



Determinación de esfuerzos tectónicos a partir de los mecanismos focales de terremotos en la microplaca de Panamá, República de Panamá

Determination of tectonic stresses from the focal mechanisms of earthquakes in the Panama microplate, Republic of Panama

Elizabeth Muñoz

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá

facinet25@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-9230-2324>

Néstor Luque

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá. nestor.luque@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-4564-1947>

Julissa Sanjur

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias de la Tierra, Panamá. julissa.sanjur@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0000-1845-9651>

Allan López

Universidad Latina, Ingeniería Civil, Costa Rica.

allan.lopez@geologos.or.cr

<https://orcid.org/0000-0002-3845-3027>

Arkin Tapia

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias de la Tierra, Panamá.

arkin.tapiae@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0003-2355-4615>

Autor de correspondencia: facinet25@gmail.com

Fecha de recepción: 17 de marzo 2026

Fecha de aceptación: 13 de mayo de 2026

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v8n2.a10882>



RESUMEN

En este trabajo se caracterizó el campo de esfuerzos tectónicos de la microplaca de Panamá mediante el análisis de la sismicidad ocurrida entre los años 2015 y 2019. Para ello, se utilizaron eventos sísmicos con magnitudes iguales o superiores a Mw 4.0, registrados por el Instituto de Geociencias de la Universidad de Panamá, lo que permitió disponer de una base de datos robusta de 965 sismos. A partir de estos registros, se determinaron 275 mecanismos focales confiables mediante el análisis de las polaridades de la onda P, garantizando la calidad de la información empleada.

Con los mecanismos focales obtenidos, se calcularon los tensores de esfuerzo en nueve de las diez regiones sismogénicas definidas en el estudio, utilizando el programa Win Tensor. Este análisis permitió estimar parámetros fundamentales como la orientación de los ejes principales de esfuerzo (σ_1 , σ_2 y σ_3), los coeficientes R y R', los tipos de régimen tectónico y la dirección del esfuerzo máximo horizontal (SHmax). Los resultados fueron representados mediante mapas elaborados con el software Generic Mapping Tool (GMT) y visualizados en la plataforma CASMO del Mapa Mundial de Esfuerzos.

Los mapas obtenidos revelan una notable heterogeneidad espacial en los regímenes de esfuerzo dentro de la microplaca de Panamá. Se identificaron zonas dominadas por esfuerzos compresivos, extensivos, de rumbo y regímenes mixtos. Regiones como Punta Burica muestran coexistencia de regímenes compresivos y extensivos, mientras que en Panamá Este predominan regímenes extensivos y compresivos con componente de rumbo. En la región de Talamanca, en la frontera Panamá–Costa Rica, también se evidencian regímenes tectónicos complejos.

En conjunto, este estudio aporta una visión integral de la dinámica tectónica de la microplaca de Panamá, destacando su complejidad estructural y contribuyendo al entendimiento regional de los procesos sísmicos y tectónicos activos.

PALABRAS CLAVE

Microplaca de Panamá, esfuerzos tectónicos, mecanismos focales, regímenes tectónicos y sismicidad

ABSTRACT

This study aimed to characterize the tectonic stress field of the Panama microplate through the analysis of seismicity that occurred between 2015 and 2019. For this purpose, seismic events with magnitudes equal to or greater than Mw 4.0, recorded by the Institute of Geosciences, were used, resulting in a robust database of 965 earthquakes. From these records, 275 reliable focal mechanisms were determined through the analysis of P-wave polarities, ensuring the quality of the data used.

Based on the obtained focal mechanisms, stress tensors were calculated for nine of the ten seismogenic regions defined in the study using the Win Tensor software. This analysis allowed the estimation of key parameters such as the orientation of the principal stress axes (σ_1 , σ_2 , and σ_3), the R and R' coefficients, the tectonic regime types, and the orientation of the maximum horizontal stress (SHmax). The results were represented in maps generated using GMT software and visualized on the CASMO platform of the World Stress Map.

The resulting maps reveal a marked spatial heterogeneity of stress regimes within the Panama microplate. Areas dominated by compressional, extensional, strike-slip, and mixed stress regimes were identified. Regions such as Punta Burica exhibit the coexistence of compressional and extensional regimes, whereas in eastern Panama,



extensional and compressional regimes with a strike-slip component predominate. In the Talamanca region, along the Panama–Costa Rica border, complex tectonic regimes were also identified.

Overall, this study provides a comprehensive view of the tectonic dynamics of the Panama microplate, highlighting its structural complexity and contributing to the regional understanding of active seismic and tectonic processes.

KEYWORDS

Panama microplate, tectonic stresses, focal mechanisms, tectonic regimes, and seismicity

INTRODUCCIÓN

La microplaca de Panamá constituye un elemento fundamental dentro del marco geodinámico de América Central, donde la interacción entre las placas Caribe, Nazca, Cocos y Sudamericana genera patrones complejos de deformación y una sismicidad activa. Este entorno tectónico da lugar a un campo de esfuerzos heterogéneo y a una diversidad de regímenes tectónicos, lo que convierte al istmo de Panamá en una región clave para el estudio de la deformación intraplaca y las interacciones entre límites de placas. La caracterización detallada del campo de esfuerzos tectónicos es esencial para interpretar la dinámica regional, evaluar la peligrosidad sísmica y mejorar los modelos tectónicos existentes.

El campo de esfuerzos tectónicos puede inferirse de manera eficaz a partir del análisis de mecanismos focales de terremotos, ya que estos proporcionan información sobre los estilos de fallamiento y la orientación de los ejes principales de esfuerzo (σ_1 , σ_2 y σ_3). La interpretación conjunta de estas soluciones focales permite caracterizar la dinámica interna de la corteza y comprender los procesos geodinámicos que controlan la sismicidad en una región determinada.

Diversos estudios han demostrado la solidez de esta metodología. Por ejemplo, *Zoback (1992)* integró datos de mecanismos focales y otros indicadores para definir el campo de esfuerzos tectónicos a escala global, evidenciando patrones coherentes con los límites de placas. Asimismo, *Álvarez-Gómez et al., (2018)* desarrollaron el proyecto del World Stress Map, consolidando una base de datos global que combina mecanismos focales e inversiones de esfuerzos para identificar regímenes tectónicos dominantes. De igual manera, *Ishibe et al., (2009)* han aplicado técnicas de inversión de esfuerzos en zonas sísmicamente activas de Japón, demostrando la variabilidad espacial de los regímenes compresivos y extensivos tras grandes terremotos.

En conjunto, estos trabajos evidencian que el análisis sistemático de mecanismos focales, combinado con técnicas de inversión de esfuerzos, constituye una herramienta robusta para identificar los regímenes tectónicos dominantes —compresivos, extensivos, transcurrentes o mixtos— y evaluar su distribución espacial en regiones tectónicamente activas.



A escala global, el proyecto World Stress Map (WSM) representa uno de los esfuerzos más completos para compilar y analizar información de esfuerzos a partir de mecanismos focales, datos de pozos y evidencias geológicas (Heidbach *et al.*, 2016). El WSM ha demostrado que la inversión de mecanismos focales es una metodología robusta para identificar patrones de esfuerzo tanto a escala regional como mundial y para contextualizar estudios locales dentro de un marco geodinámico global.

