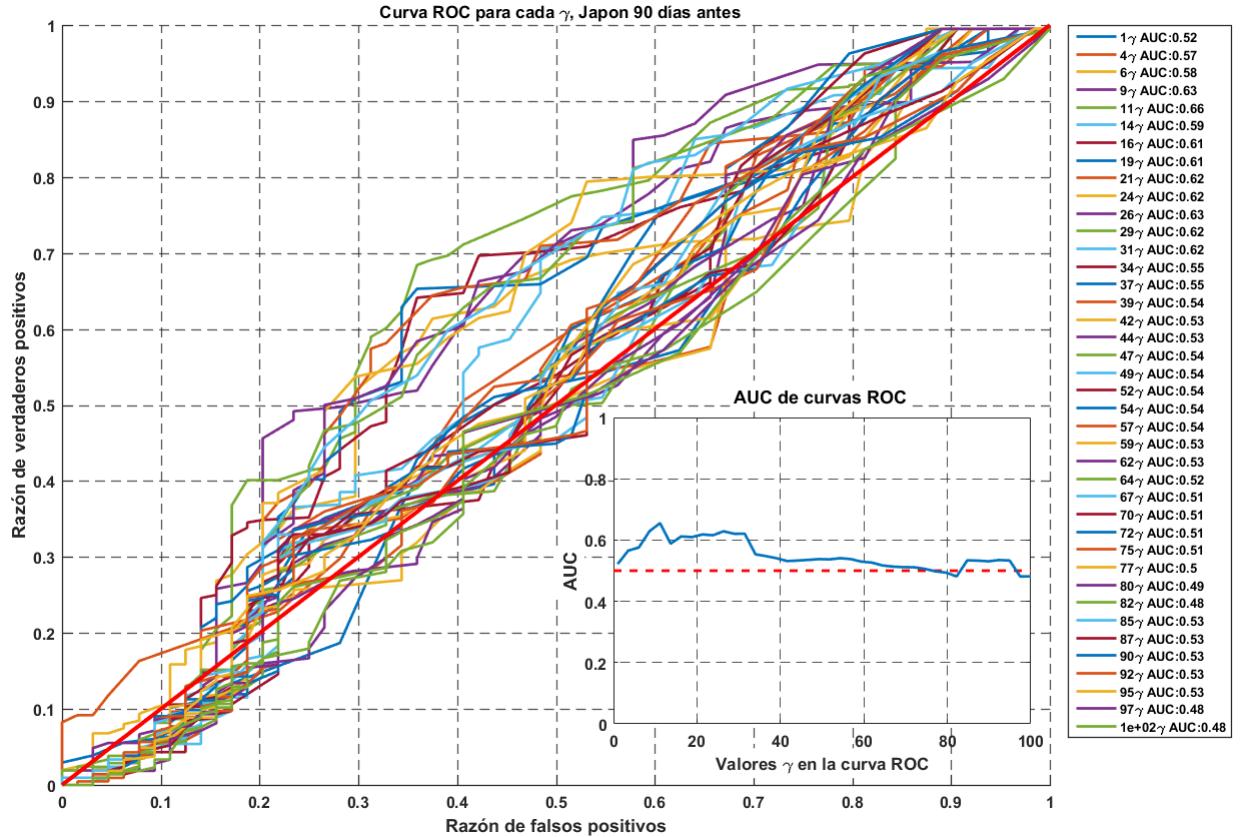
Entonces, para el estudio de un umbral de clasificación arbitrario  $\tau_u$ , se tendría una clasificación a modo de ejemplo que se muestra en la figura 3.18. Esta clasificación, luego de barrer sobre todos los valores  $\tau_u$  disponibles, nos da la posibilidad de calcular las curvas ROC mostradas en la figura 3.19 según los criterios fijados anteriormente en 3.4, 3.5 y 3.6.



**Figura 3.18:** Ejemplo de clasificación precursor para un umbral de discriminación arbitrario. Se muestra como cada punto de la señal precursora y cada sismo es clasificado según los criterios de las ecuaciones 3.4, 3.5 y 3.6.

En la figura 3.18, se muestra un ejemplo de los datos calculados para Japón ( $\phi_j(t)$ ), usando un umbral de clasificación ( $\tau_u$ ) señalado como una línea horizontal verde para posteriormente calcular

un punto en la curva ROC, con varios gammas mostrados simultáneamente en forma de puntos, los cuales son coloreados dependiendo de como fueron clasificados. Puntos verdes con rojo son puntos clasificados como verdaderos positivos ( $VP_m$ ), los puntos negros son clasificados como falsos negativos ( $FN_m$ ), los puntos azules son clasificados como verdaderos negativos ( $VN_m$ ), los puntos rosados son clasificados como falsos positivos ( $FP_m$ ), las líneas verticales verdes representan la magnitud registrada del sismo ( $t_s$ ) y que el sismo tiene un verdadero positivo asociado al sismo. Las líneas negras verticales representan la magnitud registrada del sismo y que el sismo no tiene verdaderos positivos asociados. Las líneas verticales azules, son sismos que no se toman en cuenta ya que el tren de datos calculados esta fuera del rango de registro de los datos geomagnéticos.



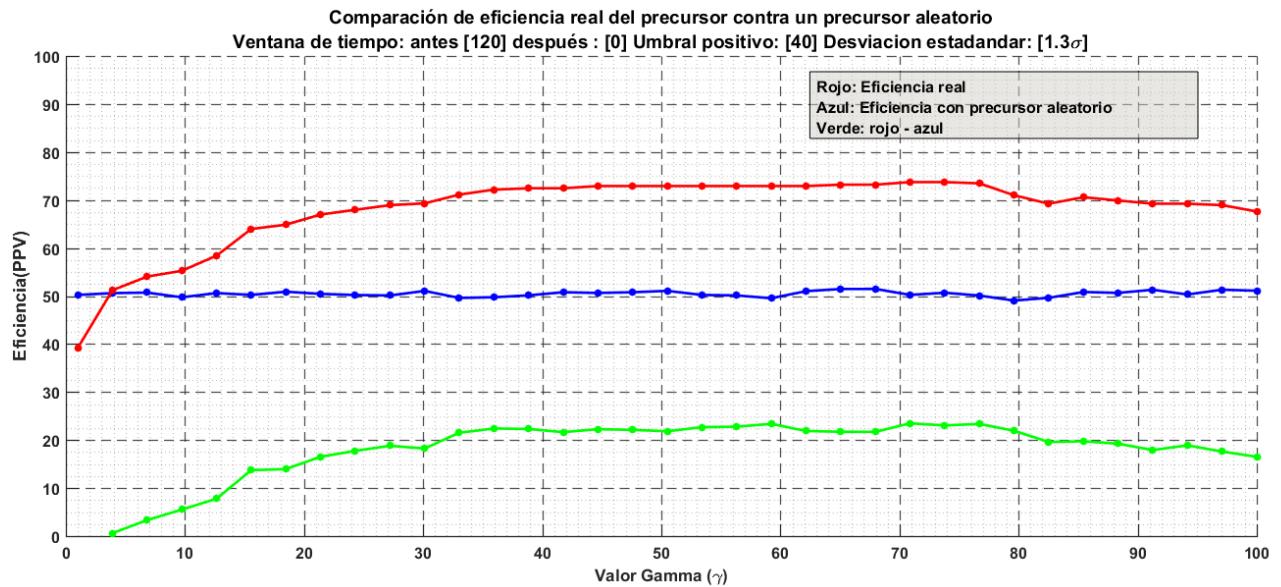
**Figura 3.19:** Curva ROC calculada para cada gamma individual, calculada para un caso ejemplo de Japón para varios gammas (figura 3.18), cada línea de color representa un gamma diferente. Se muestra el AUC de cada curva ROC mostrada en la curva azul en función de cada gamma.

Luego de barrer por todos los umbrales posibles, eso permite construir la curva ROC mostrada en la figura 3.19 con sus respectivos índices AUC asociados a cada gamma que fuera calculado para una determinada zona.

### 3.4.2. Eficiencia del precursor contra un precursor aleatorio.

Una vez determinado el mejor umbral posible para un determinado conjunto de señales asociadas a una región. Se procede a comparar con una señal generada de manera aleatoria pero con la misma cantidad de datos que la señal original. Supongamos que la señal precursora tiene una distribución normal, si se determina que el umbral óptimo hipotético se ubica en  $2\sigma$ , entonces la cantidad de datos que son usados para la predicción serían muy cercanos al 2.1% del total de datos, con esto la posición de estos datos están asociados a una determinada eficiencia para un

determinado conjunto de sismos. Por lo tanto, uno de los métodos que se proponen para probar que se pueden hacer predicciones significativas con el precursor propuesto es generar un precursor aleatorio, el cual consiste en cambiar las posiciones temporales del precursor y volver a calcular su eficiencia con las nuevas posiciones. En este ejemplo, para un umbral de  $2\sigma$ , se volvería a calcular la eficiencia, pero dándole una distribución a lo largo del tiempo aleatoria, esto se puede repetir, para cada valor de gamma como se muestra en la figura 3.20, donde se muestra uno de los resultados para la región de Perú.



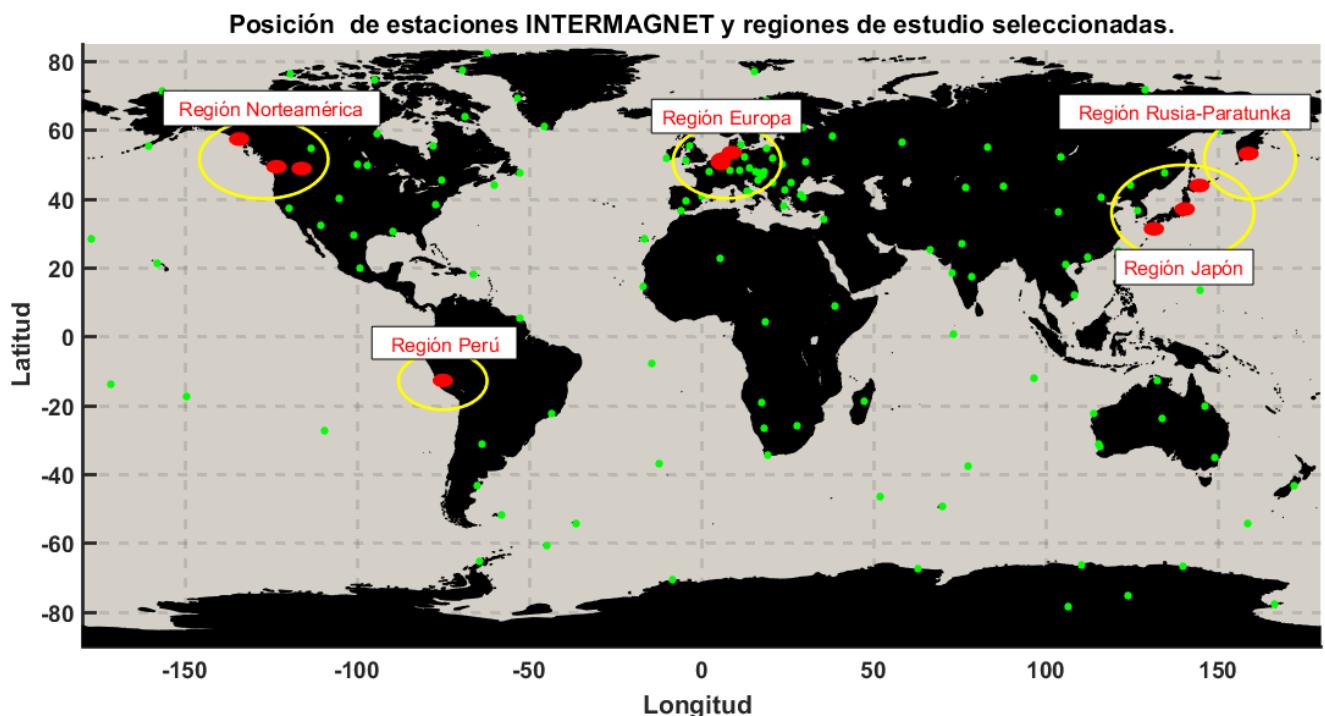
**Figura 3.20:** Comparación de la eficiencia de un precursor real (línea roja) y un precursor aleatorio (línea azul) para la región peruana.

# Capítulo 4

## Resultados

En este capítulo se mostrarán los resultados por regiones obtenidos, las zonas de estudio presentadas en esta investigación fueron seleccionadas bajo los siguientes criterios:

1. **Región silente.** Esta región debe ser silente sísmicamente en los años estudiados para terremotos mayores a M5, dicha zona fue localizada en las cercanías a las estaciones DOU, MAB y WNG entre Bélgica y Alemania.
2. **Regiones con pocos terremotos.** Se buscan eventos sísmicos que estén aislados en el tiempo, permitiendo un estudio de la señal precursora antes, durante y después de dicho evento.
3. **Otras regiones con actividad sísmica.** Seleccionando una región sísmica  $\Delta r_0$  alrededor de una determinada estación geomagnética, donde históricamente ocurran eventos sísmicos importantes ( $> 6.8M$ ) y que los datos geomagnéticos proporcionados por InterMagnet tengan un máximo de hasta (3 %) de espiurios durante los años estudiados.

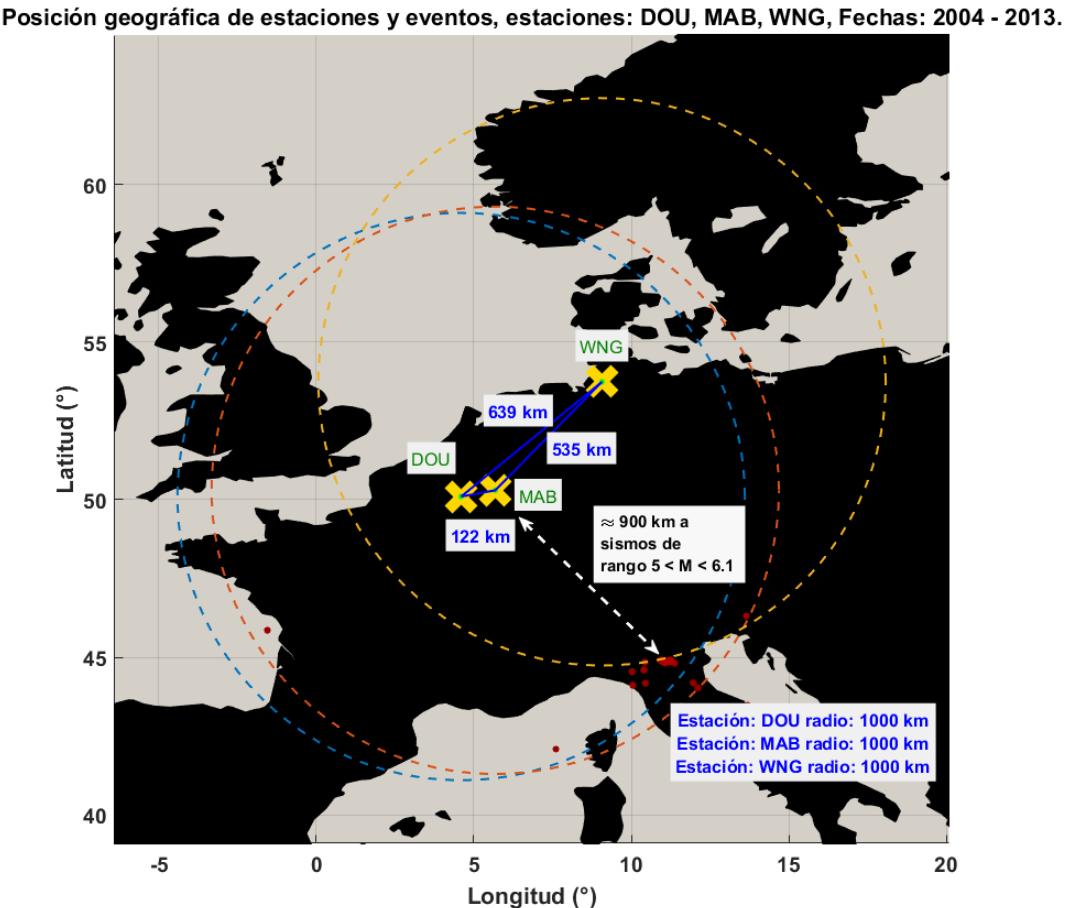


**Figura 4.1:** Mapa mundial, puntos verdes representan localización de las estaciones InterMagnet disponibles. Puntos rojos representan estaciones geomagnéticas usadas durante este estudio.

En la figura 4.1 se pueden observar las distintas regiones que durante la realización de esta investigación cumplieron los criterios planteados anteriormente. Empezando por Europa con las estaciones DOU, MAB y WNG se identificó una región sísmicamente silente en los años estudiados para terremotos mayores a M5, seguidamente, se pasará a estudiar la zona japonesa, donde se presenta un terremoto de M9.1 y muchos estudios indican la existencia de señales precursoras anómalas electromagnéticas antes del evento sísmico, las estaciones involucradas en los resultados mostrados están cerca de la falla ( $<300\text{km}$ ) y esto la hace una zona con potencial para este estudio. La zona norteamericana también será parte de nuestra investigación y aunque no presenta la misma densidad sísmica que el resto de las regiones, permite estudiar un terremoto muy importante de M6.8 a menos de 200 km de una de las estaciones geomagnéticas. Las siguientes dos estaciones, HUA (Lima-Perú) y PET (Mar de Ojotsk), son estaciones individuales y muy separadas de otras estaciones, sin embargo, la zona donde están ubicadas presentan la oportunidad de hacer estudios muy concentrados en las inmediaciones ( $<300\text{km}$ ) de cada estación, con eventos relevantes de M8.1 y M7.2 respectivamente a menos de 200 km de la estación. Finalmente, se hace un estudio global de las curvas ROC para todas las zonas estudiadas y de la relación  $Q$  en función de la magnitud.

## 4.1. Europa, zona silente sísmica

La zona europea seleccionada, conformada por las estación DOU, MAB y WNG cumple con los criterios para ser una estudiada como una zona sismicamente silente (2005-2012).

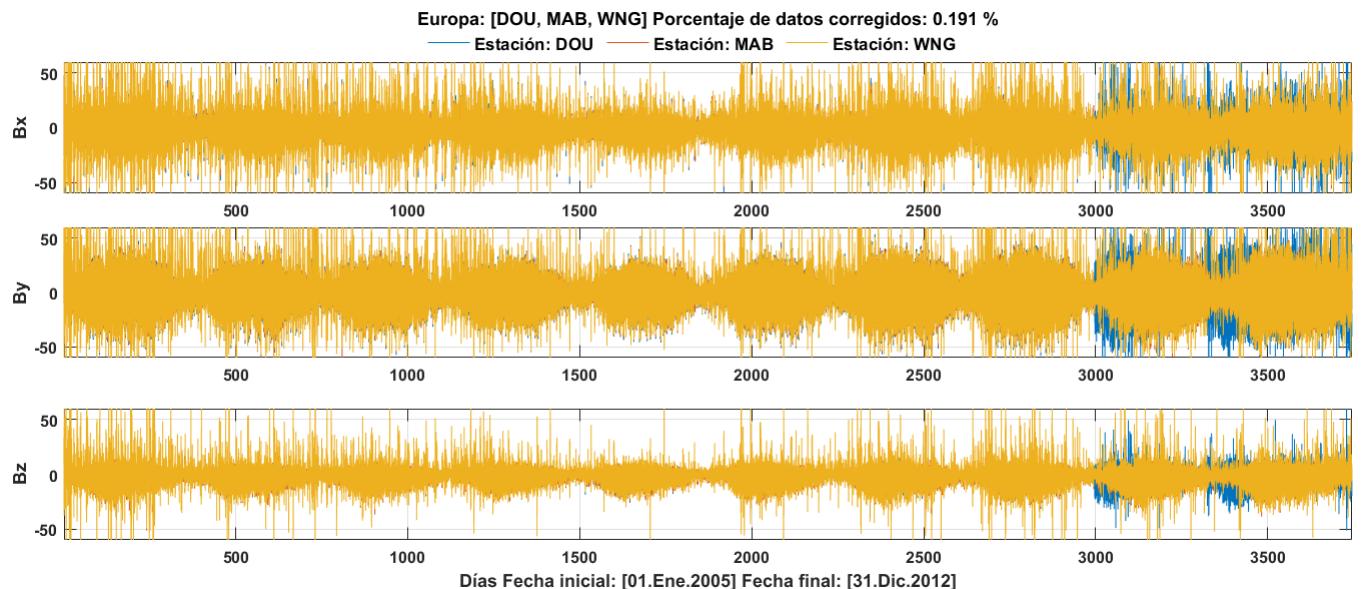


**Figura 4.2:** Localización geográfica de la zona, estaciones DOU , MAB y WNG resaltadas para señalar la región de estudio <sup>1</sup>, las líneas azules representan las distancias entre las estaciones geomagnéticas.

Para los propósitos de esta investigación, cumple con tres elementos difíciles de conseguir La zona europea seleccionada, es una zona muy especial geográficamente hablando para esta investigación, cumple con tres elementos difíciles de conseguir simultáneamente.

1. Disponibilidad de datos de estaciones cercanas.
2. Zona con actividad sísmica casi nula (solo sismos menores a  $<4M$ ) durante los años de disponibilidad de datos.
3. Datos de estaciones geomagnéticas en buenas condiciones (menos de un 1% de los datos contiene espurios).

Tenemos entonces, las estaciones mostradas en la figura 4.2, que proporcionan los datos sin normalizar mostrados en la figura 4.3, las estaciones tienen apenas un 0,191 % de datos con espurios que fueron corregidos y las componentes muestran muy poca diferencia entre las distintas estaciones lo cual únicamente exalta la fiabilidad de los datos. Los sismos más cercanos de magnitudes significativas para ser consideradas ( $>5M$ ) a cualquiera de las estaciones más cercanas es de más de 900 km, incluso en un rango de 1000 km a todas las estaciones, no se registran sismos de magnitudes mayores a ( $>6.2M$ ), esto significa la oportunidad de poner a prueba el procedimiento desarrollado en esta investigación en una zona donde presumimos no debería existir una señal precursora sísmica. Para poner a prueba esto, se desarrollaron 2 procedimientos. Ambos procedimientos tienen en común algo importante, los sismos que accederán al proceso algorítmico tanto para la calibración como para la producción serán generados de manera aleatoria, esto significa: Se generan en fechas aleatorias (dentro del tren de datos geomagnéticos disponibles), en horas aleatorias, en zonas adyacentes a las estaciones de forma aleatoria.



**Figura 4.3:** Datos de las estaciones DOU, MAB y WNG, media de cada día llevada a cero, sin normalizar, se observa la distribución de los campos geomagnéticos de las tres estaciones junto al porcentaje total de datos corregidos, estos son datos espurios y luego fueron introducidos siguiendo la regla de sustitución planteada en el capítulo 3.

**¿Cómo puede una misma zona geográfica que tiene una sola señal geomagnética tener más de un posible resultado?** Esto es debido a que la señal generada, es el resultado de un conjunto sísmico de calibración, más el conjunto de parámetros en el cual se evalúa. Para otras

<sup>1</sup>DOU: Bélgica, MAB: Bélgica, WNG: Alemania.

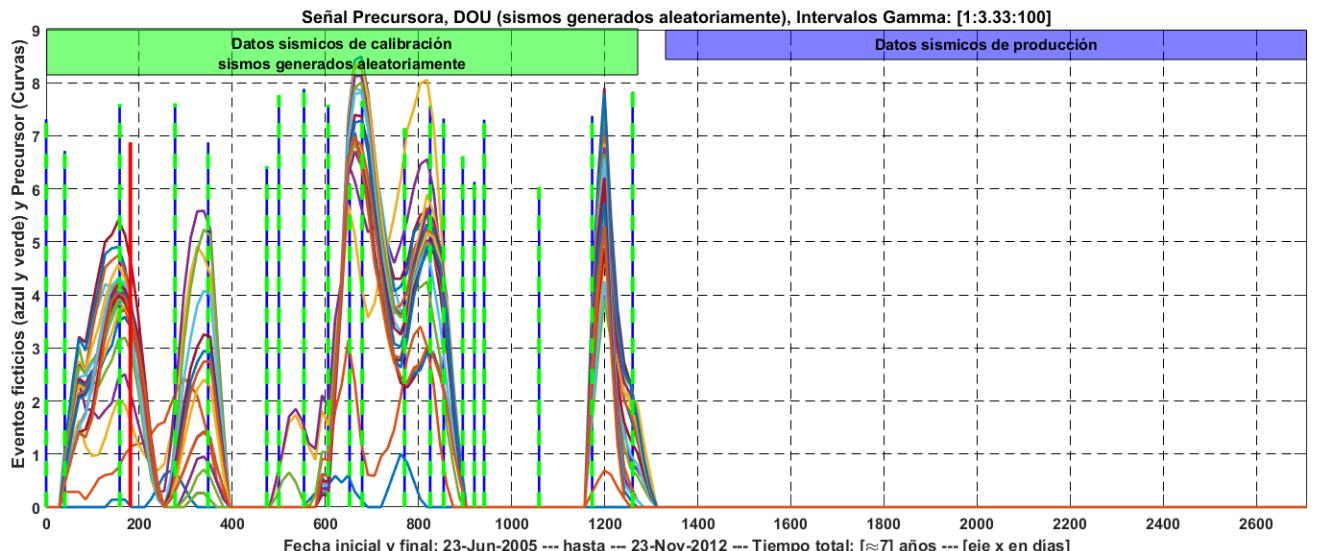
zonas, con sismicidad, la calibración es fija y está determinada por la sismicidad de la zona, mientras que los parámetros son arbitrarios<sup>2</sup>, esto hace que el conjunto de posibles resultados para la zona Europea, sean muchos más que los que computacionalmente tenemos la capacidad de procesar. Sin embargo, tenemos la oportunidad de situarnos en dos casos específicos y analizar con las herramientas disponibles si dichos resultados pueden ser entendidos dentro del marco de nuestra teoría. Para eso tendremos los dos resultados:

1. Revisión de silencio en el precursor vía calibración aleatoria.
2. Revisión de control, vía calibración y producción aleatoria, empleando curva ROC y comparación de eficiencia con un precursor aleatorio.

#### 4.1.1. Revisión de silencio en el precursor vía calibración aleatoria.

Se generan datos sísmicos aleatorios para la región temporal de calibración, pero dejando la región temporal de producción con los datos sísmicos de la zona, es decir, sin sismos. Por la forma en la que el algoritmo es sensible a perturbaciones horarias y perturbaciones a lo largo del tiempo, una calibración desarrollada en función de sismos aleatorios debería significar que ninguna zona horaria se podrá considerar óptima. Sin embargo, dado que solo podemos generar un número razonable de sismos por intervalo de tiempo y este número debe ser consistente con otras zonas manejadas en esta investigación, cualquier distribución de sismos generada aleatoriamente podría, producto de la aleatoriedad, tener un aparente bias accidental el cual debe tenerse en cuenta. Una vez generado un conjunto aleatorio de sismos, se ajustaron los parámetros para 60 días antes con un muestreo de la señal cada hora. Buscando eficiencias superiores a 20 %, usando gammas que barren valores del 1 al 100 en intervalos regulares, la señal resultante se muestra en la figura 4.4, donde se aprecia claramente el comportamiento esperado.

- La señal es forzada a activarse en la fase de calibración.
- La señal no se activa a lo largo de la fase de producción.



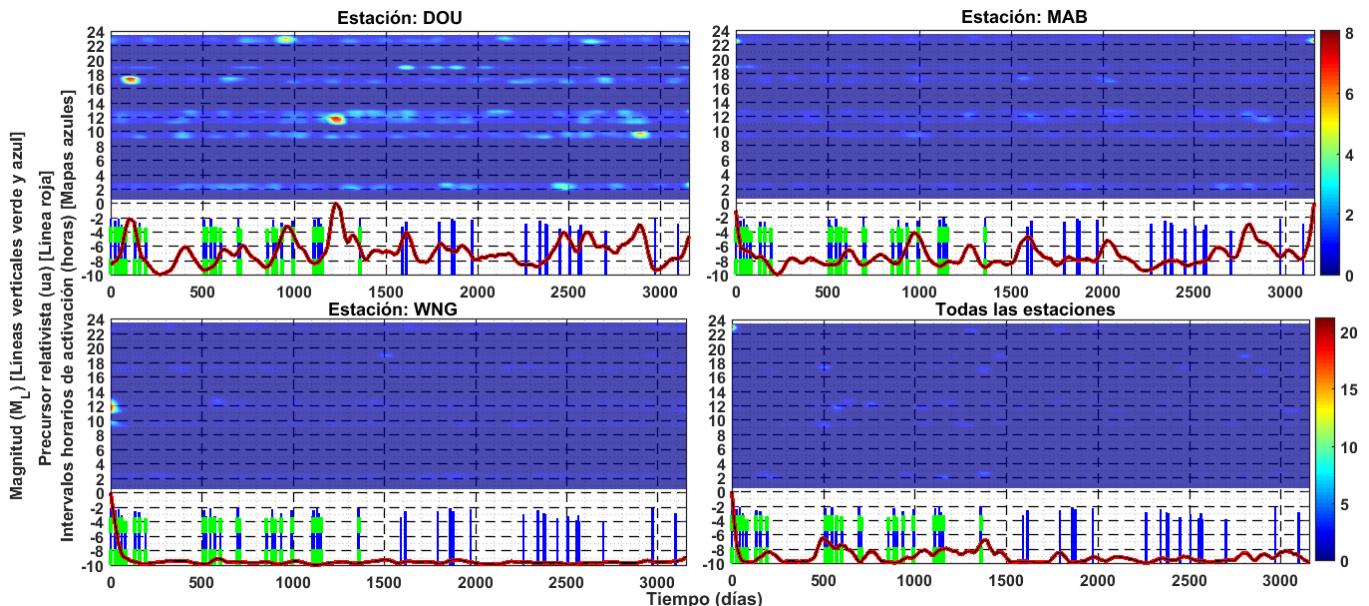
**Figura 4.4:** Señal precursora zona silente Europea, sismos de la zona temporal de calibración generada aleatoriamente, para la zona de producción se dejó intencionalmente vacío.

<sup>2</sup>Aún arbitrarios, durante esta investigación se encontró de manera consistente ciertos valores que funcionaron mejor que otros, calibraciones dando 60 días antes y después, usando ventanas horarias de 1 hora parece ser consistentemente suficiente para tener una calibración al cual accedan suficientes datos.

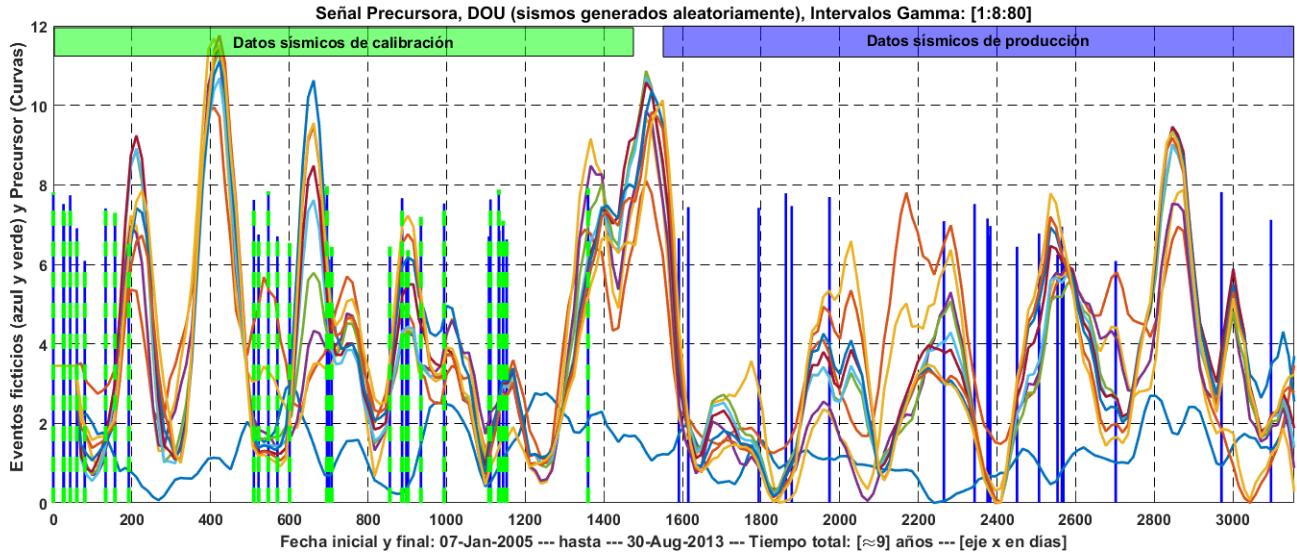
Esto es esperado, ya que ninguna región horaria debería ser significativamente relevante sobre las demás (por las características intrínsecas a la generación aleatoria), resultando que cuando el algoritmo es sometido a la etapa de producción, no encuentra ninguna zona horaria estadísticamente relevante, resultando en un silencio del precursor que corresponde positivamente con la zona de estudio.

#### 4.1.2. Revisión de control, vía calibración y producción aleatoria.

Para este procedimiento, se genera aleatoriamente un conjunto de calibración y producción, como explicamos anteriormente, la señal precursora será la combinación de los sismos otorgados en la fase de calibración y los parámetros en los cuales se estudie. Así que para esta sección variaremos los parámetros de estudio, pero manteniendo la generación aleatoria de sismos del procedimiento pasado. El objetivo tras este procedimiento es: Poner a prueba los análisis de resultados empleados en esta investigación. Si los análisis de resultados no son capaces de detectar una señal que no tiene ningún valor como precursor, indicaría que el análisis efectuado en esta investigación necesita una revisión, a la vez permite poner a prueba el algoritmo en una situación límite y pone en contexto todos los demás resultados al contrastarlo con estos, la existencia de una señal no es suficiente, debe tener asociado algún valor predictivo. Una vez generado un conjunto aleatorio de sismos, se ajustaron los parámetros para 90 días antes con intervalos horarios de 30 minutos, esto último para tener la mayor cantidad de resolución posible en la señal horaria. En la figura 4.5 se muestra el cálculo individual de la mediana de los gammas calculados para el conjunto de estaciones y las respectivas contribuciones de cada estación geomagnética a la señal total, la estación DOU posee intervalos horarios de actividad principalmente entre las 10 de la mañana y 1 de la tarde, sin embargo, las estaciones MAB y WNG presentan largos silencios del precursor a cualquier hora del día, lo cual resulta en una señal precursora resultante de la combinación de estas tres estaciones con poca o ninguna capacidad de predicción sobre los eventos aleatorios estudiados aquí. Buscando eficiencias superiores a 20 %, usando gammas que barren valores del 1 al 100 en intervalos regulares tendremos los resultados mostrados en la figura 4.6.

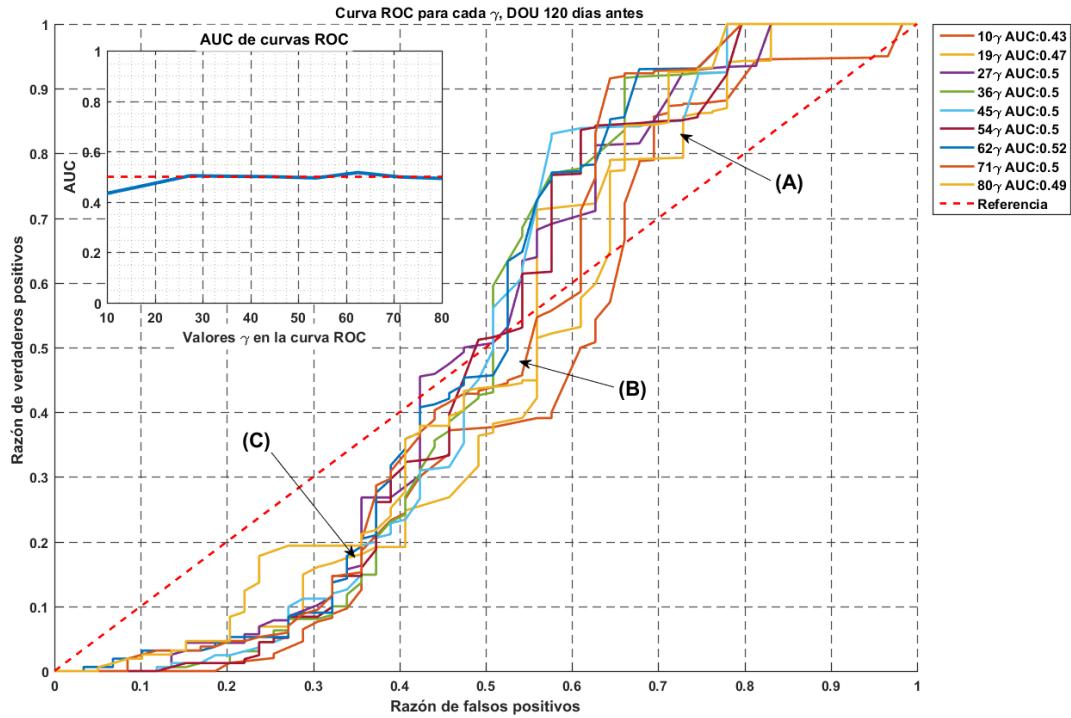


**Figura 4.5:** Señal precursora zona silente Europea, señal mostrada para la mediana de los gammas calculados, mostrando los intervalos horarios y las señales generadas para cada estación.

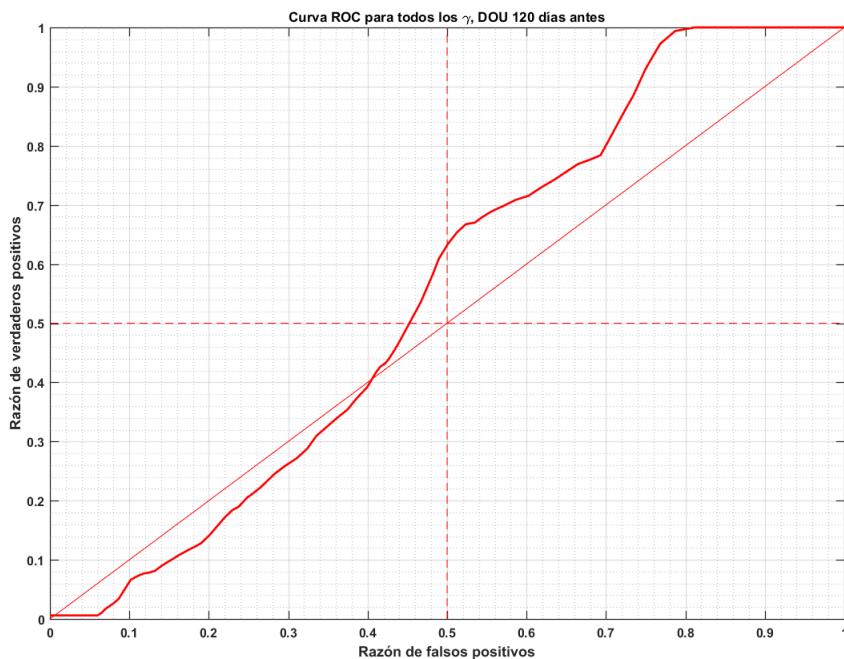


**Figura 4.6:** Señal precursora zona silente Europea, sismos de la zona temporal de calibración y producción generados aleatoriamente.

**Comentario sobre las curvas ROC:** Evaluando los resultados mostrados en 4.6 por medio de las curvas ROC mostradas en 4.7 y 4.8, los índices AUC sugieren un comportamiento parecido a un clasificador aleatorio para casi cualquier umbral discriminador independientemente del gamma ( $\gamma$ ). Por la forma en la que el índice AUC es calculado, este solo puede tomar en cuenta la naturaleza global de toda la curva (discusión de esto en el capítulo 3, sección 3.4.1), pero solo estudiando localmente secciones de ella, podemos tener una lectura más profunda del significado de la curva 4.7 y sus implicaciones para el resto de las regiones. Para la sección (A) que correspondería a umbrales de clasificación (para esta región en específico) que comprenden de  $0\sigma < \tau_u < 1\sigma$  con sigma ( $\sigma$ ) representando la desviación estándar del conjunto de resultados mostrados en 4.6, resalta que se alcanza casi un 0.85RVP y para un 0.65RFP, esto difiere del esperado clasificador aleatorio para un umbral bajo que teóricamente estaría en 0.7RVP para 0.7RFP. La curva (en rojo punteado) que damos por referencia corresponde a un clasificador aleatorio que no tiene en cuenta el efecto de la variable de los días antes que agregamos, para umbrales bajos, muchos puntos son clasificados como verdaderos positivos y debido a la densidad de sismos que se generaron por año ( $\approx 6 \pm 6$  sismos por año) significa que ese tipo de desbalance entre los índices RVP y RFP es esperado. En la región (B) donde al aumentar el umbral de clasificación  $1\sigma < \tau_u < 2\sigma$  y, por lo tanto, directamente reducir la cantidad de puntos que fueron clasificados como verdaderos positivos, la relación de RVP y RFP se equilibra y converge a los 0.5RVP y 0.5RFP esperados de un clasificador aleatorio. Por último la sección (C) presenta lo contrario a la región (A), al acceder a los umbrales de discriminación más altos  $2.5\sigma < \tau_u$  la cantidad de puntos que es clasificado como verdaderos negativos se dispara, mientras que se encuentran muy pocos verdaderos positivos para compensar y alcanzar la forma del clasificador aleatorio teórico. En resumen, a pesar la forma en general de la curva no se apegue a un clasificador aleatorio, esto es solo debido a la distribución del precursor y consecuencia del método en la que clasificamos VP (verdaderos positivos) y VN (verdaderos negativos), adicionalmente este resultado funciona como referencia para el estudio de otras zonas, que deberían presentar comportamientos distintos en especial en las zonas (B) y (C) debido a nuestra hipótesis de que presentan sismos importantes poseen anomalías geomagnéticas detectables y estarán correlacionadas a los eventos.



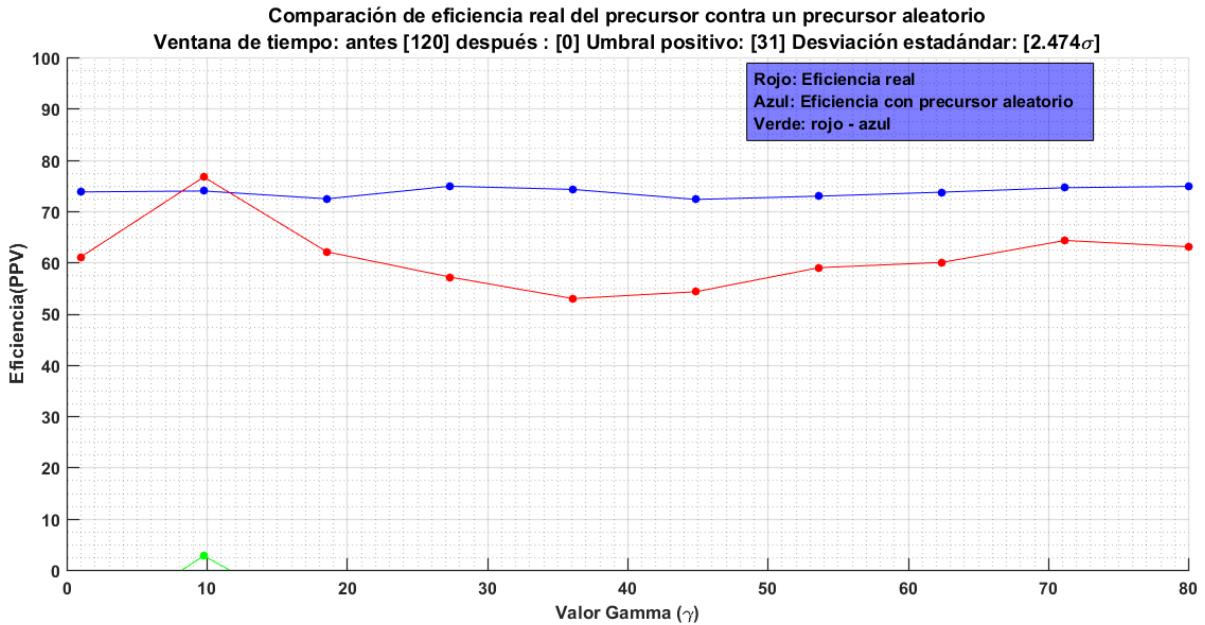
**Figura 4.7:** Curvas ROC generadas con los resultados de las estaciones europeas, para cada gamma calculado y sismos generados aleatoriamente, curva de AUC de curvas ROC muestra que todas las curvas ROC son bastante similares a un clasificador aleatorio (A)  $\tau_u < 1\sigma$ , (B)  $1\sigma < \tau_u < 2\sigma$ , (C)  $2\sigma < \tau_u$ .



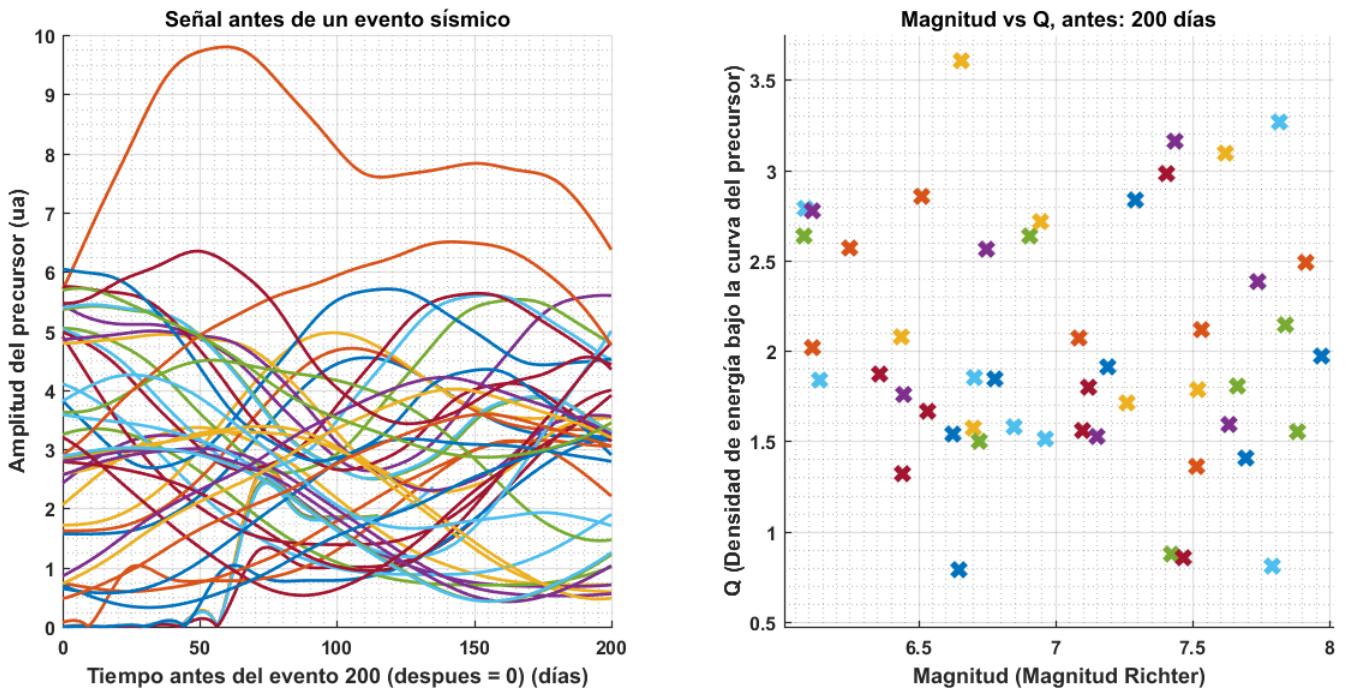
**Figura 4.8:** Curva ROC para región Europea para todos los gammas con una ventana de 120 días antes del sismo.

De la figura 4.7, se puede extraer un umbral de discriminación óptimo ( $\approx 2.4\sigma$ ) y compararlo con un precursor generado aleatoriamente, esta comparación se muestra en la figura 4.9, donde el único valor gamma que presenta una mayor eficiencia (PPV) con respecto a su contraparte aleatoria,

lo hace por 7% y para el resto de las señales es hasta 20% peor que un precursor generado aleatoriamente. Seguidamente, se analizaron los resultados de  $Q$  en función de la magnitud  $m$ , la magnitud fue generada de manera aleatoria, esto se muestra en la figura 4.10, a diferencia de otras regiones, no se observa ninguna tendencia, ninguna relación, la forma de la curva es independiente a la magnitud.



**Figura 4.9:** Señal precursora, con el mejor umbral de selección posible determinado por análisis ROC, comparado con un precursor generado aleatoriamente en la misma proporción.



**Figura 4.10:** Densidad de energía bajo la curva  $Q$  en función de la magnitud del sismo, para la zona europea, bajo el procedimiento de: *Revisión de control, vía calibración y producción aleatoria*, con sismos generados aleatoriamente.

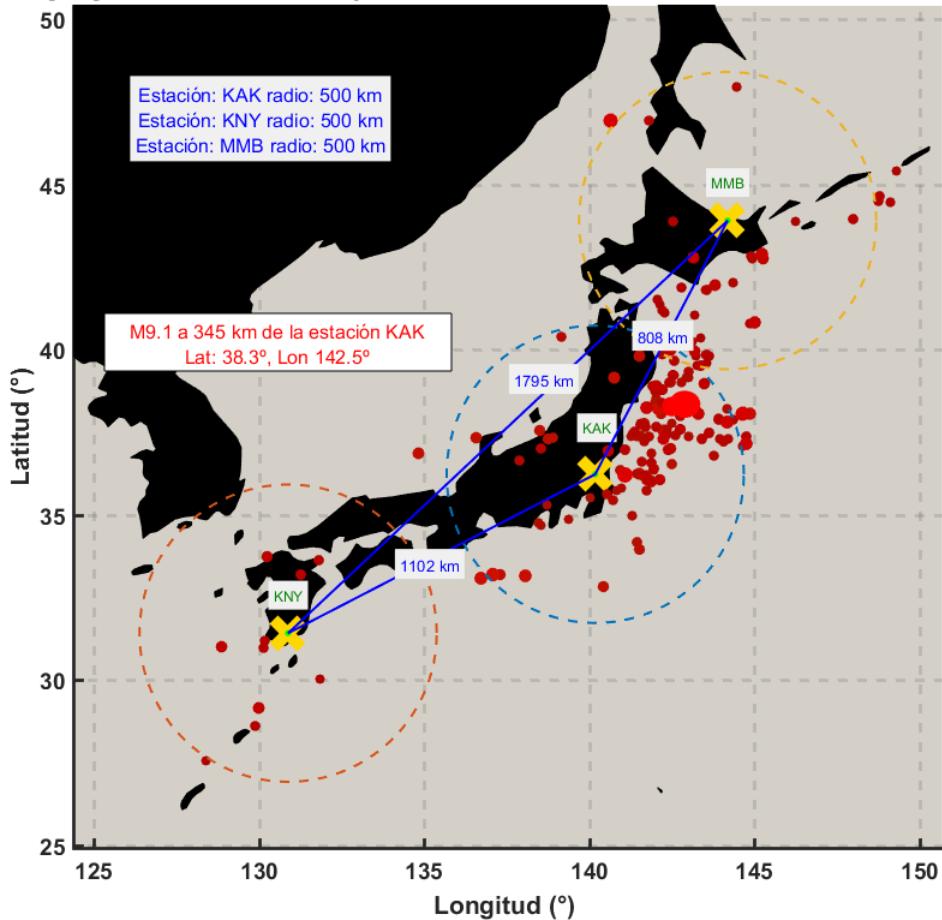
## 4.2. Gran terremoto de Japón oriental

Denominado oficialmente por la Agencia Meteorológica de Japón como el terremoto de la costa del Pacífico en la región de Tohoku, fue un terremoto de magnitud 9.1M que creó olas de maremoto de hasta 40,5 metros. El terremoto ocurrió a las 2:46:23 p. m. hora local (05:46:23 UTC) del viernes 11 de marzo de 2011. El epicentro del terremoto se ubicó en el mar, frente a la costa de Honshu, 130 km al este de Sendai, en la prefectura de Miyagi, Japón, a una profundidad de 32 kilómetros. El terremoto duró aproximadamente seis minutos según los sismólogos. El USGS explicó que el terremoto ocurrió a causa de un desplazamiento en proximidades de la zona de la interfase entre placas de subducción entre la placa del Pacífico y la placa Norteamericana. En la latitud en que ocurrió este terremoto, la placa del Pacífico se desplaza en dirección oeste con respecto a la placa Norteamericana a una velocidad de 83 mm/año. La placa del Pacífico se introduce debajo de Japón en la fosa de Japón, y se hunde en dirección oeste debajo de Asia. Este evento fue uno de los primeros estudiados en esta investigación, ya que otros estudios independientes (Stanica et al. [14]) señalaban indicios de precursores sísmicos en las componentes de campo geomagnéticos. Otros estudios señalaron extrañas anomalías electromagnéticas en la zona antes y durante el sismo (Kamiyama et al. [27]). Dado que los modelos usados dependen de la distancia entre el epicentro a las estaciones y de la magnitud del terremoto, con Japón teniendo tres estaciones de alta fiabilidad en su entrega de datos durante años (KAK, KNY, MMB), se consideró un buen candidato para empezar la búsqueda de un potencial precursor sísmico haciendo énfasis en el evento de magnitud 9.1 del 2011, para eso primero se hace una lista de los eventos sísmicos vecinos a la estación más cercana (KAK) destacando eventos de magnitud por iguales o mayores a magnitud siete para tener un contexto adecuado en la lectura de los resultados obtenidos con el procedimiento planteado en el capítulo 3.

### 4.2.1. Datos de entrada y parámetros del análisis.

Japón es un país altamente sísmico por su ubicación en el cinturón de fuego del Pacífico, su proximidad entre las estaciones geomagnéticas y los episodios sísmicos hacen de esta zona una candidata ideal para el estudio de relaciones entre señales electromagnéticas precursoras a un evento sísmico importante. Sin embargo, a pesar de estos beneficios, también presenta problemas significativos a la hora de plantear un modelo estadístico que permita la comprobación de la validez de un precursor debido a la cantidad de terremotos que pasan año tras año. Según la agencia sismológica de Japón, dentro y alrededor de Japón, suceden uno de diez terremotos en el mundo, en promedio un terremoto M7 sucede cada año (Matsu'ura [29]). Para el estudio en esta zona, las estaciones que recolectan datos geomagnéticos están a varios miles de kilómetros, esto representa un reto en el momento de determinar alguna zona de influencia, y la distribución de eventos  $>M6$  es bastante continua a lo largo del tren de datos geomagnéticos que estudiaremos, la zona cuenta con datos geomagnéticos del 2010, que es el año del terremoto de M9.1. El principal reto es, aun descubriendo una señal anómala que pueda estar asociada a algún registro histórico que de una certeza de que dicha señal está relacionada con un evento sísmico, la zona de estudio son varios miles de kilómetros, esta dificultad puede sortear planteando que el foco de esta investigación son los grandes terremotos, por lo que si un terremoto grande golpea cualquier parte, toda la región se verá afectada. Eso nos deja la predicción del tiempo y la magnitud, ventanas de tiempo muy grandes podrían dejar la predicción sin un uso real, la predicción de la magnitud podría ser bastante certera para terremotos en los que se tengan muchos datos (como por ejemplo los de M6) sin embargo, debido a la naturaleza intrínseca de que los mayores terremotos pasan muy poco, se necesitaría un registro de datos geomagnéticos más extenso para conseguir la masa crítica de estadística para extraer conclusiones útiles.

**Posición geográfica de estaciones y eventos, estaciones: KAK, KNY, MMB, Fechas: 2004 - 2015.**

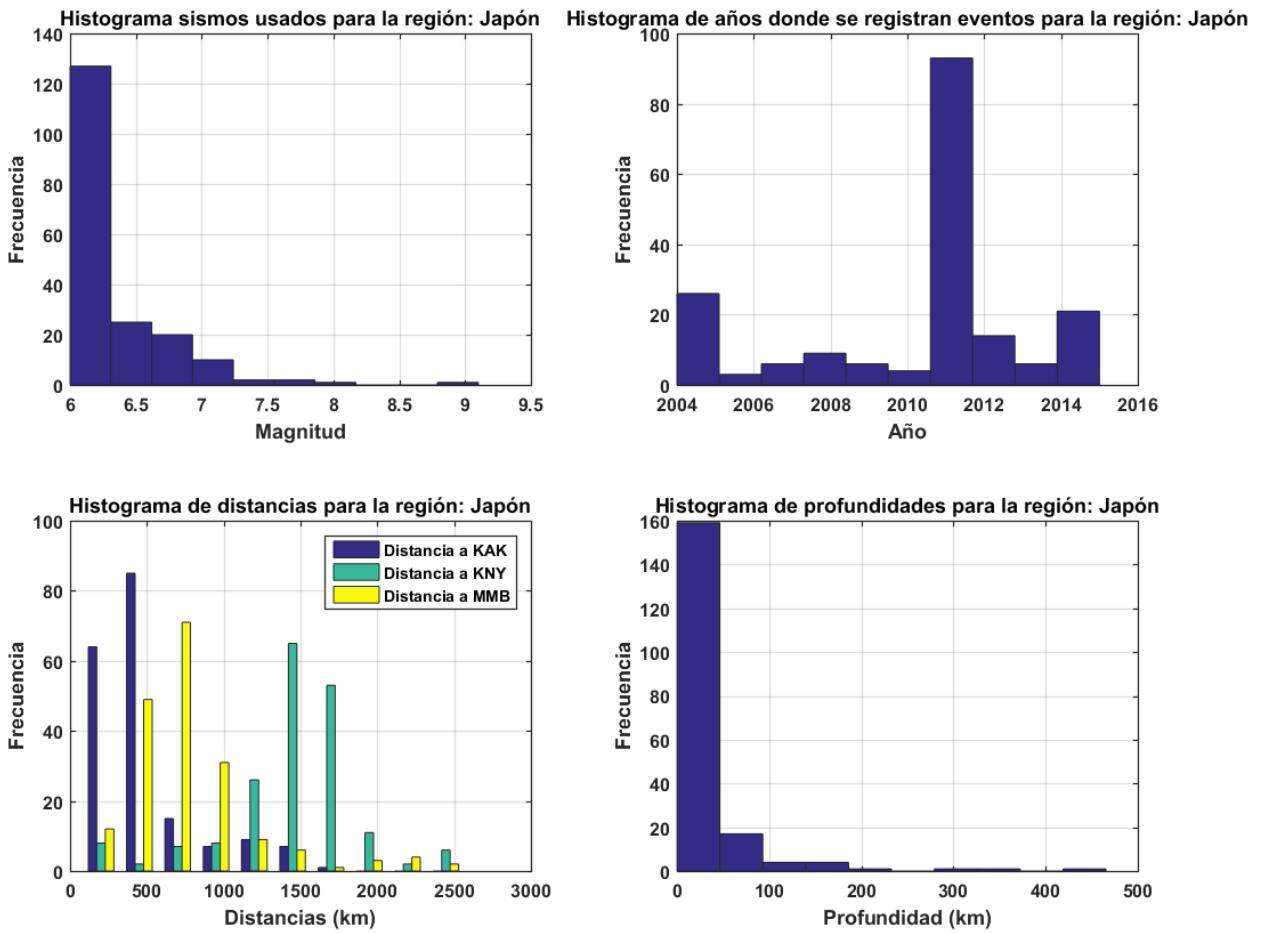


**Figura 4.11:** Mapa de la zona Japón con las estaciones marcadas (KAK,KNY y MMB) terremotos seleccionados. El tamaño de los puntos rojos es proporcional a la magnitud, epicentro del terremoto M9.1 ubicado en latitud 38.3º y longitud 142.5º ocurrido el 11 de marzo del 2011.

Si hiciéramos un círculo imaginario centrado en cada una de las estaciones, con un radio solo de 300 kilómetros tendríamos casi 300 sismos a partir del 1998 hasta el 2020 con magnitud registrada mayor a seis y ese número solo se dispara a más de 2200 si consideramos sismos mayores a 5 con el mismo radio a las estaciones y las mismas fechas. Son aproximadamente 100 sismos al año (mayores a 5 y en el radio planteado a las estaciones geomagnéticas) en los datos manejados durante esta investigación, para sismos mayores a M6, el número pasa a ser 14 al año.

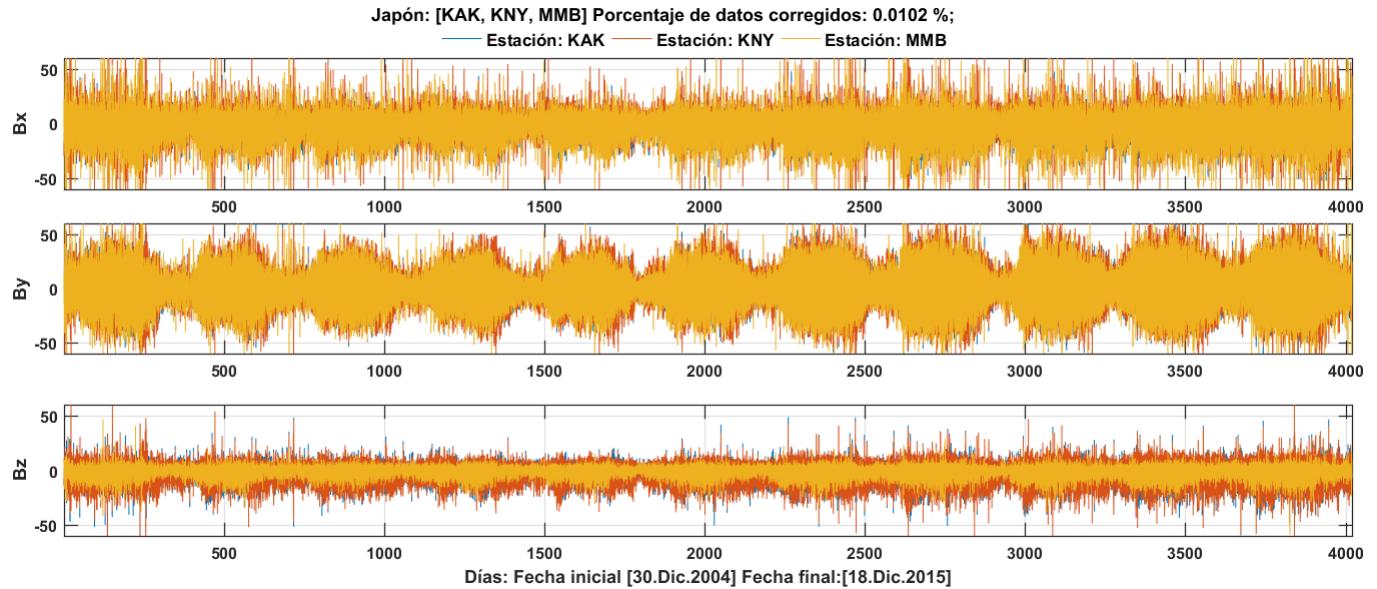
**Cuadro 4.1:** Algunos sismos significativos cercanos a la estación KAK en los años 2010 y 2011.

Latitud (º)	Longitud (º)	Magnitud	Día	Mes	Año
36.2	141.0	7.9	11	3	2011
38.2	141.7	7.1	7	4	2011
38.3	142.5	9.1	11	3	2011
38.0	143.3	7.0	10	7	2011
38.4	142.9	7.3	9	3	2011
38.0	144.6	7.6	11	3	2011
26.9	143.7	7.4	21	12	2010



**Figura 4.12:** Histogramas de cantidades importantes relacionadas con los eventos sísmicos en las adyacencias de las estaciones geomagnéticas durante los años de estudio.

Solo se puede estudiar un terremoto de M9 en los 22 años de datos usados en esta investigación. En la figura 4.12, se detalla la distribución de eventos utilizados en este estudio para la zona de Japón, resalta que por cada evento M7, se tienen aproximadamente 11 eventos M6 esto presentará un desafío a la hora de analizar los resultados específicamente para los grandes terremotos en esta zona. Las estaciones geomagnéticas que proporcionan los datos para esta región son KAK, KNY y MMB extraídos de INTERMAGNET, el total de datos espurios presentados y corregidos fue de aproximadamente 0,0102 % como se muestra en la figura 4.13, para realizar la fase de calibración, empezando desde el 2004 hasta el 01 de febrero de 2011 justo un poco antes del evento del 11 de marzo de 2011 (terremoto de magnitud 9.1) y para la fase de producción, se tomó todo el tren de datos disponible. El proceso de normalización para los datos de cada estación y cada componente de campo magnético tiene la intención intrínseca de que cada componente y todas las estaciones deben tener una relevancia estadística similar, lo anterior se logra con el proceso de normalización descrito en el capítulo 3, pero para el caso específico de Japón, se trabajó teniendo en cuenta que las componentes  $B_y$  de todas las estaciones y en menor medida  $B_x$ ,  $B_z$  están influenciadas por una señal anual relacionada con el sol. Esta contribución anual no fue posible removerla sin afectar severamente la fase de la señal, por lo que nos apoyaremos en varias técnicas y la repetición del procedimiento en distintas zonas geográficas para contextualizar el resultado en un marco más amplio, donde la duda razonable de que las señales observadas estén relacionadas con una interacción solar anual, sea mínima o razonablemente improbable.



