

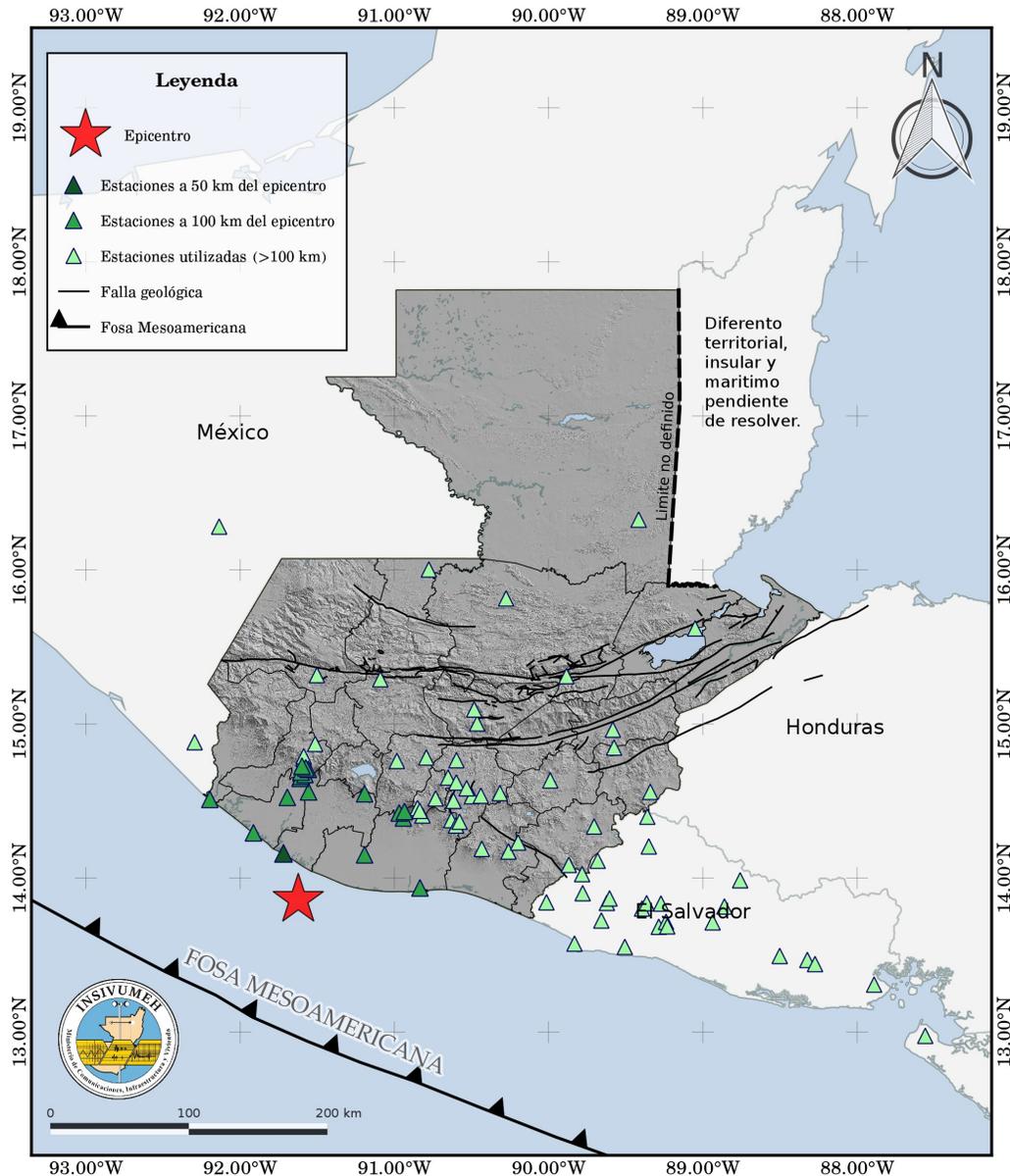


REPORTE TÉCNICO

Publicado: 10 de Febrero

Año 2025

ANÁLISIS DEL EVENTO SÍSMICO DEL 05 DE FEBRERO DEL AÑO 2025



Descripción: Estaciones sísmicas utilizadas para la caracterización, localización y análisis del evento sísmico del 05 de febrero con ID único ES-25-36-0101.

INS-DG-SS-RT-2025-01



Ministerio de
Comunicaciones,
Infraestructura y
Vivienda

Departamento de Geofísica
Sección de Sismología

Instituto Nacional de
Sismología, Vulcanología,
Meteorología e Hidrología

INSTITUTO NACIONAL DE SISMOLOGIA, VULCANOLOGIA, METEOROLOGIA E HIDROLOGIA -INSIVUMEH-

DIRECTOR GENERAL:
Ing. Edwin Aroldo Rojas Domingo

SUBDIRECTOR GENERAL:
Ing. Mario René Mejía Clara

DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN Y SERVICIOS GEOFÍSICOS

JEFE DE DEPARTAMENTO:
Lic. Robin Onelio Yani Quiyuch

SECCIÓN DE SISMOLOGÍA

COORDINADOR DE SECCIÓN:
Ing. Diego Andrés Castro Rojas

TÉCNICOS EN SISMOLOGÍA:
Tec. Luis Alberto Arriola
Tec. Dulce Pamela Calán Chon
Tec. Irene Almadaly Ligorria Sierra
Tec. Alejandra Dessiré Zapeta Hernández
Tec. Brando Leonel Coc Chen
Tec. Carlos Enrique Perez Tórtola
Tec. Héctor David Barral Padilla
Tec. Rony Rocael Cabnal
Tec. Luis Angel Teos Zuleta

INSTRUMENTACIÓN Y COMPUTACIÓN:

Ing. Oscar Anibal Chamalé Grijalva
Joshua David Paz Garcia
Williams Alexander Juarez Jimenez
Walter René Perez Morales

REDACCIÓN DEL REPORTE TÉCNICO:

Tec. Carlos Enrique Perez Tórtola
Tec. Brando Leonel Coc Chen
Tec. Dulce Pamela Calán Chon
Tec. Rony Rocael Cabnal
Tec. Luis Angel Teos Zuleta
Lic. Rodolfo Alvarado Sosa
Tec. Héctor David Barral Padilla

DISEÑO GRÁFICO:

Tec. Carlos Enrique Perez Tórtola

Índice

1. Introducción	2
2. Información General	2
3. Contexto Sismológico	5
3.1. Marco Geo-tectónico	5
3.2. Sismos históricos	6
4. Procesamiento sismológico	8
4.1. Red Sismológica Nacional -RSN-	8
4.2. Caracterización	9
4.3. Alerta Temprana y Seiscomp	9
4.3.1. Procesamiento de alerta temprana	9
4.3.2. Procesamiento en tiempo real	11
4.4. Localización manual	11
5. Análisis de Intensidades	12
5.1. Intensidades Instrumentales	12
5.2. Análisis de la intensidad sísmica (IMM) reportada por los usuarios de la alerta de terremotos	14
5.2.1. Mapas de intensidad sísmica registrada	15
5.3. Mapa de sacudidas	17
6. Fuente Sísmica	18
6.1. Análisis en el campo cercano: FMNEAR	18
6.2. Inversión de la Fase W	19
7. Conclusiones	21
8. Agradecimientos	22
9. Anexos	23

PAGINA INTENCIONALMENTE EN BLANCO

1. Introducción

En horas de la madrugada del día 5 de febrero del año 2025, la ocurrencia de un evento sísmico con epicentro en el Océano Pacífico, frente a las costas del departamento de Escuintla, alarmó fuertemente a la población guatemalteca. A pesar de presentar una magnitud moderada de 5.6, e intensidades sísmicas que no excedieron un valor de VI en la Escala de Mercalli Modificada, el sismo sirvió como un firme recordatorio del terremoto del año 1976, uno de los mayores desastres naturales en la historia de Guatemala y cuyo 49 aniversario había sido conmemorado el día anterior, así como de la amenaza sísmica a la cual el país se encuentra permanentemente expuesta.

Por medio de este reporte se presenta el desempeño de la herramienta de alertamiento ante terremotos, ofrecida a la población a través de la aplicación para teléfonos inteligentes “INSIVUMEH - Alerta de Terremotos”, tanto en relación a su capacidad de procesar la información del sismo en un tiempo adecuado, así como a la interacción que existió entre los usuarios y la aplicación. Así mismo, se muestran también los principales resultados y productos derivados del análisis y estudio del evento sísmico.

Dicho análisis fue realizado por el personal de la Sección de Sisimología del Departamento de Investigación y Servicios Geofísicos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología - INSIVUMEH, utilizando los registros de la Red Sismológica Nacional (RSN) y de estaciones sísmicas de instituciones colaboradoras, tanto nacionales como internacionales.

Este reporte está pensado para informar tanto al público general como a profesionales y expertos en el campo de la sismología, por lo que algunas de las técnicas sismológicas utilizadas en el análisis del evento sísmico son mencionadas, mas no se detallan a profundidad. Así mismo, se describen los resultados principales derivados del estudio de la actividad sísmica, así como la instrumentación y herramientas informáticas utilizadas en dicho análisis.

Hasta el momento, dicho evento sísmico ha generado también la ocurrencia de al menos 26 réplicas; sin embargo, debido a la prontitud con la cual se ha procedido a la elaboración y emisión de este reporte, no se descarta la ocurrencia de más réplicas en los días próximos, ni de eventos sísmicos que puedan presentar magnitudes mayores en el área cercana a la región epicentral del evento del día 5 de febrero.

2. Información General

El evento sísmico de magnitud M_w 5.6 ocurrió el día miércoles 05 de febrero de 2025 a las 01:01:20 (hora local) con identificador único ES-25-36-0101, con epicentro localizado frente a las costas del departamento de Escuintla, en océano Pacífico de Guatemala, asociado a la zona de subducción. Este sismo tuvo una profundidad de 44.6 km (ver Tabla 1), de acuerdo con los registros de la Red Sismológica Nacional (RSN) y las estaciones que comparten información con INSIVUMEH.

Cuadro 1: Resumen de la información hipocentral del evento sísmico.

Tiempo de origen	Mw	Lat.	Lon.	Prof.
2025/02/05 01:01:20 (local)	5.6	13.952	-91.573	44.6 km

Después del evento sísmico principal, se han registrado 26 réplicas. En la Tabla 2 se presenta un listado de estas réplicas hasta el día 7 de febrero a las 00:00:00 (hora local). Este listado es únicamente informativo, más no concluyente y se mantendrá el monitoreo permanente de la actividad sísmica en esta área. Adicional se presenta el desarrollo de la actividad en un gráfico de magnitud de los eventos sísmicos respecto al tiempo (ML vs t), el cual muestra su evolución en el tiempo (ver Figura 1).

