

Instituto Politécnico Nacional

Unidad Profesional Interdisciplinaria en
Ingeniería y Tecnologías Avanzadas

"Sistema mecatrónico de entrenamiento asistido para el aprendizaje del método Fridrich en el cubo Rubik 3 × 3"

Alumno:

Fidel Alfredo Olmos García

Asesores:

Nombre:	M. en C. Jorge Fonseca Campos
Procedencia:	UPIITA – IPN
Nombre:	Dra. Irene Lopez Rodriguez
Procedencia:	Externa
Nombre:	Dr. Carlos Carrizales Velazquez
Procedencia:	Externo

Junio, 2025

Resumen

El presente documento se enfoca en la necesidad de un sistema unificado para la recolección y procesamiento de datos de posibles precursores sísmicos, como patrones de quietud sísmica, anomalías en campos eléctricos y magnéticos, y señales ionosféricas, provenientes de diversas fuentes. El objetivo primordial de este proyecto es diseñar una herramienta integral y accesible para el análisis e identificación de estos datos, con el fin de mejorar la comprensión de los procesos sísmicos. Este proyecto está organizado en cuatro etapas esenciales: visualización de datos, procesamiento en un servidor dedicado, recolección de datos y almacenamiento de los mismos.

Palabras clave: precursores sísmicos, quietud sísmica, señales ionosféricas, campo magnético, campo eléctrico.

Índice

1. Introducción	3
2. Justificación	5
3. Planteamiento del problema	7
4. Propuesta de solución	8
5. Objetivo general	10
5.1. Objetivos específicos	10
6. Marco teórico	11
6.1. Posibles precursores sísmicos	12
6.1.1. Patrones de quietud sísmica	12
6.1.2. Anomalías del campo eléctrico	12
6.1.3. Anomalías del campo magnético	12
6.1.4. Señales ionosféricas	12
6.2. Elementos clave para la predicción de sismos	13
7. Estado del Arte	15
7.1. TELESISMUX: Subsistema Telemático para una Estación Sísmica Remota .	15
7.2. Sistema IoT para la medición, registro y visualización web de señales electromagnéticas, geo-eléctricas y acústicas asociadas a precursores sísmicos	15
7.3. Sistema de monitoreo y registro de señales asociadas a precursores sísmicos en la costa mexicana del Pacífico	15
7.4. Anomalías en las señales electromagnéticas de baja frecuencia en la banda VLF	16
8. Escenario de pruebas	18
9. Cronograma	19
10. Glosario de términos	21

Índice de figuras

1.	Placas tectónicas	5
2.	Mapa de sismosidad anual 2022	6
3.	Propuesta de interacción de actores del sistema	8
4.	Cronograma de actividades	19

Índice de tablas

1.	Características principales de los proyectos relacionados y su contribución al trabajo actual	17
2.	Cronograma de actividades	20

1. Introducción

El cubo Rubik, creado en 1974 por el arquitecto húngaro Ernő Rubik como herramienta didáctica para mostrar transformaciones espaciales, se ha consolidado como uno de los rompecabezas más populares del mundo, con más de 350 millones de unidades hasta 2018[1]. Su impacto trascendió el entretenimiento, dando origen en los años 80 a competencias formales centradas en resolver el cubo en el menor tiempo posible. Esta disciplina, conocida como *speed-cubing*, ha evolucionado hacia niveles altamente competitivos y técnicos.

Dentro de esta comunidad, el método Fridich -también denominado CFOP por sus siglas en inglés: Cross, F2L, OLL y PLL- se ha convertido en el sistema de resolución más utilizado por los practicantes de alto nivel[2]. A diferencia del método básico para principiantes, CFOP requiere la memorización y ejecución precisa de más de 78 algoritmos. Particularmente, la etapa F2L (First Two Layers) representa el mayor desafío, ya que concentra aproximadamente el 52 % del tiempo de resolución total y genera la mayoría de las pausas que interrumpen la fluidez del solve[2].

Sin embargo, el proceso de aprendizaje de estos algoritmos es considerablemente ineficiente. Para practicar un caso específico, el usuario debe manipular el cubo de forma manual hasta reproducir la situación deseada, resolviéndolo o desarmándolo repetidamente. Esta limitación introduce una barrera mecánica que dificulta la práctica enfocada, ralentiza la memorización y puede llevar a la frustración del practicante.

Frente a este problema, la ingeniería mecatrónica ofrece una solución prometedora. Esta disciplina, entendida como la integración sinérgica de sistemas mecánicos, electrónicos, informáticos y de control, permite el diseño de sistemas inteligentes que interactúan con el entorno de forma precisa y programada[3]. Aplicada al contexto del *speed-cubing*, esta integración da lugar a un sistema robotizado capaz de automatizar la preparación de casos específicos del método Fridrich, eliminando la necesidad de intervención manual.

Si bien existen numerosos proyectos de robótica enfocados en resolver completamente el cubo Rubik -por ejemplo, sistemas que emplean visión artificial y brazos colaborativos para identificar y ejecutar soluciones completas en pocos segundos[4]-, la mayoría de estos desarrollos se centran en la resolución total del cubo y no están pensados como herramientas de entrenamiento. Su propósito final es resolver, no generar situaciones controladas para practicar partes específicas del proceso.

La literatura reporta numerosos robots cuyo objetivo principal es resolver completamente el cubo (p.ej., sistema UR3e + OpenCV que detecta el estado y ejecuta la solución con un manipulador colaborativo[4]). Sin embargo, dichos trabajitos no ofrecen funciones de entrenamiento controlador caso-por-caso; tras cada solución el cubo vuelve a estado resuelto, obligando al practicante a iniciar de cero. Esto evidencia un vacío que el presente proyecto aborda al enfocarse en la preparación selectiva de F2L, OLL y PLL.

