

Diseño e implementación de módulos para SeisComP para el estudio de sismos  
en Santander usando la red sísmológica REDNE

Autores:

Julián Alberto Reyes Pinto y Ricardo Alejandrino Jaimes Santos

*Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingenieros Electrónicos*

Director:

Sergio Alberto Abreo Carrillo  
Ph.D.En Ingeniería Electrónica

Codirector:

Ana Beatriz Ramírez Silva  
Ph.D.En Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas  
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones  
Bucaramanga  
2025

---

## **Dedicatoria**

La culminación de este proyecto representa el final de la etapa más importante de mi vida hasta ahora, convertirme en Ingeniero electrónico. Este logro se lo dedico a personas importantes, especiales e incondicionales que la vida me dio, mi familia, en especial mis padres quienes siempre creyeron en mí, guiaron mis pasos con sus consejos, palabras de aliento en los momentos más decisivos de esta etapa, ayudándome a ser resiliente a pesar de cualquier adversidad, siempre había una solución, y hoy se ve reflejado al terminar mi carrera.

**Julián Alberto Reyes Pinto**

Quiero dedicar este libro en memoria del tiempo que la vida gastó con el objetivo de hacer posible mi crecimiento personal y profesional.

**Ricardo Alejandrino Jaimes Santos**

---

## Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron, hacen y serán parte de este camino que inicié hace cinco años. En primer lugar, a mi familia, especialmente a mis padres y hermanos, cuyo apoyo incondicional hizo posible este momento. Siempre, con una sonrisa y palabras de aliento, me recordaban por qué y por quién debía lograrlo. A la familia que elegí: mis amigos. Personas leales y sinceras que me brindaron su apoyo cuando más lo necesité, con sus consejos y con cada aventura compartida. Son esos recuerdos los que perduran y dan significado a esta etapa. A Ricardo, mi compañero, gracias por la paciencia, los consejos y la experiencia compartida, algo invaluable e imborrable.

Finalmente, a mi segunda casa en estos años, la Universidad Industrial de Santander (UIS), mi alma mater, testigo fiel de mi crecimiento personal y profesional. Sus salones de clase fueron el escenario donde se forjó mi carácter y nació el profesional que hoy soy. Agradezco a todos los profesores, en especial a la profesora Ana, por su invaluable apoyo y consejos. También al personal administrativo y de servicios generales, con su dedicación fueron una guía en este camino.

Este logro no es solo mío, sino el resultado del apoyo y la sabiduría de cada uno de ustedes. ¡Gracias!

**Julián Alberto Reyes Pinto**

Expresar mi agradecimiento y reconocimiento primeramente a Dios por darme la sabiduría y la ciencia de llegar a donde he llegado y ser lo que hoy soy. Agradecerle a esa versión pasada de mí por no desfallecer durante el proceso si no de intentarlo una vez más. A mis padres y mis hermanos por ser siempre ese aliento de motivación y ese anhelo de superación. A aquellos profesores que hicieron parte de mi formación y que con sus lecciones ayudaron a forjar el carácter del profesional que seré. Al profesor Sergio Abreo y la Profesora Ana Ramirez a quienes admiro, quiero y respeto en gran medida; gracias por guiarnos y apoyarnos a conseguir esta meta importante en esta etapa de la vida. Igualmente, gracias a la Universidad Industrial de Santander por permitirme formarme en sus instalaciones y ser uno de los privilegiados de ser orgullosamente UIS. Finalmente, agradecerle a mi compañero de trabajo de grado Julian Reyes por permitirme la oportunidad no solo de trabajar juntos si no de compartir una porción de vida. Se dice que quien encuentra un amigo, encuentra un tesoro.

Gracias a todos y cada uno de ustedes.

**Ricardo Alejandrino Jaimes Santos**

---

## Contenido

	<b>Pág.</b>
<b>1 Objetivos del trabajo de grado</b>	<b>12</b>
1.1. Objetivo general . . . . .	12
1.2. Objetivos específicos . . . . .	12
<b>2 La Red Sismológica REDNE</b>	<b>13</b>
2.1. Magnitud de un sismo . . . . .	13
2.2. Ubicación de un sismo . . . . .	15
2.3. Planteamiento del problema . . . . .	16
2.4. Antecedentes . . . . .	16
2.5. Red sismológica REDNE . . . . .	17
2.6. Principios de Funcionamiento de SeisComp . . . . .	18
2.6.1. <i>Su diseño y funcionamiento se basa en 5 elementos importantes</i> . . . . .	18
<b>3 Estudio, Configuración y análisis de Módulos</b>	<b>19</b>
3.1. Especificaciones técnicas generales . . . . .	19
3.2. Diseño de Módulos . . . . .	20
3.2.1. <i>Modulo SCAUTOLOC</i> . . . . .	20
3.2.2. <i>GUI SCEVENT y Modulo SCAUTOPICK</i> . . . . .	21
3.2.3. <i>Modulo SCMAG</i> . . . . .	21
3.2.4. <i>GUI SCOLV</i> . . . . .	21
3.3. Implementación y pruebas . . . . .	21
<b>4 Resultados</b>	<b>29</b>
<b>5 Conclusiones</b>	<b>38</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>39</b>
<b>Apéndices</b>	<b>40</b>

---

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Gráfica que permite cuantificar la magnitud de Richter (extraída de Tarbuck et al., 2005) . . . . .	14
Figura 2. Parámetros de configuración para módulos (Imagen de referencia, los parámetros cambian para cada modulo) . . . . .	20
Figura 3. Códigos de configuración de SCAUTOPICK . . . . .	23
Figura 4. código De configuración y ajuste del modulo SCAUTOLOC . . . . .	24
Figura 5. Código de implementación del modulo . . . . .	25
Figura 6. Interpolación Cubica Spline . . . . .	26
Figura 7. Sismo detectado por estaciones UIS03 UIS05 Y UIS09 . . . . .	29
Figura 8. Detección manual de picos del sismo . . . . .	30
Figura 9. Magnitud $ML_v$ . . . . .	30
Figura 10. Resumen del evento sísmico . . . . .	31
Figura 11. Análisis en frecuencia del evento . . . . .	32
Figura 12. Desviación entre magnitudes (a) y ubicaciones (b) de los sismos . . . . .	33
Figura 13. Comparación de epicentros por eventos . . . . .	34
Figura 14. Relación distancia - Magnitud . . . . .	35
Figura 15. Distribución de estaciones de REDNE . . . . .	36
Figura 16. Distribución de estaciones del SGC . . . . .	36

---

## Lista de tablas

Tabla 1.	Ubicación y nombre de las estaciones sísmicas . . . . .	17
Tabla 2.	Valores interpolados de $\log_{10}(A_0)$ para nuevas distancias epicentrales . . . . .	26
Tabla 3.	Parámetros relevantes de <code>scautopick</code> , <code>scautoloc</code> y <code>scmag</code> en SeisComp . . . . .	27
Tabla 4.	Configuración optimizada del BK Picker para detección de fases P en el Nido Sísmico de Bucaramanga . . . . .	28
Tabla 5.	Relación entre amplitud y magnitud de los sismos . . . . .	31
Tabla 6.	Comparación de latitud y longitud entre el SGC y la REDNE, con errores absolutos individuales . . . . .	32
Tabla 7.	Comparación de magnitudes entre el SGC y la REDNE, con error absoluto por evento . . . . .	33
Tabla 8.	Comparación de distancia epicentral entre SGC y REDNE . . . . .	34
Tabla 9.	Clasificación y consecuencias según rango de magnitud sísmica . . . . .	37

---

## Lista de apéndices

A	Parámetros Módulos de SeiscomP .....	41
B	Guías y repositorio .....	49
C	Resultados adicionales e información de estaciones .....	50

---

## Resumen

**TÍTULO:** Diseño e implementación de módulos para SeisComP para el estudio de sismos en Santander usando la red sismológica REDNE\*

**AUTOR:** Julián Alberto Reyes Pinto y Ricardo Alejandrito Jaimes Santos\*\*

**PALABRAS CLAVE:** SeisComP, REDNE, Georreferenciación, Magnitud, Profundidad, Monitoreo Sísmico, Análisis, Predictivo.

**DESCRIPCIÓN:** Este trabajo de grado presenta el diseño e implementación de módulos para SeisComP con el propósito de mejorar el estudio de sismos en Santander, Colombia, mediante la Red Sismológica REDNE. El objetivo principal es desarrollar herramientas que permitan georreferenciar eventos sísmicos, así como determinar su magnitud en tiempo real, optimizando la precisión de los datos procesados.

El estudio sigue una metodología estructurada que incluye la exploración del problema, la investigación de antecedentes, el diseño y la implementación de los módulos. SeisComP es un software ampliamente utilizado en el monitoreo sísmico, y la personalización de sus módulos permitirá mejorar la detección y caracterización de eventos locales.

Los módulos desarrollados se integrarán con el flujo de datos de REDNE, permitiendo un procesamiento más eficiente y una mejor representación de los eventos sísmicos en la región. Además, se busca que estos avances puedan ser utilizados por instituciones de monitoreo sísmico, autoridades locales y comunidades en zonas de riesgo para mejorar la respuesta ante eventos sísmicos.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Ingeniería Electrónica. Director: Sergio Alberto Abreo Carrillo  
Ph.D.En Ingeniería Electrónica.

---

## Abstract

**TITLE:** Design and Implementation of Modules for SeisComP for the Study of Earthquakes in Santander Using the REDNE Seismological Network.\*

**AUTHOR:** Julián Alberto Reyes Pinto y Ricardo Alejandrito Jaimes Santos\*\*

**KEYWORDS:** SeisComP, REDNE Seismological Network, Georeferencing, Magnitude, Depth, Seismic Monitoring, Predictive Analysis.

### DESCRIPTION:

This thesis presents the design and implementation of modules for SeisComP to enhance earthquake studies in Santander, Colombia, through the REDNE Seismological Network. The main objective is to develop tools that enable the georeferencing of seismic events and the determination of their magnitude in real time, optimizing data processing accuracy.

The study follows a structured methodology, including problem exploration, background research, module design, and implementation. SeisComP is widely used in seismic monitoring, and customizing its modules will allow improved detection and characterization of local events.

The developed modules will integrate with REDNE's data flow, enabling more efficient processing and better representation of seismic events in the region. Additionally, these advances aim to benefit seismic monitoring institutions, local authorities, and communities in risk-prone areas to improve their response to seismic events.

---

\* Bachelor thesis.

\*\* Physical-Mechanical Engineering Faculty. Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications School. Master Degree in Electronic Engineering. Director: Sergio Alberto Abreo Carrillo  
Ph.D.En Ingeniería Electrónica.

---

## Introducción

Desde tiempos ancestrales, la humanidad ha buscado comprender los fenómenos naturales, para lo cual ha venido desarrollando tecnologías que permiten la observación, análisis y respuesta oportuna ante estos eventos que en su momento no tenían explicación como lo es el caso de los fenómenos sísmicos. Actualmente, estos esfuerzos se están potencializando gracias al avance de tecnologías modernas como la inteligencia artificial, el análisis de datos automático y los sistemas de monitoreo sísmico avanzados. La Red Sismológica REDNE se ha destacado por su papel en la monitorización de la actividad sísmica en la región, proporcionando datos clave para la toma de decisiones en gestión del riesgo y protección civil. A medida que aumentan las expectativas sobre la precisión y rapidez de análisis de los datos, surge la necesidad de desarrollar e implementar soluciones que optimicen los procesos de caracterización de los eventos sísmicos: georreferenciación, magnitud, profundidad, entre otros.

El proyecto que se presenta se enfoca en el diseño e implementación de módulos especializados para SeisComP, un sistema de monitoreo sísmico ampliamente utilizado a nivel mundial. Esta propuesta no solo busca mejorar la detección y caracterización de eventos sísmicos, sino también optimizar la integración y operatividad de la red sismológica en Santander, aprovechando la alta actividad sísmica de la zona, “El Nido Sísmico de Bucaramanga es una zona ubicada en el departamento de Santander (debajo del municipio de Los Santos), en donde se observa este tipo de actividad sísmica, con hipocentros localizados a profundidades intermedias, cerca de los 150 km por debajo de la superficie”, sentenció el SGC [1]. La motivación de este desarrollo es la importancia de contar con información sísmica precisa y en tiempo real, crucial para la mitigación de riesgos, la investigación científica y la seguridad de las comunidades en zonas vulnerables.

Además, este proyecto explora la incorporación de técnicas avanzadas de procesamiento de datos y análisis automatizado [2], lo cual permite a SeisComP no solo detectar eventos, sino también evaluar sus características en tiempo real, minimizando los tiempos de respuesta y mejorando la capacidad de reacción ante emergencias. Con el uso de módulos personalizados, se espera que SeisComP se convierta en una herramienta aún más provechosa para sismólogos, autoridades locales y otros actores clave involucrados en la gestión de eventos sísmicos.

La implementación de estos módulos también abre la puerta a la integración con otras tecnologías emergentes, como la computación en la nube y el aprendizaje automático, que facilitan el manejo de grandes volúmenes de datos y mejoran la interpretación de estos. Así, este proyecto representa un avance tecnológico y contribuye a la formación de capacidades locales en el uso de herramientas tecnológicas aplicadas a la sismología, fortaleciendo la red sismológica y el conocimiento científico en la región.

El objetivo de este trabajo se enmarca en el contexto de colaboración entre diferentes actores académicos y científicos, buscando fortalecer la infraestructura tecnológica de la red sismológica y posicionar a la Universidad Industrial de Santander como un referente en el estudio y monitoreo de

sismos en la región. Los resultados esperados van más allá del simple desarrollo técnico; se busca impactar positivamente en la toma de decisiones estratégicas, la preparación ante emergencias y la resiliencia de las comunidades frente a desastres naturales.

Este libro se conforma de 5 capítulos. En el primero, se plasman los objetivos del proyecto. En el segundo, se brinda una contextualización del problema, se hace una revisión del estado del arte, antecedentes y diseño de los parámetros de los módulos necesarios para cumplir con los objetivos del proyecto. El tercero describe el proceso de desarrollo y funcionamiento de los nuevos ajustes realizados a los módulos de SeiscomP. El cuarto capítulo se centra en los resultados obtenidos en el transcurso del desarrollo del proyecto y diversos análisis de los datos. Finalmente, en el capítulo 5 se abordan las conclusiones.

## **Capítulo 1**

### **Objetivos del trabajo de grado**

#### **1.1. Objetivo general**

- a) Diseñar y adaptar módulos de SeisComP para el estudio de sismos en Santander usando la Red Sismológica REDNE.

#### **1.2. Objetivos específicos**

- a) Estudiar y clasificar las funciones del software SeisComP, a partir del análisis de módulos existentes y disponibles para consulta.
- b) Adaptar los módulos de SeiscomP para la Red Sismológica REDNE.
- c) Probar los módulos adaptados con una base de datos de sismos de la red REDNE.
- d) Conectar los módulos adaptados al servidor de datos sismológicos de REDNE.

## Capítulo 2

### La Red Sismológica REDNE

En este capítulo se analiza la detección y caracterización de eventos sísmicos en la región de Santander mediante la red sismológica REDNE y el uso de SeisComp. Se examina la problemática asociada a la georreferenciación de los sismos y la determinación de su magnitud, así como las limitaciones de los métodos convencionales de monitoreo. Para ello, se revisa la documentación existente sobre sismología y sistemas de alerta temprana, considerando antecedentes relevantes y metodologías empleadas en otros estudios internacionales. Además, se abordan los desafíos de la Red Sismológica REDNE y la necesidad de fortalecer su capacidad de monitoreo a través de herramientas tecnológicas avanzadas. En primer lugar, se presenta un estudio de métodos existentes de análisis de parámetros sísmicos como magnitud y ubicación.

Santander es una de las zonas con mayor actividad sísmica a nivel global debido a que en este departamento se encuentra ubicado uno de los nidos sísmicos más activos que existen en el mundo, el nido sísmico de Bucaramanga. Este nido sísmico junto con el de Vrancea en Rumanía y el de Hindu-Kush en Afganistán[3] forman la terna de nidos sísmicos más activos a nivel mundial, los cuales se caracterizan por la ocurrencia frecuente de eventos sísmicos con un rango de 130[km] a 180 [km] de profundidad, característica poco usual en las zonas sísmicas a nivel general.

Particularmente, en el nido sísmico de Bucaramanga se generan alrededor de 20.000 sismos al año, equivalente a una cifra mayor a 50 sismos diarios, de los cuales un gran porcentaje presentan baja magnitud, haciéndolos poco o nada perceptibles por el ser humano.

A pesar de que en Colombia la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana tiene un gran impacto en cuanto a eventos sísmicos, el nido sísmico de Bucaramanga no se ve influenciado por dicho factor. Por el contrario, como lo sostiene Danilo Seccia en su tesis *Deep Geometry of Subduction Below the Andean Belt of Colombia as Revealed by Seismic Tomography* [4], la actividad de este nido sísmico es debida a la compresión de la placa del Caribe, la cual, a su vez, dicha compresión se da por el cambio de dirección de la subducción, provocando la liberación de energía en forma de calor y ondas sísmicas.

#### 2.1. Magnitud de un sismo

Al momento de medir el impacto de un sismo o terremoto, no es lo mismo hablar de magnitud que de intensidad. No miden lo mismo ni se expresan con la misma unidad.

La magnitud mide la energía liberada por el sismo. Se trata de una escala logarítmica que mide escalas como la de Richter (ML) o la de momento sísmico (Mw), dependiendo de la magnitud. Cada salto de unidad equivale a un desplazamiento del suelo 10 veces mayor, y a una liberación de energía unas 33 veces mayor [5]. Esta magnitud se calcula a partir de los registros obtenidos por sismógrafos, instrumentos diseñados para detectar y registrar las ondas sísmicas generadas por

los terremotos. Los sismógrafos permiten identificar parámetros clave como la amplitud máxima de las ondas y el tiempo de llegada de las ondas P y S, datos fundamentales para determinar con precisión la magnitud de un evento sísmico [6].

Comúnmente se conoce una escala de magnitud adoptada en algunos casos de 1 a 10 o de 1 a 9, pero en realidad no se trata de una escala lineal. La energía liberada por un terremoto de una determinada magnitud equivale, aproximadamente, a la energía liberada por una treintena de terremotos de la magnitud anterior.

En la figura 1 se observa una gráfica de cómo se puede determinar la magnitud de Richter de un terremoto. En ella se ven 4 sismos, a partir de cada línea, determina la distancia entre la onda S-P, la amplitud de onda y la magnitud.

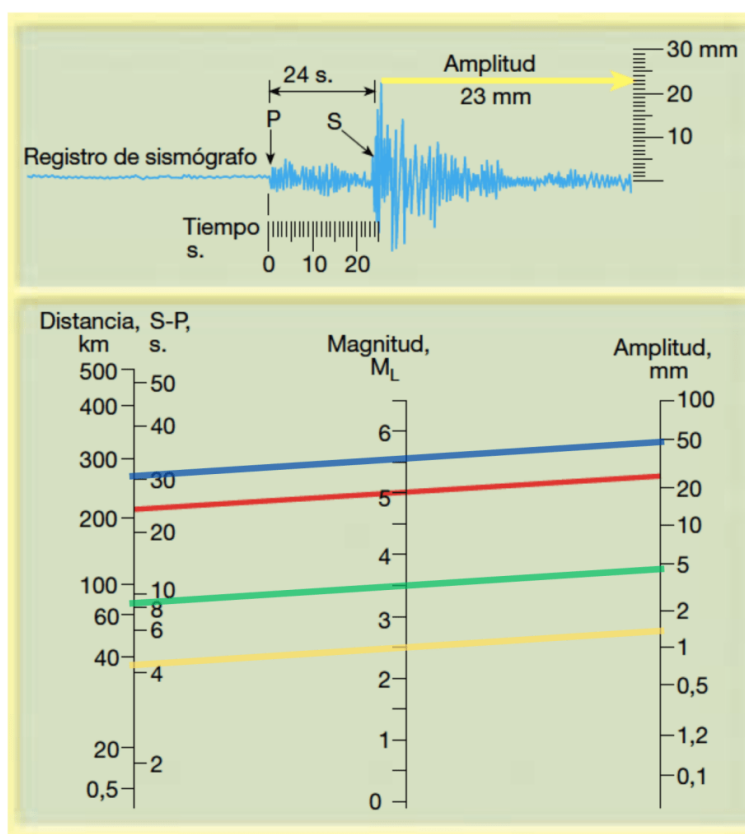


Figura 1: Gráfica que permite cuantificar la magnitud de Richter (extraída de Tarbuck et al., 2005) [7]

Richter implementó una escala logarítmica para cuantificar la magnitud del sismo, ecuación 2.1 que fue definida usando un sismógrafo torsional Wood-Anderson [8]. La escala de Richter es logarítmica de base 10, lo que significa que un incremento de 1 unidad en magnitud corresponde a un aumento de 10 veces en la amplitud de onda registrada por el sismógrafo. Siguiendo con las propiedades, al ver que la ecuación corresponde a una resta, esta se convierte en una división, por lo que la magnitud es adimensional, por tanto es incorrecto señalar que se mide en grados [9]. Esta

magnitud la hace adecuada para sismos locales de pequeña a mediana magnitud, algunas agencias que la emplean son SSN (México), CSN (Chile), SGC (Colombia).

$$M_L = \log_{10}(A_{\max}) - \log_{10}(A_0) \quad (2.1)$$

Para el desarrollo de este proyecto, se estima la magnitud Local (Richter) descrita en la ecuación 2.1, gracias al acceso a las formas de onda que nos permite estimar las amplitudes y tiempos entre ondas.

