

**APORTES A LA CARACTERIZACIÓN SISMOTECTÓNICA DE
LA COSTA PACÍFICA COLOMBIANA Y DE LA PLACA OCEÁNICA DE
NAZCA POR ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE SISMICIDAD - SSA.**

ALBERTO BENAVIDES-HERRÁN.

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
MAESTRÍA EN CIENCIAS – FÍSICA
SANTIAGO DE CALI
MARZO DE 2019**

**APORTES A LA CARACTERIZACIÓN SISMOTECTÓNICA DE
LA COSTA PACÍFICA COLOMBIANA Y DE LA PLACA OCEÁNICA DE
NAZCA POR ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE SISMICIDAD - SSA.**

**Trabajo de investigación de Maestría en Ciencias – Física presentado como
requisito parcial para optar el título de Magister en Ciencias – Física.**

Presentado por **Alberto Benavides-Herrán**,
Estudiante de la Maestría en Ciencias – Física de la Universidad del Valle.

Director: **Elkin de Jesús Salcedo Hurtado Ph.D.**,
Observatorio Sismológico y Geofísico del Sur Occidente Colombiano,
Departamento de Geografía, Universidad del Valle.

Codirector: **William Richard Aguirre Contreras Dr. en Ciencias – Física**,
Departamento de Física, Universidad del Valle.

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
MAESTRÍA EN CIENCIAS – FÍSICA
SANTIAGO DE CALI
MARZO DE 2019**

RESUMEN

Este trabajo hace un aporte a la caracterización sismotectónica de la Placa Oceánica de Nazca y de la parte sumergida de la Placa Continental de Suramérica, frente a la Costa Pacífica Colombiana, analizando estadísticamente 3986 eventos registrados por la Red Sismológica Nacional de Colombia - RSNC en el polígono limitado por 80.00° W y 77.50° W y por 1.50° N y 7.00° N entre el 1 de junio de 1993 y el 28 de febrero de 2018. Para este catálogo de la RSNC la Magnitud de Corte M_c es 2.7 y el valor- b es 0.78 ± 0.02 .

En un segundo catálogo de 45 sismos con magnitudes $M_w \geq 4.8$ descargados del Global Centroid Moment Tensor – GCMT, en la misma región y tiempo, se calculan los tensores de Momento Sísmico, de Deformación Sísmica y de Tasa de Deformación sobre cuatro ambientes: al occidente y al oriente de la Fosa Colombo-Ecuatoriana y al norte y al sur del paralelo 5.00° N. Las tasas de deformación en los cuatro ambientes varían desde 1.10 hasta 13.92×10^{-9} año⁻¹. Para el ambiente sismotectónico II-sur, correspondiente a la Costa de Nariño y Cauca, se calculan eventos entre 6.2 y 7.0 M_w .

Palabras clave: **Caracterización Sismotectónica, Análisis Estadístico de Sismicidad, Ambientes Sismotectónicos, Placa Oceánica de Nazca, Costa Pacífica Colombiana.**

ABSTRACT

This work makes a contribution to the seismotectonic characterization of the Nazca Oceanic Plate and the submerged part of the Continental Plate of South America, in front of the Colombian Pacific Coast, analyzing statistically 3986 events registered by the National Seismological Network of Colombia - RSNC in the polygon limited by 80.00° W and 77.50° W and by 1.50° N and 7.00° N between June 1, 1993 and February 28, 2018. For this catalog of the RSNC the Magnitude Cutoff M_c is 2.7 and the b -value is 0.78 ± 0.02 .

In a second catalog of 45 earthquakes with magnitudes $M_w \geq 4.8$ downloaded from the Global Centroid Moment Tensor - GCMT, in the same region and time, the tensors of Seismic Moment, Seismic Deformation and Deformation Rate are calculated over four environments: to the west and to the east of the Colombo-Ecuadorian Trench and to the north and south of the 5.00° N parallel. The rates of deformation in the four environments vary from 1.10 to 13.92×10^{-9} year⁻¹. For the seismotectonic environment II-south, corresponding to the coast of Nariño and Cauca, events between 6.2 and 7.0 M_w are calculated.

Key words: **Seismotectonic Characterization, Statistical Analysis of Seismicity, Seismotectonic Environments, Nazca Oceanic Plate, Colombian Pacific Coast.**

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al concurso de personas maravillosas que hicieron aportes muy significativos, cada una su manera, desde su espacio y en su tiempo. Debo un reconocimiento muy especial e infinita gratitud a Lucía Herrán, Martha Lucía y Luz Amparo Benavides y a Rosalba Lemos por ese entusiasmo sin fin y su solidaridad con mi causa. Un reconocimiento de corazón a mis profesores todos, los que están y los que no, los de antes y los de ahora, a mis maestros Ramiro Tobón, Michel Valero, Carlos Jairo Díaz, Nelson Porras, Germán Pérez, Alberto Bohorquez, Ernesto Combariza, Otto Vergara, Pedro Muñoz, Doris Hinestroza, Efraín Solarte, Orlando Zúñiga, Gabriel París y Elkin Salcedo, gracias por sus enormes contribuciones a mi vida.