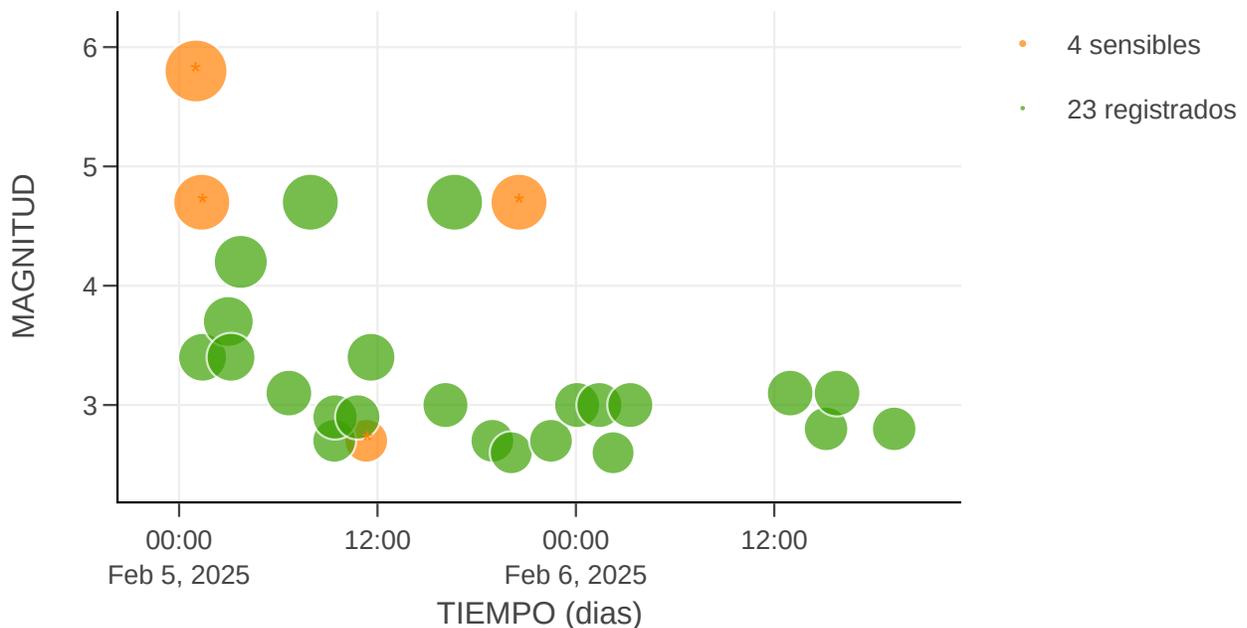


Figura 1: Evolución temporal de los sismos enlistados en Tabla 2, donde los eventos sensibles y registrados se presentan con colores naranja y verde, respectivamente.

Cuadro 2: Resumen de la información de réplicas, tiempo de origen (hora local), latitud, longitud, profundidad, magnitud local. De color naranja se presentan los eventos que se han reportado sensibles por la población. La columna “Aviso App” indica si el evento fue notificado a través de la aplicación.

No.	Fecha y Hora	Lat (°)	Lon (°)	Prof. (km)	ML	ID*	Aviso App
1	2025-02-05 01:22:11	13.890	-91.599	40.0	4.7	ES-25-36-0122	Sí
2	2025-02-05 01:25:11	13.750	-91.680	41.0	3.4	ES-25-36-0125	No
3	2025-02-05 02:58:25	13.774	-91.713	42.6	3.7	ES-25-36-0258	No
4	2025-02-05 03:08:26	13.941	-91.615	24.9	3.4	ES-25-36-0308	No
5	2025-02-05 03:43:42	13.943	-91.599	22.8	4.2	ES-25-36-0343	No
6	2025-02-05 06:38:17	13.961	-91.601	21.6	3.1	ES-25-36-0638	No
7	2025-02-05 07:56:12	13.867	-91.611	37.2	4.7	ES-25-36-0756	Sí
8	2025-02-05 09:22:58	14.218	-91.559	34.6	2.7	ES-25-36-0922	No
9	2025-02-05 09:25:56	13.981	-91.570	23.5	2.9	ES-25-36-0925	No
10	2025-02-05 10:48:24	14.136	-91.772	14.2	2.9	ES-25-36-1048	No
11	2025-02-05 11:19:09	13.985	-91.570	18.3	2.7	ES-25-36-1119	No
12	2025-02-05 11:36:31	13.959	-91.580	26.8	3.4	ES-25-36-1136	No
13	2025-02-05 16:06:38	13.982	-91.583	24.8	3.0	ES-25-36-1606	No
14	2025-02-05 16:39:38	14.110	-91.534	42.7	4.7	ES-25-36-1639	Sí
15	2025-02-05 18:56:53	14.048	-91.630	45.7	2.7	ES-25-36-1856	No
16	2025-02-05 20:05:31	13.986	-91.615	56.4	2.6	ES-25-36-2005	No
17	2025-02-05 20:33:24	13.739	-91.711	43.4	4.7	ES-25-36-2033	Sí
18	2025-02-05 22:29:40	13.963	-91.364	25.7	2.7	ES-25-36-2229	No
19	2025-02-06 00:04:32	13.916	-91.622	31.5	3.0	ES-25-37-0004	No
20	2025-02-06 01:25:20	14.059	-91.416	35.6	3.0	ES-25-37-0125	No
21	2025-02-06 02:14:57	13.900	-91.602	20.0	2.6	ES-25-37-0214	No
22	2025-02-06 03:17:29	13.998	-91.563	37.5	3.0	ES-25-37-0317	No
23	2025-02-06 12:57:46	13.985	-91.621	47.9	3.1	ES-25-37-1257	No
24	2025-02-06 15:07:51	13.825	-91.662	14.2	2.8	ES-25-37-1507	No
25	2025-02-06 15:47:49	13.872	-91.628	17.8	3.1	ES-25-37-1547	No
26	2025-02-06 19:15:04	13.884	-91.705	24.1	2.8	ES-25-37-1915	No

*:El ID se genera tomando la cabecera departamental más cercana (por ejemplo, ES: Escuintla), seguida del año del evento (25), su día juliano (que corresponde al día 36 del año) y la hora y minutos de generación del evento sísmico en formato HHMM.

3. Contexto Sismológico

3.1. Marco Geo-tectónico

Guatemala se encuentra afectada tectónicamente por la interacción de las placas de Norteamérica, Caribe y Cocos; el movimiento relativo entre ellas, su composición (oceánica y continental) y su edad geológica producen dos tipos de contacto: el primero, tipo trascurrente, entre las placas de Norteamérica y Caribe. El segundo de tipo convergente entre las placas de Cocos y Caribe. [Dewey and Suárez, 1991]

Cuando una placa oceánica entra en contacto con una placa continental, debido a la diferencia de densidades, la placa más densa tiende a ser forzada hacia abajo por efecto de la gravedad; a la región tectónica donde ocurre este evento se le conoce como zona de subducción. [Lowrie, 2007]

En las costas del océano Pacífico, el tipo de contacto entre placas es convergente, en el que la placa de Cocos penetra por debajo de la placa del Caribe a lo largo de la dorsal, generando un ambiente de compresión y deformación. El contacto entre estas placas provoca una intensa actividad tectónica, que resulta en la formación de montañas, sismos y volcanismo. [Burchfiel and Davis, 1975]

Estudios geológicos en el talud terrestre de la Fosa de Mesoamérica frente a Guatemala muestran que la cuña del basamento del talud está formada por rocas ofiolíticas hasta el pie del talud continental; se han reconocido rocas metamórficas de facies de harzburgita, peridotita acumulada, gabro, dolerita y anfibolita con análisis petrológicos y geoquímicos. [Aubouin et al., 1982] [Bourgeois et al., 1984]

Los procesos que se desarrollan con la profundidad en la placa que es subducida [Ranero et al., 2005] son los siguientes: (1) Las placas oceánicas que convergen en las zonas de subducción poseen una corteza superior hidratada y fallada; sin embargo, la corteza inferior y el manto se encuentran no deformados y secos. (2) En el área de la trinchera, las deformaciones por flexión extensiva provocan una hidratación parcial de los 20 km superiores de la placa que está ingresando. (3) El proceso de curvatura y fallas de la placa subducida sigue ocurriendo debajo de la placa superior; así mismo, la hidratación podría seguir activa en ese lugar. (4) El proceso de metamorfismo progresivo deshidrata la mayor parte del agua adherida químicamente en los sedimentos en subducción, lo que genera la hidratación del manto de la placa superior (continental). (5) La sismicidad intralosa se inicia aproximadamente entre 60 y 80 km cuando la deshidratación de los minerales dentro de la losa libera fluidos, reduciendo la fricción en las fallas y favoreciendo la sismicidad. (6) A más de 100 km aproximadamente, se completa la eclogitización y, a profundidades similares o ligeramente más profundas, el manto de la losa se deshidrata y las fallas de curvatura se reactivan, lo que producirá sismicidad dentro del manto de la losa superior (Figura 2).

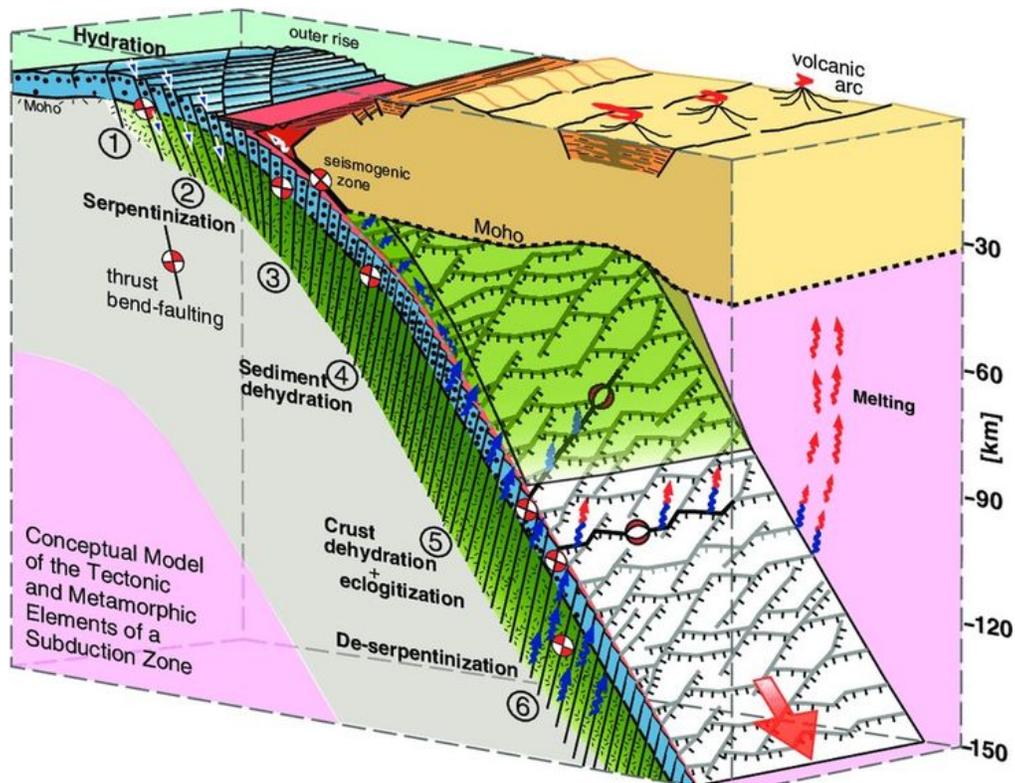


Figura 2: Modelo teórico de la estructura y desarrollo metamórfico de la corteza subducida. [Ranero et al., 2005]

3.2. Sismos históricos

En Guatemala debido a los sistemas de fallas y convergencia de las placas tectónicas (Caribe, Cocos y Norteamericana) se tiene un historial de eventos sísmicos importantes entre ellos varios de carácter destructivo según. En este reporte únicamente mencionaremos los eventos asociados a la zona de subducción asociada a la intersección entre la placa de Cocos y del Caribe. Esta se describe por una región llamada de subducción superficial (profundidad = 50km) y otra llamada subducción intermedia y profunda (profundidad >50 km), según [Molina and Benito, 2009].