A nivel regional, metodologías similares han sido aplicadas con éxito en áreas tectónicamente complejas comparables a la microplaca de Panamá. En América Central, particularmente en Costa Rica y el sur del istmo, diversos estudios han empleado mecanismos focales e inversión de tensores de esfuerzo para caracterizar la variación espacial de los regímenes tectónicos asociados a la subducción y a la deformación de microplacas. Por ejemplo, Pérez *et al.* (2018) utilizaron mecanismos focales y técnicas de inversión de esfuerzos para identificar transiciones entre regímenes compresivos, extensivos y de rumbo relacionadas con la interacción entre las placas de Cocos y Caribe. Estos trabajos resaltan la eficacia de esta metodología en regiones donde coexisten múltiples procesos tectónicos y donde el campo de esfuerzos presenta una marcada heterogeneidad lateral.

A pesar de la relevancia tectónica de la microplaca de Panamá, los estudios integrales que abordan la distribución espacial del campo de esfuerzos a escala de toda la microplaca siguen siendo limitados. Investigaciones previas se han centrado principalmente en zonas específicas o en estructuras tectónicas particulares, dejando vacíos en la comprensión de los patrones regionales de esfuerzo. La compleja interacción entre la subducción de la placa de Nazca, la influencia de la placa Caribe y la deformación interna del istmo sugiere que el campo de esfuerzos no es uniforme ni simple, lo que requiere análisis actualizados basados en datos sísmicos recientes.

Los avances en las técnicas de inversión de esfuerzos y en las herramientas computacionales han mejorado significativamente la confiabilidad de las estimaciones del campo de esfuerzos. Programas como Win Tensor permiten calcular tensores de esfuerzo a partir de conjuntos de mecanismos focales, proporcionando parámetros clave como la orientación de los ejes principales (σ_1 , σ_2 y σ_3), los coeficientes R y R', la clasificación de los regímenes tectónicos y la orientación del esfuerzo máximo horizontal (SHmax). Asimismo, la representación cartográfica de los resultados mediante herramientas como GMT y su integración en plataformas globales, como CASMO del Mapa Mundial de Esfuerzos (Rajabi *et al.*, 2025), facilitan la comparación entre patrones locales, regionales y globales.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo caracterizar el campo de esfuerzos tectónicos de la microplaca de Panamá mediante el análisis de la sismicidad registrada entre 2015 y 2019, considerando eventos con magnitudes $M_w \geq 4.0$. A través de



la determinación de mecanismos focales confiables y el cálculo de tensores de esfuerzo en las principales regiones sismogénicas, este estudio aporta nuevos elementos para comprender la complejidad tectónica del Istmo panameño y contribuye al entendimiento regional y global de los procesos tectónicos y sísmicos activos.

Antecedentes

A nivel internacional, diversos estudios han aplicado el análisis de mecanismos focales y la inversión de esfuerzos para caracterizar campos de esfuerzo en zonas sísmicamente activas. Un ejemplo relevante es el estudio realizado en el norte de Japón, donde *Susukida et al. (2021)* determinaron los campos de esfuerzos en la zona de réplicas del terremoto de Hokkaido Oriental Iburi de 2018. A partir de soluciones de mecanismos focales, los autores realizaron una inversión de esfuerzos que permitió identificar el predominio de fallas inversas en la región. Adicionalmente, propusieron que los valores promedio del parámetro R varían en función de la profundidad, lo que evidencia cambios en el régimen tectónico con el aumento del nivel hipocentral y resalta la importancia de considerar la dimensión vertical en los estudios de esfuerzos tectónicos.

A escala regional, múltiples investigaciones en América han empleado metodologías similares para comprender la dinámica tectónica asociada a zonas de subducción y deformación cortical. En Centroamérica, *López (2018)* analizó la sismicidad del norte y sur de Honduras considerando eventos con magnitud $M_w > 4.0$, a partir de los cuales calculó tensores de esfuerzo mediante mecanismos focales. Sus resultados indicaron un régimen predominantemente compresivo con fallas inversas asociadas a la subducción, principalmente hasta profundidades de 25 km, y se recomendó ampliar estos análisis a mayores profundidades. De manera complementaria, en Norteamérica, *Domínguez et al. (2019)* estudiaron grandes terremotos en la región de México mediante inversión del tensor sísmico y análisis de mecanismos focales, obteniendo resultados característicos de un entorno de subducción. En Sudamérica, *Morandi et al. (2001)* identificaron regímenes transtensionales y compresivos en el norte de Venezuela mediante el método de los diedros rectos, mientras que *Vásquez (2019)* determinó el tensor de esfuerzos en el nido sísmico de Bucaramanga, Colombia, utilizando ISOLA y Stress Inverse, evidenciando una compleja orientación de los esfuerzos principales.

A nivel local, investigaciones recientes han demostrado que la microplaca de Panamá presenta una sismicidad variada asociada a una compleja interacción tectónica. *González (2020)* analizó patrones de sismicidad y mecanismos focales, concluyendo que los

terremotos en la región responden a la interacción entre placas y a la deformación interna de la microplaca. Asimismo, estudios enfocados en la amenaza sísmica han analizado mecanismos focales en sectores específicos, como el extremo norte de la Zona de Fractura de Panamá (*Camacho, 2003*). Otras investigaciones se han concentrado en el sur de Panamá,



particularmente en el sistema de fallas Azuero–Soná, donde el análisis de mecanismos focales compuestos evidenció la presencia de mecanismos con componentes inversas y normales (*Sanjur et al., 2025*). En conjunto, estos antecedentes destacan la necesidad de estudios integrales que permitan una caracterización sistemática del campo de esfuerzos tectónicos en toda la microplaca de Panamá.

Contexto geodinámico

El istmo de Panamá representa un escenario tectónico singular debido a su ubicación en una zona de interacción múltiple entre placas y bloques tectónicos. En este contexto, la microplaca de Panamá presenta características propias de los tres tipos de límites tectónicos, lo que la convierte en una región de elevada complejidad geodinámica, intensa deformación y notable actividad sísmica. Esta configuración favorece la coexistencia de diversos estilos de fallamiento y mecanismos focales, así como una distribución heterogénea del campo de esfuerzos.

La microplaca de Panamá es un bloque tectónico relativamente rígido que se ha desarrollado como resultado de la interacción prolongada entre la placa del Caribe y la placa de Nazca. Su evolución tectónica está estrechamente vinculada a procesos de subducción, colisión, acreción y deformación cortical que han operado desde el Cretácico hasta el Cuaternario reciente. La subducción de la placa de Nazca bajo el margen sur del istmo genera un régimen compresivo dominante, responsable de la acumulación de tensiones en la corteza y su posterior liberación en forma de terremotos (*Bilek, 2017*).

Además de la influencia directa de la subducción, la microplaca de Panamá se encuentra sometida a la interacción con placas vecinas, principalmente la placa del Caribe, la placa de Cocos y la placa Sudamericana. Este entorno tectónico complejo da lugar a un sistema de esfuerzos tridimensional que se distribuye de manera heterogénea en la corteza terrestre, favoreciendo la formación de fallas activas, zonas de cizalla y estructuras compresivas y extensivas.

Estudios geodésicos basados en mediciones GPS han evidenciado que la microplaca de Panamá presenta un desplazamiento promedio del orden de 3 cm/año, lo que confirma la existencia de una actividad tectónica significativa y persistente (*González, 2020*). Este movimiento relativo contribuye a la reactivación de estructuras preexistentes y al desarrollo de nuevos sistemas de fallas, aspectos fundamentales para la interpretación de la sismicidad regional.