## 2.2. Ubicación de un sismo

Al hablar de la caracterización de un evento sísmico, también es fundamental determinar su ubicación. Localizar un sismo implica conocer el lugar exacto dentro de la Tierra donde se originó, conocido como hipocentro, así como su proyección superficial, el epicentro. Esta información es clave para estimar los posibles daños y emitir alertas tempranas.

La localización se realiza a partir del análisis de los tiempos de llegada de las ondas sísmicas a distintas estaciones distribuidas geográficamente. La diferencia entre el arribo de las ondas P (primarias) y S (secundarias), ecuación 2.2, permite estimar la distancia al epicentro. Tradicionalmente, estos cálculos se hacían manualmente, utilizando métodos gráficos o sistemas de triangulación. Con el tiempo, surgieron herramientas computacionales que mejoraron la precisión del proceso.

$$\Delta t = T_S - T_P \quad (2.2)$$

Las velocidades promedio de propagación dependen de la profundidad en la que se desplacen. El modelo de velocidades para el *Valle Medio del Magdalena* [10] explica cómo varía la velocidad de las ondas a diferentes profundidades en el Nido Sísmico de Bucaramanga y se usó para la estimación del epicentro de los eventos sísmicos en este proyecto.

Actualmente, existen sistemas automáticos como LOCSAT con la ecuación 2.3, utiliza modelos de velocidad de propagación de ondas en la Tierra, como el IASP91 [11] o el modelo del *Valle Medio del Magdalena* [10], para estimar el origen del evento. Estos algoritmos calculan el punto más probable de origen evaluando múltiples combinaciones de datos, y pueden funcionar en tiempo real.

$$E = \sum_i \left( T_i^{obs} - (t_0 + TT_i(x, y, z)) \right)^2 \quad (2.3)$$

donde:

- $T_i^{obs}$  es el tiempo de llegada de la onda P  $i$ ,
- $t_0$  es el tiempo de origen del sismo,
- $TT_i(x, y, z)$  es el tiempo de viaje teórico desde el hipocentro  $(x, y, z)$  hasta la estación  $i$ .

Esta función de error  $E$  se minimiza para encontrar la mejor estimación del epicentro y el tiempo de origen del evento sísmico.

Agencias como USGS (Estados Unidos), IRIS (EE.UU y Asociados), SGC (Colombia), usan modelos como el *LOCATE*, *Hypo71* y *LocSAT*, que son modelos basados en diferencias de tiempo P-S, no lineales y modelos regionales de velocidad sísmica.[12]

### 2.3. Planteamiento del problema

Para el monitoreo de la actividad sísmica en el país, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) cuenta con una red de estaciones de monitoreo distribuidas en todo el territorio colombiano las cuales permiten captar las formas de onda sísmicas y bajo la configuración propia de SeisComp analizar y calcular características de estos eventos sísmicos tales como magnitud, localización, profundidad, entre otras. Haciendo uso de esta misma red, el SGC presenta información acerca de los eventos del nido sísmico de Bucaramanga, que aun sin estar enfocada específicamente para esta zona puede dar valores aproximados estimados gracias a la configuración de los módulos de SeisComp que permite a partir de la forma de onda hacer un tratamiento de esta y estimar las características en tiempo real y automático.

De manera análoga, se cuenta con una red local que es la Red de Sismología del Nororiente de Colombia (REDNE) cuyas estaciones de monitoreo están localizadas estratégicamente alrededor del nido sísmico de Bucaramanga con el fin de captar de manera más específica las señales provenientes de esta zona. Esta red cuenta con la capacidad de captar las formas de onda, pero no de generar valores estimados de las características de los eventos como lo hace el SGC; dado que existen módulos de SeisComp que permiten realizar de manera automática el cálculo de dichas características pero de manera general, no adaptados a las condiciones del nido sísmico de Bucaramanga. Así, la REDNE tiene la necesidad de que se diseñen módulos especializados en SeisComp para trabajar con las formas de onda provenientes de su red de estaciones y que, posterior a su tratamiento y análisis, se presenten las estimaciones de las características de los eventos sísmicos y así poder generar un impacto a nivel social buscando la manera de llevar esta información a la comunidad.

### 2.4. Antecedentes

El desarrollo de algoritmos de alerta temprana (EEW) mediante software se ha estandarizado globalmente, permitiendo el análisis en tiempo real de eventos sísmicos y la estimación de su localización, magnitud y posibles consecuencias [13]. Un estudio del National Institute for Earth Physics (NIEP) en Rumanía aporta una base útil para este propósito, al implementar sistemas de detección de terremotos locales que reducen falsos positivos y proponen técnicas para mejorar la detección [14].

En este contexto, el análisis de las ondas sísmicas P y S es crucial, ya que aporta información clave para la localización y caracterización de los sismos [15]. Las ondas P, al ser las primeras detectadas por los sismógrafos, permiten identificar con precisión el inicio del evento, mientras que las ondas S, al propagarse más lentamente, contribuyen a estimar la ubicación del epicentro. El análisis conjunto de ambas facilita la determinación de profundidad, distancia epicentral y energía

liberada, aspectos fundamentales para geo-referenciar los eventos y entender la falla geológica involucrada.

## 2.5. Red sísmológica REDNE

La Red Sísmológica del Nororiente Colombiano (REDNE) es una iniciativa desarrollada conjuntamente por la Universidad Industrial de Santander y la Universidad del Valle. Según el *Informe de la instalación en campo de las estaciones sísmológicas de la red REDNE* [16], la red está compuesta por ocho estaciones sísmológicas instaladas, de las cuales tres se encuentran actualmente en operación continua. La implementación de estas estaciones se llevó a cabo mediante cuatro etapas técnicas.

1. Selección de sitios. En esta etapa se realizó la visita a campo de los lugares seleccionados para verificar la relación señal/ruido de la zona y la presencia de roca fresca para la correcta instalación de los acelerógrafos y sismógrafos.
2. Instalación del búnker. En esta etapa se realizó la apertura de un hueco de 1mt de profundidad para instalar un búnker donde fue instalada la estación sísmológica.
3. Instalación eléctrica. En esta etapa del proceso se realizó la instalación de paneles solares en las estaciones que no tienen conexión cercana de red eléctrica y se realizó la instalación de cableado en aquellas que si tienen conexión cercana a la red eléctrica.
4. Instalación de las estaciones sísmológicas. En esta etapa se realizó la instalación de los acelerómetros y sismógrafos en los búnkers.

Las estaciones instaladas se encuentran ubicadas en:

Ubicación	ID Estación
Los Santos, Santander	UX.UIS01.HN
Málaga, Santander	UX.UIS03.HN
Pamplonita, Santander	UX.UIS04.HN
La Esmeralda, Santander	UX.UIS05.EH
San Alberto, Cesar	UX.UIS09.EH
Zapatoca, Santander	UX.UIS10.EH
Macaravita, Santander	UX.UIS12.EH
Chitagá, Norte de Santander	UX.UIS13.EH

Tabla 1: Ubicación y nombre de las estaciones sísmicas

Las estaciones sísmológicas empleadas en el desarrollo del proyecto fueron Málaga, La Esmeralda y Zapatoca. La selección de estas estaciones no fue opcional, ya que corresponden a las únicas que presentan operatividad continua en la Red Sísmológica del Nororiente Colombiano (REDNE). No obstante, su disposición geográfica resulta favorable, ya que rodean el Nido Sísmico de Bucaramanga y permiten una cobertura suficiente para el análisis de eventos sísmicos en la región, tal y como se muestran en la figura 15.

## 2.6. Principios de Funcionamiento de SeisComp

Como bien se menciona en su página principal, SeiscomP es un software sísmológico diseñado para la adquisición, procesamiento, distribución y análisis interactivo de datos sísmicos. Desarrollado por el programa GEOFON del centro alemán de geociencias GFZ en colaboración con gempa GmbH; SeiscomP se ha convertido en una herramienta esencial para instituciones sísmológicas a nivel mundial [17].

### 2.6.1. *Su diseño y funcionamiento se basa en 5 elementos importantes*

1. Arquitectura Modular: El sistema está compuesto por múltiples módulos independientes, cada uno encargado de funciones específicas como adquisición de datos, procesamiento y distribución.
2. Adquisición de datos: SeiscomP utiliza el protocolo SeedLink para la transmisión de datos sísmicos en tiempo real.
3. Procesamiento de Datos: El software ofrece capacidades tanto automáticas como interactivas para el procesamiento de datos. Incluye herramientas para la detección y localización de eventos sísmicos, cálculos de magnitudes y análisis de formas de onda.
4. Distribución y Almacenamiento: Además de la transmisión en tiempo real, SeiscomP permite el almacenamiento local de datos sísmicos y su distribución a través de servicios web.
5. Interfaz de Usuario: El software cuenta con interfaces gráficas que permiten a los usuarios visualizar y analizar datos sísmicos de manera eficiente.

Con base en los objetivos del proyecto y teniendo en cuenta los recursos disponibles, existen 3 módulos que nos ayudarán en el desarrollo del proyecto. Estos módulos se estudiarán en el siguiente capítulo realizando una introducción y revisando el estado del arte existente, con el propósito de verificar modelos matemáticos, configuraciones y aplicaciones de cada uno de ellos para lograr un óptimo funcionamiento.

---

## Capítulo 3

### Estudio, Configuración y análisis de Módulos

En el marco de este capítulo, se estudia la dependencia, configuración de parámetros y funcionamiento de los módulos de nuestro interés.

#### 3.1. Especificaciones técnicas generales

##### 1. Equipo de cómputo

- Versión de SeiscomP: 6.6.3
- OS Versión Ubuntu: 24.04.2 LTS
- Procesador: 11th Gen Intel® Core™ i5-11400H × 12
- Memoria: 8GB
- Tamaño de la partición en dualboot: 60GB
- Modelo de Hardware: Acer Nitro AN515-57

##### 2. Estaciones de monitoreo 3D

- Shake Model: RS3D
- Modelo del Raspberry PI: 3 Model B y 3 Model B+  
*Raspberry Shake 3D Datasheet* [18].

##### 3. Estaciones de monitoreo 4D

- Shake Model: RS4D
- Modelo del Raspberry PI: 3 Model B+  
*Raspberry Shake 4D Datasheet* [19].

La configuración de las estaciones y su conexión se presenta en el Anexo B, sección Adecuación de las estaciones y puesta en funcionamiento.

### 3.2. Diseño de Módulos

Haciendo un estudio del estado del arte disponible en artículos y de la página web oficial de SeiscomP, se encuentra que existen parámetros que permiten realizar la configuración de cada uno de los módulos en este software, como se evidencia en la figura en la Figura 2

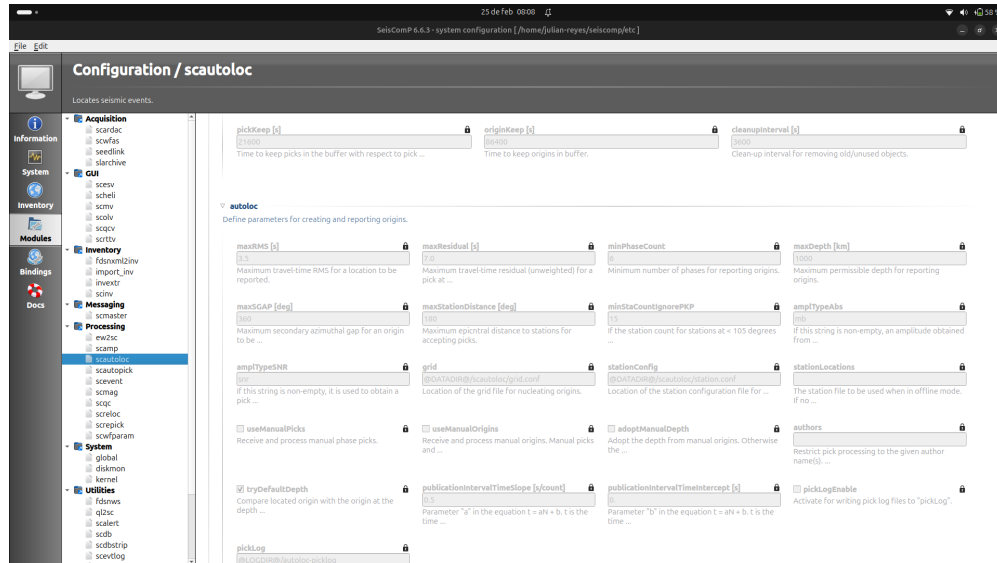


Figura 2: Parámetros de configuración para módulos (Imagen de referencia, los parámetros cambian para cada módulo)

Haciendo uso de un método iterativo, donde se analizan los datos que arroja la configuración con los del servicio geológico, es posible realizar configuraciones óptimas tanto en la interconexión de módulos presentes en SeiscomP como en los parámetros de cada uno de ellos; esto con el fin de cumplir con los objetivos del presente trabajo (sección 1). De acuerdo a lo anterior, se realizó un análisis de los módulos utilizados en SeiscomP haciendo énfasis en la funcionalidad y configuración de parámetros, tomando como referencia la información disponible en el sitio web oficial.

A continuación se estudian los módulos utilizados durante el desarrollo del proyecto.

#### 3.2.1. Módulo SCAUTOLOC

Scautoloc es el programa SeiscomP responsable de localizar eventos sísmicos en el tiempo a partir de selecciones de fase (marcas en el tiempo de los momentos exactos en el que una onda es detectada por una estación), considerando las amplitudes asociadas. Este módulo intenta identificar combinaciones de selecciones de fase que correspondan o no a un mismo evento sísmico. Posteriormente, las selecciones se envían a otro módulo llamado LOCSAT que se encarga de estimar su localización. Si la ubicación producida por este módulo cumple con los criterios de coherencia, se informa como un objeto de origen y se transmite a otros módulos que toman los orígenes como entrada. Las selecciones de fase y las amplitudes suelen ser creadas por scautopick, pero también pueden ser proporcionadas por otros medios.[20]

### **3.2.2. GUI SCEVENT y Modulo SCAUTOPICK**

En este caso, ambos módulos interactúan de tal manera que el sistema de detección de fases scautopick, aplica el monitoreo de umbral el cual se basa en la detección de cambios significativos en la amplitud de las ondas, con el fin de detectar anomalías de forma de onda que podrían deberse a la llegada de ondas de eventos sísmicos. Cuando esto ocurre se genera la selección de fase proporcionando información de magnitudes y demás características asociadas a esta detección. Posteriormente estas mediciones se dirigen a los demás módulos como Scautoloc para ser procesada y analizada.

Como consecuencia del sistema en tiempo real, en SeisComP, los módulos crean varios orígenes (resultados de los procesos de localización) para un terremoto u otros eventos sísmicos, esto debido a que conforme el tiempo avanza la onda continua su propagación siendo detectada por más estaciones y como consecuencia se generan más fases y más orígenes. El modulo Scevent recibe estos orígenes y asocia los orígenes a eventos sísmicos con el fin de determinar cuales pertenecen a un mismo evento y cuales no. También es posible importar los orígenes asociados de otras agencias.

### **3.2.3. Modulo SCMAG**

El propósito de scmag es calcular magnitudes a partir de amplitudes pre-calculadas. Este módulo no accede directamente a la forma de onda, por el contrario, toma amplitudes y orígenes como entrada y produce como salida magnitudes a nivel de estación (StationMagnitudes) y magnitudes de red. Las magnitudes resultantes se envían al grupo “MAGNITUDE”.

### **3.2.4. GUI SCOLV**

Scolv es una herramienta interactiva que permite corregir o examinar el origen e información de los eventos sísmicos. Esto se puede realizar gracias a que proporciona una completa funcionalidad para analizar los parámetros de: fases de llegada de la onda, ubicación del hipocentro y tiempo de origen, mecanismos focales a partir del primer movimiento, magnitudes y formas de ondas, estado y certeza del origen, asociación de eventos y tipo de evento.

## **3.3. Implementación y pruebas**

En la sección anterior se hizo una breve descripción los módulos correspondientes para realizar los análisis deseados. En esta sección, se evalúan las configuraciones más adecuadas con el propósito de mejorar en relacion a datos del servicio geológico, la calidad de los resultados en la determinación de la magnitud y ubicación de los eventos sísmicos para el Nido Sísmico de Bucaramanga (caso de estudio de este proyecto).

Para realizar los ajustes de los parámetros, se debe tener en cuenta características propias de la zona tales como la profundidad habitual a la que ocurren los sismos, la magnitud y frecuencias de ocurrencia, la mecánica de generación sísmica, entre otras. A continuación se detallan las características de las zona del Nido sísmico de Bucaramanga.

---

1. Profundidad de los sismos

Se producen entre 130km y 170km de profundidad, lo que los clasifica como sismos intermedios.[21]

2. Magnitud y frecuencia de ocurrencia

La profundidad afecta la dispersión de frecuencias, favoreciendo componentes de baja frecuencia ( $<10$  Hz) en sismos grandes,[22].

La mayoría de los eventos son de magnitudes moderadas ( $<M4$ )[23],

3. Mecánica de generación sísmica

Según el Magister Jaime Suárez, este nido sísmico ocurre debido a un fenómeno de flexión y compresión en la placa caribe por el cambio de la dirección de su subducción. La compresión genera un aumento de temperatura y densidad al mismo tiempo. Aunque es un fenómeno interno de la placa Caribe, hay un efecto co-lateral de las placas de Nazca y de Sudamérica. [24]

4. Propagación de Ondas Sísmicas

Se presenta una alta atenuación de altas frecuencias ( $>20$  Hz) debido a la profundidad y al tipo de material del manto.

Las ondas sísmicas P y S pueden viajar largas distancias sin mucha dispersión generando percepción del movimiento en grandes áreas de Colombia, incluso en países vecinos [24].

5. Efectos en la superficie y percepción

A pesar de su gran profundidad, los sismos del nido, pueden ser fuertemente sentidos en la región andina de Colombia, incluyendo ciudades como Bucaramanga, Cúcuta, Bogotá y Medellín.

Cabe resaltar un punto importante y es que los sismos productos del nido sísmico de Bucaramanga no producen réplicas, debido a que el materia del manto es dúctil es decir la roca tiende a deformarse elásticamente en lugar de fracturarse completamente.[24]

Teniendo en cuenta la información anterior, se ajustan los parámetros necesarios para el estudio del nido sísmico de Bucaramanga. A continuación, se deja en evidencia la configuración de los parámetros referentes a cada módulo elegido y estudiado anteriormente:

1. SCAUTOPICK:

En la figura 3 se muestran los parámetros de detección de picos del modulo.