Se propone un robot de sobremesa con actuadores en las seis caras del cubo, controlado desde una interfaz de escritorio. El usuario elige un caso (p.ej., OLL) y el sistema aplica el algoritmo inverso para dejar el cubo listo en manos de X s. Un botón Repetirregenera la

misma situación indefinidamente; un modo Random "genera casos aleatorios para evaluación. En versiones futuras se integrará vision artificial para verificar la ejecución y ofrecer feedback automático.

Este proyecto tiene el potencial de impactar positivamente en distintos sectores. En primer lugar, para los speed-cubers, el sistema representa una herramienta de gran valor, ya que permite reducir significativamente el tiempo invertido en la preparación de casos específicos del método Fridrich. Al automatizar este proceso, los usuarios pueden centrarse directamente en la memorización y ejecución del algoritmo, acelerando su curva de aprendizaje.

Por otro lado, el robot también tiene aplicaciones dentro del ámbito educativo, particularmente en instituciones enfocadas en áreas STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas). Al combinar mecánica, electrónica, control e interfaces digitales en un solo sistema funcional, el proyecto se convierte en un recurso tangible y atractivo para enseñar conceptos complejos de manera interactiva y práctica.

Además, desde el enfoque de la investigación, este tipo de plataforma ofrece una base interesante para estudiar temas como el aprendizaje motor, la repetición y memorización de patrones, así como para experimentar con diferentes estrategias de optimización en la resolución de algoritmos. Su estructura abierta permitiría a otros investigadores extender o adaptar el sistema a nuevas funciones.

A partir del análisis de antecedentes y la identificación de una necesidad no resuelta en el ámbito del aprendizaje avanzado del cubo Rubik, surge la motivación para desarrollar este proyecto. El hecho de que no existan actualmente sistemas que permitan generar, de forma controlada y repetitiva, casos específicos del método Fridrich, representa una oportunidad clara de innovación.

En este contexto, el objetivo general del proyecto es diseñar, construir y validar un sistema mecatrónico que automatice la generación de casos CFOP, facilitando así su práctica de manera eficiente. Para lograrlo, será necesario comprender a fondo la cinemática del cubo y traducirla en movimientos precisos ejecutados por un mecanismo robótico. A la par, se desarrollará una interfaz de usuario intuitiva que permita seleccionar casos, controlar el sistema y visualizar los algoritmos implicados. Finalmente, se evaluará la efectividad del robot mediante métricas como el tiempo requerido para generar cada caso, la precisión en los movimientos realizados y la repetibilidad del proceso, con el fin de validar su viabilidad como herramienta de entrenamiento.

2. Justificación

La República Mexicana se encuentra en una de las regiones sísmicas más activas del mundo, conocida como el Cinturón Circumpacífico [5]. Esta alta actividad sísmica se debe a la interacción de varias placas tectónicas, incluyendo Norteamérica, Cocos, Pacífico, Rivera y Caribe como se puede observar en la figura 1 [6], así como a fallas locales en varios estados. Los estados más afectados son Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Michoacán, Colima y Jalisco, debido a la interacción de las placas oceánicas de Cocos y Rivera con Norteamérica y el Caribe en la costa del Pacífico.



Figura 1: Placas tectónicas.

Aunque los epicentros se localizan en diversos puntos del Pacífico, la Ciudad de México, aunque no está en la costa, se ve afectada debido a su proximidad y a la naturaleza de su terreno. El estudio de la actividad sísmica en México comenzó a principios del siglo XX, y se inauguró la red sismológica mexicana en 1910. Actualmente, el Servicio Sismológico Nacional [7] opera una red de 35 estaciones sismológicas y reporta en promedio la ocurrencia de 4 sismos por día de magnitud $M > 3.0$. Además del SSN, existen otros grupos de investigación como el CICESE y la RESNOR que estudian la actividad sísmica en el Golfo de California y la falla de San Andrés, respectivamente. También hay instituciones educativas que realizan estudios de sismicidad regional y mantienen comunicación para compartir avances[5].

En el año 2022, la sismicidad en México continuó siendo una preocupación importante, ya que se registraron varios sismos de magnitud considerable [7] ver figura 2. Se puede observar que algunos de estos eventos sísmicos alcanzaron magnitudes superiores a 6.0, lo que demuestra la necesidad de contar con un sistema eficiente para monitorear y analizar la actividad sísmica

en la región. La distribución de estos eventos a lo largo del año también muestra que la actividad sísmica en México no se limita a un período específico, sino que se presenta a lo largo de todo el año, lo que refuerza la importancia de contar con un sistema de monitoreo y análisis en tiempo real.