Importancia del análisis de mecanismos focales

El análisis de mecanismos focales permite reconstruir el campo de esfuerzos tectónicos y comprender la dinámica de deformación cortical en una región determinada. A partir de la inversión de datos sísmicos y del estudio de la radiación de ondas, es posible inferir las



orientaciones de los ejes principales de esfuerzo y evaluar la relación entre sismicidad y estructuras geológicas activas. En regiones tectónicamente complejas como la microplaca de Panamá, este análisis resulta esencial para identificar patrones de deformación y zonas de mayor peligro sísmico (González, 2020).

Asimismo, el estudio sistemático de mecanismos focales contribuye a la evaluación del riesgo sísmico, ya que permite reconocer áreas donde predominan ciertos estilos de fallamiento y estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos significativos.

Esfuerzo tectónico y estados de esfuerzo

El esfuerzo, en términos de geología estructural, se define como la fuerza aplicada sobre un área determinada y se utiliza para describir aquellas fuerzas que modifican la orientación, tamaño y posición de una masa rocosa (Tarbuck & Lutgens, 2011). El esfuerzo tectónico corresponde específicamente a las fuerzas generadas en la corteza terrestre como consecuencia del movimiento relativo de las placas tectónicas (Angelier, 1994a).

El estado de esfuerzos describe la magnitud y orientación de los esfuerzos que actúan en un punto específico de la corteza terrestre y se representa matemáticamente mediante un tensor de esfuerzos (Jaeger et al., 2007). La inversión de datos estructurales y sísmicos permite determinar las orientaciones de los esfuerzos principales, incluyendo el esfuerzo horizontal máximo y mínimo, así como la forma del elipsoide de esfuerzos. Bott (1959) formuló una relación fundamental entre la orientación del plano de falla y la forma del elipsoide de esfuerzos, proporcionando una base teórica para la interpretación de mecanismos de falla oblicuos.

El índice de relación entre los esfuerzos principales se expresa mediante la ecuación:

$$R' = \frac{(\sigma_z - \sigma_x)}{(\sigma_y - \sigma_x)}$$

donde σ_x , σ_y y σ_z representan los esfuerzos principales.

Tensor de esfuerzos y tipos de esfuerzo

El tensor de esfuerzos es una herramienta clave para comprender el comportamiento mecánico de las rocas y la deformación tectónica. Sus componentes incluyen esfuerzos normales, que actúan perpendicularmente a una superficie y pueden generar compresión o extensión, y esfuerzos cortantes, que actúan paralelamente y son responsables del deslizamiento a lo largo de fallas (Jaeger et al., 2007; Pollard & Aydin, 1988).

Dependiendo del número de direcciones en las que actúan las fuerzas, los estados de esfuerzo pueden clasificarse en uniaxiales, biaxiales y triaxiales. El esfuerzo triaxial es



particularmente relevante en estudios sismotectónicos, ya que simula condiciones reales del subsuelo y permite evaluar el comportamiento de materiales bajo cargas dinámicas, como las inducidas por terremotos (*Jaeger & Cook, 1979*).

En esta investigación se empleó el programa Win Tensor, el cual permite la inversión de datos de fallas y mecanismos focales para determinar el tensor de esfuerzos reducido. Los parámetros obtenidos se interpretaron siguiendo criterios ampliamente aceptados y utilizados en el proyecto del Mapa Mundial de Esfuerzos (WSM), incluyendo los esquemas de calidad propuestos por *Zoback (1992)* y los desarrollos metodológicos de *Delvaux y colaboradores (Delvaux et al., 1997; Delvaux & Sperner, 2003a)*.

Marco sismotectónico de Panamá

La República de Panamá se localiza sobre la microplaca de Panamá, la cual actúa como un bloque relativamente rígido dentro de un entorno de convergencia múltiple (*Kellogg et al., 1985*). Esta posición geológica singular explica la elevada deformación y actividad sísmica del país. La interacción entre la placa del Caribe, la microplaca de Panamá y la subducción de la placa de Nazca genera un complejo sistema de tensiones que se manifiesta en terremotos de diversa magnitud y mecanismos focales variados (*Bilek, 2017*).

Desde el punto de vista geológico, el bloque de Panamá registra múltiples fases tectónicas, incluyendo procesos de acreción oceánica, magmatismo, vulcanismo, erosión y sedimentación, reflejados en la diversidad litológica observada desde el Cretácico hasta el Cuaternario reciente (*Canal de Panamá, 2020*).

Las distintas zonas sismogénicas del territorio panameño, como Chiriquí, Azuero, la Zona de Sutura de Panamá y el Cinturón Deformado del Norte de Panamá presentan estilos tectónicos y mecanismos focales específicos, controlados por la interacción de fallas regionales y la dinámica de las placas adyacentes (*Barritt & Berrangé, 1987; Hardy et al., 1990; Camacho, 1991; Corrigan et al., 1990*).

MATERIALES Y METODOS

La metodología empleada en esta investigación se fundamenta en el análisis de mecanismos focales de terremotos como herramienta principal para la determinación de los tensores de esfuerzos tectónicos y la caracterización del régimen de deformación sismotectónica actual



en la Microplaca de Panamá. Este enfoque ha sido ampliamente utilizado en estudios geodinámicos debido a su capacidad para inferir el estado de esfuerzos en la corteza a partir de la orientación y cinemática de las fallas activadas durante los eventos sísmicos (*Angelier, 1979b; Michael, 1984; Gephart & Forsyth, 1984*). La inversión de esfuerzos se realizó mediante el software Win Tensor versión 5.9.3 (*Delvaux & Sperner, 2003a*), el cual permite obtener soluciones robustas del tensor de esfuerzos a partir de datos sísmicos depurados.

El área de estudio corresponde a la República de Panamá, específicamente a la Microplaca de Panamá, una unidad tectónica cuya evolución está controlada principalmente por la interacción entre las placas del Caribe y Nazca. Esta interacción ha generado una compleja configuración estructural y litológica, evidenciada por la presencia de diversos tipos de rocas formadas desde el Cretácico hasta la actualidad, así como por una actividad sísmica significativa asociada a distintos regímenes tectónicos.

Los datos sísmicos utilizados en esta investigación fueron suministrados por el Instituto de Geociencias de la Universidad de Panamá (IGC-UP) y complementados con información del catálogo del Global CMT Project (*Dziewonski et al., 1981*). Se seleccionaron eventos sísmicos con magnitud momento $M_w \geq 4,0$ ocurridos entre los años 2015 y 2019, abarcando un periodo de cinco años. Este proceso permitió conformar una población inicial de 965 eventos sísmicos, distribuidos anualmente como se muestra en la Tabla 1. Todos los eventos fueron revisados exhaustivamente con el objetivo de garantizar la calidad y confiabilidad de los datos utilizados para la determinación de los mecanismos focales.

Como parte del proceso metodológico, se establecieron una serie de actividades secuenciales. En primer lugar, se realizó la selección de los eventos sísmicos a partir de los registros almacenados en formato SEISAN (*Ottewöller, Voss & Havskov, 2024*). Además del criterio de magnitud, se consideró únicamente aquellos eventos registrados por más de 12 estaciones sísmicas, lo cual permitió asegurar una adecuada cobertura azimutal y mejorar la resolución de las soluciones obtenidas.

Posteriormente, se procedió a la determinación de las zonas sismogénicas con el objetivo de agrupar los mecanismos focales según su contexto tectónico y profundidad. Para ello, se tomó como referencia la zonificación sísmica nacional propuesta por *Benito et al. (2012)*, la cual clasifica los sismos en función de su profundidad y régimen tectónico. Considerando que la discontinuidad de Mohorovičić en Panamá se localiza aproximadamente a 25 km de profundidad, el estudio se enfocó en la sismicidad cortical (<25 km).