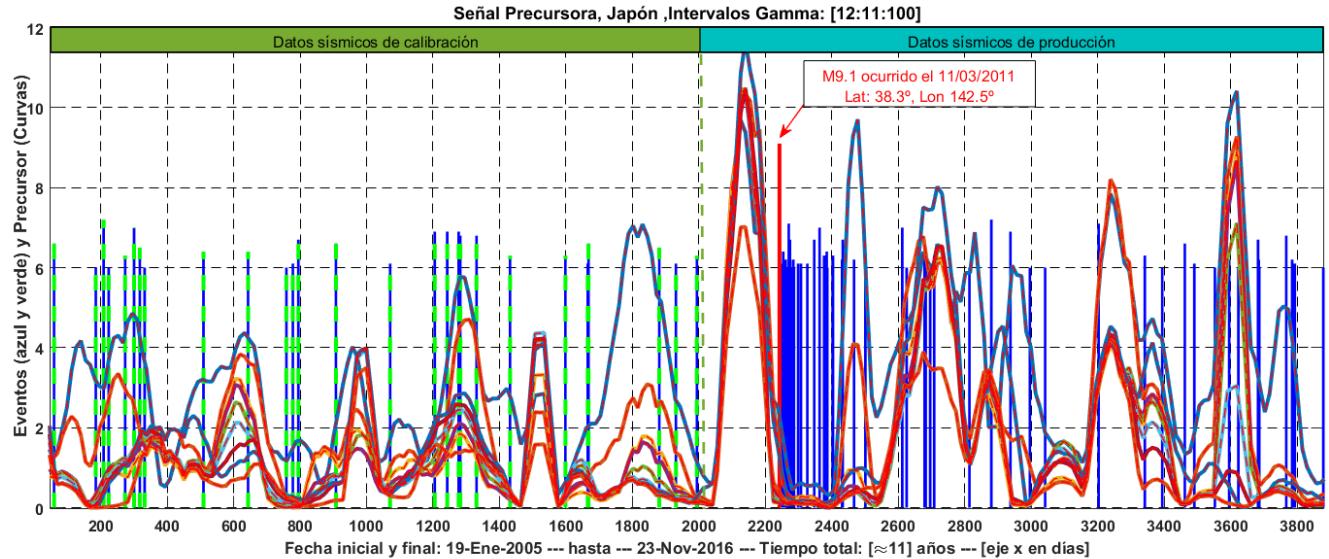
**Figura 4.13:** Datos de las estaciones KAK, KNY y MMB, media de cada día llevada a cero, sin normalizar, se observa la distribución de la señal alrededor cero de las tres estaciones junto a el porcentaje total de datos corregidos.

#### 4.2.2. Resultados del precursor.

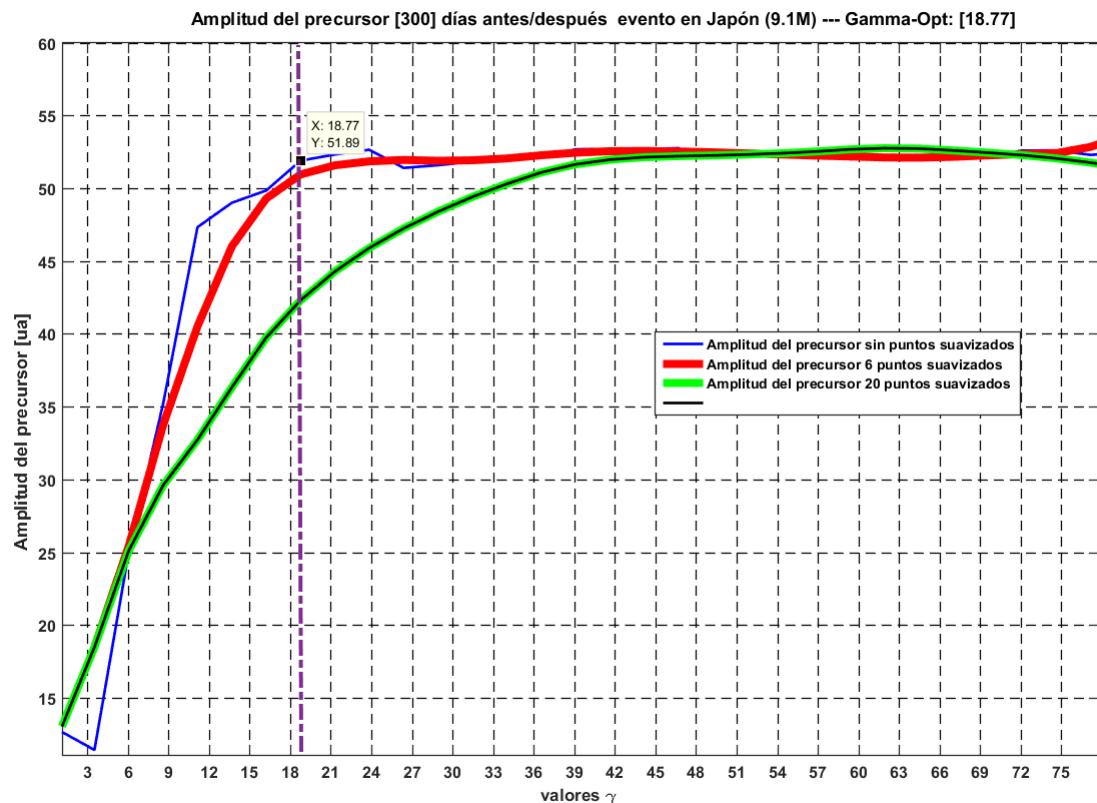
Ajustando los parámetros y alimentando el algoritmo de los datos previamente preparados, se ajustó una ventana de 60 días antes y 60 días después, con ventanas horarias de 1 hora. Usando la media horaria de los campos magnéticos locales de las estaciones KAK-MMB-KNY para generar la transformación  $\Omega(t)^k \Rightarrow \Omega'(t)^k$  (sección 3.3.2) repitiendo el procedimiento para 100 valores discretos y distintos de gamma ( $\gamma$ ), estos nos permite una búsqueda razonable de gammas óptimos para ciertos intervalos horarios. Filtrando a 20 % como la eficiencia mínima horaria (disparos relacionados con un evento sísmico dentro de una ventana de días antes o después) para reconstruir la señal, obtenemos la señal mostrada en la figura 4.14, en la misma figura se muestra que varios valores de gamma tienen distintas amplitudes, fases y frecuencias, también muestra una señal potencialmente precursora y prominente antes del evento 9.1M (marcado como una línea vertical roja), destaca que se usó aproximadamente la mitad de los datos sísmicos locales para la calibración cortando casi 220 días antes al evento de 9.1M y la totalidad para la fase de producción.

Estudiando 150 días antes y después al evento sísmico 9.1M, teniendo un registro del valor gamma máximo alcanzado por cada señal y construyendo una curva del máximo de la señal en función del gamma registrado, se tiene la figura 4.15 la cual muestra un valor óptimo en el gamma cercano al valor de  $18\gamma$ , sugiriendo la posibilidad de alguna relación entre el valor gamma y la amplitud de la señal precursora.

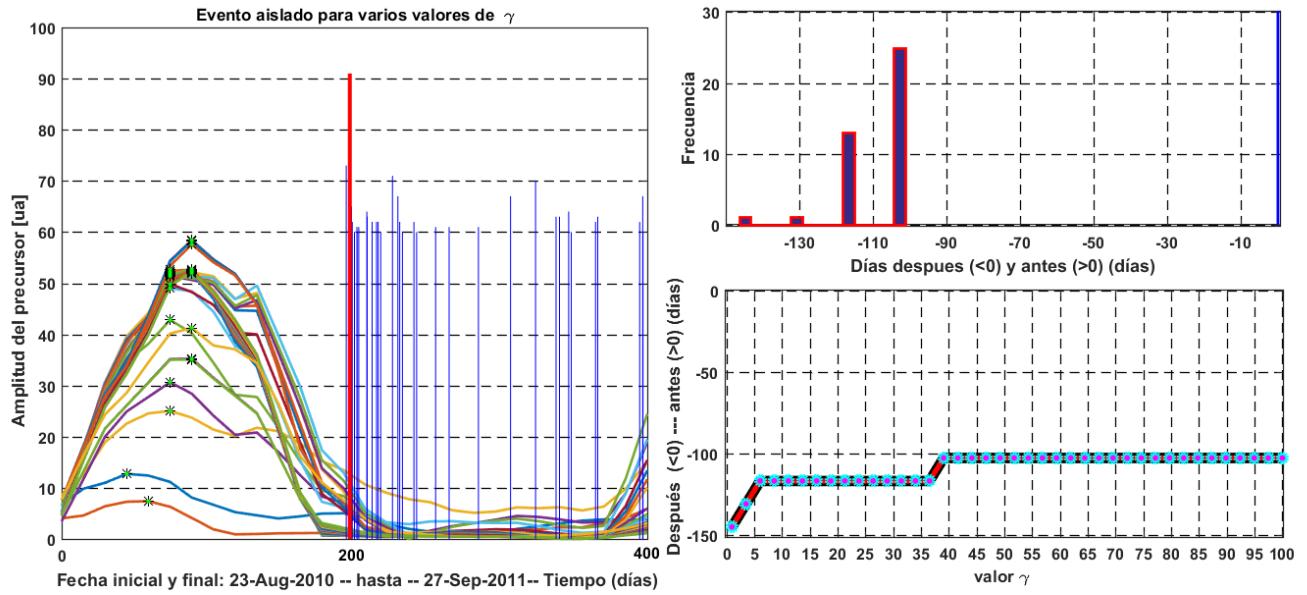
La señal precursora tiene la mayoría de sus máximos aproximadamente 100 días antes del terremoto, para luego decaer hasta la ocurrencia del mismo, solo las señales que son afectadas por el factor  $\gamma > 1$  experimentan lo que parece ser un efecto amplificador en la señal que la hace lo suficientemente distinguible para poder realizar el análisis, lo mencionado concuerda con nuestra hipótesis de la existencia de un potencial “efecto magnificador relativista”, que podría hacer evidentes señales ocultas en el ruido y que están correlacionadas con el evento sísmico.



**Figura 4.14:** Señal de las estaciones KAK, KNY y MMB, la señal precursora mostrada se encuentra a una escala proporcional a la magnitud máxima registrada durante el tiempo de estudio. Las líneas verticales azules con verde son los sismos asignados a la calibración del experimento, las líneas azules, son los sismos que son asignados para la etapa de producción del algoritmo.



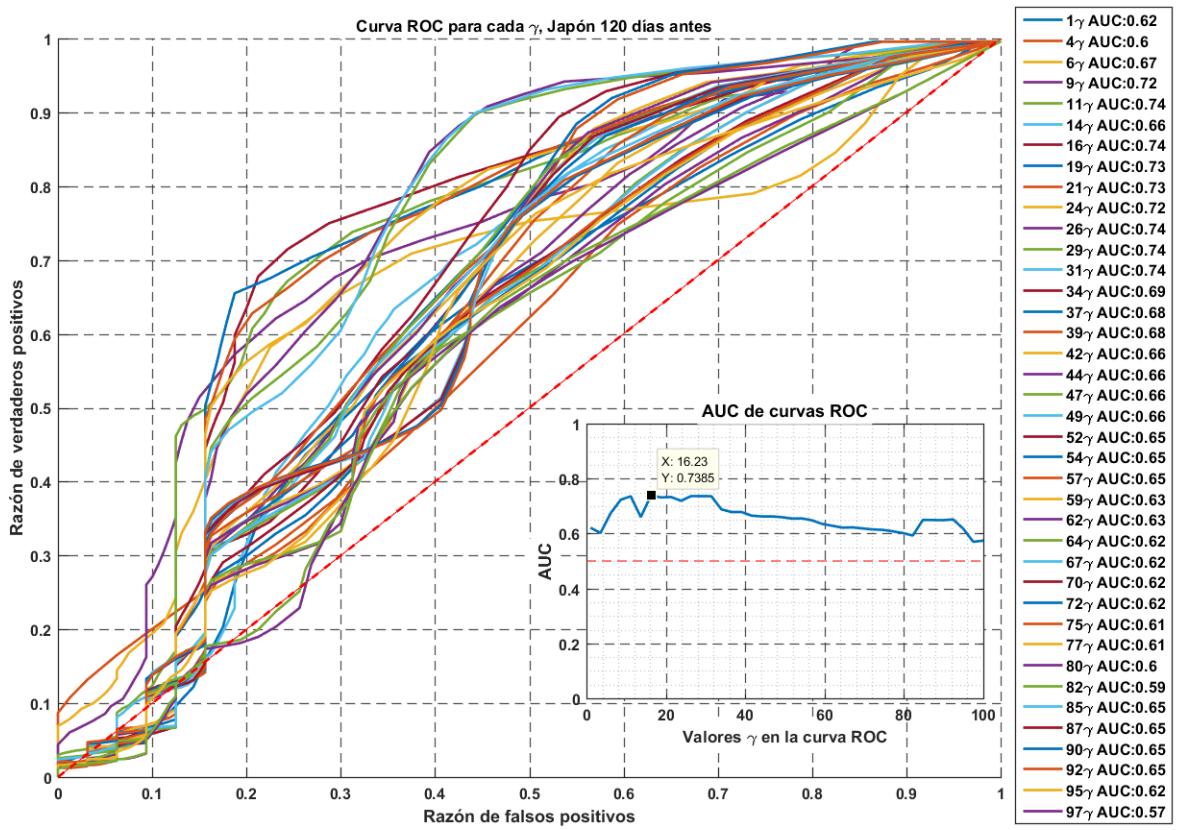
**Figura 4.15:** Amplitud de la señal en función del valor de gamma calculado, para la señal de Japón mostrada en 4.14 con una suavización sin puntos, con 6 puntos y con 20 puntos.



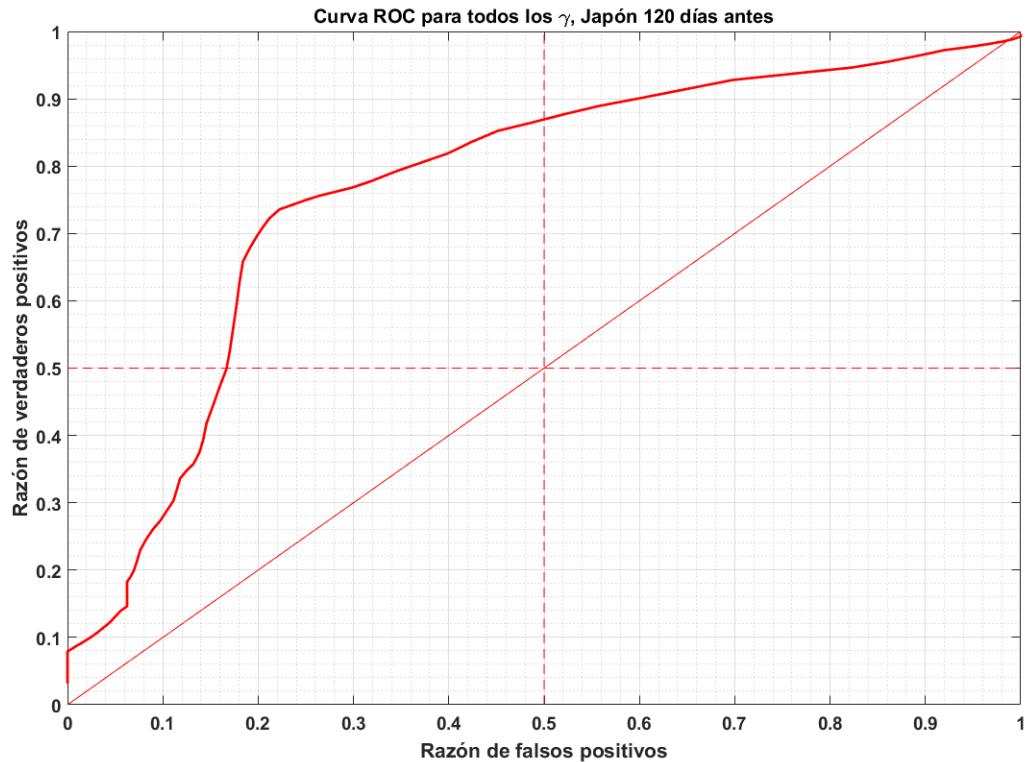
**Figura 4.16:** A la izquierda, curvas de colores muestran las varias señales precursoras calculadas, cada una depende de un gamma distinto, que llegan a un máximo (puntos verdes) entre 150 y 100 días antes del evento sísmico de Japón dentro de la ventana de tiempo mostrada, línea roja vertical representa el evento sísmico de 9.1, arriba a la derecha se muestra un histograma de cuando se registra el máximo de cada señal, mientras que abajo a la derecha se muestra la relación entre la variable gamma y cuando registra el máximo de la señal en una ventana cercana a 250 días centrada en el terremoto.

#### 4.2.3. Curva ROC y otros resultados estadísticos.

Para entender mejor los resultados observados en 4.14, 4.15 y 4.16 se procede a realizar los procedimientos descritos en el capítulo 3 (sección 3.4), entre ellos, se encuentra verificar si bajo algún umbral la señal puede o no ser considerada útil para detectar un terremoto antes de que suceda. Incrementando el umbral de detección por una unidad y calculando la sensibilidad y especificidad para una ventana de 120 días antes a un evento sísmico, separando en dos casos importantes, ambos mostrados en la figura 4.17, donde la figura de la izquierda representa la combinación de todas las señales (todos los gammas calculados), y la figura de la derecha representa el estudio a cada gamma individual. Se muestra claramente, que no todas las señales de gamma son potencialmente útiles para crear predicciones a mediano plazo, la mayoría se encuentran muy cercanos a clasificadores aleatorios, mientras que algunos selectos tienen una dinámica especial, dicha dinámica a pesar no es completamente entendida en esta investigación, se cree puede ser debido a que el factor gamma exalta ciertas combinaciones en los campos magnéticos locales, y que dichas combinaciones, estudiadas a lo largo del tiempo, permiten detectar fluctuaciones anormales en la zona. Las figuras 4.17 en conjunto con la tabla 4.2 sugieren que existen umbrales óptimos de medición para el conjunto de datos de las estaciones japonesas y que además, existen valores gamma óptimos para ciertas magnitudes. Tomando los umbrales de detección óptimos de las curvas ROC, se genera la tabla mostrada en 4.2, se muestra cuál umbral se considera óptimo y cuál valor de gamma es óptimo bajo un determinado umbral en un cierto rango de magnitudes, dichos resultados tienen el resultado esperado mostrado en el capítulo 2, donde se muestra una relación débil pero existente entre la magnitud de un sismo y el factor gamma ( $\gamma$ ), la relación mostrada en la tabla 4.2 no refleja directamente la eficiencia porcentual en detectar sismos, solo indica que es el mejor de un cierto grupo, por lo mismo se considera que la interpretación extraída de esta tabla es útil pero limitada y definitivamente no debe interpretarse sin tener en cuenta el resto de los resultados mostrados en esta investigación.



(a) Curva ROC para cada gamma calculado, con sus respectivos valores AUC asociados.



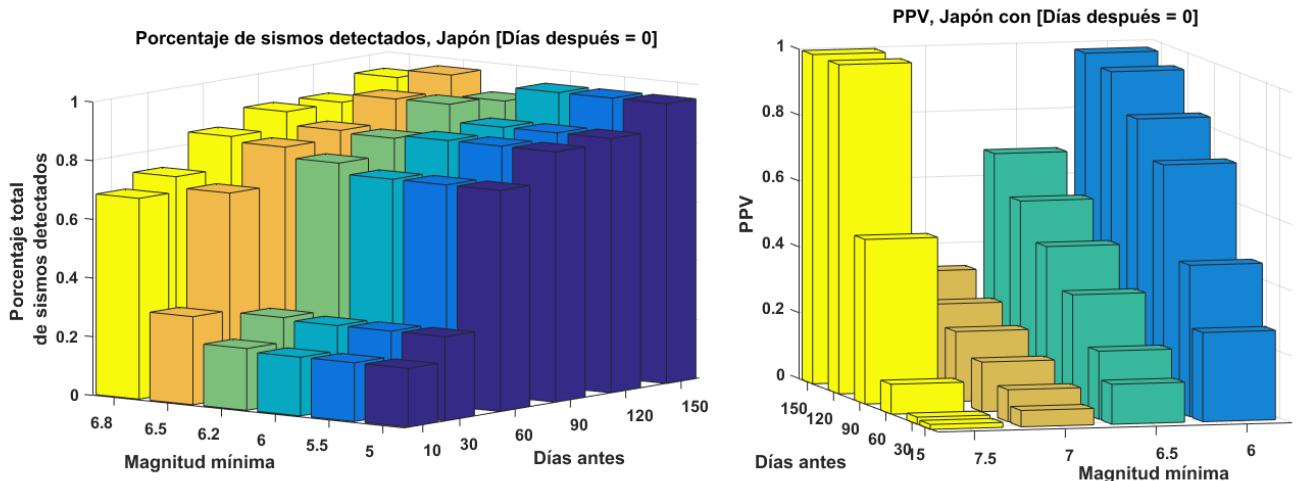
(b) Curva ROC para todos los gammas calculados.

**Figura 4.17:** Curvas ROC e índices AUC para Japón estudio señal precursora, 2004 - 2016.

**Cuadro 4.2:** Resultados de análisis vía curva ROC de umbrales(medido en desviaciones estándar ( $\sigma$ ) y gammas ( $\gamma$ ) óptimos en el conjunto de datos mostrado en 4.14.

Días antes	Magnitud mínima			
	6	7	8	
30 Días antes	$3\gamma$	$3.9\sigma$	$8\gamma$	$2.7\sigma$
60 Días antes	$3\gamma$	$3.9\sigma$	$8\gamma$	$2.7\sigma$
90 Días antes	$3\gamma$	$3.4\sigma$	$8\gamma$	$2.7\sigma$
120 Días antes	$6\gamma$	$2.2\sigma$	$8\gamma$	$2.9\sigma$
150 Días antes	$\gamma$	$1.9\sigma$	$8\gamma$	$2.9\sigma$
Media:	$4.4\gamma$	$3.08\sigma$	$8.0\gamma$	$2.79\sigma$
				<b>13.4<math>\gamma</math></b>
				<b>10.03<math>\sigma</math></b>

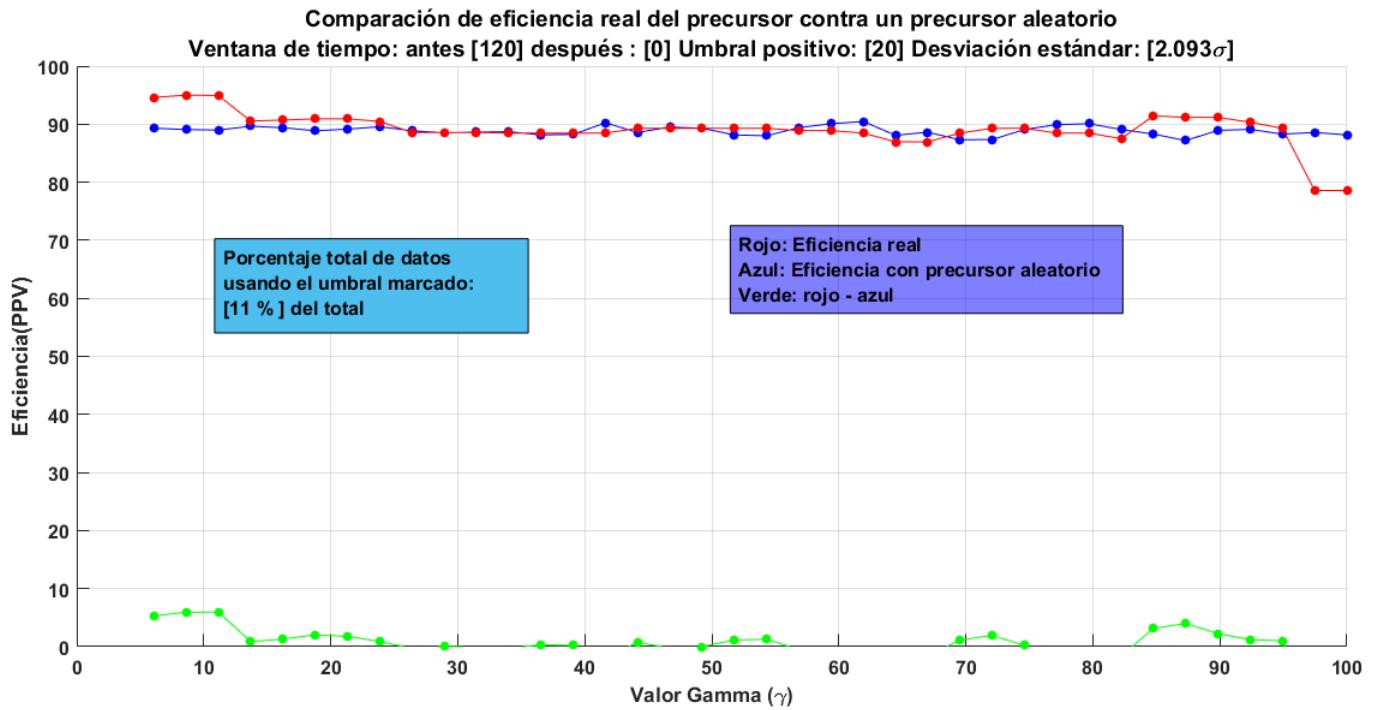
Una vez obtenido los resultados de la tabla 4.2, podemos determinar cuál es el índice PPV (Positive Predictive Value) también conocido como un índice de predicción positivo, para un determinado umbral de clasificación y para determinados eventos sísmicos que tengan una magnitud mínima, esto último con la intención de revisar si existe una correlación positiva entre una señal y un evento. Dicha revisión del PPV se muestra en la figura 4.18 y la cantidad total de sismos detectados para la misma condición estaría mostrado en la figura 4.18.



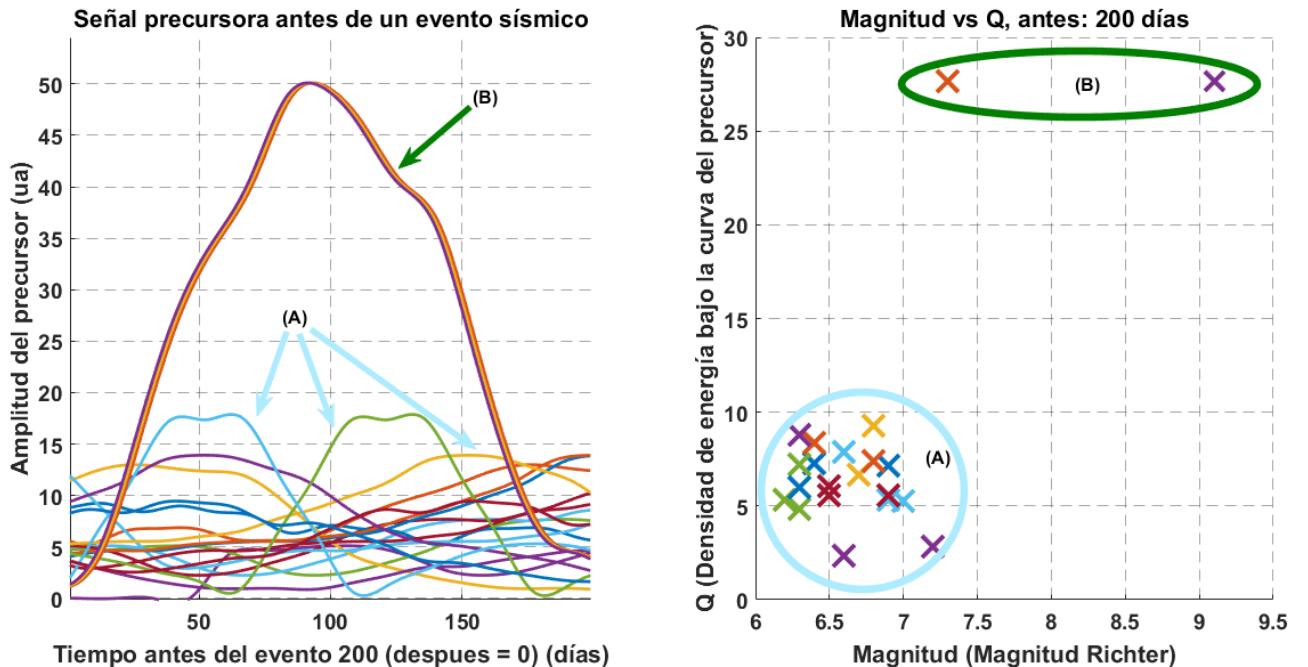
**Figura 4.18:** A la derecha el índice positivo de predicción (PPV) para las estaciones Japonesas KAK, KNY y MMB, estudiando la señal mostrada en 4.14 iterando la magnitud mínima y días antes en los cuales una señal pueda ser considerada como un verdadero positivo. Los umbrales y gammas usados para calcular la probabilidad son los mostrados en la tabla 4.2. A la izquierda total de sismos detectados con el procedimiento para distintos días antes y distintas magnitudes mínimas, esto se calcula utilizando umbrales y gammas óptimos previamente calculados y mostrados en la tabla 4.2.

Seguidamente, empleando el umbral óptimo de medición determinado por la curva ROC en la figura 4.17, se procede a comparar con la efectividad que tendría un precursor generado aleatoriamente contra nuestro potencial precursor de una forma general, es decir, tomando todos los sismos  $> M6$ . Esto último se muestra en la figura 4.19, la diferencia se espera sea poco debido a una serie de factores debidos a la cantidad de días antes, la cantidad de sismos usados y que el umbral sea muy bajo. La gráfica 4.17 muestra que para el caso no-relativista ( $\gamma = 1$ ) la eficiencia es igual a la de un precursor aleatorio, esto coincide con los resultados que se esperaría si el sistema tuviera una relación señal/ruido  $< 1$ . Algunos intervalos de gamma ( $\gamma = 7, 9, 11$ ) alcancen casi un (6.5) %

de diferencia sobre el precursor aleatorio, se consideran necesarias más pruebas para saber si la diferencia es estadísticamente significativa.



**Figura 4.19:** Comparación de precursor real y un precursor aleatorio para la región Japonesa, PPV (positive prediction value) representa cuantos puntos del precursor fueron asociados positivamente con un sismo dentro de la ventana de tiempo asignada a un determinado umbral.



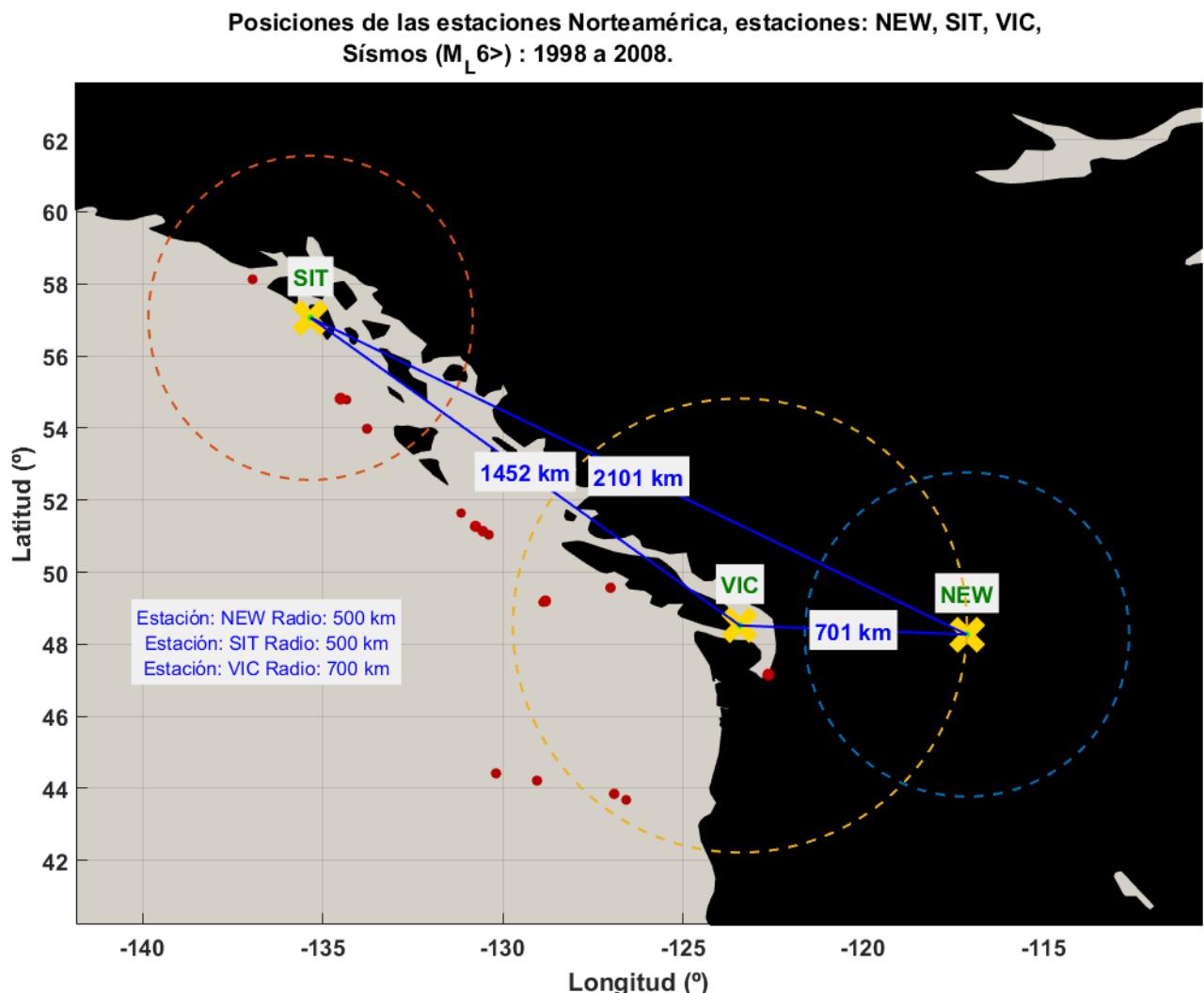
**Figura 4.20:** A la izquierda, se muestra un registro de la señal precursora registrada en las estaciones japonesas 200 días antes de un determinado evento sísmico. Es decir, el evento sísmico estaría localizado en el día 200 y la señal mostrada son los 200 días antes a un determinado evento. La figura derecha muestra un registro de las áreas bajo la curva de las curvas formadas a la izquierda y la magnitud del sismo que se ubica al día 200, esto muestra la función de la densidad de energía almacenada bajo la curva y la magnitud sísmica para el caso Japones.

## 4.3. Norteamérica

Para esta región se utilizaron datos de 1998 al 2007, obtenidos de las estaciones NEW, SIT y VIC, ubicadas en Washington-USA, Isla de Vancouver-Canadá y Sitka-Alaska respectivamente. Dichas estaciones se encuentran a 625, 1790 y 181 kilómetros respectivamente del evento en el que se tratará de detectar una señal precursora a través del procedimiento desarrollado. La localización de cada estación particular en esta región muestra que aunque una de las estaciones (SIT) tiene una diferencia de 1452 kilómetros con respecto a la estación VIC (relativo al evento sísmico), aún se puede lograr una detección de un precursor sísmico usando el hecho de que el estudio de la señal también se hace individualmente, distribución y relación espacial entre estaciones y eventos se muestra en la figura 4.21.

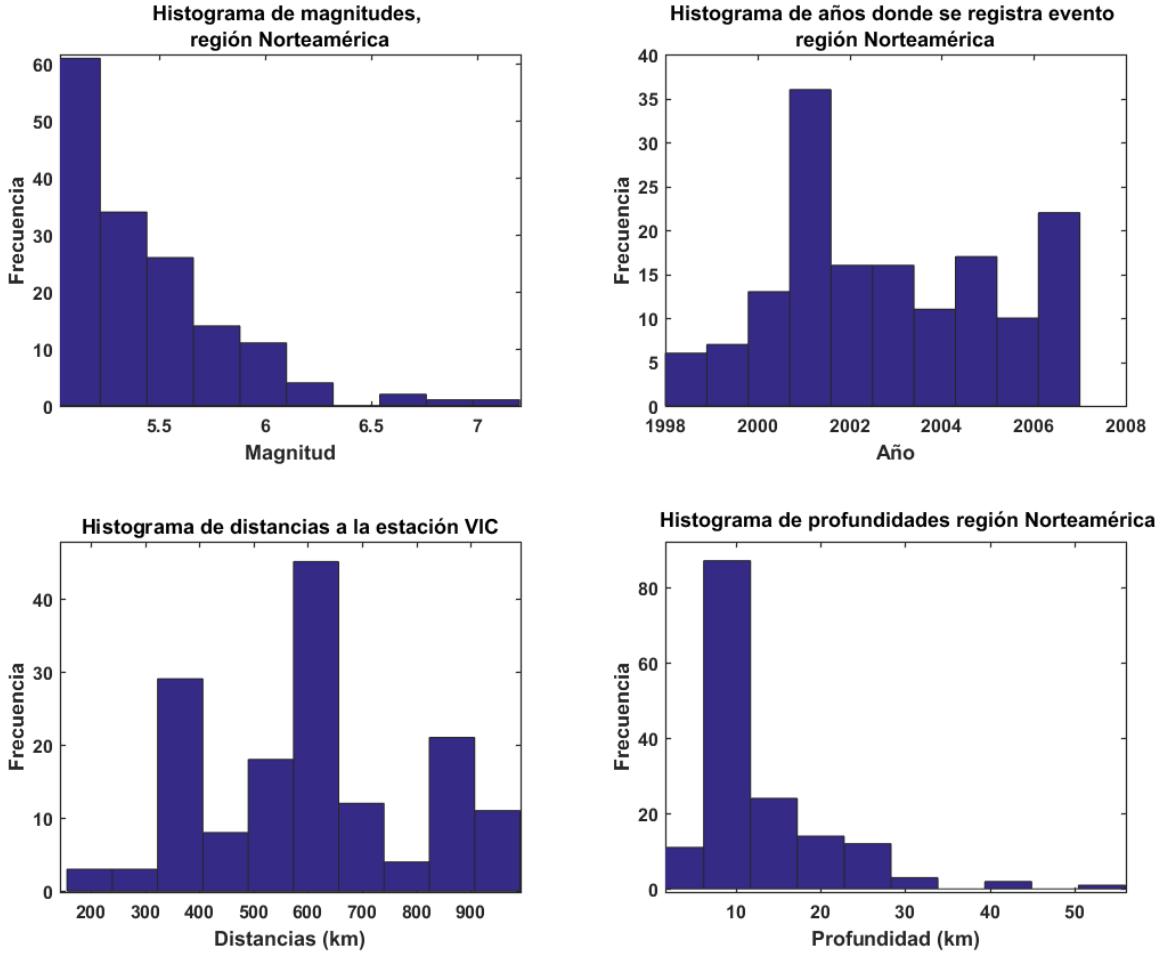
### 4.3.1. Datos de entrada y parámetros del análisis.

Para esta sección, se analizarán las condiciones geográficas de la zona, las consideraciones pertinentes con respecto a la distribución sísmica y la geometría de las estaciones.



**Figura 4.21:** Localización geográfica de la zona, estaciones NEW, SIT y VIC resaltadas para señalar la región de estudio sísmico, las líneas azules representan las distancias entre las estaciones geomagnéticas.

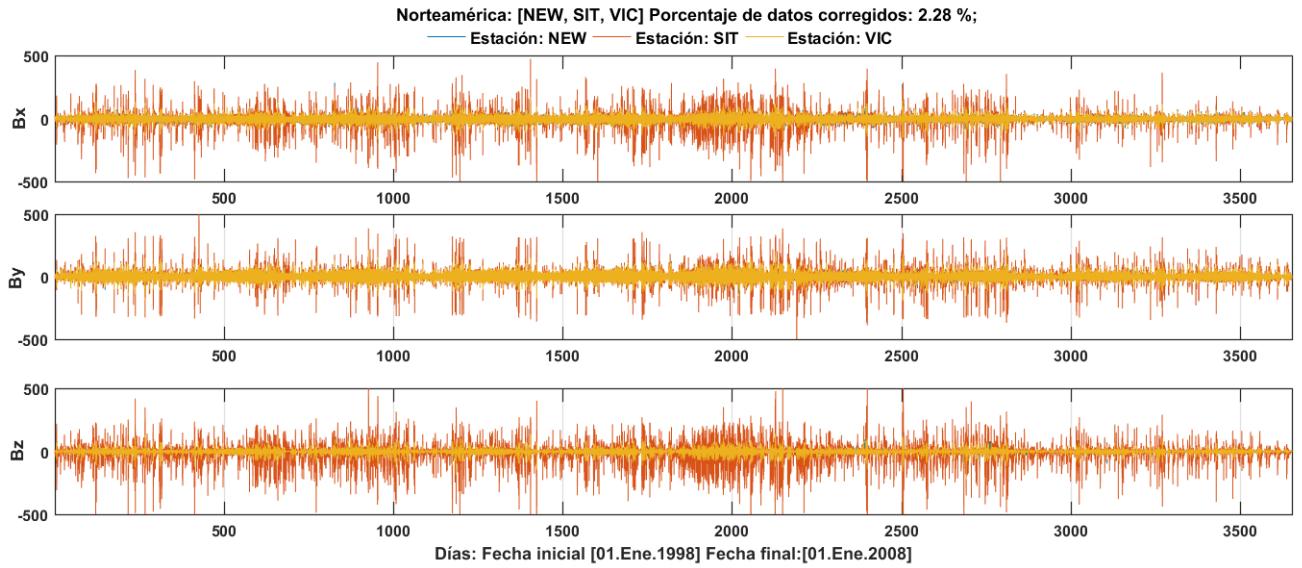
Para el conjunto de estaciones seleccionados en este caso se tomaron en cuenta aquellos terremotos que estaban a una distancia mostrada en la figura 4.21, específicamente entre 500 km y 700 km de la estación VIC y magnitudes mayores o iguales a cinco, uno de los terremotos que se consideró con mayor atención, basado en un criterio que involucra la magnitud y la distancia con respecto a las estaciones geomagnéticas, fue un evento registrado el 28/2/2001 a 176 km de la estación VIC con una magnitud de 6.8M.



**Figura 4.22:** Histogramas de diversos datos sísmicos (Distancias estación-evento, profundidad, año de ocurrencia y magnitud registrada) usados para calibración y producción de la región Norteamericana.

**Acerca de la eliminación de espurios para la región:** El proceso particular de eliminación de espurios de los datos geomagnéticos fue ligeramente diferente a otras regiones. Además de todos los procedimientos descritos en el capítulo 3, varios espurios fueron corregidos manualmente respondiendo a un criterio del experto, esto es necesario debido a que en el tren de datos extraídos de las estaciones NEW, SIT y VIC, había un porcentaje de datos aproximadamente de  $\approx 0,1\%$  con respecto al total que no fue reportado por las estaciones como datos espurios y sin embargo, presentaban valores ( $>15\sigma$ ) la desviación estándar de los datos, este criterio es común en estudios donde se presentan espurios en los datos, en nuestro caso siempre se apuntó a beneficiar la continuidad en el conjunto de datos, sustituyendo manualmente los puntos espurios por la media para aquellos datos que presentaran dicho comportamiento, una muestra de cómo terminó el conjunto de datos antes de aplicar el proceso de normalización se muestra en la figura 4.23. Por otra parte, la zona norteamericana tiene la mayor cantidad de datos que fueron necesarios corregir respecto al

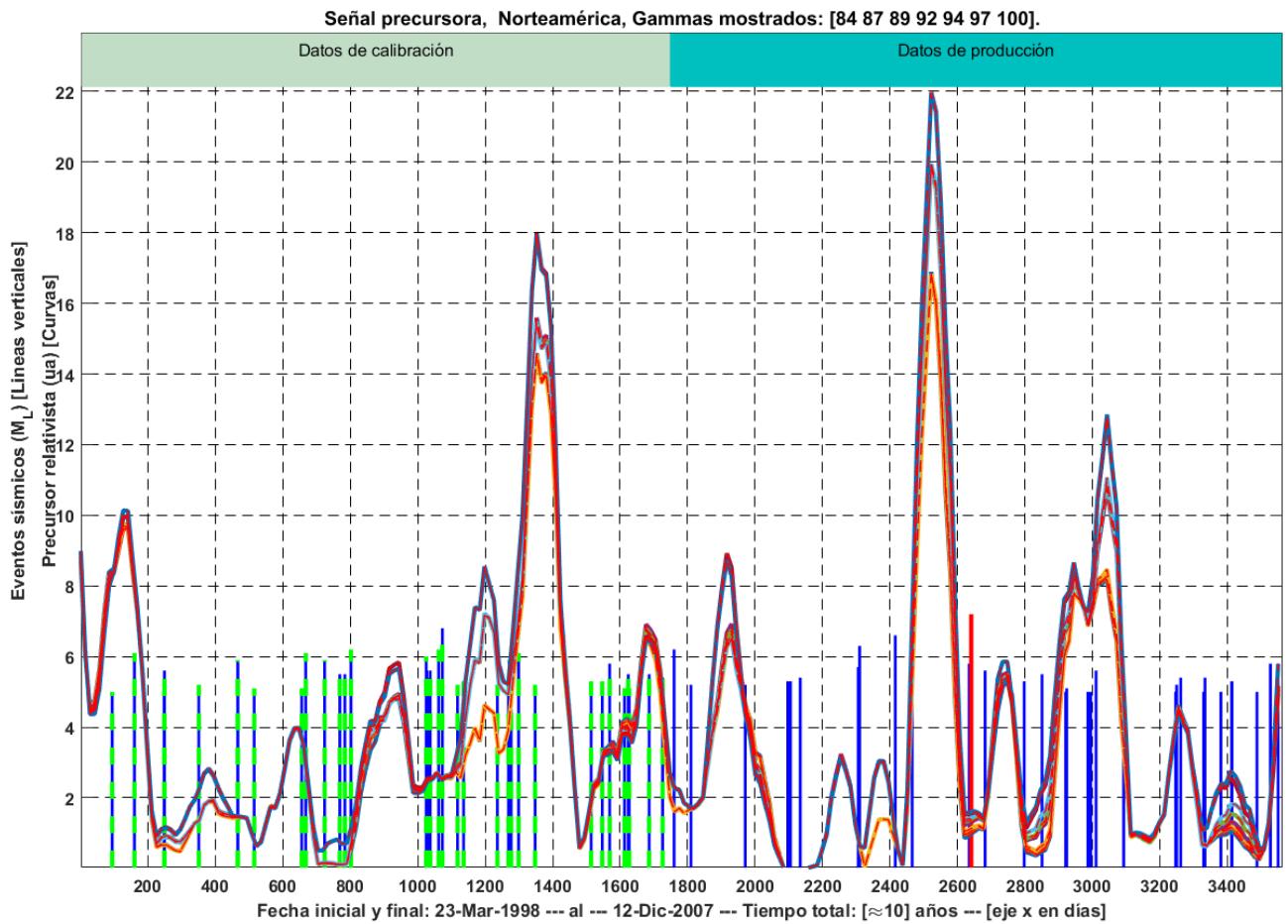
total (2.28 %), esto se mantiene por debajo del (5 %) de datos espurios que pusimos como máximo para marcar una estación como no-candidata a estudio de precursores sísmicos.



**Figura 4.23:** Datos de las estaciones NEW, SIT y VIC, media de cada día llevada a cero, sin normalizar, se observa la distribución de la señal alrededor cero de las tres estaciones junto al porcentaje total de datos corregidos, los datos de Norteamérica son uno de los que presenta mayor cantidad de ruido en toda la investigación, sin embargo, cerca de la media los datos convergen y tienen suficiente consistencia entre las tres estaciones para ser considerados buenos candidatos a estudio.

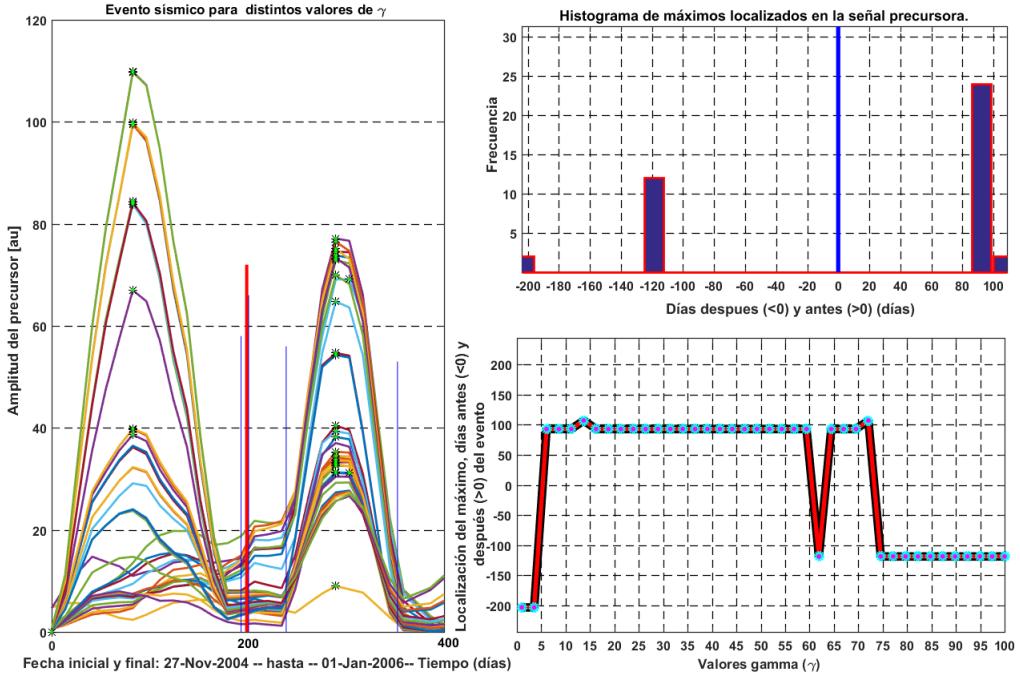
### 4.3.2. Resultados del precursor.

Los parámetros para el análisis de esta región son similares a los usados para la región de Japón: Una ventana de 60 días antes y 60 días después, con ventanas horarias de 1 hora. Usando la media horaria de los campos magnéticos locales para generar la señal precursora y repitiendo el procedimiento para 50 valores discretos y distintos de  $\gamma$ . Filtrando a 20 % la eficiencia mínima horaria para reconstruir la señal, parte de la señal se muestra en la figura 4.24. Es importante recalcar que la figura 4.24 no muestra todos los gammas calculados, sin embargo, los gammas fueron filtrados bajo el criterio de que la desviación es menor que la de los gammas que mostramos en la figura. Para el caso de  $\gamma = 1$  la señal es casi una línea horizontal y no contiene ninguna información que sea relevante para el estudio de precursores sísmicos, la variedad completa de señales se muestra directamente en la figura 4.26. Más relevante aún, es que para el caso Norteamérica, solo las señales asociadas a gammas altos aparecen 100 días antes del evento sísmico (figuras 4.25, 4.26, 4.27, 4.28). La observación de una potencial señal precursora 100 días antes de un sismo importante en la zona, para valores de gammas altos, podría sugerir que el valor gamma esta exaltando estados en el campo geomagnético terrestre asociados a la acumulación de estrés y el proceso algoritmo logra catalogarlo como una anomalía que se presenta antes del terremoto. La calibración y producción mostrada en la figura 4.24, fue con sismos mayores a M5, que como se muestra en la figura 4.22 componen un gran porcentaje del número total de sismos, si solo hubiéramos tomado los sismos mayores a M6, con la misma área alrededor de las estaciones (entre 300 y 500 km), hubiéramos tenido menos de 25 sismos a lo largo del tren de datos, los cuales además, no están uniformemente distribuidos en el tren de datos, arriesgando que el procedimiento sea muy volátil a fluctuaciones no relacionadas a la actividad sísmica. Por el contrario, si aumentamos el radio de selección para que más sismos ( $>M6$ ) ingresen al tren de datos, el error relacionado a encontrar la localización de un sismo sería muy grande.

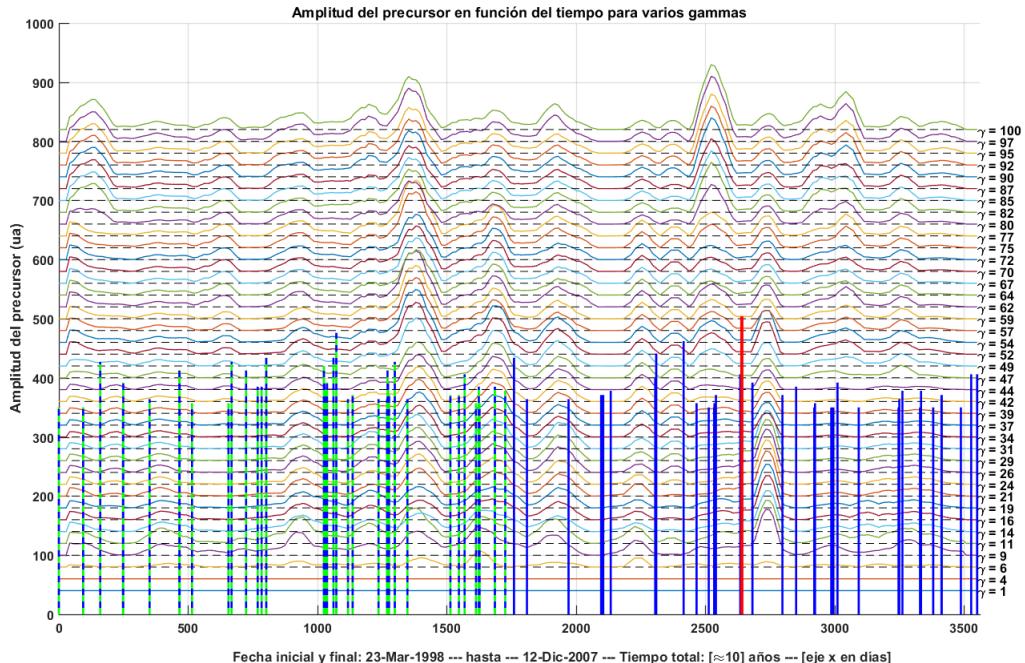


**Figura 4.24:** Señal combinada de las estaciones NEW, SIT y VIC, filtrando solo las señales que estén más lejos de la desviación de todas las señales calculadas. La señal mostrada esta a escala de la magnitud máxima registrada durante el tiempo de estudio. Las líneas verticales azul con verde son los sismos asignados a la calibración del experimento, las líneas azules son los sismos que son asignados para la etapa de producción del algoritmo y la línea roja es el sismo de interés en esta zona.

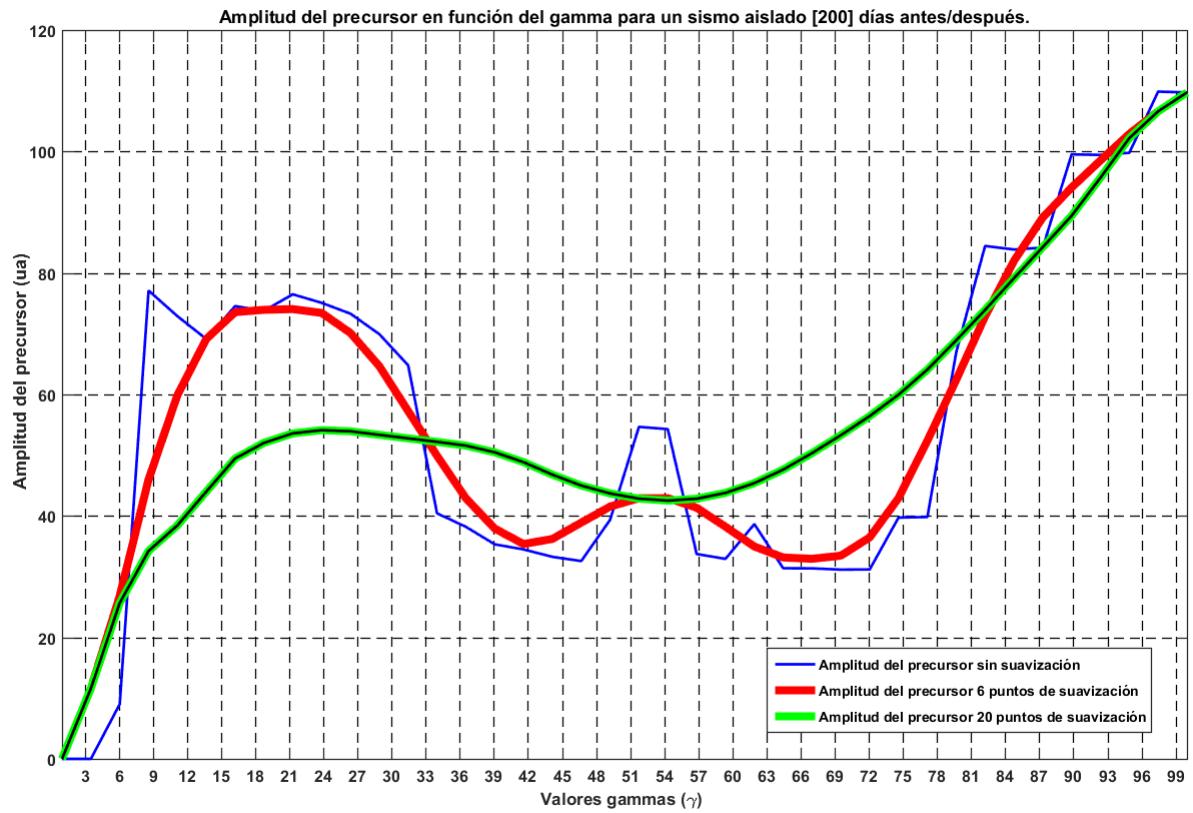
Revisando con detalle los resultados mostrados en la figura 4.24, se debe decir que la zona esta llena de sismos de magnitudes  $< M5.5$ , con los radios de selección que se eligieron, se habla de más de 2 o 3 sismos  $< M5.5$  a la semana, esto dificulta establecer una relación clara entre el comportamiento del precursor y los eventos sísmicos importantes de la zona. Si nos centramos en los 200 días antes y después del evento sísmico insignia de esta zona (figura 4.25), observaríamos un claro máximo global de la señal 100 días antes para los gammas más altos calculados ( $\gamma > 75$ ) dentro de los períodos de tiempo usados, estudiando la relación entre la amplitud de la señal precursora en función del gamma durante los 200 días antes y después del evento sísmico, tendríamos los resultados mostrados en la figura 4.27, estos resultados, acompañados de los resultados generales mostrados en al figura 4.25 sugiere que la anomalía solo se muestra para gammas altos ( $\gamma > 80$ ) lo cual podría indicar que los gammas están exaltando cierto conjunto de señales electromagnéticas que podrían estar asociadas a fenómenos físicos que experimenta la zona antes del evento sísmico. Dicha anomalía hubiera sido difícil distinguirla usando los métodos tradicionales en un sistema de referencia S fijo, esto se muestra viendo como para gammas igual a uno, la señal precursora no tiene ninguna amplitud, esto se ve con detalle en la figura 4.26 donde la señal solo empieza a surgir para gammas mayores a ( $\gamma > 9$ ).



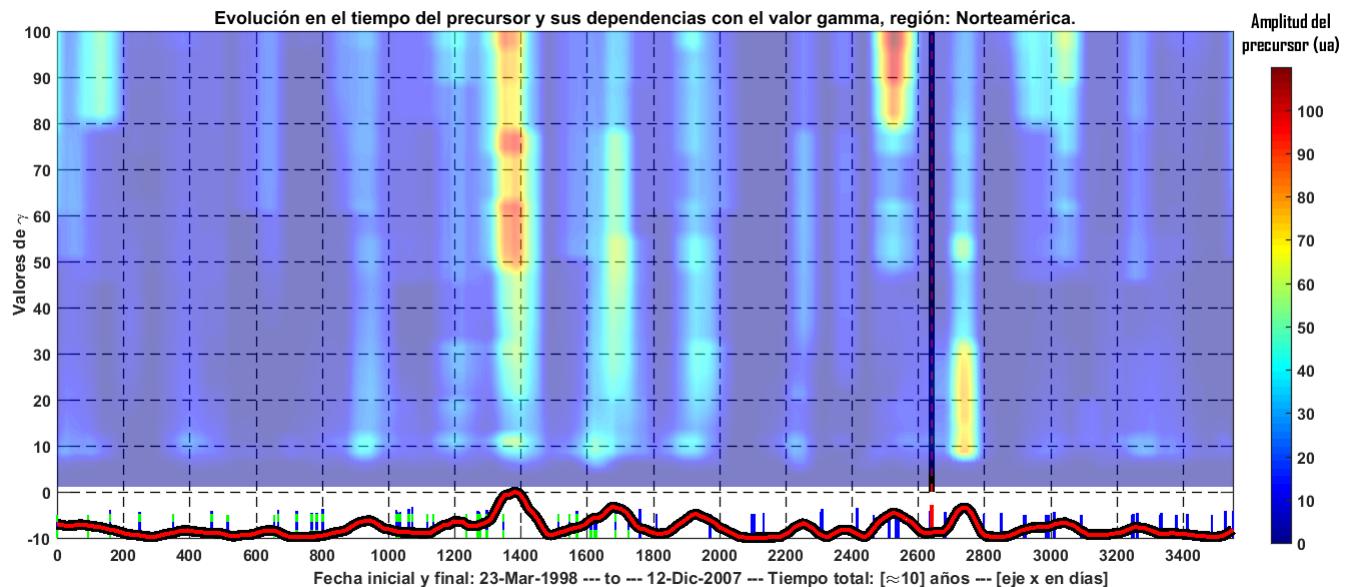
**Figura 4.25:** Señal de las estaciones NEW, SIT y VIC aislando los 200 días antes y después al evento sísmico marcado en rojo (6.8M). A la izquierda, curvas de colores muestran las varias señales precursoras calculadas, cada una depende de un gamma distinto, que llegan a un máximo (puntos verdes) entre 120 días antes del evento sísmico dentro de la ventana de tiempo mostrada, arriba a la derecha se muestra un histograma de cuando se registra el máximo de cada señal, mientras que abajo a la derecha se muestra la relación entre la variable gamma y el máximo de la señal en esta ventana de tiempo.



**Figura 4.26:** Señal de las estaciones NEW, SIT y VIC, para todos los gammas calculados, cada curva representa una señal asociada a un gamma mostrado en los bordes de la gráfica a la derecha. Líneas verticales azules con verde representan sismos asignados a la calibración, mientras que las líneas verticales azules representan los sismos asignados a la producción. Línea vertical roja es el sismo de estudio en la figura 4.25.



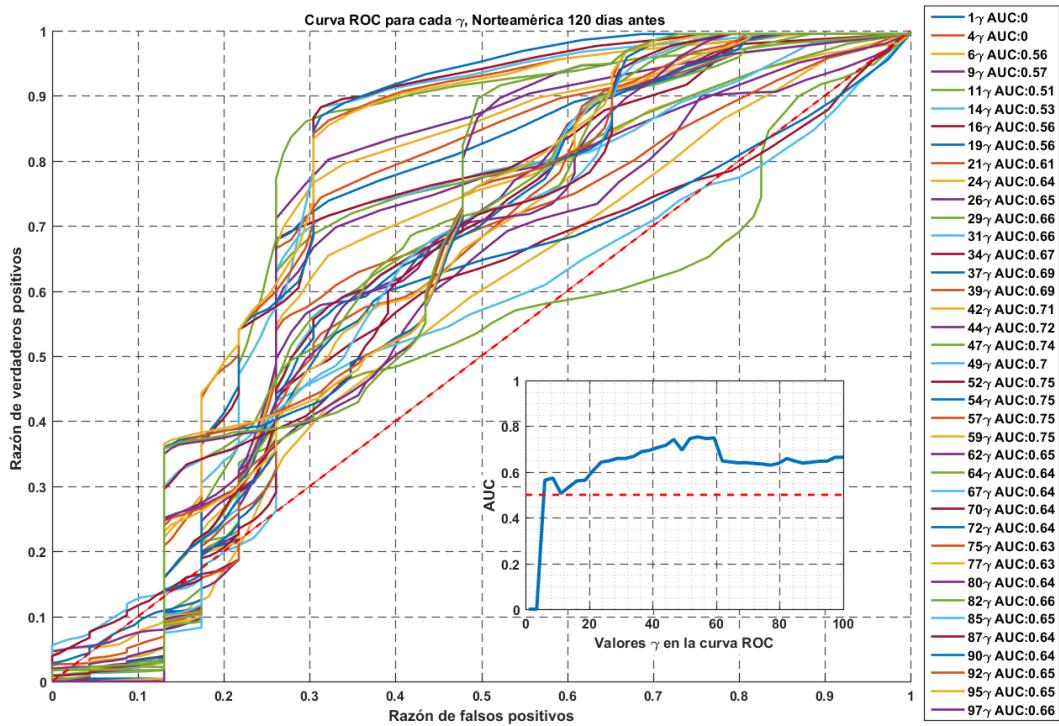
**Figura 4.27:** Amplitud de la señal en función del valor de gamma calculados estaciones NEW, SIT y VIC para el evento central mostrado en la figura 4.25 con una suavización a la media sin puntos, con 6 puntos y con 20 puntos.