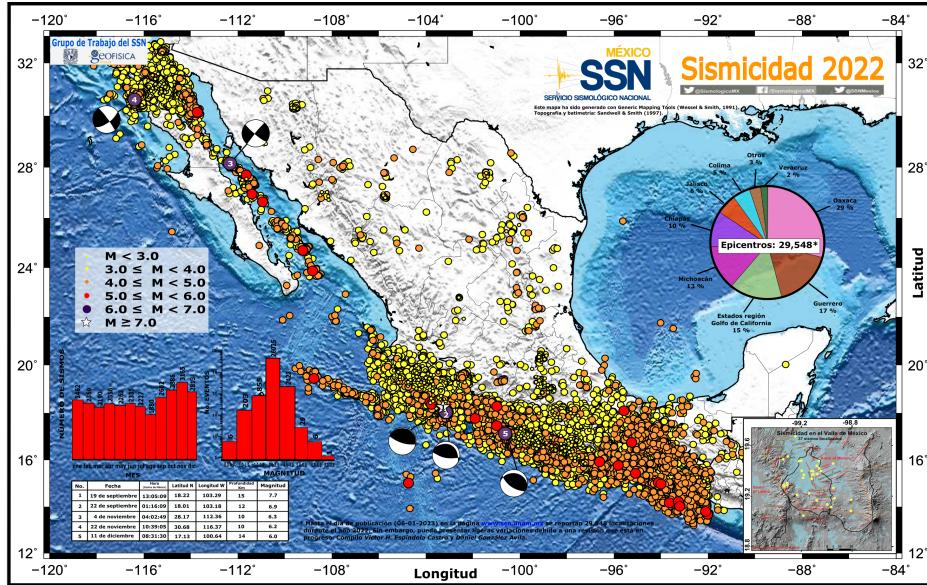


Figura 2: Mapa de sismos anuales 2022

Actualmente se tiene la necesidad de desarrollar un sistema unificado de recopilación y procesamiento de los datos asociados a posibles precursores sísmicos provenientes de diversas fuentes, como estaciones de monitoreo, catálogos sísmicos como el del servicio sismológico de México, etc. Aunado a la limitada disponibilidad de datos, los sistemas actuales no tratan ni analizan de manera sistemática los datos recolectados, lo que dificulta la comprensión de los precursores sísmicos y la toma de decisiones informadas para la reducción y gestión del riesgo de desastres.

Este proyecto busca abordar esta brecha mediante el análisis ya conocido de los posibles precursores sísmicos utilizando los datos disponibles [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14]. A través de este análisis, se pretende mejorar nuestra comprensión de los fenómenos que preceden a los sismos y establecer patrones de comportamiento relevantes de dichos precursores para evaluar la actividad sísmica en un período de tiempo específico[14]. Al fortalecer nuestra capacidad para analizar y monitorear estos precursores, el sistema propuesto contribuirá a respaldar la toma de decisiones informadas en la gestión del riesgo sísmico. Esto podría tener un impacto significativo en la prevención y mitigación de los efectos adversos de los sismos en la población y la infraestructura.

3. Planteamiento del problema

En el campo de la sismología y la gestión del riesgo sísmico, existe una brecha significativa en el manejo y análisis de los datos recopilados de los posibles precursores sísmicos de diversas fuentes. Los sistemas actuales no son adecuados para analizar eficientemente estas mediciones, lo que dificulta obtener información precisa sobre la ocurrencia de un sismo en un período de tiempo específico. Esta deficiencia incide en la comprensión de los procesos que desencadenan los sismos.

La pregunta de investigación que se propone abordar en este proyecto terminal es: *¿Cómo se puede construir un sistema eficaz, integral y de fácil acceso para el procesamiento, análisis y visualización de datos de posibles precursores sísmicos provenientes de diferentes fuentes, que a su vez potencie la comprensión de los procesos sísmicos?*

El proyecto que se presenta busca superar las limitaciones actuales en el manejo y análisis de datos de precursores sísmicos, desarrollando y aplicando un sistema unificado que pueda procesar eficientemente datos de diversas fuentes. Al centrarse en esta cuestión de investigación, el proyecto pretende contribuir a una mejor comprensión de los procesos que desencadenan los sismos, permitiendo en última instancia el desarrollo de estrategias de prevención y mitigación más sólidas.

Para lograr este objetivo, el proyecto implicará un enfoque sistemático y polifacético que incluye la identificación y selección de datos relevantes que estiman los posibles precursores sísmicos, el uso de algoritmos para el procesamiento y análisis de datos, la implementación de herramientas de graficación accesibles y fáciles de usar, y la evaluación de la eficacia del sistema en el análisis de los procesos sísmicos.

4. Propuesta de solución

Se propone el desarrollo de un sistema integrado, completo y fácil de usar que procese, analice y visualice de forma eficiente datos de diversas fuentes, centrándose en los patrones de quietud sísmica [7] [8] [15] [9], las anomalías del campo eléctrico [10] [11], las anomalías del campo magnético [12] [13] y las señales ionosféricas [16] como precursores específicos. Esta solución implicará varias etapas, incluyendo la recolección de datos muestreados y/o reportados, útiles para la implementación de algoritmos y así establecer patrones de comportamiento.

De acuerdo a lo ya mencionado anteriormente se propone:

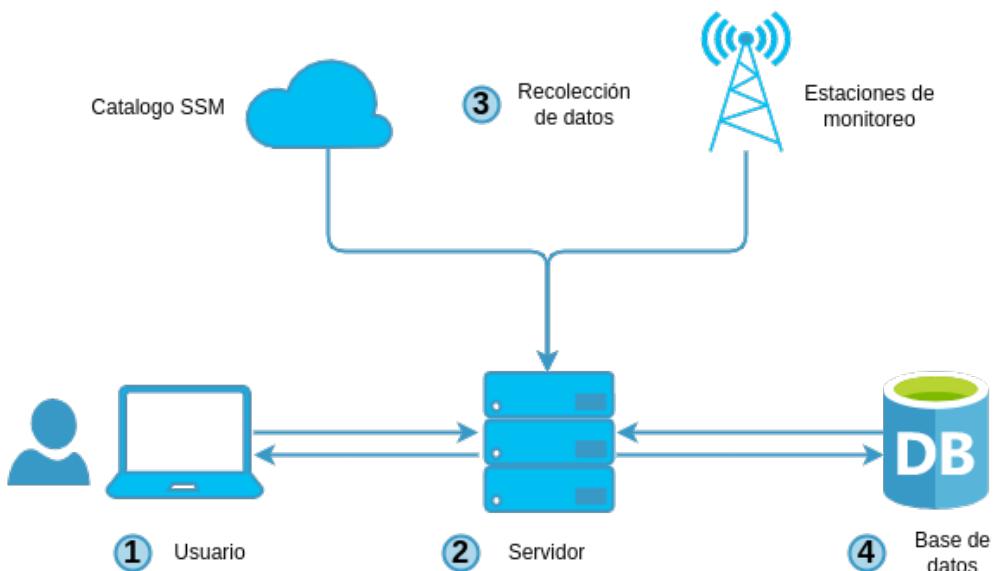


Figura 3: Propuesta de interacción de actores del sistema

■ Visualización de los datos:

Los datos procesados deben presentarse en un formato gráfico para facilitar su interpretación. La integración de todos los componentes, desde la adquisición de datos hasta la visualización en un sistema podría implicar la creación de una aplicación web, software de escritorio u otras interfaces de usuario para mostrar las visualizaciones y permitir a los usuarios interactuar con el sistema. Adicionalmente hay que identificar los requisitos de visualización lo cual implica determinar los tipos de visualización necesarios, como gráficos, tablas o mapas. Elegir una biblioteca o herramienta de visualización tales como Ploty, Dygraphs y bokeh para visualizaciones basadas en web.

■ Servidor:

Los datos recogidos se someterán a métodos y técnicas de caracterización para identificar patrones y correlaciones entre los distintos tipos de datos precursores. Los datos almacenados se procesarán y analizarán para extraer información significativa. Este proceso implicará el uso de métodos estadísticos avanzados de análisis de

patrones de sismicidad, análisis de correlaciones temporales y fractalidad de los datos muestreados para usar algoritmos de procesamiento conocidos de comportamiento que se centren en los precursores específicos mencionados anteriormente.

■ Recolección de datos:

Para obtener los catálogos del Servicio Sismológico Nacional (datos para quietud sísmica), se utilizarán técnicas de web scraping. Este proceso implica el uso de herramientas y técnicas de programación para extraer datos de manera automatizada desde una página web [7] o bien un servicio de almacenamiento en la nube (como Google Drive o Dropbox) para las estaciones de monitoreo. Los datos adquiridos se almacenarán en una base de datos como se muestra en el inciso 4 de la figura 3. Además, se pueden incluir datos complementarios, como el clima, la fase lunar y los macrosismos de otras partes del mundo para revisar la correlación con los ocurridos en México. Para identificar las tareas de procesamiento y análisis, es necesario determinar las tareas específicas necesarias, como la limpieza, el filtrado, la agregación y el análisis estadístico. Para esto, se pueden utilizar bibliotecas o marcos de trabajo como Pandas, NumPy o SciPy para el procesamiento de datos basado en Python. Por último, es necesario implementar el procesamiento y el análisis, lo que implica escribir código para realizar las tareas necesarias en los datos almacenados.

■ Almacenamiento de datos:

Una vez adquiridos los datos, hay que almacenarlos en una base de datos para su posterior procesamiento y análisis. Elegir una base de datos adecuada en función del formato de los datos y de los requisitos. Puede ser una base de datos relacional (por ejemplo, PostgreSQL, MySQL) o una base de datos NoSQL (por ejemplo, MongoDB, Cassandra) en función de la estructura de los datos y las necesidades de escalabilidad. Finalmente definir la estructura de las tablas o colecciones de la base de datos, especificando los campos y sus tipos de datos.

5. Objetivo general

Desarrollar un sistema unificado para la recolección, análisis y visualización de datos de múltiples fuentes relacionados con posibles precursores sísmicos, centrándose en patrones de quietud sísmica, anomalías del campo eléctrico, anomalías del campo magnético y señales ionosféricas, con el objetivo de mejorar la comprensión de ocurrencia de sismos en relación a sus posibles precursores.

5.1. Objetivos específicos

- Recolección de datos de eventos sísmicos, anomalías del campo eléctrico, anomalías del campo magnético, señales ionosféricas, y datos secundarios procedentes de diversas fuentes
- Procesamiento de datos recolectados aplicando algoritmos para el procesamiento y análisis de los datos de los posibles precursores sísmicos.
- Utilización de modelos matemáticos ya conocidos que incorporen los cálculos de posibles precursores sísmicos identificados para establecer patrones de comportamiento relevantes de dichos precursores.
- Creación de un sistema de visualización para mostrar los datos procesados de los posibles precursores sísmicos.

6. Marco teórico

Un sismo es un movimiento brusco de la corteza terrestre, provocado por la liberación de energía acumulada en forma de ondas sísmicas. Debido a la naturaleza no lineal y dinámica de los sismos, actualmente es imposible predecir con precisión dónde ocurrirán, cuál será su magnitud y el daño que podrían causar.

La República Mexicana se encuentra en una de las regiones sísmicas más activas del mundo, conocida como el Cinturón Circumpacífico. Esta alta actividad sísmica se debe a la interacción de varias placas tectónicas, incluyendo Norteamérica, Cocos, Pacífico, Rivera y Caribe, así como a fallas locales en varios estados. Los estados más afectados son Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Michoacán, Colima y Jalisco, debido a la interacción de las placas oceánicas de Cocos y Rivera con Norteamérica y el Caribe en la costa del Pacífico. Aunque los epicentros se localizan en diversos puntos del Pacífico, la Ciudad de México, aunque no está en la costa, se ve afectada debido a su proximidad y a la naturaleza de su terreno. El estudio de la actividad sísmica en México comenzó a principios del siglo XX, y se inauguró la red sismológica mexicana en 1910. Actualmente, el Servicio Sismológico Nacional [7] opera una red de 35 estaciones sismológicas y reporta en promedio la ocurrencia de 4 sismos por día de magnitud $M > 3.0$. Además del SSN, existen otros grupos de investigación como el CICESE y la RESNOR que estudian la actividad sísmica en el Golfo de California y la falla de San Andrés, respectivamente. También hay instituciones educativas que realizan estudios de sismicidad regional y mantienen comunicación para compartir avances.