- 29 de julio de 1773:
Región afectada: Retalhuleu y Santa Ana (El Salvador); las zonas más dañadas fueron suchitepequez y Chimaltenango teniendo un periodo prolongado de eventos. Evidencias documentales sugieren su origen en la zona de subducción, en palabras del historiador Estrada Monroy describe: "las tres de la tarde, tuvo lugar uno de los terremotos más terribles de los que se da fe por medio de la historia. Las pérdidas materiales fueron cuantiosas y el número de muertos pasó de la centena", apunta el historiador guatemalteco Severo Martínez Peláez. (Estrada Monroy, 1979: 10)".
- 19 de abril de 1902:
Región afectada: zona sur-occidente; Ms 7.9; IMM VIII; Origen: zona de subducción. Generó

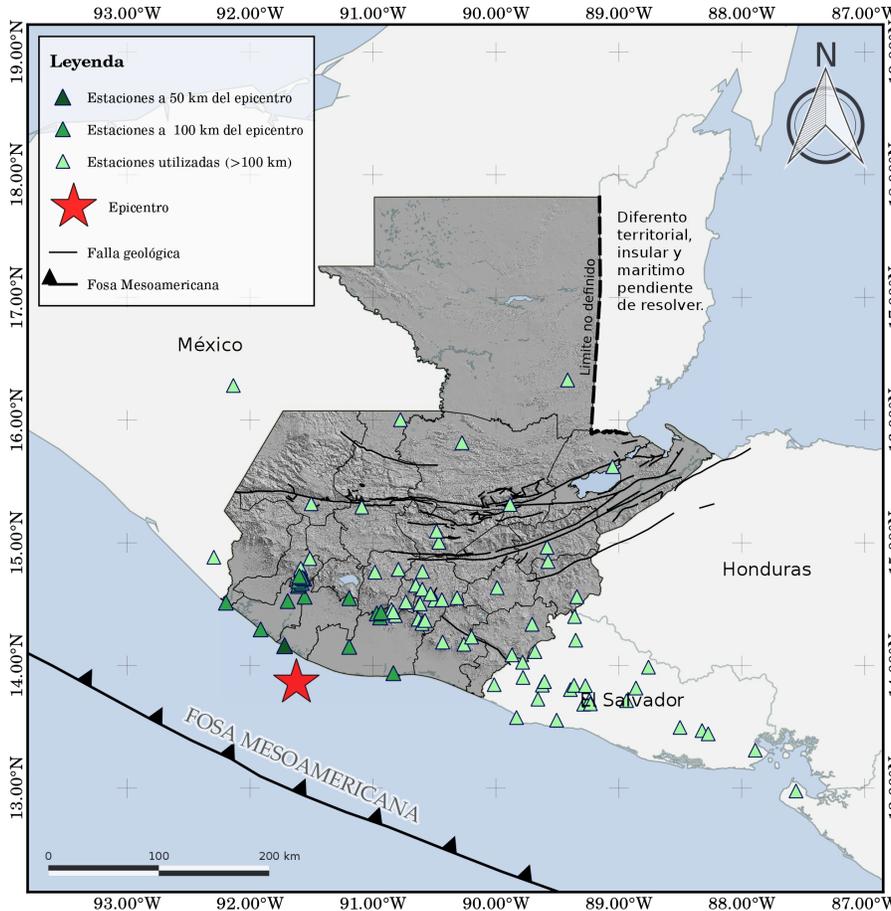
los mayores daños en Quetzaltenango, San Marcos y San Pedro Sacatepéquez (San Marcos). Se reportaron derrumbes en Cerro Quemado y licuefacción en Ocos. Se estima que murieron alrededor de 1500 personas. Se percibieron un gran número de réplicas, principalmente en las zona costera.

- 6 de agosto de 1942:
Región afectada: zona del altiplano; Ms 7.9; IMM VIII; Origen: zona de subducción. Los peores daños se reportaron en Chimaltenango y Sacatepéquez, fue sensible en el sureste de México. Las réplicas se sintieron hasta el mes de septiembre. Murieron 38 personas y las pérdidas fueron estimadas en 1 millón de dólares americanos. Se produjeron deslizamientos que bloquearon la carretera CA-1.
- 13 de enero de 2001:
Región afectada: Zona costera desde México hasta Colombia; Mw 7.6; IMM IV; Origen: zona de subducción. Este sismo fue sensible en toda la república de Guatemala y la mayor parte de daños la sufrió la región suroriente del país, reportando 8 muertes por deslizamientos.
- 7 de noviembre de 2012:
Región afectada: zona sur-occidente; Mw 7.4; IMM VII; Origen: zona de subducción. El sismo fue localizado en el Océano Pacífico en las costas de Retalhuleu a aproximadamente 50 km de la costa y a una profundidad de 33.2 km. El fuerte sismo dejó un saldo de 45 personas fallecidas y se tuvo el recuento de 133 municipios afectados (aproximadamente el 40% de municipios del país) de 11 departamentos del territorio nacional, los departamentos afectados: Huehuetenango, Quetzaltenango, Quiché, Retalhuleu, Sacatepéquez, San Marcos, Sololá, Suchitepéquez, Totonicapán, Chimaltenango y Guatemala.
- 16 de febrero de 2022:
Región afectada: zona sur-occidente; Mw 6.2; IMM VI; Origen: zona de subducción. El sismo fue localizado en el Océano Pacífico en las costas de Escuintla cercano a Suchitepéquez a una profundidad de 70 km.
- 12 de mayo de 2024:
Región afectada: zona sur-occidente; Mw 6.4; IMM V; Origen: zona de subducción. El sismo fue localizado en el Océano Pacífico en las costas de Chiapas a una profundidad de 38 km.

4. Procesamiento sismológico

4.1. Red Sismológica Nacional -RSN-

Las principales características de un sismo se determinan mediante sensores sísmicos (los cuales se muestran en la figura 3), instrumentos fundamentales de la RSN. Para analizar eventos de mayor magnitud, se cuenta con el apoyo de redes sismológicas de países vecinos, como México, El Salvador, Honduras y Nicaragua.



MAPA DE LA RED SÍSMICA NACIONAL UTILIZADA PARA LA LOCALIZACIÓN DEL EVENTO

Estaciones cercanas al sismo:

Red	Estación	Sensor	Distancia
GI	RESA	HNZ	34.8 km
GI	ESTQ	HHZ	56.4 km
GI	RECH	EHZ	57.2 km
GI	RERE	HNZ	73.7 km
GI	SUCU	HHZ	77.6 km
GI	STG11	HHZ	86.9 km

Nota: la tabla muestra las 6 estaciones más cercanas al epicentro y el tipo de sensor instalado. Si en el mapa no se muestran estaciones a 50 km o 100 km es debido a la cobertura que tuvo la red sísmica.

Parámetros de la solución:

Fases	RMS	GAP Azimutal
84	0.72	225

Nota: los datos de la tabla están relacionados a los valores de la precisión de la localización en función de la cobertura de la red de sensores sísmicos.

INSTITUTO NACIONAL DE SISMOLOGÍA,
VULCANOLOGÍA, METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN
Y SERVICIOS GEOFÍSICOS
Sección de sismología



Información sobre el sismo:

Tiempo de origen	Profundidad	Error de prof.	Latitud	Error de lat.	Longitud	Error de lon.
2025-02-05 07:01:18	44.6 km	4.3 km	13.86	1.9 km	-91.624	1.5 km

Nota: el tiempo de origen corresponde a horas UTC.

Figura 3: Estaciones sísmicas utilizadas para la caracterización del evento sísmico.

Analizando las señales sísmicas, podemos comenzar con el procesamiento de los datos, esto es *caracterizar* y *localizar* el evento sísmico y brindar su localización hipocentral. Estos aspectos se describen con mayor detalle en la siguiente sección.

4.2. Caracterización

Ante la ocurrencia de un evento sísmico, el personal de la Sección de Sismología del Departamento de Investigación y Servicios Geofísicos del INSIVUMEH, realiza una serie de procedimientos automáticos y manuales, para poder determinar las características del evento sísmico en cuestión y poder informar a la población en el menor tiempo posible. Esta información sirve para diversos objetivos, entre los más importantes están la toma de decisiones, la atención de emergencias y la comprensión de las fuentes sísmicas.

La Figura 4, muestra las acciones realizadas para la caracterización de los eventos registrados en el territorio guatemalteco que se mencionan en este reporte. Se muestran los pasos empleados para la obtención de resultados, preliminares y revisados.

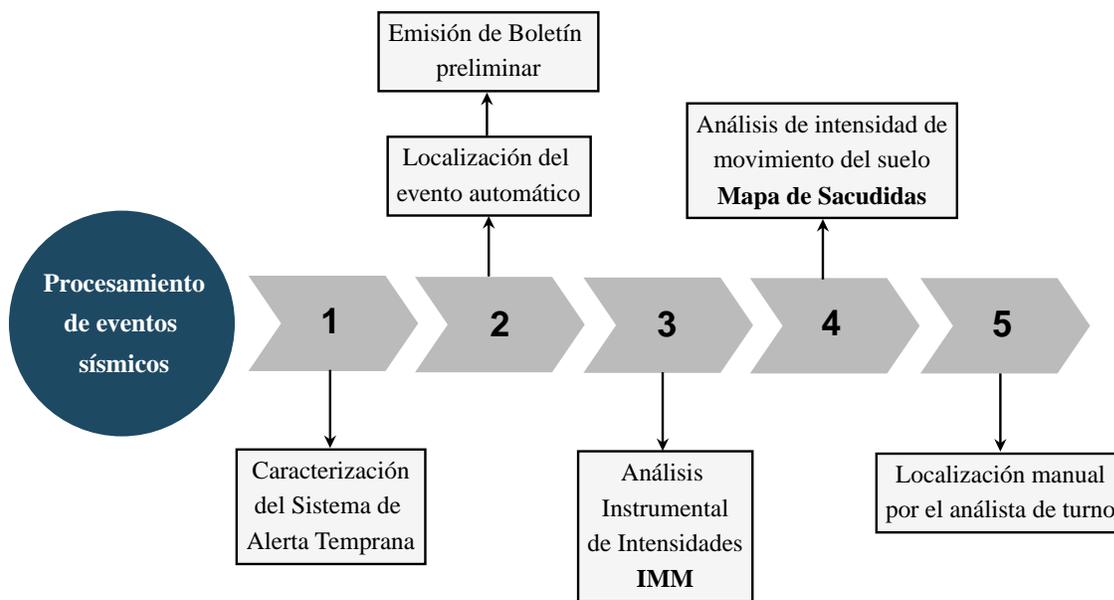


Figura 4: Imagen que muestra los pasos de la caracterización de un evento sísmico.

4.3. Alerta Temprana y Seiscomp

4.3.1. Procesamiento de alerta temprana

La alerta temprana para terremotos es una herramienta que posee INSIVUMEH, la cual fue desarrollada en los últimos años por el servicio sismológico suizo ETHZ. Esta herramienta estuvo en fase de prueba en el año 2023, y el 7 de febrero del año 2024, fue lanzada al público, con el reto de conseguir que la sociedad guatemalteca cuente con una herramienta que alerte oportunamente ante la ocurrencia de un evento sísmico.

Esta herramienta toma los primeros segundos del registro de los sensores de la Red Sismológica Nacional (RSN) y con esta información se busca caracterizar el evento sísmico (hipocentro, magnitud) figura 5. Este procesamiento se lleva a cabo en el Centro Nacional de Datos.