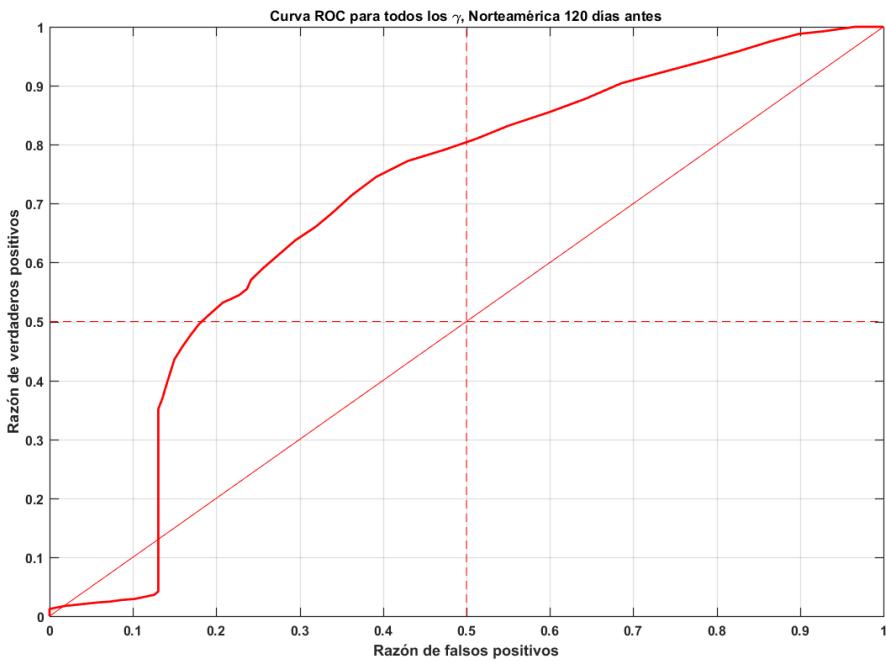
**Figura 4.28:** Representación multidimensional de la señal obtenida para Norteamérica, la curva roja (en la sección inferior de la gráfica) es la suma de las señales obtenidas en todos los gammas, mientras que los colores en el mapa muestran la intensidad relativa respecto a todo el tren de datos, la línea vertical roja muestra la localización temporal del evento a estudiar (6.8M), las líneas verticales azul con verde representan los sismos usados para la calibración y las líneas azules representan los sismos usados para la producción en el algoritmo.

### 4.3.3. Curva ROC y otros resultados estadísticos

Luego de los resultados obtenidos, se procede a realizar los procedimientos descritos en el capítulo 3 para el análisis de resultados. Si se consideran 120 días antes como una ventana de tiempo estándar para esta investigación, se obtienen los resultados mostrados en la figura 4.29, con resultados generalmente positivos que están entre 0.6 y 0.8 AUC dependiendo del gamma.



(a) Curva ROC para cada gamma calculado.



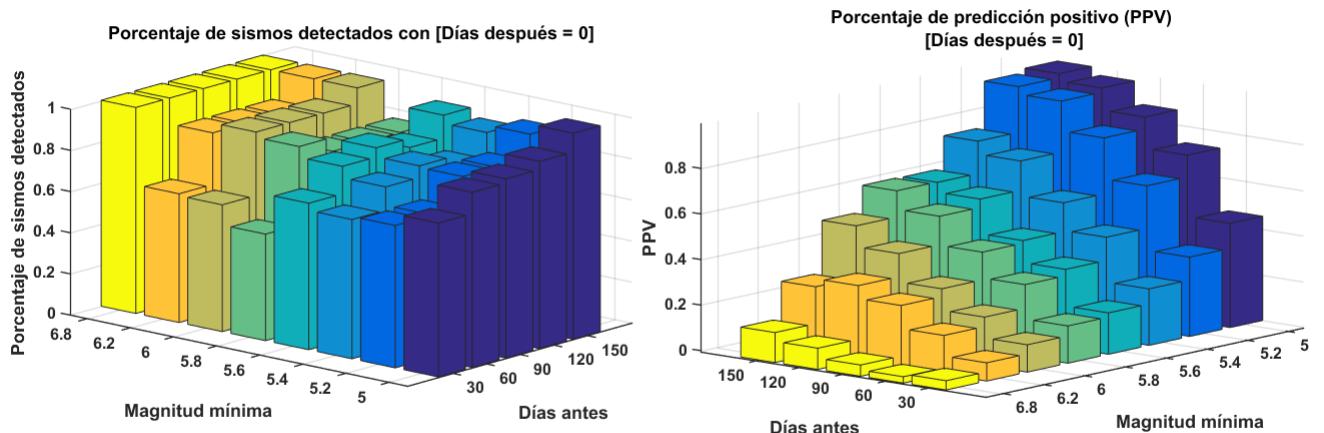
(b) Curva ROC para todos los gammas calculados.

**Figura 4.29:** Curva ROC para el resultado Norteamericano y su respectivo índice AUC asociado.

**Comentario sobre las curvas ROC:** Las figuras mostradas en 4.29 (a), reafirman que para gammas bajos ( $1\gamma - 20\gamma$ ), las curvas en general no tienen la capacidad de distinguir cuando un evento sísmico está por pasar. Esto también se ve reflejado por los índices AUC que dichas curvas tienen, se mantienen entre 0.5 y 0.6 AUC, para gammas intermedios ( $20\gamma - 60\gamma$ ), los índice AUC se ubican entre 0.65 y 0.73 AUC, estos índices son los mejores de todo el conjunto y si evaluamos las curvas individuales ( $49\gamma$ ) se observan que ciertos umbrales ( $1\sigma$ ) tienen 1 en la sensibilidad y 0.7 en su especificidad. Por otro lado, estudiando todas las señales en conjunto para la figura 4.29 (b), se muestra que la combinación de señales es una manera viable de tener una señal capaz de discriminar correctamente la actividad sísmica.

**Cuadro 4.3:** Relaciones entre la magnitud, el gamma y el umbral de discriminación (en desviaciones estándar) encontradas en los resultados de Norteamérica.

Días antes	Magnitud mínima			
	5.2	5.8	6	
30 Días antes	$9\gamma$	$1\sigma$	$18\gamma$	$1\sigma$
60 Días antes	$14\gamma$	$1\sigma$	$24\gamma$	$1.1\sigma$
90 Días antes	$13\gamma$	$0.8\sigma$	$18\gamma$	$1\sigma$
120 Días antes	$14\gamma$	$1\sigma$	$18\gamma$	$1\sigma$
150 Días antes	$18\gamma$	$0.8\sigma$	$18\gamma$	$1\sigma$
Media:	<b><math>13.6\gamma</math></b>	<b><math>0.9\sigma</math></b>	<b><math>19.2\gamma</math></b>	<b><math>1.0\sigma</math></b>
				<b><math>23.0\gamma</math></b>
				<b><math>2.3\sigma</math></b>



**Figura 4.30:** A la derecha, índice positivo de predicción para las estaciones Norteamericanas, iterando sobre la magnitud mínima que accede al cálculo del ROC y los días antes para posteriormente calcular el índice PPV. A la izquierda se muestra el total de sismos detectados con el procedimiento para distintos días antes e iterando sobre distintas magnitudes.

**Comentario sobre la figura 4.30** Se procede a filtrar progresivamente la magnitud de los sismos que son analizados por los procedimientos descritos anteriormente, buscando un umbral óptimo de discriminación para cada conjunto de resultados mostrados en la figura 4.30. Para estas figuras, se destaca:

- Para magnitudes mínimas a 5.8M y 150 días antes al evento, se tiene 63 % PPV, representan un 82 % del total de sismos en el tren de datos.

- Para magnitudes mayores a 5M, para 90 días antes, se tiene cerca del 86 % PPV, que representan un 87 % del total de sismos en el tren de datos.

Si se considera uno de los umbrales óptimos encontrados en el análisis con la curva ROC, podemos comparar la eficiencia de un precursor generado aleatoriamente bajo la misma distribución sísmica, esto se muestra en la figura 4.31, donde se aprecia que solo ciertos gammas son más eficientes que un precursor aleatorio, mientras que los demás son demasiado parecidos para ser considerados buenos candidatos a precursores fiables.

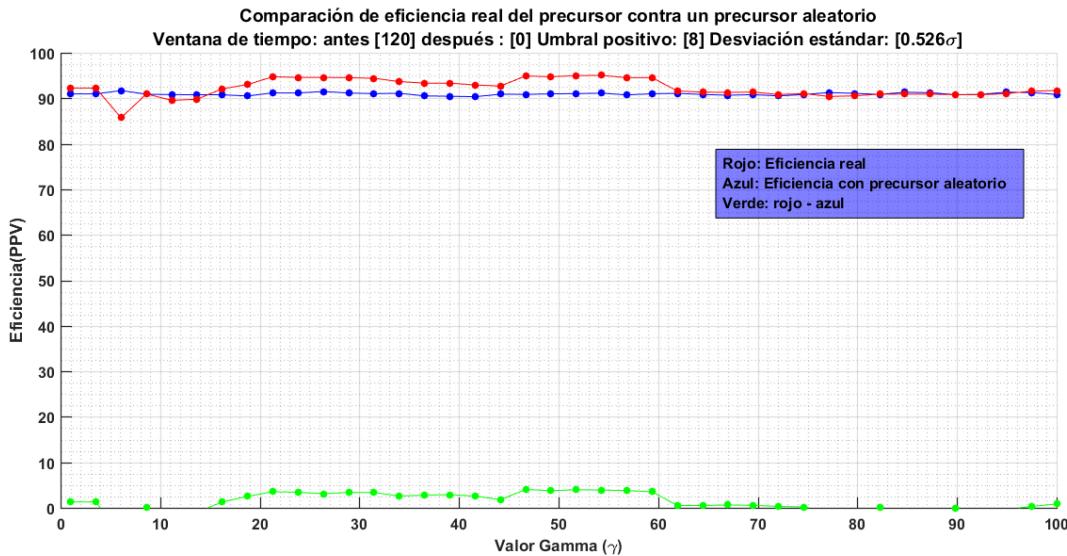


Figura 4.31: Comparación de precursor real y un precursor aleatorio para la región Norteamericana.

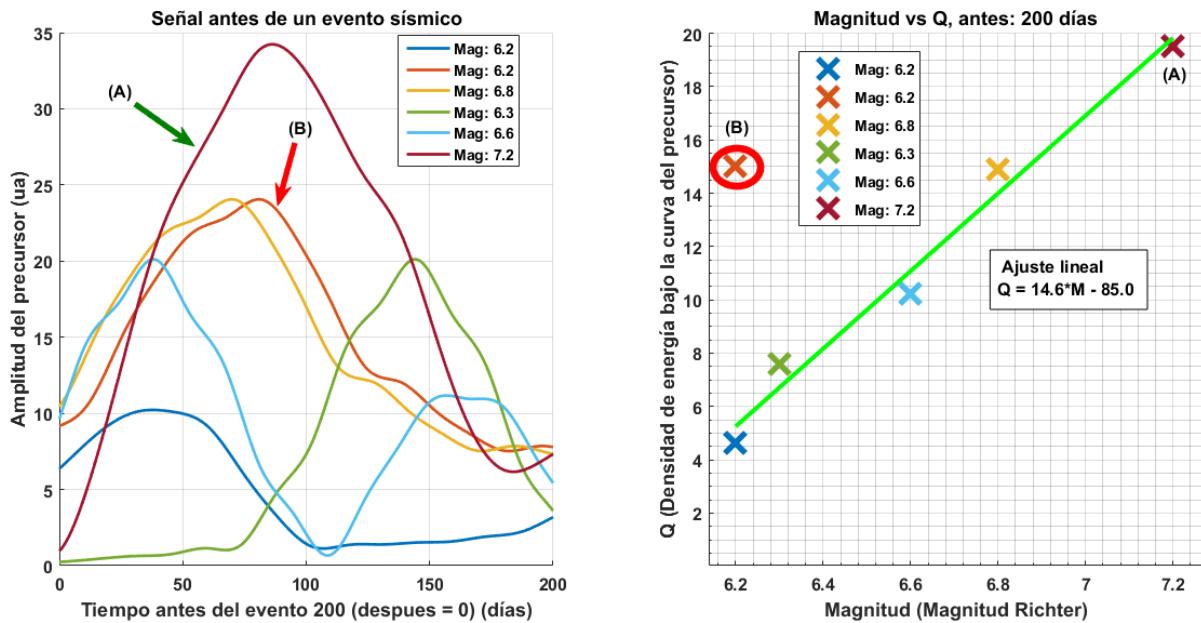


Figura 4.32: A la izquierda, se muestra un registro de la señal precursora registrada en las estaciones Norteamericanas 200 días antes de un determinado evento sísmico. La figura derecha muestra un registro del área bajo la curva acumulado bajo las figuras de la izquierda.

Se debe interpretar con cautela los resultados de la figura 4.31, ya que solo toma en cuenta un umbral y la optimización de umbrales se hace para un gamma en particular, resultando en dejar

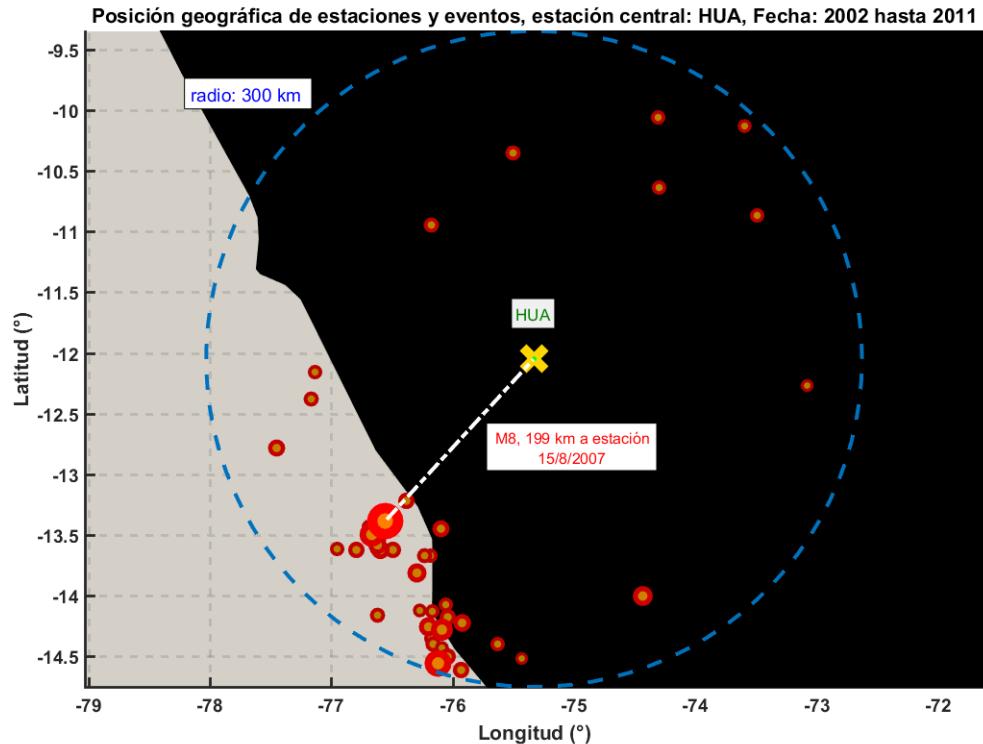
por fuera muchos factores importantes en la optimización del problema (distribución de sismos, filtrado de magnitudes, etc). Por último, se calcula la relación entre la magnitud y la cantidad  $Q$ , la cual se muestra en la figura 4.32, se encuentra entonces la relación esperada entre las cantidades para los sismos mayores a M6.2.

## 4.4. Perú.

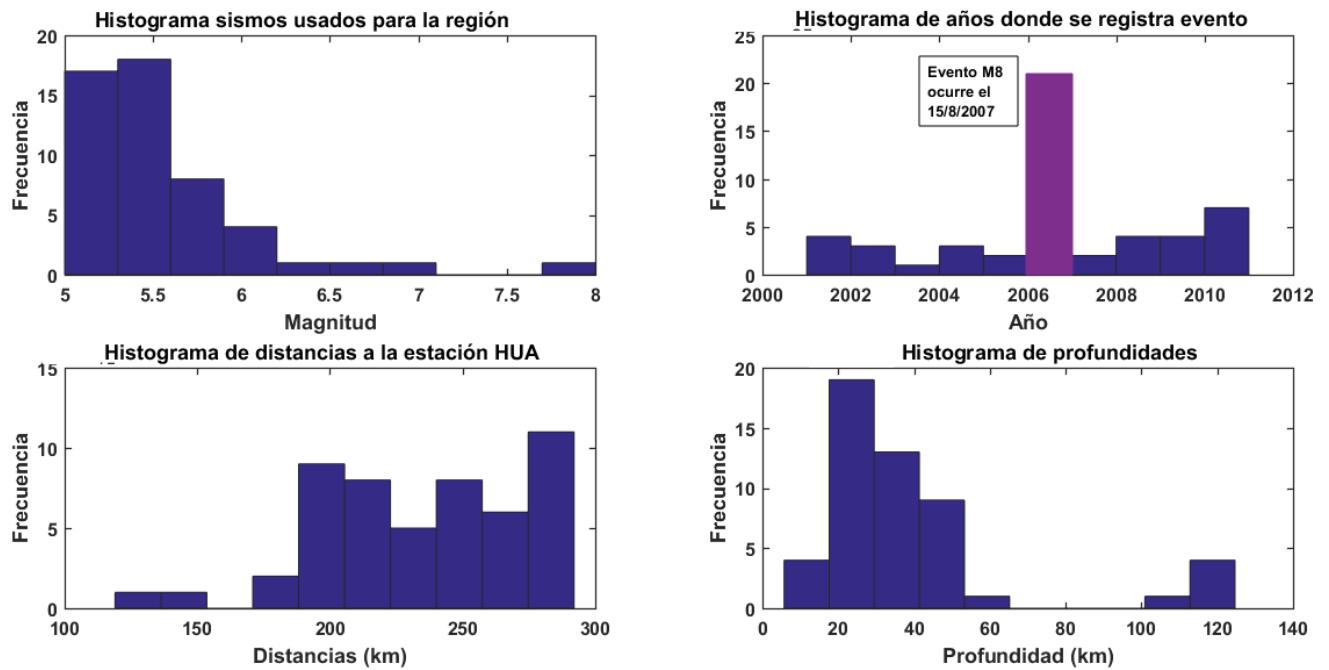
Para esta región se utilizaron datos de 2002 al 2011, obtenido de la estación geomagnética HUA ubicada en Perú-Lima. El Perú es uno de los países de mayor potencial sísmico debido a que forma parte del denominado Cinturón de Fuego del Pacífico. Las placas de Nazca y Sudamericana convergen y desarrollan el proceso de subducción mediante el cual, la placa oceánica de Nazca se introduce por debajo de la continental o Sudamericana. Este proceso es el causante de la geodinámica activa del país y por ende, de una importante actividad sísmica.

### 4.4.1. Datos de entrada y parámetros del análisis.

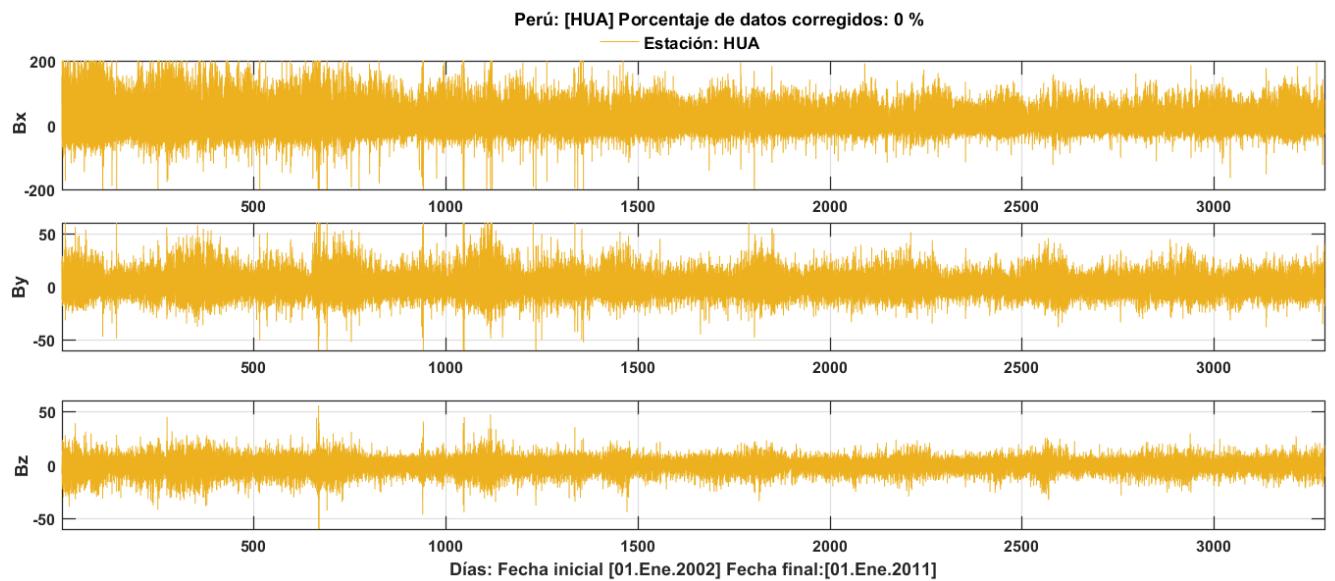
La zona próxima a la estación peruana (HUA) se muestra en la figura 4.33, tomando 300 km alrededor a la estación. Los datos de la estación geomagnética se muestran en la figura 4.35, los datos no presentaron ningún espurio, por lo tanto, los procedimientos asociados a la corrección de los mismos no fueron necesarios.



**Figura 4.33:** Mapa de la región de estudio Perú, durante los años que van del 2002 hasta el 2011, círculos rojos muestran localización de los sismos, con magnitud mínima mostrada 5M, estación geomagnética con cruz amarilla en el centro (HUA), circunferencia de 300 km con línea punteada azul.



**Figura 4.34:** Histograma de cantidades importantes relacionadas a los sismos en la base de datos usada para Perú.

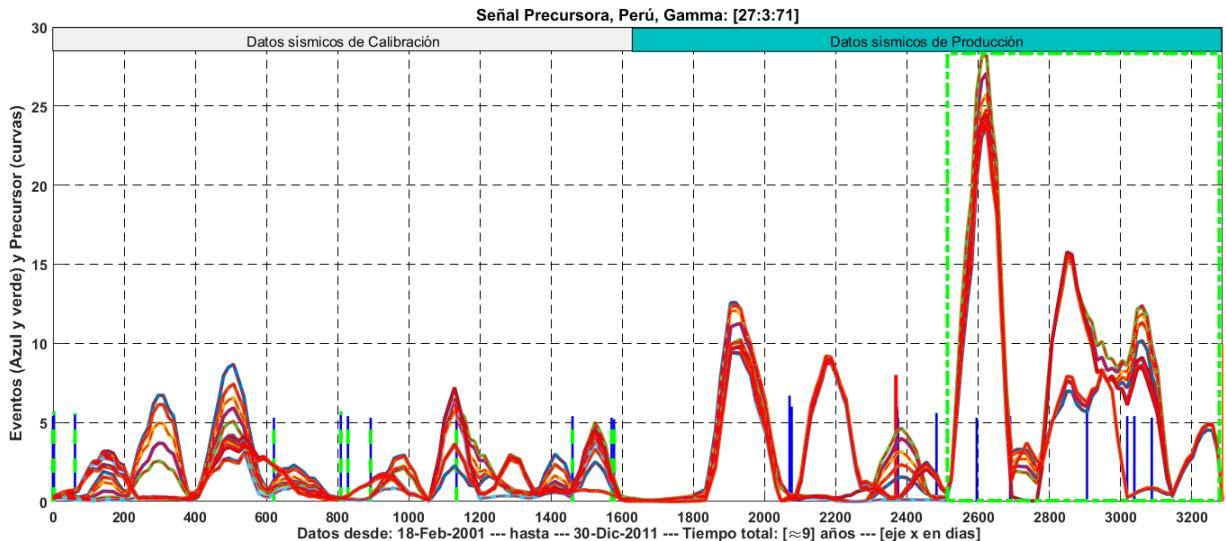


**Figura 4.35:** Datos de la estación geomagnética HUA, media de cada día llevada a cero, sin normalizar para cada componente.

#### 4.4.2. Resultados del precursor.

Ajustando los parámetros y alimentando al algoritmo de los datos previamente preparados, se ajustó la ventana a 60 días antes y 60 días después, con ventanas horarias de 1 hora, adicionalmente y de manera particular para esta región, se consideró un umbral más bajo de activación a la mitad del resto de las estaciones que se manejan durante esta investigación. Esto último ya que la cantidad de datos que ingresan al algoritmo cuando se trabaja con umbrales mayores era muy bajo para tener resultados convincentes sobre las activaciones por zona horaria. El resultado se muestra

en la figura 4.36 y junto a los histogramas 4.34 muestran el potencial problema de realizar el procedimiento con solo una estación geomagnética: Si bien el estudio individual de una estación geomagnética ofrece la posibilidad de estudiar solo las proximidades inmediatas a dicha estación ( $r_o < 300$  km) y por lo tanto, se asume una mayor probabilidad de detectar anomalías geomagnéticas antes de un terremoto que se este preparando en las inmediaciones de dicha estación al no tener otras estaciones, es difícil determinar si la señal precursora pertenece a una anomalía local debido a un evento sísmico o ruido electromagnético no correlacionado con el evento. En consecuencia, se debe tener en cuenta esta dificultad en las regiones donde solo una estación esté disponible para estudiar el precursor sísmico, aún encontrando evidencia de alguna anomalía antes de un terremoto importante, esta evidencia solo creemos será significativa si se encuentran múltiples estaciones individuales en las que se encuentren múltiples anomalías en el precursor antes de un terremoto en diferentes partes del mundo.

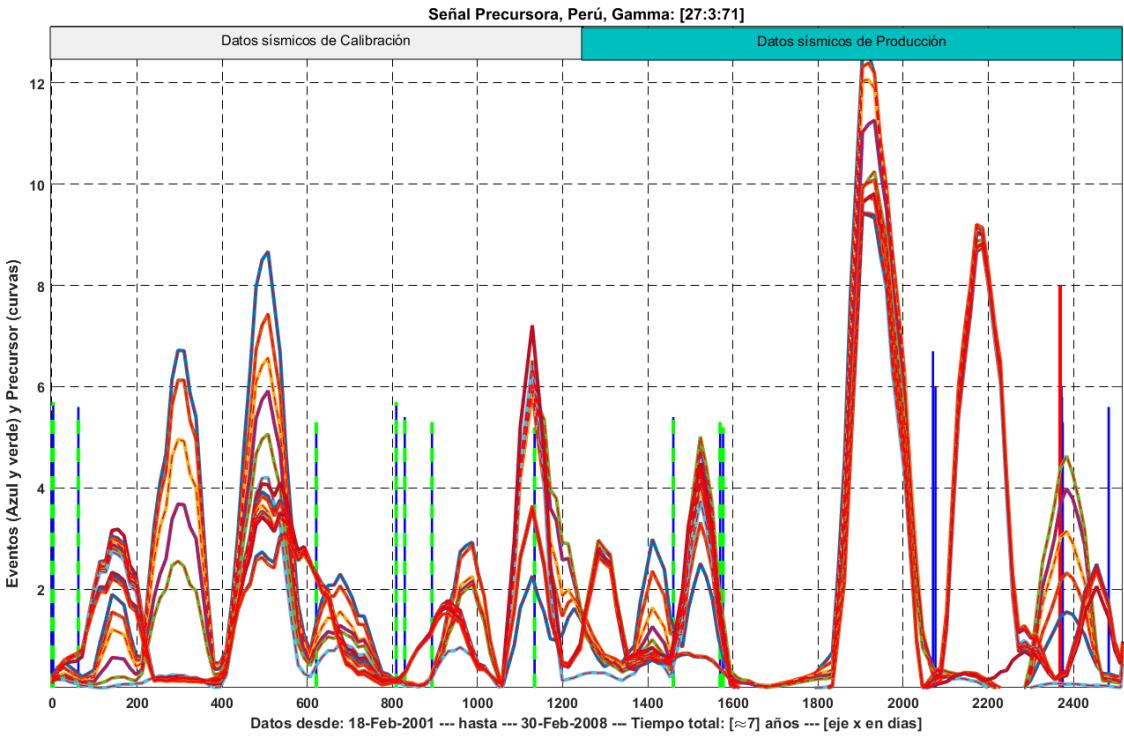


**Figura 4.36:** Señal resultante del estudio de la estación HUA. La señal está a escalada para facilitar la visualización. Las líneas azules con verde son los sismos asignados a la calibración del experimento, las líneas azules son los sismos que fueron asignados para la etapa de producción del algoritmo y la línea roja vertical es el sismo de interés en esta zona. Adicionalmente, el cuadro rojo representa una zona donde el precursor se comporta de manera irregular, mientras que el cuadro azul se muestra en la figura 4.37.

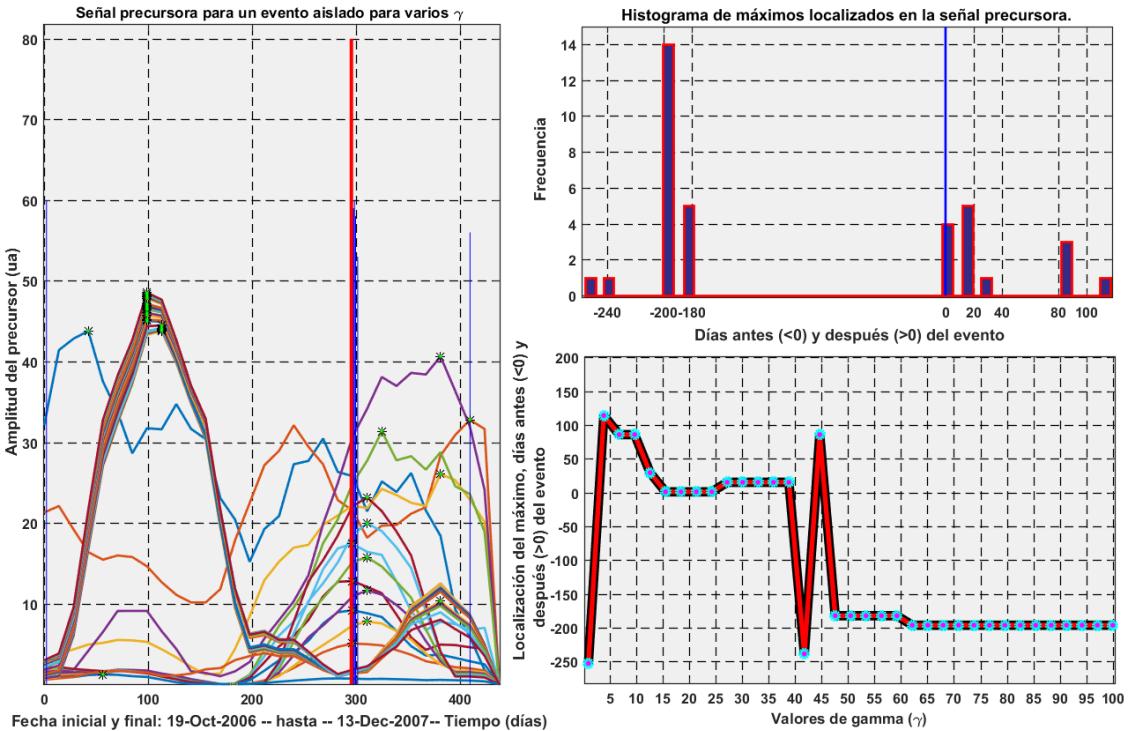
**¿Cómo calibras una medición para un sismo de magnitud M8 a partir de sismos  $M < 6M$ , y además, con menos de 30 de ellos distribuidos a lo largo de apenas 4 o 5 años?** Como se ve en la figura 4.36, es evidente que la amplitud de la señal no es consistente con la magnitud de los sismos de la zona, esto podría deberse a una serie de factores como:

- La calibración no se realizó con suficientes sismos
- Los datos proporcionados por solo una estación geomagnética no tienen otras estaciones para comparar el origen de la señal.

Sin otras estaciones adyacentes que modulen y contrasten estas señales, el método es propenso a este tipo de error. La figura 4.37 muestra solo una parte de los resultados, que muestran una mayor relación entre la amplitud del precursor y el evento sísmico registrado cercano a la estación.



**Figura 4.37:** Cuadro azul mostrado en la figura 4.37 de lo que se considera el comportamiento más regular de la señal precursora para la región de Perú (HUA).



**Figura 4.38:** Señal precursora relativista de la estación HUA, aislando unos 300 días antes y 120 días después del sismo de 8M (marcado como línea vertical roja). A la izquierda, curvas de colores muestran las varias señales calculadas, cada una depende de un gamma distinto y sus máximos son marcados por puntos verdes dentro de la ventana de tiempo mostrada, arriba a la derecha se muestra un histograma de cuando se registra dicho máximo, abajo a la derecha se muestra la relación entre la variable gamma y el máximo de la señal en la ventana de tiempo.

Por otra parte, en la figura 4.38, si estudiamos una ventana de tiempo reducida pero próxima al evento sísmico 8M se observa que la mayoría de los conteos a los máximos ubicados en los 200 días antes.

#### 4.4.3. Curva ROC y otros resultados estadísticos

Se analizarán los resultados de Perú mostrados en la figura 4.36, usando todos los intervalos horarios disponibles para conseguir una estadística más significativa en el contexto de una sola estación, además, teniendo en cuenta la distribución temporal de los sismos (con hasta 200 días entre algunos sismos importantes), usando incluso la fase de producción que se determinó como -no ideal-. En las figuras 4.39 se muestran diferentes curvas ROC para el caso Perú tomando 30, 60, 90 y 120 días antes de los eventos sísmicos.

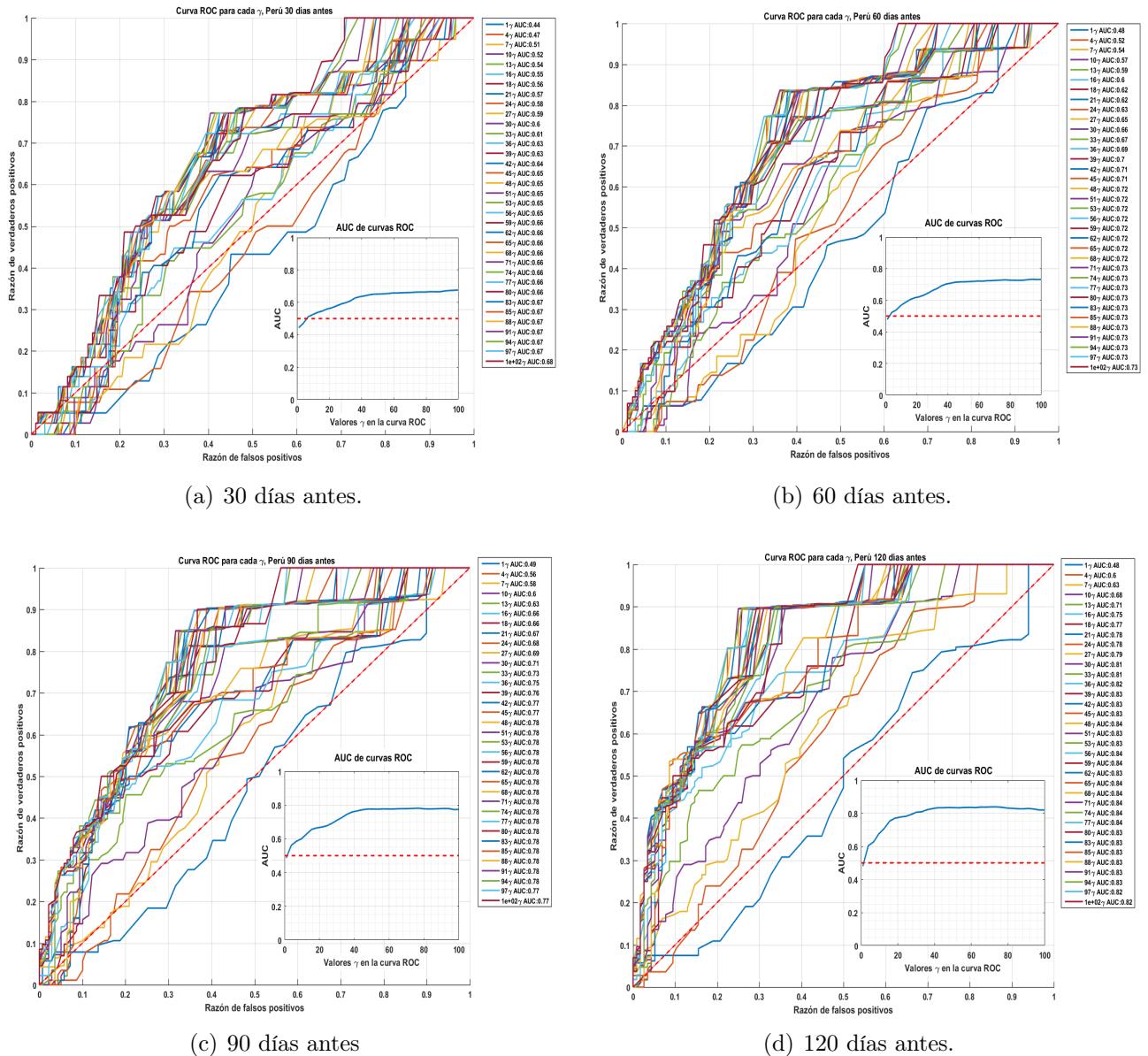
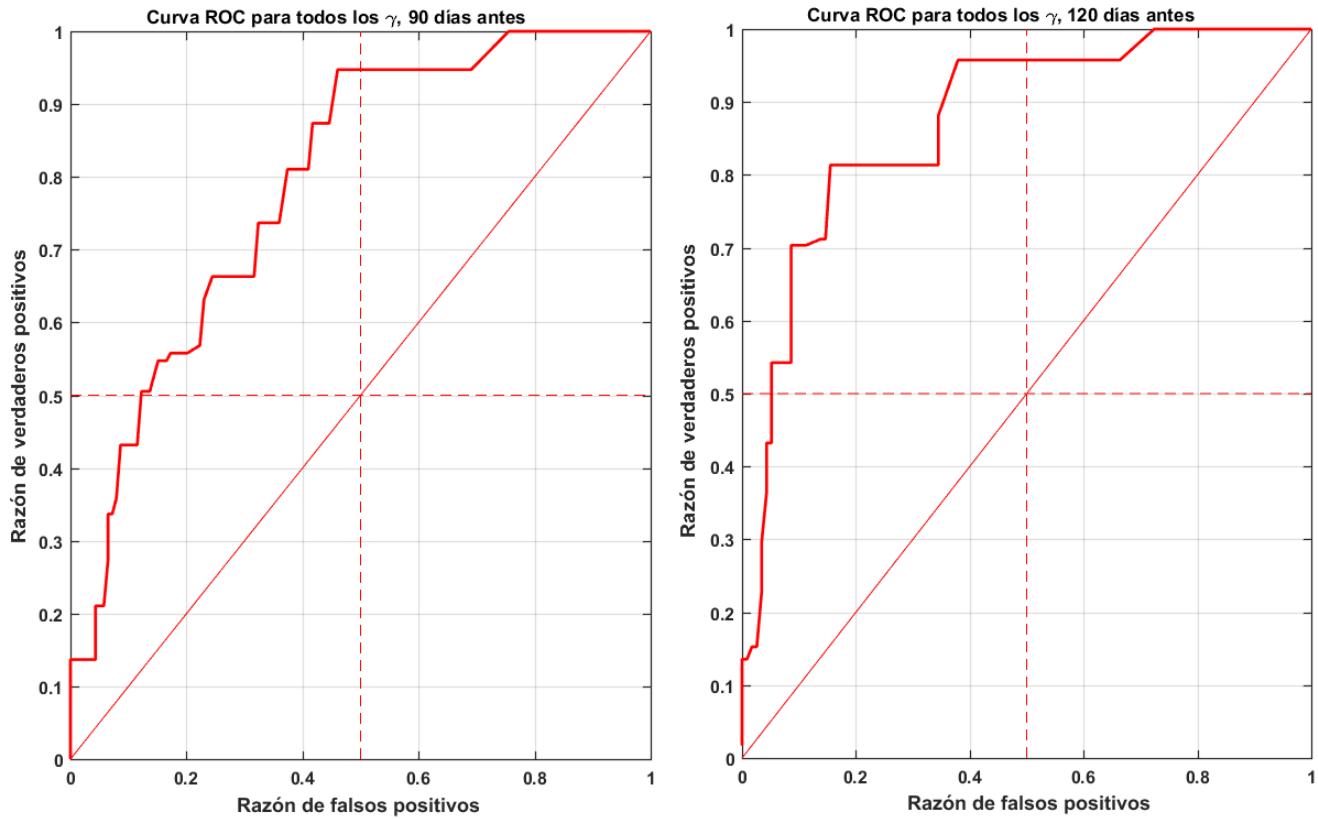


Figura 4.39: Curvas ROC para el caso Perú con 30, 60, 90 y 120 días antes.

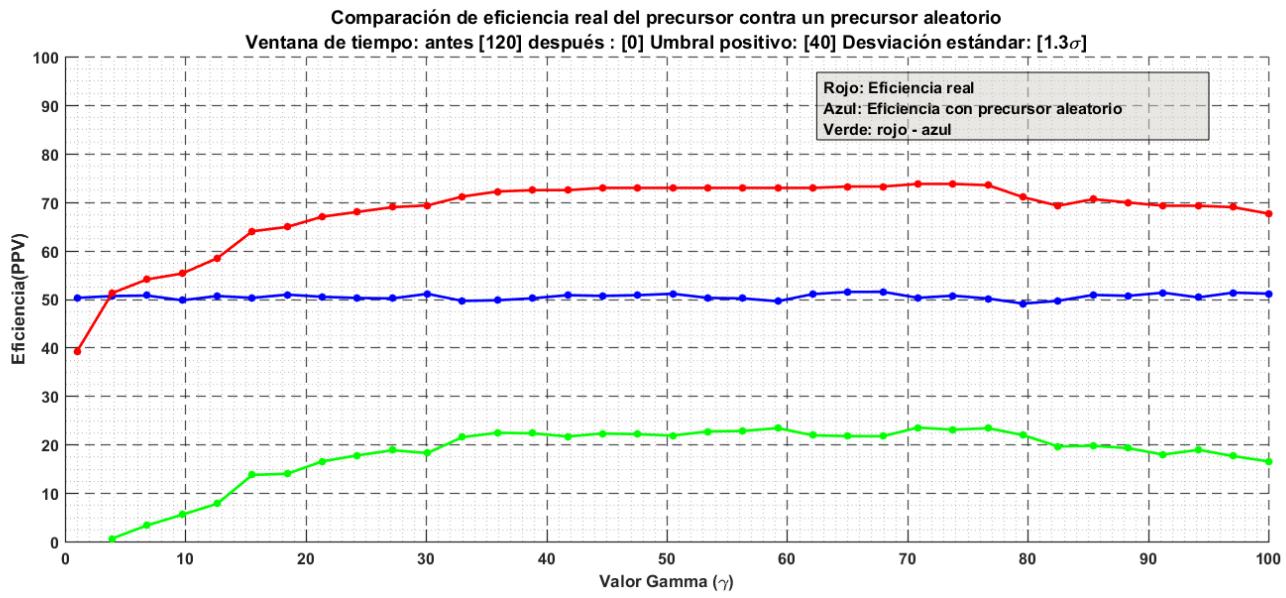


**Figura 4.40:** Curvas ROC para todos los gammas en el caso peruano, con 90 y 120 días antes de ventana de tiempo.

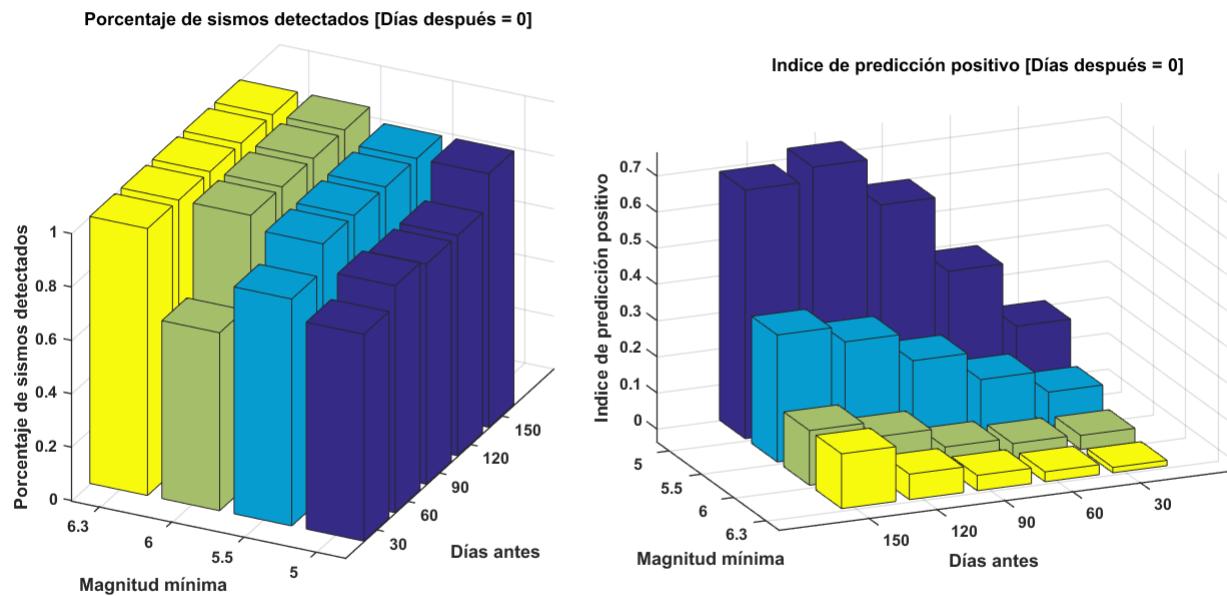
**Comentario sobre las curvas ROC de Perú:** De los resultados observados en las figuras 4.39 y 4.40, se destaca lo siguiente:

- Para los casos de 30 días antes, los resultados presentan máximos de hasta 0.67 AUC, la señal no es significativamente distinta de un precursor aleatorio para ventanas tan pequeñas de tiempo.
- Para 60 días antes, se comienzan a observar algunos gammas en particular que lo hacen mejor que otros, pero apenas llegando a 0.73 AUC.
- Para el caso de 90 y 120 días, cercano a los valores de gamma 36, 42 y 45 empiezan a superar el umbral de los 0.78 AUC.
- Para todas las ventanas de tiempo estudiadas, el indice AUC más bajo se registra para valores gammas cercanos  $\gamma = 1$ .

Con el estudio de distintos umbrales y gammas mostrados en la figura 4.39 y 4.40 , se procede a verificar el resultado al compararlo con la eficiencia de un precursor que es generado aleatoriamente, dicha comparación se muestra en la figura 4.41. Estos resultados son los esperados luego de ver los resultados de las curvas ROC anteriores, donde los gammas más bajos tienen una eficiencia similar o peor que el precursor aleatorio, pero para gammas superiores la diferencia se hace gradualmente más grande llegando hasta un 24 % de diferencia entre los dos.



**Figura 4.41:** Comparación de precursor real y un precursor aleatorio para una ventana de 120 días antes en la región adyacente a la estación HUA.



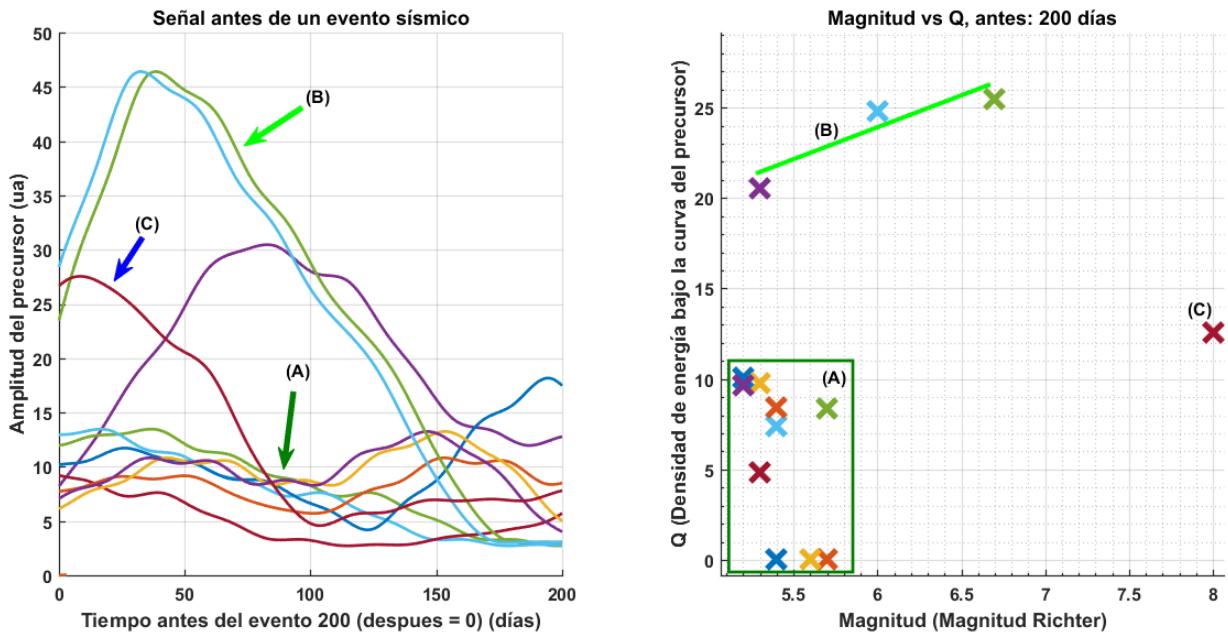
**Figura 4.42:** A la derecha, índice positivo de predicción relacionado al estudio del precursor para un umbral de discriminación óptimo para la estación peruana (HUA), iterando sobre la magnitud mínima y los días antes. A la izquierda se muestra el porcentaje de sismos detectados con el mismo tipo de procedimiento.

En la tabla 4.4, se muestran los gammas óptimos de medición, junto con el umbral asociado a esa medición, los índices PPV y la cantidad de sismos detectados con esos parámetros se muestran en

la figura 4.42, donde se destaca que el precursor no parece tener ninguna combinación que parezca buena para tener predicciones consistentes.

**Cuadro 4.4:** Tabla de resultados de las barras Perú, filtrando por magnitud y dando el umbral y gamma óptimo de la medición.

Días antes	Magnitud mínima			
	5	6	7	
30 Días antes	$2\gamma$	$1\sigma$	$12\gamma$	$0.8\sigma$
60 Días antes	$2\gamma$	$1\sigma$	$12\gamma$	$0.9\sigma$
90 Días antes	$12\gamma$	$0.8\sigma$	$12\gamma$	$1\sigma$
120 Días antes	$12\gamma$	$0.8\sigma$	$12\gamma$	$1\sigma$
150 Días antes	$3\gamma$	$1\sigma$	$23\gamma$	$1.6\sigma$
Media:	<b><math>6.2\gamma</math></b>	<b><math>0.9\sigma</math></b>	<b><math>14.2\gamma</math></b>	<b><math>1.0\sigma</math></b>
				<b><math>18.2\gamma</math></b>
				<b><math>1.0\sigma</math></b>



**Figura 4.43:** A la izquierda, se muestra un registro de la señal precursora registrada en la estación peruana (HUA) 200 días antes de un determinado evento sísmico. La figura derecha muestra un registro del área bajo la curva acumulado bajo las figuras de la izquierda.

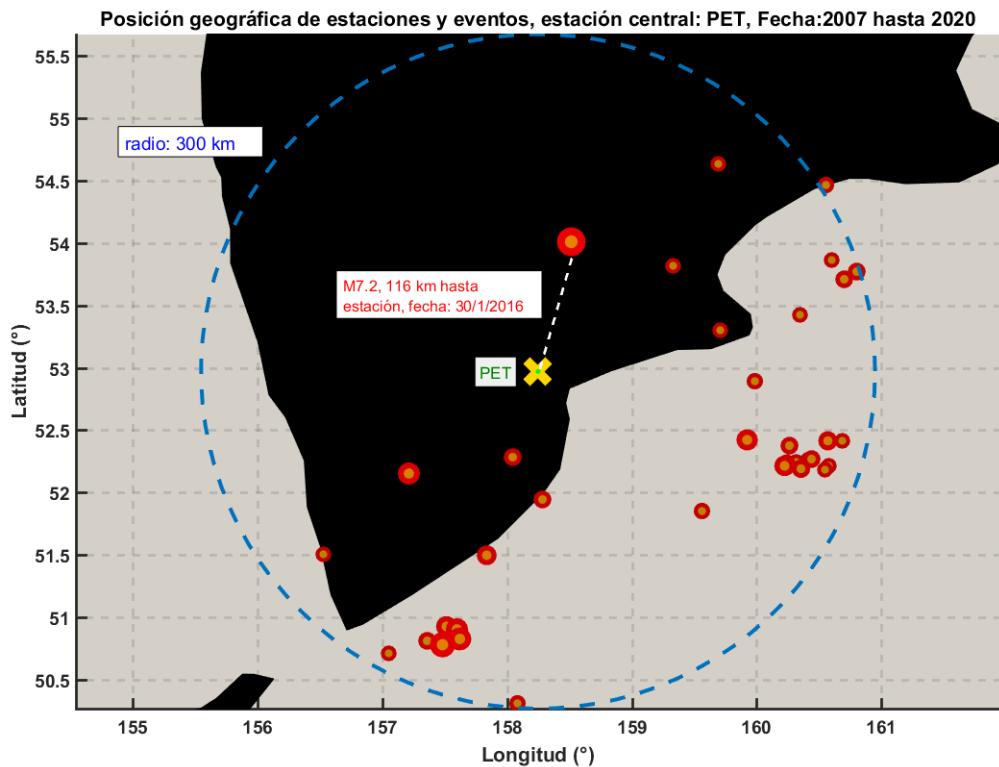
## 4.5. Rusia, cerca del Mar de Ojotsk, estación PET.

La zona adyacente a la estación geomagnética PET, situada al norte de la isla de Japón, en Rusia-Paratunka, posee una posición privilegiada, la relación entre los epicentros sísmicos y la estación geomagnética es casi ideal, con sismos importantes (mayores a 7M) ubicados a menos de 200 km de la estación, además de casi 13 años de datos disponibles para realizar el análisis.

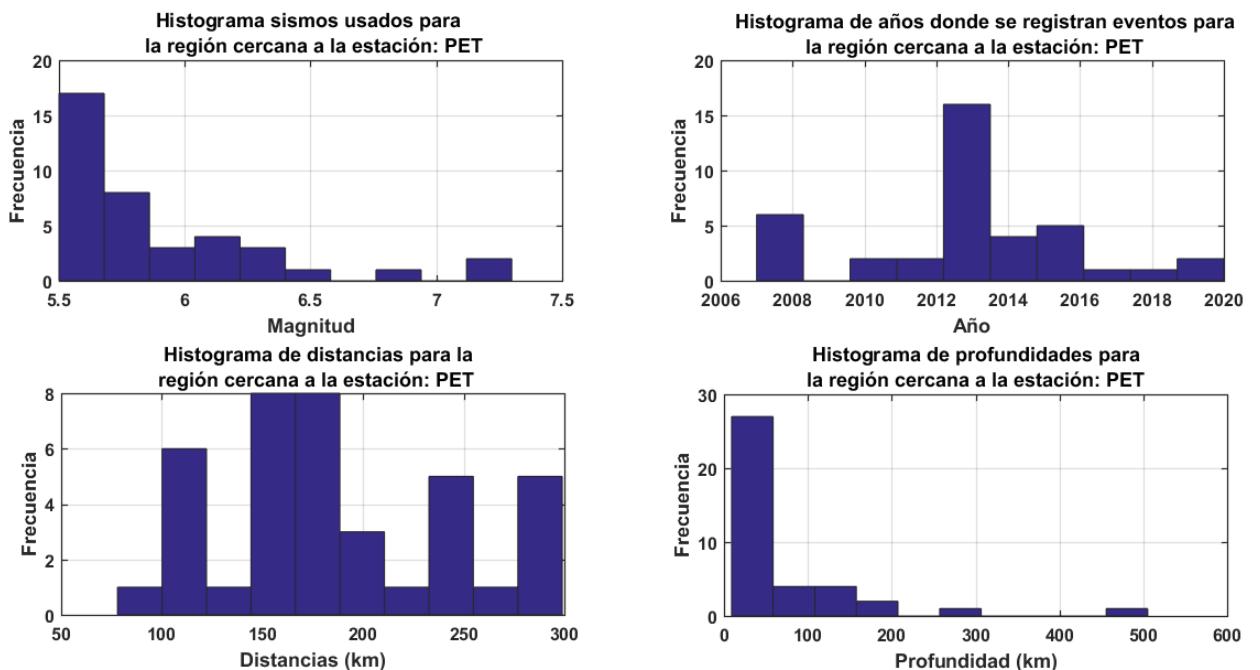
### 4.5.1. Datos de entrada y parámetros del análisis.

En la figura 4.44 se muestra la localización espacial de los sismos mostrados en los histogramas 4.45, estos sismos son los registrados durante los años 2007 hasta el 2020 en la zona adyacente a

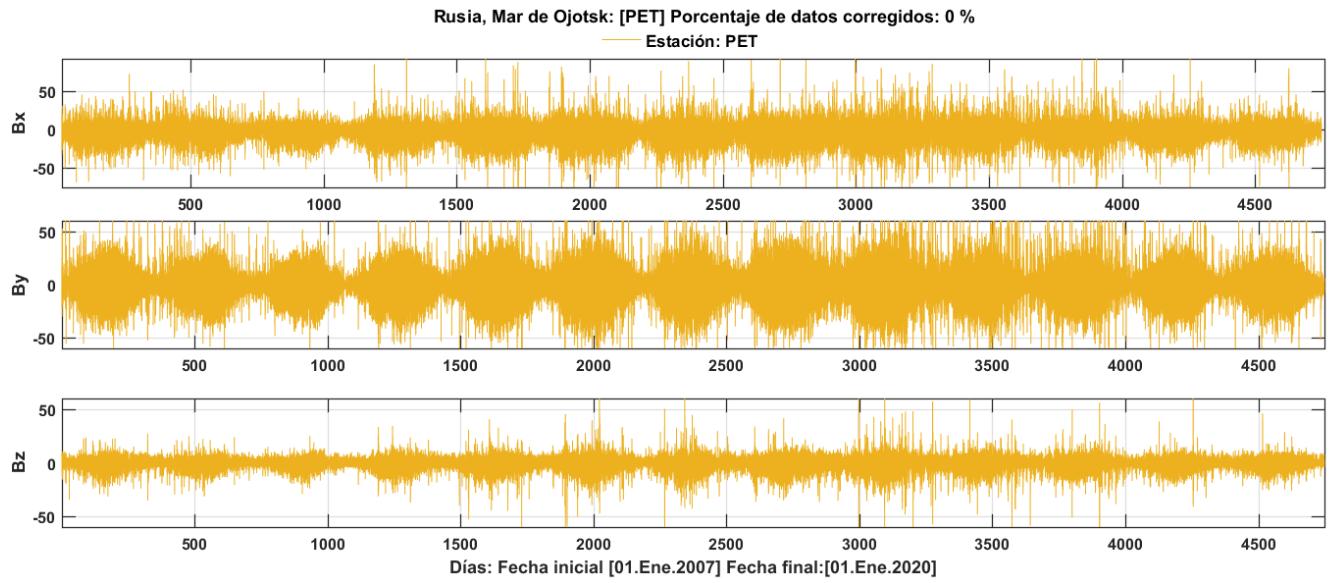
la estación, dejando por fuera del análisis los sismos mayores a 5.5M. Por otra parte, la estación PET presentó data en muy buen estado, es decir, no se detectaron espurios durante los intervalos de tiempo designados para este estudio.



**Figura 4.44:** Mapa de la zona adyacente a la estación PET con la estación marcada con una cruz amarilla, sismos marcados como puntos rojos con centro naranja proporcionales a su magnitud.



**Figura 4.45:** Histogramas de diversas cantidades relevantes asociadas con los eventos sísmicos en zona adyacente a la estación PET (300 km de radio respecto a la estación).

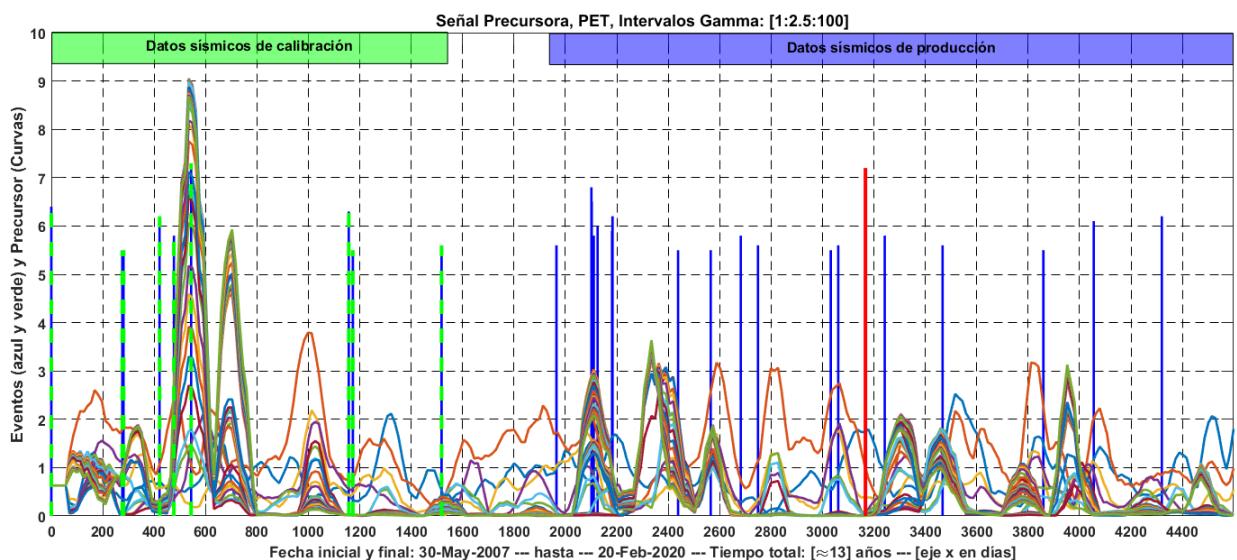


**Figura 4.46:** Datos geomagnéticos de la estación PET, media de cada día llevada a cero, sin normalizar, se observa la distribución de la señal para las tres componentes y el total de datos corregidos para el tren de datos.

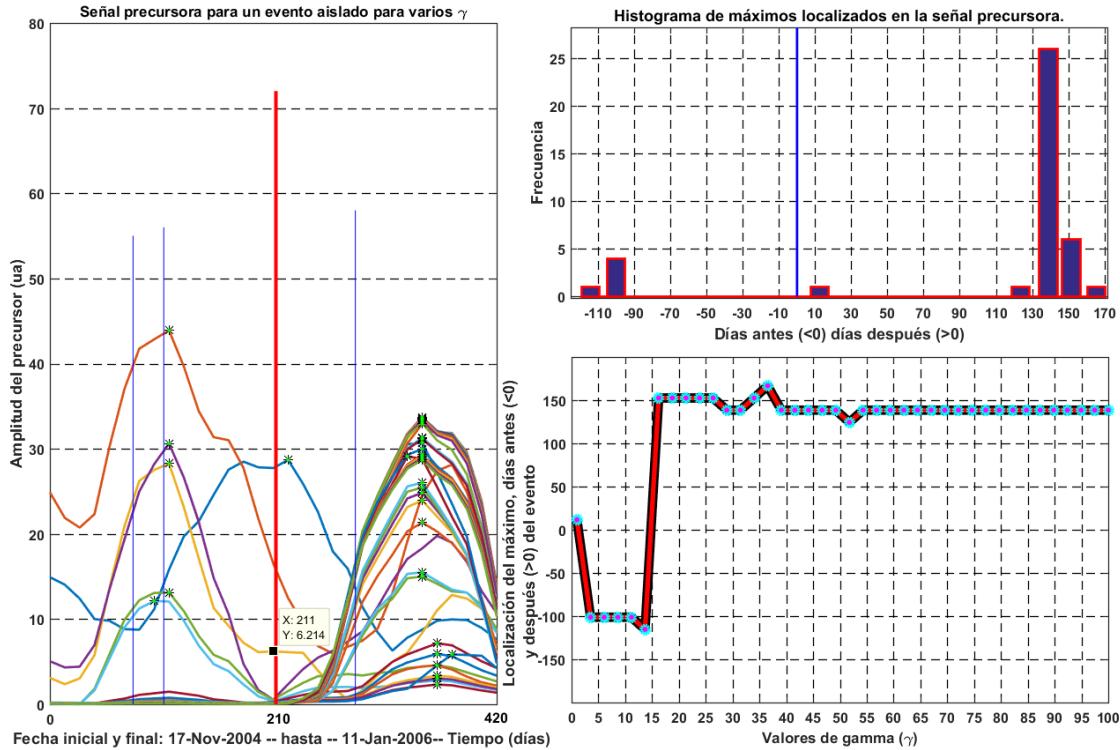
Por último, es importante mencionar que la zona y el tiempo de estudio cuenta con 3 sismos de magnitud mayor a 6.5M a lo largo de 13 años de datos disponibles.