En las últimas décadas se han realizado numerosos estudios para identificar posibles precursores de sismos, que son fenómenos observables que preceden a los fenómenos sísmicos. Estos precursores abarcan los patrones de quietud sísmica [7], las anomalías en los campos eléctricos y magnéticos, las emisiones de gases/aerosoles, las señales ionosféricas, los cambios en el nivel de las aguas subterráneas, las variaciones de temperatura de la superficie, las deformaciones de la superficie, el comportamiento de los animales, las señales térmicas infrarrojas, las ondas gravitacionales atmosféricas y los relámpagos.

La investigación sistemática de los precursores de sismos comenzó en Japón en la década de 1960 y desde entonces se ha ampliado mediante colaboraciones internacionales identificando anomalías en la medición de diversas señales previas a la manifestación de un sismo de gran magnitud ($Ms \geq 6$) como Schall 1988, Varotsos 1993, McGuire 1994, Kagan 2008. A pesar de estas observaciones, la predicción sísmica sigue siendo un desafío futuro. Aunque todavía no se ha logrado un éxito concreto, el estudio de fenómenos potencialmente asociados a la ocurrencia de movimientos telúricos ha avanzado de manera progresiva, desarrollando y expandiendo nuevas redes de monitoreo en diversas áreas con alta actividad sísmica alrededor del mundo [14].

6.1. Posibles precursores sísmicos

6.1.1. Patrones de quietud sísmica

La quietud sísmica es un fenómeno caracterizado por una notable reducción de la actividad sísmica en una región concreta, que según algunos expertos podría servir de precursor de un gran ($M_s \geq 6$) sismo. El concepto subyacente es que una disminución de los eventos sísmicos menores puede preceder un sismo de gran magnitud ($M_s \geq 6$), ya que la tensión se acumula a lo largo de las fallas antes de desencadenarse finalmente en un evento sísmico significativo [6] [8] [15] [9].

6.1.2. Anomalías del campo eléctrico

Las anomalías del campo eléctrico se refieren a variaciones o perturbaciones inusuales en el campo eléctrico de la Tierra, que han sido observadas antes de algunos sismos. Algunos investigadores sugieren que estas anomalías podrían deberse a cambios inducidos por tensiones en la corteza terrestre, que provocan la generación de cargas eléctricas y alteraciones en el campo eléctrico terrestre [10] [11] se han estudiado en zonas como Grecia y Japón.

6.1.3. Anomalías del campo magnético

Las anomalías del campo magnético se refieren a cambios o variaciones inesperados en el campo magnético de la Tierra que se han observado en asociación con algunos sismos. Estas anomalías podrían estar relacionadas con cambios inducidos por tensiones en la corteza terrestre, que pueden alterar las propiedades magnéticas de las rocas y producir cambios en el campo magnético [12] [13].

6.1.4. Señales ionosféricas

La ionosfera es una región débilmente ionizada de la atmósfera terrestre, situada por encima de los 70-80 km de altitud donde los electrones libres y los iones forman un plasma. La ionización se produce principalmente por la radiación solar en el rango de los rayos X y el ultravioleta extremo. La densidad de electrones a distintas altitudes permite diferenciar cuatro regiones dentro de la ionosfera, cada una de las cuales posee densidades, alturas y frecuencias máximas de plasma distintas. Debido a su naturaleza no homogénea, la ionosfera puede ejercer efectos variables sobre las ondas electromagnéticas que viajan en su interior, lo que puede influir en la detección de anomalías asociadas a los sismos [16].

La ionosfera terrestre contiene una elevada concentración de iones y electrones libres que pueden interactuar con las ondas electromagnéticas. Algunos estudios han informado de cambios o perturbaciones inusuales en la ionosfera que preceden a ciertos sismos, como

fluctuaciones en el contenido total de electrones (TEC) o alteraciones en la propagación de las ondas de radio.

El acoplamiento litosfera-atmósfera-ionosfera describe la conexión física entre los fenómenos observados en la ionosfera y los seísmos que parecen desencadenarlos. Existen numerosas teorías en función del tipo de fenómeno considerado, pero la teoría más completa ha sido elaborada por Pulinets y Ouzounov. Las anomalías de conductividad creadas en la superficie terrestre se transfieren a la ionosfera a través del Circuito Eléctrico Global, un sistema cuasi estacionario de corrientes eléctricas entre la superficie y la ionosfera. La primera observación del impacto de un sismo en la ionosfera se produjo en 1964. Al principio, los investigadores se centraron en las anomalías observadas en los parámetros de las distintas capas, detectadas por ionosondas y radares, o *in situ* por satélites.

6.2. Elementos clave para la predicción de sismos

Allen propuso seis elementos clave que deben tenerse en cuenta en la predicción de sismos. [14] Estos elementos son

- Ventana temporal

La ventana temporal se refiere al periodo de tiempo dentro del cual se espera que se produzca un sismo. La estimación precisa de la ventana temporal es esencial para una preparación y respuesta eficaces ante las catástrofes.

- Ventana espacial

La ventana espacial indica la ubicación geográfica en la que se prevé que se produzca un sismo. La determinación precisa de la ventana espacial es crucial para orientar los esfuerzos de mitigación y respuesta.