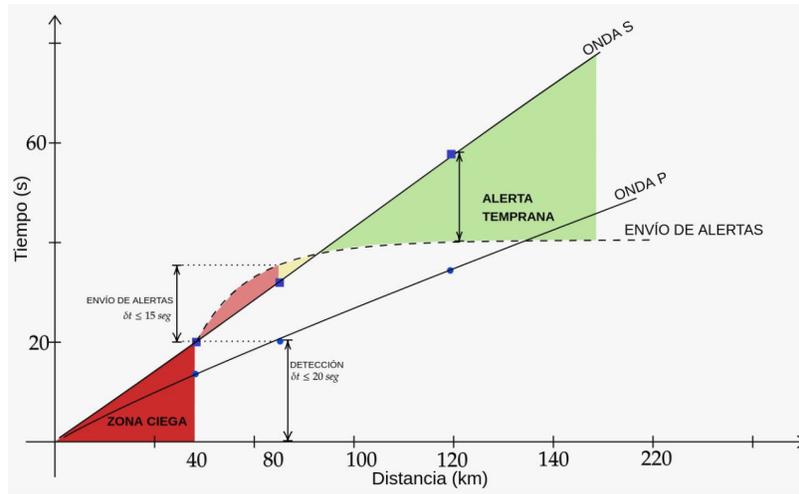


Figura 5: Gráfica de distancia epicentras en función del tiempo según fases P y S, umbrales de de zona ciega, envío de alertas y tiempo de alertamiento.

Se puede verificar el tiempo de procesamiento que toma la alerta temprana en la figura 6; se observa que toma 12 segundos llegar una primera estación, 16 segundos en llegar a la cuarta estación y dar la primera localización esto haciendo un total de 22 segundos aproximadamente para tener una localización confiable y alertar a la población en este caso por medio de la aplicación (el tiempo de alertamiento varía dependiendo de la ubicación del usuario, así como factores de internet y señal).

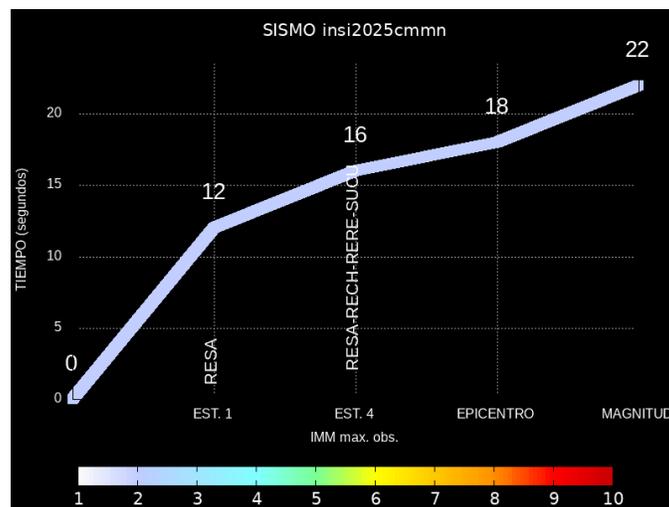


Figura 6: Tiempo de procesamiento de la alerta temprana, color variando según la escala de intensidades de Mercali Modificada.

4.3.2. Procesamiento en tiempo real

Uno de los *software* de utilidad para la localización de sismos es SeisComp [for Geosciences and gempu GmbH, 2008], cuya característica principal es el procesamiento de gran cantidad de señales sísmicas en un periodo cercano al tiempo real, el cual consiste en la localización y caracterización de un eventos sísmico y esta se va actualizando con el arribo de más señales sísmicas.

Para el evento analizado, la primera localización del sismo fue creada utilizando 10 fases, 1 minuto después se generaron 8 nuevas relocalizaciones automáticas. La solución preliminar utilizada caracterizo 49 fases, siendo esta la solución preliminar que contaba con los parámetros mínimos del control de calidad (se muestra el boletín sismológico compartido en la Figura 15).

4.4. Localización manual

Para refinar el análisis de la localización automática, luego de la información preliminar se realizó el procesamiento manual por parte del analista, donde se proceso un total 115 fases y obteniendo una magnitud preliminar ML 6.1 para este evento (Figura 7), localizando las llegadas de ondas P y S, indicando también la polaridad de la onda P para las estaciones donde dicha polaridad fuera clara. En la sección 5 se detalla la información de los mecanismos focales de cada evento y la metodología utilizada.

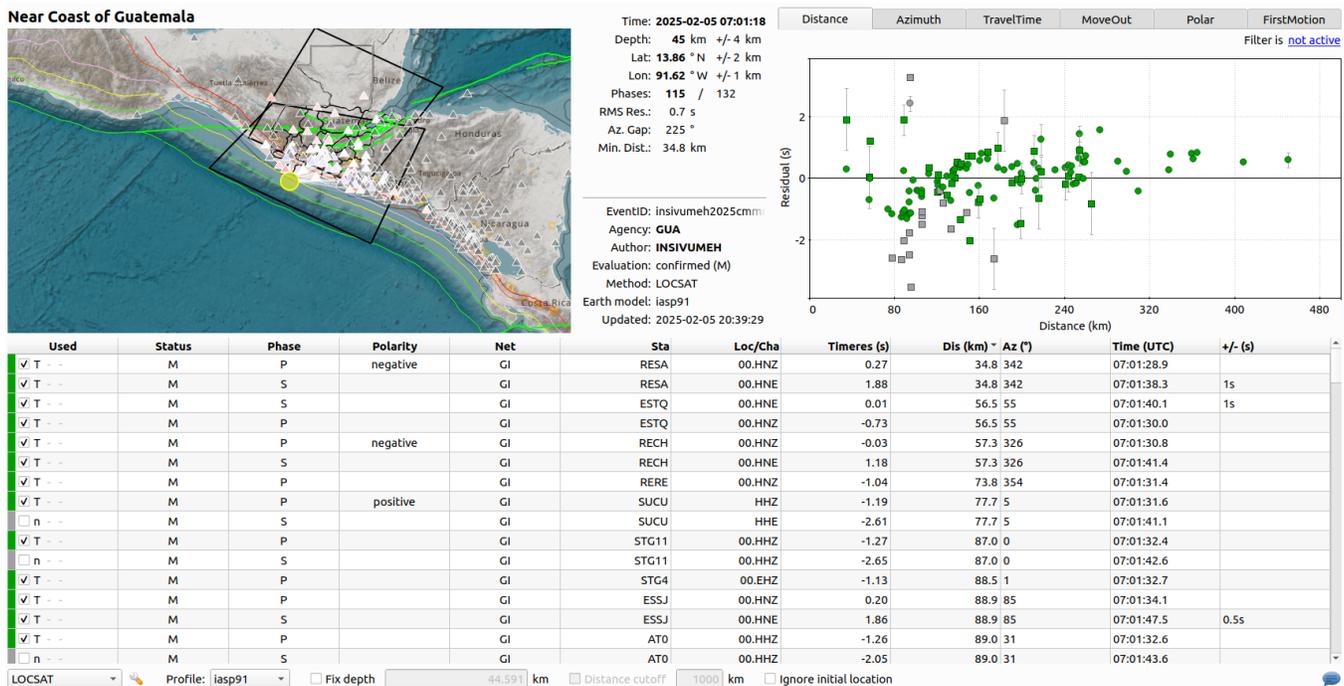


Figura 7: Localización manual del evento analizado, caracterizado en SeisComp, utilizando la localización manual con 115 fases captadas por la Red Sismológica Nacional (RSN) y estaciones adscritas por convenios interinstitucionales.

5. Análisis de Intensidades

5.1. Intensidades Instrumentales

El análisis instrumental de intensidades sísmicas, es un procesamiento que la sección de sismología realiza de forma automática en un período cercano al tiempo real, posterior a la ocurrencia de un evento sísmico. Como resultado de esto se presentan una serie de mapas en los que se muestra el movimiento del terreno y los posibles efectos sismo en términos de los niveles de intensidad instrumental usando la escala de Mecalli Modificada (IMM), en donde expresa mediante una escala de colores la sacudida del suelo.

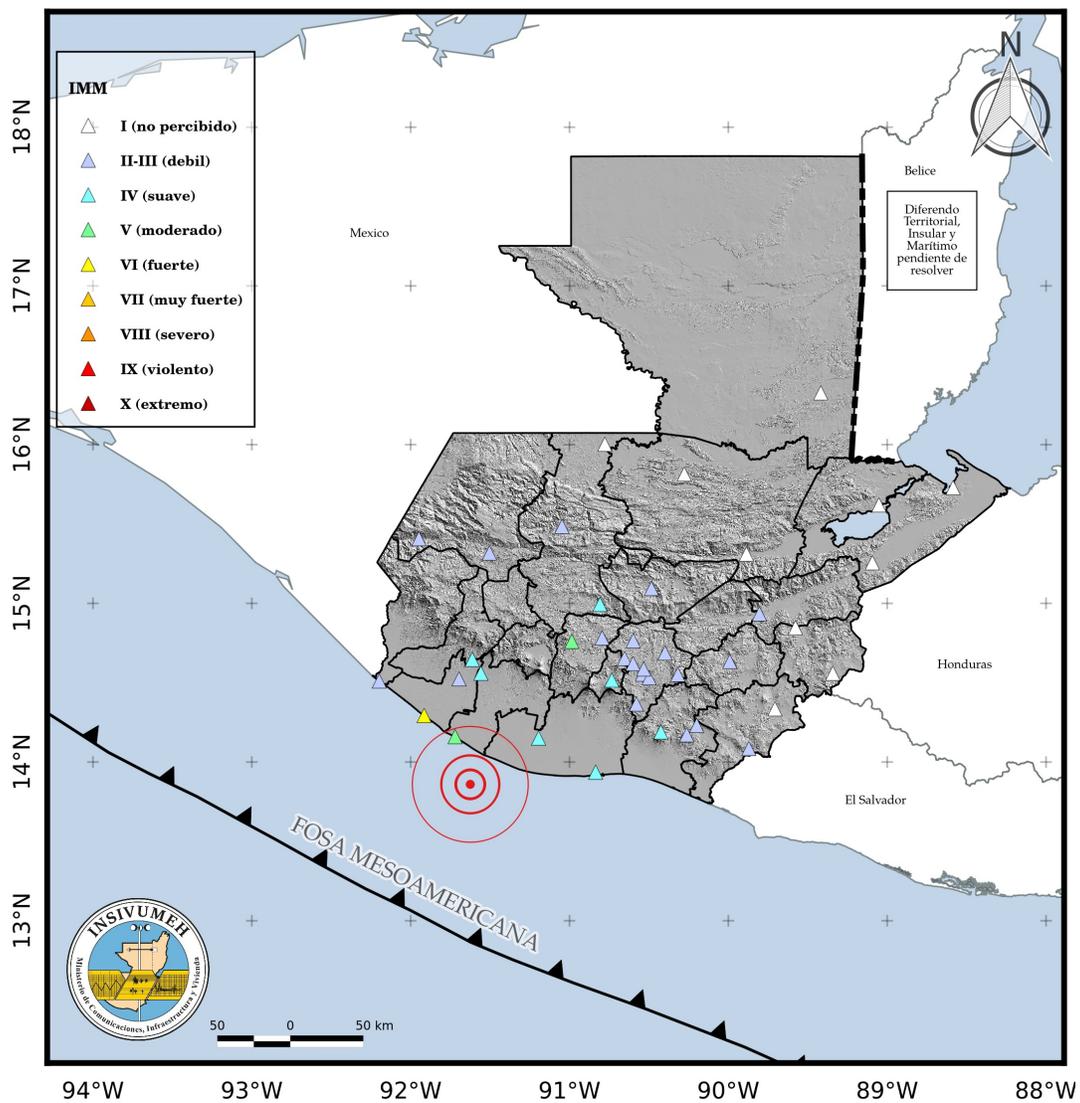


Figura 8: Intensidades sísmicas registradas por la red sísmica nacional.