Tabla 1
Compendio de eventos sísmicos desde el 2015-2019

Año	Eventos
-----	---------



2019	167
2018	175
2017	170
2016	151
2015	302
Total:	965

Nota Tabla 1: En la tabla se muestra la sismicidad por cada año desde el 2015 hasta el año 2019.

A partir de esta clasificación, se definieron diez zonas sismogénicas dentro de la Microplaca de Panamá, las cuales incluyen regiones como la Zona de Fractura de Panamá, el Cinturón Deformado del Sur y del Norte de Panamá, así como sectores específicos dentro de este último (ver Tabla 2).

Tabla 2

Zonas sismogénicas en la Microplaca Panamá.

Nombre de la zona	Nomenclatura
Punta Burica	C4
Zona de Fractura de Panamá (ZFP)	P1
Cinturón Deformado del Sur de Panamá (CDSP)	P2
Panamá Oeste	P5
Panamá Central	P6
Panamá Este	P7
Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP)	P8, P9 P10
Costa Rica, Talamanca	C7

Nota Tabla 2: Se presenta la nomenclatura que se utilizó para las regiones sismogénicas. Fuente: *Benito et al., (2012)*.



La delimitación espacial de estas zonas se realizó mediante la creación de archivos de texto que contienen las coordenadas de los polígonos representativos de cada región, utilizando el editor Notepad++ (Ho, 2026). Estos archivos fueron posteriormente integrados en scripts ejecutados con el software Generic Map Tools (GMT) (Wessel *et al.*, 2013), lo que permitió la elaboración de mapas de las regiones sismogénicas.

La determinación de los mecanismos focales se llevó a cabo utilizando el programa SEISAN (Ottmöller, Voss & Havskov, 2024), específicamente a través de la rutina FOCMEC (Snoke *et al.*, 1984). En esta etapa se revisó cuidadosamente la polaridad de las ondas P, verificando si correspondían a compresión o dilatación, así como la calidad de las estaciones utilizadas y la distribución espacial de las mismas. Asimismo, se establecieron criterios estrictos de calidad basados en los residuos de localización, tales como $RMS < 1.0$, errores de latitud y longitud menores a 10 km, y error de profundidad inferior a 20 km, siguiendo los lineamientos propuestos por Shearer (2019).

Una vez obtenidas las soluciones de los mecanismos focales, se realizó un análisis comparativo con el marco geológico regional, y se aplicaron filtros adicionales que permitieron depurar el conjunto de datos. Como resultado, se seleccionaron 275 eventos sísmicos considerados confiables para el análisis de esfuerzos, cuyo resumen anual se presenta en la Tabla 3. Estos eventos fueron clasificados según las zonas sismogénicas definidas previamente, obteniéndose la distribución mostrada en la Tabla 4.

Tabla 3

Número de eventos sísmicos por año, utilizados para los mecanismos focales.

año	2015	2016	2017	2018	2019	Total
eventos	81	55	39	43	57	275

Nota Tabla 3: En la tabla se muestra la cantidad de sismos depurados por año, de acuerdo con los parámetros establecidos.

Tabla 4

Distribución de eventos sísmicos por regiones



Nombre de la zona	Nomenclatura	Eventos sísmicos
Punta Burica	C4	87
Zona de Fractura de Panamá (ZFP)	P1	11
Cinturón Deformado del Sur de Panamá (CDSP)	P2	69
Panamá Oeste	P5	14
Panamá Central	P6	5
Panamá Este	P7	24
Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP)	P8	28
	P9	3
	P10	10
Costa Rica, Talamanca	C7	22
No pertenece a ninguna zona	Sin nomenclatura	2

Nota Tabla 4: En la tabla se muestra la distribución de eventos sísmicos en cada una de las zonas sismogénicas.

Con las soluciones finales de mecanismos focales, se procedió a la elaboración de mapas de mecanismos focales por región sismogénica. Para ello, se integraron los datos en scripts desarrollados en Notepad++ y ejecutados en GMT versión 6, lo que permitió representar gráficamente la distribución espacial y el tipo de mecanismo dominante en cada zona.

El cálculo de los estados de esfuerzos actuales se realizó mediante el software Win Tensor, utilizando el método interactivo de optimización rotacional propuesto por *Delvaux y Sperner (2003a)*. Este método permite una separación progresiva de los mecanismos focales en función del ángulo de fricción y la optimización del tensor de esfuerzos. Los resultados fueron evaluados siguiendo el esquema de calidad del World Stress Map (WSM), donde se consideran confiables los indicadores de calidad A, B y C, de acuerdo con los criterios establecidos por *Heidbach et al., (2016)*.

Finalmente, los valores del esfuerzo horizontal máximo (SHmax) obtenidos para cada región fueron utilizados para la elaboración de mapas de esfuerzos mediante la interfaz CASMO del proyecto World Stress Map (*Heidbach et al., 2025*). Para ello, se ingresaron los parámetros requeridos, tales como ubicación geográfica, orientación del esfuerzo, profundidad, calidad



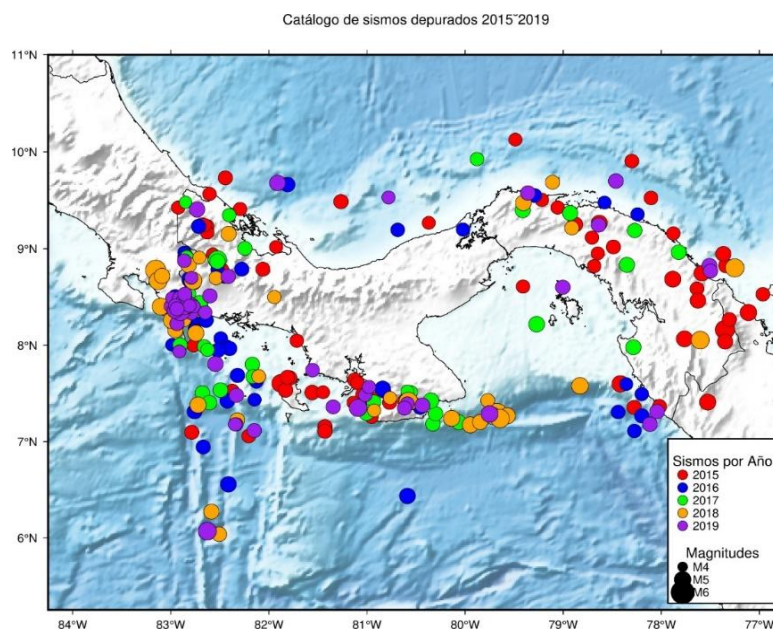
y régimen tectónico, obteniéndose mapas finales en formatos PDF y PNG que sintetizan el estado de esfuerzos actual en la Microplaca de Panamá.

RESULTADOS

Los resultados de esta investigación se presentan a través de las actividades desarrolladas: Mapa de los 275 eventos sísmicos depurados (Figura 1).