- Ventana de magnitud

La ventana de magnitud representa la intensidad prevista del sismo. La estimación precisa de la ventana de magnitud es importante para comprender el impacto potencial y planificar las contramedidas adecuadas.

- Grado de confianza

El grado de confianza se refiere a la certeza con la que se realiza la predicción. Las predicciones de alto grado de confianza pueden ayudar a los responsables de la toma de decisiones a adoptar las medidas preventivas adecuadas y a asignar los recursos de forma eficaz.

- Sismos imprevisibles como sucesos aleatorios

La posibilidad de que se produzcan seísmos imprevisibles como sucesos aleatorios debe tenerse en cuenta a la hora de hacer predicciones, ya que puede afectar significativamente a la fiabilidad global de la previsión.

- Documentación accesible y comprensible

Una documentación fácilmente accesible y comprensible es fundamental para garantizar

la eficacia de las evaluaciones futuras y facilitar la toma de decisiones con conocimiento de causa.

La incorporación de estos elementos clave a la investigación sobre el análisis de sismos es esencial para garantizar que la información proporcionada sea precisa, fiable y útil para adoptar las medidas preventivas adecuadas.

7. Estado del Arte

En los últimos años, se han llevado a cabo varios proyectos e investigaciones para desarrollar sistemas que puedan detectar, medir y analizar precursores sísmicos, en esta sección, se presentan trabajos relacionados con el prototipo mencionado anteriormente, ya sea por el tema o por las tecnologías seleccionadas e implementadas en cada uno de ellos. Se elabora una tabla que incluye los aspectos relevantes que permiten respaldar la solución propuesta, seguida de una explicación y, finalmente, se muestran los proyectos relacionados que están actualmente en desarrollo. Algunos de los trabajos destacados en el campo incluyen:

7.1. TELESMUX: Subsistema Telemático para una Estación Sísmica Remota

Este proyecto terminal presenta la investigación, diseño, desarrollo e implementación de un sistema telemático capaz de capturar, almacenar y transmitir información relativa a variables sísmicas medidas en una estación electrosísmica. El sistema integra un enlace de comunicación punto a punto entre un nodo en la estación sísmica y otro en el Laboratorio de Sistemas Complejos (UPIITA-IPN). También incluye un software de control y monitorización de los sistemas presentes en la estación sísmica y una aplicación web de acceso remoto. Este trabajo aborda los retos a los que se enfrentan los equipos de investigación en la recolección y transmisión de datos sísmicos para su posterior análisis. [17]

7.2. Sistema IoT para la medición, registro y visualización web de señales electromagnéticas, geo-eléctricas y acústicas asociadas a precursores sísmicos

Este proyecto propone el desarrollo de un sistema basado en IoT que pueda medir, registrar, almacenar y mostrar gráficos de señales electromagnéticas, geo-eléctricas y acústicas asociadas a precursores sísmicos. Los sensores y electrodos se colocan en regiones de alta actividad sísmica, y se implementa una interfaz web con servicios de almacenamiento en la nube. El sistema emplea el método VAN para medir señales electrosísmicas en la banda ULF del espectro electromagnético, diseña un sistema de inducción electromagnética para la banda VLF y registra señales acústicas terrestres. [18]

7.3. Sistema de monitoreo y registro de señales asociadas a precursores sísmicos en la costa mexicana del Pacífico

Un sistema que monitorea y registra diferentes señales relacionadas con precursores sísmicos, incluyendo señales geoeléctricas, electromagnéticas y variables ambientales como la humedad relativa y la conductividad eléctrica del suelo. [19]

7.4. Anomalías en las señales electromagnéticas de baja frecuencia en la banda VLF

Un estudio que examina las anomalías en las señales electromagnéticas de baja frecuencia en la banda VLF y su relación con los sismos de gran magnitud, así como el diseño de un sistema para monitorear y registrar señales de la banda VLF y las señales geomagnéticas terrestres. [20]

7.4 Anomalías en las señales electromagnéticas de baja frecuencia ~~ESTADÍSTICA~~~~DELARTE~~

Proyecto	Características principales	Contribución al trabajo actual
TELESISMUX	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sistema telemático para estaciones sísmicas remotas ■ Captura, almacena y transmite información relacionada con variables sísmicas 	Base para el desarrollo del sistema de adquisición y transmisión de datos
Sistema IoT para la medición, registro y visualización web de señales electromagnéticas, geoléctricas y acústicas asociadas a precursores sísmicos	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sistema IoT integral ■ Medición, registro y visualización de señales electromagnéticas, geoléctricas y acústicas ■ Sensores y electrodos en regiones de alta actividad sísmica 	Registro y visualización de precursores sísmicos
Sistema de monitoreo y registro de señales asociadas a precursores sísmicos en la costa mexicana del Pacífico	<ul style="list-style-type: none"> ■ Monitoreo y registro de señales geoléctricas, electromagnéticas y variables ambientales ■ Análisis de la relación entre estas señales y eventos sísmicos 	Incorporación de análisis de variables ambientales en el estudio de precursores sísmicos
Anomalías en las señales electromagnéticas de baja frecuencia en la banda VLF	<ul style="list-style-type: none"> ■ Estudio de anomalías en señales electromagnéticas de baja frecuencia en la banda VLF ■ Diseño de sistemas para monitorear y registrar señales de la banda VLF y señales geomagnéticas terrestres ■ Análisis estadístico y de correlaciones temporales de las series de tiempo obtenidas 	Base para el análisis de señales electromagnéticas y su relación con eventos sísmicos

Tabla 1: Características principales de los proyectos relacionados y su contribución al trabajo actual

8. Escenario de pruebas

El escenario de pruebas se llevará a cabo con datos registrados o medidos en diferentes épocas en las que las estaciones de monitoreo han estado en funcionamiento. Los pasos a seguir son los siguientes:

Autenticación de usuario: El usuario inicia sesión y accede al panel de control del sistema.

