

# Instituto Politécnico Nacional

Unidad Profesional Interdisciplinaria en  
Ingeniería y Tecnologías Avanzadas

## **"Sistema unificado para recolectar, analizar y graficar datos de múltiples fuentes relacionados con posibles precursores sísmicos"**

*Alumna:*

**González Yescas Mariel**

*Asesores:*

Nombre:	Dr. Israel Reyes Ramírez
Procedencia:	UPIITA – IPN
Nombre:	Dra. Irene Lopez Rodriguez
Procedencia:	Externa
Nombre:	Dr. Carlos Carrizales Velazquez
Procedencia:	Externo

**Junio, 2023**

### **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

## Índice de figuras

## Índice de tablas

## 1. Introducción

La República Mexicana se encuentra ubicada en una de las regiones sísmicamente más activas del mundo, conocida como el Cinturón Circumpacífico. Esta región concentra la mayor actividad sísmica del planeta, lo que convierte a México en un país propenso a los sismos. La interacción de varias placas tectónicas, como Norteamérica, Cocos, Pacífico, Rivera y Caribe, es la principal causa de la alta sismicidad en el país. Los estados más afectados por esta actividad 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 **SGM2023**.

Aunque la Ciudad de México no se encuentra en la costa, su cercanía a las zonas sísmicas la expone a los efectos sísmicos. Además, la naturaleza de su terreno, que alguna vez fue un lago, contribuye a la preocupación por la vulnerabilidad sísmica de la ciudad. A lo largo de los años, se ha observado y registrado la actividad sísmica en México, con el Servicio Sismológico Nacional encargado de recopilar y analizar estos datos. Existen también otros grupos de investigación y redes que trabajan en el estudio de la sismicidad en diferentes partes del país.

En la actualidad, el riesgo sísmico se ha convertido en una preocupación cada vez mayor en todo el mundo, especialmente en áreas propensas a los sismos como México. La prevención y mitigación de los efectos devastadores de los sismos en la población y la infraestructura son fundamentales para la gestión del riesgo de desastres. Sin embargo, la comprensión de los precursores sísmicos y la toma de decisiones informadas en la gestión del riesgo sísmico se ven obstaculizadas por la limitada disponibilidad de datos y la falta de un enfoque sistemático para su análisis.

Este documento presenta un proyecto que tiene como objetivo abordar esta brecha. Se propone el desarrollo de un "Sistema unificado para recolectar, analizar y graficar datos de múltiples fuentes relacionados con posibles precursores sísmicos". Este sistema integrado y accesible permitirá procesar, analizar y visualizar datos de posibles precursores sísmicos provenientes de diversas fuentes, como patrones de quietud sísmica, anomalías del campo eléctrico, anomalías del campo magnético y señales ionosféricas. Para mejorar la comprensión de la ocurrencia de sismos en relación con los precursores antes mencionados.

En las siguientes secciones, se profundizará en la justificación del proyecto, el planteamiento del problema, la propuesta de solución y los objetivos generales y específicos. Además, se describirán las etapas del proyecto, que incluirán la recolección, el almacenamiento, el procesamiento y análisis de datos, y la visualización de la información obtenida. Se espera que esta propuesta contribuya a una mejor comprensión de los procesos que desencadenan los sismos, lo cual permitirá proporcionar información para el desarrollo de estrategias de prevención y mitigación más sólidas y eficaces en México.

## 2. Justificación

La República Mexicana se encuentra en una de las regiones sísmicas más activas del mundo, conocida como el Cinturón Circumpacífico **SGM2023**. 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 ?? **SGM**, 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 **SSN** 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 **SGM2023**.

En el año 2022, la sismicidad en México continuó siendo una preocupación importante, ya que se registraron varios sismos de magnitud considerable **SSN** ver figura ???. 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.