---

```

1 # Configures the default filters selectable in manual picker. The entry with a
2 # leading "@" is selected as default filter.
3 picker.filters = "BP 0.1 - 1 Hz 3rd order;RMHP(10)>>ITAPER(30)>>BW(3,0.1,1)",\
4                 "BP 0.1 - 2 Hz 3rd order;RMHP(10)>>ITAPER(30)>>BW(3,0.1,2)",\
5                 "BP 0.4 - 1 Hz 3rd order;RMHP(10)>>ITAPER(30)>>BW(3,0.4,1)",\
6                 "@BP 0.7 - 2 Hz 3rd order;RMHP(10)>>ITAPER(30)>>BW(3,0.7,2)",\
7                 "BP 1 - 3 Hz 3rd order;RMHP(5)>>ITAPER(10)>>BW(3,1.0,3)",\
8                 "BP 1 - 5 Hz 3rd order;RMHP(5)>>ITAPER(10)>>BW(3,1.0,5)",\
9                 "BP 2 - 4 Hz 3rd order;RMHP(5)>>ITAPER(10)>>BW(3,2.0,4)",\
10                "BP 3 - 6 Hz 3rd order;RMHP(5)>>ITAPER(10)>>BW(3,3.0,6)",\
11                "BP 4 - 8 Hz 3rd order;RMHP(5)>>ITAPER(10)>>BW(3,4.0,8)",\
12                "HP 3 Hz 3rd order;RMHP(1)>>ITAPER(2)>>BW_HP(3,3)",\
13                "BP 0.7 - 2 Hz + STA/LTA(1,50);RMHP(10)->ITAPER(30)->BW(3,0.7,2)->STALTA(1,50)"
14
15 # The default filter used for making detections. Station-specific
16 # configurations (bindings) override this value.
17 filter = "RMHP(0.1)>>ITAPER(20)>>BW(4,0.7,8)>>STALTA(1.5,60)"
18
19 # For which value on the filtered waveforms is a pick detected. Station
20 # specific values override this value.
21 thresholds.triggerOn = 3.5
22
23 # The value the filtered waveforms must reach to enable detection again.
24 # Between triggerOn and triggerOff the picker is blind and does not produce
25 # picks. Station specific values override this value.
26 thresholds.triggerOff = 1.2
27
28 # The maximum gap length in seconds to handle. Gaps larger than this will cause
29 # the picker to be reset.
30 thresholds.maxGapLength = 3
31
32 # The time used together with measured amplitude and `thresholds.minAmplOffset`
33 # for scaling the amplitude below which the picker is inactive after a P pick.
34 # Read the documentation!
35 thresholds.deadTime = 20
36
37 # The amplitude used together with measured amplitude and `thresholds.deadTime`
38 # for scaling the amplitude below which the picker is inactive after a P pick.
39 # The value is typically similar to the trigger threshold. Read the
40 # documentation!
41 thresholds.minAmplOffset = 2
42
43 # The minimum duration to reach. The duration is measured as the time between
44 # trigger on and trigger off. If this value is configured the detection (pick)
45 # will be delayed in order to compute and check the duration.
46 thresholds.minDuration = 0.5
47

```

Figura 3: Códigos de configuración de SCAUTOPICK

## a) Filtro de preprocesamiento:

*RMHP(N)*: Filtro pasa alto de N seg: Elimina tendencias de baja frecuencia sin afectar señales de eventos sísmicos profundos.

*ITAPER(N)*: Suaviza los bordes de la señal con un taper del N % lo que reduce artefactos de procesamiento.

*BW(A,B,C)*: Filtro Butterworth [25] *pasabanda B-C Hz de orden A*: El cual esta optimizado para capturar sismos profundos sin exceso de ruido.

*STALTA(A,B)*: Un filtro STA/LTA es la relación de un promedio de amplitud de corto tiempo (STA) a un promedio de amplitud a largo plazo (LTA) calculado continuamente en dos ventanas de tiempo consecutivas.

- *STA = A s*: Longitud de la ventana de tiempo a corto plazo en segundos
- *LTA = B s*: Longitud de la ventana de tiempo a largo plazo en segundos. La ventana de tiempo termina con la misma muestra que STA.

La razón *STA/LTA* esta ajustada a la duracion de los sismos del Nido Sísmico de Bucaramanga.

### b) Parámetros de detección (*Thresholds*):

- **triggerOn  $N$**  ajusta la sensibilidad y así evita falsos positivos.
- **triggerOff  $N$**  evita que las detecciones duren demasiado después del pico inicial.
- **maxGapLength [s]:  $N$**  permite interrupciones (brechas) pequeñas de la señal antes de descartar las detecciones y reiniciar el proceso.
- **minDuration [N s]:** Requiere al menos  $N$  segundos de señal antes de confirmar un evento.
- **maxDuration  $N$  s:** Ventana de tiempo ajustable para detectar eventos de cualquier duración.
- **deadTime [N s]:** Tiempo de espera  $N$  antes de detectar otro evento cercano.
- **minAmplitudeOffset:** Evita activar detecciones con amplitudes demasiado bajas.

## 2. SCAUTOLOC:

El código de la figura 4 muestra los parámetros configurables mediante código para el modulo.

```

# Use UTC instead of local time in logging timestamps.
logging.utc = true

# The list of supported model names per interface.
tbl.LOCSAT.tables = lasp91, tab

# Compute M, peak-to-trough and sh amplitudes according to IASPEI
# recommendations.
# For M(BB) amplitudes check that the dominant period of the signal is within
# the valid range (1s, 6s). The period range may be set in a M(BB) amplitude
# profile in global bindings.
amplitudes.laspel = true

# Defines a list of available travel time tables. Each item is a tuple
# separated by a slash with format "[interface]/[model]". Built-in interfaces
# are "LOCSAT" and "finkbar". Other interfaces might be added via plugins.
# Please check their documentation for the required interface name.
FixedHypocenter.profiles = LOCSAT/lasp91, LOCSAT/tab

# Whether to use pick time uncertainties rather than a fixed time error. If
# true, then the uncertainties are retrieved from each individual pick object.
# If they are not defined, then the default pick time uncertainty as defined by
# defaultTimeError will be used instead.
FixedHypocenter.usePickUncertainties = true

# The default pick time uncertainty if pick uncertainties are not going to be
# used or if they are absent.
FixedHypocenter.defaultTimeError = 1.0

# Number of degrees of freedom used for error estimate.
FixedHypocenter.degreesOfFreedom = 0

# Confidence level between 0.5 and 1.0.
FixedHypocenter.confLevel = 0.9

# Defines a list of available LOCSAT travel-time tables.
LOCSAT.profiles = lasp91, tab

# The initial depth estimate for LOCSAT.
LOCSAT.depthInit = 20.0

# Whether to use pick time uncertainties for arrival delay rather than a fixed
# time error. If true then the uncertainties are retrieved from each individual
# pick object. If they are not defined then the default pick time uncertainty
# will be used as fallback.
LOCSAT.usePickUncertainties = false
LOCSAT.usePickTimeError = false

# The default pick time uncertainty assigned to LOCSAT's arrival delay
# attribute if pick uncertainties are not going to be used or if they are
# absent. A time uncertainty of 0 s may result in errors of the S/D
# decomposition in LOCSAT.
LOCSAT.defaultTimeError = 1.0

# Whether to forward pick backazimuth to LOCSAT or not. In an automatic
# mode slowest measurements might be inaccurate and disabling their usage in
# LOCSAT can be controlled with this parameter.
LOCSAT.usePickBackazimuth = true

# Whether to forward pick horizontal slowness to LOCSAT or not. In an automatic
# mode slowest measurements might be inaccurate and disabling their usage in
# LOCSAT can be controlled with this parameter.
LOCSAT.usePickSlowness = true

# Number of degrees of freedom.
LOCSAT.degreesOfFreedom = 9999

# Confidence level between 0.5 and 1.0.
LOCSAT.confLevel = 0.9

# Compute the confidence ellipsoid from covariance matrix in 3D.
LOCSAT.ellipseConfidenceEllipsoid = false

# Temporary file used by hypo71 to store calculation logs.
hypo71.logFile = @DATAID@/hypo71/LOG

# Temporary file to write Hypo71 user data to.
hypo71.inpFile = @DATAID@/hypo71/HYPOT1.INP

# Temporary output file to read Hypo71 location data from.
hypo71.outFile = @DATAID@/hypo71/HYPOT1.PRT

# Hypo71 default profile. If no custom profile is specified, this profile will
# be used by the plugin when proceeding to a localization.
hypo71.defaultProfileFile = @DATAID@/hypo71/profiles/default-hypo71.conf

# Bash script executed when calling the hypo71 locator plugin for locating the
# earthquakes.
hypo71.hypo71ScriptFile = @DATAID@/hypo71/run.sh

# Specifies if the given publicID should be used for generating origin publicID
hypo71.useHypo71PatternID = true

# The locator profile to use.
locator.profile = lasp91

# For each location, scautoLoc performs checks to test if the depth estimate is
# reliable. If the sum location quality (e.g. pick RMS) can be achieved while
# fixing the depth to the default depth, the latter is used. This is most often
# the case for shallow events with essentially no depth resolution.
locator.defaultDepth = 10

# The locator might converge at a depth of 0 or even negative depths. This is
# usually not desired, as 0 m might be interpreted as indicative of e.g. a
# quarry blast or another explosive source. In the case of "too shallow"
# locations the minimum depth will be used.
# Note that the minimum depth can also be configured in scv, possibly to a
# different value.
locator.minimumDepth = 5

# Maximum travel-time RMS for a location to be reported.
autoloc.maxRMS = 2.5

# Maximum travel-time residual (unweighted) for a pick at a station to be used.
autoloc.maxResidual = 5.0

# Minimum number of phases for reporting origins.
autoloc.minPhaseCount = 1

# Maximum secondary azimuthal gap for an origin to be reported by. The
# secondary gap is the maximum of the sum of 2 station gaps.
# Default: 300 degrees, i.e., no restriction based on this parameter.
autoloc.maxSGAP = 270

# Maximum station distance to stations for accepting picks.
autoloc.maxStationDistance = 20

```

Figura 4: código De configuración y ajuste del modulo SCAUTOLOC

- **maxSGAP [deg]:** Es la máxima brecha acimutal secundaria, lo que representa la cobertura del epicentro de un sismo dependiendo del numero de estaciones. A mayor numero de estaciones, la brecha acimutal disminuye (distancia entre las estaciones que rodean el epicentro, se mide el angulo que hay entre ellas y se elige la mayor) y la precisión aumenta.
- **maxResidual:** Tiempo de viaje residual (diferencia entre el tiempo que tarda la onda medido por la estación y el tiempo teórico calculado según el modelo de propagación de ondas), del cual depende si se consideren o no fases de buena cobertura para la localización.
- **minPhaseCount:** Cantidad mínima de fases detectadas para confirmar un evento, para el caso del nido sísmico podría generar más de 100 tipos de fases sísmicas.
- **maxStationDistance [deg]:** Es distancia máxima permitida (medida en grados) y el epicentro del evento. Un valor bajo aumenta la resolución local.

Además se configura el perfil para tomar como modelo de velocidades el que se menciona en el artículo *A framework for full waveform velocity and moment tensor inversion in regional seismotectonic settings* [10]

### 3. SCMAG

El código que se muestra en la figura 5 configura los parámetros de análisis del módulo *SCMAG*

```

1 # The methods for computing the network magnitude from station magnitudes.
2 # Exactly one method per magnitude can be configured. To define the averaging
3 # method per magnitude type append the type after colon, e.g.:
4 # "magnitudes.average = default, MLv:median"
5 # default: Compute the mean if less than 4 contributed station magnitudes
6 # exist. Otherwise apply trimmedMean(25), trimmed mean with 25%.
7 magnitudes.average = median
8
9 # This is the minimum station magnitude required for any magnitude to
10 # contribute to the summary magnitude at all. If this is set to 4, then no
11 # magnitude with less than 4 station magnitudes is taken into consideration
12 # even if this results in no summary magnitude at all. For this reason, the
13 # default here is 1 but in a purely automatic system it should be higher, at
14 # least 4 is recommended.
15 summaryMagnitude.minStationCount = 3
16
17 # Define the magnitude types to be excluded from the summary magnitude
18 # calculation.
19 summaryMagnitude.blacklist = ""
20
21 # Define the coefficients a. To define the value per magnitude type append the
22 # type after colon. A value without a type defines the default value.
23 summaryMagnitude.coefficients.a = 0, Mw(mB):0.96, Mw(Mwp):0.96
24
25 # Define the coefficients b. To define the value per magnitude type append the
26 # type after colon. A value without a type defines the default value.
27 summaryMagnitude.coefficients.b = 1, MLv:2, Mw(mB):-0.29, Mw(Mwp):-0.29
28

```

Figura 5: Código de implementación del módulo

- **Parámetro de magnitudes:** De acuerdo a los análisis que se esperan realizar de magnitud epicentral, habilitamos las funciones de los módulos global de los *Bindings* globales de las estaciones que nos permitan adecuar el análisis a las ondas primarias P. Por defecto, SeiscomP trae la siguiente ecuación, para el cálculo de magnitud local vertical.

$$MLv = \log_{10}(A) - \log_{10}(A_0) \quad (3.1)$$

Como se muestra en la ecuación (3.1), la magnitud local se calcula a partir de la amplitud de Wood-Anderson donde  $A$  representa la amplitud máxima registrada por el sismómetro. El parámetro  $A_0$  es una función empírica de calibración que depende de la distancia al epicentro y es utilizada para normalizar la amplitud. Para este caso de estudio enfocado en la zona del nido sísmico de Bucaramanga, la profundidad no está bien definida (entre 140 km y 180 km), por lo cual se realizan diferentes métodos de aproximación para determinar

este coeficiente como lo son la interpolación lineal, la interpolación cubica Spline y el método de aproximación exponencial.

Se realizaron las verificaciones según la línea de interpolación gracias a los datos conocidos disponibles en la web de Seiscomp y se evidencio que el método más adecuado y con mejores resultados fue el Método de interpolación cubica Spline que se muestra en la figura 6, los resultados de los demás métodos pueden ser consultados en el Anexo C la sección Resultados interpolaciones.

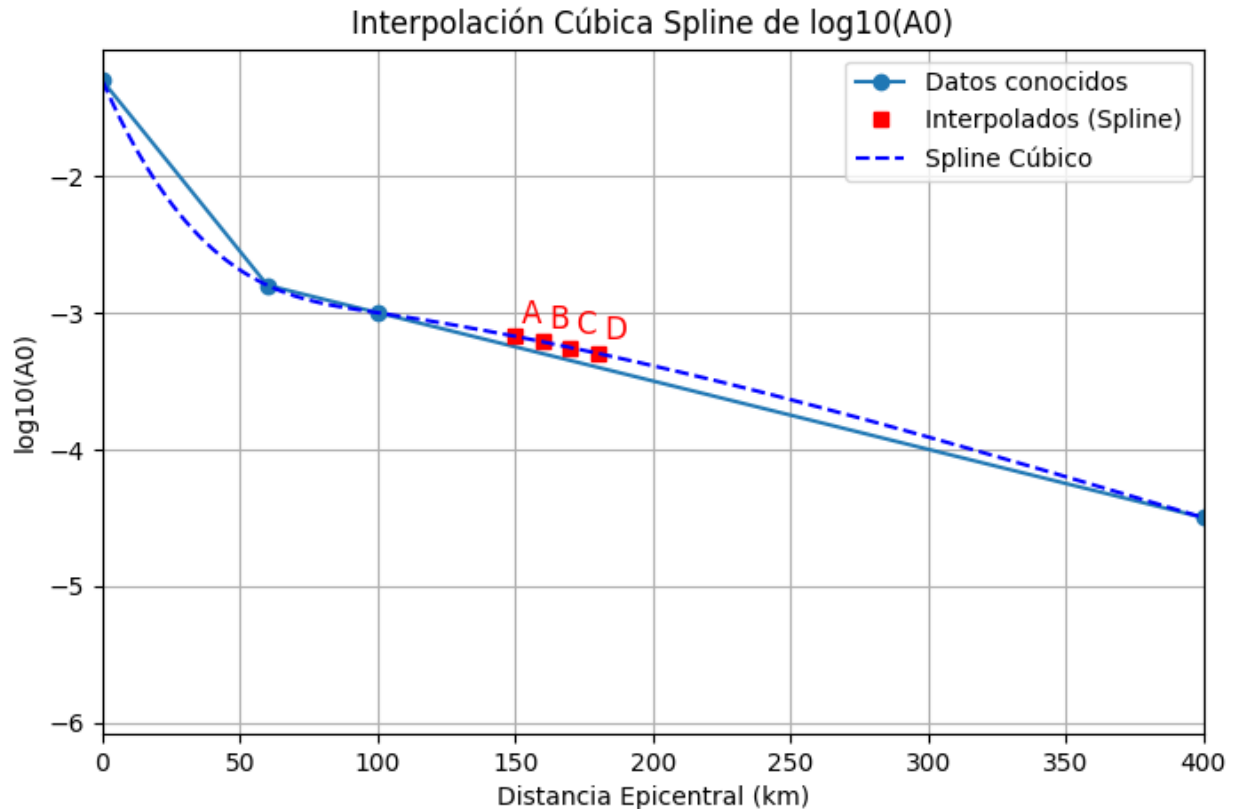


Figura 6: Interpolación Cubica Spline

Como se muestra en la figura 6 con este tipo de interpolación cubica se tienen los valores calculados y registrados en la tabla 2

Punto	Distancia (km)	$\log_{10}(A_0)$
A	150	-3.17
B	160	-3.21
C	170	-3.25
D	180	-3.30

Tabla 2: Valores interpolados de  $\log_{10}(A_0)$  para nuevas distancias epicentrales

- **minimumArrivalWeight**: Es el peso mínimo que debe tener un arribo para calcular su magnitud, dependiendo este valor se descartan magnitudes muy pequeñas.
- **AVERAGE**: Define el método de promediado de magnitudes entre estaciones, existen tres opciones:
  - a) **median**: Reduce el impacto de valores atípicos.
  - b) **trimmedMean**: Descarta valores extremos antes de promediar.
  - c) **default**: Se usa si al menos cuatro estaciones contribuyeron en la información.

La siguiente tabla presenta los ajustes realizados a cada uno de los parámetros para cada uno de los módulos previamente descritos.

Módulo	Parámetro	Ajustes
scautopick	filter	RRMHP(0.7)»ITAPER(20)»BW(4,0.7,8)»STALTA(1.5,60)
	triggerOn	3.5
	triggerOff	1.2
	maxGapLength [s]	3
	ampMaxTimeWindow [s]	10
	postPickAcceptance	-1
	deadTime [s]	20
	minAmplOffset	1.2
scautoloc	maxSGAP	270°
	maxResidual	5.0 s
	minPhaseCount	8
scmag	magnitudes	MLv. Ver tabla 1
	minimumArrivalWeight	0.7 (para descartar eventos muy pequeños)
	average	median o trimmedMean

Tabla 3: Parámetros relevantes de scautopick, scautoloc y scmag en SeisComp

Los siguientes son ajustes que fueron realizados de manera adicional a los módulos globales de los perfiles del sistema de detección de eventos para las estaciones configuradas.

1. Algoritmo de detección de eventos sísmicos *Baer/Kradolfer BK*: Se ajustan los parámetros teniendo en cuenta su funcionamiento.
  - a) **noiseBegin[s]**: Define el tiempo relativo de adquisición de ruido antes de la detección.
  - b) **signalBegin[s]**: define el tiempo de inicio de la señal, es relativo al tiempo de activación del evento.
  - c) **signalEnd[s]**: Define el tiempo de finalización de la señal, relativo al tiempo de activación.

- d) *filterType*: Indica el tipo de filtro aplicado a la señal.
- e) *filterPoles*: Número de polos del filtro. Afecta la pendiente y estabilidad del filtrado.
- f) *f1* [Hz]: frecuencia de corte inferior del filtro BP
- g) *f2* [Hz]: Frecuencia de corte superior del filtro BP.
- h) *thrshl1*: Umbral para activar la detección del evento.
- i) *thrshl2*: Umbral para actualizar la estimación del ruido sigma.

La tabla 4 muestra los ajustes de estos parametros que se consideran adecuados para la Red Sismológica del Nororiente Colombiano *REDNE*.

Parámetro	Valor ajustado	Explicación
<b>noiseBegin</b> [s]	-10	Se aumenta la ventana de ruido para mejorar la estimación de la señal de fondo.
<b>signalBegin</b> [s]	-20	Se analiza una ventana más amplia antes del trigger para captar posibles precursores sísmicos.
<b>signalEnd</b> [s]	30	Se permite un margen suficiente después del trigger para captar completamente la fase P.
<b>filterType</b>	BP	Se usa un filtro paso banda para eliminar ruido no relevante.
<b>filterPoles</b>	4	Se usan 4 polos para obtener una mejor selectividad del filtro.
<b>f1</b> [Hz]	0.3	Se reduce la frecuencia de corte inferior para captar las ondas P de sismos profundos.
<b>f2</b> [Hz]	8	Se baja la frecuencia de corte superior para evitar incluir señales de mayor frecuencia no relacionadas.
<b>thrshl1</b>	7	Se optimiza el umbral de detección para evitar falsos positivos y captar señales débiles.
<b>thrshl2</b>	14	Se ajusta el umbral de actualización para mejorar la adaptación a cambios en la señal.