#### 4.5.2. Resultados del precursor.

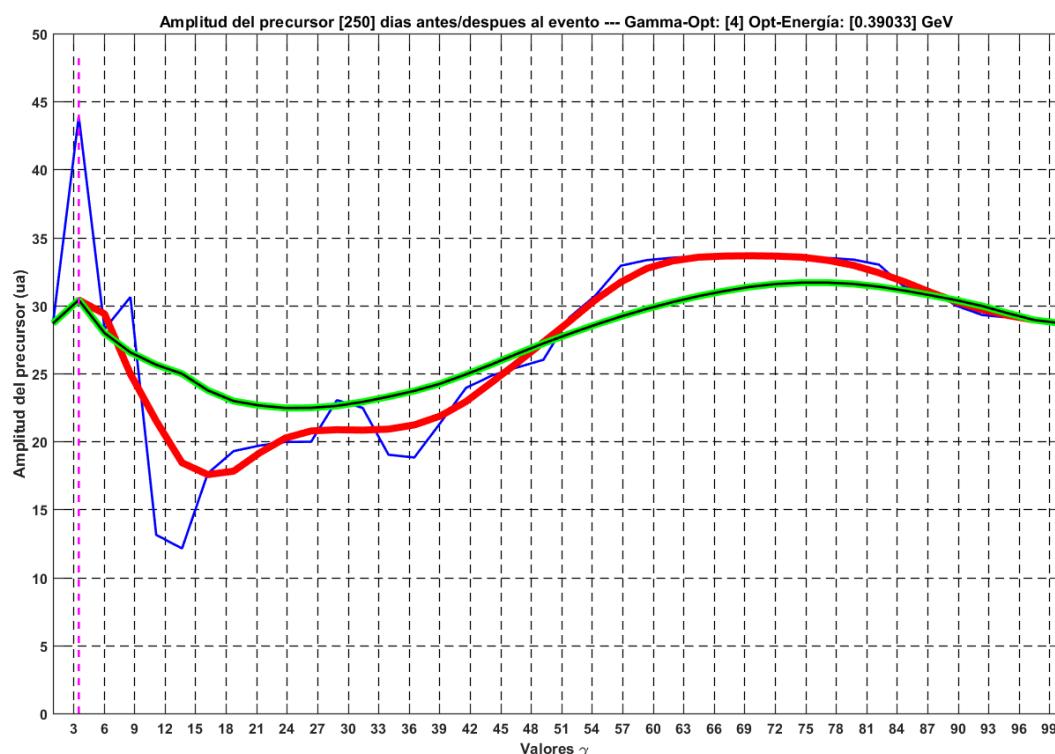
Los parámetros para el análisis de esta región son similares a los usados en las demás regiones, usando ventanas de 60 días antes y 60 días después, con ventanas horarias de 1 hora, usando la media horaria de los campos magnéticos locales para generar la transformación propuesta en esta investigación. Repitiendo el procedimiento para 40 valores discretos y distintos de gamma ( $\gamma$ ), reconstruyendo la señal filtrando aquellas eficiencias que estén por debajo del 20 % para los intervalos horarios, la señal se muestra en la figura 4.47.



**Figura 4.47:** Curvas de colores representan amplitud de la señal precursora resultante del estudio en estación PET. Las líneas verticales azules con verde son los sismos asignados a la calibración del experimento, las líneas azules son los sismos asignados a la producción, la línea vertical roja es el evento de interés en la zona.



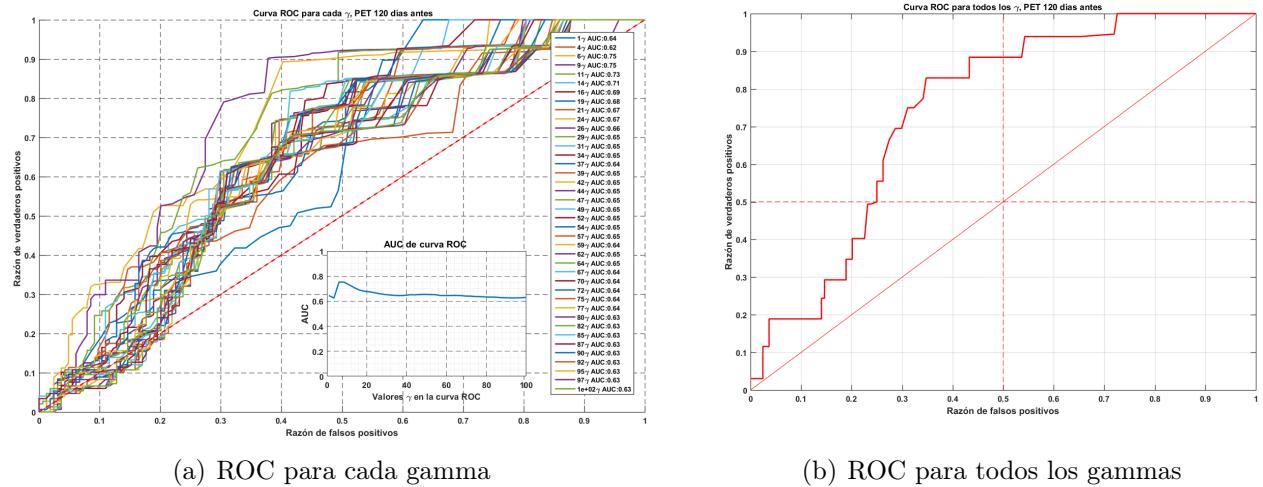
**Figura 4.48:** Señal precursora de la estación PET, centrada en evento aislado seleccionado con una ventana de 110 y 180 días antes y después respectivamente.



**Figura 4.49:** Amplitud de la señal en función del valor de gamma calculado para la estación PET para el evento seleccionado en la figura 4.48, con una suavización sin puntos (línea azul), cada 6 puntos (línea roja), con 20 puntos (línea verde).

### 4.5.3. Curva ROC y otros resultados estadísticos

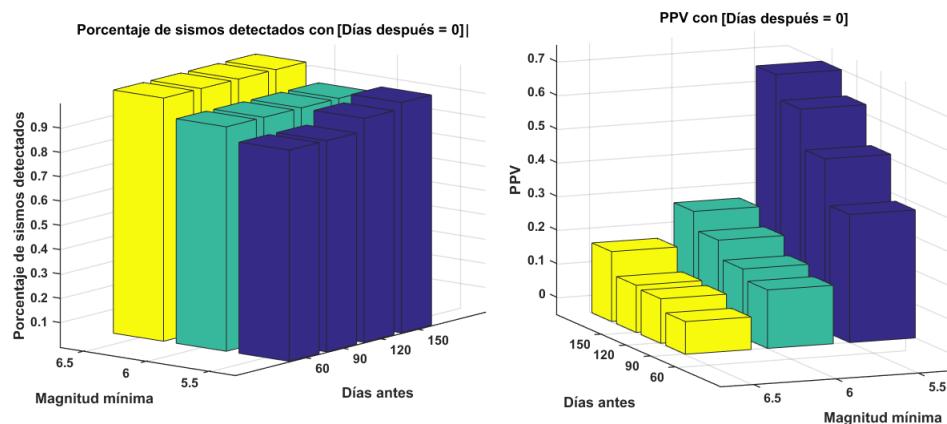
Analizando los resultados de la estación PET, se procede a realizar los procedimientos descritos en el capítulo 3 para en análisis de resultados. Considerando 120 días antes como una ventana de tiempo estándar para esta investigación, se obtienen los resultados mostrados en la figura 4.50, con resultados positivos para valores de gamma entre  $6\gamma$  y  $9\gamma$  con 0.75AUC.



**Figura 4.50:** Curva ROC para el resultado de la estación PET, para cada gamma individual con su respectivo índice AUC asociado.

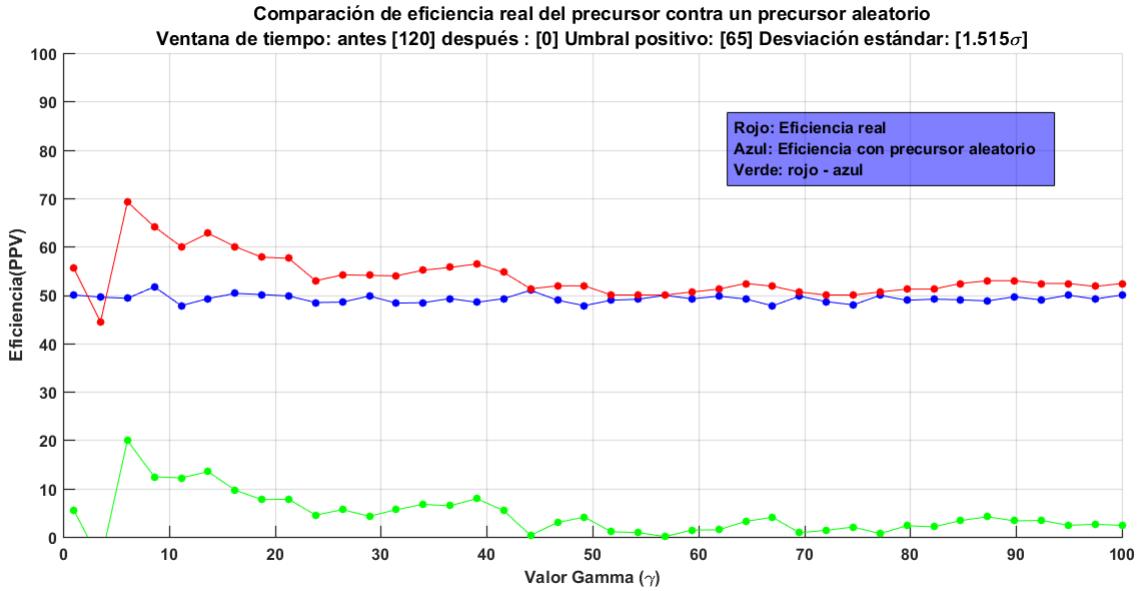
En la figura 4.50 también destaca:

- Que la mayoría de los valores de gamma se encuentran cercanos al valor 0.65AUC, con la notable excepción de los valores gammas entre  $6\gamma$  y  $9\gamma$ .
- Que los valores de gamma óptimos para el proceso de discriminación coinciden con los valores encontrados en la gráfica 4.49.



**Figura 4.51:** A la derecha, índice positivo de predicción para la estación PET, iterando sobre la magnitud mínima que accede al cálculo del ROC y los días antes para posteriormente calcular el índice PPV. A la izquierda se muestra el total de sismos detectados con el procedimiento para distintos días antes e iterando sobre distintas magnitudes.

**Comentario sobre la figura 4.51** Luego de la evaluación de distintos umbrales con las curvas ROC, se muestran los valores PPV asociados a cada valor de gamma, en la figura 4.51 se destaca un máximo para el valor de cercano al 70 % para valores de  $\gamma = 6$  esto último para sismos mayores a 6.5M.



**Figura 4.52:** Comparación de eficiencia porcentual entre la señal obtenida en los resultados y una señal generada de manera aleatoria para PET.

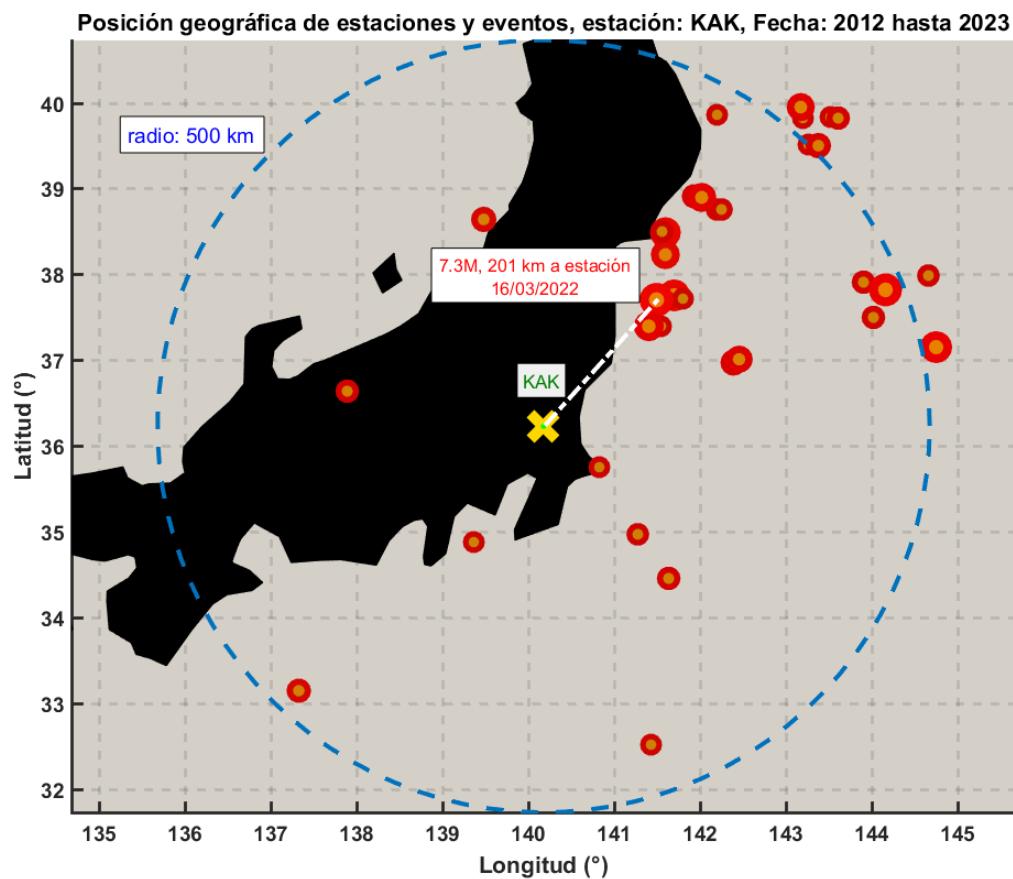
## 4.6. Japón, estación KAK.

El 16 de marzo del 2022, un terremoto de 7.3M golpeó la costa de Japón, el servicio geológico de Estados Unidos reportó que se produjo a 63 km de profundidad, a 201 km de la estación KAK. El epicentro del terremoto estuvo aproximadamente a 89 kilómetros de donde ocurrió el terremoto de 9.1M sucedido en el 2011 estudiado anteriormente cerca de la región de Fukushima, por lo que presenta una oportunidad única para estudiar cierto grado de reproducibilidad en los resultados de la sección pasada. Adicionalmente, al solo manejar una estación, podemos hacer el círculo concéntrico a la estación más pequeño, esto disminuye la cantidad de sismos con lo que se puede realizar una calibración, pero esperamos una mayor contribución de esos sismos a la señal registrada en la estación, el mapa de estaciones y sismos se muestra en la figura 4.53.

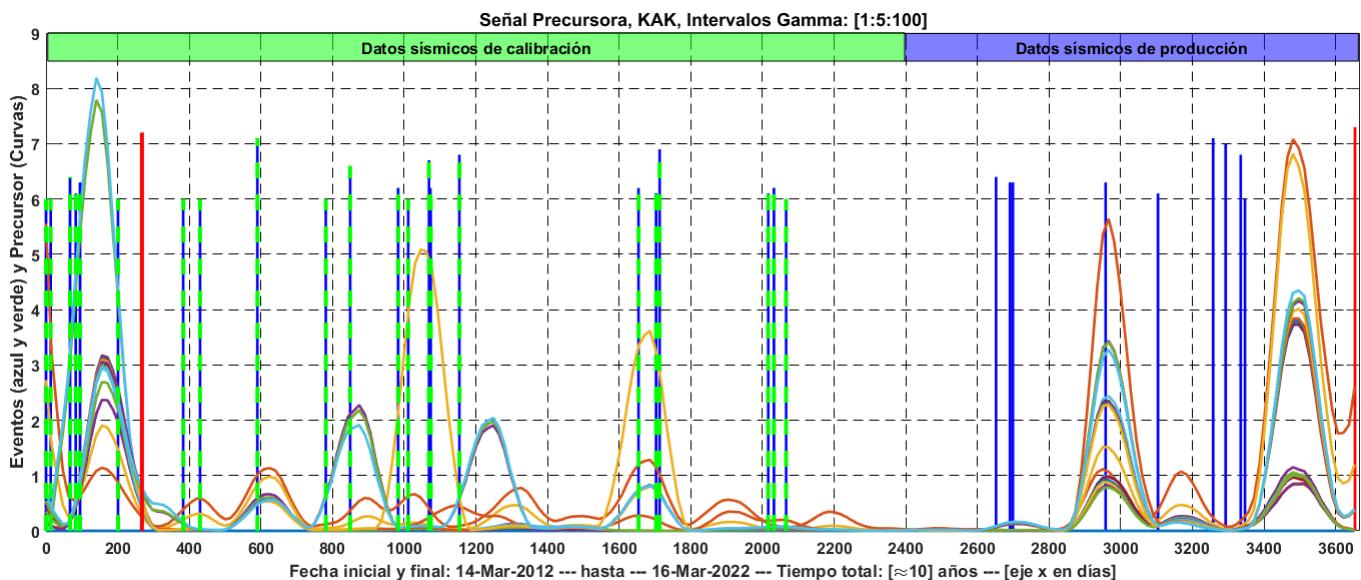
### 4.6.1. Resultados del precursor.

Ajustando los parámetros y alimentando al algoritmo de los datos previamente preparados, se ajustó una ventana de 60 días antes y 60 días después, con ventanas horarias de 1 hora. Usando la media horaria de los campos magnéticos locales de la estación KAK para estudiar el precursor relativista. Se repitió el procedimiento para 20 valores discretos y distintos de gamma ( $\gamma$ ), esto último nos permite una búsqueda razonable de gammas óptimos para ciertos intervalos horarios. Filtrando a 25 % como la eficiencia mínima horaria (disparos relacionados con un evento sísmico dentro de una ventana de días antes o después) para reconstruir la señal, obtenemos la señal mostrada en la figura 4.54, en la misma figura se muestra que varios valores de gamma tienen distintas amplitudes, fases y frecuencias, se muestra una señal potencialmente precursora y prominente antes del evento 7.3M (marcado como una línea vertical roja), destaca que se usó aproximadamente

la mitad de los datos sísmicos locales para la calibración y la totalidad para la fase de producción.



**Figura 4.53:** Mapa de la zona de Japón para la estación KAK, mostrando terremotos ( $6M >$ ) desde el año 2012 hasta el 16/03/2022.



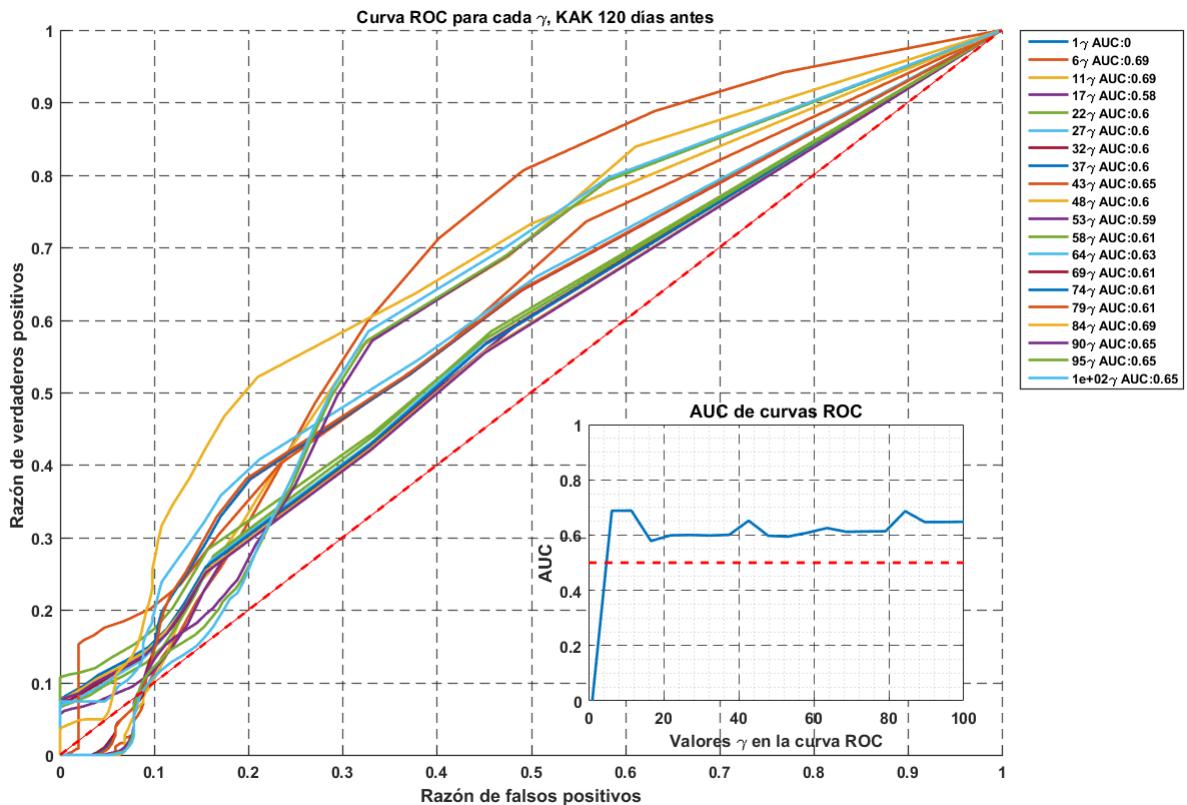
**Figura 4.54:** Resultados del precursor relativista para la estación KAK, datos geomagnéticos usados van desde el 2012 hasta el 16 de marzo del 2022.

## Comentarios sobre la figura 4.54

- Se muestra una señal potencialmente precursora al terremoto 7.3M con un máximo ocurrido aproximadamente 120 días antes del evento sísmico.
- El máximo comparte similitudes en los tiempos de ocurrencia y forma con otro terremoto de 7.3M ocurrido en el 2012.
- Tanto el terremoto de 7.3M del 2012 como el ocurrido en el 2022 ocurrieron geográficamente a pocos kilómetros entre ellos y ambos compartieron similitudes en la forma de manifestar la señal precursora con máximos 120 días antes del evento sísmico.

### 4.6.2. Curva ROC y otros resultados estadísticos.

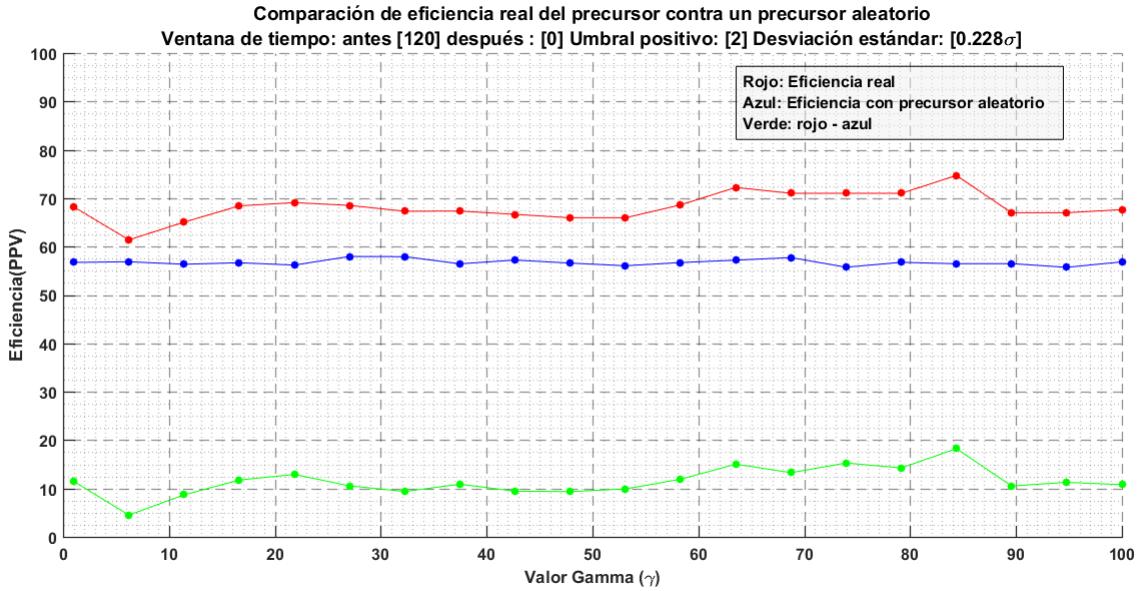
Analizando los resultados de la estación KAK, mostrados en la figura 4.54, se procede a realizar los procedimientos descritos en el capítulo 3 para en análisis de resultados. Considerando 120 días antes como una ventana de tiempo estándar para esta investigación, se obtienen los resultados mostrados a continuación:



**Figura 4.55:** Curva ROC para el resultado de la estación KAK, para cada gamma individual con su respectivo índice AUC asociado.

En general, los índices AUC se mantienen cerca de los 0.6AUC, esto podría indicar de que en general la señal precursora no tiene la capacidad para discriminar todo el conjunto de terremotos dados. Con la notable excepción de ciertos índices gammas que llegan a presentar hasta 0.69 AUC, sin embargo, aunque en conjunto la señal no presenta una fuerte relación señal-sismo, la observación visual extraída de la figura 4.54 muestra una relación más fuerte entre los eventos más grandes

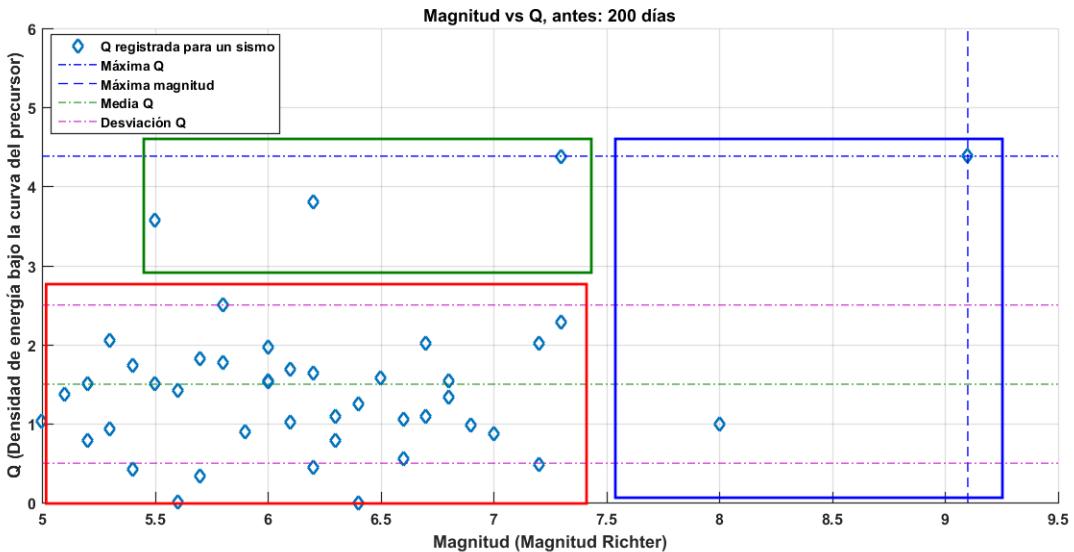
( $>7M$ ) y la señal precursora. Por otra parte, los resultados mostrados en 4.56, parecen señalar que aunque el índice AUC fuera relativamente bajo, la diferencia porcentual de los índices (PPV) del precursor real y el aleatorio son bastante distintos.



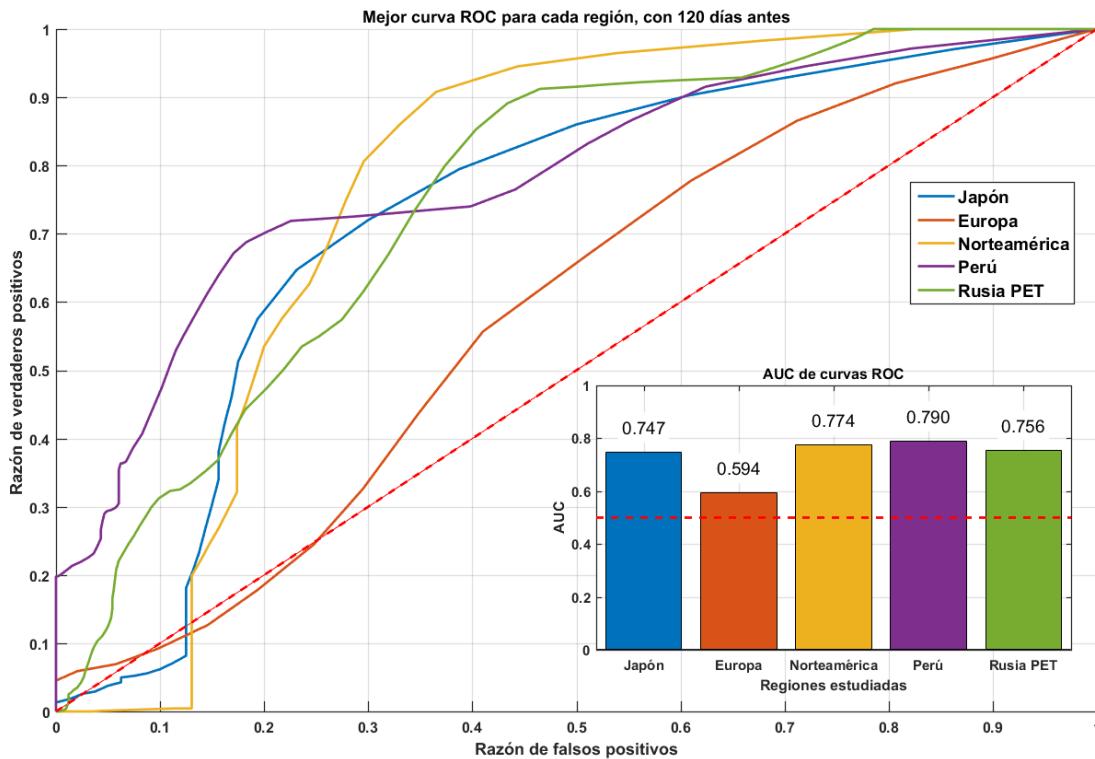
**Figura 4.56:** Comparación de eficiencia porcentual entre la señal obtenida en los resultados y una señal generada de manera aleatoria para KAK.

## 4.7. Resultados de todas las zonas.

En esta sección, haremos algunos análisis generales sobre todos los resultados anteriores. Si analizamos todos los registros de  $Q$  en función de la magnitud de las zonas estudiadas (excluyendo los sismos generados aleatoriamente de Europa) luego de normalizar los valores de  $Q$  se construye la figura mostrada en 4.57.

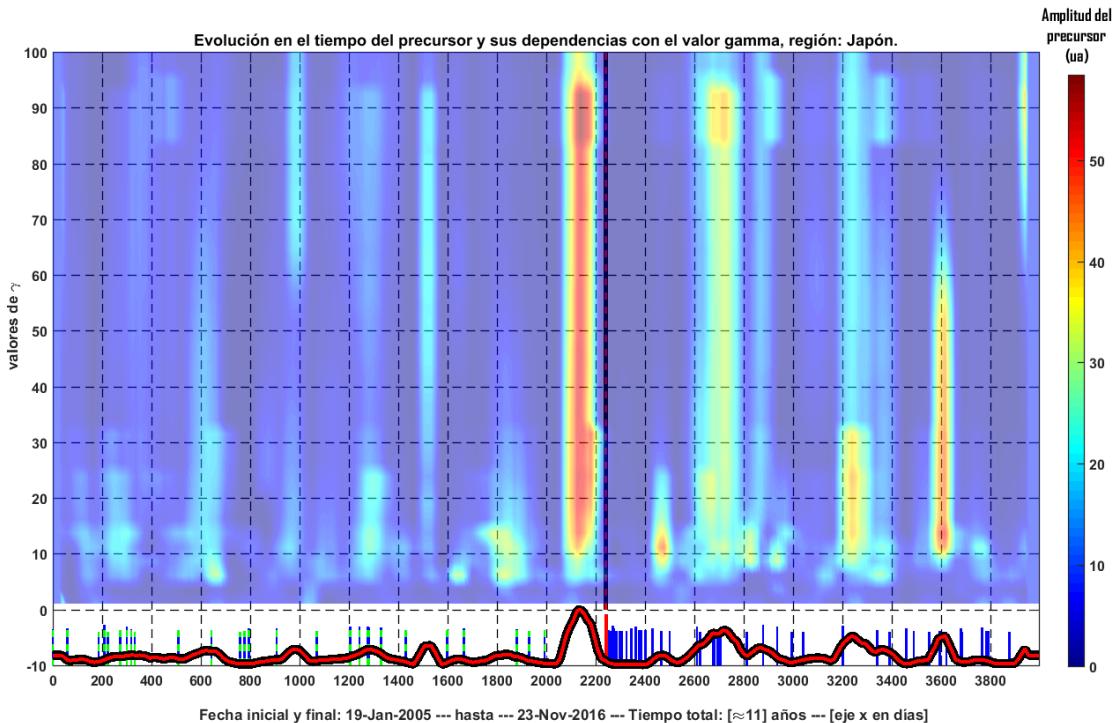


**Figura 4.57:** Relación  $Q(m)$  en función de la magnitud para todas las zonas estudiadas. Se puede observar que el sismo de magnitud 9.1 registrado en Japón, es una anomalía notable con respecto al resto de los eventos.

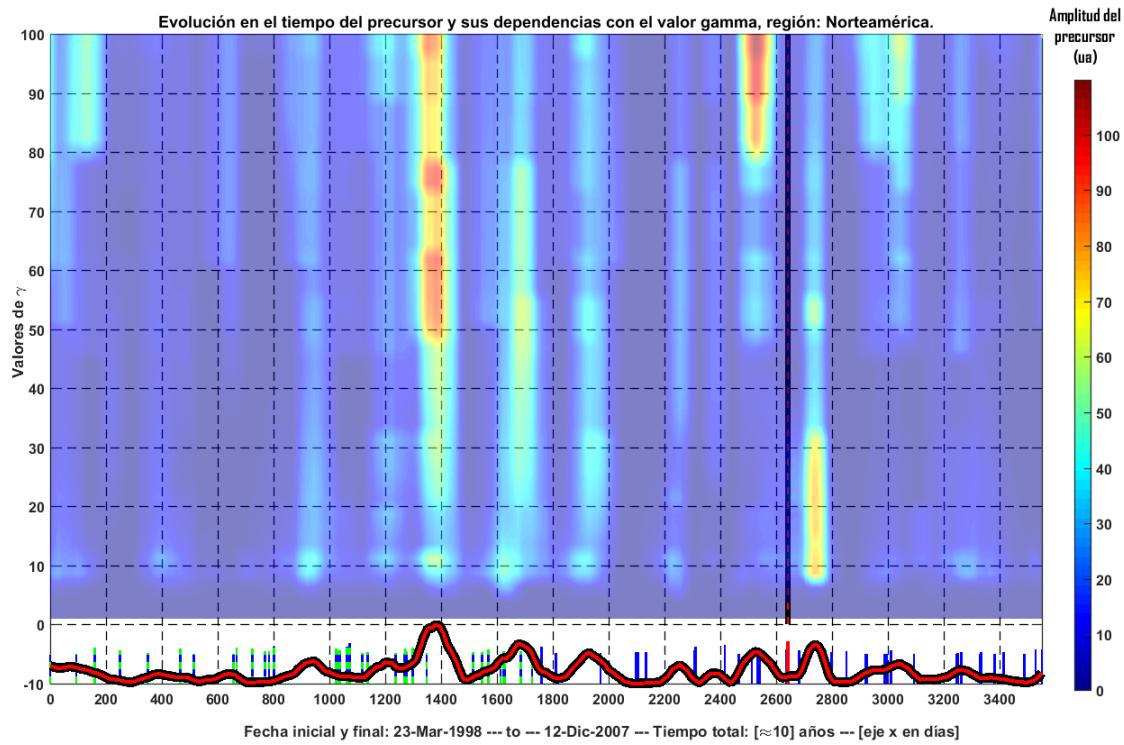


**Figura 4.58:** Curvas ROC e índice AUC de las mejores curvas ROC por región estudiada.

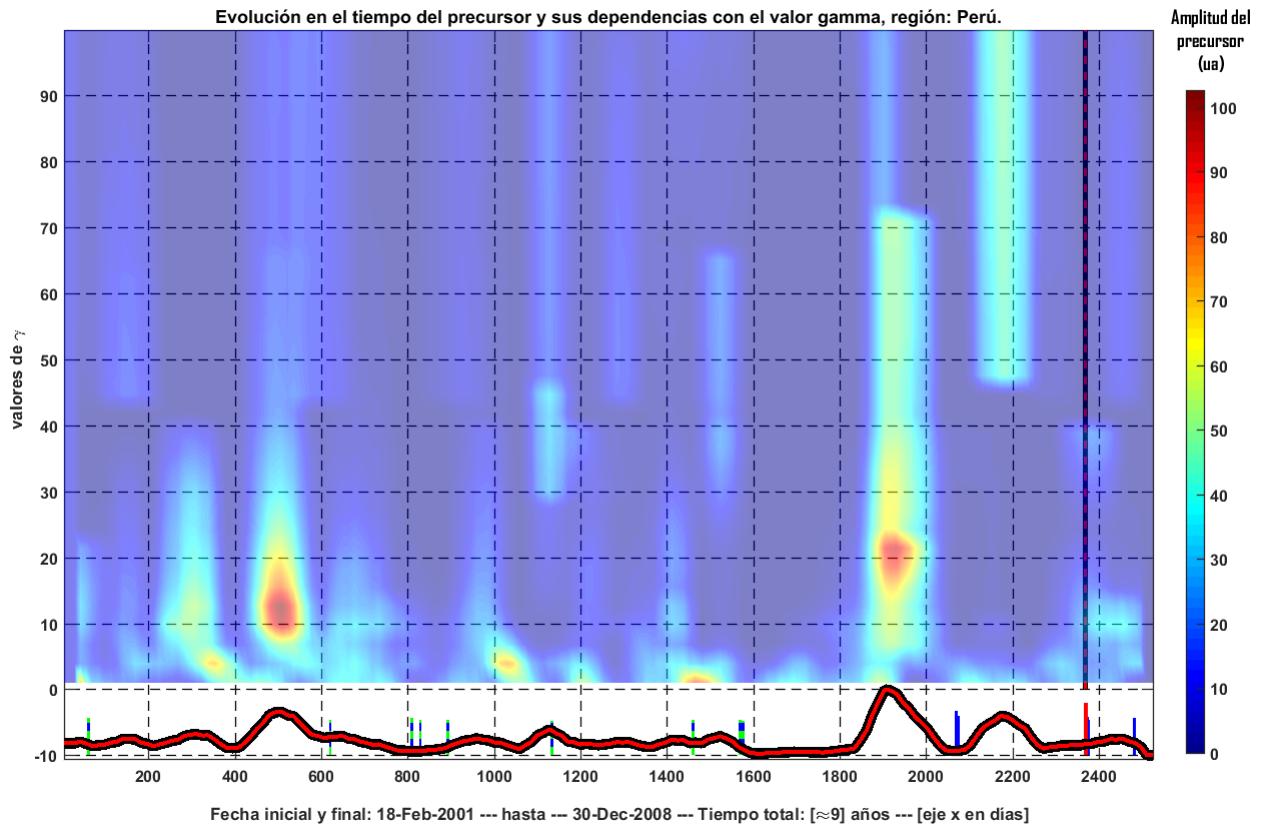
Seguidamente, podemos hacer una recopilación de la relación entre la señal generada para un determinado valor de gamma ( $\gamma$ ) en el tiempo para diferentes zonas permitiéndonos hacer algunas comparaciones cualitativas en las conclusiones y discusión de este trabajo.



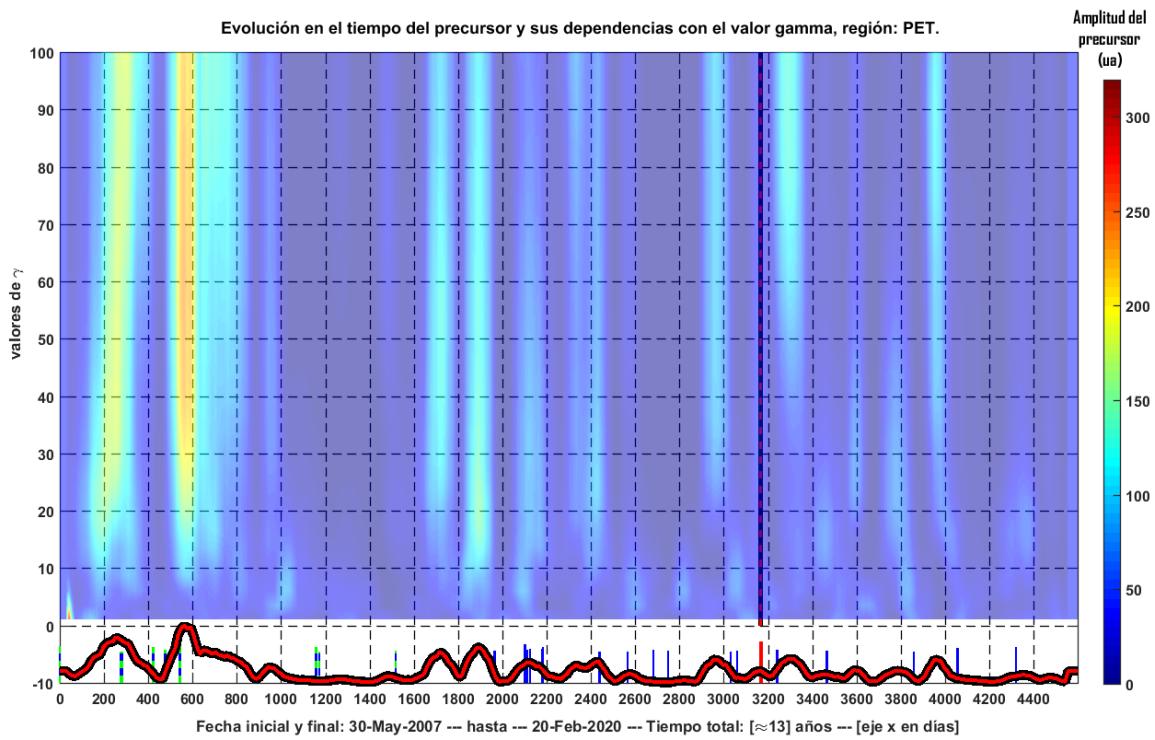
**Figura 4.59:** Amplitud del precursor (barra de color) en función de gamma (eje vertical) a lo largo del tiempo para la región de Japón.



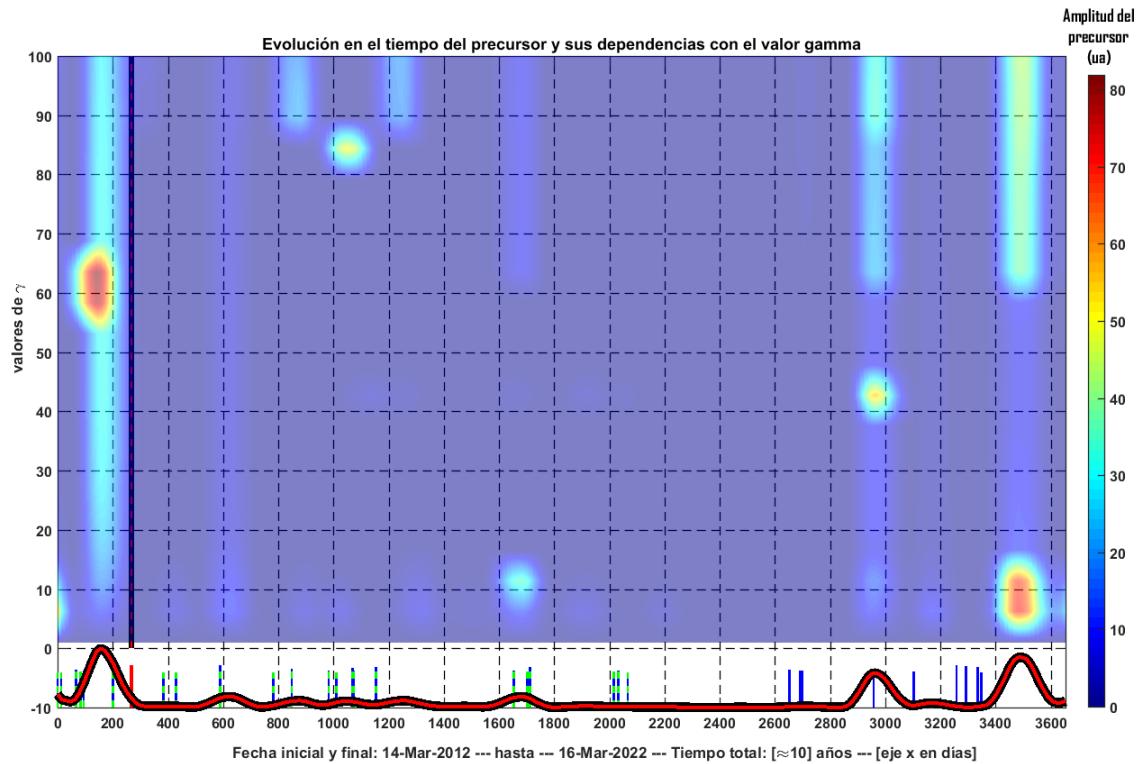
**Figura 4.60:** Amplitud del precursor (barra de color) en función de gamma (eje vertical) a lo largo del tiempo para la región norteamericana.



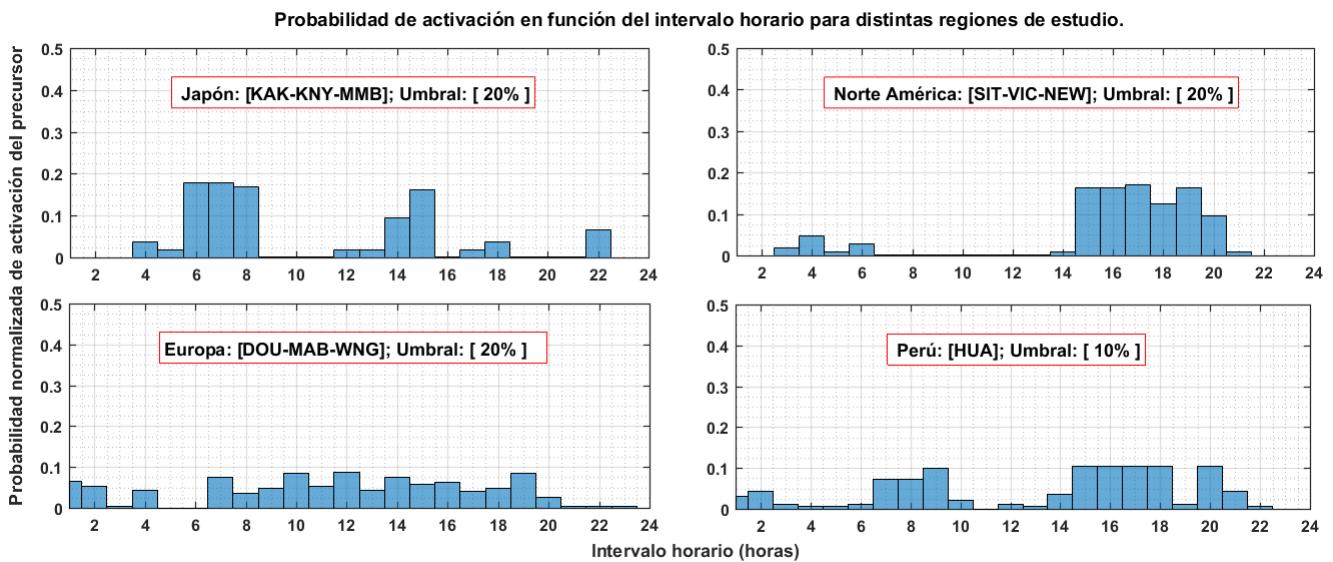
**Figura 4.61:** Amplitud del precursor (barra de color) en función de gamma (eje vertical) a lo largo del tiempo para la región de Perú.



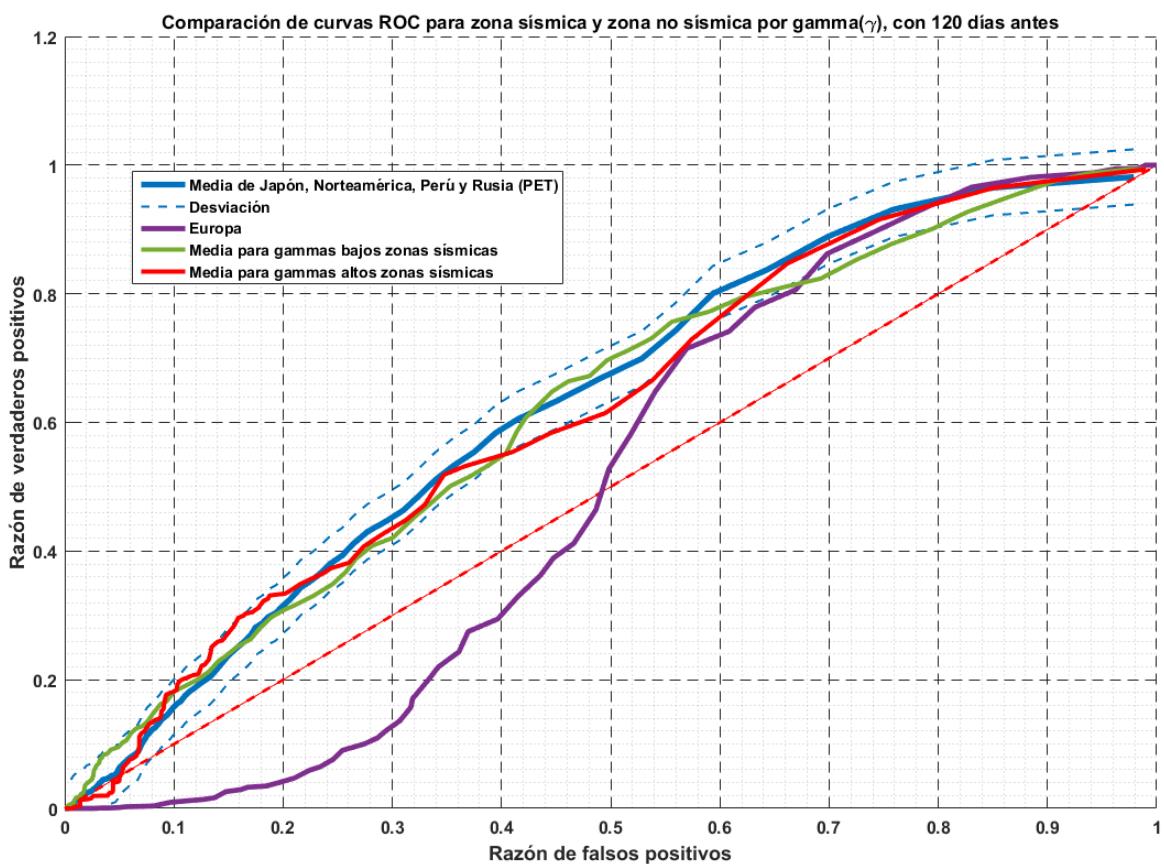
**Figura 4.62:** Amplitud del precursor (barra de color) en función de gamma (eje vertical) a lo largo del tiempo para la región de Rusia, cerca del mar de Ojotsk, estación PET.



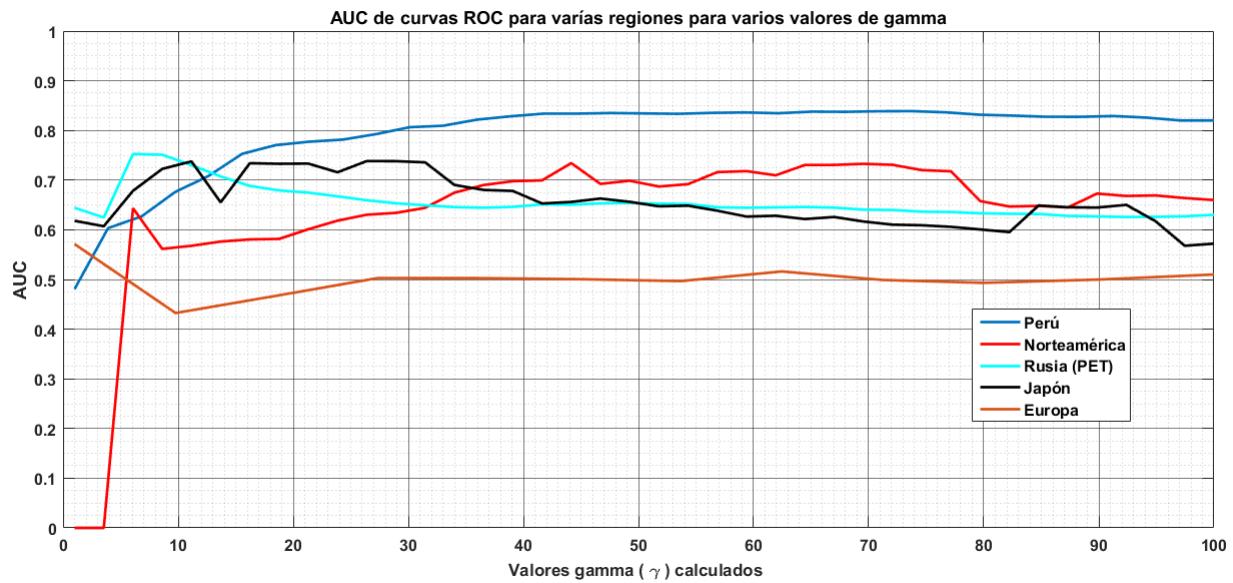
**Figura 4.63:** Amplitud del precursor (barra de color) en función de gamma (eje vertical) a lo largo del tiempo para la estación japonesa KAK.



**Figura 4.64:** Probabilidad normalizada de activación en función del intervalo horario para distintas regiones de estudio.



**Figura 4.65:** Media de las curvas ROC calculadas y comparación con zona de calibración Europea.



**Figura 4.66:** Valores AUC registrados para las curvas ROC en función del gamma ( $\gamma$ ) y comparación con zona de calibración Europea.

En general, las curvas ROC (figura 4.65 e índices AUC muestran que las zonas con sismicidad y las zonas sin sismicidad se comportan fundamentalmente distinto usando los métodos de evaluación que se planteó en esta investigación, la curva de AUC en función de gamma de la figura 4.66 parece sugerir que ciertos valores de gamma son universalmente mejores que otros independientemente de la geografía ( $\gamma = 6$ ).

# Conclusiones

En esta tesis se desarrolló una metodología para transformar las componentes del tensor energía impulso  $T_{ij}$ , enfocados en las componentes relacionadas con el vector de Poynting  $S_i$  a un precursor sísmico no convencional que podría tener el potencial de predecir grandes terremotos ( $>M7$ ) basándose en una validación “off line” de eventos sísmicos ya ocurridos. Se seleccionaron las zonas del Norte de Europa, Japón, Norteamérica, Perú y Rusia, para realizar estudios del comportamiento del precursor relativista, adicionalmente se descargaron y usaron datos sísmicos de la plataforma IRIS en conjunto con los datos de INTERMAGNET. Se estudiaron y discutieron los efectos de factores ambientales como la contribución solar a la señal de una estación geomagnética y su papel en enmascarar potenciales precursores sísmicos electromagnéticos. Se desarrolló una metodología para trabajar con datos geomagnéticos proporcionados por INTERMAGNET, incluyendo distintos métodos de filtrado de señales sistemáticas no relacionadas a precursores sísmicos electromagnéticos. Lo deseable de un precursor sísmico sería que solo se active cuando va a ocurrir un evento de interés, de ser posible que el precursor se pueda sintonizar, que se pueda modular para hacer predicciones sobre distintos tipos de eventos. Esto en teoría sería posible, si se tuviese el conocimiento absoluto de los parámetros que gobiernan el fenómeno, aún se encuentra lejos de que ésto sea cierto, de manera que tenemos que hacer uso de probabilidades de ocurrencia, los valores más probables son aquí los que gobiernan nuestro escenario de verdades del conocimiento predictivo y la robustez del método lo gobierna la incertidumbre, los errores en las mediciones. De manera que esta propuesta debe ser entendida como un acercamiento a una forma distinta de combinar, de observar las variaciones enmascaradas en los campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$ , ahora vistas por un observador que tiene otra perspectiva que un sistema de referencia en reposo no ve. Basándose en los criterios expuestos en la sección de resultados, se mencionará lo siguiente:

- Región silente: Se espera un silencio del precursor en la fase de producción debido a que ningún intervalo horario se debería ver favorecido por la naturaleza aleatoria por la que se producen los terremotos en la fase de calibración.
- Regiones con pocos terremotos: Se espera una correlación entre la señal y el sismo más importante de una determinada región de estudio.

En cada zona de estudio, se aplicó la metodología propuesta en esta investigación y se extrajeron las siguientes conclusiones de los resultados.

## 1. Norte de Europa:

- a) Zonas silentes Europeas con sismos generados aleatoriamente en la calibración, mostraron resultados esperados, con un silencio del precursor sísmico que corresponde a silencios sísmicos en la zona de estudio (4.4).
- b) Zonas silentes europeas con sismos generados aleatoriamente en la calibración y producción mostraron resultados esperados, con activaciones homogéneas a lo largo del tren de datos, curvas ROC sugieren que en general la señal no es capaz de generar predicciones

significativas, umbrales de discriminación puntuales que pudieran verse como favorables, se demuestra no son mejores que precursores generados de manera aleatoria (4.6, 4.7, 4.8).

- c) Zonas silentes europeas con sismos generados aleatoriamente en la calibración y producción no muestran ninguna relación clara entre la cantidad  $Q$  y la magnitud. Esto es esperado debido a que los eventos sísmicos que se introdujeron al algoritmo son independientes de cualquier causa-efecto que pudiera residir en los datos (4.10).

## 2. Japón:

- a) Resultados del estudio realizado en Japón, sugieren una fuerte correlación entre el precursor relativista y el terremoto M9.1 del 11 de marzo del 2011 (4.14, 4.16), con una anomalía detectada 90 días antes.
- b) Centrados en el terremoto M9.1 de marzo del 2011, la señal solo se magnifica para ciertos valores de gamma  $\gamma > 1$  lo que sugiere que el método propuesto en esta investigación podría estar magnificando señales precursoras ocultas en el ruido (4.15).
- c) Al mismo tiempo, estudiando sismos mayores a ( $>M6$ ), ( $>M7$ ) y ( $>M8$ ) se identificó una relación entre la amplitud del disparo, la desviación y la magnitud del sismo para distintas ventanas de tiempo (Cuadro 4.2).
- d) Curvas ROC calculadas para la zona de Japón, muestran correlación entre la señal y el evento sísmico para una ventana de tiempo 120 días antes y 0 días después centrados en los eventos sísmicos, con índices AUC máximos para gamma ( $\gamma = 26$ ,  $AUC = 0.74$ ) (4.17).
- e) En la zona de Japón, se calcularon los índices de predicción positiva, arrojando un 98 % para 120 días antes en sismos mayores a M7.5 (4.18).
- f) En la zona de estudio de Japón, para un umbral de discriminación de valor  $2.0\sigma$ , al comparar la eficiencia porcentual del precursor real calculado en  $(90 \pm 5)\%$  con un precursor aleatorio en  $(90 \pm 2)\%$ , se encuentra muy poca diferencia para casi todos los gammas estudiados, sugiriendo que el precursor no genera predicciones significativas para todo el tren de datos con el umbral de discriminación óptimo  $2.0\sigma$  extraído de la curva ROC (figura 4.17 y cuadro 4.2), esto podría deberse a que la zona tiene una distribución temporal de terremotos muy homogénea ( $>M6$ ) a lo largo de los años estudiados (2005-2016), lo cual, acompañado de ventanas de tiempo muy grandes (120 días antes de cada sismo) hace difícil generar predicciones significativas (4.19).
- g) Estudio de la cantidad  $Q$  en la zona de Japón, definida como se muestra en la ecuación 2.37, muestra que las señales asociadas al terremoto M9.1 del 11 de marzo del 2011 son mayores que el resto antes de la ocurrencia de dicho evento, la amplitud del precursor llega a un máximo histórico desde el 2006 al 2011 y luego decae en fechas muy cercanas (5 días) al evento sísmico M9.1. Esto no puede ser considerado como una prueba de  $Q \propto M_L$ , debido al carácter único y anómalo de los grandes terremotos como el presentado el 11 de marzo del 2011 en Japón, no se tiene ninguna base estadística que permita concluir en algún patrón o relación (4.20), más estudios en terremotos de grandes magnitudes son necesarios.
- h) Resultados mostrados en 4.54 extraídos del estudio de la estación KAK, parecen sugerir una relación débil pero existente entre la señal precursora 100 días antes del terremoto de 7.3M del 16/03/2022 en la costa de Japón.

## 3. Norteamérica:

- a) Resultados del estudio realizado en Norteamérica, sugieren una posible correlación entre el precursor relativista y un terremoto M7.2 localizado a 822 km de la estación VIC (4.25), el comportamiento anómalo es detectado  $\approx 100$  días antes del terremoto.
- b) Resultados del estudio efectuado en Norteamérica, muestran que la señal precursora solo se manifiesta para gammas altos  $\gamma > 1$  (4.28, 4.27) para el caso del sismo de M6.8.
- c) Curvas ROC calculadas para la zona de Norteamérica, muestran cierta correlación entre la señal y los diferentes eventos sísmicos para una ventana de tiempo 120 días antes y 0 días después centrados en los eventos sísmicos, con índices AUC máximos para gamma ( $\gamma = 52$ ,  $AUC = 0.75$ ) (4.29, 4.29).
- d) Al mismo tiempo, estudiando sismos mayores a ( $>M5.2$ ), ( $>M5.8$ ) y ( $>M6$ ) se identificó una relación entre la amplitud del precursor, la magnitud del sismo y las ventanas de tiempo (Cuadrado 4.3).
- e) Se calculó, que para la zona de Norteamérica, Para magnitudes mínimas a 5.8M y 150 días antes al evento, se tiene 63 % PPV, representan un 82 % del total de sismos en el tren de datos. Para magnitudes mayores a 5M, para 90 días antes, se tiene cerca del 86 % PPV, que representan un 87 % del total de sismos en el tren de datos.
- f) Relación  $Q$  en función de la magnitud para la zona de Norteamérica en eventos mayores a ( $>M6$ ) sugieren una relación lineal entre la energía bajo la curva del precursor y la magnitud (4.32).

#### 4. Perú:

- a) Resultados del estudio realizado en Perú, estación HUA, entre el precursor relativista y un terremoto M8.1 localizado a 199 km de la estación (4.37, 4.38), el comportamiento anómalo es detectado  $\approx 200$  días antes del terremoto.
- b) En la zona de estudio de Perú, para un umbral de discriminación ubicado a desviación estándar de  $1.2\sigma$ , al comparar la eficiencia porcentual máxima calculada en 72 %, con un precursor aleatorio en  $(50 \pm 2)\%$  (4.41), esto acompañado del estudio sobre todos los umbrales posibles realizado y expresado en las curvas ROC (4.39) sugiere una fuerte correlación entre el fenómeno precursor y el evento sísmico en la zona.