Este procesamiento se aplicó a las estaciones de la RSN (Red Sismológica Nacional) que se utilizaron para detectar el sismo. Para obtener los niveles de intensidad se extrae el valor de respuesta instrumental del sensor y se calculan los valores máximos de aceleración y velocidad en cada estación por individual para el evento de magnitud Mw 5.6. El mapa de la intensidad sísmica instrumental (Figura 8) muestra que tan fuerte se registró el movimiento del suelo por cada estación, mostrando que el valor máximo de intensidad se registró en la estación RECH, y corresponde a un valor VI en la escala IMM (ver Tabla 5).

Con esta información se procede a realizar un mapa de IMM discreto que da una idea del nivel de sacudida en distintos puntos del territorio nacional para el evento sensible (Figura 12), útil para las acciones de respuesta de la CONRED y otros organismos nacionales. Es necesario resaltar que al contar con un mayor número de estaciones (p. ej. uno por municipio) se podría tener una mejor resolución. Por otra parte, esta información de intensidades instrumentales también es útil para la generación o validación de modelos de predicción del movimiento del suelo (GMPE, *Ground motion prediction equations*) que son de utilidad para diversos objetivos, entre ellos el sistema de alerta temprana de terremotos.

5.2. Análisis de la intensidad sísmica (IMM) reportada por los usuarios de la alerta de terremotos

El análisis de la IMM basado en los reportes realizados por los usuarios de la aplicación de INSIVUMEH alerta de terremotos ha proporcionado una valiosa visión sobre la percepción y el impacto de este evento en particular. En total, se recibieron reportes de 7155 usuarios para el sismo principal, lo que permitió complementar los datos de la IMM instrumental para la zona suroccidental del país y para la Ciudad de Guatemala. Estos mapas son fundamentales para comprender la distribución espacial de la intensidad del sismo y mejorar las estrategias de mitigación y respuesta ante futuros eventos sísmicos.

Los reportes realizados por la población en la aplicación de la alerta temprana de terremotos proporciona datos sobre la dispersión de la intensidad percibida por el evento sísmico tal y como se puede observar en la Figura 9 en donde queda evidenciado cuales han sido las zonas con el mayor movimiento del suelo.

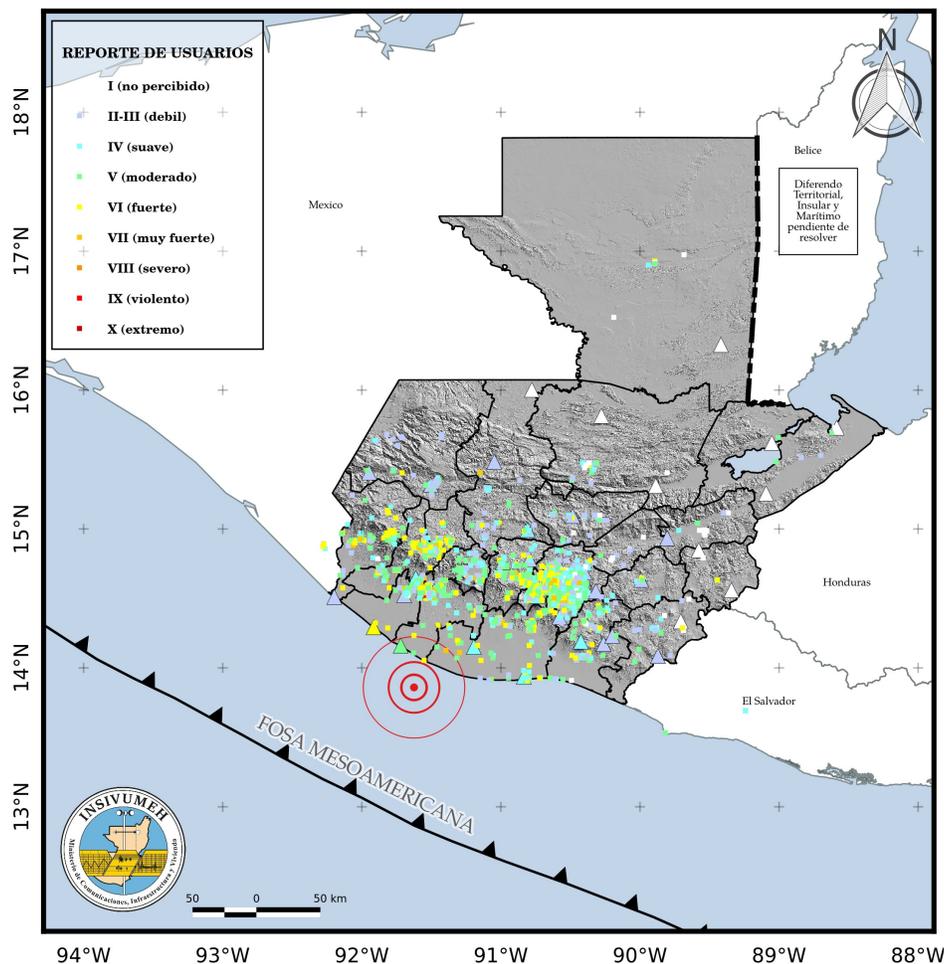
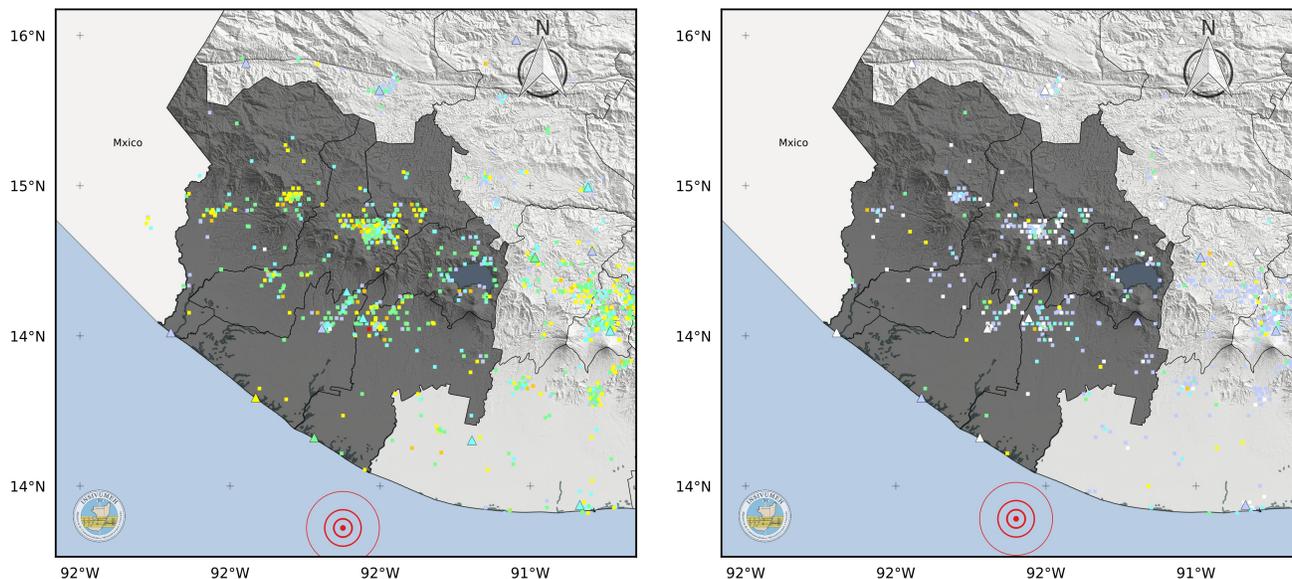


Figura 9: Mapa del territorio nacional, donde se muestran los 7155 reportes de la población a través de la aplicación INSIVUMEH alerta de terremotos.

5.2.1. Mapas de intensidad sísmica registrada

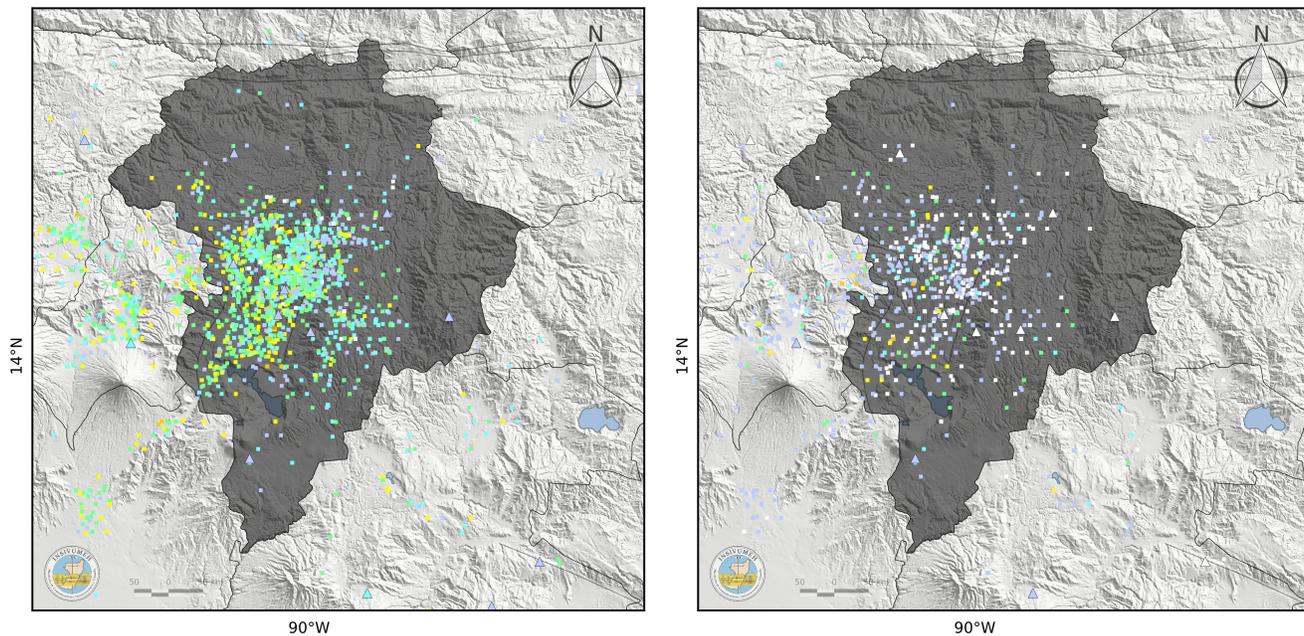
Región suroccidental de Guatemala: Se enfoca específicamente en los departamentos más cercanos al epicentro (Figura 10), el total de reportes recibidos para el sismo principal es de 1161 lo cual proporciona un desglose más detallado de la intensidad sísmica registrada por los usuarios en la aplicación y la intensidad instrumental registrada en la red sísmica nacional para el evento principal. Asimismo, se muestra la distribución de los 575 usuarios que fueron alertados y que reportaron la réplica de mayor magnitud registrada 21 minutos después.



(a) 1161 usuarios que reportaron el sismo principal con intensidad moderada a fuerte en la escala de Mercalli Modificada (IMM). (b) 575 usuarios que reportaron una réplica 21 minutos después del sismo principal con tiempo de origen 01:22:12 hora local, con valores de intensidad no percibida a débil en la escala de Mercalli Modificada (IMM).

Figura 10: Comparación de la intensidad sísmica reportada en la región suroccidente del país por los usuarios de la aplicación de INSIVUMEH alerta de terremotos para los sismos ocurridos en la madrugada del 05 de febrero del 2025.

Departamento de Guatemala: Se enfoca específicamente en el área metropolitana, donde la densidad de usuarios alertados aumenta considerablemente debido al alto número de habitantes que utilizan la aplicación. Esto permite obtener una delimitación más precisa de los niveles de intensidad sísmica ya que se recibieron un total de 4625 reportes para el sismo principal y 2190 reportes para la réplica ocurrida 21 minutos después. (Figura 11). Al comparar ambos mapas se puede ver un aumento de reportes en el área metropolitana.