Tabla 4: Configuración optimizada del BK Picker para detección de fases P en el Nido Sísmico de Bucaramanga

## Capítulo 4

### Resultados

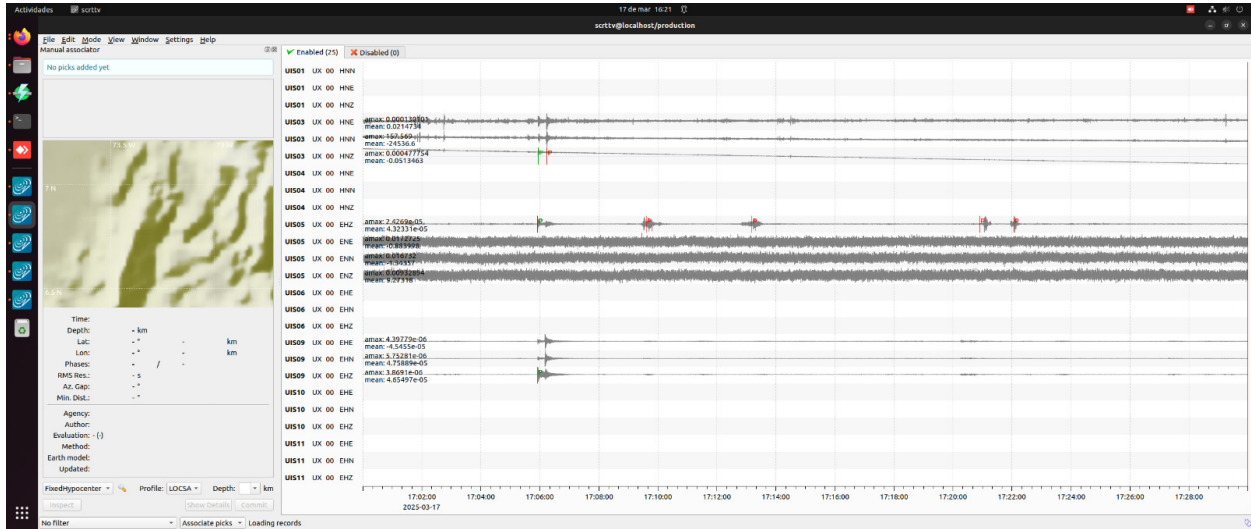


Figura 7: Sismo detectado por estaciones UIS03 UIS05 Y UIS09

La figura 7 muestra el comportamiento de una señal sísmica para la que se usó la detección automática de picos tanto con ajuste de los parámetros(verdes), como se muestra en la figura 8; como sin ajuste de parámetros(rojo). Se puede observar que la detección de los picos mejora considerablemente ya que esta se da en el tiempo inmediato de haber iniciado el cambio en la forma de onda y no transcurrido un tiempo como se estaba ejecutando previo al ajuste en la configuración de fases, con los márgenes de frecuencia ajustados al nido sísmico de Bucaramanga.

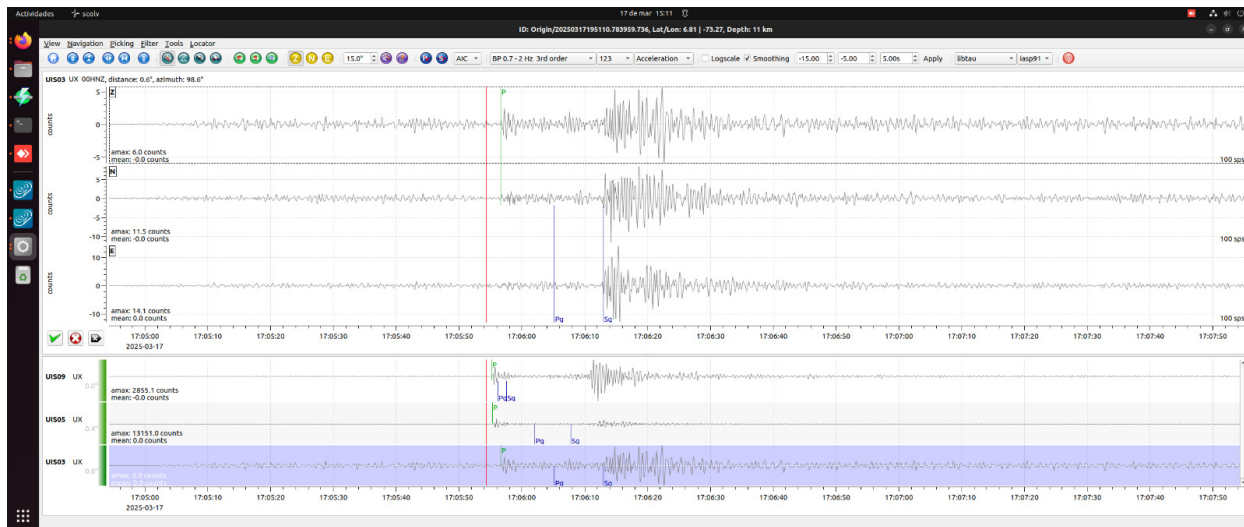


Figura 8: Detección manual de picos del sismo

Con el propósito de realizar una comparación entre los resultados en el cálculo de magnitud de los métodos implementados en los módulos *SCMAG* y *SCAUTOPICK*, se realizó un análisis y ajuste manual de los picks, ajustando ligeramente los valores de ubicación en comparación a los calculados automáticamente. Se realizó el análisis correspondiente en *SCOLV* (ver Anexo B, sección Guías Desarrolladas) y se observó que en la pestaña *MAGNITUDES* se puede corroborar las secciones de onda producidas por el sismo y su magnitud estimada por el módulo. Figura 9

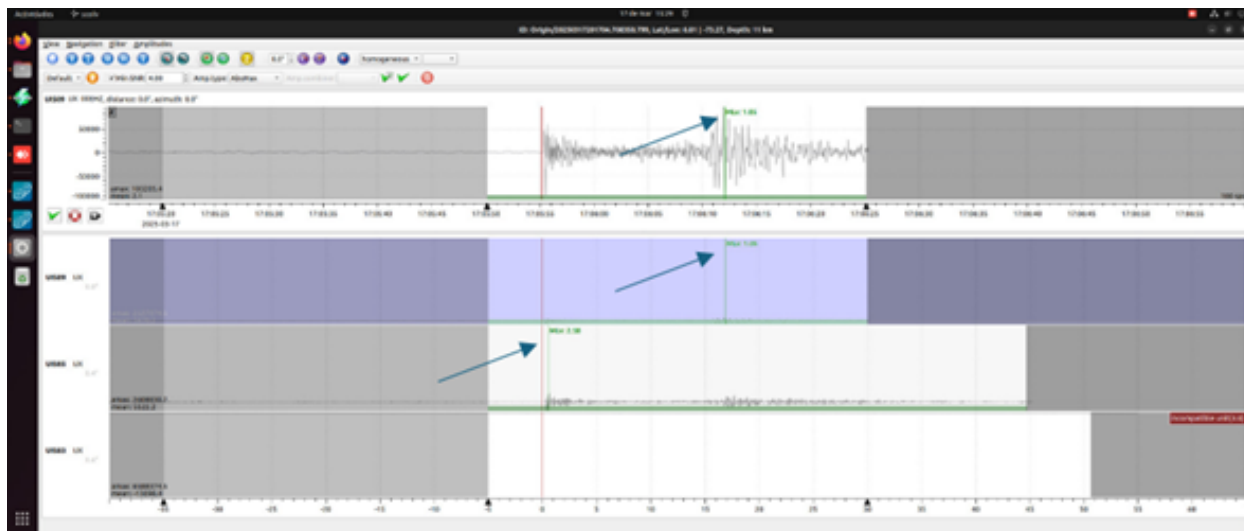


Figura 9: Magnitud  $ML_v$

Se observa en la figura 9 que la estación UIS03 ubicada en Málaga, Santander, no realiza un aporte a la medida de magnitud debido a una incompatibilidad entre las unidades medidas y la estación. El par adicional de estaciones, UIS05 La Esmeralda y UIS09 Zapatoca, realizan sus mediciones correctamente. En el caso de UIS05 ( $ML_v: 2.58$ ) detecta una magnitud superior en comparación con el valor de la estación de Zapatoca ( $ML_v: 1.05$ ); lo que indica que el epicentro del

sismo tiende a estar ubicado hacia esa zona del departamento, conjetura que se confirma con el resultado del calculo de ubicación de el modulo GUI SCOLV, presentado en la parte izquierda de la figura 10

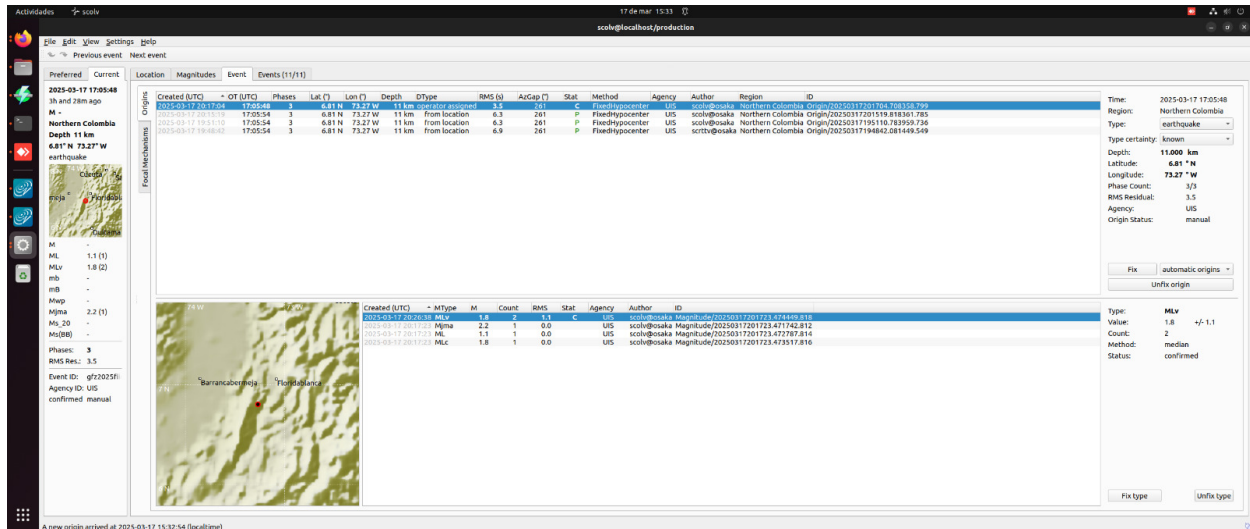


Figura 10: Resumen del evento sísmico

La magnitud total del sismo se calcula realizando un análisis de las magnitudes individuales de las señales de los sismómetros que registraron el sismo; siguiendo la ecuación 4.1

$$w_i = a_i \times stationCount(M_i) + b_i \tag{4.1}$$

Donde los coeficientes  $a_i$  y  $b_i$  representan valores de ajuste para el cálculo de la magnitud, los cuales dependen del valor que presente cada estación.  $w$  es el valor de la magnitud total,  $M$  es la magnitud reportada por cada estación. Es posible determinar de manera empírica dichos valores, pero en este caso, se cuenta con acceso a eventos registrados en grabaciones (los archivos .mseed usados están disponibles en el repositorio del Anexo B sección 5). Se realizó una regresión lineal para determinar tales valores haciendo uso de las amplitudes y magnitudes de estos sismos registrados para los cuales se conocen esos datos de la tabla 5.

Amplitud [nm]	Magnitud
5993	3.2
59127	4.2
46404	4.5
19938	3.9
123147	4.4

Tabla 5: Relación entre amplitud y magnitud de los sismos

Se usó un código en lenguaje python que permitió realizar el cálculo de la regresión lineal para determinar los coeficientes. Este código se encuentra en el Repositorio de GitHub. Luego de

la ejecución del código, los resultados obtenidos fueron:  $a=0.96$   $b=-0.29$  Es posible realizar la clasificación de los sismos mediante un análisis en frecuencia de dichas señales. En la figura 11 se observa el uso de esta herramienta. Las componentes de baja frecuencia se representan en color verde donde se observa la mayor amplitud de la señal y las componentes en alta frecuencia en color azul que son las del ruido constante. Este análisis cobra gran relevancia en el caso de estudio de este proyecto, ya que se pueden detectar los sismos provenientes del nido sísmico de Bucaramanga gracias al conocimiento, por capítulos previos, que la profundidad habitual de los eventos en esta zona es mayor a los 150 km, lo que conlleva a una frecuencia en el rango de [0.7 - 8] Hz, lo que se puede evidenciar en la figura 11.

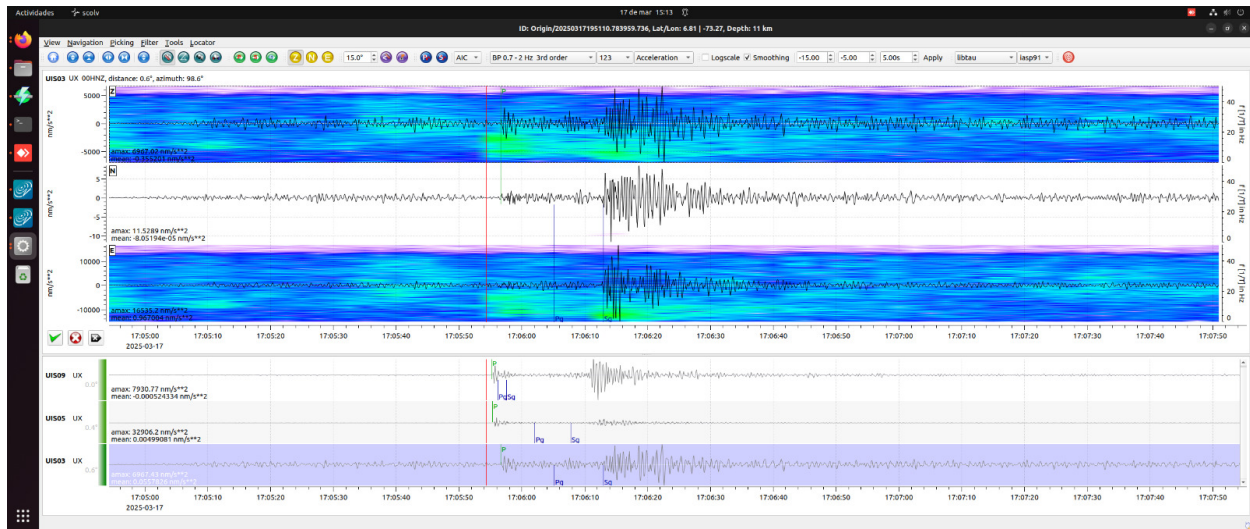


Figura 11: Análisis en frecuencia del evento

Hasta la fecha se presentaron 7 sismos que fueron registrados tanto por el SGC como por REDNE, presentándose los datos comparativos de las tablas 6 y 7

ID	Fecha	Latitud (SGC)	Latitud (REDNE)	Error Lat	Longitud (SGC)	Longitud (REDNE)	Error Lon
1	24/03/2025	6.81	6.81	0.000	-73.155	-73.13	0.025
2	26/03/2025	6.81	6.81	0.000	-73.094	-73.03	0.064
3	17/04/2025	6.793	6.78	0.013	-73.157	-73.14	0.017
4	18/04/2025	6.809	6.81	0.001	-73.129	-73.27	0.141
5	27/04/2025	6.883	6.84	0.043	-73.369	-73.27	0.099
6	29/04/2025	6.576	6.79	0.214	-73.401	-73.27	0.131
7	30/04/2025	6.796	7.13	0.334	-73.159	-73.04	0.119

Tabla 6: Comparación de latitud y longitud entre el SGC y la REDNE, con errores absolutos individuales

ID	Fecha	MAG (SGC)	MAG (REDNE)	Error (abs)
1	24/03/2025	4.0	3.9	0.1
2	26/03/2025	4.6	3.7	0.9
3	17/04/2025	2.8	2.0	0.8
4	18/04/2025	5.2	3.8	1.4
5	27/04/2025	2.9	2.3	0.6
6	29/04/2025	3.2	2.6	0.6
7	30/04/2025	3.1	2.8	0.3

Tabla 7: Comparación de magnitudes entre el SGC y la REDNE, con error absoluto por evento

Se pueden notar diferencias entre las mediciones presentadas en las tablas 6 y 7. Para analizar dichas diferencias, se emplearon las figuras 12 y 13.

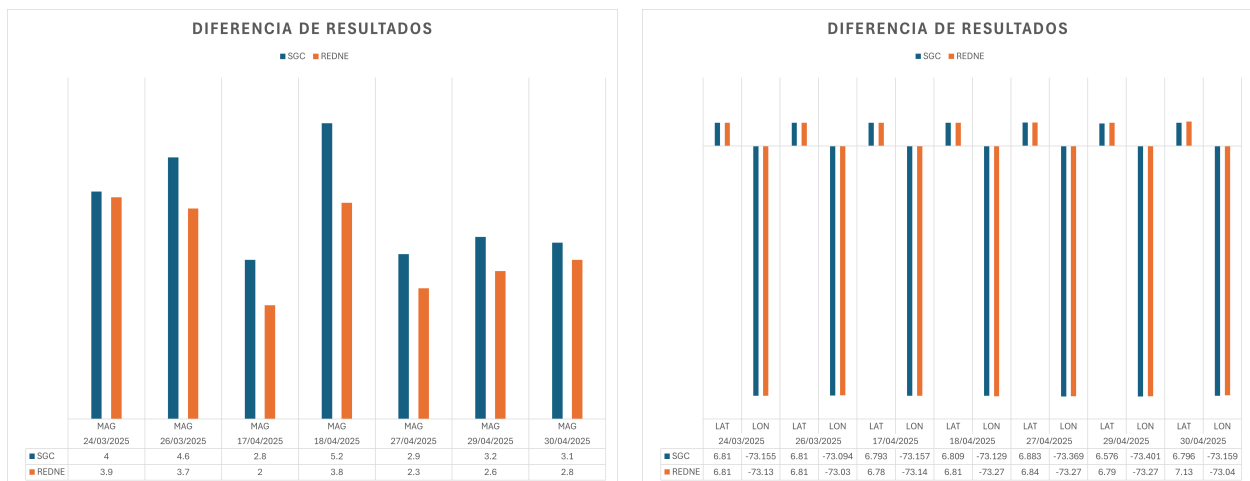


Figura 12: Desviación entre magnitudes (a) y ubicaciones (b) de los sismos

De manera general, se evidencia alta coincidencia en los resultados de latitud (LAT) y longitud (LON). En términos de latitud la diferencia máxima está alrededor de los  $0.334^\circ$  mientras que en longitud está alrededor de  $0.141^\circ$ . Dichos valores representan 36.9 km y 15.7 km de diferencia, respectivamente.

En la figura 13 se muestra la dispersión de los puntos correspondientes a esos valores de longitud y latitud. Para cada evento se realiza la comparación respecto a lo reportado por el SGC y REDNE.