#### 5. Rusia, cerca del mar de Ojotsk:

- a) No se encontró una fuerte correspondencia entre la señal precursora y el sismo M7.2 ocurrido a 116 km de la estación PET el día 30/1/2016 en Rusia, cerca del mar de Ojotsk 4.47. Esto podría deberse a varios factores, pero creemos se debe a la falta de otras estaciones en las proximidades que ayudarán a una calibración más precisa de las zonas horarias.
- b) Se sugiere una cierta correlación entre la señal precursora para valores gammas específicos ubicados en ( $\gamma = 6$ ), los cuales tienen asociados un índice  $AUC = 0.75$  (4.50). Se calculó un máximo en el índice de predictibilidad positivo del 70 % para valores  $\gamma = 6$  asociados a sismos mayores a M6.5 (4.51) en la región de Rusia, cerca del mar Ojotsk, estación PET.
- c) En la zona de estudio Rusia, cerca del mar Ojotsk, para un umbral de discriminación ubicado a desviación estándar de  $1.5\sigma$ , al comparar la eficiencia porcentual máxima calculada en 69 %, con un precursor aleatorio en  $(50 \pm 3)\%$  (4.52), sugiere una fuerte correlación entre el precursor y los eventos sísmicos para gammas específicos ( $\gamma = 6$ ).

## 6. Todas las zonas:

- a) El análisis de  $Q(m)$  de todas las zonas, no muestra relaciones claras (4.57), esto podría deberse a que no se calibró cada estación individualmente, lo cual podría estar causando que todas las señales contribuyen estadísticamente igual lo cual no necesariamente es cierto para estaciones que están separadas.
- b) Se observa una diferencia sustancial entre las curvas ROC calculadas para regiones con alta sismicidad y la curva ROC calculada para una región en la que se generaron sismos aleatorios (4.58, 4.65), esto podría sugerir que efectivamente existe una diferencia medible entre como se comporta la señal precursora en zonas con mucha actividad sísmica y zonas con largos silencios sísmicos. Esto también se ve reflejado en el estudio de los índices AUC (4.66).

# Discusiones

El estudio de precursores sísmicos convencionales pareciera haber llegado a un punto crítico a lo largo de los últimos años, la convención es que la relación señal/ruido no es favorable para generar predicciones útiles, especialmente a la hora de predecir grandes terremotos cerca de sitios poblados, esto tal vez es parte de la naturaleza intrínseca de la poca frecuencia de los grandes terremotos, aun si diéramos como un hecho la existencia de señales anómalas electromagnéticas potencialmente precursoras antes de un evento sísmico. ¿Cómo se podría plantear un precursor sísmico basado solo en un par de eventos importantes? Esto va en contra de las corrientes científicas modernas en donde la reproducibilidad de un resultado es crucial, detectar una señal anómala antes de un terremoto ya no es suficiente, debe existir suficiente evidencia estadística para plantear que los fenómenos están correlacionados y a partir de allí poder estudiar relaciones directas entre la señal precursora y el evento sísmico, y que sea esto, lo que permita un entendimiento más profundo sobre el origen físico de la señal precursora. A diferencia de otros fenómenos naturales, no se tiene acceso directo a la mecánica interna del movimiento y presiones que sufren volúmenes inmensos de roca en constante movimiento. Esto último nos empuja a lo que modernamente se conoce como la climatología sísmica, donde un análisis multilateral y muchas veces multidisciplinario se aplica para determinar niveles de riesgo a lo largo de varios potenciales precursores convencionales o no. La no convencionalidad no significa no funcionalidad, a pesar del abuso y sensacionalismo que experimentó esta ciencia durante los años noventa, los nuevos enfoques son necesarios para romper paradigmas y dogmas. En esta investigación no se propone algo tan extremo como un cambio de paradigma, más bien un enfoque distinto y único al problema de encontrar una señal precursora exaltando ciertos estados del campo electromagnético por medio de un fenómeno físico muy bien conocido en nuestros tiempos, la relatividad especial. Proponemos medir los campos desde un sistema en movimiento que pueda ver una magnificación de los campos EM anómalos asociados a la acumulación de estrés en un determinado volumen. El uso de muones para exaltar señales electromagnéticas anormales antes, durante y después de un terremoto es un enfoque no convencional, con antecedentes teóricos experimentales y tiene el potencial de ser calificado como un precursor sísmico “offline”. Esto solo fue posible gracias a estudiar el campo  $\vec{B}$ , en un marco de referencia  $S'$ , inspirados en la forma única en la que partículas de alta energía interactúan con el campo geomagnético. Sin embargo, esta investigación no deja sin justas interrogantes y retos, el primero de estos sería que no se observa una relación clara entre la amplitud de la señal precursora y la magnitud de los eventos registrados, aún entendiendo que podría ser un problema causado por el empleo de varias estaciones a varios miles de kilómetros entre ellas, este hecho debe ser estudiado con cuidado, debido a que si la forma o amplitud de la señal no guarda relación con la magnitud entonces el título de precursor tendría que ser revisado debido a que no sería capaz de predecir la magnitud de algún evento que se esté preparando. Un conocimiento más profundo de las características geográficas de cada zona hubiera podido guiar con mayor precisión cuáles eventos se pueden usar para calibrar y cuáles no; en el mismo tren de ideas, estudiar con más detalle como la contribución solar podría o no enmascarar una señal que provenga de la acumulación de estrés en una determinada zona, no entendemos exactamente como los ciclos solares pudieran estar

afectando los datos. Por otra parte, en esta investigación se usaron curvas ROC para determinar el grado de correlación entre el fenómeno sísmico en general y la señal precursora, pero el análisis tiene el potencial de ser estadísticamente mucho más contundente si se hace con un grupo de estaciones mayores que permita cubrir un área superior o experimentar con distintas variaciones en otros parámetros para estudiar como influyen en los resultados.

# Recomendaciones y futuras líneas de investigación.

## 4.7.1. Recomendaciones.

Se recomiendan los siguientes aspectos:

- Ampliar el estudio sobre la amplitud y forma del precursor relativista y su relación con la magnitud de los sismos.
- Conseguir datos de campo eléctrico que permita estudiar ambos campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  en un sistema de referencia  $S'$ .

## 4.7.2. Investigaciones futuras.

Como continuación de este trabajo se propone lo siguiente:

- El estudio se enfocó solo una de las componentes del tensor  $T_{ij}$  si existe alguna contribución a la señal precursora que esté relacionada con la actividad sísmica en una zona dicha contribución debería poderse medir en las demás componentes.
- Desarrollar un algoritmo para poder calcular el precursor relativista en vivo con el objetivo de hacer predicciones en varias zonas simultáneamente.
- Extraer data geomagnética de otros centros que brinden datos para tener mayor densidad de estaciones por área.

# Glosario y abreviaturas.

## 4.8. Glosario

- **Media:** Es el resultado de un conjunto de operaciones realizadas a varios números para que ese resultado pueda representar a todo un conjunto
- **Desviación estandár:** Es una medida que se utiliza para cuantificar la variación o la dispersión de un conjunto de datos numéricos.
- **Tolerancia:** Rango de error permitido, prescrito por la normatividad.
- **Outlier:** Es una observación anormal y extrema en una muestra estadística o serie temporal de datos que puede afectar potencialmente a la estimación de los parámetros del mismo.
- **Covarianza:** Es el valor que refleja en qué cantidad dos variables aleatorias varían de forma conjunta respecto a sus medias.

## 4.9. Abreviaturas

- **EM:** Electromagnético.
- **VP:** Verdaderos positivos.
- **FP:** Falsos positivos.
- **VN:** Verdaderos negativos.
- **FN:** Falsos negativos.
- **ROC:** Receiver Operating Characteristic.
- **AUC:** Area Under the Curve.
- **PPV:** Positive Prediction Value.
- **FPR:** False Positive Rate.
- **TPR:** True Positive Rate.
- **INTERMAGNET:** International Real-time Magnetic Observatory Network.

# Bibliografía

- [1] Villegas, J., Rosales, M. and Guada, C. (2012). Influencia de anomalías geomagnéticas locales en la variación del flujo de muones generados en la atmósfera por radiación cósmica. [Una propuesta para el estudio de precursores sísmicos.]. DOI:10.13140/RG.2.2.26111.02724
- [2] Rosales, M., Villegas, J., Rengifo, M. and Guada, C. (2020). Early Warning System based on non-Conventional Seismic Precursors. (A Relativistic Point of View) [An application to the great earthquake that occurred in Japan]. DOI:10.13140/RG.2.2.36829.44000
- [3] Prada, J., Rosales, M. and Guada, C. (2020). Montaje y calibración de un detector de Ioduro de Sodio-NaI(Tl), para medir la componente electromagnética de baja energía en una cascada de partículas de radiación cósmica. [La Hechicera, estado Mérida, 1893 m s.n.m., 800 g/cm<sup>2</sup> ]. DOI:10.13140/RG.2.2.36829.44000
- [4] Rosales, M., Jaime R. Lafaille, Martín A. Rengifo, Carlos E. Guada, Luis A. Núñez, Alejandra L. Melfo, Juan C. Villegas y Arturo J. Espinoza. (2015). Radiación Cósmica y Precursores Sísmicos. Revista del Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico, Tecnológico y de las Artes. Edición Especial N° 27-28.
- [5] Rosales, M., and LAGO Collaboration. (2011). The large aperture gamma ray observatory as an observational alternative at high altitude. Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, 40, 135-140.
- [6] Johnston, M. J. S. (2002). Electromagnetic fields generated by earthquakes. International Geophysics Series, 81(A), 621-636.
- [7] Geller, R. J. (1997). Earthquake prediction: a critical review. Geophysical Journal International, 131(3), 425-450.
- [8] Rosales, D., Vidal, E., and Orihuela, S. (2011). Principales variaciones geomagnéticas de periodo corto y periodo largo registrado en el observatorio de Huancayo. Perú, Reporte técnico *GEO201104 : Radio Observatorio de Jicamarca–Observatorio de Huancayo–Instituto Geofísico del Perú*.
- [9] Hough, S. E. (2016). Predicting the unpredictable: the tumultuous science of earthquake prediction. Princeton University Press.
- [10] Herraiz, M., Farelo, A., Cueto, M., and Mohíno, E. (2000). Una aproximación crítica a la propuesta de fenómenos ionosféricos como precursores sísmicos. Tendencias Actuales en la Investigación de la Ionosfera, Física de la Tierra, (12), 319-355.
- [11] Suárez-Ántola, R. (2006). El método de la memoria magnética de Dubov y las regiones de influencia de los defectos significativos. Uruguay.

- [12] Whitham, K., Berry, M. J., Heidebrecht, A. C., Kanasewich, E. R., Milne, W. G. (1976). Earthquake prediction in China. *Geoscience Canada*.
- [13] Ward, P. L. (1979). Earthquake prediction. *Reviews of Geophysics*, 17(2), 343-353.
- [14] Stanica, D. A., Stanica, D., and Vladimirescu, N. (2015). Long-range anomalous electromagnetic effect related to M9 Great Tohoku earthquake. *Earth Sci*, 4(1), 31-38. DOI: 10.11648/j.earth.20150401.13
- [15] Kappler, K. N., Schneider, D. D., MacLean, L. S., Bleier, T. E., and Lemon, J. J. (2019). An algorithmic framework for investigating the temporal relationship of magnetic field pulses and earthquakes applied to California. *Computers and Geosciences*, 133, 104317.
- [16] Park, S. K., Johnston, M. J., Madden, T. R., Morgan, F. D., and Morrison, H. F. (1993). Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: A review of observations and mechanisms. *Reviews of Geophysics*, 31(2), 117-132.
- [17] Bath, M., and Duda, S. J. (1964). Earthquake volume, fault plane area, seismic energy, strain, deformation and related quantities. *Annals of Geophysics*, 17(3), 353-368.
- [18] Li, M., Lu, J., Zhang, X., and Shen, X. (2019). Indications of Ground-based Electromagnetic Observations to A Possible Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Electromagnetic Coupling before the 12 May 2008 Wenchuan MS 8.0 Earthquake. *Atmosphere*, 10(7), 355.
- [19] Kachakhidze, M., Kachakhidze-Murphy, N., Khvitia, B., y Ramishvili, G. (2019). Large Earthquake Prediction Methods. *Open Journal of Earthquake Research*, 8(4), 239-254.
- [20] Petraki, E., Nikolopoulos, D., Nomicos, C., Stonham, J., Cantzos, D., Yannakopoulos, P., and Kottou, S. (2015). Electromagnetic pre-earthquake precursors: Mechanisms, data and models-A review. *Journal of Earth Science and Climatic Change*, 6(1), 1.
- [21] Benavides, V, A.R.d. (2017). Curvas ROC (Receiver-Operating-Characteristic) y sus aplicaciones. (Trabajo Fin de Grado Inédito). Universidad de Sevilla, Sevilla.
- [22] Gómez, J., Olmos, J., and Meseguer J. (1999). Cuestiones y problemas de electromagnetismo y semiconductores. España. ISBN: 84-7721-827-7
- [23] Das, R., and C. Meneses. 2021. “Scaling Relations for Energy Magnitudes”. *Journal of Geophysics* 64 (1), 1-11. <https://journal.geophysicsjournal.com/JofG/article/view/304>.
- [24] Stress-energy tensor of the electromagnetic field. (2021, February 28). Retrieved August 5, 2021, from <https://phys.libretexts.org/@go/page/3485>
- [25] Coles, R. L., and House, M. INTERMAGNET technical reference manual version 4.4 2008 Edited by: Benoît St-Louis.
- [26] Halzen, F., and Katz, U. (2013). The era of kilometer-scale neutrino detectors. *Advances in High Energy Physics*.
- [27] Kamiyama, M., Sugito, M., Kuse, M., Schekotov, A., and Hayakawa, M. (2016). On the precursors to the 2011 Tohoku earthquake: crustal movements and electromagnetic signatures. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(2), 471-492, DOI: 10.1080/19475705.2014.937773.

- [28] Basu, S. (2020) Cosmic Rays impact on Space Weather associated to Geomagnetic Activity with Solar Activity. IOSR Journal Of Applied Physics (IOSR-JAP) DOI: 10.9790/4861-1203033642
- [29] Matsu'ura, R. S. (2017). A short history of Japanese historical seismology: past and the present. *Geoscience Letters*, 4(1), 1-15.
- [30] Gutenberg, B., and Richter, C. F. (1955). Magnitude and energy of earthquakes. *Nature*, 176(4486), 795-795.
- [31] Okal, E. A. (2019). Energy and magnitude: A historical perspective. *Pure and Applied Geophysics*, 176(9), 3815-3849.
- [32] Tsuboi, C. (1956). Earthquake energy, earthquake volume, aftershock area, and strength of the earth's crust. *Journal of Physics of the Earth*, 4(2), 63-66.
- [33] Tsuboi, C. (1933). Notes on the mechanic strength of the earth's crust. *Bull. Earthq. Res. Inst*, 11, 488-499.
- [34] Conti, L., Picozza, P., and Sotgiu, A. (2022). A critical review of ground based observations of earthquake precursors. *Geospace Observation of Natural Hazards*.
- [35] Ouzounov, D., Pulinets, S., Kafatos, M. C., and Taylor, P. (2018). Thermal radiation anomalies associated with major earthquakes. *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*, Geophysical Monograph, 234, 259-274.
- [36] Zhong, M., Shan, X., Zhang, X., Qu, C., Guo, X., and Jiao, Z. (2020). Thermal Infrared and Ionospheric Anomalies of the 2017 Mw6. 5 Jiuzhaigou Earthquake. *Remote Sensing*, 12(17), 2843.

# Apéndice A

## Estaciones INTERMAGNET

IAGA	Name	Country	Colatitude	East Longitude	Institute
AAA	Alma Ata	Kazakhstan	46.8°	76.9°	IIRK
AAE*	Addis Ababa	Ethiopia	80.97°	38.77°	AAU IPGP
ABG	Alibag	India	71.38°	72.87°	IIG
ABK	Abisko	Sweden	21.642°	18.823°	SGU
AIA	Argentine Islands	Antarctica	155.25°	295.75°	NASC
ALE*	Alert	Canada	7.503°	297.647°	GSC
AMS	Martin de Vivies	French Southern and Antarctic Lands	127.8°	77.57°	EOST
API	Apia	Western Samoa	103.8°	188.22°	MNRE
AQU*	L'Aquila	Italy	47.62°	13.32°	INGV
ARS	Arti	Russia	33.567°	58.567°	IG UB RAS, GCRAS
ASC	Ascension Island	United Kingdom	97.95°	345.62°	BGS
ASP	Alice Springs	Australia	113.77°	133.88°	GA
BDV	Budkov	Czech Republic	40.92°	14.02°	ASCR
BEL	Belsk	Poland	38.16°	20.79°	PAS
BFE*	Brorfelde	Denmark	34.375°	11.672°	DTU
BFO	Black Forest	Germany	41.669°	8.325°	GGUKS
BLC	Baker Lake	Canada	25.682°	263.988°	GSC
BMT	Beijing Ming Tombs	China	49.7°	116.2°	IGGCAS
BNG*	Bangui	Central African Republic	85.67°	18.57°	IRD
BOU	Boulder	United States of America	49.86°	254.76°	USGS
BOX	Borok	Russia	31.93°	38.23°	GCRAS, IPGP
BRD	Brandon	Canada	40.13°	260.0261°	GSC
BRW	Barrow	United States of America	18.68°	203.38°	USGS

IAGA	Name	Country	Colatitude	East Longitude	Institute
BSL	Stennis Space Center	United States of America	59.65°	270.36°	USGS
CBB	Cambridge Bay	Canada	20.877°	254.969°	GSC
CKI	Cocos-Keeling Islands	Australia	102.1875°	96.8336°	GA
CLF	Chambon la Foret	France	41.98°	2.27°	IPGP
CMO	College	United States of America	25.13°	212.14°	USGS
CNB	Canberra	Australia	125.32°	149.36°	GA
CNH	Changchun	China	45.92°	124.86°	CEA
CSY	Casey Station	Antarctica	156.283°	110.533°	GA
CTA	Charters Towers	Australia	110.1°	146.3°	GA
CYG	Cheongyang	Republic of Korea	53.63°	126.854°	KMA
CZT	Port Alfred	French Southern and Antarctic Lands	136.43°	51.87°	EOST
DED	Deadhorse	United States of America	19.64°	211.21°	USGS
DLR*	Del Rio	United States of America	60.5°	259.08°	USGS
DLT	Dalat	Vietnam	78.06°	108.48°	VAST, IPGP
DMC	Dome C	Antarctica	165.25°	124.167°	EOST, INGV
DOU	Dourbes	Belgium	39.9°	4.6°	RMIB
DRV	Dumont d'Urville	Antarctica	156.67°	140.01°	EOST
DUR	Duronia	Italy	48.65°	14.466°	INGV
EBR	Ebro	Spain	49.043°	0.333°	OEB
ESK	Eskdalemuir	United Kingdom	34.68°	356.8°	BGS
EYR	Eyrewell	New Zealand	133.474°	172.393°	GNS
FCC	Fort Churchill	Canada	31.241°	265.912°	GSC
FRD	Fredericksburg	United States of America	51.8°	282.63°	USGS
FRN	Fresno	United States of America	52.91°	240.28°	USGS
FUR	Furstenfeldbruck	Germany	41.83°	11.28°	LMU
GAN	Gan	Maldives	89.3054°	73.1537°	ETH
GCK	Grocka	Serbia	45.4°	20.8°	GIG
GDH	Qeqertarsuaq	Greenland	20.748°	306.467°	DTU
GLN*	Glenlea	Canada	40.355°	262.880°	GSC
GNA*	Gnangara	Australia	121.8°	116.0°	GA
GNG	Gingin	Australia	121.356°	115.715°	GA
GUA	Guam	United States of America	76.41°	144.87°	USGS
GUI	Guimar-Tenerife	Spain	61.68°	343.57°	IGNS

IAGA	Name	Country	Colatitude	East Longitude	Institute
GZH	Zhaoqing	China	67°	112.5°	CEA
HAD	Hartland	United Kingdom	39°	355.52°	BGS
HBK	Hartebeesthoek	South Africa	115.88°	27.71°	SANSA
HER	Hermanus	South Africa	124.43°	19.23°	SANSA
HLP	Hel	Poland	35.39°	18.82°	PAS
HON	Honolulu	United States of America	68.68°	202.0°	USGS
HRB	Hurbanovo	Slovakia	42.14°	18.19°	SAS
HRN	Hornsund	Norway	13°	15.37°	PAS
HUA	Huancayo	Peru	102.05°	284.67°	IGP
HYB	Hyderabad	India	72.6°	78.6°	NGRI, GFZ
IPM	Isla de Pascua Mataveri	Chile	117.2°	250.58°	DMC, IPGP
IQA	Iqaluit	Canada	26.247°	291.482°	GSC
IRT	Irkutsk	Russia	37.73°	104.45°	ISTP SB RAS
ISK*	Kandilli	Turkey	48.9°	29.1°	KEORI
IZN	Iznik	Turkey	49.5°	29.72°	KEORI
JAI	Jaipur	India	63.08°	75.80°	IIG
JCO	Jim Carrigan Observatory	United States of America	19.644°	211.201°	HAL, BGS
KAK	Kakioka	Japan	53.77°	140.18°	JMA
KDU	Kakadu	Australia	102.69°	132.47°	GA
KEP	King Edward Point	South Georgia and the South Sandwich Islands	144.2821°	323.5071°	BGS
KHB	Khabarovsk	Russia	42.39°	134.69°	IKIR
KIV	Kiev	Ukraine	39.28°	30.3°	NASU
KMH	Keetmanshoop	Namibia	116.54°	18.110°	SANSA, GFZ
KNY	Kanoya	Japan	58.58°	130.88°	JMA
KOU	Kourou	French Guiana	84.79°	307.27°	IPGP
LER	Lerwick	United Kingdom	29.87°	358.82°	BGS
LNP*	Lunping	Taiwan	65°	121.2°	DGT
LON	Lonjsko Polje	Croatia	44.5919°	16.6592°	UNIZG
LOV*	Lovoe	Sweden	30.66°	17.82°	SGU
LRM	Learmonth	Australia	112.22°	114.1°	GA
LVV	Lviv	Ukraine	40.1°	23.75°	NASU
LYC	Lycksele	Sweden	25.4°	18.8°	SGU
LZH	Lanzhou	China	53.9°	103.84°	CEA, IPGP
MAB	Manhay	Belgium	39.702°	5.682°	RMIB
MAW	Mawson	Antarctica	157.6°	62.88°	GA
MBC*	Mould Bay	Canada	13.685°	240.638°	GSC

IAGA	Name	Country	Colatitude	East Longitude	Institute
MBO	Mbour	Senegal	75.62°	343.03°	IPGP, IRD
MCQ	Macquarie Island	Australia	144.5°	158.95°	GA
MEA	Meanook	Canada	35.384°	246.653°	GSC
MGD	Magadan	Russia	29.949°	150.728°	IKIR
MID*	Midway Island	United States of America	61.79°	182.62°	USGS
MMB	Memambetsu	Japan	46.09°	144.19°	JMA
NAQ	Narsarsuaq	Greenland	28.84°	314.558°	DTU
NCK	Nagycenk	Hungary	42.37°	16.72°	HAS
NEW	Newport	United States of America	41.73°	242.88°	USGS
NGK	Niemegk	Germany	37.93°	12.68°	GFZ
NUR	Nurmijarvi	Finland	29.49°	24.66°	FMI
NVS	Novosibirsk	Russia	35.15°	83.23°	IPGG SB RAS
ORC	Orcadas	Argentina	150.737°	315.26°	SMN
OTT	Ottawa	Canada	44.597°	284.448°	GSC
PAF	Port-aux-Francais	French Southern and Antarctic Lands	139.35°	70.26°	EOST
PAG	Panagjurishte	Bulgaria	47.5°	24.2°	NIGGG BAS, GFZ
PBQ*	Poste-de-la-Baleine	Canada	34.723°	282.255°	GSC
PEG	Pedeli	Greece	51.9°	23.9°	IGME
PET	Paratunka	Russia	37.029°	158.248°	IKIR
PHU	Phuthuy	Vietnam	68.97°	105.95°	VAST, IPGP
PIL	Pilar	Argentina	121.4°	296.12°	SMN
PPT	Pamatai	French Polynesia	107.57°	210.42°	IPGP
PST	Port Stanley	Falkland Islands	141.7°	302.11°	BGS
QSB*	Qsaybeh	Lebanon	56.1°	35.6°	NCGR, IPGP
RES	Resolute Bay	Canada	15.31°	265.105°	GSC
SBA	Scott Base	Antarctica	167.85°	166.78°	GNS
SBL	Sable Island	Canada	46.0679°	299.9905°	BGS
SFS	San Fernando	Spain	53.333°	354.055°	RIOA
SHU	Shumagin	United States of America	34.65°	199.54°	USGS
SIT	Sitka	United States of America	32.94°	224.67°	USGS
SJG	San Juan	United States of America	71.89°	293.85°	USGS
SOD	Sodankyla	Finland	22.63°	26.63°	SGO
SON	Sonmiani	Pakistan	64.8832°	66.4487°	SUPARCO

IAGA	Name	Country	Colatitude	East Longitude	Institute
SPG	Saint Petersburg	Russia	29.458°	29.716°	GCRAS
SPT	San Pablo-Toledo	Spain	50.45°	355.65°	IGNS
STJ	St John's	Canada	42.405°	307.323°	GSC
SUA	Surlari	Romania	45.32°	26.25°	GIR, GFZ
TAM	Tamanrasset	Algeria	67.21°	5.53°	CRAAG, IPGP
TAN*	Antananarivo	Madagascar	108.917°	47.552°	IOGA, EOST
TDC	Tristan da Cunha	Tristan da Cunha	127.067°	347.685°	GFZ, DTU
TEO*	Teoloyucan	Mexico	70.25°	260.81°	IG/UNAM
THL	Qaanaaq (Thule)	Greenland	12.53°	290.773°	DTU
THY	Tihany	Hungary	43.1°	17.89°	MFGI
TIK*	Tixie Bay	Russia	18.4°	129.0°	IZMIRAN
TRW	Trelew	Argentina	133.3°	294.7°	UNLP, RMIB
TSU	Tsumeb	Namibia	109.202°	17.584°	SANSA
TUC	Tucson	United States of America	57.82°	249.27°	USGS
UPS	Uppsala	Sweden	30.097°	17.353°	SGU
VAL	Valentia	Ireland	38.067°	349.75°	IMS
VIC	Victoria	Canada	41.48°	236.580°	GSC
VNA	Neumayer Station	Antarctica	160.683°	351.718°	AWI, GFZ
VOS	Vostok	Antarctica	168.464°	106.835°	AARI
VSS	Vassouras	Brazil	112.4°	316.35°	ON, GFZ
WIC	Conrad Observatory	Austria	42.0695°	15.8657°	ZAMG
WMQ	Urumqi	China	46.19°	87.71°	CEA
WNG	Wingst	Germany	36.26°	9.07°	GFZ
YAK	Yakutsk	Russia	28.04°	129.66°	IKFIA, GFZ
YKC	Yellowknife	Canada	27.52°	245.518°	GSC

# Apéndice B

## Programas utilizados en MATLAB.

### B.1. Lee Data INTERMAGNET.

```
% LEE DATA INTERMAGNET
%=====%
% DESCRIPCIÓN: Este programa permite la lectura de una determinada carpeta
% con los documentos descomprimidos sacados de INTERMAGNET, elimina los
% esparcios, lleva la señal a media = 0 y lo guarda en con el formato de
% nombre deseado.
% SALIDA: 'Japon_MMB_2004_2021' Bx Bxo By Byo Bz Bzo F Fo Bxo_Mo Byo_Mo ...
%   Bzo_Mo Bxo_Sp Byo_Sp Bzo_Sp Porcentaje_Datos_Malos;
%=====
band=0;
clear all; close all; clc
band=0;
%DIRECTORIO:
File= 'C:\Tesis\Data\Japon_2001_2015\Japon_MMB\Japon_MMB_2004_2021';
eval(['cd ', File]);
%EMPIEZA A CARGAR LOS DATOS
F = [];
a = dir ('*.min');
h = waitbar(0, 'Please wait... preparing files ');
for i=1:length(a)
    b = a(i).name;
    c = b(4:11);
    y = str2double(c(1:4));
    m = str2double(c(5:6));
    d = str2double(c(7:8));
    F(i) = datenum([y,m,d]);
    waitbar(i/length(a),h)
end
close(h)
[~,jo] = sort(F);
a = a(jo);
Bxo = zeros(length(F),1434);
Byo = zeros(length(F),1434);
Bzo = zeros(length(F),1434);
Fo = zeros(length(F),1434);

h = waitbar(0, 'Please wait... generating format of data Bx,By and Bz');

for i=1:length(a)
    %eval(['cd ', a(i).name]);
    c = importdata(a(i).name);
    C = c(27:end,:);
    cm = cell2mat(C);
    fo = datenum(datestr(cm(:,1:24)));
    bx = str2num(cm(:,33:42));
    by = str2num(cm(:,42:50));
    bz = str2num(cm(:,52:60));
    vb = 1:1434; %length(bx); % SI REPORTA ERROR USAR 1437
    Bxo = [Bxo;bx(vb)];
    Byo = [Byo;by(vb)];
    Bzo = [Bzo;bz(vb)];
    Fo = [Fo;fo(vb)];
    clc
    disp([round((i/length(a))*100)])
end
% VISUALIZACION
%=====
if band == 1
    Fs = Fo(:);
    t = (Fs - Fs(1))/365; %TIEMPO EN AÑOS
    set(figure(1), 'Position',[3 414 1021 249], 'Color', 'W')
    plot(t,Bxo(:),'r', hold on)
    plot(t,Byo(:),'g')
    plot(t,Bzo(:),'b'), grid, hold off
    title('Bx (r),By (g) and Bz (b)')
    xlabel('Time in years')
    ylabel ('Amplitude in nT')
end
```

```

cd 'C:\Tesis\Datos\Japon_2001_2015'; %salida de los documentos
[Porcentaje_Datos_Malos]=Porcentaje_Indices_malos(Bxo,Byo,Bzo);
[Bxo_Sp,Byo_Sp,Bzo_Sp]=Limpia_Espurios_data_bxo_byo_bzo(Bxo,Byo,Bzo,band);
[Bxo_Mo]=Corrige_saltos_data(Bxo_Sp); %Corrige el salto en la data
[Byo_Mo]=Corrige_saltos_data(Byo_Sp); %Corrige el salto en la data
[Bzo_Mo]=Corrige_saltos_data(Bzo_Sp); %Corrige el salto en la data
Bxo_Sp=Bxo_Sp'; Byo_Sp=Byo_Sp'; Bzo_Sp=Bzo_Sp';
Bx = Bxo_Sp(:);
By = Byo_Sp(:);
Bz = Bzo_Sp(:);
Fo = Fo';
%SALIDA:
save 'Japon_MMB_2004_2021' Bx Bxo By Byo Bz Bzo F Fo Bxo_Mo Byo_Mo ...
Bzo_Mo Bxo_Sp Byo_Sp Bzo_Sp Porcentaje_Datos_Malos;
%FIN
%=====

```

### B.1.1. Limpia espurios

```

%=====%
%LIMPA_ESPURIOS_DATA_BXO_BYO_BZO
%=====%
% DESCRIPCIÓN: Dado un tren de datos Bxo, Byo, Bzo en el formato:
% size(B(x,y,z)o) = Minutos x día
% Encontrará los valores espurios marcado por intermagnet, una vez
% encontrado, determinará si dicho espurio tiene vecinos espurios, si no
% tiene, el punto aislado espurio es sustituido por la media de los puntos
% adyacentes, si tiene vecinos espurios, es sustituido por datos buenos del
% día pasado.
% SALIDA: B(x,y,z)o En el mismo formato de entrada y sin espurios en el
% tren de datos.
%=====%
function [Bxo,Byo,Bzo]=Limpia_Espurios_data_bxo_byo_bzo(Bxo,Byo,Bzo,band)
Ind = [];
ind_x=[];
ind_y=[];
ind_z=[];
close all;

% para aquellos que no tengan un punto final o al principio ,se
% sustituye la data del día anterior (la faltante)

for j=1:size(Bxo,1)
    ind_x = find(Bxo(j,:)>= 90000);
    ind_y = find(Byo(j,:)>= 90000);
    ind_z = find(Bzo(j,:)>= 90000);

    if band==1
        % waitbar(j/size(Bxo,1),h)
        subplot(2,3,1);hold on
        plot(Bxo(j,:));title(' datos no corregido Bx');
        xlabel('Minutos');
        ylabel('campo magnetico');
        subplot(2,3,2);hold on
        plot(Byo(j,:));title(' datos no corregido By');
        xlabel('Minutos');
        ylabel('campo magnetico');
        subplot(2,3,3);hold on
        plot(Bzo(j,:));title(' datos no corregido Bz');
        xlabel('Minutos');
        ylabel('campo magnetico');
        pause(0.0001);
    end
    if ((length(ind_x)>0) | (length(ind_y)>0) | (length(ind_z)>0))
        Ind = [Ind;j];
        % función sustituye un vector de datos con data corrupta
        % por la media de los puntos más cercanos
        %PARA BXO
        %
        n=0;
        while ((length(ind_x)>0))
            n=n+1;
            if( (length(ind_x)>0) )
                ig=Bxo(j,:);
                a=ind_x;z=[];
                % Los siguientes condicionales son para cuando no hay punto
                % final o inicial para hacer la media
                if ((ig(1,size(ig,2))== 99999) | ((ig(1,1)== 99999)))
                    if (ig(1,size(ig,2))== 99999)
                        % cuando eso pasa, se rellena con la data del día
                        % anterior a la misma hora
                        Bxo(j,a(1):size(Bxo,2))=Bxo(j-n,a(1):size(Bxo,2));
                    else
                        Bxo(j,1:length(a))=(Bxo(j-n,1:length(a)));
                    end
                else
                    % función que recibe un vector de datos con indices
                    % corruptos y devuelve un vector del mismo tamaño
                    % pero limpio (usando la media de los vecinos)
                    for t=1:length(a)
                        %ya que el vector esta ordenado al valor previo
                        %estamos seguros que es correcto

```

```

        prev=ig(a(t)-1);
        z=t;
        % si el proximo valor tambien esta corrupto
        % vemos el de mas arriba hasta encontrar uno limpio
        while((z+1)<= length(a) && (a(z)+1 ==a(z+1)))
            z=z+1;
        end
        next=ig(a(z)+1);
        ig(a(t))=(prev+next)/2;
    end
    Bxo(j,:)=ig;
end
ind_x = find(Bxo(j,:)>= 99998);

%PARA BYO
%
n=0;
while ((length(ind_y) >0))
    n=n+1;
    if( (length(ind_y) >0) )
        ig=Byo(j,:);a=ind_y;z=[];prev=[];next=[];
        if ((ig(1, size(ig,2))== 99999) | ((ig(1,1)== 99999)))
            if (ig(1, size(ig,2))== 99999)
                Byo(j,a(1):size(Byo,2))=Byo(j-n,a(1):size(Byo,2));
            else
                Byo(j,1:(length(a)))=(Byo(j-n,1:length(a)));
            end
        else
            for t=1:length(a)
                % ya que el vector esta ordenado al valor previo
                % estamos seguros que es correcto
                prev=ig(a(t)-1);
                z=t;
                % si el proximo valor tambien esta corrupto vemos
                % el de mas arriba hasta encontrar uno limpio
                while((z+1)<= length(a) && (a(z)+1 ==a(z+1)))
                    z=z+1;
                end
                next=ig(a(z)+1);
                ig(a(t))=(prev+next)/2;
            end
            Byo(j,:)=ig;ig=[];
        end
    end
    ind_y = find(Byo(j,:)>= 99998);

end
%PARA BZO
%
n=0;
while ((length(ind_z) >0))
    n=n+1;
    if( (length(ind_z) >0) )
        ig=Bzo(j,:);a=ind_z;z=[];prev=[];next=[];
        if ((ig(1, size(ig,2))== 99999) | ((ig(1,1)== 99999)))
            if (ig(1, size(ig,2))== 99999)
                Bzo(j,a(1):size(Bzo,2))=Bzo(j-n,a(1):size(Bzo,2));
            else
                Bzo(j,1:(length(a)))=(Bzo(j-n,1:length(a)));
            end
        else
            for t=1:length(a)
                % ya que el vector esta ordenado al valor previo
                % estamos seguros que es correcto
                prev=ig(a(t)-1);
                z=t;
                % si el proximo valor tambien esta corrupto vemos
                % el de mas arriba hasta encontrar uno limpio
                while((z+1)<= length(a) && (a(z)+1 ==a(z+1)))
                    z=z+1;
                end
                next=ig(a(z)+1);
                ig(a(t))=(prev+next)/2;
            end
            Bzo(j,:)=ig;
        end
    end
    ind_z = find(Bzo(j,:)>= 99998);

end
%
%Muestra los datos sin espurios
if band==1
    hold on; subplot(2,3,4);
    plot(Bxo(j,:)); title('datos sin espurios Bx'); xlabel('Minutos');
    ylabel('campo magnetico');
    hold on; subplot(2,3,5);
    plot(Byo(j,:)); title('datos sin espurios By'); xlabel('Minutos');
    ylabel('campo magnetico');
    hold on; subplot(2,3,6); hold on
    plot(Bzo(j,:)); title('datos sin espurios Bz'); xlabel('Minutos');
    ylabel('campo magnetico');
end

```

```

end
end
% FIN
%=====
```

## B.1.2. Corrige saltos en los datos

```

% CORRIGE_SALTOS_DATA
%=====
% DESCRIPCIÓN: Función que toma un tren de datos Bxo, Byo, Bzo y resta la media de cada día para llevarla a cero
% SALIDA: Bxn con media diaria igual a cero
%=====
function [BxN]=Corrige_saltos_data(Bio)
mx=mean(Bio);
mr = repmat(mx, size(Bio,1),1);
BxN = Bio-mr;
```

## B.1.3. Porcentaje indices malos.

```

% PORCENTAJE INDICES DAÑADOS
%=====
% DESCRIPCIÓN: Calcula el porcentaje de índices espurios en un tren de
% datos otorgado por intermagnet
% SALIDA: Porcentaje de datos dañados.
%=====

function [Porcentaje]=Porcentaje_Indices_malos(Bxo,Byo,Bzo)
Pr=[];
ind_x = find(Bxo(:) >= 90000);
ind_y = find(Byo(:) >= 90000);
ind_z = find(Bzo(:) >= 90000);
Pr(1)=size(ind_x,1)/(size(Bxo,1)*size(Bxo,2));
Pr(2)=size(ind_y,1)/(size(Byo,1)*size(Byo,2));
Pr(3)=size(ind_z,1)/(size(Bzo,1)*size(Bzo,2));
Porcentaje= Pr.*100;
end
% FIN
%=====
```

## B.2. Estaciones INTERMAGNET.

```

% ESTACIONES INTERMAGNET
%=====
% Entradas:
% Estaciones intermagnet:
% [Contiene la localización de las estaciones INTERMAGNET]
% IEBQuakesExport31767_m5:
% [Contiene la información relacionada a los sismos]
% DESCRIPCIÓN: Muestra distintas representaciones gráficas de los archivos:
% Con eso da la opción de filtrar por radio, por magnitud, por año inicial
% y final, por mes y por caso, también da la opción de:
% caso = 1 se abre un mapa mundial y se centra en un terremoto cercano
% al click, busca 3 estaciones cercanas y te dice la distancia
% terremoto-estaciones.
% caso = 2 Al hacer click en el mapa, se centra en la estación más cercana
% al click y marca todos los terremotos dentro del radio seleccionado.
% caso = 3 Muestra un mapa general mundial y sus sismos.
% caso = 4 Dando el nombre directo de 3 estaciones INTERMAGNET,
% permite manejar los radios individuales de cada estación y muestra un
% mapa de los sismos cercanos además de generar las tablas de salida que
% pueden ser usados posteriormente.
% SALIDA: T % Tabla con datos sísmicos de la zona.
%=====

clear all
close all
%% Filtrado de entradas
%Entradas
%=====

radio=300; % En kilometros
Mo=6; % Filtro de magnitud mínima
Depth_max = 1000; % PROFUNDIDAD MAXIMA EN KM
T1 = 2004; % TIEMPO INICIAL DE LA DATA
T2 = 2015; % TIEMPO FINAL DE LA DATA
M1 = 1; % MES INFERIOR
M2 = 13; % MES SUPERIOR
caso=4;
%=====

Time1 = T1;
Time2 = T2;

if caso == 4
    r1=500;%radio estacion 1
    r2=500;%radio estacion 2
    r3=500;%radio estacion 3
    display('Caso 4. Estaciones:')
    Label_Station={'KAK','KNY','MMB'}
end
```

```

% generando un area en el cual se tomarán los sismos dentro de ese area
% solamente
%=====
imprimir=0; %0 = no guarda imagenes ; 1= si guarda
if imprimir==1
    fileName='MapaTerremotos_Estaciones_Generado'; %MapaMundiGuardado
    fileNameC1='ZonaCasol';
    fileNameC2='ZonaCaso2';
    save Etiquetas_de_losSismos_vs_Tiempo_Japon2 YearS MonthS DayS
end
%=====
% Carga las entradas necesarias para procesar:
load ('Estaciones_intermagnet');load ('IEBQuakesExport31767_m5');
latitud=90-Colatitude ; %90-colatitud=latitud
Region_Total = Region;
Long_Intermagnet=EastLongitude;
ind = find(Long_Intermagnet >=180);
Long_Intermagnet(ind) = Long_Intermagnet(ind) - 360;
Long_Intermagnet_New = Long_Intermagnet;
%=====
ind_m = [];
%=====
% LAZO PARA LOCALIDADES Y MAGNITUDES SELECCIONADAS
%=====
ind_o = find(Mag >= Mo & Depthkm <= Depth_max & Year >= T1 & Year <= T2 & Month >= M1 & Month <= M2);
ind_m = [ind_m;ind_o];
Ind_M = ind_o;
Number_total_of_Events = length(Ind_M);

% SOLO LOS DATOS FILTRADOS
%=====
Day = Day(Ind_M);
Depthkm = Depthkm(Ind_M);
IRISID = IRISID(Ind_M);
Lat = Lat(Ind_M);
Lon = Lon(Ind_M);
Mag = Mag(Ind_M);
Month = Month(Ind_M);
Region = Region(Ind_M);
TimeUTC = TimeUTC(Ind_M);
Timestamp = Timestamp(Ind_M);
Year = Year(Ind_M);
%=====
%%MUESTRA LOS MAPAS PARA EMPEZAR
% Muestra las estaciones
figure1 = figure(1);
axes1 = axes('Parent',figure1);
set(axes1,'ClippingStyle','rectangle','Color',[0.8313725490 0.815686274509 0.78431372549], 'DataAspectRatio',[1 1
1]);
% -----
% pinta estaciones:
geoshow('landareas.shp', 'FaceColor', [0 0 0]);hold on; ylim([-90 85]);
xlim([-180 180]);grid
geoshow(latitud,Long_Intermagnet,'DisplayType','point','Marker','.', 'MarkerEdgeColor','g','MarkerSize',17)
title('Longitude(x axes),Latitude(y axes), g=Stations');
title({['Posicion de estaciones Intermagnet', 'Numero de terremotos mostrados: ', num2str(length(Mag))]} );
xlabel('Longitude');
ylabel('Latitude');
% pinta terremotos: de acuerdo a su magnitud:
color2=linspace(0, 1, length(Mag));% generates N points between X1 and X2.
%%GRAFICA TERREMOTOS:
for i=1:length(Mag)
    i=length(Mag)-i+1;
    geoshow(Lat(i),Lon(i),'DisplayType','point','Marker','.', 'MarkerEdgeColor',[0.18+(Mag(i)/10 - 0.09999)
    color2(i) 0], 'MarkerSize',exp(Mag(i)/2.45))
end
% Imprime la figura:
if imprimir==1;
    ImprimeFigura(fileName)
end
% contra más rojo, mayor magnitud, se puede seguir ajustando
%%CASO 2:
% CASO 2:
for resumir2=1:1
    if caso==2
        close (figure(2))
        [xo,yo] = ginput(1); % toma un punto del mapa
        [Numero_Estacion] = Busca_Estacion_cercana...
        (latitud,Long_Intermagnet,xo,yo);
        %=====
        % Una vez obtenido el sitio, procedemos a buscar terremotos
        % en el radio especificado:
        ELON=Long_Intermagnet(Numero_Estacion);
        ELAT=latitud(Numero_Estacion);
        [T_Dentro_Radio_indices, Distancias_respectivas] = Terremotos_Radio(Lon,Lat,ELON,ELAT,radio);
        %%VISUALIZA UN CIRCULO Y BORRA LO DEMAS
        % Visualiza la region "filtrada" con un circulo
        %un circulito:
        theta = linspace(0,2*pi);
        r = radio/111.1;
        xc = Long_Intermagnet(Numero_Estacion);
        yc = latitud(Numero_Estacion);
        % Hace un circulo:
        x = r*cos(theta) + xc;
        y = r*sin(theta) + yc;
        %% visualiza solo lo que este dentro del circulo:
        figure(2)
        figure1 = figure(2);
        axes1 = axes('Parent',figure1);
        set(axes1,'ClippingStyle','rectangle','Color',[0.831372549019608 0.815686274509804 0.784313725490196], '

```

```

    DataAspectRatio',[1 1 1]);
geoshow('landareas.shp','FaceColor',[0 0 0]); hold on;
xlim([(x(50)-1) (x(100)+1)]); ylim([y(75) y(25)]);
grid
geoshow(latitud,Long_Intermagnet,'DisplayType','point','Marker','x','LineWidth',10,'MarkerEdgeColor'
,[1.0000 0.8431 0],'MarkerSize',24)
geoshow(latitud(Numeros_Estacion), Long_Intermagnet(Numeros_Estacion),'DisplayType','point','Marker','.','
LineWidth',3,'MarkerEdgeColor','g','MarkerSize',12)
text(Long_Intermagnet,latitud+1.15,IAGA,'Color',[ 0 0.4980 0], 'FontSize',13,'HorizontalAlignment','Center
','BackgroundColor',[0.9412 0.9412 0.9412])
title(['Geographical position and events, central Station:' char(IAGA(Numeros_Estacion)) ', Date:'
num2str(Time1)' to 'num2str(Time2)])
% -----
DayS=Day(T_Dentro_Radio_indices);
MonthS=Month(T_Dentro_Radio_indices);
RegionS=Region(T_Dentro_Radio_indices);
TimeUTCS=TimeUTC(T_Dentro_Radio_indices);
TimestampS=Timestamp(T_Dentro_Radio_indices);
YearS = Year(T_Dentro_Radio_indices);
DepthkmS=Depthkm(T_Dentro_Radio_indices);
IRISIDS=IRISID(T_Dentro_Radio_indices);
LatS=Lat(T_Dentro_Radio_indices);
LonS=Lon(T_Dentro_Radio_indices);
MagS=Mag(T_Dentro_Radio_indices);
% Plot terremotos
% Plot terremotos
for i=1:length(MagS)
i=length(MagS)-i+1;
geoshow(LatS(i),LonS(i),'DisplayType','point','Marker','.', 'MarkerEdgeColor',[0.29+(MagS(i)/10 -
0.09) color2(i) 0],'MarkerSize',(MagS(i)^2.2))
geoshow(LatS(i),LonS(i),'DisplayType','point','Marker','.', 'MarkerEdgeColor',[0.29+(MagS(i)/10 -
0.09) 0.5 color2(i)],'MarkerSize',(MagS(i)^1.8))
end
plot(x,y,'—','LineWidth',3)
%TABLA DISTANCIAS FINAL:
if length(Distancias_respectivas)>=1 %Evita un error
T=table(MagS,round(Distancias_respectivas),LatS,LonS,DayS,MonthS,YearS,TimeUTCS,TimestampS,DepthkmS,
IRISIDS,'VariableNames',{'Magnitud' 'DistanciasAEstacionKm' 'Latitud' 'Longitud' 'Dia' 'Mes',
'Year' 'TimeUTC',...
'Timestamp' 'DepthkmS' 'IRISIDS'});
else
T=table(num2str(MagS),round(Distancias_respectivas),num2str(LatS),num2str(LonS),DayS,MonthS,YearS,
TimeUTCS, ...
num2str(TimestampS),IRISIDS,DepthkmS,'VariableNames',{'Magnitud' 'DistanciasAEstacionKm' 'Latitud
' 'Longitud' ...
'Dia' 'Mes' 'Year' 'TimeUTC' 'Timestamp' 'IRISIDS' 'DepthkmS'});
end
display(T)
if imprimir==1; %Imprime la figura
ImprimeFigura(fileNameC2)
end
Ejes_Visibles(2); xlabel(['Longitude (' char(176) ')']);
ylabel(['Latitude(' char(176) ')']);
end
Parametros_entrada.radio = radio;
Parametros_entrada.Magnitud_Minima = Mo;
Parametros_entrada.Profundidad_Max = Depth_max;
Parametros_entrada.Year_Ini = T1;
Parametros_entrada.Year_Final = T2;
end
%PARA GUARDAR LAS SALIDAS DESCOMENTAR ESTO:
if caso == 2;
Dist_respectivas=round(Distancias_respectivas);
% save ('Etiquetas_KNYEntrenamiento2','T','Parametros_entrada',...
% , 'MagS','Dist_respectivas','LatS','LonS','DayS','MonthS',...
% , 'YearS','TimeUTCS','TimestampS','IRISIDS','DepthkmS')
% save ('Etiquetas_KNYProduccion2','T','Parametros_entrada',...
% , 'MagS','Dist_respectivas','LatS','LonS','DayS','MonthS',...
% , 'YearS','TimeUTCS','TimestampS','IRISIDS','DepthkmS')
end
%%CASO 1:
for resumir=1:1
if caso==1
figure(1)
[xo,yo]=ginput(1);
% Busca el terremoto m?s cercano al click:
[Numeros_Terremoto]=Busca_Terremoto_cercano(Lat,Lon,xo,yo);
LatS1=Lat(Numeros_Terremoto);
LonS1=Lon(Numeros_Terremoto);
ELON1=Long_Intermagnet;
ELAT1=latitud;
[E_Dentro_Radio_indices,Distancias_respectivasE] =Estaciones_Radio(LatS1,LonS1,ELON1,ELAT1,radio);
% SALIDA:
%TABLA DISTANCIAS FINAL:
display({'Magnitud:' num2str(Mag(Numeros_Terremoto))});
if length(Distancias_respectivasE)>=1
T2=table((IAGA(E_Dentro_Radio_indices),round(Distancias_respectivasE),Long_Intermagnet(
E_Dentro_Radio_indices),...
ELAT1(E_Dentro_Radio_indices),Country(E_Dentro_Radio_indices), 'VariableNames',{ 'IAGA' ,
'Distancias_km' 'Longitud' 'Latitud' 'Country'}));
else
T2=table(IAGA(E_Dentro_Radio_indices),round(Distancias_respectivasE),num2str(Long_Intermagnet(
E_Dentro_Radio_indices)),...
num2str(ELAT1(E_Dentro_Radio_indices)),Country(E_Dentro_Radio_indices), 'VariableNames',{ 'IAGA' ,
'Distancias_km' 'Longitud' 'Latitud' 'Country'}));
end
T2 = sortrows(T2, 'Distancias_km', 'ascend');
display(T2)
% FIN DE LA SECCION DE TABLAS

```

```

if imprimir==1; %Imprime la figura:
    ImprimeFigura(fileNameC1)
end
end
% Las salidas de ambos casos son las tablas T Y T2 para el caso 2 y 1
% respectivamente.
%%CASO 3
% Este caso simplemente es otra manera de ver los datos
%NO LO RECOMIENDO:
for resumir3=1:1
    if caso==3 %Visualiza mapa y pinta las estaciones con su nombre
        close (figure(3))
        figure(3)
        ax = worldmap('World');
        land = shaperead('landareas', 'UseGeoCoords', true);
        geoshow(ax, land, 'FaceColor', [0.5 0.7 0.5])
        title('Longitude(x axes),Latitude(y axes)')
        scatterm(latitud,EastLongitude,10,'filled')
        scalaruler('units','km')
        textm(latitud+1,EastLongitude+1,IAGA,'FontSize',10);
        %
        scatterm(Lat,Lon,9,'filled','r');
        plotm(latitud,EastLongitude,'xb','LineWidth',2)
        % para cosas mas dinamicas, revisa: Text Properties Clipping
        C = num2cell(Year);
        D = num2cell([1:p]);
        textm(Lat,Lon,C,'FontSize',7); %GET(H)
    end
end
%%CASO 4
if caso == 4;
    %BUSCA LAS POSICIONES DE LAS ESTACIONES:
    idx = [];
    Ind_station = [];
    for j=1:length(Label_Station);
        for i=1:length(IAGA);
            idx = strfind(IAGA(i),Label_Station(j));
            if (cell2mat(idx)== 1)
                %Contiene el indice en la variable IAGA
                Ind_station = [Ind_station,i];
                i = length(IAGA);
            end
        end
    end
    clearvars j idx i
    %Genera area sobre las estaciones:
    r_todo = [r1 r2 r3]; % Radio 1, 2 y 3 ejem;('KNY', 'KAK', 'MMB')
    ELON=Long_Intermagnet((Ind_station));
    ELAT=latitud((Ind_station));
    clearvars Eventos f
    EventF.Stat = [(Label_Station(1)); (Label_Station(2)); (Label_Station(3))];
    EventF.Stat = struct('Ind',[],'Dist',[]);
    for std_f = 1:length(Label_Station)
        display(['Buscando sismos en estacion:' Label_Station(std_f)])
        [T_Dentro_Radio_indices, Distancias_respectivas] = Terremotos_Radio(Lon,Lat,ELON(std_f),ELAT(std_f),r_todo
        (std_f));
        % Esta estructura contiene todos los datos filtrados de los sismos.
        EventF.Stat(std_f).Ind = T_Dentro_Radio_indices;
        EventF.Stat(std_f).Dist = Distancias_respectivas;
    end
    %Crea 3 circulos:
    theta = linspace(0,2*pi);
    r=[];
    for std_f= 1: length(Label_Station)
        r = r_todo(std_f)/111.1;
        xc = Long_Intermagnet(Ind_station(std_f));
        yc = latitud(Ind_station(std_f));
        % Plot a circle centered at the point (xc,yc) with a radius equal to r.
        x(std_f,:)= r*cos(theta) + xc;
        y(std_f,:)= r*sin(theta) + yc;
    end
    %Encuentra los extremos de las estaciones para ajustar la figura:
    Max_x= max(x(:));Max_y= max(y(:));
    Min_x= min(x(:));Min_y= min(y(:));
    %Prepara figura:
    figure1 = figure(2);
    axes1 = axes('Parent',figure1);
    set(axes1,'ClippingStyle','rectangle','Color',[0.831372549 0.815686274 0.78431372], 'DataAspectRatio',[1 1 1])
    ;
    geoshow('landareas.shp', 'FaceColor', [0 0 0]); hold on;
    xlim([(Min_x-2) (Max_x+2)]);
    ylim([(Min_y-2 Max_y+2)]);
    grid,geoshow(latitud(Ind_station),Long_Intermagnet(Ind_station),'DisplayType','point','Marker','x','
    LineWidth',10,'MarkerEdgeColor',...
    ,[1.0000 0.8431 0],'MarkerSize',24)
    geoshow(latitud(Ind_station),Long_Intermagnet(Ind_station),'DisplayType','point','Marker', '.', 'LineWidth',3,
    'MarkerEdgeColor',...
    ,g','MarkerSize',12)
    text(Long_Intermagnet(Ind_station),latitud(Ind_station)+1.15,IAGA(Ind_station),'Color',[ 0 0.4980 0 ], '
    FontSize',9,'HorizontalAlignment','Center','BackgroundColor',[0.9412 0.9412 0.941])
    title('Region selected,r=Earthquake g=Stations')
    for std_f= 1: length(Label_Station)
        DayS=Day(EventF.Stat(std_f).Ind);
        MonthS=Month(EventF.Stat(std_f).Ind);
        RegionS=Region(EventF.Stat(std_f).Ind);
        TimeUTCs=TimeUTC(EventF.Stat(std_f).Ind);
        TimestampS=Timestamp(EventF.Stat(std_f).Ind);
        YearS = Year(EventF.Stat(std_f).Ind);
        DepthkmS=Depthkm(EventF.Stat(std_f).Ind);
    end

```

```

IRISIDS=IRISID(EventF.Stat(std_f).Ind);
LatS=Lat(EventF.Stat(std_f).Ind);
LonS=Lon(EventF.Stat(std_f).Ind);
MagS=Mag(EventF.Stat(std_f).Ind);
% CREA tablas de salida de cada estacion:
if length(EventF.Stat(std_f).Dist)>=1
    switch std_f
        case 1,
            T1 = table(MagS,round(EventF.Stat(std_f).Dist),LatS,LonS,DayS,MonthS,YearS,TimeUTCS,
                        TimestampS,DepthkmS, ...
                        IRISIDS,'VariableNames',{ 'Magnitud' 'DistanciasAEstacionKm' 'Latitud' 'Longitud' 'Dia' ,
                        'Mes' 'Year' 'TimeUTC' 'Timestamp' 'DepthkmS' 'IRISIDS'});
        case 2,
            T2 = table(MagS,round(EventF.Stat(std_f).Dist),LatS,LonS,DayS,MonthS,YearS,TimeUTCS,
                        TimestampS,DepthkmS, ...
                        IRISIDS,'VariableNames',{ 'Magnitud' 'DistanciasAEstacionKm' 'Latitud' 'Longitud' 'Dia' ,
                        'Mes' 'Year' 'TimeUTC' 'Timestamp' 'DepthkmS' 'IRISIDS'});
        case 3,
            T3 = table(MagS,round(EventF.Stat(std_f).Dist),LatS,LonS,DayS,MonthS,YearS,TimeUTCS,
                        TimestampS,DepthkmS, ...
                        IRISIDS,'VariableNames',{ 'Magnitud' 'DistanciasAEstacionKm' 'Latitud' 'Longitud' 'Dia' ,
                        'Mes' 'Year' 'TimeUTC' 'Timestamp' 'DepthkmS' 'IRISIDS'});
    end
    % fin de creacion de tablas T1,T2,T3 y Parametros_entrada
end
%----- Plot terremotos:
for i=1:length(MagS)
    hold on
    i=length(MagS)-i+1;
    geoshow(Lats(i),LonS(i),'DisplayType','point','Marker','.', 'MarkerEdgeColor',[0.18+(MagS(i)/10 - 0.09999)) color2(i) 0], 'MarkerSize',(MagS(i)^1.7))
end
plot(x(std_f,:),y(std_f,:),'—','LineWidth',1.5)
xlabel('Longitud');
ylabel('Latitude');
end
P1 = [ Long_Intermagnet(Ind_station(1)) latitud(Ind_station(1)) ];
P2 = [ Long_Intermagnet(Ind_station(2)) latitud(Ind_station(2)) ];
P3 = [ Long_Intermagnet(Ind_station(3)) latitud(Ind_station(3)) ];
plot([P1(1),P2(1),P3(1),P1(1)], [P1(2),P2(2),P3(2),P1(2)], 'B-','LineWidth',1.5)

% plot distancias estaciones: (lineas rectas)
[arcLEN,~]=distance(P1,P2);
dist_std(1)=deg2km(arcLEN);
[arcLEN,~]=distance(P1,P3);
dist_std(2)=deg2km(arcLEN);
[arcLEN,~]=distance(P2,P3);
dist_std(3)=deg2km(arcLEN);
dist_std=round(dist_std);

text((P1(1)+P2(1))/2,(P1(2)+P2(2))/2,{'num2str(dist_std(1))' 'km'},'Color','b','FontSize',7.5,'HorizontalAlignment','Center','BackgroundColor',[0.9412 0.9412 0.9412])
text((P1(1)+P3(1))/2,(P1(2)+P3(2))/2,{'num2str(dist_std(2))' 'km'},'Color','b','FontSize',7.5,'HorizontalAlignment','Center','BackgroundColor',[0.9412 0.9412 0.9412])
text((P2(1)+P3(1))/2,(P2(2)+P3(2))/2,{'num2str(dist_std(3))' 'km'},'Color','b','FontSize',7.5,'HorizontalAlignment','Center','BackgroundColor',[0.9412 0.9412 0.9412])
% legend:
legend_text=[{'Station: ' char(Label_Station(1)) ' Radius: ' num2str(r1)' km'; 'Station: ' char(Label_Station(2)) ' Radius: ' num2str(r2) ... ' km'; 'Station: ' char(Label_Station(3)) ' Radius: ' num2str(r3) ' km'}];
text(Max_x+6.5,Max_y,legend_text,'Color','b','FontSize',8,'HorizontalAlignment','Center','BackgroundColor',[0.9412 0.9412 0.9412])
% titulo:
title(['Geographical position , Stations: ' char(Label_Station(1)) ' , ' char(Label_Station(2)) ' , ' char(Label_Station(3)) ' , Date: ' ... num2str(Time1) ' to ' num2str(Time2) ' . '])
% fin del caso 4. SALIDAS: T1 T2 T3;
% Filtro de T1 T2 T3
% Se filtran las salidas T1, T2, T3 para generar T sin sismos repetidos
% Se busca si existen eventos repetidos en las listas T1,T2,T3
% Una vez detectado que existen eventos repetidos, necesita eliminarlo
% de la lista que tenga mayor distancia.
% Tabla T1 y T2
% revisa repetidos en tabla t1 y t2
intersecta = intersect(T1.IRISIDS,T2.IRISIDS);
Mapa_indice = [];
for i=1:length(intersecta)
    ind2=find(intersecta(i)==T1.IRISIDS);
    Mapa_indice=[Mapa_indice; ind2];
end
% display (length(intersecta))
T1(Mapa_indice,:)=[];%acia el repetido de la tabla 1
% Tabla T3 y T1
% revisa repetidos en tabla t1 y t2
Mapa_indice=[];
for i=1:length(intersecta)
    ind2=find(intersecta(i)==T3.IRISIDS);
    Mapa_indice=[Mapa_indice; ind2];
end
T3(Mapa_indice,:)=[];%acia el repetido de la tabla 1
% Tabla T3 y T2
% revisa repetidos en tabla t1 y t2
intersecta=intersect(T3.IRISIDS,T2.IRISIDS);
Mapa_indice=[];
for i=1:length(intersecta)

```

```

ind2=find(intersecta(i)==T3.IRISIDS);
Mapa_indice=[Mapa_indice; ind2];
end
display (length(intersecta))
T3(Mapa_indice,:)=[];%acá el repetido de la tabla 1

%% Se crea la tabla total T
T = [];
T = [T1; T2; T3];
T.DistanciasAEstacionKm=[T.DistanciasAEstacionKm(:) T.DistanciasAEstacionKm(:) T.DistanciasAEstacionKm(:)];

%Tabla T tiene variable DistanciasAEstacionKm que necesita ser modificada
%para proporcionar distancia a las 3 estaciones

%% DISTANCIAS ESTACIONES-TERREMOTOS:
grados_km = 111.1;
for std = 1:length(Label_Station)
    y_station=ELON(std).*grados_km;
    x_station=ELAT(std).*grados_km;
    for indtablat=1:length(T.Latitud)
        dx_Terremotoalternativo = (x_station -(T.Latitud(indtablat)*grados_km));
        dy_Terremotoalternativo = (y_station -(T.Longitud(indtablat)*grados_km));
        d_st_ev = round(sqrt(dx_Terremotoalternativo.^2 + dy_Terremotoalternativo.^2));
        T.DistanciasAEstacionKm(indtablat,std) = d_st_ev;
    end
end
% FIN
%=====