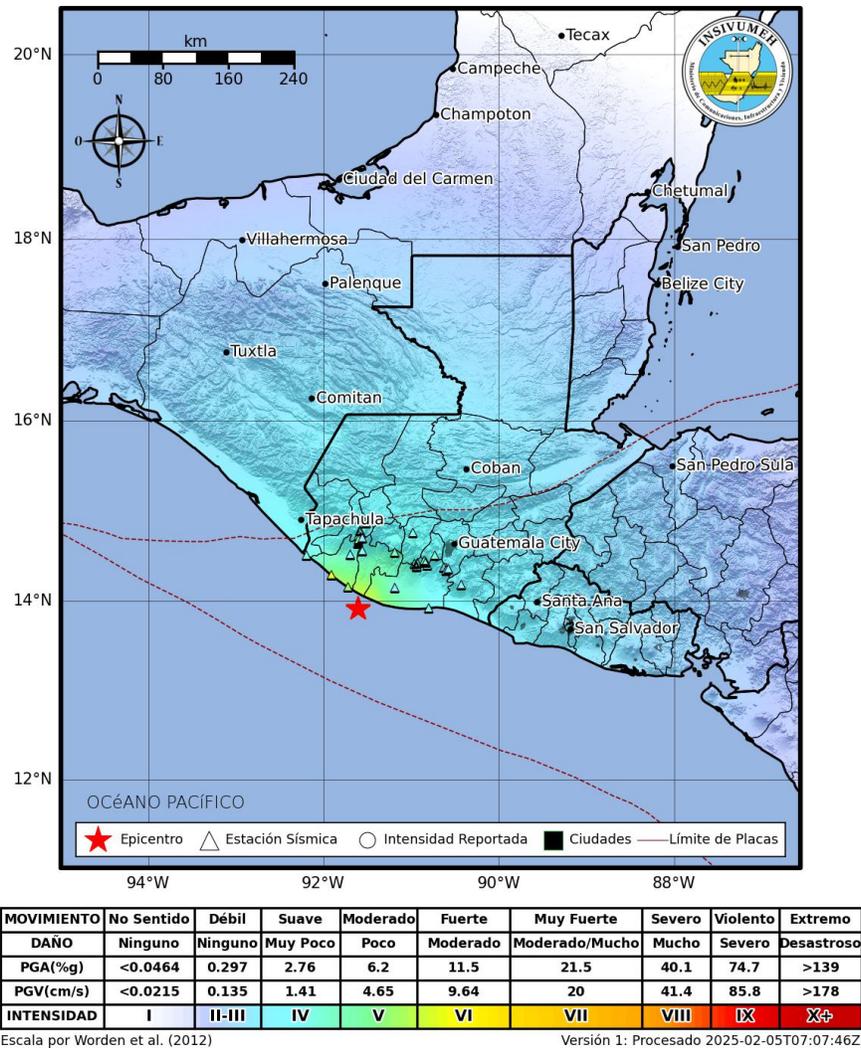
(a) 4625 usuarios que reportaron el sismo principal con tiempo de origen 01:01:21 hora local, con valores de intensidad moderada a fuerte en la escala de Mercalli Modificada (IMM). (b) 2190 usuarios que reportaron una réplica 21 minutos después del sismo principal con tiempo de origen 01:22:12 hora local, con valores de intensidad no percibida a débil en la escala de Mercalli Modificada (IMM).

Figura 11: Comparación entre la respuesta de los usuarios alertados por la aplicación de INSIVUMEH alerta de terremotos para un evento de movimiento fuerte y para un evento de movimiento débil-no percibido

La información proporcionada por los usuarios de la aplicación de INSIVUMEH alerta de terremotos es un valioso aporte al momento de identificar cuales fueron las zonas más afectadas por el evento sísmico. Esto sumado a la intensidad sísmica instrumental permite delimitar de una manera confiable y precisa cual fue el alcance que tuvo el sismo en terminos de intensidad o de movimiento del suelo.

5.3. Mapa de sacudidas

El mapa de sacudida o *ShakeMap* en inglés, es una herramienta que se utiliza para representar el alcance de las sacudidas después de un terremoto, «Esta información es fundamental para medir la extensión de las áreas afectadas, determinar qué áreas son potencialmente más afectadas y permitir una estimación rápida de las pérdidas» [Worden et al., 2012]. El *ShakeMap*, que fue desarrollado por primera vez para terremotos en el sur de California, como parte del Proyecto TriNet, un esfuerzo conjunto del Servicio Geológico de EE.UU.. En Guatemala se ha implementado en el monitoreo sísmico en INSIVUMEH a partir del año 2023.



© Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, Guatemala, C.A. (INSIVUMEH 2025.)

Figura 12: Mapa de Guatemala con la distribución espacial de las intensidades (magnitud de momento Mw 5.6). El degradado de colores hace referencia a la intensidad de movimiento del suelo en escala de Mercalli Modificada, de acuerdo a su aceleración y velocidad pico registrados, propuesto por [Worden et al., 2012]

En el centro de procesamiento del INSIVUMEH se recopilan datos de aceleración del suelo registrados por la Red Sismológica Nacional (RSN) y socios locales e internacionales, obteniendo los valores instrumentales que, combinados con modelos teóricos, ayudan a complementar el mapa de intensidades en la escala de Mercali Modificada (IMM, ver sección 6). El mapa de sacudidas para el evento analizado asociado a la zona de subducción en el océano Pacífico del territorio guatemalteco se muestra en la figura 12.

6. Fuente Sísmica

El análisis de la fuente sísmica es fundamental para comprender la dinámica de los terremotos y la interacción entre placas tectónicas. A partir de la inversión de formas de onda y el cálculo de mecanismos focales, es posible obtener información detallada sobre la geometría y el tipo de falla que originó un sismo. Entre las metodologías utilizadas, la inversión de la fase W permite estimar soluciones robustas para eventos de magnitud moderada a grande, mientras que en el campo cercano, herramientas como FMNEAR ofrecen una caracterización detallada de la magnitud de momento, la directividad y la distribución del momento sísmico a lo largo de la ruptura. Estos enfoques complementarios proporcionan una visión integral del proceso de generación de terremotos y contribuyen a mejorar la evaluación del peligro sísmico en regiones activas.

6.1. Análisis en el campo cercano: FMNEAR

Con las estaciones sísmicas utilizadas en el campo cercano fue posible la localización manual del hipocentro, el registro de las polaridades de las ondas P y el uso del método de inversión de formas de onda que ajusta ciertas frecuencias de las ondas sísmicas, con modelos teóricos para obtener una buena descripción no solo de los planos nodales, sino también de la liberación de momento sísmico, la función fuente temporal y parámetros que describen la calidad de los ajustes.

Como parte del procesamiento de este *software*, los registros se convierten a desplazamiento, ya sea que estén en velocidad o en aceleración. Esto significa que en el caso de los registros de estaciones banda ancha se aplica solo una integración y filtros pasa banda específicos que van del rango de 0.01 a 0.8 Hz, por cada componente de los sismogramas (norte, este y vertical). La inversión se lleva a cabo en pasos sucesivos que combinan búsquedas rápidas de cuadrícula en los parámetros de rumbo, buzamiento e inclinación para determinar los tiempos de inicio de ruptura y la función fuente temporal local. La búsqueda en cuadrícula no lineal ofrece la posibilidad de evaluar el grado de unicidad de la solución y define un índice de confianza que va de 0 a 100%.

Para el caso del sismo del 05 de febrero del presente año se logró obtener un mecanismo focal fuertemente restringido (calidad A), con un RMS de la inversión de 0.52 y un índice de confianza de 82% como se muestra en la figura 13 (en la sección de anexos se muestra la solución completa donde se observa la inversión de las 9 estaciones utilizadas), en la cual se muestra un mecanismo focal que describe un movimiento de falla normal con una componente de rumbo sinistral.

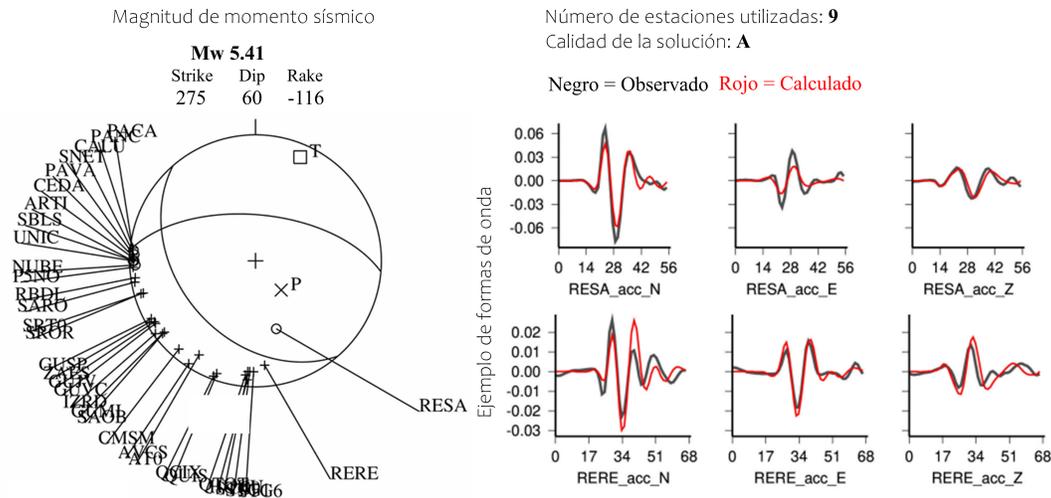


Figura 13: Solución obtenida para el sismo del 05-02-2025 01:01 (hora local), con el software FMNEAR [Delouis, 2014]. Se observa el adecuado ajuste del registro sísmico obtenido (sismograma negro) y el sintético (sismograma rojo), para dos estaciones de la RSN (RESA, Retalhuleu San Andres Villa Seca y RERE, Retalhuleu, Retalhuleu). En los anexos se muestran las 9 estaciones sísmicas utilizadas.

La magnitud de momento M_w estimada por el software fue de 5.41, mientras que los planos nodales encontrados con FMNEAR se muestran en la Tabla 3.

Plano	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)
1	275.0	60.0	-115.9
2	139.1	38.8	-52.9

Cuadro 3: Planos nodales encontrados usando el método de inversión de FMNEAR.

6.2. Inversión de la Fase W

La fase W es una onda de largo período que arriba antes de la llegada de la onda S. Los rangos de velocidad de la fase W se encuentran entre 4.5 a 9.0 km/s y el rango de períodos entre 100 a 1 000 s. Debido a ello no se ve muy afectada por las heterogeneidades en el interior de la Tierra [Kanamori and Rivera, 2008] y resulta relativamente sencillo modelarlo con gran precisión.

La inversión de la fase W puede realizarse con sismogramas saturados por el arribo de las ondas superficiales, debido a que la fase W se encuentra antes de la llegada de la onda S (que a su vez arriba antes que las ondas superficiales), por lo que se pueden utilizar estaciones locales, regionales y globales.