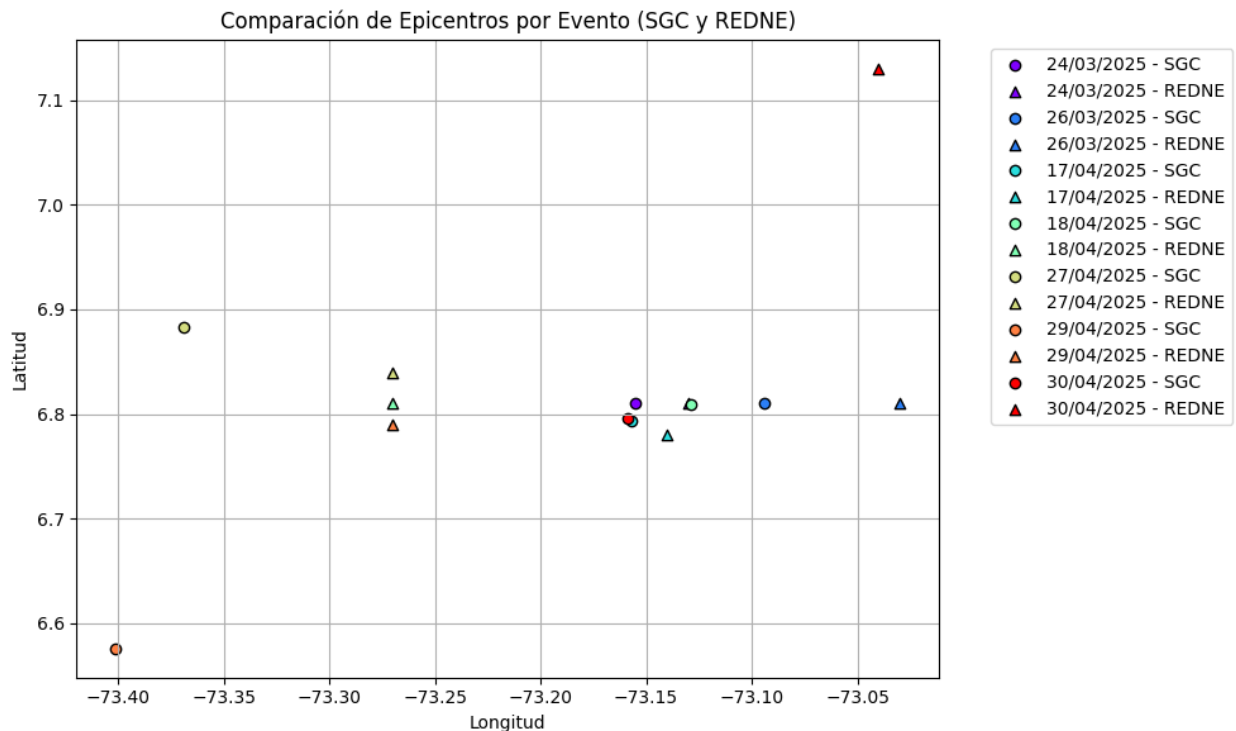


Figura 13: Comparación de epicentros por eventos

La Tabla 8 presenta la diferencia en las distancias epicentrales determinadas por el SGC y la REDNE, y la discrepancia en la estimación de magnitud entre ambas redes.

Fecha	Diferencia entre epicentros (km)
24/03/2025	2.76
30/04/2025	39.39
27/04/2025	11.93
29/04/2025	27.85
17/04/2025	2.37
26/03/2025	7.07
18/04/2025	15.57
<b>PROM</b>	<b>15.28</b>

Tabla 8: Comparación de distancia epicentral entre SGC y REDNE

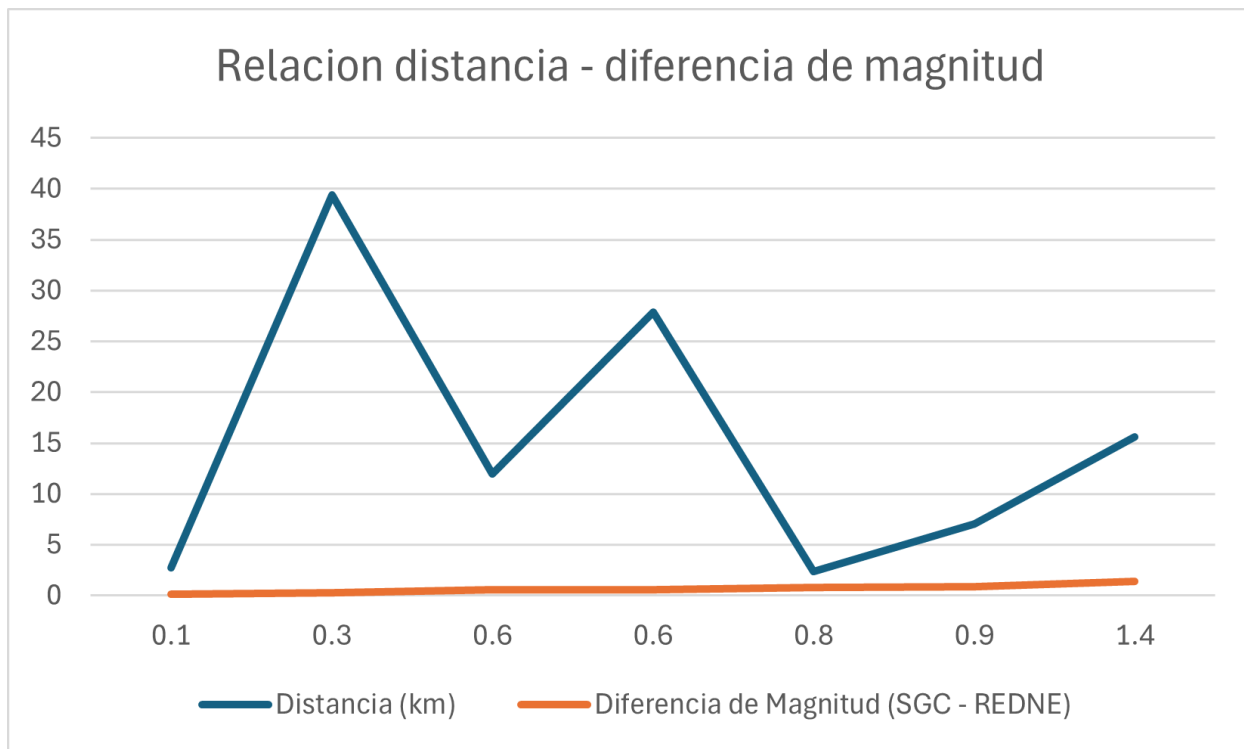


Figura 14: Relación distancia - Magnitud

La figura 14 muestra que no existe tendencia alguna en la relación entre la distancia de epicentros y la diferencia de magnitudes, por lo que se infiere que no existe una correlación entre la magnitud calculada y la distancia epicentral; dado que incluso cuando la distancia varía drásticamente, la diferencia de magnitud se mantiene baja.

Teniendo en cuenta el contexto de trabajo, las diferencias en la ubicación son relativamente pequeñas con respecto al área de estudio que abarca cerca de 128 km<sup>3</sup> [21] lo que valida un funcionamiento adecuado de la red configurada. Adicional, la ubicación de las estaciones tanto del SGC y REDNE son diferentes, así pues como se muestra en las figuras 15 y 16 el SGC dispone de estaciones localizadas lateralmente respecto al Nido Sísmico de Bucaramanga, mientras que la REDNE presenta una distribución circundante, lo que favorece una estimación más representativa y precisa de los parámetros asociados al comportamiento sísmico en dicha región.

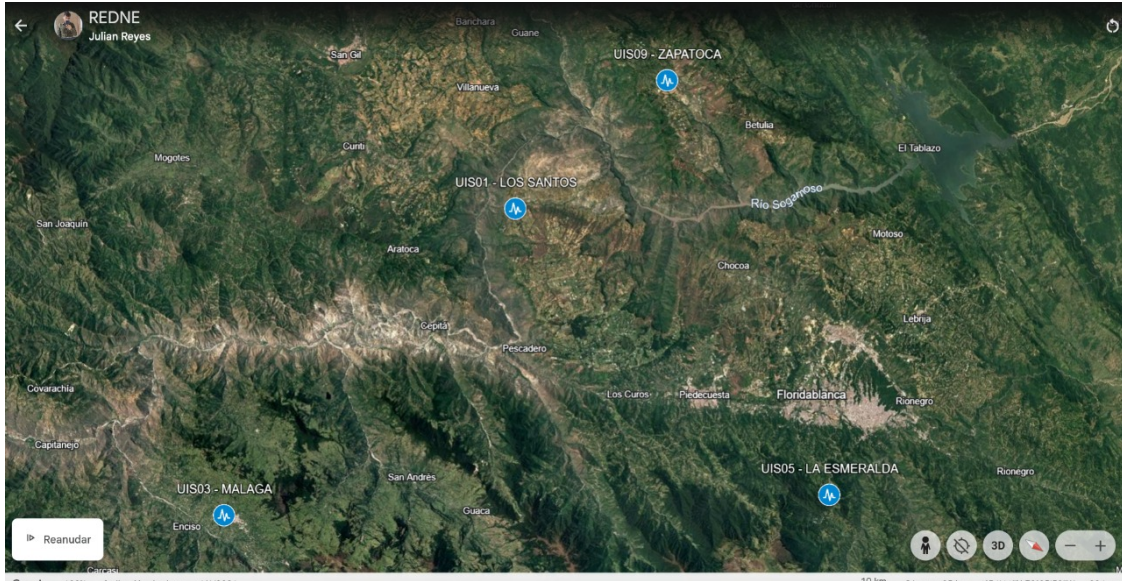


Figura 15: Distribución de estaciones de REDNE

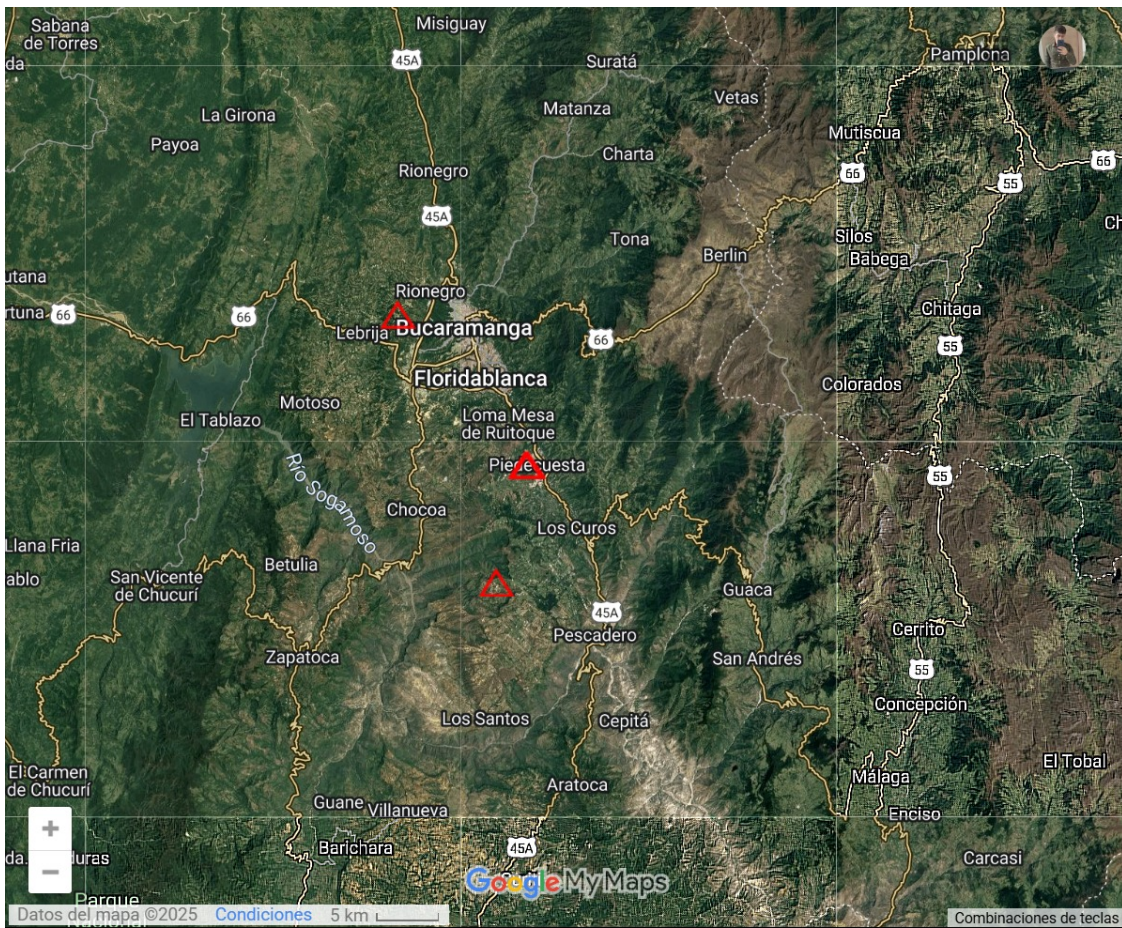


Figura 16: Distribución de estaciones del SGC

Clasificar las diferencias de las magnitudes calculadas por cada red con base a la información de [26], permite analizar las posibles consecuencias que se presentarían debido a una gran diferencia entre medidas.

<b>Rango de Magnitud</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Consecuencias Típicas</b>
2.0 – 3.0	Micro Magnitud	No perceptibles
3.0 – 3.9	Menor Magnitud	Perceptibles con poco movimiento; sin daños
4.0 – 4.9	Ligera Magnitud	Perceptibles con movimiento de objetos; rara vez causa daños
5.0 – 5.9	Moderada (Mediana) Magnitud	Puede causar daños mayores en construcciones débiles o mal construidas
6.0 – 6.9	Fuerte Magnitud	Pueden ser destructivos
7.0 – 7.9	Mayor Magnitud	Pueden ser destructivos en zonas extensas
8.0 – 9.9	Gran Magnitud	Catastróficos; destrucción total en áreas cercanas al epicentro
≥10.0	Épica Magnitud	Nunca registrada; posible extinción local

Tabla 9: Clasificación y consecuencias según rango de magnitud sísmica

Según la tabla 8 la diferencia máxima fue de 1.4 grados de magnitud en la medición del sismo registrado como 3.8 y 5.2 de magnitud en cada una de las redes, esto representa un cambio de clasificación del sismo de menor magnitud a magnitud moderada. Aunque puede activar alertas locales no es causal de activación de protocolos, es una diferencia significativa al momento de realizar diseños estructurales.

enumitem

## Capítulo 5

### Conclusiones

Las nuevas configuraciones en los parámetros de los módulos como *SCAUTOPICK* permite identificar con mayor facilidad los eventos que se registran en el nido sísmico de Bucaramanga. Lo anterior es posible ya que conociendo las características de la zona como la frecuencia a la que ocurren los eventos, se puede configurar de forma más precisa, los parámetros de los módulos permitiendo extraer la información de interés.

Al comparar los resultados obtenidos en este trabajo y los datos proporcionados por la red del Servicio Geológico colombiano, se pueden evidenciar diferencias en el cálculo de magnitud y ubicación relativa del sismo. Lo anterior, no significa que los métodos usados en este trabajo estén mal implementados y diseñados de la misma manera para los del SGC; si no más bien a que la red de estaciones de trabajo para este proyecto está más enfocada y dedicada exclusivamente a esta zona del país, a diferencia del SGC que como se observa en la figura 3 del Apéndice C solo cuenta con 3 estaciones activas para el monitoreo del Nido sísmico, distribuidas en una zona bastante reducida. En su lugar, la REDNE cuenta con 4 estaciones de detección y una mayor cobertura del nido sísmico de Bucaramanga, como se evidencia en la figura 4 del Apéndice C.

Las implementaciones de las nuevas configuraciones se realizaron mediante un método iterativo de prueba y error de funcionamiento. Primero se ajustaron a estaciones de prueba dispuestas en las oficinas del grupo de investigación (Apéndice B) en las cuales se comprobó el correcto funcionamiento; esto con el fin de no ocasionar interferencia en la base de datos de la REDNE si por algún motivo los ajustes quedaron mal hechos. Cuando se obtuvo certeza de su funcionamiento, se procedió a realizar la configuración en la Red Sismológica de Santander y se presentaron los resultados del capítulo anterior.

Durante las pruebas se presentaron algunos inconvenientes como la pérdida de señal de las estaciones sísmicas y retrasos en la adquisición de datos y eventos. Inconvenientes debidos principalmente a que el número de estaciones mínimo requerido para realizar las configuraciones es de 3 unidades. Pese a esto, los datos obtenidos fueron suficientes y adecuados para el análisis de resultados de los módulos configurados.

La variabilidad en los resultados de magnitud de los datos en algunos casos es significativa, para su ajuste se requiere un mayor registro de eventos sísmicos de gran magnitud con el fin de verificar la tendencia de la relación entre la distancia epicentral de las redes y la diferencia de magnitudes de las redes sismológicas.

---

## Bibliografía

- [1] Rey Diego, “Sismos en Colombia: ¿por qué tiembla tanto en Bucaramanga?.” *Infobae*, disponible en Link, 2024. Consultado el 24 de septiembre de 2024.
- [2] Zamora Hernández, Abigail González Navarro, Felix Fernando González López Gloria Ines Ordaz Schroeder Mario Gustavo, “Desarrollo de sistemas de cómputo para el procesamiento de sismos: un reto a superar,” *Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá - Facultad de Ciencias - Departamento de Geociencias*, vol. XXX, p. X, 2012.
- [3] Finanzas Yahoo, “El nido sísmico de Bucaramanga, la casa de 60 temblores diarios,” 2024.
- [4] Seccia Danilo, *Deep Geometry of Subduction Below the Andean Belt of Colombia as Revealed by Seismic Tomography*. PhD thesis, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, 2011.
- [5] National Geographic, “Magnitud e intensidad: Dos maneras diferentes de medir un terremoto,” 01 2020.
- [6] Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS), “How often do earthquakes occur?,” 2025.
- [7] Tarbuck Edward J. and Lutgens Frederick K., *Ciencias de la Tierra: Una Introducción a la Geología Física*. Pearson Educación, 8 ed., 2005.
- [8] Survey U.S. Geological, “Earthquake magnitude, energy release, and shaking intensity,” n.d.
- [9] Aprender es Resiliencia, “La matemáticas de los terremotos,” 2021.
- [10] Serrano Jheyston, Ramirez Ana B., Abreo Sergio, Reyes Oscar, and Florez Manuel, “A framework for full waveform velocity and moment tensor inversion in regional seismotectonic settings,” *Journal of Seismology*, vol. 29, pp. 353–365, 2025.
- [11] Kennett B.L.N. and Engdahl E.R., “Iasp91 velocity model.” <https://ds.iris.edu/spud/earthmodel/9991809>, 1991. Accedido: 2025-05-08.
- [12] Lee W.-H. K., Lahr John C., and Valdes C. M., “Thehypo71 earthquake location program,” *International Geophysics*, vol. 81, no. B, pp. 1641–1642, 2003. Disponible en USGS Publications Warehouse.
- [13] Zuccolo, Elisa, Cremen Gemma Galasso Carmine, “Comparing the performance of regional earthquake early warning algorithms in Europe,” *Frontiers in Earth Science*, vol. 9, 2021.
- [14] Neagoe, Cristian, Grecu Bogdan Manea Liviu Marius, “Improving real-time detection and location of local seismic events in Romania,” *Surveying Geology Mining Ecology Management (SGEM)*, vol. 17, pp. 181–188, 2017.

- 
- [15] Venerdini, Agostina, Sánchez Gerardo Alvarado Patricia Bilbao Inés Ammirati Jean-Baptiste, “Nuevas determinaciones de velocidades de ondas p y ondas s para la corteza sísmica del terreno cuyana en el retroarco andino,” *Revista mexicana de ciencias geológicas*, vol. 33, no. 1, pp. 59–71, 2016.
- [16] Ramírez Ana B., “Informe de la instalación en campo de las estaciones sismológicas de la red redne,” 2022. Universidad Industrial de Santander, disponible en el Anexo 5.1.a del proyecto REDNE.
- [17] for Geosciences Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre and gempa GmbH, “The seiscomp seismological software package,” *GFZ Data Services*, 2008.
- [18] Shake Raspberry, “Specifications for raspberry shake 3d,” 2017. Accessed: March 31, 2025.
- [19] Shake Raspberry, “Specifications for raspberry shake 3d,” 2017. Accessed: March 31, 2025.
- [20] GmbH Gempa, “scautoloc—automatic event detection and location,” s.f. Recuperado el [25-02-2025].
- [21] Sepúlveda-Jaimes F. J. and Cabrera-Zambrano F. H., “Tomografía sísmica 3d del nido sísmico de bucaramanga (colombia),” *Boletín de Geología*, vol. 40, no. 2, pp. 15–33, 2018. n.d.
- [22] Lay Thorne and Wallace Terry C., *Modern Global Seismology*. Academic Press, 1995.
- [23] Mejía-Amaya Jairo, Bernal Gustavo, Clavijo Luis, Martínez Jorge, Monsalve Gabriel, Díaz Jorge, and Ojeda José, “Respuesta del suelo durante el evento del nido sísmico de bucaramanga del 10 de marzo de 2015 (mw 6.4),” *XV Congreso Colombiano de Geotecnia*, 2018. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/328926915>.
- [24] Suares Mg. Javier, “Why do so many earthquakes occur in the bucaramanga nest?,” 2023. Accedido el 10 de marzo de 2025.
- [25] SeisComP Documentation, “Filter grammar - seiscomp,” 2025. List of filters, disponible en: [https://www-seiscomp-de.translate.google.com/doc/base/filter-grammar.html?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=tc#sec-filters-list](https://www-seiscomp-de.translate.google.com/doc/base/filter-grammar.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc#sec-filters-list).
- [26] Gerson Guzmán, “Cómo se clasifican los sismos según su magnitud e intensidades,” 2011. Disponible en: <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/chile/2011/03/29/como-se-clasifican-los-sismos-segun-su-magnitud-e-intensidad.shtml>.
- [27] LocationIQ, “¿qué es la fórmula haversine?,” s.f.
- [28] Servicio Geológico Colombiano, “Reporte de sismo publicado en X,” Mar. 2025. [Tweet].
-

---

## Apéndice A: Parámetros Módulos de Seiscomp

### SCAUTOLOC

#### 1. Locator (Parámetros del Localizador)

- a) **profile**: Define el modelo de velocidad que usará el localizador. En este caso, está configurado en `iasp91`, que es un modelo estándar de propagación de ondas sísmicas.
- b) **defaultDepth [km]**: Profundidad por defecto asignada a los eventos cuando no hay suficiente información para determinarla.
- c) **minimumDepth [km]**: Profundidad mínima permitida para un evento. Evita que el localizador asigne profundidades de 0 km o negativas.