```

## B.3. Verifica Eficiencia para varios parámetros.

```

% Verifica_Eficiencia_Para_Varios_Parametros.m
%
% VERIFICA EFICIENCIA DE LOS PRECURSORES RELATIVISTAS
%=====
% DESCRIPCIÓN:
% SALIDA:
%=====
clear all
close all
%=====
Gamma_2 = linspace(1,100,40); %Gammas que se quieren calcular
Gamma_2(1) = 1;
%=====
stations= [7]; % Estaciones que se quieren procesar 1 = Japon, 2 = Europa, 3= USA, etc...
band_display = 1; %Muestra en pantalla el proceso

for Data_Stations= stations
    Stadistic_Entrena = {};
    Stadistic_Produce = {};
    for CASO = 0:1 % (0) PARA ENTRENAMIENTO (1) PARA PRODUCCION
        Caso_Ent_Prod = CASO;
        [Data,Label_Station] = Data_Geomagnetica(Data_Stations);

        %CARGAR UN DETERMINADO CONJUNTO DE DATOS GEOMAGNETICOS
        %=====
        if Caso_Ent_Prod == 0
            switch Data_Stations
                case 1
                    load ('Entrena_Etiqueta_Eventos_Japan_II_6M_2000_2019','Lx_c','Lx','Ly_c',...
                           'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE ENTRENAMIENTO
                    disp('Fase de Entrenamiento JAPON')
                case 12
                    load ('Etiquetas_KNY_Entrenamiento_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
                           'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE ENTRENAMIENTO
                    disp('Fase de Entrenamiento JAPON(SÓLO KNY)')
                case 13
                    load ('Etiquetas_MMB_Entrenamiento_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
                           'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE ENTRENAMIENTO
                    disp('Fase de Entrenamiento JAPON(SÓLO MMB)')
                case 2
                    %GENERA ETIQUETAS ENTRENAMIENTO
                    % [Parametros_entra, Sismos_Simulados ,Tabla_generada] = Simula_Terremotos(label_station_central...
                    % ,numero_terremotos,mag_mi,mag_max,fo1,fo2 , Prof1 , Prof2 ,radio_inferior,radio_superior,band);
                    % [Parametros_entra, Sismos_Simulados ,Tabla_generada]= Simula_Terremotos({'D0U'} ...
                    % , 20,6,8,'2005-01-01','2019-01-01',5,50,10,200,1);
                    % %AGREGAR ETIQUETAS DE SIMULACION EUROPA SILENCIO
                    % load ('Etiquetas_DOUEntrenamiento_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
                    % '%, 'Lon_S', 'Lat_S', 'Mag_S', 'Depthkm_S') %DATOS DE ENTRENAMIENTO
                    % load ('Etiquetas_DOUEntrenamiento2_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
                    % '%, 'Lon_S', 'Lat_S', 'Mag_S', 'Depthkm_S') %DATOS DE ENTRENAMIENTO
                    % load ('Etiquetas_DOUEntrenamiento3_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
                    % '%, 'Lon_S', 'Lat_S', 'Mag_S', 'Depthkm_S') %DATOS DE ENTRENAMIENTO
                    % load ('Etiquetas_DOUEntrenamiento4_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
                    % '%, 'Lon_S', 'Lat_S', 'Mag_S', 'Depthkm_S') %DATOS DE ENTRENAMIENTO
                    % disp('Fase de Entrenamiento Europa silencio sismico, con sismos simulados en sitios aleatorios')
                case 3
                    load ('Etiquetas_USA_Entrenamiento_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
                           'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE ENTRENAMIENTO
                    disp('Fase de Entrenamiento USA')
                case 4
                    load ('Etiquetas_CHILE_Entrenamiento_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
                           'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE ENTRENAMIENTO
                    disp('Fase de Entrenamiento CHILE')
            end
        end
    end
end
%=====

```

```

case 5
load ('Etiquetas_EUROPA_DUREntrenamiento_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
,'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE ENTRENAMIENTO
disp('Fase de Entrenamiento DUR')
case 6
load ('Etiquetas_EUROPA_PEGEntrenamiento_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
,'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE ENTRENAMIENTO
disp('Fase de Entrenamiento PEG')
case 7
load ('Etiquetas_PETEntrenamiento_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
,'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE ENTRENAMIENTO
% Solo del 2007 al 2011 con 10 sismos entrenando y todo
% el resto produciendo
% load ('Etiquetas_PETEntrenamiento2_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
%,'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE ENTRENAMIENTO
disp('Fase de Entrenamiento PET')

end
disp('Fase de Entrenamiento')
else
switch Data_Stations
case 1
load ('Produce_Etiqueta_Eventos_Japan_HI_6M_2000_2019','Lx_c','Lx','Ly_c',...
,'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE PRODUCCION
disp('Fase de Produccion JAPON')
case 12
load ('Etiquetas_KNY_Produccion_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
,'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE PRODUCCION
disp('Fase de Produccion JAPON(SOLO KNY)')
case 13
load ('Etiquetas_MMB_Produccion_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
,'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE PRODUCCION
disp('Fase de Produccion JAPON(SOLO MMB)')
case 2
% ETIQUETAS DE SIMULACION EUROPA SILENCIO
% load ('Etiquetas_DOUProduccion_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
%,'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE PRODUCCION
% load ('Etiquetas_DOUProduccion2_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
%,'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE PRODUCCION
% load ('Etiquetas_DOUProduccion3_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
%,'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE PRODUCCION
% load ('Etiquetas_DOUProduccion4_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
%,'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE PRODUCCION
load ('Etiquetas_DOUProduccion4_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
,'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE PRODUCCION
disp('Fase de Produccion Europa silencio sismico, con sismos simulados en sitios aleatorios')
case 3
load ('Etiquetas_USA_Produccion_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
,'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE PRODUCCION
disp('Fase de Produccion USA')
case 4
load ('Etiquetas_CHILE_Produccion_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
,'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE PRODUCCION
disp('Fase de Produccion CHILE')
case 5
load ('Etiquetas_EUROPA_DURProduccion_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
,'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE PRODUCCION
disp('Fase de Produccion DUR')
case 6
load ('Etiquetas_EUROPA_PEGProduccion_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
,'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE PRODUCCION
disp('Fase de Produccion PEG')
case 7
load ('Etiquetas_PETProduccion_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
,'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE PRODUCCION
% load ('Etiquetas_PETProduccion2_Ready.mat','Lx_c','Lx','Ly_c',...
%,'Lon_S','Lat_S','Mag_S','Depthkm_S') %DATOS DE PRODUCCION
disp('Fase de Produccion PET')
end
disp('Fase de Produccion')
end

% VISUALIZACION
%
band = -2; % (0) LA PRIMERA VEZ CALCULA Y SALVA LA DATA NORMALIZADA
% (1) CARGA LA DATA NORMALIZADA, DA UN REPORTE BREVE, CALCULA Y VISUALIZA FIGURAS
% (-1) CARGA LA DATA NORMALIZADA CALCULA PERO NO VISUALIZA FIGURAS
% (-2) CARGA LA DATA NORMALIZADA CALCULA Y VISUALIZA FIGURAS SOBRE LA EFICIENCIA
%
% CARGA CAMPO GEOMAGNETICO YA NORMALIZADO

switch Data_Stations
case 1 %JAPON:
%
load Campo_Geomagnetico_Normalizado %Media 0 std (:)
%load Campo_Geomagnetico_Normalizado_Japon.mat %Media 0 std 1
%
case 2 %SILENCIO EUROPA DOU_MAB_WNG
%
%load Campo_Geomagnetico_Normalizado_EUROPA_DOU.mat %Media 0 std 1
%
load Campo_Geomagnetico_Normalizado_EUROPA_DOU2.mat %Media 0 std (:)
case 3 %USA:
%
%load ('Campo_Geomagnetico_Normalizado_USA.mat') %Maximo en 1 y distribucion por debajo
load Campo_Geomagnetico_Normalizado_USA2.mat %Media 0 std (:)
%load Campo_Geomagnetico_Normalizado_USA3.mat
%load Campo_Geomagnetico_Normalizado_USA4 %Media 0 std 1
%
case 4 %CHILE:
%

```

```

% load Campo_Geomagnetico_Normalizado_CHILE %Maximo en 1 y distribucion por debajo
% load Campo_Geomagnetico_Normalizado_CHILE2 %Maximo en 1 y distribucion por debajo
load Campo_Geomagnetico_Normalizado_CHILE3.mat %Media 0 std(:)
%load Campo_Geomagnetico_Normalizado_CHILE4 %Media 0 std 1
%
case 5
%
% load Campo_Geomagnetico_Normalizado_EUROPA_DUR %Maximo en 1 y distribucion por debajo
load Campo_Geomagnetico_Normalizado_EUROPA_DUR2 %Media 0 std(:)
%load Campo_Geomagnetico_Normalizado_EUROPA_DUR3 %Media 0 std 1
%
case 6
%
% load Campo_Geomagnetico_Normalizado_EUROPA_PEG %Maximo en 1 y distribucion por debajo
load Campo_Geomagnetico_Normalizado_EUROPA_PEG2 %Media 0 std(:)
%load Campo_Geomagnetico_Normalizado_EUROPA_PEG3 %Media 0 std 1
%
case 7
%
% load Campo_Geomagnetico_Normalizado_PET.mat %Media 0 std 1
%
load Campo_Geomagnetico_Normalizado_PET2.mat %Media 0 std (:)

end

% DESCOMENTAR SECCION SI SE DESEA: %NORMALIZA A MEDIA 0 Y DESVIACION 1
%
% NORMALIZACION TIPO 2 SIGNIFICA DIVIDIR CADA DIA POR LA STD DEL DIA
% TIPO 1 SIGNIFICA DIVIDIR CADA DIA POR LA STD DEL CONJUNTO COMPLETO
%
% [Bxn ,Byn ,Bzn ,F ,Fo] = Proceso_Normaliza_media0_desvl(Label_Station ,Data ,1 ,0);
%
% [Bxn ,Byn ,Bzn ,F ,Fo] = Proceso_Normaliza_media0_desvl(Label_Station ,Data ,2 ,1);
%
% si se desea normalizar por todas las estaciones:(pero con todas las
% estaciones en un vector)
% [Bxt ,Byt ,Bzt]=NormalizaData2(Bxt ,Byt ,Bzt ,1 ,band);
%
% save Campo_Geomagnetico_Normalizado_KNY.mat Bxn Byn Bzn Fo %Media 0 std 1
%
% save Campo_Geomagnetico_Normalizado_PET2.mat Bxn Byn Bzn Fo %Media 0 std (:)
%
%
% DEFINICION DE PARAMETROS DE ANALISIS
%
% PRECURSOR USADO
%
% (1) ==> ENERGIA TOTAL
% (2) ==> PRESION DE RADACION
% (3) ==> FLUJO DE MOMENTO (EN X ==> plano yz)
% (4) ==> FLUJO DE MOMENTO (EN Y ==> plano xz)
% (5) ==> FLUJO DE MOMENTO (EN Z ==> plano xy)
% (6) ==> TRAZA DEL TENSOR
% (7) ==> DENSIDAD DE MOMENTUM (VECTOR DE POINTING)
%
Componente_Tensor_Maxwell = 7;
%
% MOMENTO ESTADISTICO UTILIZADO PARA EL PRECURSOR
% (1) MEDIA (2) KURTOSIS (3) DESVIACION STANDARD
%
Momento_Usado = 1;
%
% UMBRAL CONSIDERADO PARA EL PRECURSOR
%
uo = 1; % Umbral usado
if band_display ==0
    display(['Umbral USADO: ' num2str(uo) '']);
end
%
% ESTACIONES A UTILIZAR: (1) KKA (2) KNY (3) MMB y (4) USA LAS 3 ESTACIONES SIMULTANEAMENTE.
% (OJO) SE PUEDEN USAR COMBINACIONES DE LAS
% ESTACIONES ==> [1 2], [1 3], [2 3] o [1 2 3]
%
Station_Used_Now = [1 2 3 4];
%
%
% CALCULO DE LA EFICIENCIA PARA CADA ESTACION
%
for Actual_Station = 1:length(Station_Used_Now)
    Stadistic_Ef = []; %ESTADISTICA DE LA EFICIENCIA (para usar en ciclos de un parametro)
    Max_a = [];
    FP = [];

    if Actual_Station <=3
        Station_Used_Now = Actual_Station; %SOLO UNA ESTACION POR LAZO
    else
        Station_Used_Now = [1 2 3]; %LAS TRES ESTACIONES SIUMULTANEAS
    end

    disp(['Station_Used_Now: ', num2str(Station_Used_Now)])
    for jg = 1:length(Gamma_2)
        if band_display == 1
            disp([CASO Actual_Station Gamma_2(jg)])
        end
    %
    % VALORES DE GAMMA
    %

```

```

Ng = 4; %NUMEROS DE GAMMAS A GENERAR
gamma_1 = Gamma_2(jg); %VALOR INFERIOR DE GAMMA
gamma_2 = Gamma_2(jg) + Gamma_2(jg)/1e6; %VALOR SUPERIOR DE GAMMA
G = linspace(gamma_1,gamma_2,Ng); %VALORES DE GAMMA
dg = 3; %TAMAÑO DE LA MUESTRA DE GAMMA (GAMMAS USADOS EN LA ESTADISTICA)
% debe ser >= 3
%
%NUMERO DE DIAS POR VENTANA
%
Md = 14; %NUMERO DE VENTANAS (SE CALCULAN AUTOMATICAMENTE A PARTIR DE Md Y TIEMPO TOTAL DE LOS DATOS)
%
% ACTIVACION DEL PRECURSOR
%
nd_b = 60/Md; %0/Md; % EL SISMO OCURRE (nd_b) ANTES DE LA ACTIVACION DEL PRECURSOR
Nd_a = 60/Md; %60=120 dias %650/Md;%50:20*5:95*Md)/Md; % EL SISMO OCURRE (nd_a) DESPUES DE LA ACTIVACION DEL
PRECURSOR ((Nd_a) ETIQUETA DE ANCHO DE VENTANA)
%
% INTERVALO HORARIO TOTAL
%
num_h = 1; %NUMERO DE HORAS DEL INTERVALO EN ESTUDIO
Num_h = 1/num_h;
dho = 1;
Dh = [1:dho:24*Num_h];
Dho = 2; %INTERVALO INCREMENTAL HORARIO (debe ser >=2)
M_dh = [];
for i=1:length(Dh) - Dho, dh = Dh(i):Dh(i+Dho); M_dh(i) = mean(dh); end % (M_dh) ETIQUETA DE INTERVALO HORARIO
%
%CAMPOS A LLENAR
%
IM = [];
ST = {};
k_ev = 0;
Pt = [];
Pa = [];
AS_IND_C = [];
AS_IND_F = [];
AS_IND_CF = [];
M_Gamma = [];
AMPLITUD = {};
IMAGE_HISTORY = {};
%
% Dr_C ==> DISTRIBUCION DE TIEMPOS PARA LOS EVENTOS NO CONTIGUOS
% Ind_C ==> INDICES PARA LOS EVENTOS NO CONTIGUOS
% CICLO PARA CADA EVENTO NO CONTIGUO SELECCIONADO
%
for ev=1:1; %length(Dr_C)
%
% PARA ETIQUETAR LOS EVENTOS CONTIGUOS
%
Lxx = Lx_c;
Lyy = Ly_c;
%
% SI USAMOS DATA SIMULADA
%
Lxx = Lx_Sim;
Lyy = Ly_Sim;
Mag_S = Mag_Simulada;
f1 = datenum('13-Jan-2004');
f2 = datenum('01-Jan-2020 00:01:00');
% datestr(Lxx(:,1))
%
% PRESELECCION DE LOS EVENTOS (INTERVALO DE FECHAS REALES VALIDAS)
%
f1 = Lx(1,1); %FECHA INFERIOR DE LOS DATOS TOTALES
f2 = Lx(end,end); %FECHA SUPERIOR DE LOS DATOS TOTALES
% INDICES VALIDOS
%
ind_s = find(Lxx(:,1)>=f1 & Lxx(:,1) <= f2); %INTERVALO DE FECHAS (f1 y f2)
ind_sf = find(Fo(:,1)>=f1 & Fo(1,:) <= f2);
Fo = Fo(:,ind_sf);
[nf, mf, kf] = size(Fo);
if length(ind_s) > 1
    k_ev = k_ev+1;
end
nc = length(ind_s); %NUMERO TOTAL DE SISMOS EN ESTUDIO
Lxx_u = Lxx(ind_s,:);
Lyy_u = Lyy(ind_s,:);
Ep = []; %EFICIENCIA PORCENTUAL
S = []; %ESTATUS
S1 = []; %ESTATUS
MAG_S = {}; %MAGNITUDES SELEC EN EL CICLO
DEPTH_S = {};%PROFUNDIDADES SELEC EN EL CICLO
%
dga = 1;
Ku = 0;
Parametro = Nd_a;
%
INDICES = ones(nc,length(Nd_a));
indices = 1:nc;
for ku = 1:length(Parametro)
    ind_im = 0;
    for ga=1:dga:length(G)-dg
        Ku = Ku + 1;
        nd_a = Nd_a; % Parametro(Ku);
        gamma = G(ga:ga+dg); %VALORES DE GAMMA
        %
        [gamma,E] = Energia_Vs_Gamma(gamma,0); % VALORES DE LA ENERGIA EN GeV
        %
        % SALIDAS
        %
    end
end

```

```

Ef = []; % EFICIENCIA ACIERTOS Y FALLOS
IND_KC = []; % INDICE CIERTOS
IND_KF = []; % INDICE FALLOS
AMP_U = []; % AMPLITUD ASOCIADA AL PRECURSOR EN CADA ACIERTO
IM = [];
count_surf = 0;
%_____
for i=1:length(Dh) - Dho
    count_surf = count_surf + 1;
    dh = Dh(i):Dh(i+Dho);
    m_dh = mean(dh/Num_h);
    %
Programa_General_Precursores_Relativistas %CALCULA EL PRECURSOR SELECCIONADO (FLUJO POR EJEMPLO)
Encuentra_Sismos_Sicronizados %SISMOS LOCALIZADOS DIAS ANTES Y DIAS DESPUES DEL MAXIMO DEL PRECURSOR
%
IND_KC = [IND_KC;IND_kc]; % SISMOS ENCONTRADOS CIERTOS
IND_KF = [IND_KF;IND_kf]; % SISMOS NO ENCONTRADOS
Ef = [Ef;m_dh pc pf p_ind_c p_ind_f p_ind_c + p_ind_f CASO Actual_Station jg length(Gamma_2)]; % EFICIENCIA
AMP_U = [AMP_U;Amp_U];
%
% surf(P), shading interp ,view ([0 90]), pause
Pt(:, :, count_surf) = P'; %EVOLUCION DEL PRECURSOR UMBRALIZADO (SURF)
Pa(:, count_surf) = As'; %EVOLUCION DEL PRECURSOR SIN UMBRALIZAR (PROBABILIDAD CONDICIONADA) (SURF)
%
% SOLO LOS INDICES CIERTOS Y FALLOS
%
As_Ind_c = zeros(1,length(As));
As_Ind_f = As_Ind_c;
As_Ind_c(Ind_c) = As(Ind_c);
As_Ind_f(IND_Fp) = As(IND_Fp);
%
AS_IND_C(:, count_surf) = As_Ind_c;
AS_IND_F(:, count_surf) = As_Ind_f;
AS_IND_CF(:, count_surf) = As_Ind_c + As_Ind_f;
%
if size(AS_IND_C,2) > 1
    clf
    hg = 1;
    set(figure(1), 'Position',[680 32 1197 906], 'Color','W')
    subplot(4,1,1)
    surf(AS_IND_C'), shading interp ,view ([0 90]), title ('AS_IND_C')
    xlim([0 Nv])
    subplot(4,1,2)
    plot((Lxx'-f1)/Md,Lyy','r', 'LineWidth',[1]), grid, hold on
    plot(smooth(sum(AS_IND_C')),hg), 'b', 'LineWidth',[2]),
    hold off
    xlim([0 Nv])
    subplot(4,1,3)
    surf(AS_IND_F'), shading interp ,view ([0 90]), title ('AS_IND_F')
    xlim([0 Nv])
    subplot(4,1,4)
    plot((Lxx'-f1)/Md,Lyy','r', 'LineWidth',[1]), hold on
    plot(smooth(sum(AS_IND_F')),hg), 'r', 'LineWidth',[2])
    plot(smooth(sum(AS_IND_C')),hg), 'b', 'LineWidth',[2])
    grid, hold off % SISMOS NO-ENCONTRADOS
    xlim([0 Nv])
    Ejes_Visibles(1)
    % set(figure(2), 'Position',[680 32 1197 906], 'Color','W')
    % plot((Lxx'-f1)/Md,Lyy,'r', 'LineWidth',[1]), hold on
    % plot(mean(AS_IND_CF') .* std(AS_IND_CF') *20), grid, hold off
    % pause(.01)
end
%
if band_display == 1
    % VISUALIZACION DE LAS SALIDAS
    %
    fprintf('
        n')
    disp('      m_dh      pc      pf      pc+pf      p_ind_c      p_ind_f      p_ind_c + p_ind_f      CASO
          Actual_Station      jg      length(Gamma_2)')
    disp([Ef])
    fprintf('
        n')
    %
end
end
%
[mf, nf] = max(Ef(:,2));
Stadistic_Ef = [Stadistic_Ef; mean(G) mean(E) mean(Ef(:,2)) std(Ef(:,2)) Ef(nf,1) Ef(nf,2)]; % ESTADISTICA DE LA EFICIENCIA
% ETIQUETAS
%
% (1) ==> VALOR MEDIO DE GAMMA
% (2) ==> VALOR MEDIO DE LA ENERGIA
% (3) ==> EFICIENCIA MEDIA EN TODO EL INTERVALO HORARIO DE INTERES (0 24 H)
% (4) ==> DESVIACION STANDARD
% (5) ==> INTERVALO HORARIO MEDIO
% (6) ==> EFICIENCIA PORCENTUAL
%
[j_kc, i_kc] = hist(IND_KC, length(IND_KC));
i_kc = round(i_kc);
p_kc = (j_kc/length(IND_KC))*100; % PROBABILIDAD local
IND_KCO = IND_KF;
IND_KFO = IND_KC;
%

```

```

% VISUALIZACION DE EFICIENCIA
%=====
% ACIERTOS Y FALLOS VERSUS INTERVALO HORARIO
%
Int_H = Ef(:,1);
Aciertos = Ef(:,2);
Fallos = Ef(:,3);
Total_a = Ef(:,4);
[jMc,iMc] = max(Aciertos);
%
Ind_Aciertos = Ef(:,5);
Ind_Fallos = Ef(:,6);
Total_f = Ef(:,7);
[jMf,iMf] = max(Ind_Fallos);
%
% IND FALSOS POSITIVOS VS INTERVALO HORARIO
%
% SISMOS NO ENCONTRADOS
% ELIMINA INDICES REPETIDOS
%
IND_FO = [];
IND_FC = [];
while length(IND_KFO)>0
    Ind_R = IND_KFO(1);
    ind_e = find(Ind_R==IND_KFO);
    if length(ind_e)>1
        IND_FO = [IND_FO;IND_KFO(1)];
        IND_KFO(ind_e) = [];
    else
        IND_KFO(1) = [];
    end
end
Ind_S = ind_s;
Ind_S(IND_FO) = [];
IND_FO = sort(IND_FO);
%
INDICES(IND_FO,ku) = IND_FO;
Ind_New_In = [];
Ind_New_Out = [];
if ku>1
    Ind_New_In = find(INDICES(:,ku-1)-INDICES(:,ku)<0);
    %Ind_New_Out = find(INDICES(:,ku-1)-INDICES(:,ku)>0);
else
    Ind_New_In = IND_FO;
    %Ind_New_Out = find(INDICES(:,ku)>0);
end
if length(Ind_New_In)>0
    Ind_New_Events = Ind_New_In;
    %
    St = [1 2 3];      % ESTACIONES
    %
    % ESTIMACION DE LA DISTANCIA A ESTACIONES USADAS Y NUEVOS EVENTOS SEGUN EL PARAMETRO DE CONTROL USADO
    %
    dx_station = y_station(Station_Used_Now)/grados_km;
    dy_station = x_station(Station_Used_Now)/grados_km;
    Dx_Station_m = mean(dx_station);
    Dy_Station_m = mean(dy_station);
    %
    % DISTANCIA ENTRE EL CENTRO GEOMETRICO ENTRE ESTACIONES USADAS Y EVENTOS
    %
    if length(IND_FO)>0
        R_Dx_Station = repmat(Dx_Station_m,length(Ind_New_Events),1);
        R_Dy_Station = repmat(Dy_Station_m,length(Ind_New_Events),1);
        Rx_St_Event = sqrt((R_Dx_Station - Lon_S(Ind_New_Events)).^2 + (R_Dy_Station - Lat_S(Ind_New_Events)).^2);
        Rm_St_Event = (Rx_St_Event)*grados_km; % DISTANCIA MEDIA NUEVOS EVENTOS RESPECTO AL CENTRO GEOMETRICO
                                                % DE LAS ESTACIONES USADAS
    else
        Rm_St_Event = 0;
    end
    %
    % SALIDA: EFICIENCIA PORCENTUAL EVENTOS CIERTOS ENCONTRADOS
    %
    Ep(Ku) = 100 - (length(Ind_S)/length(ind_s))*100;
    MAG_S(Ku).MAG_S = Mag_S(Ind_New_Events);
    DEPTH_S(Ku).DEPTH_S = Depthkm_S(Ind_New_Events);
    AMPLITUD(Ku).AMPLITUD = AMP_U;
    IMAGE_HISTORY(Ku).IMAGE_HISTORY = IM;
    %
    % (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8)
    % (9) (10) (11) (12) (13) (14)
    % (15) (16) (17) (18)
    S = [S; nd_a mean(E) Ep(Ku) mean(Aciertos) mean(Fallos) mean(Ind_Aciertos) mean(Ind_Fallos) Int_H(iMc)
          Aciertos(iMc) Fallos(iMc) Int_H(iMf) Ind_Aciertos(iMf) Ind_Fallos(iMf) mean(Mag_S(Ind_New_Events))
          mean(Lat_S(Ind_New_Events)) mean(Lon_S(Ind_New_Events)) mean(Depthkm_S(Ind_New_Events)) mean(
          Rm_St_Event)];
    S1 = [S1;Depthkm_S(Ind_New_Events) Rm_St_Event];
    %
    % LEYENDA:
    %
    % (1) ==> VALOR MEDIO DE GAMMA (o del umbral uo)
    % (2) ==> VALOR MEDIO DE LA ENERGIA EN GeV
    % (3) ==> EFICIENCIA PORCENTUAL PARA CADA VALOR DE GAMMA
    % (4) ==> VALOR MEDIO DE LOS SISMOS ACERTADOS
    % (5) ==> VALOR MEDIO DE LOS SISMOS FALLIDOS
    % (6) ==> VALOR MEDIO DE LOS INDICES ACERTADOS (CASOS POSITIVOS)
    % (7) ==> VALOR MEDIO DE LOS INDICES FALLIDOS (FALSOS POSITIVOS)
    % (8) ==> INTERVALO HORARIO DONDE EL MAXIMO DE ACIERTOS
    % (9) ==> VALOR MAXIMO DE LOS ACIERTOS (EN INTERVALO 0 A 24 HORAS)
    % (10) ==> VALOR MAXIMO DE LOS FALLOS (EN INTERVALO 0 A 24 HORAS)

```

```
% (11) ==> INTERVALO HORARIO DONDE OCURRE EL MAXIMO DE LOS INDICES ACERTADOS
% (12) ==> VALOR MAXIMO DE LOS INDICES ACERTADOS
% (13) ==> VALOR MAXIMO DE LOS INDICES FALLOS
% (14) ==> MEDIA DE LA MAGNITUD PARA LOS EVENTOS ENCONTRADOS
% (15) ==> MEDIA DE LA LATITUD PARA LOS EVENTOS ENCONTRADOS
% (16) ==> MEDIA DE LA LONGITUD PARA LOS EVENTOS ENCONTRADOS
% (17) ==> MEDIA DE LA PROFUNDIDAD SISMICA PARA LOS EVENTOS ENCONTRADOS
% (18) ==> DISTANCIA PROMEDIO ENTRE ESTACIONES USADAS Y NUEVOS EVENTOS
%
if band == -3 | band == -1
    set.figure(5, 'Position',[5 514 1912 464], 'Color', 'W')
    plot(Int_H,Aciertos,'-r',Int_H,Aciertos,'or',Int_H,Fallos,'-b',Int_H,Fallos,'ob',Int_H,Total_a,'-m',
        Int_H,Total_a,'om','LineWidth',[2]),hold on
    plot(Int_H(iMc),Aciertos(iMc),'+k','MarkerSize',[12],'LineWidth',[2]),hold off
    xlabel('Time interval from 0 to 24 h')
    ylabel('Efficiency in (%)')
    title(['Efmax: [ ' num2str(Aciertos(iMc)) '(%)] — Dh: [ ' num2str(Int_H(iMc)) '] hours ' ])
    xlim([Dh(1) Dh(end)/Num_h])
    ylim([0 100])
    grid
Ejes_Visibles(5)
g = get(5);
g1 = g.Children;
set(g1, 'Position',[0.0415 0.1250 0.9514 0.8103])
legend('Thru', ' ', 'False', ' ', 'Total', 'Location', 'Best')
ax1 = gca;
% current axes
ax1.XTick = [Dh(1):1:Dh(end)/Num_h];
%
set.figure(6, 'Position',[5 514 1912 464], 'Color', 'W')
plot(Int_H,Ind_Aciertos,'-r',Int_H,Ind_Aciertos,'or',Int_H,Ind_Fallos,'-b',Int_H,Ind_Fallos,'ob',
    Int_H,Total_f,'-m',Int_H,Total_f,'om','LineWidth',[2]),hold on
plot(Int_H(iMf),Ind_Fallos(iMf),'+k','MarkerSize',[12],'LineWidth',[2]),hold off
xlabel('Time interval from 0 to 24 h')
ylabel('Efficiency (Indices) in (%)')
title(['Indices false positives: [ ' num2str(Ind_Fallos(iMf)) '(%)] — Dh: [ ' num2str(Int_H(iMf)) '] hours ' ])
xlim([Dh(1) Dh(end)/Num_h])
ylim([0 100])
grid
g = get(6);
g1 = g.Children;
set(g1, 'Position',[0.0415 0.1250 0.9514 0.8103])
Ejes_Visibles(6)
legend('Thru', ' ', 'False', ' ', 'Total', 'Location', 'Best')
ax1 = gca;
% current axes
ax1.XTick = [Dh(1):1:Dh(end)/Num_h];
% STATIONS VISUALIZATION
%
set.figure(7, 'Position',[697 32 1220 946], 'Color', 'w')
plot(Lon_S(ind_s),Lat_S(ind_s),'og',Lon_S(ind_s),Lat_S(ind_s),'+r'),hold on
plot(Lon_S(IND_FO),Lat_S(IND_FO),'oc',Lon_S(IND_FO),Lat_S(IND_FO),'+k')
plot(Lon_S(Ind_New_Events),Lat_S(Ind_New_Events),'*m',Lon_S(Ind_New_Events),Lat_S(Ind_New_Events),'sk',
    'LineWidth',[2],'MarkerSize',[8])
grid
for i=1:length(Station_Used_Now)
    text(x_station(St(Station_Used_Now(i)))/grados_km,y_station(St(Station_Used_Now(i)))/grados_km,
        Label_Station(St(Station_Used_Now(i))), 'Color', 'b')
    text(x_station(St(Station_Used_Now(i)))/grados_km-0.2,y_station(St(Station_Used_Now(i)))/grados_km, 'o',
        'Color', 'r')
end
for i=1:length(St)
    text(y_station(i)/grados_km,x_station(i)/grados_km,Label_Station(i), 'Color', 'b')
end
for i=1:length(Ind_New_Events)
    text(Lon_S(Ind_New_Events(i))+0.2,Lat_S(Ind_New_Events(i)),num2str(Mag_S(Ind_New_Events(i))), 'FontSize',
        [12])
end
plot(Dx_Station_m+.025,Dy_Station_m,'ob',Dx_Station_m+.025,Dy_Station_m,'+r','MarkerSize',[10], 'LineWidth',[1])
title(['Total events: [ ' num2str(nc) ' ] Old events: [ ' num2str(length(IND_FO)) ' ] New events: [ ' num2str(length(Ind_New_Events)) ' ] Mag: [ ' num2str(mean(Mag_S(Ind_New_Events))) ' ]'])
ylabel('Latitude')
xlabel('Longitude')
hold off
ylim([20 48])
xlim([120 150])
set(gca,'dataaspectratio mode','manual'),set(gca,'dataaspectratio',[1 1 1]);
Ejes_Visibles(7)
%
set.figure(8, 'Position',[697 32 1220 946], 'Color', 'w')
plot(Lxx_u'-f1,Lyy_u','-r',Lxx_u'-f1,Lyy_u,'-g'),hold on,plot(Lxx_u(IND_FO,:)-f1,Lyy_u(IND_FO,:),'-r',
    Lxx_u(IND_FO,:)-f1,Lyy_u(IND_FO,:),'-c','LineWidth',[2])
plot(Lxx_u(Ind_New_Events,:)-f1,Lyy_u(Ind_New_Events,:),'-k',Lxx_u(Ind_New_Events,:)-f1,Lyy_u(Ind_New_Events,:),'-y',
    'LineWidth',[2])
grid
title(['Total events: [ ' num2str(nc) ' ] Old events: [ ' num2str(length(IND_FO)) ' ] New events: [ ' num2str(length(Ind_New_Events)) ' ] Mag: [ ' num2str(mean(Mag_S(Ind_New_Events))) ' ]'])
Ejes_Visibles(8)
%
set.figure(9, 'Position',[826 32 1091 946], 'Color', 'W')
subplot(3,1,1)
plot(S(:,1),S(:,3),'-r',S(:,1),S(:,3),'ob')
grid
title('Total efficiency')
ylabel('Efficiency (%)')
ylim([0 100])
subplot(3,1,2)
plot(S(:,1),S(:,4),'-r',S(:,1),S(:,4),'og'),hold on
```

```

plot(S(:,1),S(:,5),'.-b',S(:,1),S(:,5),'ob'),hold off
grid
title('Seismic events as: hits (red) and falses (blue)')
ylabel('Eficiency (%)')
ax1 = gca; % current axes
%ax1.XTick = [0:0.5:S(end,1)]
%ax1.YTick = [0:10:100];
subplot(3,1,3)
plot(S(:,1),S(:,6),'.-r',S(:,1),S(:,6),'og'),hold on
plot(S(:,1),S(:,7),'.-b',S(:,1),S(:,7),'ob'),hold off
grid
title('Indices as: hits (red) and falses (blue)')
ylabel('Eficiency (%)')
xlabel('Parameter')
ax1 = gca; % current axes
% ax1.XTick = [0:0.5:S(end,1)]
% ax1.YTick = [0:10:100];
Ejes_Visibles(9)

set.figure(10), 'Position',[826 32 1091 946], 'Color','W')
subplot(2,1,1)
plot(S(:,1),S(:,9),'.-b',S(:,1),S(:,9),'ob'),hold on, plot(S(:,1),S(:,10),'.-r',S(:,1),S(:,10),'or'),
hold off, grid
title('Maximo de Aciertos (b) y fallos (red) (eventos)')
subplot(2,1,2)
plot(S(:,1),S(:,12),'.-b',S(:,1),S(:,12),'ob'),hold on, plot(S(:,1),S(:,13),'.-r',S(:,1),S(:,13),'or'),
hold off, grid
title('Maximo de Aciertos (b) y fallos (red) (indices)')
Ejes_Visibles(10)

set.figure(11), 'Position',[826 32 1091 946], 'Color','W')
subplot(3,1,1)
plot(S(:,1),S(:,14),'.-b',S(:,1),S(:,14),'ob'),grid
title('Media de las magnitudes encontradas')
subplot(3,1,2)
plot(S(:,1),S(:,17),'.-b',S(:,1),S(:,17),'ob'),grid
title('Media de las profundidades encontradas')
ylabel('Km')
subplot(3,1,3)
plot(S(:,1),S(:,18),'.-b',S(:,1),S(:,18),'ob'),grid
title('Media de la distancia estacion y eventos nuevos')
ylabel('Km')
xlabel('Parameter')
Ejes_Visibles(11)

set.figure(12), 'Position',[826 32 1091 946], 'Color','W')
if size(INDICES,2) >1
    surf(INDICES),colorbar
    title('History events')
    xlabel('Parameter')
    ylabel('Events number')
    zlabel('Events number')
    % ylim([1 nc])
    % xlim([1 length(Uoo)])
    % zlim([1 nc])
    grid
    view([0 90])
    cb = colorbar;
    set(cb,'Ticks',[0:5:100])
    Ejes_Visibles(12)
else
    plot(INDICES,'--r','LineWidth',[2])
    title('History events')
    xlabel('Parameter')
    ylabel('Events number')
    % ylim([1 nc])
    % xlim([1 length(Uoo)])
    % zlim([1 nc])
    grid
    Ejes_Visibles(12)
end
pause(.1)
end
end
end
end
ST(k_ev).ST = S;
end
end

if Caso_Ent_Prod == 0
Pa = AS_IND_C;
caso_salida=1;
Stadistic_Results{Actual_Station,jg,caso_salida} = struct('Stadistic_Ef',Stadistic_Ef,'Gamma_2',Gamma_2,'Md',
'Md','M_dh',M_dh,'Nd_a',Nd_a,'num_h',num_h,'dg',dg,'Ng',Ng,'uo',uo,...,
'Momento_Usado',Momento_Usado,'Total_a',Total_a,'Componente_Tensor_Maxwell',Componente_Tensor_Maxwell,...,
'Station_Used_Now',Station_Used_Now,'iMc',iMc,'Int_H',Int_H,'Aciertos',Aciertos,'Fallo',Fallo,'t',t,...,
'Label_Station',Label_Station,'dho',dho,'Dh',Dh,'nh',nh,'Num_h',Num_h,'f1',f1,'f2',f2,'Nv',Nv,...,
'M_Gamma',M_Gamma,'Max_a',Max_a,'Caso_Ent_Prod',Caso_Ent_Prod,'Pt',Pt,'Pa',Pa);
% save STADISTIC_ENTRENA_R_Gamma_100_10_1 Stadistic_Entra
else
caso_salida=2;
Stadistic_Results{Actual_Station,jg,caso_salida} = struct('Stadistic_Ef',Stadistic_Ef,'Gamma_2',Gamma_2,'Md',
'Md','M_dh',M_dh,'Nd_a',Nd_a,'num_h',num_h,'dg',dg,'Ng',Ng,'uo',uo,...,
'Momento_Usado',Momento_Usado,'Total_a',Total_a,'Componente_Tensor_Maxwell',Componente_Tensor_Maxwell,...,
'Station_Used_Now',Station_Used_Now,'iMc',iMc,'Int_H',Int_H,'Aciertos',Aciertos,'Fallo',Fallo,'t',t,...,
'Label_Station',Label_Station,'dho',dho,'Dh',Dh,'nh',nh,'Num_h',Num_h,'f1',f1,'f2',f2,'Nv',Nv,...,
'M_Gamma',M_Gamma,'Max_a',Max_a,'Caso_Ent_Prod',Caso_Ent_Prod,'Pt',Pt,'Pa',Pa);
% save STADISTIC_PPRODUCE_R_Gamma_100_10_1 Stadistic_Produce
end

```

```

    end % FIN DE CASO
end
end

% SALIDA EN CADA LAZO
%
switch Data_Stations
% std(:); == TYPE 1 NORMALIZACION EN LOS DATOS.
% std 1;== TYPE 2 NORMALIZACION EN LOS DATOS.
% STADISTIC_ENTRENA/PRODUCE_ZONA_VERSION %METADATOS

case 1 %JAPON
%----- VIEJO FORMATO -----
% save STADISTIC_ENTRENA_R_Japon_100_10_1 Stadistic_Entrena %std(:);
% save STADISTIC_PRODUCE_R_Japon_100_10_1 Stadistic_Produce %std(:);
% save STADISTIC_ENTRENA_R_Japon_100_10_1b Stadistic_Entrena %o=1;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,20);
% save STADISTIC_PRODUCE_R_Japon_100_10_1b Stadistic_Produce %o=1;Media_0 std 1 uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,20);
% save STADISTIC_ENTRENA_R_Japon_100_10_1c Stadistic_Entrena %Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,40);
Nd_a = 0
% save STADISTIC_PRODUCE_R_Japon_100_10_1c Stadistic_Produce %Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,40);
Nd_a = 0
% save STADISTIC_ENTRENA_R_Japon_100_10_1d Stadistic_Entrena %Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,50);
Nd_a = 0;nd_b = 30/Md
% save STADISTIC_PRODUCE_R_Japon_100_10_1d Stadistic_Produce %Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,50);
Nd_a = 0;nd_b = 30/Md
% save STADISTIC_ENTRENA_R_Japon_100_10_1f Stadistic_Entrena %Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(25,29,10);
Nd_a = 30/Md;nd_b = 30/Md
% save STADISTIC_PRODUCE_R_Japon_100_10_1f Stadistic_Produce %Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(25,29,10);
Nd_a = 30/Md;nd_b = 30/Md
%----- NUEVO FORMATO -----
% save STADISTIC_Results_Japon Stadistic_Results %std(:)
% save STADISTIC_Results_JaponA Stadistic_Results %NO SE GUARDO%o=1;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,10);Nd_a = 30/Md;nd_b = 30/Md
% save STADISTIC_Results_JaponB Stadistic_Results %o=10;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,20);Nd_a = 60/Md;nd_b = 60/Md
% save STADISTIC_Results_JaponC Stadistic_Results %o=1;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,20);Nd_a = 60/Md;nd_b = 60/Md
% save STADISTIC_Results_JaponD Stadistic_Results %o=1;Media_0 std (:);uo=1;Gamma_2 = (1,80,10);Nd_a = 90/Md;nd_b = 90/Md num_h = 1/2
% save STADISTIC_Results_JaponF Stadistic_Results %o=1;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,20);
% save STADISTIC_Results_JaponG Stadistic_Results %Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,40);Nd_a = 0
% save STADISTIC_Results_JaponH Stadistic_Results %Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,50);Nd_a = 0;nd_b = 30/Md
% save STADISTIC_Results_JaponI Stadistic_Results %Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(25,29,10);Nd_a = 30/Md;nd_b = 30/Md
% save STADISTIC_Results_JaponJ Stadistic_Results %std(:) 60 60 1 h (1,100,10) 1 10
% save STADISTIC_Results_JaponK Stadistic_Results %std(:) 90 90 1 h (1,100,10) 1
% save STADISTIC_Results_JaponL Stadistic_Results %std(:) 90 90 30 m (1,100,10) 1
% save ('STADISTIC_Results_JaponM', Stadistic_Results) %std(:) 90 90 1 h (1,100,100) 1
% save STADISTIC_Results_JaponP Stadistic_Results %std(:) 60 60 1 h (1,100,40) 1 10

case 2 %EUROPA SILENCIO SISMICO CON SISMOS SIMULADOS DUO
% save STADISTIC_Results_DOU Stadistic_Results %o=10;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,80,10);Nd_a = 60/Md;nd_b = 60/Md
%
%----- DOU -----
% save STADISTIC_Results_DOUa Stadistic_Results %o=10;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,80,5);Nd_a = 60/Md;nd_b = 60/Md Entrenamiento2
% save STADISTIC_Results_DOUb Stadistic_Results %o=10;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,80,5);Nd_a = 60/Md;nd_b = 60/Md Entrenamiento3
% save STADISTIC_Results_DOUc Stadistic_Results %o=10;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,10,5);Nd_a = 60/Md;nd_b = 60/Md Entrenamiento3
% save STADISTIC_Results_DOUd Stadistic_Results %o=10;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,20,10);Nd_a = 60/Md;nd_b = 60/Md Entrenamiento4 num_h = 1/2;
% save STADISTIC_Results_DOUe Stadistic_Results %o=10;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,80,10);Nd_a = 90/Md;nd_b = 90/Md Entrenamiento4 num_h = 1/2;
% save STADISTIC_Results_DOUg Stadistic_Results %std(:) 90 90 1 h (1,100,35) 10 Entrenamiento2 y producion 4
% save STADISTIC_Results_DOUh Stadistic_Results %std(:) 60 60 30m (1,50,10) 10 Entrenamiento4 y producion 4
case 3 %USA
%----- VIEJO FORMATO -----
% save STADISTIC_ENTRENA_R_USA_100_10_1 Stadistic_Entrena %std(:);
% save STADISTIC_PRODUCE_R_USA_100_10_1 Stadistic_Produce %std(:);
% save STADISTIC_ENTRENA_R_USA_100_10_1b Stadistic_Entrena %std(:); UO=1 gamma del 1 al 100, 50 valores
% save STADISTIC_PRODUCE_R_USA_100_10_1b Stadistic_Produce % std(:); UO=1 gamma del 1 al 100, 50 valores
%----- NUEVO FORMATO -----
% save STADISTIC_Results_USA Stadistic_Results %std(:);
% save STADISTIC_Results_USAa Stadistic_Results %o=1;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,10);Nd_a = 30/Md;nd_b = 30/Md
% save STADISTIC_Results_USAb Stadistic_Results %o=10;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,20);Nd_a = 90/Md;nd_b = 90/Md
% save STADISTIC_Results_USAc Stadistic_Results %o=10;Media_0 std (:);uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,10);Nd_a = 90/Md;nd_b = 90/Md num_h = 1/2
% save STADISTIC_Results_USAd Stadistic_Results %o=10;Media_0 std (:);uo=1;Gamma_2 = linspace(10,15,5);Nd_a = 90/Md;nd_b = 90/Md num_h = 1/2

```

```

% save STADISTIC_Results_USAf      Stadistic_Results
%      %ho=10;Media_0 std(:,);uo=1;Gamma_2 =
%      linspace(25,100,20);Nd_a = 60/Md;nd_b = 60/Md num_h = 1/2
%
% save STADISTIC_Results_USAg      Stadistic_Results
%      %ho=10;Media_0 std(:,);uo=1;Gamma_2 =
%      linspace(25,100,20);Nd_a = 60/Md;nd_b = 60/Md num_h = 1
%
% save STADISTIC_Results_USAh      Stadistic_Results %std(:,);UO=1 gamma del 1 al 100, 50 valores
case 4
%----- VIEJO FORMATO -----
% save STADISTIC_ENTRENA_R_CHILE_100_10_la Stadistic_Entrena % std(:,);%UO=0.5
% save STADISTIC_PRODUCE_R_CHILE_100_10_la Stadistic_Produce % std(:,);%UO=0.5
% save STADISTIC_ENTRENA_R_CHILE_100_10_lb Stadistic_Entrena % std(:,);%UO=1 gamma del 1 al 10, 100 valores
% save STADISTIC_PRODUCE_R_CHILE_100_10_lb Stadistic_Produce % std(:,);%UO=1 gamma del 1 al 10, 100 valores
% save STADISTIC_ENTRENA_R_CHILE_100_10_lc Stadistic_Entrena % std(:,);%UO=1 gamma del 1 al 100, 50 valores
% save STADISTIC_PRODUCE_R_CHILE_100_10_lc Stadistic_Produce % std(:,);%UO=1 gamma del 1 al 100, 50 valores
% save STADISTIC_ENTRENA_R_CHILE_100_10_ld Stadistic_Entrena % std(:,);%UO=0.5 gamma del 1 al 50, 10 valores
% save STADISTIC_PRODUCE_R_CHILE_100_10_ld Stadistic_Produce % std(:,);%UO=0.5 gamma del 1 al 50, 10 valores
%----- NUEVO FORMATO -----
% save STADISTIC_Results_Chile Stadistic_Results % std(:,);%UO=0.5
% save STADISTIC_Results_Chilea Stadistic_Results %ho=1;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,10);Nd_a =
  30/Md;nd_b = 30/Md
% save STADISTIC_Results_Chileb Stadistic_Results %ho=10;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,20);Nd_a =
  60/Md;nd_b = 60/Md
% save STADISTIC_Results_Chilec Stadistic_Results %ho=10;Media_0 std (:);uo=1;Gamma_2 = linspace(1,80,10);Nd_a =
  90/Md;nd_b = 90/Md num_h = 1/2
% save STADISTIC_Results_Chiled Stadistic_Results %std(:,); UO=1 gamma del 1 al 10, 100 valores
% save STADISTIC_Results_Chilef Stadistic_Results %std(:,); UO=1 gamma del 1 al 100, 50 valores
% save STADISTIC_Results_Chileg Stadistic_Results % std(:,); UO=0.5 gamma del 1 al 50, 10 valores
% save STADISTIC_Results_Chileh % std(:,) 60       60       1 h     (1,100,35)   0,5     10

case 5
%----- VIEJO FORMATO -----
% save STADISTIC_ENTRENA_R_DUR2_100_10_1 Stadistic_Entrena % std(:,);%UO = 1; SIN SE?AL REGISTRADA:
% save STADISTIC_PRODUCE_R_DUR2_100_10_1 Stadistic_Produce % std(:,);%UO = 1; SIN SE?AL REGISTRADA:
% save STADISTIC_ENTRENA_R_DUR2_100_10_lb Stadistic_Entrena % std(:,);%UO = 0.6; gamma 1 al 100, 10 valores SIN
  SE?AL REGISTRADA:
% save STADISTIC_PRODUCE_R_DUR2_100_10_lb Stadistic_Produce % std(:,);%UO = 0.6; gamma 1 al 100, 10 valores SIN
  SE?AL REGISTRADA:
% save STADISTIC_ENTRENA_R_DUR2_100_10_lc Stadistic_Entrena % std(:,);%UO = 0.5; gamma 1 al 100, 10 valores;
  SIN SE?AL REGISTRADA:
% save STADISTIC_PRODUCE_R_DUR2_100_10_lc Stadistic_Produce % std(:,);%UO = 0.5; gamma 1 al 100, 10 valores;
  SIN SE?AL REGISTRADA:
% save STADISTIC_ENTRENA_R_DUR2_100_10_1d Stadistic_Entrena % std(:,);%UO = 0.3; gamma 1 al 100, 10 valores;
% save STADISTIC_PRODUCE_R_DUR2_100_10_1d Stadistic_Produce % std(:,);%UO = 0.3; gamma 1 al 100, 10 valores;
% save STADISTIC_ENTRENA_R_DUR2_100_10_1f Stadistic_Entrena % std(:,);%UO = 0.3; gamma 1 al 100, 100 valores;
% save STADISTIC_PRODUCE_R_DUR2_100_10_1f Stadistic_Produce % std(:,);%UO = 0.3; gamma 1 al 100, 100 valores;
%----- NUEVO FORMATO -----
% save STADISTIC_Results_DUR Stadistic_Results % std(:,);%UO = 1; SIN SE?AL REGISTRADA:
% save STADISTIC_Results_DURa Stadistic_Results %ho=1;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,10);Nd_a =
  30/Md;nd_b = 30/Md
% save STADISTIC_Results_DURb Stadistic_Results %ho=10;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,20);Nd_a =
  60/Md;nd_b = 60/Md
% save STADISTIC_Results_DURc Stadistic_Results %ho=10;Media_0 std (:);uo=1;Gamma_2 = linspace(1,80,10);Nd_a =
  90/Md;nd_b = 90/Md num_h = 1/2
% save STADISTIC_Results_DURd Stadistic_Results % std(:,);%UO = 0.6; gamma 1 al 100, 10 valores SIN SE?AL
  REGISTRADA:
% save STADISTIC_Results_DURf Stadistic_Results % std(:,);%UO = 0.5; gamma 1 al 100, 10 valores; SIN SE?AL
  REGISTRADA:
% save STADISTIC_Results_DURg Stadistic_Results % std(:,);%UO = 0.3; gamma 1 al 100, 10 valores;
% save STADISTIC_Results_DURh Stadistic_Results % std(:,);%UO = 0.3; gamma 1 al 100, 100 valores;
case 6
%----- VIEJO FORMATO -----
% save STADISTIC_ENTRENA_R_PEG2_100_10_1 Stadistic_Entrena % std(:,);
% save STADISTIC_PRODUCE_R_PEG2_100_10_1 Stadistic_Produce % std(:,);
% save STADISTIC_ENTRENA_R_PEG2_100_10_lb Stadistic_Entrena % std(:,);
% save STADISTIC_PRODUCE_R_PEG2_100_10_lb Stadistic_Produce % std(:,);
%----- NUEVO FORMATO -----
% save STADISTIC_Results_PEG Stadistic_Results % std(:,);
% save STADISTIC_Results_PEGA Stadistic_Results %ho=1;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,10);Nd_a =
  30/Md;nd_b = 30/Md
% save STADISTIC_Results_PEGb Stadistic_Results %ho=10;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,20);Nd_a =
  60/Md;nd_b = 60/Md
% save STADISTIC_Results_PEGc Stadistic_Results %ho=10;Media_0 std (:);uo=1;Gamma_2 = linspace(1,80,10);Nd_a =
  90/Md;nd_b = 90/Md num_h = 1/2
% save STADISTIC_Results_PEGd Stadistic_Results % std(:,);

case 7
%----- NUEVO FORMATO -----
% save STADISTIC_Results_PET Stadistic_Results %ho=10;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,20);Nd_a =
  60/Md;nd_b = 60/Md
% save STADISTIC_Results_PETA Stadistic_Results %ho=10;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,20);Nd_a =
  30/Md;nd_b = 30/Md
% save STADISTIC_Results_PETb Stadistic_Results %ho=10;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,10);Nd_a =
  60/Md;nd_b = 60/Md
% save STADISTIC_Results_PETc Stadistic_Results %ho=10;Media_0 std (:);uo=1;Gamma_2 = linspace(1,80,10);Nd_a =
  90/Md;nd_b = 90/Md num_h = 1/2
% save STADISTIC_Results_PETd Stadistic_Results %ho=10;Media_0 std (:);uo=1;Gamma_2 = linspace(1,80,10);Nd_a =
  60/Md;nd_b = 60/Md %produccion 2
% save STADISTIC_Results_PETf Stadistic_Results %ho=10;Media_0 std (:);uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,10);Nd_a =
  60/Md;nd_b = 60/Md %produccion 2
% save STADISTIC_Results_PETg Stadistic_Results %ho=10;Media_0 std (:);uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,10);Nd_a =
  60/Md;nd_b = 60/Md
% save STADISTIC_Results_PETH Stadistic_Results %ho=10;Media_0 std 1;uo=1;Gamma_2 = linspace(1,100,10);Nd_a =
  60/Md;nd_b = 60/Md num_h = 1/2
% save STADISTIC_Results_PETi Stadistic_Results %std(:,) 90       90       1     (1,100,50)    1
  10
% save STADISTIC_Results_PETj Stadistic_Results %std(:,) 90       0       1     (1,100,20)    1
  10 Entrenamiento 2 y produccion 2
% save STADISTIC_Results_PETk Stadistic_Results %std(:,) 60       60       1     (1,100,40)    1

```

```
end
end
% FIN
%=====
```

### B.3.1. Data Geomagnética.

```
% DATA GEOMAGNETICA DE LAS ESTACIONES A ESTUDIAR
%=====
function [Data, Label_Station] = Data_Geomagnetica(n);
%clc
Data = [];
Label_Station = [];
%clc
% disp('(1) Japon (2) Europa (3) Otras estaciones')
switch n
case 1
    disp('Data seleccionada correspondiente a Japon')
    %JAPON
    %
    Data_1 = 'Japon_KAK_2004_2015.mat';
    Data_2 = 'Japon_KNY_2004_2015.mat';
    Data_3 = 'Japon_MMB_2004_2015.mat';
    %
    Label_Station = {'KAK', 'KNY', 'MMB'}; % ETIQUETAS DE LAS ESTACIONES JAPON
    %
case 12
    disp('Data seleccionada correspondiente a Japon(solo KNY)')
    %JAPON
    %
    Data_1 = 'Japon_KNY_2004_2021.mat';
    Data_2 = 'Japon_KNY_2004_2021.mat';
    Data_3 = 'Japon_KNY_2004_2021.mat';
    %
    Label_Station = {'KNY', 'KNY', 'KNY'}; % ETIQUETAS DE LAS ESTACIONES JAPON
    %
case 13
    disp('Data seleccionada correspondiente a Japon(solo MMB)')
    %JAPON
    %
    Data_1 = 'Japon_MMB_2004_2021.mat';
    Data_2 = 'Japon_MMB_2004_2021.mat';
    Data_3 = 'Japon_MMB_2004_2021.mat';
    %
    Label_Station = {'MMB', 'MMB', 'MMB'}; % ETIQUETAS DE LAS ESTACIONES JAPON
    %
case 2
    disp('Data seleccionada correspondiente a Europa (DOU-MAB-WNG)')
    Data_1 = 'DOU_2005_2013.mat';
    Data_2 = 'MAB_2005_2013.mat';
    Data_3 = 'WNG_2005_2013.mat';
    %
    Label_Station = {'DOU', 'MAB', 'WNG'}; % ETIQUETAS DE LAS ESTACIONES EUROPA
    %
case 3
    disp('Data seleccionada correspondiente a USA')
    Data_1 = 'USA_NEW_1998_2007_P3.mat';
    Data_2 = 'USA_SIT_1998_2007_P3.mat';
    Data_3 = 'USA_VIC_1998_2007_P3.mat';
    %
    Label_Station = {'NEW', 'SIT', 'VIC'}; % ETIQUETAS DE LAS ESTACIONES USA
    %
case 4
    disp('Data seleccionada correspondiente a CHILE')
    Data_1 = 'Chile_HUA_2002_2011.mat';
    Data_2 = 'Chile_HUA_2002_2011.mat';
    Data_3 = 'Chile_HUA_2002_2011.mat';
    %
    Label_Station = {'HUA', 'HUA', 'HUA'}; % ETIQUETAS DE LAS ESTACIONES CHILE
    %
case 5
    disp('Data seleccionada correspondiente a SUR DE EUROPA (DUR)')
    Data_1 = 'DUR_2016_2020.mat';
    Data_2 = 'LON_2016_2020.mat';
    Data_3 = 'THY_2016_2020.mat';
    %
    Label_Station = {'DUR', 'LON', 'THY'}; % ETIQUETAS DE LAS ESTACIONES (DUR)
    %
case 6
    disp('Data seleccionada correspondiente a SUR DE EUROPA (PEG-PAG-IZN)')
    Data_1 = 'PEG_2016_2020.mat';
    Data_2 = 'PAG_2016_2020.mat';
    Data_3 = 'IZN_2016_2020.mat';
    %
    Label_Station = {'PEG', 'PAG', 'IZN'}; % ETIQUETAS DE LAS ESTACIONES (PEG)
    %
case 7
    disp('Data seleccionada correspondiente muy al norte de Japon (PET)')
    Data_1 = 'PET_2007_2020.mat';
    Data_2 = 'PET_2007_2020.mat';
    Data_3 = 'PET_2007_2020.mat';
    %
    Label_Station = {'PET', 'PET', 'PET'}; % ETIQUETAS DE LAS ESTACIONES EUROPA
```

```

%
otherwise
    disp('Elija otra estacion')
    return
end
%
Data = [Data_1;Data_2;Data_3]; % ETIQUETAS DE LOS DIRECTORIOS
%

```

### B.3.2. Programa General Precursores Relativistas.

```

% Programa_General_Precurosres_Relativistas.m
%
% DESCRIPCION: prepara las componentes Bx, By, Bz en ventanas horarias que
% puedan ser calculadas en la función:
% Relativistic_Flux_as_Seismic_Precursors_Tensor
% Esta función tambien necesitará la posición geográfica de las estaciones
% geomagnéticas.
% SALIDA:
%
% CONTEO UMBRALIZADO Y FILTRADO PARA CADA GAMMA Y PARA CADA INTERVALO DE HORAS DEL DIA
%
% Count_Por % USANDO EFICIENCIA PORCENTUAL PARA CADA (Md) DIAS
% P % USANDO AMPLITUD DEL PRECURSOR
% Fp % DENSIDAD DE MOMENTUM (VECTOR DE POINTING)
%
% DEFINICION DE PARAMETROS DE ENTRADA
%
% DIMENSION DE LOS DATOS
%
[bn,bm,bk] = size(Bxn(:,1:mf,:));
% REDIMENSIONA LOS DATOS HASTA CONSEGUIR UN MULTIPLO DEL NUMERO DE VENTANAS X
% NUMERO DE DIAS POR VENTANA APROX A LA DIMENSION DE LOS DATOS (NUMERO TOTAL DE DIAS)
%
n = 0;
while rem(bm-n,Md) > 0
    n = n + 1;
end
Nv = (bm - n)/Md; % NUMERO DE VENTANAS
% UMBRAL
%
u1 = 0; % UMBRAL INFERIOR (EN VALORES DE SIGMA)
u2 = 70; % UMBRAL SUPERIOR (EN VALORES DE SIGMA)
n_u = 20; % NUMERO TOTAL DE UMBRALES
Uo = linspace(u1,u2,n_u); % VECTOR DE UMBRALES (EN VALORES DE SIGMA)
% HORAS DEL DIA
%
nh = 1; % NUMERO DE HORAS CORRESPONDIENTE AL ANCHO DE LA VENTANA DE DATOS
ng = 2; % NUMERO DE GAMMAS USADOS PARA PROMEDiar
St = [1 2 3]; % ESTACIONES A UTILIZAR
[Gamma,E] = Energia_Vs_Gamma(gamma,0); % ENERGIA EN GeV
%
grados_km = 111.11; % CONVERSIÓN DE GRADOS A KM
ko = 1; % PARÁMETRO DE AMPLIFICACIÓN PARA VISUALIZAR
hp = 6; % FILTRO DE SUAVIZACIÓN PARA EL PRECURSOR (usando amplitud)
hc = 6; % FILTRO DE SUAVIZACIÓN PARA EL PRECURSOR (usando conteo (eficiencia
    porcentual %))
h2 = 14; % FILTRO DE SUAVIZACIÓN PARA EL GRAFICO
h3 = 8; % NUMERO DE BINES DEL HISTOGRAMA DE FRECUENCIA SISMICA
%
na = length(Fo)/365.5; % NUMERO TOTAL DE AÑOS CONSIDERADO
% FRECUENCIA SISMICA
%
[ny,nx] = hist(Lxx(:,1),h3);
fs = round((na*365.25)/h3); % FRECUENCIA SISMICA EN SISMOS/TIEMPO
%
% ESTACIONES INTERMAGNET
%
load Estaciones_intermagnet_IEBQuakesExport.mat
latitud = 90 - Colatitud; % 90 - COLATITUD = LATITUD
Long_Intermagnet = EastLongitude;
ind = find(Long_Intermagnet >= 180);
Long_Intermagnet(ind) = Long_Intermagnet(ind) - 360;
idx = [];
Ind_M = [];
for j=1:length(Label_Station);
    for i=1:length(IAGA);
        idx = strfind(IAGA(i),Label_Station(j));
        if (cell2mat(idx)== 1)
            Ind_M = [Ind_M,i];
            i = length(IAGA);
        end
    end
end
%
% ESTACIONES UTILIZADAS
%
% REALES
%
x_station = latitud(Ind_M) * grados_km;
y_station = Long_Intermagnet(Ind_M) * grados_km;
z_station = [0.042 0.033 0.107]*grados_km;
%
% SIMULADAS
%
% x_station = x_station_Sim;
% y_station = y_station_Sim;
% z_station = z_station_Sim;
%
% LOCALIZACION DEL EVENTO SISMICO DE JAPON

```

```

%=====
switch Data_Stations
case 1 %JAPON
    HLJ = 1.157401129603386e-05*60*60*9; %HORA LOCAL Japon
    Mag = 9.1; %MAGNITUD DEL EVENTO
    ts = '11-Mar-2011 05:46:23'; %GRAN TERREMOTO DE JAPON HORA UTC
    Lat_sismo = 38.19;
    Long_sismo = 142.22;
    x_event = Lat_sismo*grados_km;
    y_event = Long_sismo*grados_km;
    z_event = 29;
case 2 %Europa silencio sismico sismos simulados
    HLJ = 1.157401129603386e-05*60*60*(1.3393); %HORA LOCAL EUROPA
    Mag = 7.2; %MAGNITUD DEL EVENTO
    ts = datenum([2005 3 2]);
    Lat_sismo = 49;
    Long_sismo = 4.56;
    x_event = Lat_sismo*grados_km;
    y_event = Long_sismo*grados_km;
    z_event = 11.8;
case 3 %USA
    T=timezones('America');
    % mean(T.UTCOffset)
    HLJ = 1.157401129603386e-05*60*60*(-4.9660); %HORA LOCAL USA
    Mag = 6.8; %MAGNITUD DEL EVENTO
    ts = datenum([2001 02 28]);
    Lat_sismo = 47.15;
    Long_sismo = -122.63;
    x_event = Lat_sismo*grados_km;
    y_event = Long_sismo*grados_km;
    z_event = 56;
case 4 %CHILE
    T=timezones('America');
    % mean(T.UTCOffset)
    HLJ = 1.157401129603386e-05*60*60*(-4.9660); %HORA LOCAL CHILE
    Mag = 8; %MAGNITUD DEL EVENTO
    ts = datenum([2007 08 15]);
    Lat_sismo = -13.38;
    Long_sismo = -76.55;
    x_event = Lat_sismo*grados_km;
    y_event = Long_sismo*grados_km;
    z_event = 40;
case 5 %EUROPA DUR
    T=timezones('America');
    % mean(T.UTCOffset)
    HLJ = 1.157401129603386e-05*60*60*(1.3393); %HORA LOCAL EUROPA
    Mag = 6.2; %MAGNITUD DEL EVENTO
    ts = datenum([2016 08 24]);
    Lat_sismo = 42.72;
    Long_sismo = 13.19;
    x_event = Lat_sismo*grados_km;
    y_event = Long_sismo*grados_km;
    z_event = 4.4;
case 6 %EUROPA PAN IZN PEN
    T=timezones('America');
    % mean(T.UTCOffset)
    HLJ = 1.157401129603386e-05*60*60*(1.3393); %HORA LOCAL EUROPA
    Mag = 6.6; %MAGNITUD DEL EVENTO
    ts = datenum([2017 07 20]);
    Lat_sismo = 36.92;
    Long_sismo = 27.41;
    x_event = Lat_sismo*grados_km;
    y_event = Long_sismo*grados_km;
    z_event = 7;
case 7 %JAPON PET PET
    T=timezones('America');
    % mean(T.UTCOffset)
    HLJ = 1.157401129603386e-05*60*60*9; %HORA LOCAL JAPON
    Mag = 7.2; %MAGNITUD DEL EVENTO
    ts = datenum([2016 1 30]);
    Lat_sismo = 54.00;
    Long_sismo = 158.51;
    x_event = Lat_sismo*grados_km;
    y_event = Long_sismo*grados_km;
    z_event = 163.2;
end
%=====
% ETIQUETAS DE LOS PRECURSORES DEL TENSOR ELECTROMAGNETICO
%=====
Precursor_Usado = {'Energia total','Presion de radiacion','Flujo de momentum en x ==> plano yz','Flujo de momentum en y ==> plano xz',...
    'Flujo de momentum en z ==> plano xy','Traza del tensor','Densidad de momentum (Vector de Pointing)'};
%=====
if band == 1
if band_display == 1
    fprintf('status\n')
    disp('Selected stations')
    fprintf(' \n')
    disp(Label_Station)
    fprintf(' \n')
    disp('Selected data')
    fprintf(' \n')
    disp(Data)
    fprintf(' \n')