Para la inversión se utiliza el software *W-phase* [Kanamori and Rivera, 2008, Hayes et al., 2009, Duputel et al., 2012], ejecutado de forma manual, con él se obtiene una descripción del tensor de

momento, el momento sísmico, la magnitud de momento (M_{ww} , magnitud de momento basado en la fase W), información de los planos nodales, parámetros de ajuste, entre otros (ver Figura 14).

```

Moment mag. : 5.63
PDE location : Lat= 13.86N; Lon= 91.62W; Dep= 44.6 km
Centroid loc.: Lat= 14.26N; Lon= 91.62W; Dep= 45.5 km
Origin time : 2025/02/05 07:01:18.00
Time delay : 0.0 sec
Half duration: 0.0 sec

Moment tensor: scale= 1.0E+25 dyn.cm
rr=-0.301 ; tt= 0.231 ; pp= 0.069
rt= 0.030 ; rp=-0.016 ; tp=-0.224

Principal Axes:
1.(T) Val= 0.390 ; Plg= 3 ; Azm= 35
2.(N) -0.088 ; 1 ; 305
3.(P) -0.302 ; 87 ; 194

Best Double Couple: M0=3.46E+24 dyn.cm
NP1: Strike=126.2 ; Dip=42.2 ; Slip= -88.4
NP2: Strike=304.0 ; Dip=47.8 ; Slip= -91.4
    
```

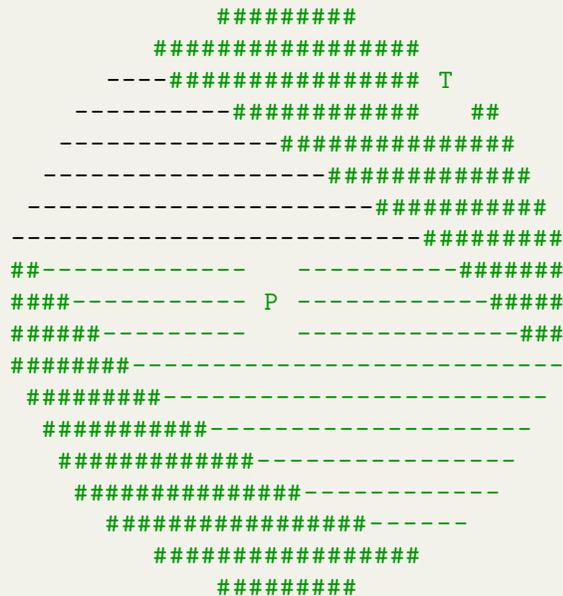


Figura 14: Archivo de salida del software WPHASE donde se muestran los parámetros estimados de la fuente sísmica: magnitud de momento, coordenadas del centroide, elementos del tensor de momento, ejes de tensión, presión y neutro, planos nodales, entre otros.

La magnitud obtenida para el sismo analizado en el presente reporte, mediante esta inversión fue de M_{ww} 5.63 . Los planos nodales encontrados con *W-phase* se muestran en la Tabla 4.

Plano	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)
1	126.2	42.2	-88.4
2	304.0	47.8	-91.4

Cuadro 4: Planos nodales encontrados usando el método de inversión *W-phase*.

7. Conclusiones

Debido a su localización epicentral, el evento sísmico del día 5 de febrero del año 2025, junto a sus réplicas, han sido asociados a la zona de subducción en el pacífico Guatemalteco. Así mismo, tanto la profundidad hipocentral de 44.6 km, como el mecanismo focal de una falla normal estimado a través de dos métodos diferentes (FMNEAR y la inversión de la Fase W), son congruentes con actividad sísmica de tipo intraplaca.

A través de la aplicación “INSIVUMEH - Alerta de Terremotos” se recibieron 7155 reportes acerca de la percepción del sismo principal. Menos de un 5% de los usuarios reportaron intensidades sísmicas que superaron a las máximas intensidades registradas de forma instrumental, lo que significa que dicha información ayuda en gran medida a complementar la estimación de las intensidades sísmicas, convirtiéndose en una herramienta importante para la toma de acciones de respuesta por parte de la CONRED.

Adicionalmente, se recibieron 3444 reportes acerca de la percepción de la primera réplica. La elevada interacción que existió entre los usuarios y la herramienta de alertamiento es una muestra clara de las responsabilidades que el INSIVUMEH mantiene con la población guatemalteca, dado el alto interés que ésta tiene en conocer los fenómenos sismológicos a los que se encuentra expuesta.

A través del análisis de los sismogramas tanto en el campo cercano como en el campo lejano, fue posible obtener información más sofisticada de la fuente sísmica (polaridades, planos nodales, mecanismo focal, momento sísmico, etc.), para lo cual se realizaron inversiones utilizando los software FMNEAR y WPHASE, que están siendo implementados satisfactoriamente en los procesos automáticos y manuales del INSIVUMEH.

La ocurrencia de este sismo de magnitud moderada ha demostrado nuevamente la importancia del intercambio de registros sísmicos entre agencias sismológicas de la región, permitiendo la obtención de características más apropiadas de la fuente sísmica. Esto significa un paso importante para la comprensión de las amenazas sísmicas que afectan a la nación.

8. Agradecimientos

Para generar la información incluida en este reporte, además de la utilización de los registros sísmicos de la Red Sismológica Nacional (RSN) operada por el INSIVUMEH, se utilizó información del Servicio Sismológico de México (SSN), del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) en el Salvador, del Comité Permanente de Contingencias (COPECO) de Honduras y del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). También se han integrado a la RSN estaciones sismológicas de socios locales: Municipalidad de Guatemala y Colegio Julio Verne. Además, para los análisis con registros telesísmicos se utilizaron registros sísmicos obtenidos a través de la plataforma Wilber 3, del consorcio EarthScope, con el que el INSIVUMEH intercambia información de forma permanente.

Por otro lado la cooperación internacional ha significado un fortalecimiento de la RSN y en consecuencia en la calidad de la información sismológica generada por el INSIVUMEH, entre los que cabe destacar el Proyecto de Alerta Temprana de Terremotos para América Central (ATTAC), con el apoyo del ETHZ/COSUDE y un especial agradecimiento a: Griselda Marroquin y al Msc. Ing Luis Mixco personal del (MARN) quienes en el marco del proyecto ATTAC no han apoyado en la implementación el ShakeMap. El Programa de Asistencia para Desastres Volcánicos (VDAP, por sus siglas en inglés) del Servicio Sismológico de los Estados Unidos y del proyecto Aumentando la Resiliencia ante Amenazas Naturales en Guatemala, con la Universidad de Tulsa, Oklahoma y Geocientíficos Sin Fronteras. Agradecemos a la Universidad de Chile, que por medio del Programa Riesgo Sísmico ha brindado apoyo al INSIVUMEH para la implementación del FMNEAR.

También resaltamos el apoyo de la SE-CONRED, quienes comunican al INSIVUMEH los reportes de la población a través de sus delegados en todo el territorio nacional.

9. Anexos

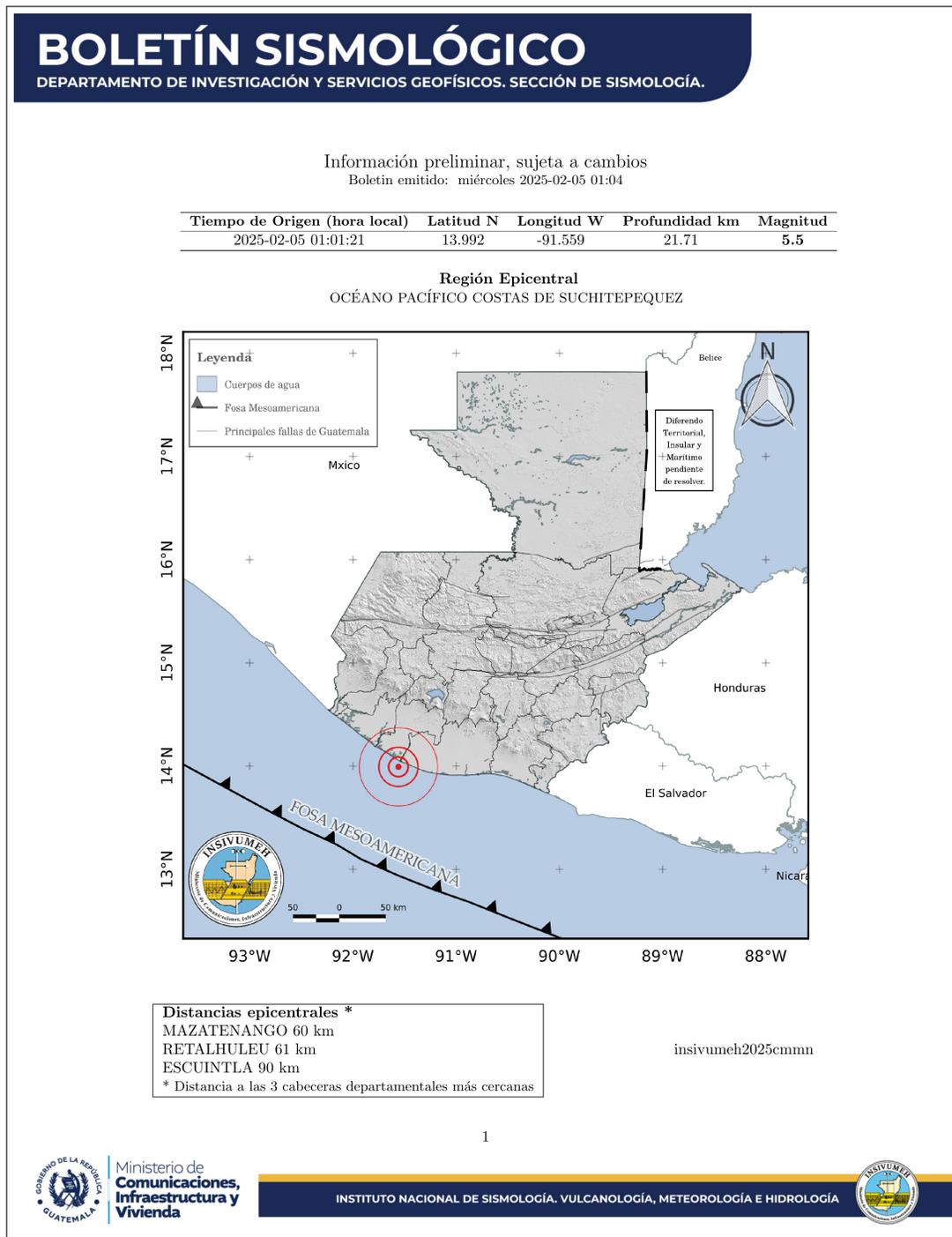


Figura 15: Boletín sismológico compartido el día 05 de febrero de 2025, asociado al sismo de estudio.