#### 2. Buffer (Control del Almacenamiento Temporal de Objetos)

- a) **pickKeep [s]**: Tiempo en segundos que los picks (detecciones de llegada de ondas) permanecen en el buffer antes de ser eliminados.
- b) **originKeep [s]**: Tiempo en segundos que los orígenes (eventos detectados) permanecen en el buffer antes de ser eliminados.
- c) **cleanupInterval [s]**: Intervalo de tiempo en segundos para limpiar del buffer objetos antiguos o no utilizados.

#### 3. Autoloc (Creación y Reporte de Orígenes)

- a) **maxRMS [s]**: RMS máximo aceptado para reportar una ubicación. Un valor mayor indica más tolerancia a errores en el ajuste del evento.
- b) **maxResidual [s]**: Residual máximo permitido entre los tiempos de llegada observados y teóricos. Controla la calidad de las soluciones.
- c) **minPhaseCount**: Número mínimo de fases sísmicas necesarias para considerar un evento.
- d) **maxDepth [km]**: Profundidad máxima permitida para reportar eventos sísmicos.
- e) **maxSGAP [deg]**: Máximo azimuthal gap permitido. Un valor de  $360^\circ$  sugiere que no se está filtrando por la distribución de estaciones.
- f) **maxStationDistance [deg]**: Distancia epicentral máxima en grados para aceptar picks de estaciones.
- g) **minStaCountIgnorePKP**: Si hay al menos 15 estaciones a menos de  $105^\circ$ , se ignoran las fases PKP (ondas de núcleo).

#### 4. Cálculo de Magnitud y Amplitudes

- a) **amplTypeAbs** = mb: Tipo de amplitud usado para calcular la magnitud. Aquí se usa la magnitud de cuerpo (mb).
- b) **amplTypeSNR** = snr: Indica que se usa la relación señal-ruido (SNR) en la detección de picks.

## 5. Configuraciones de Archivos

- a) **grid** = @DATADIR@/scautoloc/grid.conf: Ruta del archivo de configuración de la cuadrícula de nucleación de orígenes.
- b) **stationConfig** = @DATADIR@/scautoloc/station.conf: Ruta del archivo de configuración de estaciones.
- c) **stationLocations** (vacío): Archivo de estaciones en modo offline (no está configurado en este caso).

## 6. Manejo de Datos Manuales

- a) **useManualPicks** (desactivado): Si se activa, permite procesar picks manuales.
- b) **useManualOrigins** (desactivado): Si se activa, permite procesar eventos manuales.
- c) **adoptManualDepth** (desactivado): Si se activa, se adopta la profundidad de los orígenes manuales.
- d) **tryDefaultDepth** (activado): Compara la profundidad predicha con la profundidad por defecto.

## 7. Registros y Logs

- a) **pickLog** = @LOGDIR@/autoloc-picklog: Ruta donde se almacenan los logs de picks.
- b) **pickLogEnable** (desactivado): Si se activa, registra los picks en el archivo pickLog.

## 8. Parámetros para el Tiempo de Publicación de Eventos

La ecuación utilizada para calcular el tiempo de publicación es:

$$t = aN + b \quad (5.1)$$

donde  $N$  es el número de eventos detectados. Los parámetros son:

- a) **publicationIntervalTimeSlope [s/count]** = 0.5: Parámetro  $a$  en la ecuación.
- b) **publicationIntervalTimeIntercept [s]** = 0.0: Parámetro  $b$  en la ecuación.

## 9. XXL (Detección de Eventos de Gran Magnitud)

Activa la detección de eventos XXL (sismos de gran magnitud). Puede generar falsas detecciones si no se configura bien. Los parámetros son:

- a) **minAmplitude**: Amplitud mínima para que un pick sea considerado XXL.
- b) **minSNR**: Relación señal/ruido mínima para que un pick sea considerado XXL.
- c) **minPhaseCount**: Número mínimo de picks XXL para formar un origen.
- d) **maxStationDistance [deg]**: Distancia máxima entre estaciones para aceptar picks XXL.
- e) **maxDepth [km]**: Profundidad máxima para la creación de orígenes XXL.

## SCEVENT

### 1. Locator (Parámetros del localizador)

- `profile`: Define el modelo de velocidad que usará el localizador. En este caso, está configurado en `iasp91`, que es un modelo estándar de propagación de ondas sísmicas.
- `defaultDepth [km]`: Profundidad por defecto asignada a los eventos cuando no hay suficiente información para determinarla.
- `minimumDepth [km]`: Profundidad mínima permitida para un evento. Evita que el localizador asigne profundidades de 0 km o negativas.

### 2. Buffer (Control del almacenamiento temporal de objetos)

- `pickKeep [s]`: Tiempo en segundos que los picks (detecciones de llegada de ondas) permanecen en el buffer antes de ser eliminados.
- `originKeep [s]`: Tiempo en segundos que los orígenes (eventos detectados) permanecen en el buffer antes de ser eliminados.
- `cleanupInterval [s]`: Intervalo de tiempo en segundos para limpiar del buffer objetos antiguos o no utilizados.

### 3. Autoloc (Creación y reporte de orígenes)

- `maxRMS [s]` RMS máximo aceptado para reportar una ubicación. Un valor mayor indica más tolerancia a errores en el ajuste del evento.
- `maxResidual [s]` Residual máximo permitido entre los tiempos de llegada observados y teóricos. Controla la calidad de las soluciones.
- `minPhaseCount` Número mínimo de fases sísmicas necesarias para considerar un evento.
- `maxDepth [km]` Profundidad máxima permitida para reportar eventos sísmicos.
- `maxSGAP [deg]` Máximo azimuthal gap permitido. Un valor de  $360^\circ$  sugiere que no se está filtrando por la distribución de estaciones.
- `maxStationDistance [deg]` Distancia epicentral máxima en grados para aceptar picks de estaciones.
- `minStaCountIgnorePKP` Si hay al menos 15 estaciones a menos de  $105^\circ$ , se ignoran las fases PKP (ondas de núcleo).

#### Cálculo de magnitud y amplitudes

- `ampTypeAbs = mb` Tipo de amplitud usado para calcular la magnitud. Aquí se usa la magnitud de cuerpo (mb).
  - `ampTypeSNR = snr` Indica que se usa la relación señal-ruido (SNR) en la detección de picks. Configuraciones de archivos
  - `grid = @DATADIR@/scautoloc/grid.conf` Ruta del archivo de configuración de la cuadrícula de nucleación de orígenes.
-

- stationConfig = @DATADIR@/scautoloc/station.conf Ruta del archivo de configuración de estaciones.
- stationLocations (vacío) Archivo de estaciones en modo offline (no está configurado en este caso). Manejo de datos manuales
- useManualPicks (desactivado) Si se activa, permite procesar picks manuales.
- useManualOrigins (desactivado) Si se activa, permite procesar eventos manuales.
- adoptManualDepth (desactivado) Si se activa, se adopta la profundidad de los orígenes manuales.
- tryDefaultDepth (activado) Compara la profundidad predicha con la profundidad por defecto.

#### Registros y Logs

- pickLog = @LOGDIR@/autoloc-picklog Ruta donde se almacenan los logs de picks.
- pickLogEnable (desactivado) Si se activa, registra los picks en el archivo pickLog.

#### Parámetros para el tiempo de publicación de eventos

- publicationIntervalTimeSlope [s/count] = 0.5 Parámetro  $a$ .<sup>en</sup> la ecuación  $t = aN + b$ , donde N es el número de eventos detectados.
- publicationIntervalTimeIntercept [s] = 0.0 Parámetro  $b$ .<sup>en</sup> la ecuación  $t = aN + b$ .

4. **XXL** Activa la detección de eventos XXL (sismos de gran magnitud). Puede generar falsas detecciones si no se configura bien.

- minAmplitude: Amplitud mínima para que un pick sea considerado XXL.
- minSNR: Relación señal/ruido mínima para que un pick sea considerado XXL.
- minPhaseCount: Número mínimo de picks XXL para formar un origen.
- maxStationDistance [deg]: Distancia máxima entre estaciones para aceptar picks XXL.
- maxDepth [km]: Profundidad máxima para la creación de orígenes XXL.

## SCAUTOPICK

### 1. Global Parameters

- ringBufferSize Tamaño del búfer en segundos para almacenar registros
  - leadTime tiempo antes del presente en que se empiezan a detectar eventos
  - playback permite hacer detecciones en datos históricos
  - initTime tiempo necesario tras la inicialización para estabilizar el filtro
  - gapInterpolation habilita la interpolación lineal de pequeñas brechas de datos
  - useAllStreams usa todos los flujos de datos disponibles para la detección
  - filter filtro predeterminado utilizado para hacer detecciones
-

- timeCorrection la corrección de tiempo aplicada para una selección
- picker algoritmo usado para refinar detecciones
- phaseHInt tipo de fase sísmica asignada asignada a una detección
- sendDetections envía detecciones preliminares como eventos rechazados para depuración
- spicker algoritmo secundario para detectar fases S
- killPendingSPickers desactiva detectores secundarios si una nueva detección ocurre
- extraPIckComments agrega información adicional a las detecciones (SNR, Duración)
- fx Algoritmo de extracción de características para localizar eventos
- amplitudes tipos de amplitud calculados a partir de detecciones

## 2. thresholds

- triggerOn nivel máximo de señal para activar una detección
- triggerOff nivel de señal mínimo para permitir una nueva detección
- maxGapLength brecha máxima en segundos antes de reiniciar el detector
- amplMaxTimeWindow ventana de tiempo para calcular máximos de amplitud
- deadTime tiempo mínimo entre detecciones para evitar falsas alarmas
- minAmplOffset desplazamiento mínimo para calcular la amplitud de la señal
- minDuration duración mínima para validar un evento
- maxDuration duración máxima permitida para un evento detectado

## 3. Amplitudes

- enableUpdate habilita la actualización de parámetros en tiempo real

## 4. Connection

- amplitudeGroup grupo de parámetros usados para calcular amplitudes

## 5. Coments

- ID identificador único del parámetro
- text información descriptiva o comentario asociado al parámetro

## SCMAG

### 1. magnitudes

- Valor: MLv, mb, mB, Mwp Indica los tipos de magnitudes sísmicas que se van a calcular.
  - MLv: Magnitud local basada en velocidad.
  - mb: Magnitud de ondas de cuerpo (Body-wave magnitude).
-

- mB: Otra variante de magnitud de ondas de cuerpo.
  - Mwp: Magnitud de momento basada en ondas P.
2. minimumArrivalWeight Representa el peso mínimo de una llegada (arribo de ondas) para ser considerada en los cálculos de magnitud. Un valor más alto filtra datos menos confiables.
  3. magnitudes average Valor: default Especifica el método para calcular la magnitud de la red a partir de magnitudes de estaciones. default usa el método estándar de SeisComP, que suele ser el promedio de magnitudes individuales.
  4. summaryMagnitude (Magnitud Resumen)
    - enabled → Activado, lo que significa que se calculará la magnitud resumen.
    - type → "M" → Define el nombre/tipo de la magnitud resumen.
    - minStationCount → 1 → Se requiere al menos 1 estación para calcular la magnitud resumen.
    - singleton → Permite calcular la magnitud resumen incluso si solo hay una estación disponible.
    - blacklist → "mB, Mwp" → Excluye las magnitudes mB y Mwp del cálculo de la magnitud resumen.
    - whitelist → Vacío → No hay una lista específica de magnitudes incluidas (se usarán todas excepto las excluidas en blacklist).

#### 5. coefficients

Define los coeficientes para ponderar las magnitudes de la red. La fórmula usada es:

$$\text{Peso} = a \times \text{magnitudStationCount} + b$$

## SCOLV

- **Conectado a la mensajería:** en este modo, Scoln trabaja en un modo online en donde se conecta a la mensajería en tiempo real y actualiza los parámetros de eventos de manera continua. Adicionalmente en este modo, la herramienta esta conectada directamente a las estaciones de medición.
- **Sin conexión a la mensajería:** En este modo(offline) la herramienta carga los datos desde archivos XLM o desde la base de datos locales que contienen los valores de los parámetros. Los nuevos parámetros son también guardados en archivos XLM.

A su vez, la ventana principal de la herramienta interactiva de Scoln tiene 4 perspectivas(pestañas) desde las cuales se pueden abrir ventanas externas.

---

- **Pestaña de Ubicación:** Muestra información asociada a fases, residuos, hipocentros, tiempo, distribución de la estación y ayuda a encontrar valores atípicos. Todo esto se hace sobre un origen elegido. Además muestra un mapa con la ubicación del evento. La información de los parámetros ya mencionados así como de otros tantos, se puede ver haciendo uso de una tabla en la cual se pueden activar los que se desean dejar visibles y dejando inactivos aquellos no deseados. Igualmente, la pestaña de ubicación presenta una sección de diagramas o gráficas que se pueden activar de acuerdo al análisis que se desea realizar solo dando click en cada una de las pestañas que se presentan en esta sección. Adicionalmente se puede visualizar la forma de onda en el tiempo de los eventos con valores de parámetros deseados como puede ser selección de fase, selección de incertidumbres, selección de polaridades entre otros.
- **Pestaña de Magnitud:** Esta pestaña permite visualizar toda la información con referente a la magnitud del origen actual o presenta la posibilidad de recalcular dicha información después de crear un nuevo origen. Para los diferentes tipos de magnitud (por ejemplo mb, mB, MLv) se puede visualizar la información mediante tablas y gráficas. Las gráficas residuales presentan la diferencia entre la magnitud de la estación y la magnitud de la red. Esta última se calcula a partir de las correspondientes magnitudes de las estaciones. Adicionalmente, permite ver las formas de ondas en el tiempo de los eventos con su correspondiente amplitud. Esta pestaña también incluye una visualización en el mapa del evento.
- **Pestaña de Evento:** Por su parte, la pestaña de evento presenta toda la información del tipo de magnitud deseada y origen del evento actual seleccionado. Al igual que las otras pestañas la visualización de la información es mediante tablas que permite ver detalles del origen, lista de magnitudes, mecanismo focales y tensores de momentos para el evento seleccionado de la lista de eventos disponibles.
- **Pestaña de Eventos:** Esta última pestaña ofrece una descripción general de los eventos en un intervalo de tiempo definido. La visualización se hace mediante una tabla en la cual se lista el número de eventos junto con información acerca de tiempo de origen, mejor tipo de magnitud, magnitud preferida, número de fases, epicentro, profundidad, región, agencia e Identificación del origen o evento.

## SCAUTOLOC

1. **Filtrado de las fases:** Como primer paso el módulo recibe y filtra las selecciones de fases y genera orígenes. Las selecciones de fase son usadas en otros módulos si cumplen las condiciones impuestas (Ver ??) de lo contrario se ignora. De igual manera, si una estación genera señales con alta frecuencia es necesario aumentar el umbral de SNR para evitar falsas detecciones, pues dichas selecciones se consideran ruido o errores de la estación.
2. **Asociación de picos:** Se intenta asociar la selección entrante proveniente del filtro con un origen conocido. Si la asociación se hace de manera correcta se evita la nucleación. La asociación está limitada por la distancia epicentral la cual se configura en el parámetro de `auto-loc.maxStationDistance`.

3. **Nucleación del origen:** Si la asociación directa no se lleva a cabo de manera correcta, se acude a la nucleación en donde se genera un nuevo origen a partir de la selección de fase y otras que no están asociadas. Para ello, el módulo toma puntos de una cuadrícula predefinida (archivo configurado en outoloc.grid) en el espacio y el tiempo y prueba estos como si fuera un hipocentro hipotético de las selecciones entrantes.
  4. **Refinamiento de Origen:** Los orígenes generados por los procesos anteriores pueden presentar errores por lo que basándose en el SNR y la amplitud de las selecciones se hace una mejora de estos.
  5. **Filtrado de Origen:** En este paso final, el módulo se encarga de verificar la calidad de los orígenes haciendo una validación del cumplimiento de criterios heurísticos configurables tales como: Número mínimo de fases por origen, residuo de la estación, RMS del origen, entre otros. Aquí no se realizan modificaciones solo verificación.
-

---

## **Apéndice B: Guías y repositorio**

A continuación, se presentan las guías desarrolladas durante la implementación de los módulos y estaciones sísmicas:

- Adecuación de las estaciones y puesta en funcionamiento.
- Informe SCOLV y SCRTTV.