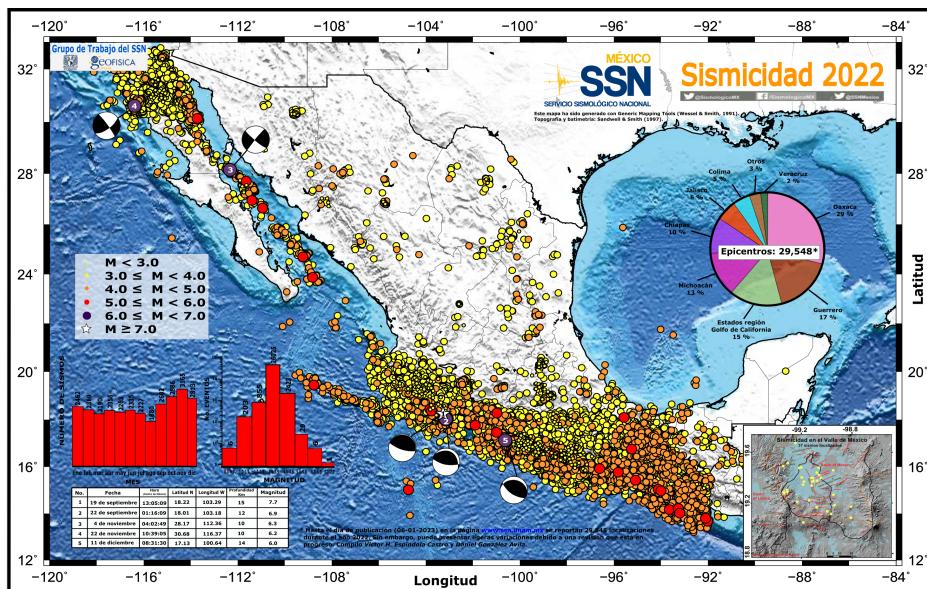


Figura 2: Mapa de sismos anuales 2022

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 **mcnally1983seismic scholz1997whatever varotsos1984physical yepez1995electric hayakawa1999**. 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 **Bhardwaj2021**. 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 **SSN mcnally1983seismic wyss1997cannot scholz1997whatever**, las anomalías del campo eléctrico **varotsos1984physical yepez1995electric**, las anomalías del campo magnético **hayakawa1999fractal hayakawa2007monitoring** y las señales ionosféricas **eftaxias2003experience** como precursores específicos. Esta solución implicará varias etapas, incluyendo la recolección de datos muestrados y/o reportados, útiles para la implementación de algoritmos y así establecer patrones de comportamiento.

De acuerdo a lo ya mencionado anteriormente se propone:

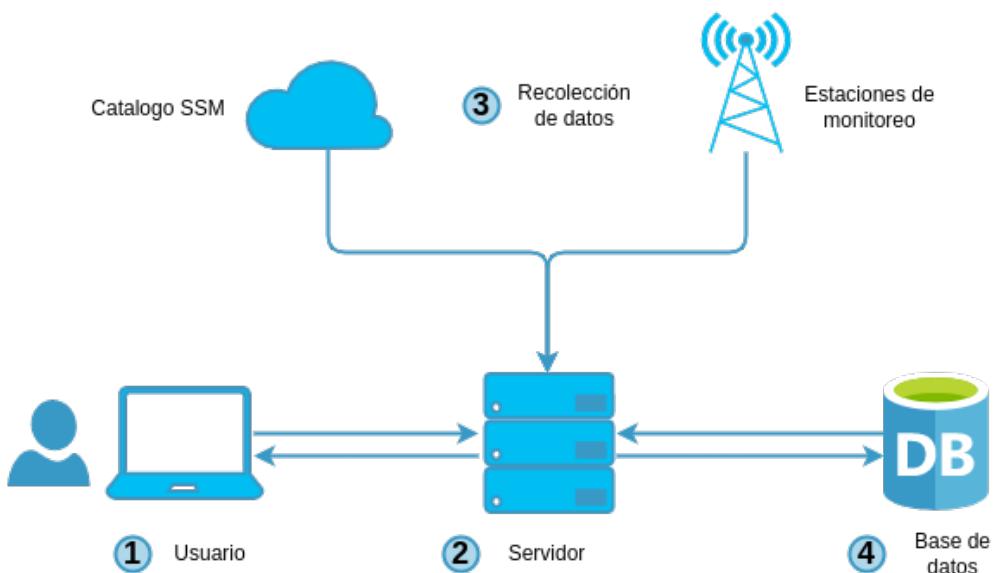


Figura 3: Propuesta de interacción de actores del sistema

### ■ 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 **SSN** 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 ???. 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 **SSN** 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 **SSN**, 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 **Bhardwaj2021**.

## 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 **SGM mcnally1983seismic wyss1997cannot scholz1997whatever**.

### 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 **varotsos1984physical yepez1995electric** 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 **hayakawa1999fractal hayakawa2007monitoring**.

### 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 **eftaxias2003experience**.

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. **Bhardwaj2021** 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. **Valencia2012**

### 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. **PerezS2022**

### 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. **Guerrero2019**

#### 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. **DeLeon2020**

Proyecto	Características principales	Contribución al trabajo actual
TELESISMUX	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Sistema telemático para estaciones sísmicas remotas</li> <li>■ Captura, almacena y transmite información relacionada con variables sísmicas</li> </ul>	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"> <li>■ Sistema IoT integral</li> <li>■ Medición, registro y visualización de señales electromagnéticas, geoléctricas y acústicas</li> <li>■ Sensores y electrodos en regiones de alta actividad sísmica</li> </ul>	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"> <li>■ Monitoreo y registro de señales geoléctricas, electromagnéticas y variables ambientales</li> <li>■ Análisis de la relación entre estas señales y eventos sísmicos</li> </ul>	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"> <li>■ Estudio de anomalías en señales electromagnéticas de baja frecuencia en la banda VLF</li> <li>■ Diseño de sistemas para monitorear y registrar señales de la banda VLF y señales geomagnéticas terrestres</li> <li>■ Análisis estadístico y de correlaciones temporales de las series de tiempo obtenidas</li> </ul>	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 locaciones con datos de estaciones de monitoreo) así como la fecha mediante o menu 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 segun 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.

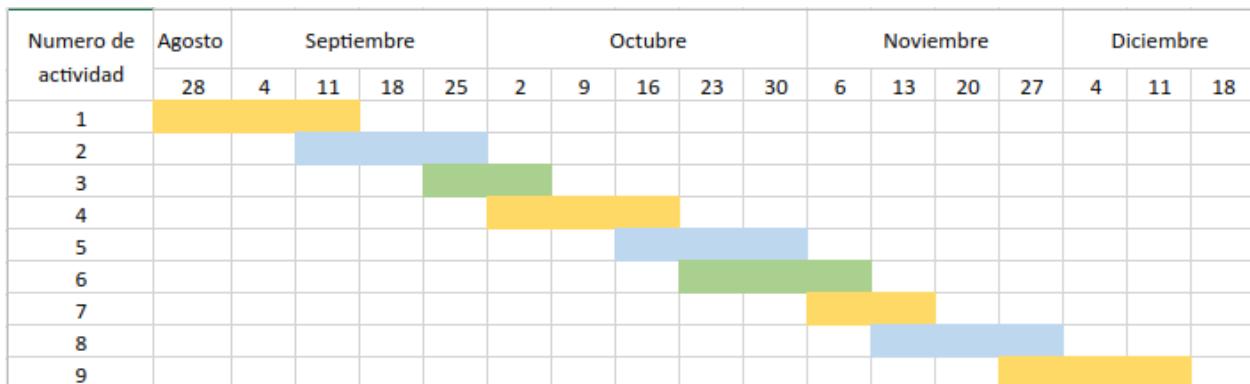


Figura 4: Cronograma de actividades

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 terremoto.
- 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 terremotos.
- Precursor sísmico: Fenómeno observable que ocurre antes de un terremoto 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.