Figura 1

Catálogo de sismicidad en la Microplaca de Panamá



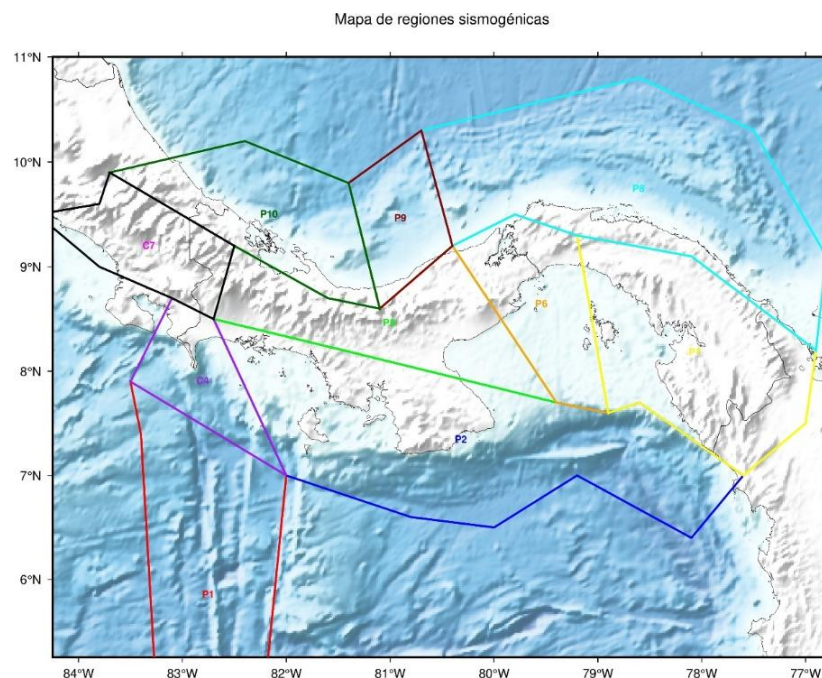
Nota Figura 1: En la figura 1 se muestra la distribución espacial de los eventos sísmicos depurados del año 2015 hasta el 2019. Se han asignado colores para identificarlos por año.

Con apoyo del software GMT (*Wessel et al., 2013*), se elaboró un mapa estructural que permitió delimitar diez (10) regiones sismogénicas dentro de la Microplaca de Panamá (Figura 2).

Figura 2

Mapa de las regiones sismogénicas





Nota
muestra

GM2 2025 Aug 24 07:54:51 Elizabeth Muñoz

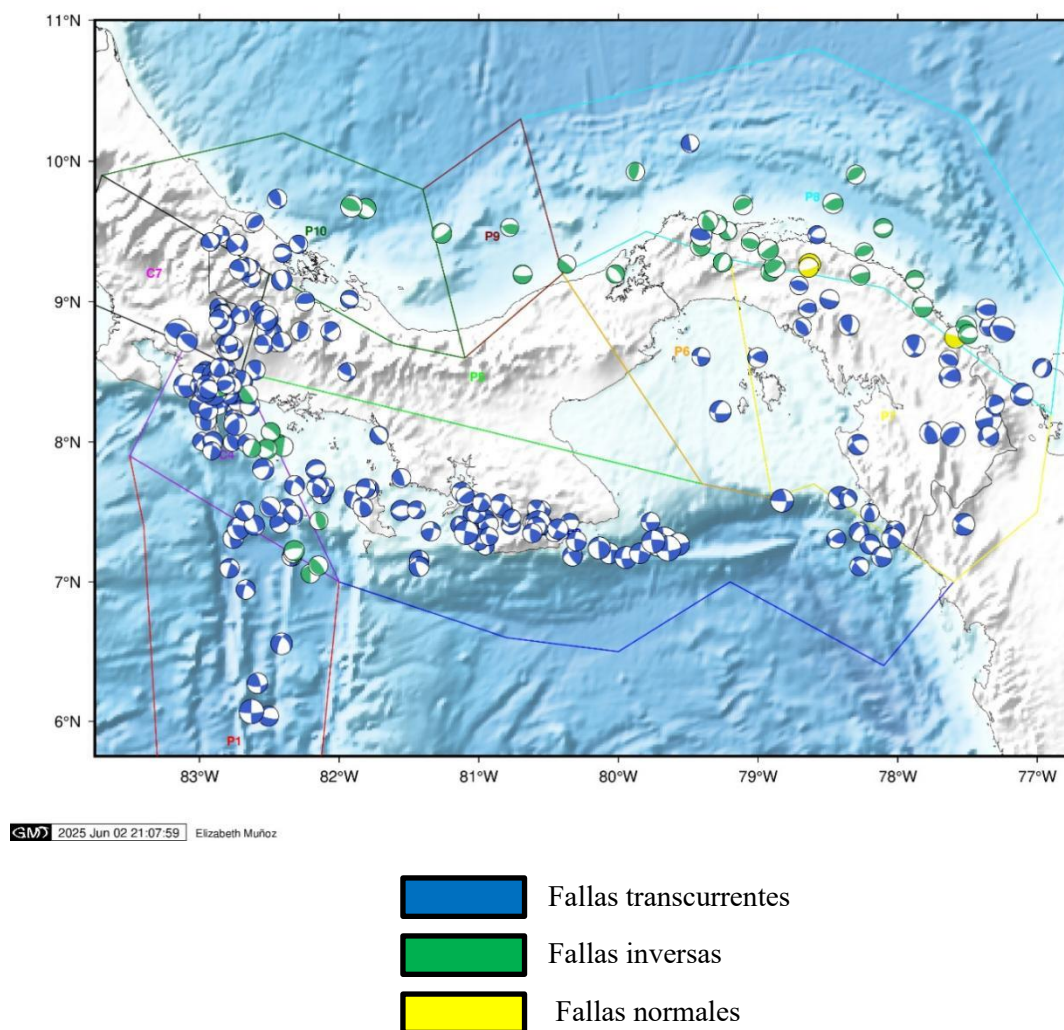
Figura 2: Se
la ubicación

de las zonas sismogénicas con las correspondientes nomenclaturas para cada una. Según la nomenclatura corresponden a: Punta Burica (C4), Zona de Fractura de Panamá (P1), Cinturón Deformado del Sur de Panamá (P2), Panamá Oeste (P5), Panamá Central (P6), Panamá Este (P7), Cinturón Deformado del Norte de Panamá Oriente (P8), Cinturón Deformado del Norte de Panamá Central (P9), Cinturón Deformado del Norte de Panamá Occidente (P10). Fuente: (Molina *et al.*, 2008).

A partir del análisis de las polaridades del primer arribo de la onda P y la aplicación de criterios estrictos de control de calidad, se identificaron 275 mecanismos focales confiables, los cuales constituyeron la base para la caracterización tectónica de las distintas zonas sismogénicas. Estos resultados permitieron elaborar un mapa de mecanismos focales, donde se integran los eventos sísmicos procesados con sus respectivos tipos de fallamiento (Figura 3), proporcionando una visión espacial clara de los estilos de deformación predominantes en cada región.

Figura 3

Mapa de Mecanismos focales por región sismogénica



Nota Figura 3: Se muestran los mecanismos focales ubicados por región sismogénica, se presentan a través de proyecciones estereográficas y se han clasificado por colores de acuerdo con el tipo de fallamiento.

Posteriormente, los mecanismos focales seleccionados fueron utilizados para estimar los estados de esfuerzo tectónico actuales mediante inversiones realizadas con el programa Win Tensor. Para cada región analizada se obtuvieron los tensores de esfuerzo, representados mediante proyecciones estereográficas, histogramas de frecuencia y el Triángulo de

Frohlich, lo que permitió identificar el régimen de esfuerzo dominante. Asimismo, se determinaron los parámetros completos del tensor, incluyendo la orientación de los ejes principales de esfuerzo (σ_1 , σ_2 y σ_3), el esfuerzo horizontal máximo (SHmax), la calidad de la inversión, los índices R y R' y sus incertidumbres asociadas. En algunas regiones se reconocieron dos tensores de esfuerzo diferenciados, mientras que en otras solo fue posible definir un único estado de esfuerzo representativo.