Elección de precursor a analizar: Se selecciona el posible precursor sísmico como anomalías del campo eléctrico, magnético y señales ionosféricas de los datos que ya se cuenta.

Selección de región/fecha: El usuario elige una región de interés en un mapa interactivo (reservado a ubicaciones con datos de estaciones de monitoreo) así como la fecha mediante un menú desplegable de ventanas de tiempo válidas.

Análisis y estimación: El sistema ejecuta las rutinas que cada precursor requiere para realizar sus estimaciones.

Visualización de resultados: El sistema muestra gráficos, tablas y mapas para que los investigadores realicen las interpretaciones correspondientes.

Exportación de resultados: El usuario exporta los resultados en formatos PDF, CSV o imágenes según corresponda.

Cierre de sesión: El usuario cierra sesión tras revisar los resultados.

Este escenario de prueba evalúa la funcionalidad, usabilidad, precisión y efectividad del sistema de análisis de precursores sísmicos y estimación de probabilidad de ocurrencia de sismo

9. Cronograma

Para el proyecto, se ha establecido un cronograma de actividades que será llevado a cabo por un solo estudiante. Es importante destacar que todas las actividades mencionadas se llevarán a cabo en el orden en que se presentan en el cronograma y se ajustarán según el tiempo disponible y la complejidad de cada tarea.

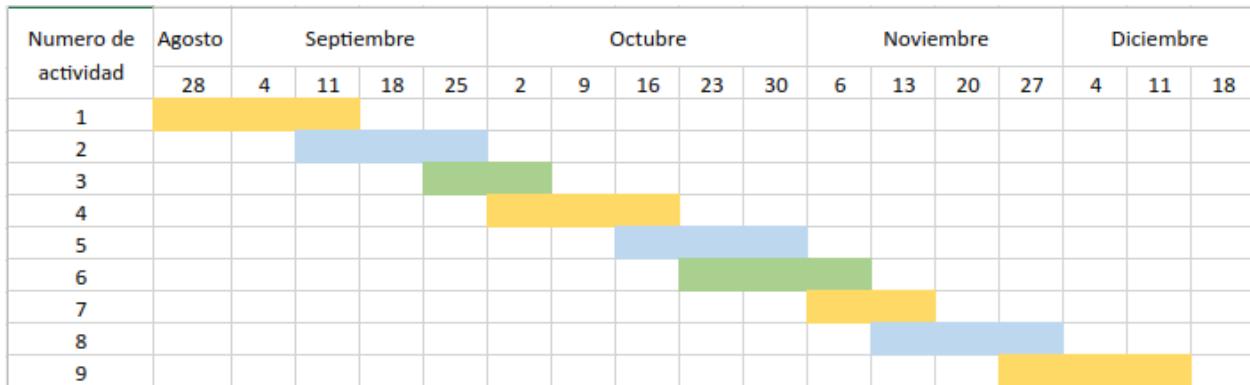


Figura 4: Cronograma de actividades

No actividad	Nombre de tarea	Objetivo	Resultados esperados
1	Análisis y requerimientos del sistema	Determinar y explicar los procesos que se llevarán a cabo dentro del sistema y el comportamiento de los actores. Enumerar los requisitos que debe cumplir el sistema para un buen funcionamiento.	Diagramados que describan los procesos del sistema y el comportamiento de los actores (Casos de uso, secuencia, entre otros), ocupando diagramado UML. Listado con los elementos que requiere el sistema, así como los aspectos que debe cumplir.
2	Recopilación de datos de precursores sísmicos	Recopilar información relevante	Obtener datos para seleccionar base de datos
3	Diseño del esquema de base de datos	Diseñar una estructura adecuada para almacenar los datos recopilados	Esquema de base de datos diseñado y tablas o colecciones creadas
4	Selección de servidor	Análisis y elección de servidor, contratación de un servicio en la nube o montar un servidor local	Tener un sistema de servidor adecuado y eficiente que satisfaga las necesidades
5	Aplicación de métodos estadísticos avanzados	Analizar patrones de sismicidad y correlaciones temporales	Resultados del análisis estadístico de los datos
6	Análisis de precursores sísmicos específicos	Utilizar modelos matemáticos y algoritmos para analizar precursores sísmicos	Resultados del análisis de precursores sísmicos
7	Identificación de requisitos de visualización	Determinar qué tipos de gráficos, tablas o mapas son necesarios	Requisitos de visualización identificados
8	Elección de biblioteca o herramienta de visualización	Seleccionar una herramienta para crear visualizaciones basadas en web	Herramienta de visualización seleccionada
9	Integración del sistema	Unir todos los componentes en un sistema unificado	Sistema integrado y funcional