### **Repositorio con metadatos e información del proyecto**

REPOSITORIO.GIT

---

## Apéndice C: Resultados adicionales e información de estaciones

### Resultados interpolaciones

#### 1. Interpolación Lineal

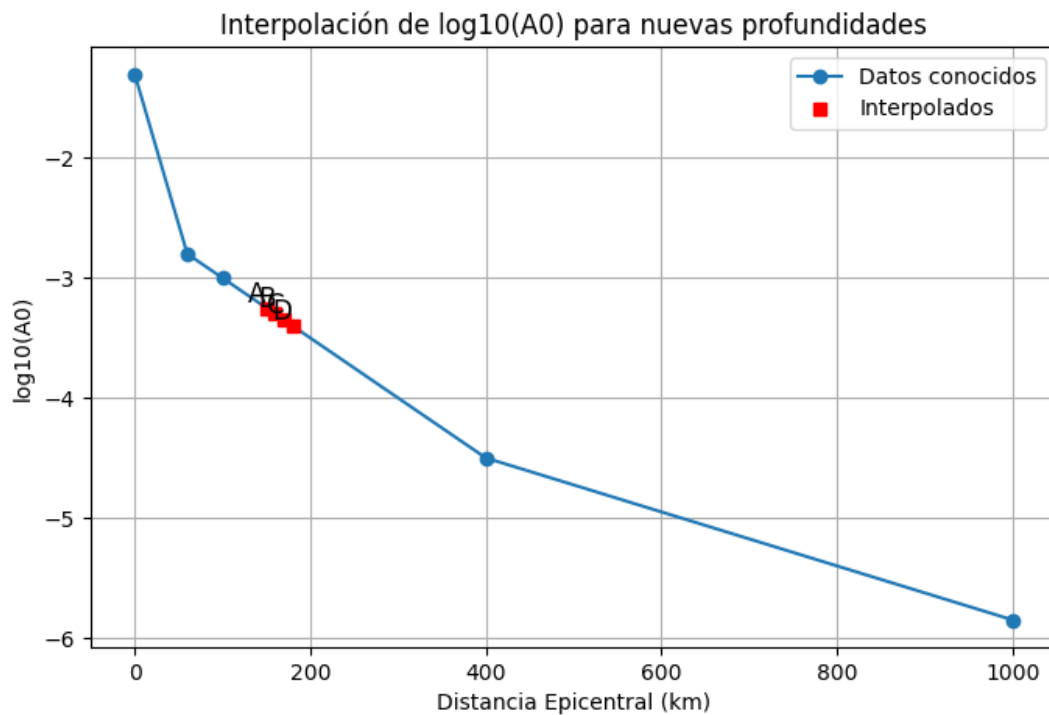


Figura 1: Interpolación Lineal

#### 2. Interpolación por modelo de atenuación exponencial

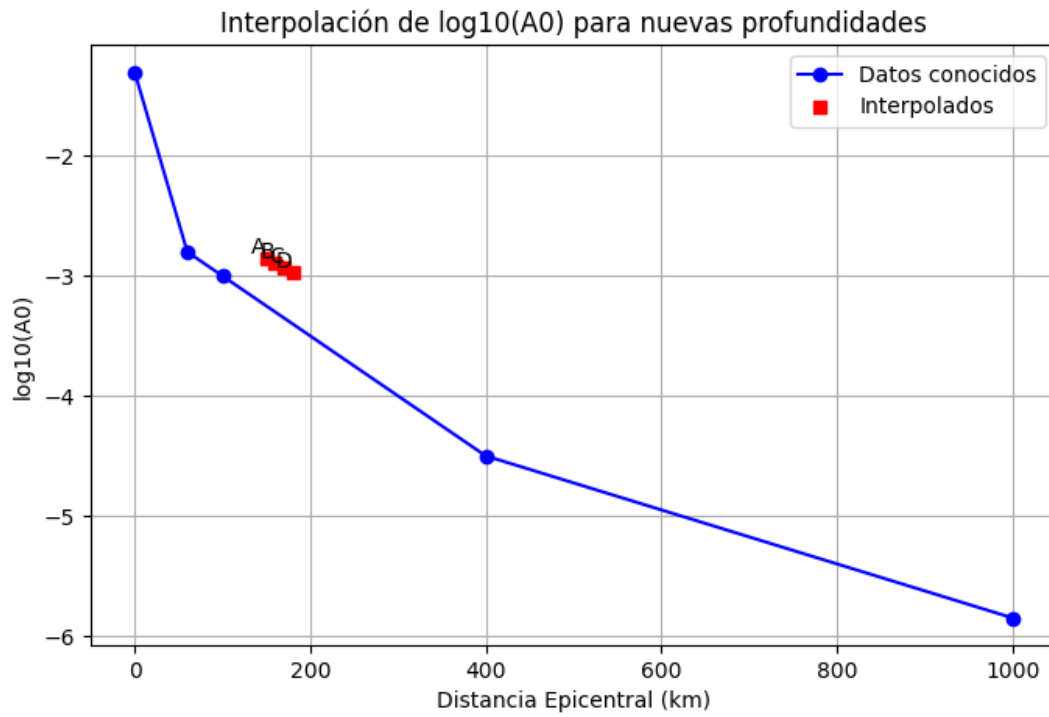


Figura 2: Modelo de atenuación exponencial

**Ubicación de estaciones de las entidades**

1. SGC

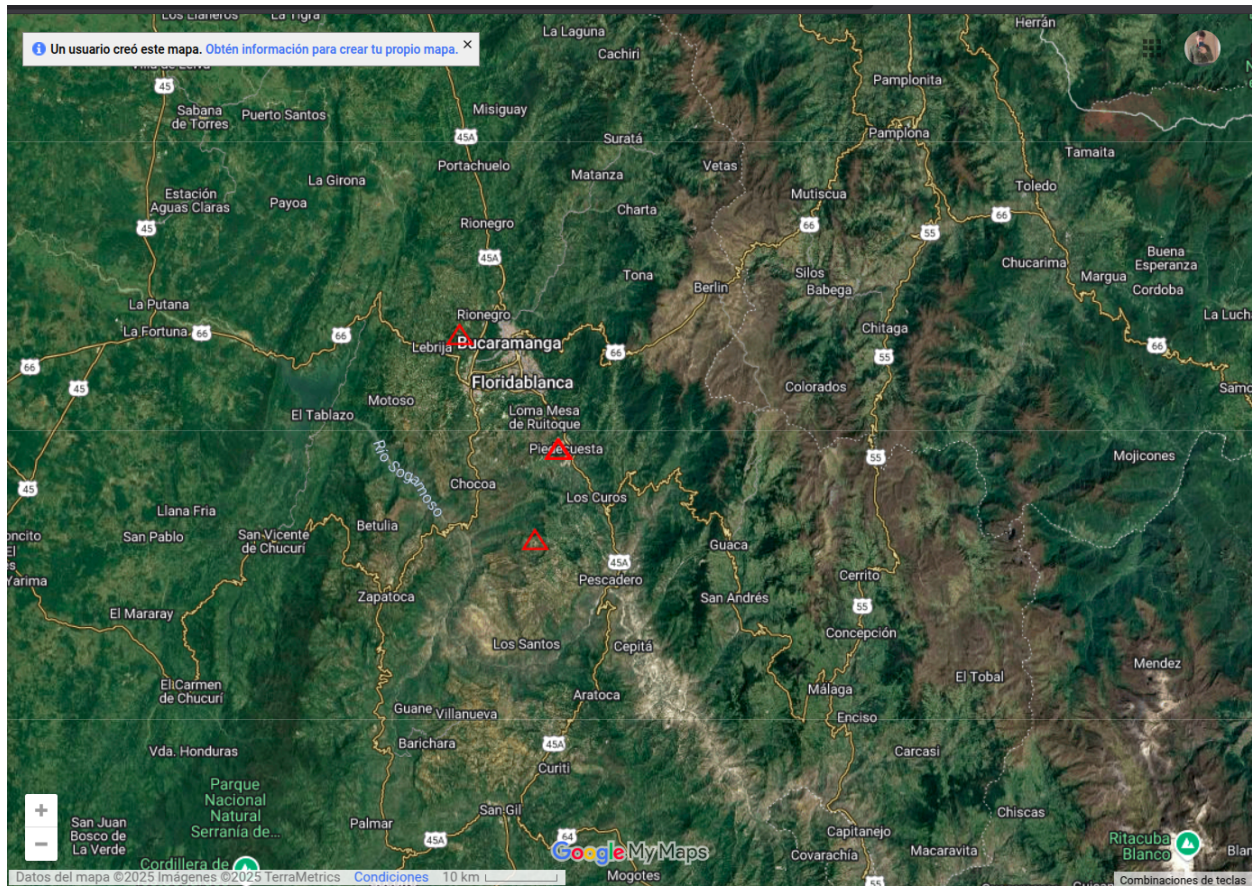


Figura 3: Estaciones activas del SGC

## 2. REDNE

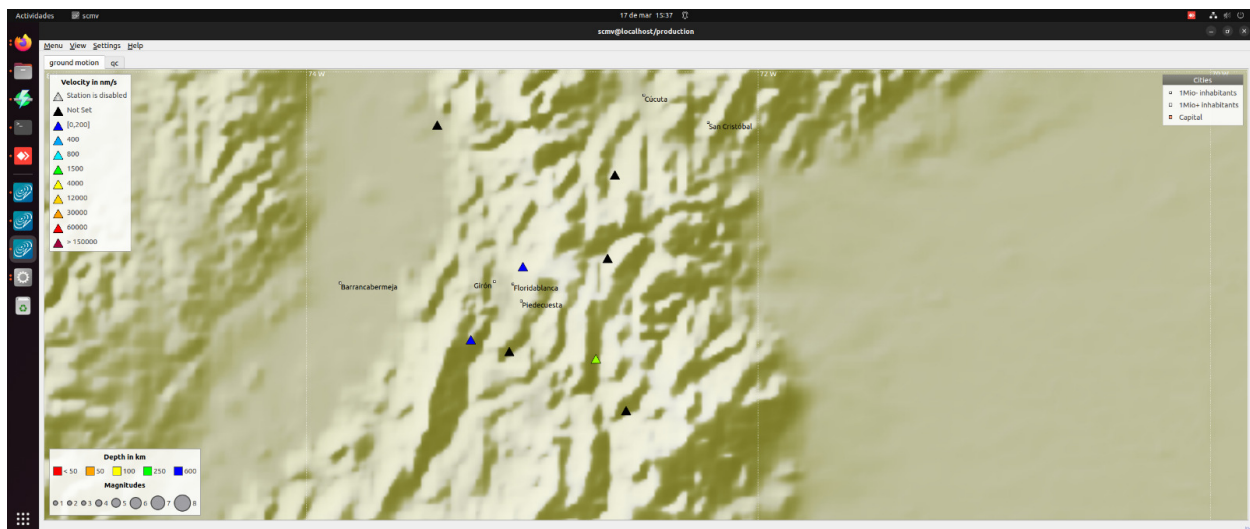


Figura 4: Estaciones activas REDNE

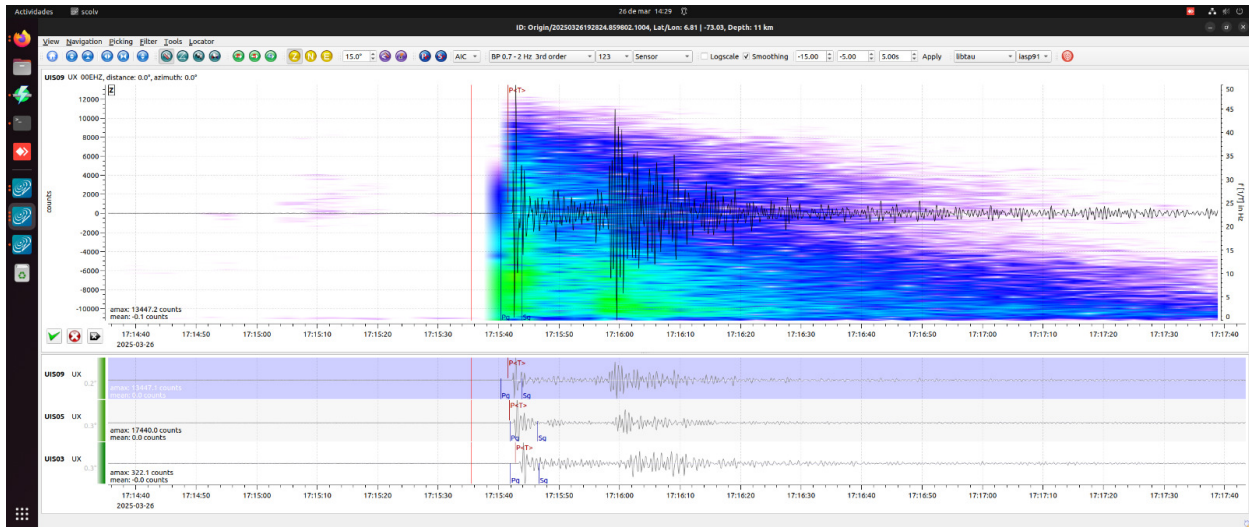


Figura 6: Frecuencias para evento 26 de marzo

confirmación de frecuencias

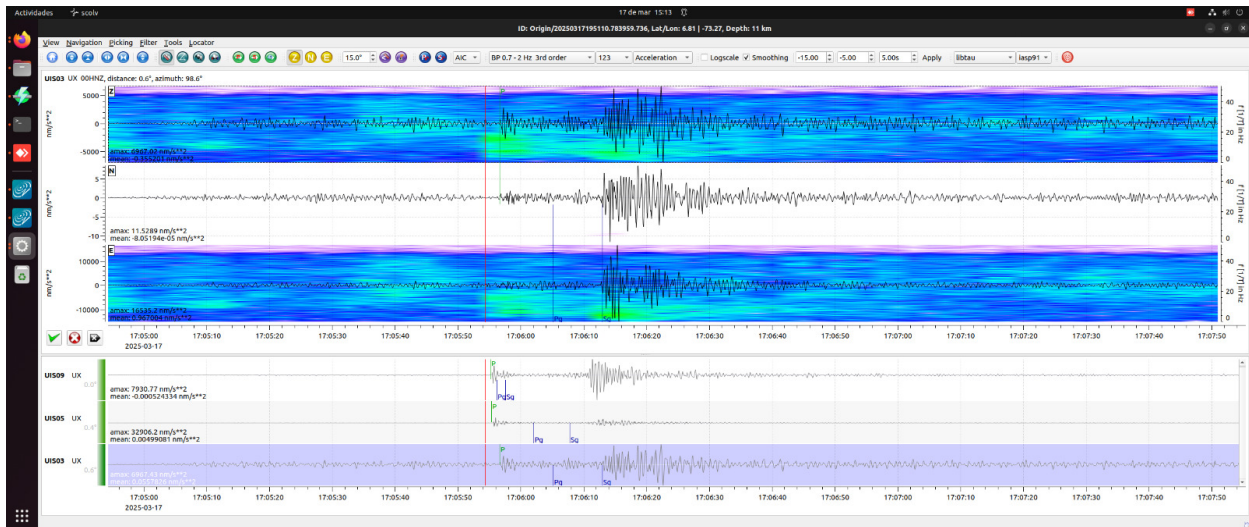


Figura 5: Rangos de frecuencias de los sismos detectados por REDNE

### Eventos no detectados por el SGC

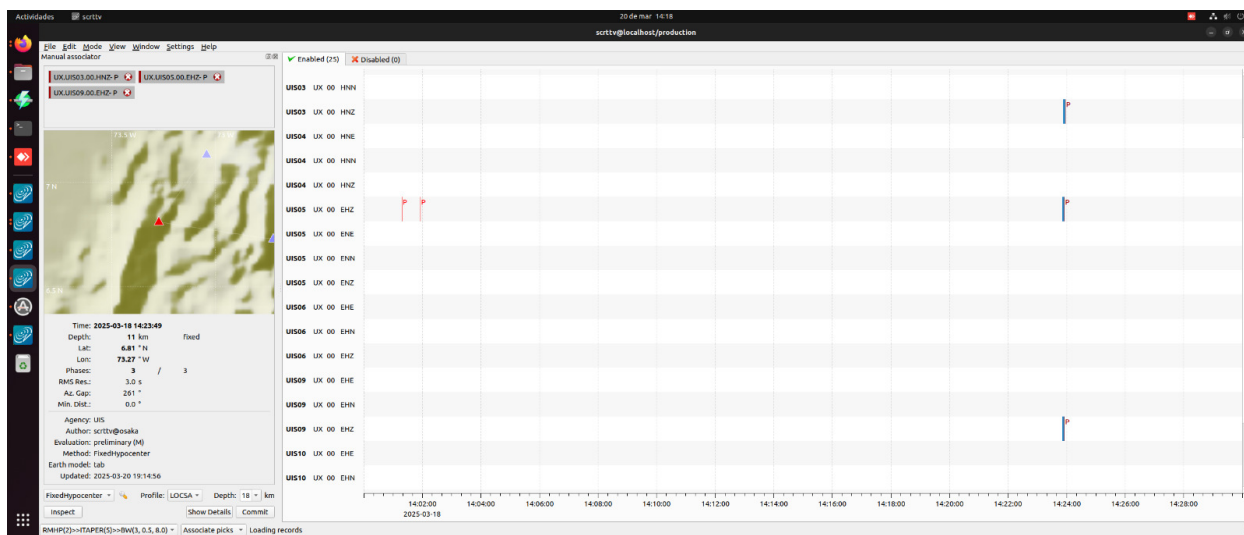


Figura 7: Sismo detectado por 3 estaciones

En la figura anterior, no se pueden apreciar las formas de onda del evento sísmico, solo se muestran picks que informan el evento. Esto se debe a que el análisis está fuera de buffer (memoria temporal del servidor de SeisComP), sin embargo, podemos confirmarlo gracias al servicio geológico, como se muestra en la figura 8

Fecha-Hora (UTC)	Lat (°)	Long (°)	Prof (km)	Mag	Tipo	Fases	Num (fases)	Gap (°)	Error Lat (km)	Error Long (km)	Error Prof (km)	Region	QuakeML	Fases	Mapa	Estado
2025-03-18 07:23:02	6.749	-73.065	106.61		Mlz_3		11	0.3	3.323	3.323	2.90	Los Santos - Santander, Colombia				normal

Figura 8: Evento registrado por el servicio geológico colombiano

Podemos verificar información como magnitud y ubicación en la siguiente tabla.

Parámetro	SGC	REDNE
Latitud (°)	6.749	6.81
Longitud (°)	73.065	73.27
Magnitud $M_w$	1.7	2.4

Tabla 1: Comparación de parámetros sísmicos entre el SGC y la REDNE

Haciendo uso de estos datos, se puede calcular la distancia entre las ubicaciones de ambas mediciones tanto del SGC como de REDNE. Para ello, se hace uso de la fórmula de Haversine [27] (el código usado para este cálculo se encuentra en el disponible en el Repositorio de GitHub), arrojando un resultado de 23.6 km de distancia entre los puntos, tal como se observa en la figura 9

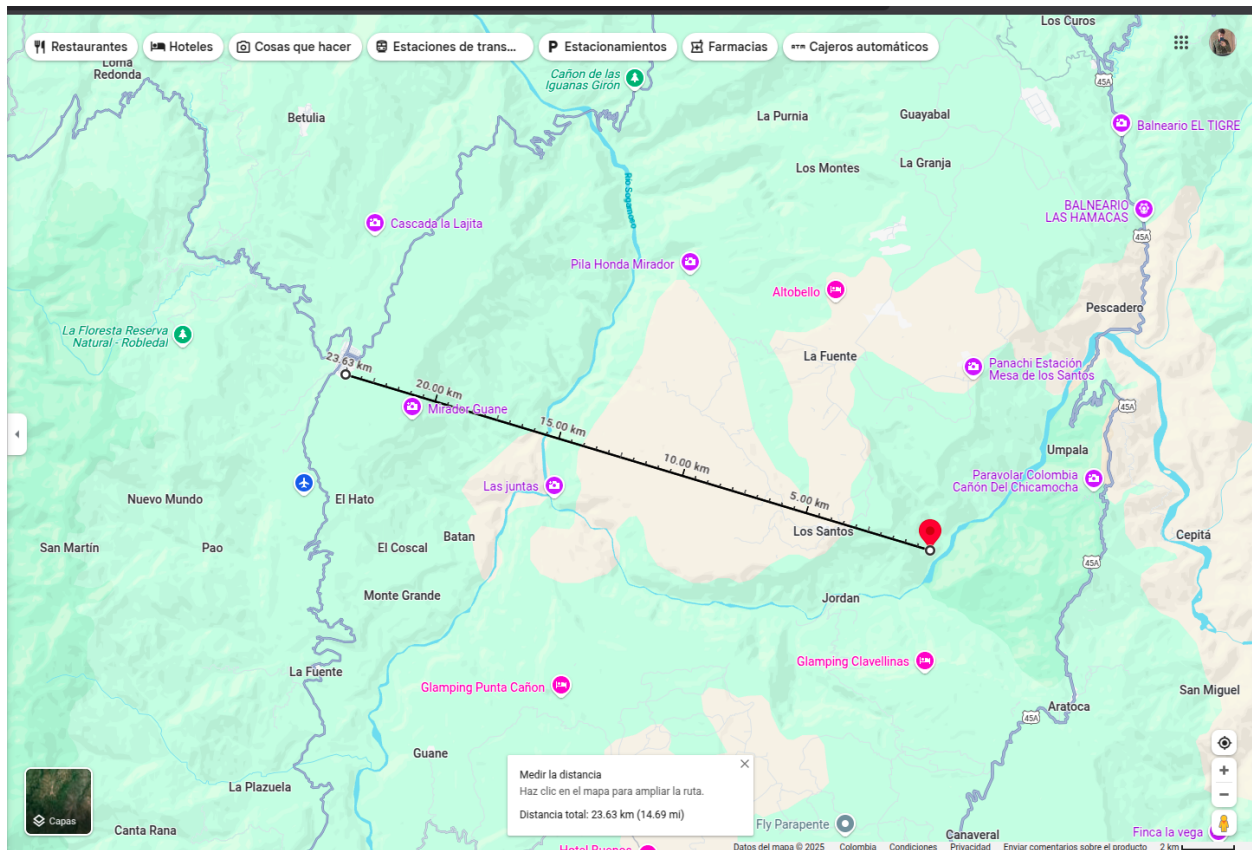


Figura 9: Distancia calculada en google maps

De acuerdo al SGC, el día lunes 24 de marzo de 2025 se presentó un evento sísmico de magnitud 4.0 ubicado en la Mesa de Los Santos, Santander, según el informe publicado en su cuenta oficial de X[28] Se puede ver en la figura 10.