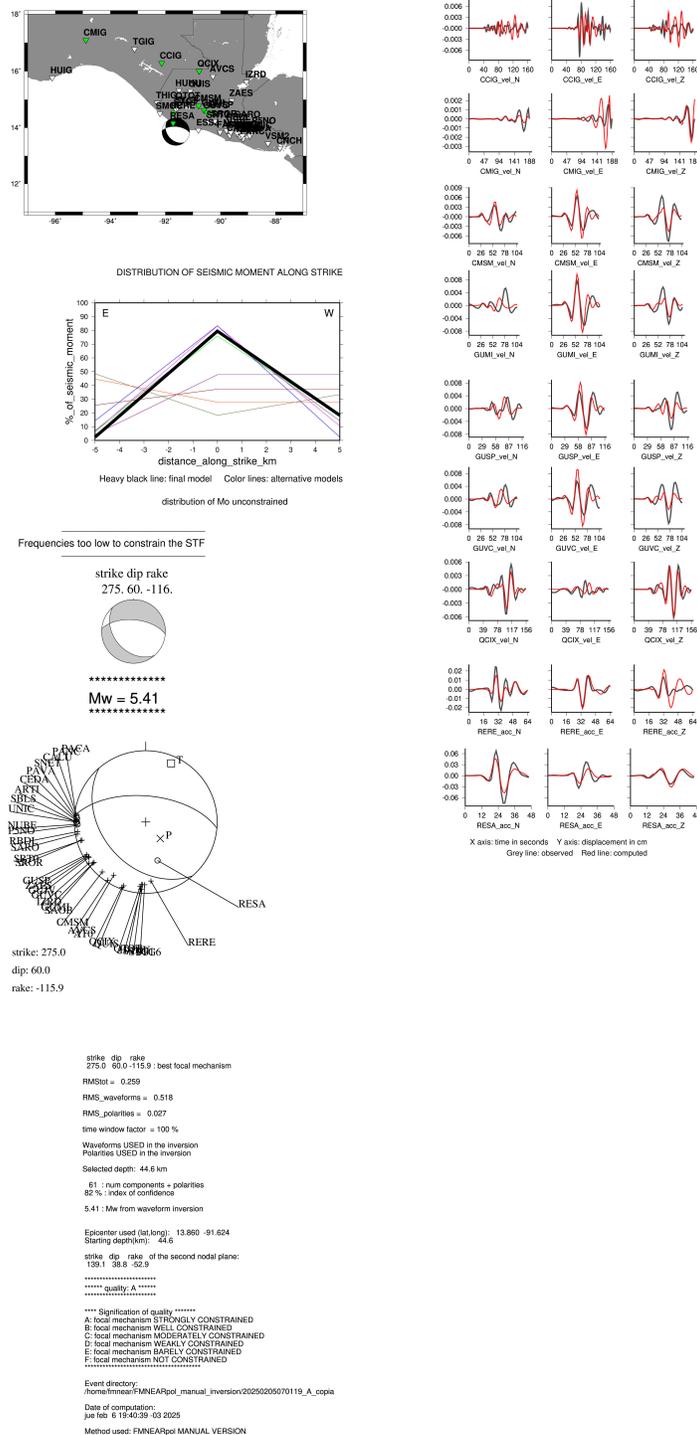
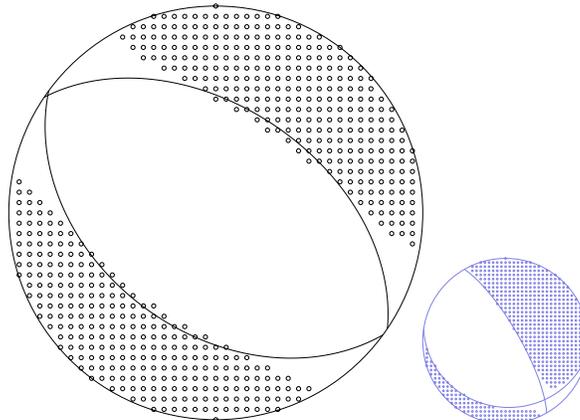


Figura 16: Solución completa obtenida a través del programa FMNEAR [Delouis, 2014] para la inversión en el campo cercano.

insivumeh2025cmmn



WCMT, Mw= 5.63

RCMT, Mw= 5.84
ratio = 2.10; epsilon = 0.913

Moment Tensor [dyn-cm x 1e25]: -0.3007 0.2313 0.0694 0.0296 -0.0159 -0.2242
 Scalar moment [dyn-cm]: 3.46e+24
 Best Nodal planes (strike/dip/rake): WCMT: 126.2/ 42.2/ -88.4 304.0/ 47.8/ -91.4
 RCMT : 98.5/ 21.2/ -139.8 330.2/ 76.5/ -73.5
 Eigenvalues [dyn-cm x 1e25]: 0.3903 -0.0880 -0.3023 (Mw = 5.63)
 Fit Quality: WCMT - RMS: 0.00008 mm (0.489), Gap: 172.4°, C# 14
 RCMT - RMS : 0.00011 mm (0.600)

Used stations (6, 10 channels) :

PAYG(LH1,LHZ)	HKT(LHZ)	GTBY(LHZ)	DWPF(LH1,LH2,LHZ)	WVT(LH1,LHZ)	CCM(LHZ)
WPWIN: 0.00	15.00	0.00	180.00		
Dmin : 14.50	Dmax :24.10				
wN : 1.00	wE :1.00	wZ :1.00			

Filter parameters:

filt_order: 4
 filt_cf1 : 0.00400
 filt_cf2 : 0.01000
 filt_pass : 1

Version: r252
 GF_PATH: /media/HDD/fgreen
 Screening: -med -th 5.0 3.0 0.9

PDE and Centroid:

PDEQ2025 02 05 07 01 18 13.859998 -91.624031 44.590930
 Event id : insivumeh2025c02n
 Time shift : 0.0 s
 Half duration: 0.0 s
 Latitude : 14.260
 Longitude : -91.624
 Depth : 45.500

Processed Date : Thu Feb 06 19:01:29 2025 UT

Figura 17: Solución obtenida con el software *W-phase*, para la inversión con registros regionales y globales.

Cuadro 5: Valores de velocidad y aceleración instrumental y su relación con la intensidad sísmica según [Wald et al., 1999] para el evento sensible del 12-03-2024 13:49 (hora local).

Departamento	Ubicación	Código	Dist	PGV	PGA	IMM
Retalhuleu	San Andres Villa Seca	RESA	34	6.782	8.301	V
Escuintla	Tiquisate	ESTQ	56	4.538	3.999	IV
Retalhuleu	Champerico	RECH	57	10.458	15.184	VI
Retalhuleu	Retalhuleu	RERE	73	1.849	1.965	II-III
Suchitepequez	Cuyotenango	SUCU	77	1.689	3.242	IV
Escuintla	San Jose	ESSJ	85	2.708	3.500	IV
Retalhuleu	El Tambor	STG11	87	1.286	2.974	IV
San Marcos	Ocos	SMOC	94	58.500	2.698	II-III
Sacatepequez	San Juan del Obispo	SAOB	120	2.725	3.955	IV
Chimaltenango	Tecpán	TUCT	121	2.185	6.392	V
Villa Canales	Finca El Muñeco	PCG6	126	1.182	2.616	II-III
Santa Rosa	Ixpaco	SRT01	134	1.091	2.997	IV
Chimaltenango	San Martin Jilotepeque	CMSM	135	1.162	1.823	II-III
Sacatepequez	San José Pacul	TUSP	136	1.529	2.634	II-III
Guatemala	Lo de Coy - Mixco	GUMI	139	1.381	2.323	II-III
Guatemala	MuniGuateZ21	GGU21	139	1.056	1.920	II-III
Guatemala	Villa Canales	GUVC	142	0.498	0.623	II-III
Guatemala	INSIVUMEH	GCG4	142	0.626	1.036	II-III
Guatemala	San Raymundo	TUGR	149	0.737	1.626	II-III
Santa Rosa	Santa Maria Ixhuan	SRT02	151	0.498	1.253	II-III
Quiché	Joyabaj	TUQJ	153	1.451	2.808	IV
Santa Rosa	Oratorio	SROR	159	0.454	1.216	II-III
Guatemala	San Jose Pinula	GUSP	160	0.332	0.653	II-III
Guatemala	MuniGuateZ25	GGU25	160	0.561	0.896	II-III
Huehuetenango	Huehuetenango	HUHU	161	0.576	0.533	II-III
Huehuetenango	Cuilco	HUCU	174	0.550	1.007	II-III
Baja Verapaz	Rabinal	TUBR	183	0.532	0.914	II-III
Quiche	Chajul	QCCJ	190	0.388	1.166	II-III
Jutiapa	Comapa	JUT5	191	0.154	0.401	II-III
Jalapa	Jalapa	TUJJ	196	0.197	0.259	II-III
Jutiapa	Asuncion Mita	TUJA	213	0.087	0.169	I
Zacapa	Cabanas	TUZC	229	0.137	0.239	II-III
Chiquimula	Chiquimula	TUCH	246	0.099	0.098	I
Alta Verapaz	La Tinta	TUAL	246	0.101	0.130	I
Quiche	Ixcán	QCIX	254	0.100	0.057	I
Chiquimula	Esquipulas	CQES	258	0.060	0.030	I
Alta Verapaz	Chisec	AVCS	260	0.040	0.038	I

continua en la siguiente página...

Departamento	Ubicación	Código	Dist	PGV	PGA	IMM
Izabal	Los Amates	TUIA	313	0.022	0.045	I
Izabal	Rio Dulce	IZRD	338	0.070	0.039	I
Petén	Poptún	PEPO	361	0.022	0.033	I
Izabal	Puerto Barrios	IZPB	387	0.451	0.127	I

(fin del cuadro)

Referencias

- J. Aubouin, J. Az ma, J. Bourgois, and R. von Huene. The middle america trench in the geological framework of central america, dsdp 67. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Leg 67*, 67:1–12, 1982.
- Jacques Bourgois, Jacques Az ma, Peter O. Baumgartner, Jacques Tournon, Alain Desmet, and Jean Aubouin. The geologic history of the caribbean-cocos plate boundary with special reference to the nicoya ophiolite complex (costa rica) and d.s.d.p. results (legs 67 and 84 off guatemala): A synthesis. *Tectonophysics*, 108(1-2):1–32, 1984. doi: 10.1016/0040-1951(84)90152-5.
- B. Clark Burchfiel and G.A. Davis. Nature and controls of cordilleran orogenesis, western united states: Extensions of an earlier synthesis. *Geological Society of America Bulletin*, 86(11):1457–1480, 1975.
- Bertrand Delouis. Fmnear: Determination of focal mechanism and first estimate of rupture directivity using near-source records and a linear distribution of point sources. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104:1479–1500, 06 2014. doi: 10.1785/0120130151.
- James W. Dewey and Gerardo Su rez. Seismotectonics of middle america. In *Neotectonics of North America*, volume 1 of *Decade of North American Geology*, pages 309–321. Geological Society of America, 1991. doi: 10.1130/DNAG-NEO.309.
- Z. Duputel, L. Rivera, H. Kanamori, and G. Hayes. W phase source inversion for moderate to large earthquakes (1990–2010). *Geophysical Journal International*, 189:1125–1147, May 2012. doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05419.x. URL <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05419.x>.
- Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences and gempa GmbH. The seiscomp seismological software package, 2008. URL <https://doi.org/10.5880/GFZ.2.4.2020.003>.
- G. Hayes, L. Rivera, and H. Kanamori. Source Inversion of the W-Phase: Real-time Implementation and Extension to Low Magnitudes. *Seismological Research Letters*, 80(5):817–822, September 2009. doi: 10.1785/gssrl.80.5.817. URL <https://doi.org/10.1785/gssrl.80.5.817>.
- H. Kanamori and L. Rivera. Source inversion of Wphase: speeding up seismic tsunami warning. *Geophysical Journal International*, 175:222–238, October 2008. doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03887.x. URL <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03887.x>.

- William Lowrie. *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2nd edition, 2007. ISBN 9780521679749. doi: 10.1017/CBO9780511800773.
- E. Molina and Ma. B. Benito. Capítulo 6: Estudio de la amenaza sísmica en Guatemala. In Ma. B. Benito and Y. Torres, editors, *Amenaza sísmica en América Central*, pages 145–167. Entimema, Madrid, 2009.
- C. R. Ranero, A. Villaseñor, J. P. Morgan, and W. Weinrebe. Relationship between bend-faulting at trenches and intermediate-depth seismicity. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(12): Q12002, 2005. doi: 10.1029/2005GC000997.
- David J Wald, Vincent Quitoriano, Thomas H Heaton, and Hiroo Kanamori. Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified mercalli intensity in California. *Earthquake spectra*, 15(3):557–564, 1999.
- C. B. Worden, M. C. Gerstenberger, D. A. Rhoades, and D. J. Wald. Probabilistic Relationships between Ground-Motion Parameters and Modified Mercalli Intensity in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(1):204–221, 02 2012. ISSN 0037-1106. doi: 10.1785/0120110156. URL <https://doi.org/10.1785/0120110156>.