A partir de la inversión de los mecanismos focales realizada a través del programa denominado Win Tensor se obtuvieron los principales parámetros de los tensores de esfuerzos de 10 regiones sismogénicas (Tabla 5).

Tabla 5
Principales parámetros de los tensores de esfuerzos

Sub-vol	σ_1	σ_2	σ_3	R	R'	Q _{WSM}	$\frac{n}{nt}$	Régimen
C4-1	17/243	3/334	73/074	0,10	2,17	B	29/174	TF
C4-2	65/223	25/041	01/131	0,31	0,31	A	19/174	NF
P1-1	14/051	15/144	69/279	0,02	0,50	C	7/11	TF
P1-2	53/125	15/014	33/274	0,26	0,26	C	4/11	UF
P2-1	14/234	55/344	31/135	0,21	1,78	B	33/33	SS
P2-2	58/226	28/077	14/339	0,13	0,13	C	19/138	NF
P5-1	14/073	25/337	61/191	0,01	2,01	B	11/28	TF
P6-1	58/025	30/228	10/132	0,76	0,76	C	4/10	NF
P7-1	02/066	44/158	46/333	0,42	2,42	C	7/11	TS
P7-2	45/129	38/270	21/017	0,06	0,06	C	4/4	NS
P8-1	15/006	11/099	72/224	0,36	2,36	B	12/28	TF
P8-2	80/341	02/242	10/151	0,08	0,08	B	8/28	NF
P9	Sin Data.							
P10-1	07/011	19/279	70/120	0,30	2,30	C	6/20	TF
P10-2	49/315	38/158	11/059	0,35	0,35	C	4/20	NS
C7-1	23/212	32/107	49/331	0,17	2,17	B	14/44	TS
C7-2	25/055	63/213	08/321	0,19	1,79	C	5/44	SS

Nota Tabla 5: Se presentan los resultados de la inversión de los mecanismos focales. Primera columna: nomenclatura de las regiones sismogénicas (en algunas regiones se calcularon dos tensores), segunda columna: datos de sigma 1 (σ_1), en la tercera: la información de sigma 2 (σ_2), en la cuarta columna: valores de sigma 3 (σ_3), quinta columna: datos de R o factor de forma del tensor de esfuerzo, en la séptima columna: sexta columna: valores de R' o índice de régimen de esfuerzo, en la octava: calidad del tensor ya sea A, B, C; novena columna: la



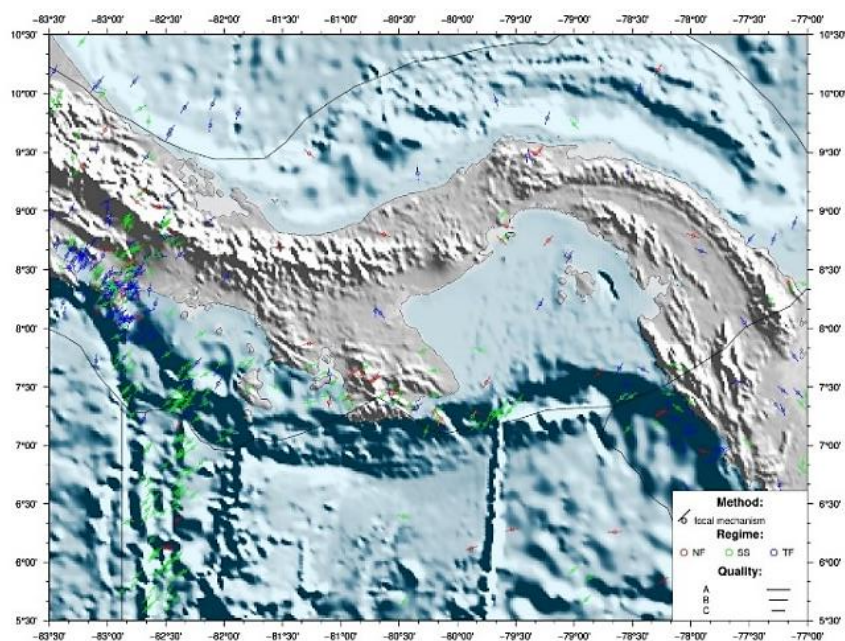
cantidad de mecanismos focales considerados y en la décima columna: se indica el tipo de régimen de esfuerzo: compresivo (TF), transpresivo (TS), rumbo (SS), transtensivo (NS), extensivo (NF) y desconocido (UF).

Mapa de las orientaciones del esfuerzo máximo horizontal.

Se integraron los resultados en el formato HTML del sistema CASMO (Catalog of Stress Magnitudes and Orientations), asociado al proyecto del Mapa Mundial de Esfuerzos. Esta acción permitió generar un mapa adicional que muestra la orientación del esfuerzo máximo horizontal (SHmax) en la Microplaca de Panamá, conforme a estándares internacionales. Se presenta el mapa actual (Figura 4) y el propuesto por la investigación (Figura 5).

Figura 4

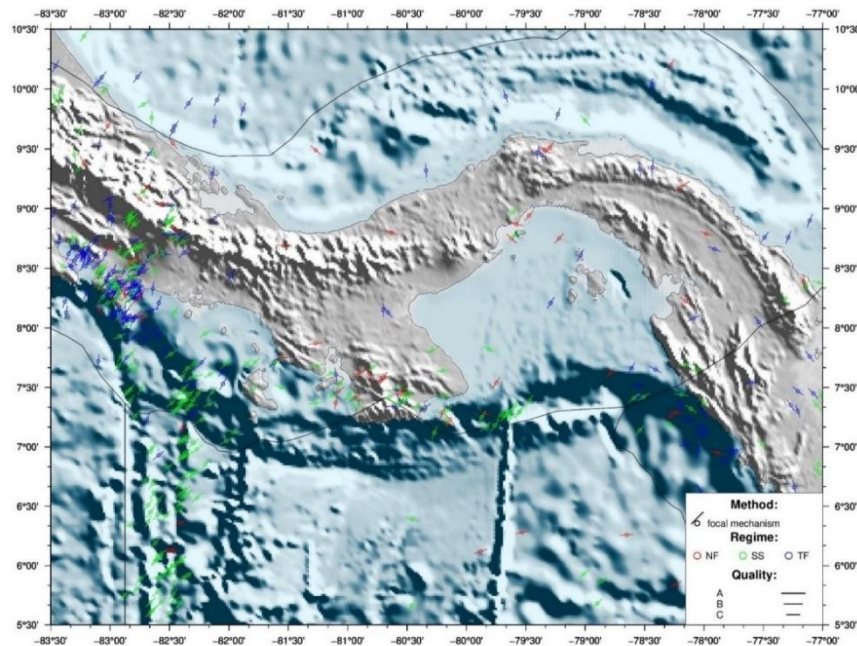
Mapa de esfuerzos actual en la Microplaca Panamá



Nota Figura 4: en este mapa se presentan los regímenes de esfuerzos en la Microplaca Panamá. Esta imagen fue elaborada por CASMO (Heidbach et al., 2025). La leyenda nos indica los regímenes de esfuerzos: color rojo: extensivo (NF), color verde: rumbo (SS) y color azul: compresivo (TF).

Figura 5

Mapa de esfuerzos propuesto de la investigación



Nota Figura 5: en este mapa se presentan los regímenes de esfuerzos determinados en esta investigación (Heidbach *et al.*, 2025). La leyenda nos indica los regímenes de esfuerzos: color rojo: extensivo (NF), color verde: rumbo (SS) y color azul: compresivo (TF).

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio abarcan el análisis de 275 mecanismos focales y el cálculo de tensores de esfuerzos en nueve regiones sismogénicas de la Microplaca de Panamá, estas reflejan la alta complejidad tectónica del istmo y son consistentes con diversos estudios regionales.