```

```

fprintf('Numero de dias por ventana Md: %1.0f\n',Md)
fprintf('Numero de ventanas Nv: %1.0f\n',Nv)
fprintf('Umbral inferior: %1.0f\n',u1)
fprintf('Umbral superior: %1.0f\n',u2)
fprintf('Numero de umbrales: %1.0f\n',n_u)
Ih = [ 'Intervalo horario [0 to 24h] => [', repmat(' %d ',1,length(dh)) ']\n'];
fprintf(Ih,dh)
fprintf('Gamma inferior: %1.0f\n',gamma_1)
fprintf('Gamma superior: %1.0f\n',gamma_2)
fprintf('Valor medio de Gamma: %1.2f\n',mean(G))
fprintf('Gammas usados: %1.0f\n',Ng)
fprintf('Numero de gammas usados para promediar: %1.0f\n',ng)
fprintf('Numero de estaciones usadas: %d\n',length(St))
for i=1:length(St)
    fprintf('Estacion: [%1.1f] %\n',St(i),cell2mat(IAGA(Ind_M(St(i))))),end
fprintf('Parametro de amplificacion: %1.0f\n',ko)
fprintf('Filtro de suavizacion precursor: %1.0f\n',hp)
fprintf('Filtro de suavizacion del grafico: %1.0f\n',h2)
fprintf('Precursor_Usado: %',cell2mat(Precursor_Usado(Componente_Tensor_Maxwell)))
fprintf('\nstatus=\n')
end
%
% GENERA PRECURSORES
%
if band == 0
%
M = [];
Bxt = []; Byt = []; Bzt = [];
%
% DETERMINA LAS DIMENSIONES MINIMAS DE LAS ESTACIONES
%
for i=1:length(St)
    S = whos('-file',Data(St(i),:));
    M = [M;str2num(mat2str(S(2).size))];
end
%
moo = min(M(:,1));
noo = min(M(:,2));
vm = 1:moo;
vn = 1:noo;
v = 1:moo*noo;
[Bxn,Byn,Bzn,F,Fo] = Proceso_Normaliza_media0_desv1(Label_Station,Data,2,1);
%
end
if band == 0
%
% VISUALIZACION DE LA DATA DE LAS TRES ESTACIONES
%
%COMPONENTE X
%
set.figure(1,'Position',[1 28 1920 950],'Color','W')
for st=1:length(St)
    subplot(3,1,st)
    imagesc(Bxt(:,:,st)),colormap jet,colorbar
    title(['X component from Station number: ' num2str(St(st))]),grid, axis on
    ylabel('[0 to 24 hours]')
end
g = get.figure(1);
g1 = g.Children;
set(g1(1),'Position',[0.9607 0.1095 0.0139 0.2158]);
set(g1(2),'Position',[0.0510 0.1100 0.8938 0.2157]);
set(g1(3),'Position',[0.9629 0.4095 0.0139 0.2158]);
set(g1(4),'Position',[0.0510 0.4096 0.8954 0.2157]);
set(g1(5),'Position',[0.9633 0.7095 0.0139 0.2158]);
set(g1(6),'Position',[0.0505 0.7093 0.8964 0.2157]);
xlabel(['Time in days from: ' datestr(Fo(1)) ' to ' datestr(Fo(end))])
Ejes_Visibles(1)
%COMPONENTE Y
%
set.figure(2,'Position',[1 28 1920 950],'Color','W')
for st=1:length(St)
    subplot(3,1,st)
    imagesc(Byt(:,:,st)),colormap jet,colorbar
    title(['Y component from Station number: ' num2str(St(st))]),grid, axis on
    ylabel('[0 to 24 hours]')
end
g = get.figure(2);
g1 = g.Children;
set(g1(1),'Position',[0.9607 0.1095 0.0139 0.2158]);
set(g1(2),'Position',[0.0510 0.1100 0.8938 0.2157]);
set(g1(3),'Position',[0.9629 0.4095 0.0139 0.2158]);
set(g1(4),'Position',[0.0510 0.4096 0.8954 0.2157]);
set(g1(5),'Position',[0.9633 0.7095 0.0139 0.2158]);
set(g1(6),'Position',[0.0505 0.7093 0.8964 0.2157]);
xlabel(['Time in days from: ' datestr(Fo(1)) ' to ' datestr(Fo(end))])
Ejes_Visibles(2)
%COMPONENTE X
%
set.figure(3,'Position',[1 28 1920 950],'Color','W')
for st=1:length(St)
    subplot(3,1,st)
    imagesc(Bzt(:,:,st)),colormap jet,colorbar
    title(['Z component from Station number: ' num2str(St(st))]),grid, axis on
    ylabel('[0 to 24 hours]')
end
g = get.figure(3);
g1 = g.Children;

```

```

set(g1(1), 'Position', [0.9607    0.1095    0.0139    0.2158]);
set(g1(2), 'Position', [0.0510    0.1100    0.8938    0.2157]);
set(g1(3), 'Position', [0.9629    0.4095    0.0139    0.2158]);
set(g1(4), 'Position', [0.0510    0.4096    0.8954    0.2157]);
set(g1(5), 'Position', [0.9633    0.7095    0.0139    0.2158]);
set(g1(6), 'Position', [0.0505    0.7093    0.8964    0.2157]);
xlabel(['Time in days from: ', datestr(Fo(1)), ' to ', datestr(Fo(end))])
Ejes_Visibles(3)
%
end
% GENERACION DE LA VENTANA DESLIZANTE
%
NH = Num_h*24*dho; % NUMERO TOTAL DE HORAS EN UN DIA
np = round(NH/nh); % NUMERO TOTAL DE PARTES IGUALES EN LA SE DESEA DIVIDIR LA TOTALIDAD DE LOS DATOS

% ENCUENTRA MULTIPLO DE LA MATRIZ DE ACUERDO AL NUMERO DE DIAS POR VENTANA ELEGIDOS
%
[m,n,k] = size(Bxn);
dn = 0;
while rem((m+dn)/nh,np)
dn = dn + 1;
end
%
vn = m-dn+1:m;
Bmx = Bxn(vn,:,:); % MATRIZ MASCARA PARA ASEGURAR UNA DIMENSION DE MATRIZ QUE SEA MULTIPLO DE nh
Bmy = Byn(vn,:,:); % PARA ELLO SE TOMAN LOS ULTIMOS dn ELEMENTOS DE LA MATRIZ Bxn, Byn y Bzn
Bmz = Bzn(vn,:,:); % SE AGREGAN A LA MATRIX Bxn, Byn y Bzn CREANDO UNA NUEVA MATRIZ BxN, ByN y BzN
BxN = [Bxn;Bmx];
ByN = [Byn;Bmy];
BzN = [Bzn;Bmz];
%
% VISUALIZACION DE LA MATRIZ MASCARA
%
if band == -3
close all
set(figure(1), 'Position', [5 261 1912 717], 'Color', 'W')
BxNv = BxN;
BxNv(end-dn+1:end,:,:)=BxNv(end-dn+1:end,:,:)+10;
imagesc(BxNv(:,:,1)), axis xy
title(['Original matrix [ ', num2str(size(Bxn,1)) 'x', num2str(size(Bxn,2)), ', ] plus the mask ', num2str(dn) ...
' rows at the end: New matriz: [ ', num2str(size(BxN,1)) 'x', num2str(size(BxN,2)), ', ] '])
ylim([1 size(BxN,1)+50])
xlabel('Time in days')
ylabel('Time interval (0 to 24 hours)')
axis on, grid
colormap jet, colorbar
g = get(figure(1));
g1 = g.Children;
set(g1(1), 'Position', [0.9582    0.0823    0.0139    0.8466]);
set(g1(2), 'Position', [0.0460    0.0823    0.8950    0.8466]);
Ejes_Visibles(1)
pause
end
%
mo = round((m+dn)/np);
Bxnr = reshape(Bxn,np,mo,n,k);
Bynr = reshape(Byn,np,mo,n,k);
Bznr = reshape(Bzn,np,mo,n,k);
%
% PARA VISUALIZAR EL FORMATO DE LOS DATOS
% PERMITE TESTAR EL FORMATO DE LOS DATOS
%
if band == -3
N_h = linspace(0,24, size(BxN,1));
v1 = 1:np:size(BxN,1); v1(1)=1;
v2 = np:np:size(BxN,1);
Bv = BxN;
nk = 10; % NUMERO DE FILAS A TESTAR
close all
set(figure(1), 'Position', [6 32 1910 946], 'Color', 'W')
for i=1:size(Bxnr,2)
Bc = BxN;
a = squeeze(Bv(1:nk,:,:));
b = squeeze(Bxnr(1:nk,i,:,:));
[Xp,Yp,p] = polinomio2(a(:,b(:,1,10,0));
Test = sum(a(:,b(:,1,10,0));
if band_dysplay == 1
disp(Test)
end
%
subplot(2,2,1)
plot(a(:,b(:,1,'.'), hold on
plot(Xp,Yp,'r')
grid
title(['Mean interval: ', num2str(mean(N_h(v1(i)):N_h(v2(i)))) , ' hours and [mo : bo] ==> [ ', num2str(p(1)) ' : ', ...
num2str(round(p(2))), ', ] '])
xlabel('Old format'), ylabel('New format')
xlim([-max(abs(a(:)))-5 max(abs(a(:)))+5])
ylim([-max(abs(a(:)))-5 max(abs(a(:)))+5])
subplot(2,2,2)
plot(squeeze(Bv(1:nk,:,:)), 'b')
hold on, plot(squeeze(Bxnr(1:nk,i,:,:)), 'r'), hold off, grid
title(['Old format (-b) and New format (-r) for first: ', num2str(nk) , ' rows'])
%
Bv(1:size(Bxnr,1),:,:)=[];
Bc(v1(i):v2(i),:,:)=Bc(v1(i):v2(i),:,1)+ 10;
%
xlim([0 size(Bxnr,3)])
ylim([-max(abs(a(:)))-5 max(abs(a(:)))+5])
subplot(4,1,3)
imagesc(1:size(Bxnr,3),N_h,Bc(:,:,1)), axis xy, axis on, grid, colormap jet, colorbar

```

```

title(['Horary interval: ', num2str(N_h(v1(i))), ' to ', num2str(N_h(v2(i)))])
ylabel('0 to 24h')
subplot(4,1,4)
plot(mean(Bc(v1(i):v2(i),:,:1))), grid
xlim([0 size(Bxnr,3)])
ylim([0 20])
xlabel('Time in days')
ylabel('Amplitude')
g = get.figure(1));
g1 = g.Children;
set(g1(1), 'Position',[0.0393 0.0698 0.9382 0.1871]);
set(g1(2), 'Position',[0.9644 0.3277 0.0140 0.1808]);
set(g1(3), 'Position',[0.0403 0.3277 0.9047 0.1808]);
set(g1(4), 'Position',[0.5241 0.5740 0.4529 0.3795]);
set(g1(5), 'Position',[0.0393 0.5719 0.4550 0.3784]);
Ejes_Visibles(1)
pause(.01)
end
pause
end
%
%
% VALOR MEDIO POR VENTANA DESLIZANTE (nh) EN LA DIRECCION VERTICAL
%
Bxm = squeeze(mean(permute(Bxnr,[2 1 3 4])));
Bym = squeeze(mean(permute(Bynr,[2 1 3 4])));
Bzm = squeeze(mean(permute(Bznr,[2 1 3 4])));
Bxm = Bxm(:,:,St);
Bym = Bym(:,:,St);
Bzm = Bzm(:,:,St);
%
% VISUALIZA LOS PROMEDIO DE CADA VENTANA
%
if band == -3
close all
for i=1:size(Bxm,3)
set.figure(i), 'Position',[5 32 1912 946], 'Color', 'W')
subplot(3,1,1)
plot(Bxm(:,:,i))
ylim([-10 10])
xlim([0 size(Bxm,2)])
ylabel('Amplitude')
title(['Bxm and Station: ', Label_Station(i)])
grid
subplot(3,1,2)
plot(Bym(:,:,i))
ylim([-10 10])
xlim([0 size(Bxm,2)])
ylabel('Amplitude')
title(['Bym and Station: ', Label_Station(i)])
grid
subplot(3,1,3)
plot(Bzm(:,:,i))
ylim([-10 10])
xlim([0 size(Bxm,2)])
ylabel('Amplitude')
xlabel('Time in days')
title(['Bzm and Station: ', Label_Station(i)])
grid
g = get.figure(i);
g1 = g.Children;
set(g1(1), 'Position',[0.0387 0.1100 0.9419 0.2157]);
set(g1(2), 'Position',[0.0345 0.4096 0.9440 0.2157]);
set(g1(3), 'Position',[0.0314 0.7093 0.9461 0.2157]);
Ejes_Visibles(i)
end
pause
end
%
%
% GENERACION DEL PRECURSOR (CICLO EN GAMMA Y EN CADA UMBRAL Y PARA LAS HORAS DEL DIA ELEGIDAS)
%
GM = {};
GS = {};
%
% CICLOS PARA CADA INTERVALO HORARIO Y PARA CADA VALOR DE GAMMA
%
Gm = [];
Gs = [];
P = [];
fp = [];
for k=1:length(dh)-1 % ojo (-1)           % PARA CADA INTERVALO HORARIO
for g = 1:length(gamma)-ng            % PARA CADA VALOR DE GAMMA
    Gamma = gamma(g:g+ng);           % SE CONSIDERAN DOS VALORES CONSECUTIVOS DE GAMMA (LUEGO SE PROMEDIA)
    Energy = E(g:g+ng);
    Pm = []; pm = [];
    Ps = []; ps = [];
    for j=1:length(Gamma)
        M_Gamma = [M_Gamma; mean(Gamma)]; % VALORES MEDIOS DE GAMMA POR INTERVALO PROMEDIADO DEL FLUJO
    % PRECURSOR USADO: TENSOR ELECTROMAGNETICO
    %
    %
    % TENSOR DE MAXWELL
    %
    if Componente_Tensor_Maxwell ~= 7
        [W,Rp,Sxy,Sxz,Syz,Tz] = Relativistic_Flux_as_Seismic_Precursors_Tensor(Bxm,Bym,Bzm,...           % COMPONENTES
        PROMEDIO DEL CAMPO POR INTERVALO
        Gamma(j),...                           % VALOR DE GAMMA
        x_station,y_station,z_station,...     % COORDENADAS DE POSICION DE LA ESTACION
        x_event,y_event,z_event,...           % COORDENADAS DE EVENTO SISMICO
        Mag,0); pause(0.5)                   % MAGNITUD CONSIDERADA
    end
end

```

```

k_w = 1; %ell;
k_p = 1; %e7;
k_syz = 1; %e3;
k_sxz = 1; %e3;
k_sxy = 1; %el;
k_tz = 1; %e5;
k_fp = 1; %.9882;%el;

% ETIQUETAS DE LOS PRECURSORES DEL TENSOR ELECTROMAGNETICO
%
switch Componente_Tensor_Maxwell
case 1 %ENERGIA TOTAL
Fp = W/k_w;
case 2 %PRESION DE RADIACION
Fp = Rp/k_p;
case 3
Fp = abs(Syz)/k_syz; %FLUJO DE MOMENTO (EN X ==> plano_yz)
case 4
Fp = abs(Sxz)/k_sxz; %FLUJO DE MOMENTO (EN Y ==> plano_xz)
case 5
Fp = abs(Sxy)/k_sxy; %FLUJO DE MOMENTO (EN Z ==> plano_xy)
case 6
Fp = abs(Tz)/k_tz; %TRAZA DEL TENSOR
case 7 %DENSIDAD DE MOMENTUM (VECTOR DE POINTING)
%
%
```

---

```

% DENSIDAD DE MOMENTUM (VECTOR DE POINTING)
%
Fp = Relativistic_Flux_as_Seismic_Precursors(Bxm,Bym,Bzm,...) %COMPONENTES PROMEDIO DEL
CAMPO POR INTERVALO %VALOR DE GAMMA
Gamma(j),... %COORDENADAS DE POSICION DE LA
x_station,y_station,z_station,... %COORDENADAS DE EVENTO SISMICO
ESTACION %MAGNITUD DEL EVENTO
x_event,y_event,z_event,... %-
Mag,0); %pause
Fp = Fp/k_fp;
otherwise
disp(['Warning ... Componente del tensor NO seleccionada'])
end %PARA VISUALIZAR EL PRECURSOR PARA CADA ESTACION
%
if band == -3
close all
M_Fp = max(Fp(:));
set(figure(1), 'Position',[6 32 1910 946], 'Color', 'W')
subplot(3,1,1)
plot(Fp(:, :, 1))
ylim([0 M_Fp])
xlim([0 size(Fp, 2)])
ylabel('Amplitude')
title(['Fp Station: ', Label_Station(1)])
grid
subplot(3,1,2)
plot(Fp(:, :, 2))
ylim([0 M_Fp])
xlim([0 size(Fp, 2)])
ylabel('Amplitude')
title(['Fp and Station: ', Label_Station(2)])
grid
subplot(3,1,3)
plot(Fp(:, :, 3))
ylim([0 M_Fp])
xlim([0 size(Fp, 2)])
ylabel('Amplitude')
xlabel('Time in days')
title(['Fp and Station: ', Label_Station(3)])
grid
g = get(figure(1));
g1 = g.Children;
set(g1(1), 'Position',[0.0419 0.1100 0.9361 0.2157]);
set(g1(2), 'Position',[0.0408 0.4096 0.9377 0.2157]);
set(g1(3), 'Position',[0.0414 0.7093 0.9361 0.2157]);
Ejes_Visibles(1)
pause(.1)
end %

```

---

```

%PROMEDIO DEL FLUJO POR ESTACION EN EL INTERVALO DE HORAS ELEGIDO
%
if length(Station_Used_Now) > 1
for i=1:length(Station_Used_Now)
pm = [pm; mean(Fp(dh(k):dh(k+1), :, St(Station_Used_Now(i))))];
ps = [ps; std(Fp(dh(k):dh(k+1), :, St(Station_Used_Now(i))))];
% VISUALIZA EL PROMEDIO DE Fp POR INTERVALO HORARIO Y POR ESTACION
%
if band == -3
%close all
set(figure(1), 'Position',[5 121 1912 857], 'Color', 'W')
M_Fp = max(Fp(:));
subplot(4,1,1)
plot(Fp(dh(k):dh(k+1), :, St(Station_Used_Now(i))))
title(['Fp for interval: [ ', num2str(dh(k)), ' to ', num2str(dh(k+1)), ' ] and station ', num2str(St(Station_Used_Now(i))), ' and Gamma: ', num2str(Gamma(j))])
ylabel('Amplitude')
ylim([0 M_Fp])
xlim([0 size(Fp, 2)])
grid
subplot(4,1,2)

```

```

plot(mean(Fp(dh(k):dh(k+1),:,St(Station_Used_Now(i)))),'r'),grid
title(['Fp mean (r) value'])
ylim([0 M_Fp])
xlim([0 size(Fp,2)])
subplot(4,1,3)
plot(std(Fp(dh(k):dh(k+1),:,St(Station_Used_Now(i)))),'-b')
title('Fp std (b) value')
ylabel('Amplitude')
ylim([0 M_Fp])
xlim([0 size(Fp,2)])
grid
subplot(4,1,4)
g = get.figure(1));
g1 = g.Children;
set(g1(1), 'Position', [0.0497 0.1100 0.9372 0.1544]);
set(g1(2), 'Position', [0.0486 0.3459 0.9362 0.1320]);
set(g1(3), 'Position', [0.0476 0.5650 0.9362 0.1320]);
set(g1(4), 'Position', [0.0460 0.7841 0.9367 0.1320]);
Ejes_Visibles(1)
pause(.1)
end
%
end
else
pm = [pm;mean(Fp(dh(k):dh(k+1),:,St(Station_Used_Now)))];
ps = [ps; std(Fp(dh(k):dh(k+1),:,St(Station_Used_Now)))];
end
end
prod(pm)/std(prod(pm)); % PROBABILIDAD CONDICIONADA: 1) PARA CADA ESTACION,2) PARA CADA INTERVALO HORARIO Y
Ps = prod(ps)/std(prod(ps)); % 3) PARA CADA VALOR DE GAMMA (SE TOMA EL PRODUCTO)
%
if band == -3
%VISUALIZA LA PROBABILIDAD CONDICIONADA
%
plot(Pm, 'r'),hold on,plot(Ps, '-b'),hold off
title('Conditioned probability Pm (-r) and Ps (-b)')
xlabel('Time in days')
ylabel('Amplitude')
ylim([0 M_Fp])
xlim([0 size(Fp,2)])
set(g1(4), 'Position', [0.0460 0.7841 0.9367 0.1320]);
grid
Ejes_Visibles(1)
pause
%
end
%
fp = [fp;Pm + Ps]; %PRECURSOR USADO (DESVIACION MAS LA MEDIA DEL FLUJO)
fp = [fp;Pm]; %PRECURSOR USADO (DESVIACION DEL FLUJO)
%
if band == -3
close all
set.figure(1), 'Position', [5 660 1852 318], 'Color', 'W')
plot(Pm, '-r'),hold on,plot(Ps, '-g'),plot(Pm+Ps, '-b'),hold off
title('Conditioned probability: Pm (-r), Ps (-g) and Pm + Ps (-b)')
xlabel('Time in days')
ylabel('Amplitude')
ylim([0 M_Fp])
xlim([0 size(Fp,2)])
grid
g = get.figure(1);
g1 = g.Children;
set(g1(1), 'Position', [0.0416 0.1447 0.9438 0.7358]);
Ejes_Visibles(1)
pause
end
%
Gm = [Gm;mean(fp)*ko]; %VALOR MEDIO PARA LOS VALORES ACTUALES DE GAMMA
Gs = [Gs;std(fp)*ko]; %DESVIACION PARA LOS VALORES ACTUALES DE GAMMA
%
end
% %CONTADOR DE EVENTOS (PARA CADA VALOR DE GAMMA)
% size(GM(Station).GM)
%
P = [];
Count_Por = []; %CONTEO PORCENTUAL POR CADA VENTANA DE Md DIAS
for go = 1:length(Uo)
    uoo = Uo(go); %UMBRAL ACTUAL
    if length(Station_Used_Now)>1
        a = mean(Gm) + mean(Gs);
    else
        a = Gm + Gs;
    end
    %UMBRALIZAMOS EL PRECURSOR
    %LO DIVIDIMOS EN Nv VENTANAS DE Md DIAS CADA UNA
    %
    a = a(1:Md*Nv)/std(a(1:Md*Nv)); %NORMALIZAMOS A SU DESVIACION STANDARD (LA ESCALA SERA EN STD)
    Max_a = [Max_a;max(a)]; %GUARDAMOS SU VALOR MAXIMO
    b = reshape(a,Nv,Md); %DIVIDIMOS EN Nv VENTANAS DE Md DIAS CADA UNA
    v = 1:Md*Md*Nv;
    count = zeros(1,Nv);
    count_por = zeros(1,Nv);
    to = F0(1,1:Md*Nv);
    so = std(a);
    Ud = uoo*so;

```

```

%UMBRAL USADO (PROPORCIONAL A LA DESVIACION STANDARD)
%
%CONTEOS MAYORES AL UMBRAL
%
if band == -3
Bb = [];
set(figure(1), 'Position', [5 545 1852 393], 'Color', 'W'), end
for q=1:Nv
s = find(b(q,:)>= Ud);
count(q) = sum(b(q,s)); %PROPORCIONAL A LA AMPLITUD (suma de las amplitudes de las activaciones)
count_por(q) = (length(s)/Md)*100; %ACTIVACION PORCENTUAL POR CADA Md DIAS
%
if band == -3
Bb = [Bb b(q,:)];
ly_u = Ud*ones(1,length(Bb));
lx_u = linspace(1,length(Bb),length(Bb));
subplot(2,1,1)
plot(Bb), hold on, plot(lx_u,ly_u,'-r'), hold off
title('Conditioned probability Gm + Gs')
ylabel('Amplitude')
ylim([-2 1.2*Ud])
xlim([0 size(Fp,2)])
grid
subplot(2,1,2)
plot(count)
title(['Count for Ud: ' num2str(Ud)])
xlabel('Time in days')
ylabel('Counts')
g = get(figure(1));
g1 = g.Children;
set(g1(1), 'Position', [0.0373 0.1323 0.9449 0.3189]);
set(g1(2), 'Position', [0.0356 0.6296 0.9460 0.2954]);
grid
Ejes_Visibles(1)
pause(.01)
end
%
end
%
p = smooth(smooth(count, hp), hp/2)*ko; % SE FILTRA EL PRECURSOR
%
count_por = smooth(smooth(count_por, hc), hc/2)*ko; % SE FILTRA EL PRECURSOR
%
% CONTEO UMBRALIZADO Y FILTRADO PARA CADA GAMMA Y PARA CADA INTERVALO DE HORAS DEL DIA
%
P = [P;p']; % USANDO AMPLITUD DEL PRECURSOR
Count_Por = [Count_Por;count_por']; % USANDO EFICIENCIA PORCENTUAL PARA CADA (Md) DIAS
end
%
%PARA VISUALIZAR LAS
%
if band == -3
close all
M_a = round(max(abs(a(:)))+1);
set(figure(1), 'Position', [5 655 1854 323], 'Color', 'W')
jv = 0:size(b,2);
tv = 1:Md*Nv;
hold on
for i=1:Md
bx = i*Nv*ones(1,Nv); %v((jv(i))*Nv+1:i*Nv);
by = linspace(-M_a,M_a,Nv);
plot(tv((jv(i))*Nv+1:i*Nv),b(:,i),'-.', 'LineWidth', [3])
plot(bx,by,'-b', 'LineWidth', [1])
end
plot(tv,a,'—c')
xlim([0 size(Fp,2)])
ylim([-M_a M_a])
xlabel('Time in days')
ylabel('Amplitude')
title(['Format verification for: [ ' num2str(Md) ' ] windows each one with [ ' num2str(Nv) ' ] total [ ' num2str(Nv*Md) ' ] days'])
hold off
g = get(figure(1));
g1 = g.Children;
set(g1(1), 'Position', [0.0345 0.1455 0.9509 0.7214]);
grid
Ejes_Visibles(1)
pause
end
%
A = a*max(Mag_S)*1.5; %SE??AL AMPLIFICADA RELATIVA A LA MAGNITUD MAXIMA (SOLO PARA VISUALIZAR)
%
%VISUALIZA EL STATUS ACTUAL DEL PRECURSOR Y LA POSICION DE LOS EVENTOS SISMICOS
%
if band == 1
set(figure(1), 'Position', [5 509 1912 469], 'Color', 'W')
Ea = num2str(Energy(j));
f1 = Fo(1,1);
x = [datenum(ts)-f1 datenum(ts)-f1];
y = [0 50];
bar(nx-f1,ny/10,'FaceColor',[0 1 0.1], 'EdgeColor', 'b', 'BarWidth', [0.1]), hold on %FRECUENCIA SISMICA
plot(to-f1,A,'-b', 'LineWidth', [2])
plot(Lxx'-f1,Lyy', '-r', 'LineWidth', [1])
line(x,y,'Color', 'g', 'LineStyle', '--', 'LineWidth', [2])
title(['dh: ' num2str(dh(1)) ' to ' num2str(dh(end)), ' Hours and Gamma: ' num2str(round(Gamma(j))) ' Energy ', Ea(1:4) ...
, '(GeV) == Seismic frequency each [ ' num2str(fs) ' ] days == Station: [ ' cell2mat(Label_Station( ...
Station_Used_Now)) ' ]'])
hold off
xlabel(['Time in days from: ' datestr(round(Fo(1,1))) ' ==to== ' datestr(round(Fo(1,end))) ' [ ' num2str(round(na

```

```

    )) '] years' ])
ylabel('Seismic amplitude')
xlim([Fo(1,1)-f1 Fo(1,end)-f1])
grid
g = get(1);
g1 = g.Children;
set(g1, 'Position', [0.0335      0.1250      0.9514      0.8103])
Ejes_Visibles(1)
end
%=====
%MOMENTO ESTADISTICO UTILIZADO
%=
switch Momento_Usado
case 1           %MEDIA
    As = mean(P);          %USANDO AMPLITUD DEL PRECURSOR
case 2           %KURTOSIS
    As = kurtosis(P);
% As = kurtosis(Count_Por);
for i=1:length(As)
    ind_k = findstr(num2str(As(i)), 'NaN');
    if length(ind_k)>0
        As(i) = 0;
    end
end
case 3
    As = std(P); % DESVIACION
otherwise
    disp(['Momento estadistico no seleccionado'])
end
%=====
%VISUALIZACION
%=
[mnt, nt] = size(P);
t1 = Fo(1,1);
t2 = Fo(1,end);
t = linspace(t1, t2, nt);
%=
if band == 1
%PLOT
%=
set(gcf, 'Position', [5 514 1912 464], 'Color', 'W')
bar(nx-f1, ny/10, 'FaceColor', [0 1 0.1], 'EdgeColor', 'b', 'BarWidth', [0.1]) %FRECUENCIA SISMICA
hold on
plot(Lxx'-f1, Lyy', '-r', 'LineWidth', [1])
plot(t-f1, As, '-b', 'LineWidth', [2])
plot(datenum(ts)-f1, Mag, '*m')
x = [datenum(ts)-f1 datenum(ts)-f1];
y = [0 Mag];
line(x,y, 'Color', 'k', 'LineStyle', '--', 'LineWidth', [2])
xlabel(['Time in days from: ' datestr(round(Fo(1,1))) ' to ' datestr(round(Fo(1,end))) ' nyears: ' num2str(round(na)) ''])
ylabel('Seismic amplitude')
title(['dh: ' num2str(dh(1)) ' to ' num2str(dh(end)) ' Hours == Gamma from: ' num2str(round(gamma(1))) ' to ' num2str(round(gamma(end))) ' == Energy ' num2str(round(E(1))) ...
        ' to ' num2str(round(E(end))) ' (Gev) == Seismic frequency each ' num2str(fs) ' days == Station: ' cell2mat(Label_Station(Station_Used_Now)) ''])
xlim([Fo(1,1)-f1 Fo(1,end)-f1])
grid
hold off
g = get(2);
g2 = g.Children;
set(g2, 'Position', [0.0335      0.1250      0.9514      0.8103])
Ejes_Visibles(2)
%SURF P
%=
eo = 10;
set(gcf, 'Position', [5 32 921 906], 'Color', 'W')
surf(t-f1, Uo+Uo(1), medfilt2(P,[1 1]), shading interp, colormap jet, hold on
plot(Lxx'-f1, Lyy'-eo, '-r', 'LineWidth', [2])
line(x,y-eo, 'Color', 'k', 'LineStyle', '--', 'LineWidth', [2])
hold off
xlim([Fo(1,1)-f1 Fo(1,end)-f1])
ylim([-eo Uo(end)+Uo(1)])
xlabel(['Time in days from: ' datestr(round(Fo(1,1))) ' to ' datestr(round(Fo(1,end))) ' nyears: ' num2str(round(na)) ''])
ylabel('Magnitudes (<0) and threshold in sigma values')
zlabel('Precursors amplitude')
view([10 90])
title(['dh: ' num2str(dh(1)) ' to ' num2str(dh(end)) ' Hours and Precursor amplitude for ' cell2mat([
        Label_Station(Station_Used_Now)) ]])
Ejes_Visibles(3)
colorbar
%SURF Count_Por
%=
eo = 10;
set(gcf, 'Position', [934 32 956 904], 'Color', 'W')
surf(t-f1, Uo+Uo(1), medfilt2(Count_Por,[1 1]), shading interp, colormap jet, hold on
plot(Lxx'-f1, Lyy'-eo, '-r', 'LineWidth', [2])
line(x,y-eo, 'Color', 'k', 'LineStyle', '--', 'LineWidth', [2])
hold off
xlim([Fo(1,1)-f1 Fo(1,end)-f1])
ylim([-eo Uo(end)+Uo(1)])
xlabel(['Time in days from: ' datestr(round(Fo(1,1))) ' to ' datestr(round(Fo(1,end))) ' nyears: ' num2str(round(na)) ''])
ylabel('Magnitudes (<0) and threshold in sigma values')
zlabel('Precursors amplitude')
view([10 90])
title(['dh: ' num2str(dh(1)) ' to ' num2str(dh(end)) ' Hours and Poential (%) for ' cell2mat([
        Label_Station(Station_Used_Now)) ]])
Ejes_Visibles(4)

```

```

colorbar
pause(.1)
end
% FIN

```

### B.3.3. Encuentra sismos sincronizados.

```

% Encuentra_Sismos_Sincronizados.m =====
% SISMOS LOCALIZADOS DIAS ANTES Y DIAS DESPUES DEL MAXIMO DEL PRECURSOR
% VERIFICA EFICIENCIA DE LOS PRECURSORES RELATIVISTAS
%=====

% DESCRIPCION: Programa determina aciertos y fallos en el precursor para un
% cierto tiempo.
% SALIDA:
% p_ind_c INDICES ACERTADOS
% p_ind_f INDICES FALSOS POSITIVOS
%=====

%=====

% uo = 2.5; % UMBRAL CONSIDERADO PARA EL PRECURSOR
%===== m_dh = mean(dh);

% ind_s = find(Lxx(:,1)>=f1 & Lxx(:,1) <= f2); % INTERVALO DE
% FECHAS (f1 y f2)
% nc = length(ind_s); % NUMERO TOTAL DE
% SISMOS EN ESTUDIO
% Lxx_u = Lxx(ind_s,:); Lyy_u = Lyy(ind_s,:);
% nd_b = 0; % DIAS ANTES DEL EVENTO (EL SISMO OCURRE (nb_d) ANTES
% DEL MAXIMO DEL PRECURSOR) nd_a = 90; % DIAS DESPUES DEL EVENTO (EL
% SISMO OCURRE (nb_a) DESPUES DEL MAXIMO DEL PRECURSOR)
%=====

Amp_U = [];

if band == 1
    % close all
    set(figure(5), 'Position',[5 447 1912 531], 'Color','W')
end

%=====

% ELIMINA INDICES FUERA DEL RANGO
%=====

As = smooth(As,1);
ind = find(As>uo);
% Ind_in = find(ind - nd_b >= 0 & ind + nd_a <= Nv*Md);
Ind_in = find(ind - nd_b > 0 & ind + nd_a < Nv);
ind = ind(Ind_in);
%=====

Lxx_c = []; Lyy_c = []; % SISMOS ENCONTRADOS EN EL RANGO DIAS ANTES Y DIAS DESPUES
Lxx_f = []; Lyy_f = []; % SISMOS NO-ENCONTRADOS EN EL RANGO DIAS ANTES Y DIAS DESPUES
Ind_c = []; ind_c = [];
Ind_f = []; ind_f = [];

lx = t - f1;
ly = ones(1,length(t))*uo;
kc = 0;
kf = 0;

IND_kc = [];
IND_kf = [];

ind_kc = 0;
for ind_kc=1:nc
    Io = find(Lxx_u(ind_kc,1) >= t(round(ind - nd_b)) & Lxx_u(ind_kc,1) <= t(round(ind + nd_a))); % CRITERIO DE
    % BUSQUEDA
    if length(Io)>0
        kc = kc + 1;
        Lxx_c = [Lxx_c;Lxx_u(ind_kc,:)]; % SISMOS CIERTOS EN EL RANGO BUSCADO
        Lyy_c = [Lyy_c;Lyy_u(ind_kc,:)];
        Ind_c = [Ind_c;ind(Io)]; % INDICES CORRESPONDIENTES EN EL PRECURSOR (As)
        ind_c = [ind_c;Io]; % INDICES CORRESPONDIENTES ???
        IND_kc = [IND_kc;ind_kc];
        %
        plot(t-f1,As,'-b','LineWidth',[1]), hold on
        plot(t(Ind_c)-f1,As(Ind_c),'+g','LineWidth',[1]),
        plot(t(Ind_c)-f1,As(Ind_c),'.g','LineWidth',[1])
        plot(t(IND_FP)-f1,As(IND_FP),'.r',t(IND_FP)-f1,As(IND_FP),'+r','LineWidth',[1])
        %
        plot(Lxx_u'-f1,Lyy_u','-r')
        plot(Lxx_c'-f1,Lyy_c,'-g','LineWidth',[2]) % SISMOS ENCONTRADOS
        plot(Lxx_f'-f1,Lyy_f,'-c','LineWidth',[2]) % SISMOS
        % NO-ENCONTRADOS plot(lx,ly,'-m'), grid hold off
        %
    % AMPLITUD MEDIA, MAXIMA, DESVIACION, MAGNITUD, DISTANCIA A
    % EVENTO-ESTACION, MEDIA DE INTERVALO HORARIO, DIFERENCIA
    % FECHA REAL-OBTENIDA Y ANCHO DE LA VENTANA EN DIAS
    Dr_C = ones(1,ind_kc);
    Am = [mean(As(ind(Io)));max(As(ind(Io)));std(As(ind(Io)));Lyy_u(ind_kc,end);Dr_C(ind_kc);m_dh;mean(t(Ind_c)) -
    Lxx_u(ind_kc,1);nd_a];
    Amp_U =[Amp_U;Am];
    %
else
    kf = kf + 1;
    Lxx_f = [Lxx_f;Lxx_u(ind_kc,:)]; % SISMOS CIERTOS EN EL RANGO BUSCADO
    Lyy_f = [Lyy_f;Lyy_u(ind_kc,:)];
    %
end

```

```

Ind_f = [Ind_f;ind(Io)];
ind_f = [ind_f;Io'];
IND_kf = [IND_kf;ind_kc];
end
end

% STATUS ===== SISMOS ENCONTRADOS Y FALLOS
%
pc = round((kc/nc)*100); % SISMOS ACERTADOS
pf = round((kf/nc)*100); % SISMO FALLOS
%

%===== ELIMINA INDICES REPETIDOS
%
IND_C = [];
while length(ind_c)>0
    ind_e = find(ind_c==ind_c(1));
    if length(ind_e)>1
        IND_C = [IND_C;ind_c(1)];
        ind_c(ind_e) = [];
    else
        IND_C = [IND_C;ind_c(1)];
        ind_c(1) = [];
    end
end
%
IND_F = [];
while length(ind_f)>0
    ind_e = find(ind_f==ind_f(1));
    if length(ind_e)>1
        IND_F = [IND_F;ind_f(1)];
        ind_f(ind_e) = [];
    else
        IND_F = [IND_F;ind_f(1)];
        ind_f(1) = [];
    end
end
%
% INDICES FALSOS POSITIVOS
%
ind_fp = [];
for i=1:length(IND_C)
    ind_fp = [ind_fp;find(IND_C(i)==ind)];
end
ind(IND_C) = [];
IND_FP = ind;
%
ind_im = ind_im + 1;
IM(ind,ind_im) = 1; %As;
% IM(:,ind_im) = As;
%
if band == 1
    plot(t-f1,As,'-b','LineWidth',[1]),
    hold on
    plot(t(Ind_c)-f1,As(Ind_c),'+g','LineWidth',[1]),
    plot(t(Ind_c)-f1,As(Ind_c),'.g','LineWidth',[1])
    % plot(t(Ind_f)-f1,As(Ind_F),'x+r','LineWidth',[1])
    plot(t(IND_FP)-f1,As(IND_FP),'.r',t(IND_FP)-f1,As(IND_FP),'+r','LineWidth',[1])
    plot(Lxx_u'-f1,Lyy_u','-r')
    plot(Lxx_c'-f1,Lyy_c,'-g','LineWidth',[2]) % SISMOS ENCONTRADOS
    plot(Lxx_f'-f1,Lyy_f,'-c','LineWidth',[2]) % SISMOS NO-ENCONTRADOS
    plot(lx,ly,'-m').grid
    xlabel('Time in days')
    ylabel('Magnitude')
    title(['Time interval: [ ', num2str(dh) ' ] mdh: [ ', num2str(m_dh) ' ] Threshold uo: [ ', num2str(uo) ' ] ndb: [ ', num2str(nd_b) ' ] nda: [ ', num2str(nd_a) ' ] (days) '])
    %ylim([0 40])
    xlim([0 NvMd])
    g = get(5);
    g1 = g.Children;
    set(g1(1),'Position',[0.0329 0.0914 0.9582 0.8451])
    hold off
    Ejes_Visibles(5)
    % set(figure(5),'Position',[419 32 1498 931],'Color','W')
    % imshow(IM',[0 25]), colormap jet, colorbar axis on, grid
    pause
end
%
%===== AMPLITUDES DEL PRECURSOR
%
% LOCALIZADAS EN LA ACTIVACION
%
Amp_U = []; if
length(Ind_c)>1
Amp_U = sum(As(Ind_c));
t_U = mean(t(Ind_c)); %epmat('==',length(Ind_c),1)
% disp(['num2str(Amp_U)', ' == ', datestr(t_U) ' == ', datestr(Lxx(Ind_c,1))])
% end INDICES ACERTADOS Y FALLOS %
p_ind_c = round(length(IND_C)/length(Ind_in)*100); % INDICES ACERTADOS
p_ind_f = round(length(IND_FP)/length(Ind_in)*100); % INDICES FALSOS POSITIVOS
%
%
% disp([pc pf pc+pf p_ind_c p_ind_f p_ind_c + p_ind_f])
%
% % POSICON DE LOS EVENTOS (1ERO,2DO,..., ) %
[md,nd] = size(t_enc); n1 = 1;
n2 = 1; if n2-n1 > 1
    subplot(1,2,1)
    plot(mean(t_dado(1:nd,n1:n2)'),t_enc(1:nd),'*-' ), xlim([0 4000]), grid
    subplot(1,2,2) hist(t_enc(1:nd),'_'
    mean(t_dado(1:nd,n1:n2)'),30), grid, pause(1) xlim([-nd_a nd_a])
% else
%     subplot(1,2,1) plot((t_dado(1:nd,n1:n2)'),t_enc(1:nd),'*-' ), xlim([0
%
```

```
%      4000]),grid subplot(1,2,2) hist(t_enc(1:nd)')-
%      (t_dado(1:nd,n1:n2)'),30),grid,pause(1) xlim([-nd_a nd_a]) [xc,yc,p]
%      = polinomio2((t_dado(1:nd,n1:n2)'),t_enc(1:nd)',1,100,0);
%      Pol = [Pol;p];
% end %
%=====
```

## B.4. Visualiza resultados.

```
% plot_resultados_general.m
%=====

% DESCRIPCIÓN: generaliza el proceso y visualiza las salidas dado un cierto
% porcentaje de filtraje para la calibración
% SALIDA: Por_Ef Est Stadistic_Results T_entrena ...
% Data_Stations Label_e IRISIDS Dist_respectivas Nombre_caso Data_Stations
%=====

clear all
% carpeta madre
cd 'C:\Tesis\Programas\Misael_22_Oct_2020'
%ARA 7, MUESTRA 0%
%%ENTRADAS
label_e = 'c';
Data_Stations = 8;
Por_Ef_Est=25;
%%PROCESO
label = {label_e};
Nombre_general = 'STADISTIC_Results';
Nombre_caso = {'Japon', 'DOU', 'USA', 'Chile', 'DUR', 'PEG', 'PET', 'KAK'};
Directorio = dir([Nombre_general char(Nombre_caso(Data_Stations)) char(label) '.mat']);
clc
display(['Nombre archivo cargado: ' Directorio .name])
display(['Zona: ' char(Nombre_caso(Data_Stations)) ' Label: ' char(label) ' '])
%%ENTRENA, PRODUCE Y PRECURSOR
%%ENTRENA =====
band = 0;
load(Directorio .name,'Stadistic_Results')
Stadistic_Entrena=Stadistic_Results(:, :, 1);
Optimal_Time_Interval_Entrena
T_entrena = T;
%%PRODUCE =====
clearvars -except Directorio Por_Ef_Est Stadistic_Results T_entrena ...
Data_Stations label_e Nombre_caso Data_Stations
band = 0;
Stadistic_Produce=Stadistic_Results(:, :, 2);
Optimal_Time_Interval_Produce
%%PRECURSOR =====
clearvars -except Directorio Por_Ef_Est Stadistic_Results T_entrena ...
Data_Stations label_e IRISIDS Dist_respectivas Nombre_caso Data_Stations
Precursor_Activation_Gamma_Dependence_new
%=====
```

### B.4.1. Tiempos óptimos de calibración.

```
% Optimal_Time_Interval_Entrena.m
%=====

% DESCRIPCIÓN: Programa permite leer la primera parte de la estructura
% STADISTIC_Results y visualizar resultados
% SALIDA: INDICES_ENTRENA
%=====

%PARAMETROS DE INICIACION
%
sigma_so = 1; %UMbral de la desviacion
Por_Ef_Est = 20; %PORCENTAJE DE EFICIENCIA ESTIMADO (EMPIRICO)

%DATA GEOMAGNETICA DE LAS ESTACIONES A USAR
%
% Data_Stations = 3; % (1) Japan (2) Europa (3) otras ....
[Data, Label_Station] = Data_Geomagnetica(Data_Stations);
%
% COORDENADAS Y ETIQUETAS DE LOS EVENTOS SISMICOS
%
switch Data_Stations
    case 1
        load ('Entrena_Etiqueta_Eventos_Japan_II_6M_2000_2019.mat','Lx_c','Ly','Lx',...
            'Ly_c','Mag_S','Lon_S','Lat_S','Depthkm_S','Lx_Cont','Ly_Cont');
        disp('Entrenamiento JAPON')
    case 2
        load ('Etiquetas_DOUEntrenamiento2_Ready.mat','Lx_c','Ly','Lx',...
            'Ly_c','Mag_S','Lon_S','Lat_S','Depthkm_S','Lx_Cont','Ly_Cont');
        disp('Entrenamiento Europa silencio, sismos simulados')
    case 3
        load ('Etiquetas_USA_Etrenamiento_Ready.mat','Lx_c','Ly','Lx',...
            'Ly_c','Mag_S','Lon_S','Lat_S','Depthkm_S','Lx_Cont','Ly_Cont');
        disp('Entrenamiento USA')
    case 4
        load ('Etiquetas_CHILE_Etrenamiento_Ready.mat','Lx_c','Ly','Lx',...
            'Ly_c','Mag_S','Lon_S','Lat_S','Depthkm_S','Lx_Cont','Ly_Cont');
        disp('Entrenamiento CHILE')
    case 5
        load ('Etiquetas_EUROPA_DUREntrenamiento_Ready.mat','Lx_c','Ly','Lx',...
            'Ly_c','Mag_S','Lon_S','Lat_S','Depthkm_S','Lx_Cont','Ly_Cont');
        disp('Entrenamiento DUR')
end
```

```

case 6
load ('Etiquetas_EUROPA_PEGEntrenamiento_Ready.mat','Lx_c','Ly','Lx',...
,'Ly_c','Mag_S^','Lon_S^','Lat_S','Depthkm_S','Lx_Cont','Ly_Cont')
disp(' Entrenamiento PEG')
case 7
load ('Etiquetas_PETEntrenamiento_Ready.mat','Lx_c','Ly','Lx',...
,'Ly_c','Mag_S^','Lon_S^','Lat_S','Depthkm_S','Lx_Cont','Ly_Cont')
disp(' Entrenamiento PET')
case 8
load ('Etiquetas_KAK_Entrenamiento_Ready.mat','Lx_c','Ly','Lx',...
,'Ly_c','Mag_S^','Lon_S^','Lat_S','Depthkm_S','Lx_Cont','Ly_Cont')
disp(' Entrenamiento KAK')
end

Lxx = Lx;
Ly = Ly;

%%
% CAMPOS
%
INDICES_ACIERTOS_ALL = [];
INDICES_FALLOS_ALL = [];
Indices_Aciertos_Produce = {};
Indices_Entrena = {};
PA = [];
Por_Ef = [];
Mag_max = 10;
%
%
% VALOR ACTUAL DE GAMMA
%
S_Ent = Stadistic_Entrena;
s_ent = S_Ent{4,1};
Station_Used_Now = s_ent.Station_Used_Now;
Actual_Gamma = s_ent.Gamma_2;
%
% OBTENCION DEL PORCENTAJE DE EFICIENCIA PROMEDIO (MINIMA)
%
Total_Stations_Combinations = 4;
for Actual_Station = 1:Total_Stations_Combinations;
s_ent = S_Ent{Actual_Station,1};
Aciertos = s_ent.Aciertos;
iMc = s_ent.iMc;
%
% INDICES CON EFICIENCIA PORCENTUAL >= Por_Ef
%
% MAXIMO DE PROBABILIDAD EN LOS ACIERTOS
end
%
POR_EF = min(Por_Ef); % PORCENTAJE DE EFICIENCIA MINIMA
%
% LAZO PARA VARIOS VALORES DE GAMMA
%
for j_gamma = 1:length(Actual_Gamma);
%
if band == 1
disp(' ')
disp([' Indice de gamma: ', num2str([j_gamma]) ' Valor da gamma ' ...
num2str(Actual_Gamma(j_gamma))])
disp(' ')
end
%
Por_Ef = [];
for Actual_Station = 1:Total_Stations_Combinations;
s_ent = S_Ent{Actual_Station,j_gamma};
Aciertos = s_ent.Aciertos;
Fallos = s_ent.Fallos;
iMc = s_ent.iMc;
M_dh = s_ent.M_dh;
Dh = s_ent.Dh;
Num_h = s_ent.Num_h;
Int_H = s_ent.Int_H;
Total_a = s_ent.Total_a;
Pa = s_ent.Pa;
t = s_ent.t;
T = t - t(1);
%
% INDICES CON EFICIENCIA PORCENTUAL >= Por_Ef
%
% CASO USA Y JAPON
Por_Ef(Actual_Station) = Por_Ef_Est;
%
% PRUEBA Chile:
Por_Ef(Actual_Station) = round(Aciertos(iMc) - sigma_so*std(Aciertos));
%
ind_aciertos = find(Aciertos >= Por_Ef(Actual_Station));
ind_fallos = find(Aciertos < Por_Ef(Actual_Station));
%
% CREA LOS INDICES DEL ENTRENAMIENTO POR ESTACION
%
Indices_Aciertos_Produce{Actual_Station} = struct('ind_aciertos',...
'ind_aciertos','ind_fallos','ind_fallos');
INDICES_ACIERTOS_ALL = [INDICES_ACIERTOS_ALL;ind_aciertos];
INDICES_FALLOS_ALL = [INDICES_FALLOS_ALL;ind_fallos];
Pa(:,ind_aciertos) = Pa(:,ind_aciertos);

```

```

Pa(:, ind_fallos) = 0.125; % SOLO ES EL BACKGROUND DE LA IMAGEN
PA(:,:,Actual_Station) = Pa;
end
%
Por_Ef = min(Por_Ef);
%
% ELIMINA INDICES REPETIDOS (aciertos)
%
INDICES_ACIERTOS_ALL_sort = sort(INDICES_ACIERTOS_ALL);
IND_ACIERTOS = [];
while length(INDICES_ACIERTOS_ALL_sort) > 0
    ind = find(INDICES_ACIERTOS_ALL_sort==INDICES_ACIERTOS_ALL_sort(1));
    IND_ACIERTOS = [IND_ACIERTOS; INDICES_ACIERTOS_ALL_sort(1)];
    INDICES_ACIERTOS_ALL_sort(ind) = [];
end
%
% ELIMINA INDICES REPETIDOS (fallos)
%
INDICES_FALLOS_ALL_sort = sort(INDICES_FALLOS_ALL);
IND_FALLOS = [];
while length(INDICES_FALLOS_ALL_sort) > 0
    ind = find(INDICES_FALLOS_ALL_sort==INDICES_FALLOS_ALL_sort(1));
    IND_FALLOS = [IND_FALLOS; INDICES_FALLOS_ALL_sort(1)];
    INDICES_FALLOS_ALL_sort(ind) = [];
end
%
Indices_Entrena{j_gamma} = struct('IND_ACIERTOS',IND_ACIERTOS,...
'IND_FALLOS',IND_FALLOS,'Indices_Aciertos_Produce',...
Indices_Aciertos_Produce,'Por_Ef',Por_Ef,'Actual_Gamma',...
Actual_Gamma(j_gamma));
%
INT_H = Int_H(IND_ACIERTOS);
lx_ac = Int_H;
ly_ac = Por_Ef*ones(1,length(Int_H));
%
% VISUALIZACION
if band == 1
    close all
    set.figure(1,'Position',[ 50 490 1245 206],'Color','W')
    plot(Int_H,Aciertos,'-r',Int_H,Aciertos,'or',Int_H,Fallos,'-b',...
    Int_H,Fallos,'ob',Int_H,Total_a,'-m',Int_H,Total_a,'om','LineWidth',[2])
    hold on
    plot(Int_H(iMc),Aciertos(iMc),'+k','MarkerSize',[12],'LineWidth',[2])
    plot(Int_H(ind_aciertos),Aciertos(ind_aciertos),'og',...
    Int_H,Aciertos,'+k','MarkerSize',[14],'LineWidth',[2])
    xlabel('Time interval from 0 to 24 h')
    ylabel('Efficiency in (%)')
    title(['Efmax: ' num2str(Aciertos(iMc)) '(%)' ' Dhm: ' ...
    num2str(round(Int_H(iMc))) ' hours ' '(Training phase)' ''])
    plot(lx_ac,ly_ac,'--g','LineWidth',[2])
    hold off
    xlim([Dh(1) Dh(end)/Num_h])
    ylim([0 100])
    g = get(1);
    g1 = g.Children;
    set(g1,'Position',[0.0415 0.1250 0.9514 0.8103],'Box','on')
    legend('True','','False','','Total','Location','Best')
    ax1 = gca;
    ax1.XTick = [Dh(1):1:Dh(end)/Num_h];
    grid
    Ejes_Visibles(1)
%
set.figure(2,'Position',[51 44 248 365],'Color','W')
for i=1:Total_Stations_Combinations
    Pm = PA(:,:,i)';
    subplot(4,2,i)
    %
    % SURF
    %
    [xa,ya] = meshgrid(linspace(T(1),T(end),size(Pm,2)),...
    linspace(1,M_dh(end),size(Pm,1)));
    surf(xa,ya/Num_h,Pm,'shading interp','view',[0 90])
    colorbar,colormap jet
    grid, axis xy, axis on
    Pm = mean(PA(:,:,i));
    Pm = (Pm-max(Pm))/(max(Pm)-min(Pm))*Mag_max;
    hold on
    plot((Lx'-Lxx(1,1)),Ly'-Mag_max,'-b','LineWidth',[2])
    plot((Lx_Cont'-Lxx(1,1)),Ly_Cont'-Mag_max,'-g','LineWidth',[3])
    plot(T,Pm,'r','LineWidth',[3]),grid
    plot(T,Pm,'k','LineWidth',[1]),grid
    hold off
    if i < 4 title(cell2mat(['Station: ' Label_Station(i)]))
    else
        title('All Station')
    end
    ax1 = gca;
    ax1.YTick = [-10:2:M_dh(end)];
    ax1.GridLineStyle = '--';
    ax1.GridColor = [1 0 0];
    xlim([0 T(end)])
    ylim([-10 24])
end
g = get.figure(2));
g1 = g.Children;
set(g1(1),'Position',[0.9674 0.0807 0.0141 0.4025],'Box','on');
set(g1(2),'Position',[0.5363 0.0806 0.4239 0.4050],'Box','on');
if not(Total_Stations_Combinations == 1)

```

```

set(g1(3), 'Position',[0.4751    0.0773    0.0141    0.4095], 'Box', 'on');
set(g1(4), 'Position',[0.0454    0.0773    0.4225    0.4095], 'Box', 'on');
set(g1(5), 'Position',[0.9685    0.5594    0.0141    0.4060], 'Box', 'on');
set(g1(6), 'Position',[0.5363    0.5596    0.4251    0.4058], 'Box', 'on');
set(g1(7), 'Position',[0.4760    0.5563    0.0141    0.4029], 'Box', 'on');
set(g1(8), 'Position',[0.0449    0.5552    0.4241    0.4040], 'Box', 'on');
end
grid
Ejes_Visibles(2)
pause
end
%
fprintf('
La base datos de Indices de Entrenamiento fue creada para las estaciones: ')
disp(Label_Station')
fprintf('
%
% SALIDAS
%
save INDICES_ENTRENA Indices_Entrena
%
```

## B.4.2. Revisión de producción.

```

% Optimal_Time_Interval_Produce.m
%
% DESCRIPCIÓN: Programa permite leer la segunda parte de la estructura
% STADISTIC_Results y visualizar resultados
% SALIDA: Precursor_Activation_Parameters
%
close all
% CAMPOS
%
PA = [];
IA_MEAN_Y = [];
IA_MEAN_X = [];
Mag_max = 10;
ka = 2e-1;
n1 = 4;           % FILTRO EN X DE LA IMAGEN
n2 = 4;           % FILTRO EN Y DE LA IMAGEN
%
% DATA GEOMAGNETICA DE LAS ESTACIONES A USAR
%
% Data_Stations = 3;           % (1) Japan (2) Europa (3) otras ....
[Data, Label_Station] = Data_Geomagnetica(Data_Stations);

switch Data_Stations
case 1
    load('Produce_Etiqueta_Eventos_Japan_HI_6M_2000_2019.mat','Lx_c','Ly','Lx',...
        'Ly_c','Mag_S','Lon_S','Lat_S','Depthkm_S','Lx_Cont','Ly_Cont','IRISIDS','Dist_respectivas')
    disp('Producción JAPÓN')
case 2
    load('Etiquetas_DOUProduccion3_Ready.mat','Lx_c','Ly','Lx',...
        'Ly_c','Mag_S','Lon_S','Lat_S','Depthkm_S','Lx_Cont','Ly_Cont');
    disp('Producción Europa silencio, sismos simulados')
case 3
    load('Etiquetas_USA_Produccion_Ready.mat','Lx_c','Ly','Lx',...
        'Ly_c','Mag_S','Lon_S','Lat_S','Depthkm_S','Lx_Cont','Ly_Cont','IRISIDS','T','Dist_respectivas')
    disp('Producción USA')
case 4
    load('Etiquetas_CHILE_Produccion_Ready.mat','Lx_c','Ly','Lx',...
        'Ly_c','Mag_S','Lon_S','Lat_S','Depthkm_S','Lx_Cont','Ly_Cont','IRISIDS','T','Dist_respectivas')
    disp('Producción CHILE')
case 5
    load('Etiquetas_EUROPA_DURProduccion_Ready.mat','Lx_c','Ly','Lx',...
        'Ly_c','Mag_S','Lon_S','Lat_S','Depthkm_S','Lx_Cont','Ly_Cont','IRISID','T','Dist_respectivas')
    disp('Producción DUR')
case 6
    load('Etiquetas_EUROPA_PEGProduccion_Ready.mat','Lx_c','Ly','Lx',...
        'Ly_c','Mag_S','Lon_S','Lat_S','Depthkm_S','Lx_Cont','Ly_Cont','IRISIDS','T','Dist_respectivas')
    disp('Producción PEG')
case 7
    load('Etiquetas_PETProduccion2_Ready.mat','Lx_c','Ly','Lx',...
        'Ly_c','Mag_S','Lon_S','Lat_S','Depthkm_S','Lx_Cont','Ly_Cont','IRISIDS');
    disp('Producción PET')
case 8
    load('Etiquetas_KAK_Produccion_Ready','Lx_c','Ly','Lx',...
        'Ly_c','Mag_S','Lon_S','Lat_S','Depthkm_S','Lx_Cont','Ly_Cont','IRISIDS');
    disp('Producción KAK')
end
Lxx = Lx;
Ly = Ly;
%
%
% CARGA LOS INDICES DEL ENTRENAMIENTO
%
load INDICES_ENTRENA
% OBTIENE EL VALOR DE Gamma_2 de la estacion 1 y gamma 1
%
S_Prod = Stadistic_Produce;
s_prod = S_Prod{1,1};
Gamma_2 = s_prod.Gamma_2;
%
```

```

%LAZO ARA GAMMA
%
for j_gamma = 1:length(Gamma_2);
    Ind_Ent = cell2mat(Indices_Entrena(j_gamma));
    IND_ACIERTOS = Ind_Ent.IND_ACIERTOS;
    IND_FALLOS = Ind_Ent.IND_FALLOS;
    Indices_Aciertos_Produce = Ind_Ent.Indices_Aciertos_Produce;
    Por_Ef = Ind_Ent.Por_Ef;
    Actual_Gamma = Ind_Ent.Actual_Gamma;
%
if band == 1
    disp(' ')
    disp(['Valor de gamma: ' num2str(Actual_Gamma) ])
    disp(' ')
end
%
Total_Stations_Combinations = 4; % Station_Used_Now = [1 2 3 4];
S_Prod = Stadistic_Produce;

for Actual_Station = 1:Total_Stations_Combinations;
    s_prod = S_Prod{Actual_Station,j_gamma};
    f1 = s_prod.f1;
    f2 = s_prod.f2;
    Md = s_prod.Md;
    M_dh = s_prod.M_dh;
    Dh = s_prod.Dh;
    Num_h = s_prod.Num_h;
    Int_H = s_prod.Int_H;
    Nv = s_prod.Nv;
    Pa = s_prod.Pa;
    Pt = s_prod.Pt;
    t = s_prod.t;
    T = t-t(1);
    Station_Used_Now = s_prod.Station_Used_Now;
    Ind_Ac = Indices_Aciertos_Produce;
    ind_aciertos = Ind_Ac.ind_aciertos;
    ind_fallos = Ind_Ac.ind_fallos;
    Pa(:,ind_aciertos) = Pa(:,ind_aciertos) + ka;
    Pa(:,ind_fallos) = 0;
    PA(:,:,Actual_Station) = Pa;
end
%
if band == 1
    close all
    set.figure(1), 'Position',[232      45      951      622], 'Color','W')
    for i=1:Total_Stations_Combinations
        Pm = PA(:,:,i)';
        subplot(2,2,i)
        %
        [xa,ya] = meshgrid(linspace(T(1),T(end),size(Pm,2)),linspace(1,M_dh(end),size(Pm,1)));
        surf(xa,ya/Num_h,Pm), shading interp, view([0 90])
        colorbar, colormap jet, alpha .7
        grid, axis xy, axis on
        Pm = mean(PA(:,:,i)');
        Pm = (Pm-(max(Pm))/(max(Pm)-min(Pm))*Mag_max;
        hold on
        plot((Lx'-Lxx(1,1)),Ly'-Mag_max,'-b','LineWidth',[2])
        plot((Lx_Cont'-Lxx(1,1)),Ly_Cont'-Mag_max,'-g','LineWidth',[3])
        plot(T,Pm,'-r','LineWidth',[3]), grid
        plot(T,Pm,'-k','LineWidth',[1]), grid
        hold off
        grid
        ax1 = gca; % current axes
        ax1.YTick = [-10:2:M_dh(end)];
        ax1.GridLineStyle = '-';
        ax1.GridColor = [0 0 0];
        ax1.GridAlpha = 1;
        ax1.LineWidth = 0.5;
        ax1.YMinorGrid = 'on';
        ax1.XMinorGrid = 'on';
        if i < 4 title(cell2mat(['Estación: ' Label_Station(i)]))
        else
            title('Todas las estaciones')
            %title('All Station')
        end
        xlim([0 T(end)])
        ylim([-10 24])
    end
    g = get.figure(1);
    g1 = g.Children;
    set(g1(1), 'Position',[0.9674 0.0807 0.0141 0.4025], 'Box','on');
    set(g1(2), 'Position',[0.5363 0.0806 0.4239 0.4050], 'Box','on');
    set(g1(3), 'Position',[0.4751 0.0773 0.0141 0.4095], 'Box','on');
    set(g1(4), 'Position',[0.0454 0.0773 0.4225 0.4095], 'Box','on');
    set(g1(5), 'Position',[0.9685 0.5594 0.0141 0.4060], 'Box','on');
    set(g1(6), 'Position',[0.5363 0.5596 0.4251 0.4058], 'Box','on');
    set(g1(7), 'Position',[0.4760 0.5563 0.0141 0.4029], 'Box','on');
    set(g1(8), 'Position',[0.0449 0.5552 0.4241 0.4040], 'Box','on');
    Ejes_Visibles(1)
%
set.figure(2), 'Position',[ 84      110      900      588], 'Color','W')
ko = 3e1;
ym = max(PA(:));
for i=1:4, subplot(2,2,i)
    hold on
    plot((Lx'-Lx(1,1)),Ly,'-b','LineWidth',[3])