Tabla 2: Cronograma de actividades

10. Glosario de términos

- Acoplamiento litosfera-atmósfera-ionosfera: Describe la conexión física entre los fenómenos observados en la ionosfera y los sismos que parecen desencadenarlos.
- Anomalías del campo eléctrico: Cambios inusuales en el campo eléctrico terrestre que podrían estar relacionados con la actividad sísmica.
- Anomalías del campo magnético: Cambios inusuales en el campo magnético terrestre que podrían estar relacionados con la actividad sísmica.
- Cinturón Circumpacífico: También conocido como el 'Cinturón de Fuego del Pacífico', es el área geográficamente más activa del mundo en términos de sismicidad y actividad volcánica.
- Contenido Total de Electrones (TEC): Medida de la cantidad total de electrones libres en la atmósfera terrestre entre dos puntos, a menudo usada en estudios de anomalías ionosféricas.
- Epicentro: Punto en la superficie de la Tierra directamente por encima del epicentro o foco de un sismo.
- Grado de Confianza: Medida de la certeza con la que se realiza una predicción sísmica.
- Placas tectónicas: Grandes placas de roca sólida que componen la superficie de la Tierra, cuyos movimientos y interacciones pueden causar sismos.
- Precursor sísmico: Fenómeno observable que ocurre antes de un sismo y que podría indicar su inminencia.
- Señales ionosféricas: Variaciones en las propiedades de la ionosfera, como la densidad de electrones, que podrían estar relacionadas con la actividad sísmica.
- Servicio Sismológico Nacional (SSN): Organización encargada de registrar, analizar y reportar la actividad sísmica en México.
- Ventana Espacial: Ubicación geográfica en la que se prevé que se produzca un sismo en un modelo de predicción.
- Ventana de Magnitud: Rango de magnitudes dentro del cual se espera que caiga la magnitud de un sismo en un modelo de predicción.
- Ventana Temporal: Período de tiempo dentro del cual se espera que se produzca un sismo en un modelo de predicción.
- Web scraping: Técnicas y herramientas de programación utilizadas para extraer datos de manera automatizada desde páginas web.

Referencias

- [1] H. Reese. «A Brief History of the Rubik's Cube.» Smithsonian Magazine, 25-Sep-2020. (2020), dirección: <https://www.smithsonianmag.com/innovation/brief-history-rubiks-cube-180975875/>.
- [2] K. Boyce y C. Storm, «Rubik's Cube: What separates the fastest solvers from the rest?» *Journal of Emerging Investigators*, vol. 5, págs. 3-4, 2022, Análisis de pausas y tiempos por etapa.
- [3] D. Perdomo, «La mecatrónica en la ingeniería contemporánea,» *Ingeniería Mecánica*, vol. 1, págs. 7-9, 2003.
- [4] A. G. Aliaga, «Diseño y desarrollo de un sistema robotizado capaz de resolver un cubo de Rubik mediante un robot colaborativo y visión artificial,» Trabajo Final de Grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Universitat Politècnica de València (ETSID-UPV), 2023.
- [5] Servicio Geológico Mexicano, *Sismología de México*, Recuperado de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>, 2023.
- [6] Servicio Geológico Mexicano, *Causas, Características e Impactos de los Riesgos Geológicos*, Accedido el 24 de abril de 2023, s.f. dirección: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Causas-caracteristicas-e-impactos.html>.
- [7] Servicio Sismológico Nacional (SSN), *Sismos fuertes*, <http://www2.ssn.unam.mx:8080/sismos-fuertes/>, Universidad Nacional Autónoma de México, s.f. (visitado 21-04-2023).
- [8] K. C. McNally, «Seismic gaps in space and time,» *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 11, n.º 1, págs. 359-369, 1983.
- [9] C. Scholz, «Whatever happened to earthquake prediction?» *Geotimes*, vol. 42, n.º 3, págs. 16-19, 1997.
- [10] P. Varotsos y K. Alexopoulos, «Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I,» *Tectonophysics*, vol. 110, n.º 1-2, págs. 73-98, 1984.
- [11] E. Yépez, F. Angulo-Brown, J. Peralta, C. Pavia y G. González-Santos, «Electric field patterns as seismic precursors,» *Geophysical research letters*, vol. 22, n.º 22, págs. 3087-3090, 1995.
- [12] M. Hayakawa, T. Ito y N. Smirnova, «Fractal analysis of ULF geomagnetic data associated with the Guam earthquake on August 8, 1993,» *Geophysical Research Letters*, vol. 26, n.º 18, págs. 2797-2800, 1999.
- [13] M. Hayakawa, K. Hattori y K. Ohta, «Monitoring of ULF (ultra-low-frequency) geomagnetic variations associated with earthquakes,» *Sensors*, vol. 7, n.º 7, págs. 1108-1122, 2007.

- [14] A. Bhardwaj, L. Sam y F. J. Martin-Torres, «The challenges and possibilities of earthquake predictions using non-seismic precursors,» *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 230, págs. 367-380, 2021. DOI: [10.1140/epjst/e2020-000257-3](https://doi.org/10.1140/epjst/e2020-000257-3).
- [15] M. Wyss, «Cannot earthquakes be predicted?» *Science*, vol. 278, n.º 5337, págs. 487-490, 1997.
- [16] K. Eftaxias, P. Kapiris, J. Polygiannakis et al., «Experience of short term earthquake precursors with VLF–VHF electromagnetic emissions,» *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 3, n.º 3/4, págs. 217-228, 2003.
- [17] J. D. Valencia Pesqueira, *TELESISMUX: Subsistema telemático para una estación sísmica remota*, Trabajo Terminal, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional, 2012.
- [18] I. Pérez Sánchez, *Sistema IoT para la medición, registro y despliegue web de señales electromagnéticas, geo-eléctricas y acústicas asociadas a precursores sísmicos*, Proyecto Terminal 2, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Para obtener el título de Ingeniero en Telemática, 2022.
- [19] B. Guerrero Olvera y J. F. Reséndiz Facio, *Sistema de monitoreo y registro de señales asociadas a precursores sísmicos en la costa mexicana del Pacífico*, Trabajo Terminal II, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional, 2019.
- [20] G. A. De León Ramírez y J. H. Domínguez Delgadillo, *Sistema para el monitoreo y registro de señales electromagnéticas asociadas a precursores sísmicos*, Trabajo Terminal II, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional, 2020.