- En la región de Punta Burica (C4) se identificaron regímenes tanto compresivos como extensivos, lo cual indica una interacción activa entre la microplaca de Panamá y la placa de Cocos, en un contexto de subducción. Algunos estudios sugieren que tales deformaciones se asocian a un cabalgamiento activo dirigido hacia el suroeste en el Norte de la Península de Burica (Morell, 2016) y a la prolongación de la Zona de Fractura de Panamá hacia tierra firme alineada con el eje central de dicha península (Camacho, 2003).
- En la Zona de Fractura de Panamá (P1), se determinó un régimen predominantemente compresivo, tal como fue determinado en estudios previos por Guender y Protti, (1998), lo que respalda los modelos tectónicos que establecen que en la región de

227



Panamá ha variado de un bloque rígido hasta una zona límite de placas en deformación, asociada a la subducción de la placa de Cocos (*Kobayashi et al., 2014*).

- En el Cinturón Deformado del Sur de Panamá (P2) se identificaron regímenes tectónicos de rumbo y extensivo, consistentes con los resultados del análisis de mecanismos focales efectuado en la zona, el cual se asocia a la actividad de fallas como la Azuero–Soná y otras estructuras paralelas.
- En Panamá Oeste (P5) se evidenció un régimen compresivo hacia la parte occidental de esta, debido a las fallas corticales activas que se ven reflejadas en la suprayacente microplaca de Panamá, inducidas por la subducción de la Dorsal de Cocos (*Quintero et al., 2023*).
- En Panamá Este (P7), se reconocieron regímenes extensivo y compresivo ambos con una componente de rumbo, lo cual es consistente con las investigaciones previas que revelan la evidencia de estos regímenes mediante imágenes satelitales y la presencia de fallas activas en esta región de Darién (*Barat et al., 2012*).
- En el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP), tanto en su sector oriental (P8) como en el occidental (P10), se observa la coexistencia de regímenes de esfuerzos mixtos (compresivos y extensivos con una componente de deslizamiento). Según las investigaciones de *Camacho & Viquez (2011a)*, los mecanismos focales en la región occidental evidencian un predominio de fallamiento inverso, acompañado de episodios de licuefacción. Por su parte, en el extremo oriental del CDNP, se ha identificado la presencia de una zona de Wadati-Benioff, lo que sugiere que la placa Caribe se introduce bajo la costa Caribe de Panamá (*Camacho et al., 2010b*).
- En la región de P9 no se realizó el cálculo de esfuerzos debido al número insuficiente de eventos sísmicos ($n=3$), ya que el programa Win Tensor requiere un mínimo de cuatro eventos para obtener resultados fiables.
- Finalmente en la región de Talamanca (zona fronteriza entre Panamá y Costa Rica^{C7}) se identificaron regímenes compresivos con un componente de deslizamiento lateral y de rumbo. Los esfuerzos tectónicos en esta región son consistente con la distribución de la sismicidad registrada por ChiriNet donde asocian algunos sismos a fallas locales, a una influencia local del sistema volcánico del Barú, así como de posibles fallas no mapeadas (*Vásquez et al., 2021*)

CONCLUSIONES



Con el desarrollo de este trabajo de investigación se han establecido las siguientes conclusiones:

Se obtuvo un sub-catálogo que cuenta con soluciones de mecanismos focales de alta calidad. Esta base de datos nos ha permitido proponer estados de esfuerzos en diferentes zonas de la región que comprende el Istmo de Panamá. Estos estados de esfuerzos propuestos, hasta donde se ha podido determinar, son consistentes con la literatura del estado del arte existente.

El análisis de los regímenes de esfuerzos de las diferentes zonas ha mostrado que la región del Bloque de Panamá refleja un campo de esfuerzo heterogéneo lo que explica la compleja deformación en el Istmo de Panamá.

El mapa de esfuerzos elaborado para la Microplaca de Panamá muestra las orientaciones del esfuerzo horizontal máximo SHmax y los diferentes regímenes tectónicos de cada región sismogénica que evidencia lo heterogéneo de los esfuerzos en todo el bloque tectónico.

Además, los vectores geodésicos reportados por *Kobayashi et al. (2014)*, que indican desplazamientos cercanos a 3 cm/año hacia el noreste de la microplaca de Panamá, presentan una correlación parcial con las orientaciones de SHmax obtenidas en este estudio. En regiones como Punta Burica y el sur de Panamá, dicha relación sugiere un control combinado entre la convergencia oblicua y la deformación interna de la microplaca.

Por otro lado, en la región de Azuero, el SHmax coincide con los sistemas de fallas de rumbo.

Todo el material suplementario extra se puede encontrar en el sitio web https://geociencias.up.ac.pa/sites/geociencias/files/2026-07/material-suplementario-articulo-elizabeth_munoz_et_al.pdf

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez-Gómez, J. A., Zoback, M. L., Heidbach, O., & Martínez-Garzón, P. (2018). The 2016 update of the World Stress Map database. *Earth-Science Reviews*, 178, 389–398. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.12.007>

Angelier, J. (1979b). Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics*, 56(3–4), 17–26. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(79\)90081-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(79)90081-7)

Angelier, J. (1994a). Fault slip analysis and paleostress reconstruction. In P. L. Hancock (Ed.), *Continental deformation* (pp. 53–100). Pergamon Press.



- Barat, F., Mercier de Lépinay, B., Sosson, M., Carla, M., Baumgartner, P., & Baumgartner Mora, C. (2012). Transition from the Farallon Plate subduction to the collision between South and Central America: Geological evolution of the Panama Isthmus. *Tectonophysics*. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.03.008>
- Barritt, S. M., & Berrangé, J. P. (1987). *The geology of the Azuero Peninsula, southwest Panamá*. British Geological Survey.
- Benito, B., Lindholm, C., Camacho, E., Climent, Á., Marroquín, G., Molina, E., Talavera, E., Rojas, W., Escobar, J., & Segura, J. (2012). A new evaluation of seismic hazard for the Central America region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(2), 504–523. <https://doi.org/10.1785/0120110015>
- Bilek, S. L. (2017). Tectonic and seismic implications of the Panama microplate. *Geophysical Research Letters*, 44(12), 6096–6104.
- Bott, M. H. (1959). The mechanics of oblique slip faulting. *Geological Magazine*, 96(2), 109–117. <https://doi.org/10.1017/S0016756800059987>
- Camacho, E., (1991). The Puerto Armuelles Earthquake (southwestern Panama) of July 18, 1934. *Rev. Geol. Am. Central* 13, 1–13
- Camacho, E. (2003). Sismotectónica del extremo norte de la Zona de Fractura de Panamá. *Tecnociencia*, 5(2), 139–152.
- Camacho, E., Hutton, W., & Pacheco, J. (2010). Una nueva mirada a la evidencia de una zona Wadati-Benioff y una convergencia activa en el CDNP. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(1), 343–348. <https://doi.org/10.1785/0120090204>
- Camacho, Eduardo & Viquez, Vilma. (2011). Historical seismicity of the north Panama deformed belt. *Revista Geológica de América Central*. 15, 49-64 <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i15.13238>
- Canal de Panamá. (2020). *Informe de diseño conceptual, reservorios multipropósito. Cuenca Perales–Presa Perales*.
- Corrigan, J., Mann, P., Ingle, J.C., (1990). Forearc response to subduction of the Cocos ridge, Panama-Costa Rica. *Geol. Soc. Am. Bull.* 102 (5), 628–652 [https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1990\)102%3C0628:FRTSOT%3E2.3.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0016-7606(1990)102%3C0628:FRTSOT%3E2.3.CO;2)