Figura 10: Información del evento sísmico según el SGC

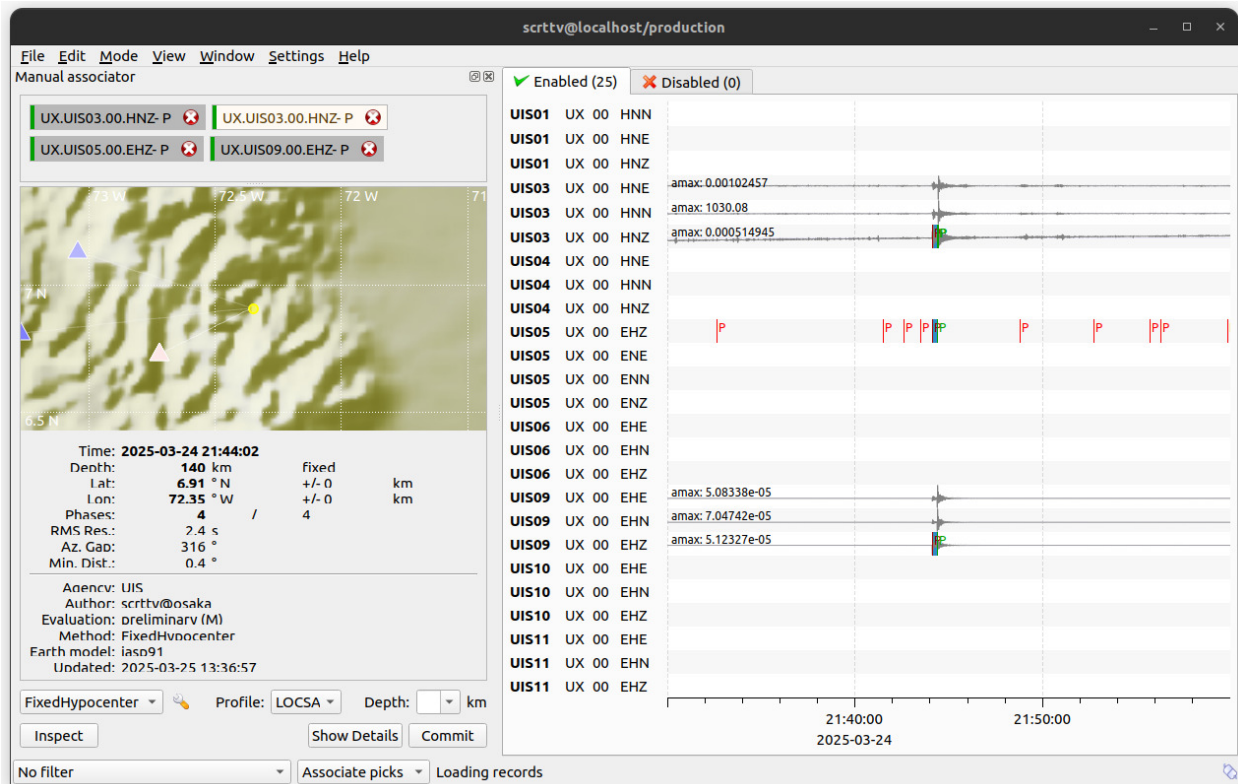


Figura 11: Detección de sismo del 24 de marzo

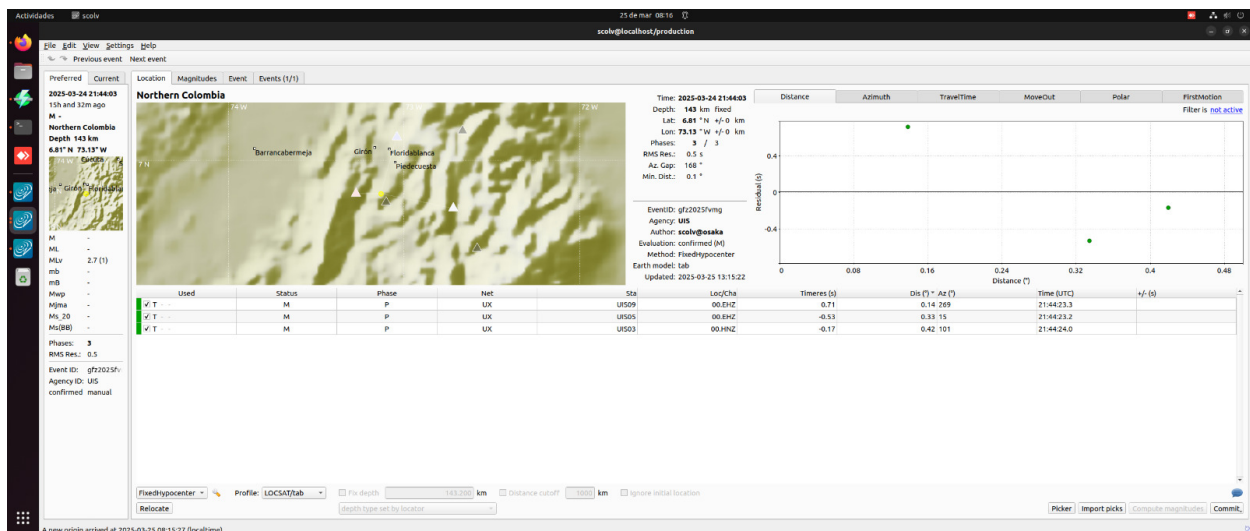


Figura 12: Registro de evento del 24 de marzo por REDNE

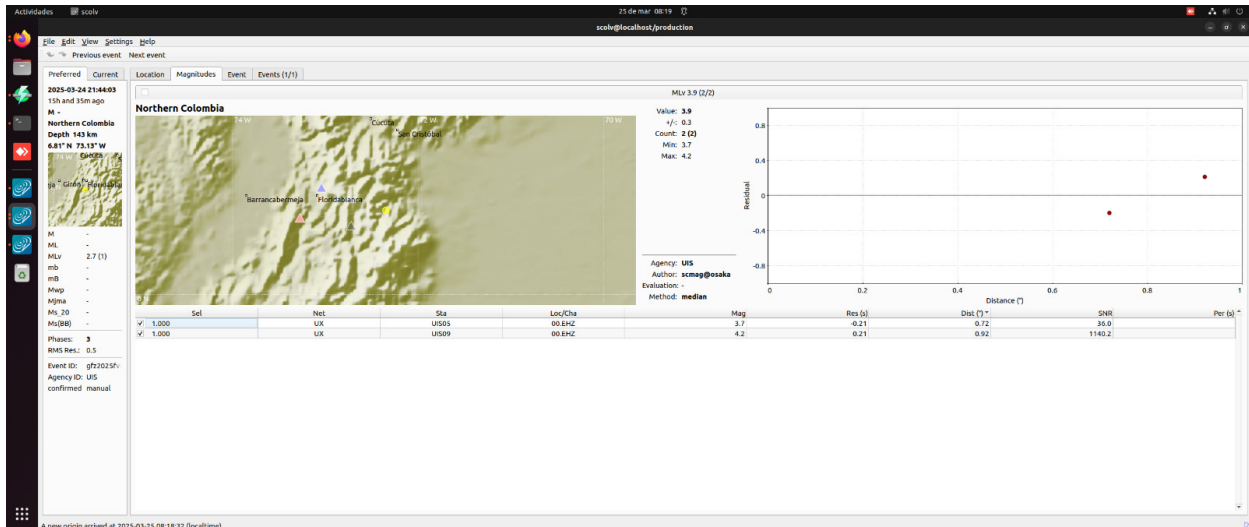


Figura 13: Magnitud calculada por el modulo para evento del 24 de marzo



Figura 14: Información del evento según el SGC

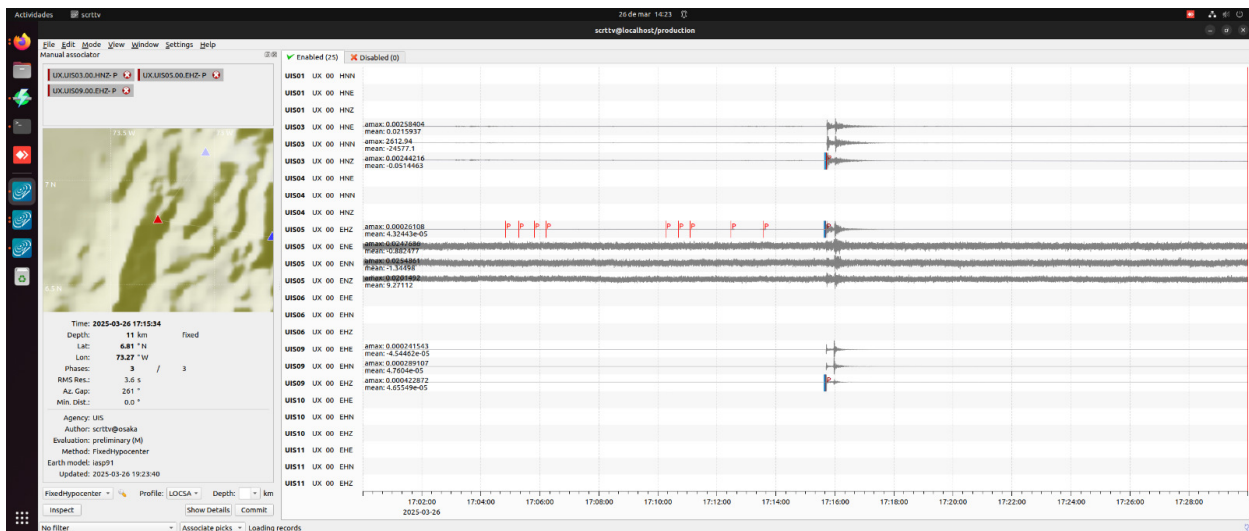


Figura 15: Detección del evento en REDNE

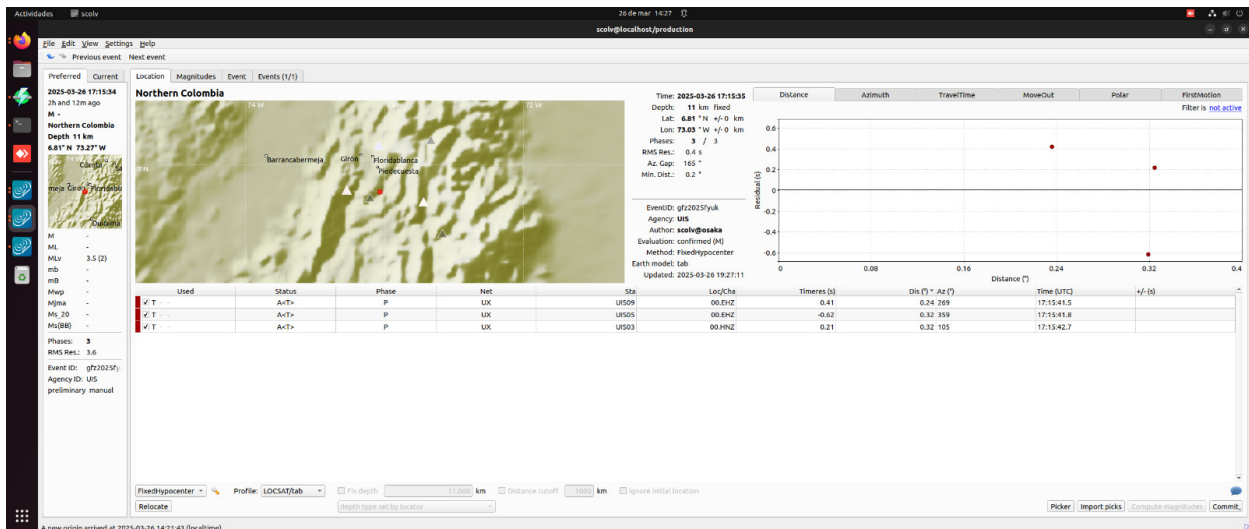


Figura 16: Registro de evento del 26 de marzo

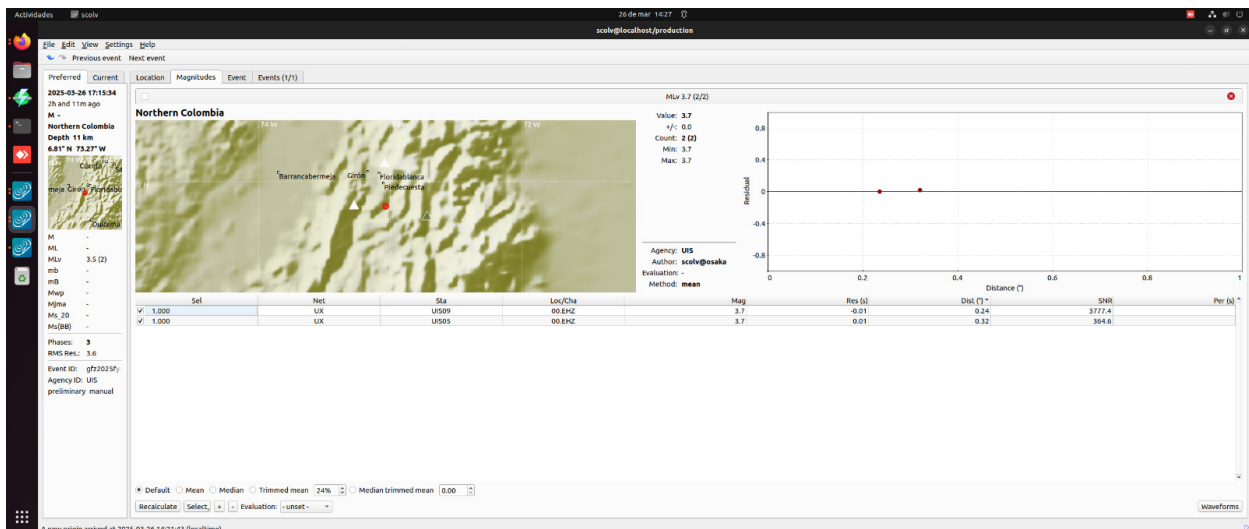


Figura 17: Magnitud calculada por el modulo para evento del 26 de marzo



Figura 18: evento reportado por el SGC



Figura 19: Detección en REDNE



Figura 20: Magnitud calculada

**Sismo confirmado 18 de abril de 2025**



Figura 21: confirmacion por el SGC



Figura 22: Detección de REDNE



Figura 23: Magnitud calculada

**Sismo confirmado 27 de abril de 2025**



Figura 24: Reporte del SG

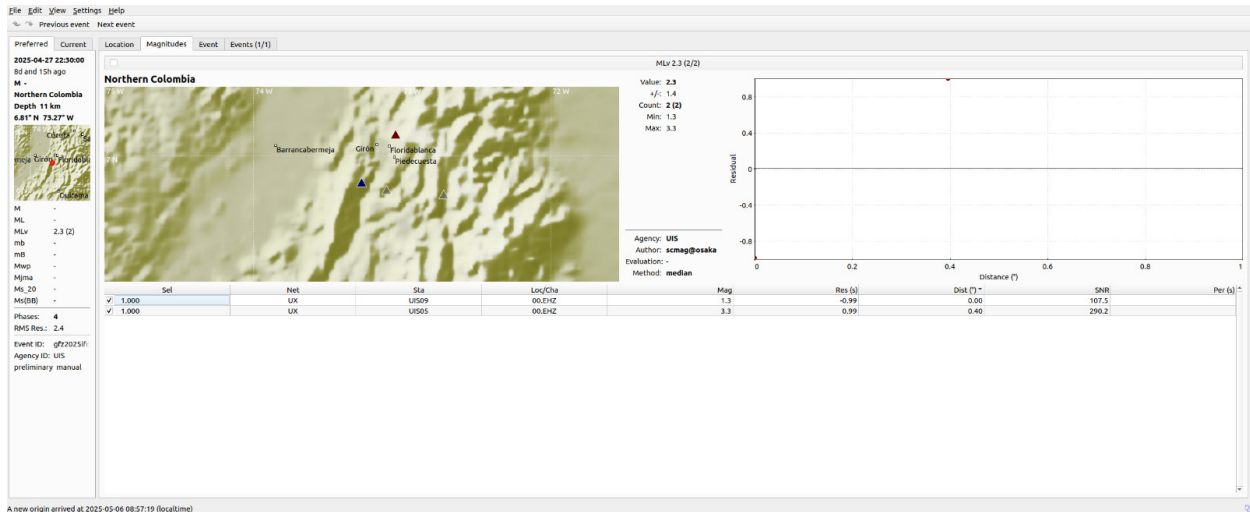


Figura 25: Análisis de REDNE

Sismo confirmado 29 de abril de 2025

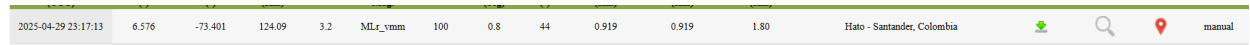


Figura 26: Reporte del SGC

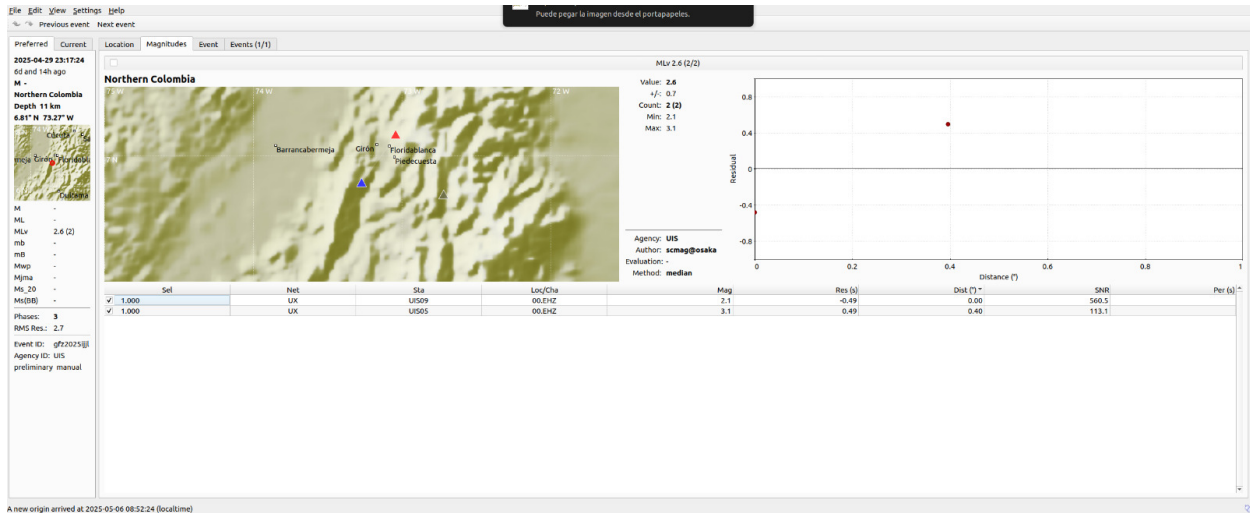


Figura 27: Análisis de REDNE

Sismo confirmado 30 de abril de 2025

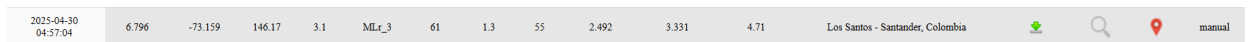


Figura 28: Reporte del SGC

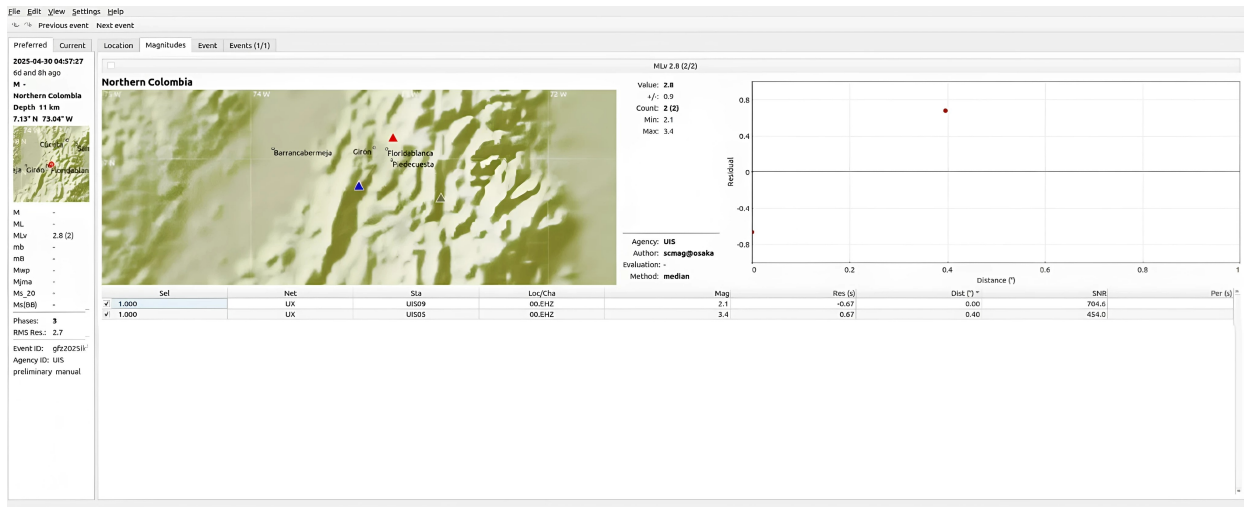


Figura 29: Análisis de REDNE

Los resultados de las estaciones de las entidades se presentan en la tabla ??