```

```

plot((Lx_Cont'-Lx(1,1)),Ly_Cont', '—g', 'LineWidth', [2])
Mpa = mean(PA(:,:,i)')*ko;
Mpa = (Mpa - min(Mpa))*ko/15;
plot(T,Mpa, '—r', 'LineWidth', [6])
plot(T,Mpa, '—k', 'LineWidth', [3])
hold off
if i < 4 title(cell2mat(['Estacion: ', Label_Station(i)])), axis xy, axis on
else
title('Todas las estaciones'), axis xy, axis on
end
xlim([T(1) T(end)])
% ylim([0 max(PA(:))*1])
ax1 = gca; % current axes
ax1.GridLineStyle = '—';
ax1.GridColor = [0 0 0];
ax1.GridAlpha = 1;
ax1.LineWidth = 0.5;
ax1.YMinorGrid = 'on';
ax1.XMinorGrid = 'on';
grid
Ejes_Visibles(2)
g = get(gcf(2));
g1 = g.Children;
set(g1(1), 'Position', [0.5385 0.0861 0.4180 0.3651], 'Box', 'on');
set(g1(2), 'Position', [0.0414 0.0795 0.4477 0.3657], 'Box', 'on');
set(g1(3), 'Position', [0.5347 0.5497 0.4286 0.3852], 'Box', 'on');
set(g1(4), 'Position', [0.0419 0.5453 0.4467 0.3874], 'Box', 'on');

end
%IMAGEN MEDIA DE LAS TRES ESTACIONES
%
%PARAMETROS DE VISUALIZACION
%
h1 = 1;
ko = 2e1;
k1 = 200;
k2 = 5;
MA = [];
%
for i = 1:1
MA = [MA; mean(PA(:,:,i))];
end
%
Pro = prod(MA)/max(prod(MA))*ko;
Sum = sum(MA)/max(sum(MA))*ko;
Pp = permute(PA,[1 3 2]); Pp = permute(Pp,[2 1 3]);
Ia = squeeze(mean(Pp));
Ia_mean_x = medfilt2(Ia,[n1 n2]);
Ia_mean_y = mean(Ia);
Ia_mean_y = smooth(Ia_mean_y - min(Ia_mean_y),h1)*k1;
yv = linspace(0,24,length(Ia_mean_y));
%
if band == 1
set(gcf(3), 'Position', [ 47 59 1307 616], 'Color', 'W')
subplot(2,1,1)
%SURF
%
[xa,ya] = meshgrid(linspace(T(1),T(end),size(Ia,2)),linspace(1,M_dh(end),size(Ia,1)));
surf(xa,ya/Num_h,Ia_mean_x), shading interp, view([0 90])
colorbar, colormap jet, alpha .7
hold on
plot((Ia_mean_y*k2-k1),yv, '—k', 'LineWidth', [5]),
plot((Ia_mean_y*k2-k1),yv, '—g', 'LineWidth', [1], 'MarkerSize', [4])
hold off
title(['Probabilidad de activación en estacion geomagnetica para gamma: ', num2str(Gamma_2(j_gamma))])
ylabel('Intervalo horario (0-24 h)')
ax1 = gca; % current axes
ax1.YTick = [0:2:M_dh(end)];
ax1.GridLineStyle = '—';
ax1.GridColor = [0 0 0];
ax1.GridAlpha = 1;
ax1.LineWidth = 0.25;
xlim([-k1 T(end)])
ylim([0 24])
subplot(2,1,2)
plot((Lx'-Lxx(1,1)),Ly, '—b', 'LineWidth', [2]), hold on
plot((Lx_Cont'-Lxx(1,1)),Ly_Cont', '—g', 'LineWidth', [3])
plot(T,Pro, '—k', 'LineWidth', [6])
plot(T,Pro, '—r', 'LineWidth', [2], 'MarkerSize', [4])
plot(T,Ia_mean_y/k2, '—k', 'LineWidth', [6])
plot(T,Ia_mean_y/k2, '—m', 'LineWidth', [2])
hold off
xlabel(['Fecha inicial y final: ', datestr(round(f1)), ' — hasta — ', ...
datestr(round(f2)), ' — Tiempo total: [\approx', ...
num2str(round((T(end)/365.25))) '] años — [eje x en días]'])
ylabel('Eventos (azul y verde) y precursor (rojo)')
xlim([0 T(end)])
g = get(gcf(3));
g1 = g.Children;
set(g1(1), 'Position', [0.0828 0.0727 0.8688 0.4611], 'Box', 'on');
set(g1(2), 'Position', [0.9569 0.5836 0.0141 0.3679], 'Box', 'on');
set(g1(3), 'Position', [0.0377 0.5838 0.9121 0.3643], 'Box', 'on');
set(g1(3), 'XTick', [-200:200:T(end)])
set(g1(1), 'XTick', [0:200:T(end)])
ax1 = gca;
ax1.YTick = [0:5:M_dh(end)];
ax1.GridLineStyle = '—';
ax1.GridColor = [0 0 0];
ax1.GridAlpha = 1;

```

```

ax1.LineWidth = 0.25;
ax1.XAxisLocation = 'bottom';
grid
Ejes_Visibles(3)
%
INT_H = Int_H(IND_ACIERTOS);
lx_ac = Int_H;
ly_ac = Por_Ef*ones(1,length(Int_H));
%
set('figure(4)', 'Position',[49 136 1306 540], 'Color','W')
plot(yv,(Ia_mean_y), 'k', 'LineWidth', [8])
hold on
plot(yv,(Ia_mean_y), 'g', 'LineWidth', [4], 'MarkerSize', [4])
plot(yv,(Ia_mean_y), 'r', 'LineWidth', [2], 'MarkerSize', [1])
plot(lx_ac,ly_ac, 'r', 'LineWidth', [4])
plot(lx_ac,ly_ac, 'g', 'LineWidth', [2])
hold off
title(['Probabilidad de activación en estacion geomagnetica para gamma: [ num2str(Gamma_2(j_gamma)) ]'])
ylabel('Probabilidad de activación')
xlabel('Intervalo horario (0-24 h)')
xlim([-1 Dh(end)/Num_h+1])
%ylim([0 1.1*max(Ia_mean_y)])
g = get(4);
g1 = g.Children;
set(g1, 'Position', [0.0415 0.1250 0.9514 0.8103], 'Box', 'on')
ax1 = gca;
% current axes
ax1.XTick = [-1:1:Dh(end)/Num_h];
ax1.GridLineStyle = '-';
ax1.GridColor = [0 0 0];
ax1.GridAlpha = 1;
ax1.LineWidth = 0.25;
grid
Ejes_Visibles(4)
pause
end
%
IA_MEAN_Y = [IA_MEAN_Y; Ia_mean_y];
IA_MEAN_X = [IA_MEAN_X; mean(Ia_mean_x)];
%
% SALIDAS
%
save Precursor_Activation_Parameters IA_MEAN_Y IA_MEAN_X Lx Ly Lx_Cont Ly_Cont T k2 f1 f2 Gamma_2 Md
%
%
fprintf('
disp(' La base datos de la fase de Produccion fue creada para las estaciones: ')
disp(Label_Station')
fprintf('

```

#### B.4.3. Visualización de calibración y producción.

```

% Precursor_Activation_Gamma_Dependence.m
%
% DESCRIPCION: Programa toma las salidas del programa Optimal_Time_Interval_Produce.m
% y visualiza los resultados.
% SALIDA: Figuras y variable IA_MEAN_YS que contiene el precursor
% relativista
%
close all
%
Mag_max = 10;
nd = 20*10.0; % NUMERO DE DIAS BEFORE EVENT
d_gamma = 10; % INCREMENTO DE GAMMA (PARA VISUALIZAR)
so = 0; % CUANTAS DESVIACIONES SE TOMAN EN CUENTA PARA CONSIDERAR LOS MAXIMOS DEL PRECURSOR
%
load Precursor_Activation_Parameters % CONTIENE LAS ENTRADAS NECESARIAS
%
% band = 0; % band = 1 VISUALIZA TODAS LAS FIGURAS
%
linas_anuales = 0; % 1,0 Visualiza lineas cada 365 dias en los datos
%
anota = 0; % 0 Visualiza cuadros de texto de calibracion y produccion
%
% Ajusta la altura total del precursor para mejorar la visualizacion
k2 = 5; % igual a 5 si se quiere el default
Lxx = Lx;
Lyy = Ly;
%
band = 1;
%
% CASOS
%
switch Data_Stations
case 1
    %CASO JAPON:
    ind = find(Lyy(:,2) >= 9.1);
    Event_Lx = Lxx(ind,:)-f1;
    Event_Ly = Lyy(ind,:);
%
    % INTERVALO
%
    n1 = 1;
    n2 = 5;
%
case 2

```

```

%1=datestr(round(min(Lx)));
%1=(round((Lx(1))));
% CASO EUROPA SILENCIO:
ind2 = find(Lyy(:,2)>=6.5);
ind = ind2(5);
Event_Lx = Lxx(ind,:)-f1;
Event_Ly = Lyy(ind,:);
%
n1 = 1;
n2 = 4;
%
nd = 10.0;
k2 = 5; % igual a 5 si se quiere el default
case 3
%TERREMOTO DE USA
%
% CASO USA:
ind2 = find(Lyy(:,2)>=7.2);
ind = ind2(1);
Event_Lx = Lxx(ind,:)-f1;
Event_Ly = Lyy(ind,:);
% nd = 30*5; % NUMERO DE DIAS BEFORE EVENT
% CASO USA:
% ind2 = find(Lyy(:,2)==6.8);
% ind = ind2(1);
% Event_Lx = Lxx(ind,:)-f1;
% Event_Ly = Lyy(ind,:);
%
n1 = 1;
n2 = 5;
%
nd = 20*10.0;
case 4
% CASO CHILE:
ind2 = find(Lyy(:,2)==8.0);
ind = ind2(1);
Event_Lx = Lxx(ind,:)-f1;
Event_Ly = Lyy(ind,:);
%
n1 = 1;
n2 = 10;
%
case 5
% CASO EUROPA DUR:
ind2 = find(Lyy(:,2)>=5.1);
ind = ind2(10);
Event_Lx = Lxx(ind,:)-f1;
Event_Ly = Lyy(ind,:);
%
%
n1 = 1;
n2 = 5;
%
% nd = 30*5.0;
case 6
% CASO EUROPA PEG:
ind2 = find(Lyy(:,2)==6.8);
ind = ind2(1);
Event_Lx = Lxx(ind,:)-f1;
Event_Ly = Lyy(ind,:);
%
n1 = 1;
n2 = 10;
%
nd = 20*10.0;
%
% % CASO EUROPA PEG:
% ind2 = find(Lyy(:,2)==6.8);
% ind = ind2(1);
% Event_Lx = Lxx(ind,:)-f1;
% Event_Ly = Lyy(ind,:);
%
% n1 = 1;
% n2 = 10;
%
% nd = 20*10.0;
case 7
% CASO JAPON PET:
ind2 = find(Lyy(:,2)>=7.1);
ind = ind2(2);
Event_Lx = Lxx(ind,:)-f1;
Event_Ly = Lyy(ind,:);
%
n1 = 1;
n2 = 10;
%
nd = 21*10.0;
%k2 = 14; % igual a 5 si se quiere el default
%k2 = 14; % igual a 5 si se quiere el default
case 8
% CASO JAPON:
ind2 = find(Lyy(:,2)>=6);
ind = ind2(7);
Event_Lx = Lxx(ind,:)-f1;
Event_Ly = Lyy(ind,:);
%
% INTERVALO
%
n1 = 1;
n2 = 5;

```

```

%
k2 = 10;
end
% factor de suavizacion sobre la variable IA_MEAN_YS
ho = 5;
IA_MEAN_YS = [];
%=
for i=1:size(IA_MEAN_Y,1),
    IA_MEAN_YS = [IA_MEAN_YS;smooth(IA_MEAN_Y(:,i),ho)];
end
IM = mean(IA_MEAN_YS(1:k2));
IA_M = mean(IA_MEAN_YS);
IA_M = -Mag_max*IA_M/max(IA_M);
IA_M = -(Mag_max+IA_M);
Days_Before = Event_Lx(1,1) - nd;
Days_After = Event_Lx(1,1) + nd;
%Days_After = Event_Lx(1,1) + nd - 100;
Total_Days = round((Days_After-Days_Before)/2);
vx = round(Days_Before/Md):round(Days_After/Md); % INTERVALO TEMPORAL
max_tx = mean(std(IA_MEAN_YS(:,vx')))*so;
[ty,tx] = max(IA_MEAN_YS(:,vx'));% LOCALIZACION DE LOS MAXIMOS
ind_ty = find(ty>=max_tx); % ELIMINACION DE PRECURSORES INFERIORES A SU DESVIACION
tx = tx(ind_ty);
ty = ty(ind_ty);
Gamma_2 = Gamma_2(ind_ty);
IA_MEAN_YS = IA_MEAN_YS(ind_ty,:); % POSICION DE LOS MAXIMOS
Tx = T(vx);
Dt = (Tx(tx) - Event_Lx(1)); % DAYS BEFORE EVENT
[gy,gx] = max(ty);
Gamma_Opt = Gamma_2(gx); % VALOR OPTIMO DE GAMMA
Gx = Gamma_Opt*ones(1,10);
Gy = linspace(0,1.1*gy,10);
[g_opt,E_opt] = Energia_Vs_Gamma(Gamma_Opt,0);
%=
if band == 1
%
set(figure(1), 'Position',[112 212 1148 470], 'Color', 'W')
for i=1:size(IA_MEAN_YS,1)
    plot((Lx'-Lxx(1,1)),Ly', '-b', 'LineWidth', [2]), hold on
    plot((Lx_Cont'-Lxx(1,1)),Ly_Cont', '--g', 'LineWidth', [3])
    plot(Event_Lx,Event_Ly, '-r', 'LineWidth', [3])
    Plot el precursor
    plot(T,IA_MEAN_YS(1:i,:)/k2, '-.', 'LineWidth', [2])
    plot((Lx_Cont'-Lxx(1,1)),Ly_Cont', '--g', 'LineWidth', [3])
    plot(Event_Lx,Event_Ly, '-r', 'LineWidth', [3])
    hold off
    xlabel(['Fecha inicial y final: ' datestr(round(f1)) ' — hasta — ' ...
        datestr(round(f2)) ' — Tiempo total: [\approx' ...
        num2str(round((T(end)/365.25))) '] años — [eje x en días]'])
    ylabel('Eventos (azul y verde) y Precursor (Curvas)')
    title(['Señal Precursora, ' char(Nombre_caso(Data_Stations)) ...
        ', Intervalos Gamma: [ ' num2str(min(Gamma_2),2) '-' ...
        num2str(max(Gamma_2)/length(Gamma_2),3) ']' ...
        num2str(max(Gamma_2),3) ']' ])
    xlim([0 T(end)+15])
    grid
    Ejes_Visibles(1)
    g = get(figure(1));
    g1 = g.Children;
    set(g1(1), 'Position', [0.0345 0.1241 0.9612 0.8237], 'Box', 'on');
    ax1 = gca; % current axes
    ax1.XTick = [0:200:T(end)];
    ax1.GridLineStyle = '-';
    ax1.GridColor = [0 0 0];
    ax1.GridAlpha = 1;
    ax1.LineWidth = 0.125;
end
% Cuadritos de texto de calibracion y produccion
if anota == 1
    figure(1)
    % Pos de los 2 cuadros de texto:
    dim1 = [0.0349 0.8949 0.3217 0.0537]; %Esto se puede editar
    dim2 = [0.4394 0.8932 0.5558 0.0531]; %Esto se puede editar
    %Cuadro de texto para la calibracion
    anot1=annotation('textbox', dim1, 'String', 'Datos sísmicos de calibración',...
        'BackgroundColor', 'green', 'FontSize', 12, 'FaceAlpha', 0.5, 'HorizontalAlignment', 'center',...
        'FontWeight', 'bold');
    %Cuadro de texto para la produccion
    anot2=annotation('textbox', dim2, 'String', 'Datos sísmicos de producción',...
        'BackgroundColor', 'blue', 'FontSize', 12, 'FaceAlpha', 0.5, 'HorizontalAlignment', 'center',...
        'FontWeight', 'bold');
    %En caso se quiera modificar la pos a mano, luego se puede cambiar anot1 y
    %2 con estos comandos:
    %get(anot1,'Position')
    %get(anot2,'Position')
end
%%
set(figure(2), 'Position',[5 382 1885 556], 'Color', 'W')
hold on
plot((Lx'-Lxx(1,1)),Ly', '-b', 'LineWidth', [2])
plot((Lx_Cont'-Lxx(1,1)),Ly_Cont', '--g', 'LineWidth', [3])
plot(Event_Lx,Event_Ly, '-r', 'LineWidth', [3])
plot(T,IM, '-k', 'LineWidth', [8])
plot(T,IM, '-r', 'LineWidth', [2])
hold off

```

```

xlabel(['Fecha inicial y final: ' datestr(round(f1)) ' — hasta — ' ...
datestr(round(f2)) ' — Tiempo total: [\approx' ...
num2str((T(end)/365.25)) '] años — [eje x en días]'])
ylabel('Eventos (azul y verde) y Precursor (curvas)')
title(['Gamma: [' num2str(Gamma_2(i)) ']'])
xlim([0 T(end)+10])
grid
g = get.figure(2);
g1 = g.Children;
set(g1, 'Position',[0.0345 0.1241 0.9612 0.8237], 'Box', 'on');
ax1 = gca; % current axes
ax1.XTick = [0:200:T(end)];
ax1.GridLineStyle = '-';
ax1.GridColor = [0 0 0];
ax1.GridAlpha = 1;
ax1.LineWidth = 0.125;
Ejes_Visibles(2)
if size(IA_MEAN_YS,1) == 10
% CASO 10 GAMMAS
%
set.figure(3), 'Position',[1 28 1893 910], 'Color', 'W')
%
for i=1:10
subplot(5,5,i)
plot((Lx'-Lxx(1,1)),Ly,'-b','LineWidth',[2]), hold on
plot((Lx_Cont'-Lxx(1,1)),Ly_Cont,'-g','LineWidth',[2])
plot(Event_Lx,Event_Ly,'-r','LineWidth',[3])
plot(T,IA_MEAN_YS(i,:)/k2,'-k','LineWidth',[5])
plot(T,IA_MEAN_YS(i,:)/k2,'-r','LineWidth',[2])
plot(T,IA_MEAN_YS(i,:)/k2,'-m','LineWidth',[1])
hold off
grid
ylim([0 22])
xlim([0 T(end)])
title(['\gamma = ' num2str(Gamma_2(i)) ], 'FontSize', [12])
% axis off
% if i==9 | i==10, axis on, end
end
load Position_Fig_3
g = get.figure(3);
g1 = g.Children;
for i=1:10, set(g1(i), 'Position',[G3(i,:)], 'Box', 'on');
if i==9 | i==10, %set(g1(i), 'Position',[G3(i,:)], 'Box', 'on');
 xlabel(['Fecha inicial y final: ' datestr(round(f1)) ' — hasta — ' ...
datestr(round(f2)) ' — Tiempo total: [\approx' ...
num2str((T(end)/365.25)) '] años — [eje x en días]'])
end
end
set(g1(1).XLabel, 'Position',[ -190.3790 -9.7333 0])
Ejes_Visibles(3)
end
if size(IA_MEAN_YS,1) <= 20
% CASO 20 GAMMAS
%
set.figure(4), 'Position',[1 28 1893 910], 'Color', 'W')
%
for i=1:size(IA_MEAN_YS,1)
ym = max(IA_MEAN_YS(:))/k2;
subplot(10,2,i)
plot((Lx'-Lxx(1,1)),Ly,'-b','LineWidth',[2]), hold on
plot((Lx_Cont'-Lxx(1,1)),Ly_Cont,'-g','LineWidth',[2])
plot(Event_Lx,Event_Ly,'-r','LineWidth',[3])
plot(T,IA_MEAN_YS(i,:)/k2,'-k','LineWidth',[5])
plot(T,IA_MEAN_YS(i,:)/k2,'-r','LineWidth',[2])
plot(T,IA_MEAN_YS(i,:)/k2,'-m','LineWidth',[1])
hold off
grid
ylim([0 ym])
xlim([0 T(end)])
title(['\gamma = ' num2str(Gamma_2(i)) ], 'FontSize', [12])
%axis off
%if i==9 | i==10, axis on, end
end
load Position_Fig_3_20
g = get.figure(4);
g1 = g.Children;
for i=1:size(IA_MEAN_YS,1), set(g1(i), 'Position',[G3(i,:)], 'Box', 'off');
set(g1(i), 'Position',[G3(i,:)], 'Box', 'on');
if i==18,
 xlabel(['Fecha inicial y final: ' datestr(round(f1)) ' — hasta — ' ...
datestr(round(f2)) ' — Tiempo total: [\approx' ...
num2str((T(end)/365.25)) '] años — [eje x en días]'])
end
end
set(g1(1).XLabel, 'Position',[ -6.9672e+03 -7.0440 0])
Ejes_Visibles(4)
end
if size(size(IA_MEAN_X),1)>1
%
set.figure(5), 'Position',[5 382 1885 556], 'Color', 'W')
%
plot(smooth(mean(IA_MEAN_X/k2),4),'-k','LineWidth',[6]), hold on
plot(smooth(mean(IA_MEAN_X/k2),4),'-g','LineWidth',[3])
plot(smooth(mean(IA_MEAN_X/k2),4),'-r','LineWidth',[1]), hold off
grid
Ejes_Visibles(5)
g = get(5);
g1 = g.Children;
set(g1(1), 'Position',[0.0473 0.1100 0.9278 0.8150])

```

```

% DETERMINACION DE LOS PICOS
%
Xa = zeros(size(IA_MEAN_YS));
Ya = zeros(size(IA_MEAN_YS));
for i=1:size(IA_MEAN_YS,1),
    [ya,xa] = findpeaks(IA_MEAN_YS(i,:));
    plot(T,IA_MEAN_YS(1:i,:)),hold on, plot(T(xa),ya,'*r'),pause
    Xa(i,1:length(xa)) = T(xa);
    Ya(i,1:length(xa)) = ya;
end
%
set(figure(6),'Position',[6 32 1883 906],'Color','W')
%
lx = T;

hold on,
for i=1:size(IA_MEAN_YS,1)
    ly = (20*i+20)*ones(1,size(IA_MEAN_YS,2));
    plot(lx,ly,'k')
    plot(T,IA_MEAN_YS(i,:)+20*i+20,'-', 'LineWidth',[1])
    text(lx(end),ly(end),['\gamma = ' num2str(round(Gamma_2(i)))], 'Color','k', 'FontWeight','Bold', 'FontSize',[12])
end
plot((Lx'-Lxx(1,1)),70*Ly,'-b', 'LineWidth',[2])
plot((Lx_Cont'-Lxx(1,1)),70*Ly_Cont,'-g', 'LineWidth',[2])
plot(Event_Lx,70*Event_Ly,'-r', 'LineWidth',[3])
hold off
xlabel(['Fecha inicial y final: ' datestr(round(f1)) ' hasta ' datestr(round(f2)) ' Tiempo total: [\approx num2str(round((T(end)/365.25)))] años [eje x en días]')
g = get(figure(6));
g1 = g.Children;
set(g1,'Position',[0.0398 0.1100 0.9092 0.8337])
set(g1(1).XLabel,'Position',[2.0040e+03 -21.9426 -1])
xlim([T(1) T(end)+10])
grid
Ejes_Visibles(6)
%
set(figure(7),'Position',[5 385 1885 553],'Color','W')
%
if size(IA_MEAN_YS,1) < 2
    set(figure(7),'Position',[5 362 1885 576], 'Color','W')
    plot((Lx'-Lxx(1,1)),Ly'-Mag_max,'-b', 'LineWidth',[2]),hold on
    plot((Lx_Cont'-Lxx(1,1)),Ly_Cont'-Mag_max,'-g', 'LineWidth',[2])
    plot(Event_Lx,Event_Ly-Mag_max,'-r', 'LineWidth',[3])
    plot(Event_Lx, 1.2*max(IA_MEAN_YS(:))*(Event_Ly),'-k', 'LineWidth',[4])
    plot(Event_Lx, 1.2*max(IA_MEAN_YS(:))*(Event_Ly),'-r', 'LineWidth',[2])
    plot(T,IA_MEAN_YS,'k', 'LineWidth',[10]),hold on
    plot(T,IA_MEAN_YS,'-r', 'LineWidth',[5])
    plot(T,IA_MEAN_YS,'-g', 'LineWidth',[2])
    hold off
    title(['Evolución temporal del precursor \gamma = [ ' num2str(Gamma_2) ' ]'])
    ylabel('Amplitud del precursor [au]', 'FontSize',[14])
    ylim([-Mag_max 1.2*max(IA_MEAN_YS(:))])
    g = get(7);
    g1 = g.Children;
    set(g1(1),'Position',[0.0377 0.1100 0.9480 0.8150], 'Box','on')
else
    [xa,ya] = meshgrid(linspace(T(1),T(end),size(IA_MEAN_YS,2)),linspace(Gamma_2(1),Gamma_2(end),size(IA_MEAN_YS,1)));
    surf(xa,ya,IA_MEAN_YS, 'shading interp', 'view',[0 90])
    colorbar, colormap jet, alpha 0.5
    axis xy, axis on
    hold on, plot((Lx'-Lxx(1,1)),Ly'-Mag_max,'-b', 'LineWidth',[2])
    plot((Lx_Cont'-Lxx(1,1)),Ly_Cont'-Mag_max,'-g', 'LineWidth',[2])
    plot(Event_Lx,Event_Ly-Mag_max,'-r', 'LineWidth',[3])
    plot(Event_Lx, 1.2*max(IA_MEAN_YS(:))*(Event_Ly),'-k', 'LineWidth',[4])
    plot(Event_Lx, 1.2*max(IA_MEAN_YS(:))*(Event_Ly),'-r', 'LineWidth',[2])
    plot(T,IA_M,'k', 'LineWidth',[8])
    plot(T,IA_M,'-r', 'LineWidth',[3])
    ylim([-Mag_max Gamma_2(end)])
    hold off
    ylabel('valores de \gamma ', 'FontSize',[14])
    title('Evolución en el tiempo del precursor y sus dependencias con el valor gamma')
    %title('Precursor time evolution and its gamma values dependences')
    ylim([-10 Gamma_2(end)])
    g = get(7);
    g1 = g.Children;
    set(g1(1),'Position',[0.9620 0.1103 0.0141 0.8156], 'Box','on')
    set(g1(2),'Position',[0.0377 0.1465 0.9093 0.7785], 'Box','on')
    set(g1(2).XLabel,'Position',[1.9943e+03 -13.1462 0])
    set(g1(2).YLabel,'Position',[ -97.6563 10.3596 0])
end
xlabel(['Fecha inicial y final: ' datestr(round(f1)) ' hasta ' datestr(round(f2)) ' Tiempo total: [\approx num2str(round((T(end)/365.25)))] años [eje x en días']])
xlim([T(1) T(end)])
ax1 = gca; % current axes
ax1.XTick = [0:200:T(end)];
ax1.GridLineStyle = '-';
ax1.GridColor = [0 0 0];
ax1.GridAlpha = 1;
ax1.LineWidth = 0.125;
Ejes_Visibles(7)

if size(IA_MEAN_YS,1)>1
%
set(figure(8),'Position',[612 32 1278 906], 'Color','W')
%
subplot(1,3,1)

```

```

plot(Tx-Tx(1),IA_MEAN_Ys(:,vx),'LineWidth',[2])
hold on
%plot(Tx-Tx(1),mean(IA_MEAN_Ys(25:35,vx)),'-k','LineWidth',[2])
plot((Lx'-Lxx(1,1))-Tx(1),10*Ly,'-b','LineWidth',[0.125])
plot(Tx(tx)-Tx(1),ty,'*k','MarkerSize',[8])
plot(Tx(tx)-Tx(1),ty,'.g','MarkerSize',[8])
plot(Event_Lx-Tx(1),10*Event_Ly,'-r','LineWidth',[3])
grid
hold off
title('Evento sismico aislado para varios valores de \gamma')
xlabel('Tiempo (días)')
ylabel('Amplitud del precursor (ua)')
xlim([0 Tx(end)-Tx(1)])
ax1 = gca; % current axes
ax1.XTick = [0:500:Tx(end)-Tx(1)];
ax1.GridLineStyle = '-';
ax1.GridColor = [0 0 0];
ax1.GridAlpha = 1;
ax1.LineWidth = 0.125;
subplot(1,3,2)
[yd,xd] = hist(Dt,200);
bd = bar(xd,yd);
bx = zeros(1,10);
by = linspace(0,max(ya(:)),10);
hold on, plot(bx,by,'-b','LineWidth',[2]), hold off
set(bd,'EdgeColor',[1 0 0],'BarWidth',[2],'LineWidth',[2],'LineStyle','-')
grid
xlabel('Días antes (<0) días después (>0)', 'FontSize',[10])
ylabel('Contador')
ax1 = gca; % current axes
ax1.XTick = [-nd:20:nd];
ax1.GridLineStyle = '-';
ax1.GridColor = [0 0 0];
ax1.GridAlpha = 1;
ax1.LineWidth = 0.125;
subplot(1,3,3)
plot(Gamma_2,Dt,'-k','LineWidth',[8]), hold on
plot(Gamma_2,Dt,'-r','LineWidth',[4])
plot(Gamma_2,Dt,'oc','LineWidth',[4])
plot(Gamma_2,Dt,'.m','MarkerSize',[14])
hold off
g = get(8);
g1 = g.Children;
set(g1(1), 'Position',[0.4844 0.0640 0.5007 0.4636], 'Box','on')
set(g1(2), 'Position',[0.4844 0.5982 0.5003 0.3620], 'Box','on')
set(g1(3), 'Position',[0.0382 0.0618 0.3966 0.8985], 'Box','on')
ax1 = gca; % current axes
ax1.XTick = [0:5:Gamma_2(end)];
%ax1.YTick = [-nd:100:nd];
ax1.GridLineStyle = '-';
ax1.GridColor = [0 0 0];
ax1.GridAlpha = 1;
ax1.LineWidth = 0.125;
ylim([-1.2*max(abs(Dt)) 1.2*max(abs(Dt))])
xlim([0 Gamma_2(end)])
xlabel('Valores \gamma')
ylabel('Días antes (<0) —— días después (>0)', 'FontSize',[12])
grid
Ejes_Visibles(8)
%
set(figure(9), 'Position',[5 385 1885 553], 'Color','W')
plot(Gamma_2,ty,'-b','LineWidth',[2]), grid, hold on
plot(Gamma_2,smooth(smooth(ty,6),3),'-r','LineWidth',[6])
plot(Gamma_2,smooth(smooth(ty,20),10),'-g','LineWidth',[6])
plot(Gamma_2,smooth(smooth(ty,20),10),'-k','LineWidth',[2])
plot(Gx,Gy,'-m','LineWidth',[2])
hold off
xlim([Gamma_2(1) Gamma_2(end)])
xlabel('Valores \gamma')
ylabel('Amplitud del precursor (ua)')
title(['Amplitud del precursor ' num2str>Total_Days ' ] dias antes/después al evento —— Gamma_Opt: ' num2str
    (round(Gamma_Opt)) ' ] Opt-Energía: ' num2str(E_opt) ' ] GeV')
g = get(9);
g1 = g.Children;
set(g1, 'Position',[0.0419 0.1100 0.9464 0.8150], 'Box','on')
ax1 = gca; % current axes
ax1.XTick = [0:3:Gamma_2(end)];
ax1.GridLineStyle = '-';
ax1.GridColor = [0 0 0];
ax1.GridAlpha = 1;
ax1.LineWidth = 0.125;
Ejes_Visibles(9)
end
end
%OPTIMAL GAMMA VALUES
%
disp('_____')
disp('Valores Optimos de Gamma: ')
disp(Gamma_2)
disp('_____')
disp(['Mean Optimal Gamma Value: ' num2str(mean(Gamma_2))])
disp(['Std Optimal Gamma Value: ' num2str(std(Gamma_2))])
%
close(figure(3))
close(figure(4))
%% Muestra la cantidad de años en el grafico con lineas verticales naranjas
if linas_anuales == 1
    figure(1)
    hold on;
    TOO = 365.25;

```

```

for i = 1:round((f2-f1)/365.25)
    if TOO+365.25 <= round(f2-f1+365)
        plot([TOO, TOO], [0, 10], 'Color',[1 0.5 0], 'LineWidth',1.3, 'LineStyle','-'), hold on;
        TOO=TOO+365.25;
    end
end
switch Data_Stations
case {7,4,2} %para el caso de 4, los datos no llegan hasta el sismo
    ts = datenum([2011 3 11]) - f1; %terremoto 9.1
    for i =1:2
        figure(i)
        hold on
        plot([ts, ts], [0, 9.1], 'Color',[1 0 0], 'LineWidth',4, 'LineStyle','-');
        plot([ts, ts], [0, 9.1], 'Color',[1 0 1], 'LineWidth',4, 'LineStyle','-'), hold on;
    end
end
%%
% FIN DEL PROGRAMA

```

#### B.4.4. Cálculo y visualización de curvas ROC.

```

% prueba_efectividad_sensibilidad_roc_respaldo.m
%=====
% DESCRIPCIÓN: Programa las salidas de Precursor_Activation_Gamma_Dependence_new
% y calcula curva ROC para una determinada ventana temporal antes
% (vent_an) o despues (vent_des).
%
% SALIDAS:
% dist_i_gamma(umbral,gamma),umbral_optimo, gamma_optimo
% Positive_predictive_value(cont_umbrales,:); verdaderos_pos / verd_pos + fal_pos
% False_predictive_value(cont_umbrales,:); verdaderos_negativos / verdaderos_negativos + falsos_negativos
% sensibilidad(cont_umbrales,:); SENSIBILIDAD X GAMMA
% especificidad(cont_umbrales,:); ESPECIFICIDAD X GAMMA
%
close all
clearvars -except T_entrena T Lx Lxx Lx_Cont Ly_Cont Ly IA_MEAN_Ys k2 IRISIDS Data_Stations f1 f2 final ini
    Gamma_2 Nombre_caso Data_Stations
band = 2;
vent_an = 120;%ventana antes
vent_des = 0;%ventana despues
%
%function [umbral_optimo,gamma_optimo,Positive_predictive_value,sal_s,...]
%especificidad,sensibilidad]=prueba_efectividad_sensibilidad_roc_respaldo(band,vent_an,vent_des,T_entrena,...%
%T,Lx,Lxx,Lx_Cont,Ly,IA_MEAN_Ys,k2,Data_Stations,f1,f2,final,NOMBRE_caso)
%close all
%
Umbr_limit_sup=floor(max(max(IA_MEAN_Ys)))+1;
cont_umbrales = 0;
cont_umbrales = 0;
Loc_sismos= Lx'-f1;%todos los sismos
Loc_sismos_ent=Lx_Cont'-f1;%sismos entrenamiento
Mag_prueba = Ly';
count_vn = 0;
ind_vecVN_T{1,1} = 0;
ind_vecFN_T = [];
ind_vector_T = [];
display_count = 1;

for Umbral_positivo = 0:1:Umbr_limit_sup
    cont_umbrales = cont_umbrales+1;

    if band == 1;
        figure
        plot(Loc_sismos,Ly,'-b','LineWidth',[2]), hold on %plot todos los sismos
        plot(Loc_sismos_ent,Ly_Cont,'--g','LineWidth',[3]); hold on;
        xlabel('Tiempo'); ylabel('Precursor y lineas de sismos')
        plot([0 T(end)], [Umbral_positivo/k2 Umbral_positivo/k2], '-','Color',[0.145,1-0.28, 0.124], 'LineWidth',[2]), hold on %plot umbral
    end
    %
    %CALCULA EFICIENCIA Y OTRAS COSAS DE LAS SALIDAS DE Precursor_Activation_Gamma_Dependence_new
    eficiencia_anteriores = [];
    an_logic_T = [];
    eficiencia = [];
    ef2 = [];
    zok = [];

    if band == 1;
        display('-----')
        display(' Abbreviations: ')
        display(' activaciones "precursoras": AP')
        display(' numero T de datos: NT')
        display(' activaciones Totales: AT')
        display(' -----')
        display(' Calcula eficiencia con data real: ')
    end

    FP_logic_T = [];
    %VARIABLES VERDADEROS NEGATIVOS
    non = []; %variable que contendra logicos para verdaderos negativos
    non_T = []; %variable que contendra logicos para verdaderos negativos totales
    %
    last_sis = size(Lx,1); %INDICE del ultimo sismo
    %ESTO SOLO SE MODIFICA SI T(end)>= sis
    %
    %% VA X CADA GAMMA EN LA VARIABLE IA_MEAN_Ys

```

```

for zoo=1:size(IA_MEAN_YS,1) %for va por los gammas
if band == 1;
%figure(1)
% get(figure(1), 'Position')
%plot(Loc_sismos,Ly,'-b','LineWidth',[2]), hold on %plot todos los sismos
%plot((Lx_Cont'-Lxx(1,1)),Ly_Cont','--g','LineWidth',[3]); hold on;
%plot([0 Loc_sismos(end)],Umbral_positivo/k2 Umbral_positivo/k2,'-g','LineWidth',[2]), hold on %plot todos los sismos
end
%______ jo, indices mayores a Umbral_positivo en los datos de IA_MEAN_YS _____
[~,jo]=find((IA_MEAN_YS(zoo,:)) > Umbral_positivo);%salidas: jo, indices mayores a Umbral_positivo
%______ jo_ig, indices iguales a Umbral_positivo en los datos de IA_MEAN_YS _____
[~,jo_ig]=find((IA_MEAN_YS(zoo,:)) == Umbral_positivo);
%______ jo_me, indices menores a Umbral_positivo en los datos
[~,jo_me]=find((IA_MEAN_YS(zoo,:)) <= Umbral_positivo);
%______

%verdaderos negativos:
primero = 0; % para moverme entre los sismos
%in = 0;
non_T = zeros(size(Loc_sismos,2),length(T(jo_me)));
%
if band == 1;
plot(T,IA_MEAN_YS(zoo,:)/k2,'.', 'LineWidth',[3])
end
an_logic_T = zeros(size(Loc_sismos,2),length(T(jo)));
%%SE MUEVE POR CADA SISMO EN EL REGISTRO
for i =1:size(Loc_sismos,2) %for por los sismos
sis=Loc_sismos(1,i); %toma un sismo particular
%%VERDADEROS POSITIVOS POR CADA GAMMA:
%_____ Busca en el vector T(jo) _____
an_logic = and( T(jo)>= sis-vent_an,T(jo) <= sis+vent_des); %LOGICA PARA ANTES Y DESPUES
%Guarda los indices logicos en la matriz an_logic_T
an_logic_T = [an_logic_T;an_logic]; %Guarda los indices
if sum(an_logic) == 0
ind_vector_T(i,zoo).datos = 0;
else
ind_vector_T(i,zoo).datos = (jo(an_logic));
end
if band == 1;
plot(T(jo(an_logic)),(IA_MEAN_YS(zoo,(jo(an_logic))/k2),'*r','LineWidth',[3]))
end
%_____ FIN DE VERDADEROS POSITIVOS POR GAMMA =
%%VERDADEROS NEGATIVOS POR CADA GAMMA:
if i >= size(Loc_sismos,2) %Loc_sismos(1,i+1)>= T(end)
fin = T(end);
else
fin = Loc_sismos(1,i+1)-vent_an;
end
%_____ Busca en el vector T(jo_me) ====
%[~,jo_me]=find((IA_MEAN_YS(zoo,:)) <= Umbral_positivo);
log1 = T(jo_me)< (sis-vent_an);
log2 = T(jo_me) > primero;
non = or (and(log1 , log2 ),and(T(jo_me)>(sis+vent_des),T(jo_me) < fin)); %Logico verdaderos negativos:
non_T = [non_T;non]; %Guarda los indices verdaderos negativos para ese gamma y lo almacena

if primero >= T(end)
primero = T(end);
else
primero = sis+vent_des;
end

if (zoo== 1)
ind_v_n=(jo_me(non));
for vn =1:length(ind_v_n)
vector_log_vn = IA_MEAN_YS(:,ind_v_n(vn));
max_vec_log_vn= max(IA_MEAN_YS(:,ind_v_n(vn)));
if (max_vec_log_vn<Umbral_positivo)
%not isempty(ind_v_n(vn)))
if not isempty(ind_v_n(vn))
%display([i,vn,cont_umbrales])
ind_vecVN_T{i,vn,cont_umbrales}= ind_v_n(vn) ;
end
end
if band == 1;
plot(T(ind_v_n(vn)),vector_log_vn/k2,'.m','LineWidth',[10]) %MARCA PUNTOS verdaderos negativos para todos los gammas
% pause(0.5)
end
else
ind_vecVN_T{i,vn,cont_umbrales}= 0 ;
end
%pause(0.01)
end
end

%%CALCULA LOS FALSOS NEGATIVOS. =====
an_logic_FN = and( T(jo)>= sis-vent_an,T(jo) <= sis+vent_des); %LOGICA PARA ANTES Y DESPUES
an_logic_FN2= and( T(jo_me)>= sis-vent_an,T(jo_me) <= sis+vent_des);
log_control=sum(an_logic_FN);
log_control2= (sum(IA_MEAN_YS(:,jo_me(an_logic_FN2))>Umbral_positivo)>=1);
if T(end)>= sis %cuando llega al limite del calculo del precursor, se detiene
if log_control == 0
zok2(zoo,i) = 0; %VENTANA ESTA VACIA TOTAL algun GAMMA

```

```

ind_vecFN_Txgamma{zoo , i} = jo_me(an_logic_FN2);
if and(log_control == 0,sum(log_contol2)==0) %isempty(an_logic) %and( isempty(an_logic), isempty(IA_MEAN_YS
(zoo,(jo(an_logic))))
zok(zoo,i) = 0; %VENTANA ESTA VACIA TOTAL DE TODOS LOS GAMMAS
ind_vecFN_T{zoo , i} = jo_me(an_logic_FN2);
else
zok(zoo,i) = 1; %VENTANA NO ESTA VACIA
ind_vecFN_T{i ,zoo}= 0;
end
else
ind_vecFN_Txgamma{zoo , i} = 0;
zok(zoo,i) = 1; %VENTANA NO ESTA VACIA
zok2(zoo,i) = 1;
ind_vecFN_T{i ,zoo}= 0;
end
else
last_sis = i -1;
break
% = size(Loc_sismos,2) +1; %fuerza la salida del loop
end
% FIN DE CALCULA LOS FALSOS NEGATIVOS-----
%pause(0.1)
%display(an_logic)
end

%% EFICIENCIA PRECURSOR:( verdaderos positivos)
%_____ EXTRA: _____
indT_VP_cell{zoo}=unique([ind_vector_T(:, zoo).datos]);
% CONTIENE UNA ESTRUCTURA CON LOS INDICES POSITIVOS
[io ,~]=find(sum(an_logic_T)>0); %suma para quitar redundancias
suma_aciertos_T=sum(io);%cantidad total de aciertos x gamma
eficiencia(zoo) = suma_aciertos_T / length(T(jo))*100;
%_____

%% EFICIENCIA FALSOS POSITIVOS. -----
%CALCULA LOS FALSOS POSITIVOS. -----
indT_FP_cell{zoo}=setdiff(jo,indT_VP_cell{zoo}); %indices de los FP totales en el vector T
% size(indT_FP_cell)
%EFICIENCIA FALSOS POSITIVOS
[io2 ,~]=find(sum(an_logic_T)==0);
suma_fallos_T(zoo)=sum(io2);
%total = suma_fallos_T(zoo) + suma_aciertos_T;
eficiencia_falsos_positivos(zoo) = suma_fallos_T(zoo) / length(T(jo))*100;

%% EFICIENCIA VERDADEROS NEGATIVOS-----
[io ,zop]=find(sum(non_T)>0); %suma para quitar redundancias
suma_non_T(zoo)=sum(io);%cantidad total de non para un gamma
eficiencia_non(zoo) = suma_non_T(zoo)/ length(T(jo_me))*100;
%_____
%Cantidad de disparos dividido en la cantidad de datos total:
%Para dar un sentido de cuanto se suele disparar en el total de los
%datos
%activaciones totales(falsos y positivos) / numero total de datos
ef2(zoo) = length(T(jo))/ length(T) *100;%activaciones "precursoras" / numero total de datos
ef3(zoo) = suma_aciertos_T/length(T) *100;
if band == 1;
display(['Gamma: ' num2str(zoo) ' eficiencia: ' num2str(round(eficiencia(zoo),2)) '%//',...
' AP / NT: ' num2str(round(ef3(zoo),2)), '%//',...
' AT/ NT: ' num2str(round(ef2(zoo),2)), '% ]);
end

verd_pos(cont_umbrales,zoo)=suma_aciertos_T; %CONTEO TOTAL DE VERDADEROS POSITIVOS X GAMMA X UMBRAL
Suma_verdpos_falpos(zoo)=length(T(jo)); %VERDADEROS POSITIVOS + FALSOS POSITIVOS
Fal_pos(cont_umbrales,zoo) = suma_fallos_T(zoo); %FALSOS POSITIVOS

%VERDADEROS NEGATIVOS:
% activaciones totales(falsos y positivos) / numero total de datos
ef2_non(zoo) = length(T(jo_me))/ length(T) *100;
%activaciones NO "precursoras" / numero total de datos
ef3_non(zoo) = suma_non_T(zoo)/length(T) *100;
%
if band == 1;
display(['Gamma: ' num2str(zoo) ' verd negat: ' num2str(round(eficiencia_non(zoo),2)) '%//',...
' ANP / NT: ' num2str(round(ef3_non(zoo),2)), '%//',...
' ANT/ NT: ' num2str(round(ef2_non(zoo),2)), '% ]);
end

%GUARDADO DE SALIDAS POSIBLEMENTE IMPORTANTES:
% verd_positivos %VERDADEROS POSITIVOS X GAMMA
eficiencia_p1= eficiencia;%eficiencia calculo directo de la ef con parametros de entrada
ef2_p1=ef2;%ef2 calculo directo de la ef con parametros de entrada
ef3_p1=ef3;%ef3 calculo directo de la ef con parametros de entrada

%% FALSOS NEGATIVOS X GAMMA:
ind_vecFN_T{zoo , i}
% cuenta la cantidad de SISMOS CON FALSOS NEGATIVOS X GAMMA
% count_sismico = zeros(1,size(IA_MEAN_YS,1));
Suma_FN = [];
FN_T = [];
for zoo = 1:size(zok,1)
%Nota importante: si aqui sale un erro va a ser pq zok no tiene
%las dimensiones correctas o empieza a asignar puntos que no
%existan dependiendo del umbral
indxgammaVN = unique(nonzeros([ind_vecFN_Txgamma{zoo,:}]));
for i =1:size(zok,2) %for por los sismos
%control = 0;
if (zok(zoo,i))== 0 % si es 0 significa no detecto señal antes/despues del sismo
end

```

```

end
%suma_FN = prueba123;
if isempty(indxgammaVN) % (zok(zoo,:))~= 0% or (isempty(Suma_FN),(zok(zoo,i))~=0)
FN_T(zoo) = 0;
% pause
else
    [%i o ,~] = find( (Suma_FN(zoo,:)) > 0);

    FN_T(zoo)=length(indxgammaVN); %falsos negativos en el precursor x gamma
end
% Ef_FN(zoo) = FN_T(zoo)/length(T(jo_me)).*100;%eficiencia % falsos negativos en el precursor x gamma
end
% %SALIDA:falsos_neg contiene la cantidad de FALSOS NEGATIVOS X GAMMA
%%CUENTA SISMOS NO DETECTADOS X GAMMA:

%ind_vecFN_T{zoo,i}
%cuenta la cantidad de SISMOS CON FALSOS NEGATIVOS X GAMMA
count_sismico = zeros(1,size(IA_MEAN_YS,1));

for zoo = 1:size(zok2,1)
    for i =1:size(zok2,2) %for por los sismos
        if (zok2(zoo,i))== 0 % si es 0 significa no detecto señal antes/despues del sismo
            count_sismico(zoo) = count_sismico(zoo) + 1;
        end
    end
end
sis_no_detect=count_sismico;
ef_sismica_Ef = sis_no_detect/last_sis .*100;%de sismos no detectados
%%cuenta la cantidad de SISMOS CON FALSOS NEGATIVOS X TODOS LOS GAMMAS
indT_FN_cell = unique(nonzeros([ind_vecFN_T{:,:}]));
count_FALSO_NEGATIVO_TOTAL = 0;

for i =1:size(zok,2) %for por los sismos
    if sum(zok(:,i))==0
        sis=Loc_sismos(1,i); %toma un sismo
        count_FALSO_NEGATIVO_TOTAL = count_FALSO_NEGATIVO_TOTAL + 1;
        % como ya se que todos los gammas tendran 0 activacion:
        for zoo = 1:size(zok,1)
            % jo, indices mayores a Umbral_positivo en los datos de IA_MEAN_YS
            [~,jo_me]=find((IA_MEAN_YS(zoo,:)) <= Umbral_positivo);
            % Busca en el vector T(jo)
            an_logic = and( T(jo_me)>= sis+vent_an, T(jo_me) <= sis+vent_des); %LOGICA PARA ANTES Y DESPUES
            if band == 1;
                plot(T(jo_me(an_logic)),(IA_MEAN_YS(zoo,(jo_me(an_logic))/k2),'*k','LineWidth',[1]) %MARCA PUNTOS NO
                     PRECURSORES
            end
        end
        if band == 1;
            plot([Loc_sismos(1,i) Loc_sismos(1,i)], [0 Mag_prueba(2,i)], '-k','LineWidth',[3]), hold on %plot sismo no
            detectado
            % pause
        end
    end
end
if indT_FN_cell == 0
    FN_T_2 = 0;
    Ef_FN_2 = 0;
    Fals_neg_pr=0;
else
    FN_T_2 = length(indT_FN_cell); %conteo del precursor falso negativo
    Ef_FN_2 = FN_T_2/length(T(jo_me)).*100; %porcentaje del precursor falso negativo
    Fals_neg_pr = count_FALSO_NEGATIVO_TOTAL/last_sis .*100;%porcentaje de sismos falsos negativos
end
if band == 1;
    display(['PORCENTAJE de sismos no detectados x gamma: ' num2str(round(ef_sismica_Ef,2))])
    display(['PORCENTAJE de sismos no detectados X TODOS LOS GAMMAS: ' num2str(round(Fals_neg_pr,2))])
    display(['TOTAL DE SISMOS NO DETECTADOS: ' num2str(round(count_FALSO_NEGATIVO_TOTAL))])
    display(['TOTAL DE SISMOS: ' num2str(round(last_sis))])
end
sal_s.ef_xgamma{cont_umbrales} = 100 - ef_sismica_Ef; % de sismos si detectados x gamma
sal_s.ef_tgamma{cont_umbrales} = 100 - Fals_neg_pr;%de sismos si detectados T gamma
sal_s.totals = last_sis;
sal_s.tsno_detecc{cont_umbrales}= count_FALSO_NEGATIVO_TOTAL;

%%VERDADEROS POSITIVOS TOTALES
for zoo = 1:size(ind_vector_T,2)
    indT_VP_cell{zoo}=unique(nonzeros([ind_vector_T(:,zoo).datos]));
end
if zoo > 1
    ind_verd_pos_T=unique([indT_VP_cell{1}]); %indices verdaderos positivos totales
else
    ind_verd_pos_T=unique([indT_VP_cell{:}]);
end
if band == 1
    plot(T(ind_verd_pos_T),IA_MEAN_YS(:,ind_verd_pos_T)/k2,'.g','MarkerSize',20)
end
VP_T_COUNT = find(ind_verd_pos_T>0);
%FIN DE LOS VERDADEROS POSITIVOS TOTALES, salida:ind_verd_pos_T
%%FALSOS POSITIVOS TOTALES:
ind_fal_pos_T=unique(nonzeros([indT_FP_cell{:}])); %indices verdaderos positivos totales

if band ==1
    plot(T(ind_fal_pos_T),IA_MEAN_YS(:,ind_fal_pos_T)/k2,'om','MarkerSize',5)
    plot(T(ind_fal_pos_T),IA_MEAN_YS(:,ind_fal_pos_T)/k2,'xm','MarkerSize',5)

```

```

end
[FP_T_COUNT,~] = find(ind_fal_pos_T>0);
%%VERDADEROS NEGATIVOS TOTALES:
if size(ind_vecVN_T,3) == cont_umbrales
ind_VN_T = unique(nonzeros([ind_vecVN_T{:, :, cont_umbrales}]));
else
indT_FN_cell = 0;
end

[~,VN_T_COUNT] = find(ind_VN_T>0);
if band ==1
plot(T(ind_VN_T),IA_MEAN_Ys(:,ind_VN_T)/k2,'ob','MarkerSize',5)
end

%SALIDA: count_sismico contiene la cantidad de FALSOS NEGATIVOS X TODOS LOS GAMMAS
%%TOTALES de todos los gammas: VP_T FP_T FN_T_3 VN_T
VP_T(cont_umbrales) = length(VP_T_COUNT); %verdaderos positivos totales

VN_T(cont_umbrales) = length(VN_T_COUNT); %verdaderos negativos TOTALES
%VN_T(cont_umbrales) = sum(suma_non_T(cont_umbrales,:)); %verdaderos negativos TOTALES suma_non_T

FN_T_3(cont_umbrales) = FN_T_2; %Falsos negativos totales;

% FP_T(cont_umbrales) = length(T) - FN_T_3(cont_umbrales) - VN_T(cont_umbrales) - VP_T(cont_umbrales); %
falsos_t(cont_umbrales) = FP_T(cont_umbrales) + FN_T_3(cont_umbrales);
total2 = verd_t + falsos_t;
%

%Esta seccion es pq si detecta exitosamente un sismo y otros puntos
%en la ventana no son VP entonces no sabe como catalogar los que
%esten por abajo del umbral, asi que dire que si 1 punto es asociado
%a un sismo, entonces toda la ventana tambien sera asociada al sismo

if not(total2(cont_umbrales) == length(T))

if display_count == 1
display('aviso: total es diferente a T')
display('PENDIENTE TIENES ESTO ACTIVADO: Si se desea que no cuente de esta manera, comentar:')
display_count = 2;
end
if 0 <(length(T)-total2(cont_umbrales))
%
VP_T(cont_umbrales) = VP_T(cont_umbrales) + length(T) - total2(cont_umbrales);
verd_t(cont_umbrales) = VP_T(cont_umbrales) + VN_T(cont_umbrales);
total2 = verd_t + falsos_t;
else
%
display('tienes mas totales que T')
%
return
end
end
% fin TOTALES de todos los gammas
%%SALIDAS X GAMMA:
% calculo de PPV, FPV, Sensibilidad y especificidad X gammas
Positive_predictive_value(cont_umbrales,:)=verd_pos(cont_umbrales,:)/(verd_pos(cont_umbrales,:)+Fal_pos(cont_umbrales,:)); %verdaderos pos / verd pos + fal_pos
False_predictive_value(cont_umbrales,:)=suma_non_T/(suma_non_T+FN_T); % verdaderos negativos / verdaderos negativos + falsos negativos
sensibilidad(cont_umbrales,:)= verd_pos(cont_umbrales,:)/(FN_T+verd_pos(cont_umbrales,:)); %SENSIBILIDAD X GAMMA
especificidad(cont_umbrales,:)= suma_non_T/ ( suma_non_T + Fal_pos(cont_umbrales,:)); % verdaderos negativos / verdaderos negativos + falsos positivos X GAMMA
% FIN DE SALIDAS X GAMMA
if band == 1;

display(['SENSIBILIDAD x gamma : ', num2str(round(sensibilidad(cont_umbrales,:).*100,1))])
display(['ESPECIFICIDAD x gamma : ', num2str(round(especificidad(cont_umbrales,:).*100,1))])
display(['TASA DE FALSOS NEGATIVOS : ', num2str(round(100-(sensibilidad(cont_umbrales,:).*100),1))])
display(['TASA DE FALSOS POSITIVOS : ', num2str(round(100-(especificidad(cont_umbrales,:).*100),1))])
end

% cuenta la cantidad de SISMOS CON VERDADEROS POSITIVOS X TODOS LOS GAMMAS
count_verd_pos = 0;

for i =1:size(zok,2) %for por los sismos
if sum(zok(:,i))> 0
count_verd_pos = count_verd_pos + 1;
if band == 1;
plot([Loc_sismos(1,i) Loc_sismos(1,i)], [0 Mag_prueba(2,i)], '-g','LineWidth',[3]), hold on %plot sismo no detectado
end
%
display(count_verd_pos)
pause(0.5)
end
if band == 1;
display(['TOTAL DE SISMOS DETECTADOS: ', num2str(round(count_verd_pos))])
end
%
% plot(1-especificidad(cont_umbrales),sensibilidad(cont_umbrales),'or');hold on; plot([0 1],[0 1],'r')
% plot(1-especificidad(cont_umbrales),sensibilidad(cont_umbrales),'xb')
%% calcula punto en la curva ROC mas cercano al [0,1]
dist_i_gamma = zeros(size(sensibilidad,1),size(sensibilidad,2));
for gamma = 1:size(sensibilidad,2)
for umbral = 1:size(sensibilidad,1)

```

```

X = [0,1;1 - especificidad (umbral, gamma), sensibilidad (umbral, gamma) ];
dist_i_gamma(umbral, gamma)=pdist(X, 'euclidean');
end
end
[valor, pos]=min(dist_i_gamma);
[umbral_optimo, gamma_optimo] = find(dist_i_gamma == min(valor));
%DESCOMENTAR LUEGO LA LINEA DE ARRIBA.
%salida: dist_i_gamma(umbral,gamma), umbral_optimo, gamma_optimo

end %FIN DEL LAZO PARA LOS UMBRALES
%% SALIDAS GRAFICADAS X GAMMA
% dist_i_gamma(umbral,gamma), umbral_optimo, gamma_optimo
% sal_s.

% Positive_predictive_value(cont_umbrales,:)%verdaderos_pos / verd_pos + fal_pos
% False_predictive_value(cont_umbrales,:)%verdaderos_negativos / verdaderos_negativos + falsos_negativos
% sensibilidad(cont_umbrales,:)%SENSIBILIDAD X GAMMA
% especificidad(cont_umbrales,:)%ESPECIFICIDAD X GAMMA
if band == 2
ho_plot = 5; %factor de suavizaci&on para las figuras ROC
figure
hold on; plot([0 1],[0 1],'-r')
legend_asig =[];
% Place axes at (0.1,0.1) with width and height of 0.8
ax = gca;
grid on
ax.GridAlpha = 0.8;
ax.GridLineStyle = '—';
% Main plot
for gamma = 1:size(sensibilidad,2)
%guarda las figuras para poder hacer una legenda personalizada
ggg_p(gamma)=plot(smooth(1-especificidad(:,gamma),ho_plot),smooth(sensibilidad(:,gamma),ho_plot),'LineWidth',2);
;
%calcula el area bajo cada curva:
Q(gamma)=trapz(especificidad(:,gamma), sensibilidad(:,gamma));
end
Ejes_Visibles(1)

legend_asig = strsplit(num2str(round(Gamma_2),2));
repgamma = repmat(cellstr('\gamma'),[1 size(sensibilidad,2)]);
repAUC = repmat(cellstr('AUC:'),[1 size(sensibilidad,2)]);
AUCgammmas=cellstr(strsplit((num2str(round(Q,2)))));
legend_asig= strcat(legend_asig, repgamma,repAUC,AUCgammmas);
legend([ggg_p],legend_asig, 'Location', 'northeastoutside')
% plot([0.5 0.5],[0 1],'-r') %Linea referencia
% plot([0 1],[0.5 0.5],'-r') %Linea referencia

title([' Curva ROC para cada \gamma, ' char(Nombre_caso(Data_Stations)) ', num2str(vent_an) ' dias antes'])
%title([' ROC curve for each \gamma, ' num2str(vent_an) ' days before']) %Si se desea que no diga el sitio
xlim([0 1]); ylim([0 1]); xlabel('1- Especificidad'); ylabel(['Sensibilidad']);
plot([0 1],[0 1],'-r','LineWidth',2)
grid on

%% Plot el coeficiente AUC

% Place second set of axes on same plot
handaxes2 = axes('Position', [0.5 0.2 0.26 0.29]);
set(handaxes2, 'Box', 'off')

% Pone la figura
plot(Gamma_2,Q,'LineWidth',2), hold on
ylim([0 1])
ax = gca;
grid on
ax.GridAlpha = 0.8;
ax.GridLineStyle = '—';
title('AUC de curvas ROC')
xlabel('Valores \gamma en la curva ROC'); ylabel(['AUC']);
hold on
plot([0 100],[0.5 0.5],'-r','LineWidth',2)
grid minor
%% figure
plot(False_predictive_value,Positive_predictive_value,'.r'); hold on
plot(False_predictive_value,Positive_predictive_value,'ob')
plot([0.5 0.5],[0 1],'-r')
plot([0 1],[0.5 0.5],'-r')
xlim([0 1]); ylim([0 1]); xlabel('FPV') ; ylabel(['PPV'])
%% CALCULO DE LA PRECISION X GAMMA:[ min=0,max =4]
precision_xgamma=sensibilidad+especificidad+Positive_predictive_value+False_predictive_value;
%%
%% calculo de PPV, FPV, Sensibilidad y especificidad TODOS los gammas
%% ENTRADAS NECESARIAS:
%%
%% VP_T
%% FP_T
%% FN_T_3
%% VN_T_3
%%

Positive_predictive_value_T = VP_T./(VP_T+FP_T);
False_predictive_value_T = VN_T./((VN_T+FN_T_3));
sensibilidad_T = VP_T./((FN_T_3+VP_T));
especificidad_T = VN_T./((VN_T+FP_T));
%% ESPECIFICIDAD Y SENSIBILIDAD TOTAL DE TODOS LOS GAMMAS
%% ho_plot = 10;
figure
plot(smooth(1-especificidad_T,10),smooth(sensibilidad_T,10),'r','LineWidth',2); hold on;
plot([0.5 0.5],[0 1],'-r')
plot([0 1],[0.5 0.5],'-r')
plot([0 1],[0 1],'-r')

```

```

for umbral = 1:size(sensibilidad_T,2)
end
grid on
%title ('Curva ROC for all \gamma')
title ([ 'Curva ROC para todos los \gamma, ' , char(Nombre_caso(Data_Stations)) , ' , num2str(vent_an) ' , 'días antes' ])
xlim([0 1]); ylim([0 1]); xlabel('1- Especificidad ') ; ylabel(['Sensibilidad ']);
Ejes_Visibles(3)
% FIN DE ESPECIFICIDAD Y SENSIBILIDAD TOTAL DE TODOS LOS GAMMAS
%
%% PRECISION TOTAL (SEN + ESP + TPV +FPV)
% figure
% plot(1:1:size(sensibilidad_T,2),(sensibilidad_T+especificidad_T+Positive_predictive_value_T+
% False_predictive_value_T), 'b','LineWidth',4);
% hold on
% plot(1:1:size(sensibilidad_T,2),(sensibilidad_T+especificidad_T+Positive_predictive_value_T+
% False_predictive_value_T), 'go','MarkerSize',4);
% for umbral = 1:size(sensibilidad_T,2)
% plot((umbral),(sensibilidad_T(umbral)+especificidad_T(umbral)),'.b');
% plot((umbral),(Positive_predictive_value_T(umbral)+False_predictive_value_T(umbral)), 'og');
% end
% legend('(sensibilidad + especificidad + PPV + FPV)', '(sensibilidad + especificidad + PPV + FPV)', '(sensibilidad + especificidad)', '(Positive predictive value + False predictive value)');
% xlabel('Umbrales'); grid on; title ('Funcion de la presicion [0 = min ;medium = 2; 4 = max] para todos los gammas')
% ylabel('(Sen + Esp + PPV + FPV )')
% FIN DE PRECISION TOTAL
%
% figure
for umbral = 1:size(sensibilidad,1)
    %plot(1-especificidad(umbral, gamma), Positive_predictive_value(umbral, gamma), 'x')
    plot(umbral,sal_s.ef_xgamma{umbral}/100,'.r'); hold on
    plot(umbral,sal_s.ef_xgamma{umbral}/100,'o') ; hold on
    % display(['Umbral ', num2str(sal_s.ef_xgamma{umbral})])
end
%FIN

title ('Analisis x CADA gamma; ')
xlim([0 umbral]); ylim([0 1]); xlabel('umbrales ') ; ylabel(['% de sismos detectados ']);
%
if or(band == 1,band == 0)
    set(gcf(1), 'Position',[ 500     367     868     318])
    set(gcf(2), 'Position',[ 502      53     440     230])
    set(gcf(3), 'Position',[ -2      42     503     299])
    set(gcf(5), 'Position',[942      43     423     240])
    set(gcf(4), 'Position',[1      425     500     259])
end
end % FIN

```