- Delvaux, D., & Sperner, B. (2003). New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. In D. Nieuwland (Ed.), *New insights into structural interpretation and modelling* (pp. 75–100). Geological Society. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.06>
- Delvaux, D., Stapel, G., Moeys, R., Petit, C., Levi, K., Miroshnichenko, A., & San'kov, V. (1997). Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part 2: Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 282, 1–38. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00210-2)
- Domínguez, T., Rodríguez Lozoya, H. E., Reyes, G., Quintanar Robles, L., Aguilar Meléndez, A., & Rodríguez Leyva, H. E. (2019). Source parameters, focal mechanisms and stress tensor inversion from moderate earthquakes and its relationship with subduction zone. *Geofísica Internacional*, 58(2), 127–137. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2018.58.2.1965>
- Dziewonski, A. M., Chou, T.-A., & Woodhouse, J. H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4), 2825–2852. <https://doi.org/10.1029/JB086iB04p02825>
- Gephart, J. W., & Forsyth, D. W. (1984). An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando earthquake sequence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B11), 9305–9320. <https://doi.org/10.1029/JB089iB11p09305>
- González, F. (2020). Seismicity and focal mechanisms in the Panama microplate. *Journal of South American Earth Sciences*, 99.
- Guendel, F. y Protti, M. (1998). Sismicidad y sismotectónica de América Central. *Física de la Tierra*, 10, 19-51.
- Hardy, N.C., Heath, R.P., Westbrook, G.K. (1990). A complex plate boundary south of the Gulf of Panama (abstract). *EOS transactions. Am. Geophys. Union* 71, 1593
- Heidbach, O., Barth, A., Müller, B., Reinecker, J., Stephansson, O., Tingay, M., & Zang, A. (2016). *WSM quality ranking scheme, database description, and analysis guidelines for stress indicators* (World Stress Map Technical Report 16-01). GFZ German Research Centre for Geosciences. <https://doi.org/10.2312/wsm.2016.001>



- Heidbach, O., Rajabi, M., Di Giacomo, D., Harris, R., Lammers, S., Morawietz, S., & Ziegler, M. (2025). World Stress Map database release 2025. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/WSM.2025.001>
- Ho, D. (2026). *Notepad++* (versión 8.9.1) [Software de computación]. Disponible en notepad-plus-plus.org. <https://notepad-plus-plus.org/>
- Ishibe, K., & Shimazaki, K. (2009). Characteristics of the stress field in Japan inferred from focal mechanism data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114, B03308. <https://doi.org/10.1029/2008JB005808>
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., & Zimmerman, R. (2007). *Fundamentals of rock mechanics* (4th ed.). Blackwell Publishing.
- Jaeger, J. C., & Cook, N. G. W. (1979). *Fundamentals of rock mechanics*. Chapman and Hall.
- Kellogg, J. N., Ogujiofor, J., & Kansakar, D. R. (1985). Cenozoic tectonics of the Panama–North Andes blocks. *Memorias del Congreso Latinoamericano de Geología*, 6, 1–40.
- Kobayashi, D., LaFemina, P., Geirsson, H., Chichaco, E., Ábrego, A. A., Mora, H., & Camacho, E. (2014). Kinematics of the western Caribbean: Collision of the Cocos Ridge and upper plate deformation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(5), 1671–2094. <https://doi.org/10.1002/2014GC005234>
- López, A. (2018). Estados de esfuerzos-sur-Honduras. Universidad Latina de Costa Rica. Centro de investigaciones en Ciencias Geológicas, Ingeniería Civil, Costa Rica. [Presentación ppt] <https://fisica.unah.edu.hk/dmsdocument/9483-estado-de-esfuerzos-sur-honduras-pdf>
- Michael, A. J. (1984). Determination of stress from slip data: Faults and folds. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B13), 11517–11526. <https://doi.org/10.1029/JB089iB13p11517>
- Molina, E., Marroquín, G., Escobar, J., Lindholm, C., Escibano, J., & Escalante P., M. (2008). Evaluación regional de la amenaza sísmica en Centro América AL09-PID-23. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Morandi, M., & Choy, J., & Osechas, C. (2001). Mecanismos focales sísmicos y esfuerzos tectónicos en la región Norte de Los Andes Merideños, Venezuela. *Interciencia*. 26. 201-209.



- Morell, K.D. (2016). Seamount, ridge and transform subduction in southern Central America. *Tectonics* 35 (2) <https://doi.org/10.1002/2015TC003950>
- Ottmöller, L., Voss, P. & Havskov, J. (2024). *SEISAN earthquake analysis software manual* for Windows, Linux, and MacOS Version 13.52. <https://seisan.info/man/seisan.pdf>
- Pérez, O. J., Alvarado, G. E., & Segura, J. (2018). Stress field and tectonic regimes in southern Central America inferred from earthquake focal mechanisms. *Journal of South American Earth Sciences*, 85, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.05.004>
- Pollard, D. D., & Aydin, A. (1988). Progress in understanding jointing over the past century. *Geological Society of America Bulletin*, 100(6), 1181–1204. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1181:PIUJOT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1181:PIUJOT>2.3.CO;2)
- Quintero, R., Zahradník, J., Guendel, F., Campos-Durán, D., Alvarado, G., & Toral Boutet, J. (2023). Subduction transition and relation to upper plate faults revealed by the 2019 Mw 6.0 and 6.2 Costa Rica–Panama earthquakes. *Tectonophysics*. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229759>
- Rajabi, M., Lammers, S., and Heidbach, O. (2025). WSM database description and guidelines for analysis of horizontal stress orientation from borehole logging, WSM *Technical Report TR 25-01*, GFZ Helmholtz Centre for Geosciences, Potsdam,, <https://doi.org/10.48440/wsm.2025.001>
- Sanjur, J., Tapia, A., & Luque, N. (2025). Determinación de mecanismos focales compuestos para la región del sistema de fallas Azuero–Soná, Panamá. *Tecnociencia*, 27(1), 196–211. <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v27n1.a6649>
- Shearer, P. M. (2019). *Introduction to Seismology* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Snoke, J. A., Munsey, J. W., Teague, A. G., & Bollinger, G. A. (1984). A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data.
- Susukida, Y., Katsumata, K., Ichiyanagi, M., Ohzono, M., Aoyama, H., Tanaka, R., Takada, M., Yamaguchi, T., Okada, K., & Takahashi, H. (2021). Focal mechanisms and the stress field in the aftershock area of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake (MJMA 6.7). *Earth, Planets and Space*, 73, 1. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01323-x>



- Tar buck, E. J., & Lutgens, F. K. (2011). *Earth: An introduction to physical geology* (9th ed.). Pearson.
- Vásquez Guardia, F., Camacho Astigarrabia, E., & Rodríguez, A. (2021). Sismotectónica del occidente de la provincia de Chiriquí a partir de datos de una red sismológica local. *Tecnociencia*, 23(2), 72–92.
- Vásquez Pachón, D. A. (2019). *Estudio de orientación de esfuerzos sísmicos en el nido de Bucaramanga* [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes].
- Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J. F., & Wobbe, F. (2013). Generic Mapping Tools: Improved version released. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 94(45), 409–410. <https://doi.org/10.1002/2013EO450001>
- Zoback, M. L. (1992). First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. *Journal of Geophysical Research*, 97(B8), 11703–11728. <https://doi.org/10.1029/92JB00132>