A mis colegas y amigos de la Universidad del Valle: Richard Aguirre, Wilson Lopera, Alvaro Ramírez, Eval Baca, Mónica Didyme-Dome, Olga Lucía Baquero y Liliam Sofía Sepúlveda y de la Pontificia Universidad Javeriana Cali: Daniel Gonzalez, Nazly Salas, Hugo Pardo, María del Pilar Marín, Gustavo Murillo, Fátima Lenis, Marino Guarín, Jose Eduardo Tofiño, Harold Castillo, David Arango, Jorge Francisco Estela, Héctor Fabio Bonilla, Hernando Prado, Gloria Portilla, Luis Alonso Velasco, Olga Lucía Delgadillo, Alba Luz Rojas, Clara Eugenia Jaramillo, Victor Hugo Valencia y Alba Doris Morales, mi gratitud por su presencia y su interés en mi investigación.

A mi gran familia ampliada: Laura Vanessa Rojas, Jessica Andrea Rojas, Maria Isabel Suaza, Olver David Muñoz, Johan Steven Rojas, Germán Agudelo, Blanca Mélida González, Olver Muñoz, Julio Calonge, Ana María Benavides, Eyder Rojas, Leonardo Lemos, Margy Delgado, Rosaura Benavides, Victor Hugo Serna, Lorena Constain, José Francisco Suaza, Luz Marina López, Ximena Caicedo, Marina Serna, Germán Benavides y Diego Miguel Garcés, mis compañeros de travesía, coincidimos en este espacio y en este tiempo, gracias por tanto apoyo y solidaridad, somos polvo en el viento.

Gratitud, reconocimiento y profunda admiración a mi profesor de sismología y director de esta tesis Elkin de Jesus Salcedo y a los profesores que me enseñaron geología, geofísica y geociencias: Pedro Muñoz, Orlando Zúñiga, Hernán Muñoz, Alvaro Nivia y Gabriel París, miles y miles de gracias, ustedes desarrollaron mi pasión por estas ciencias.

A mis jurados Jhon Leandro Pérez y Orlando Zúñiga mi gratitud por sus aportes y preocupación por un mejor documento.

Dedico este trabajo a mi madre Lucía, a mi amada Rosalba y a mis sobrinas Jessica Andrea y Laura Vanessa quienes protagonizan las revoluciones del siglo XXI.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	3
ABSTRACT	3
AGRADECIMIENTOS	4
INDICE DE TABLAS	7
INDICE DE FIGURAS	8
INTRODUCCIÓN	10
1. UN MARCO SISMOTECTÓNICO PARA LA REGIÓN	13
1.1. MARCO TECTÓNICO Y SISMOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO	13
1.2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	15
1.2.1. Un estudio de reconocimiento de patrones sismológicos en el Suroccidente de Colombia	15
1.2.2. Caracterización sismotectónica del Valle del Cauca y zonas aledañas a partir de mecanismos focales de terremotos	17
1.2.3. Deformación sismotectónica a partir de mecanismos focales de terremotos en el Valle del Cauca y alrededores	22
2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CATÁLOGO Y PERFILES DE SISMICIDAD	26
2.1. UN ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE SISMICIDAD - SSA	26
2.2. LA BASE DE DATOS SISMOLÓGICA PARA LA REGIÓN	27
2.3. UN ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CATÁLOGO SISMOLÓGICO PROPIO	29
2.4. ALGUNOS PERFILES SÍSMICOS PARA LA ZONA DE ESTUDIO.	32
2.5. DOS AMBIENTES SISMOTECTÓNICOS SUBMARINOS	36
2.5.1. Comparación estadística entre los Ambientes Sismotectónicos	39
2.5.2. Perfiles de Sismicidad en los Ambientes Sismotectónicos	44
3. CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS SISMOTECTÓNICO	49
3.1. UN ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA SISMOS DE $M_w \geq 4.8$	49
3.1.1. El catálogo de sismos de $M_w \geq 4.8$	49
3.1.2. Un análisis estadístico de sismicidad para los eventos de $M_w \geq 4.8$	51
3.1.3. Nuevos Ambientes Sismotectónicos en la zona de estudio	56
3.2. MECANISMOS FOCALES Y DEFORMACIÓN SISMOTECTÓNICA	60
3.2.1. Mecanismos Focales en los Ambientes Sismotectónicos	60
3.2.2. Momento sísmico, deformación y tasa de deformación	63
3.2.3. Deformación y tasas de deformación en los nuevos ambientes sismotectónicos	65
4. RESUMEN, DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	71
4.1. UN RESUMEN A MANERA DE CIERRE	71

4.2. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE SISMICIDAD REALIZADO CON ZMAP	71
4.3 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE DEFORMACIÓN SISMOTECTÓNICA	72
4.4 RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS	73
5. BIBLIOGRAFÍA.....	75
ANEXO A.....	79
ANEXO B.....	94
ANEXO C.....	97

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sismos con magnitud $M_w \geq 4.8$ ocurridos entre 1978 y 2010 en la región del Valle del Cauca y zonas aledañas	18
Tabla 2. Resumen de las características de los Ambientes Sismotectónicos definidos.....	20
Tabla 3. Sismos con magnitud $M_w \geq 4.8$ ocurridos entre 1978 y 2010 en la región del Valle del Cauca y zonas aledañas	24
Tabla 4. Se presentan 45 sismos con magnitud $M_w \geq 4.8$	50
Tabla 5. Se presentan 17 sismos con magnitud $M_w \geq 4.8$ del AST-I clasificados en AST-I-norte y AST-I-sur. .	56
Tabla 6. Se presentan 28 sismos con magnitud $M_w \geq 4.8$ del AST-II clasificados en AST-II-norte y AST-II-sur.	58
Tabla 7. Sismos con magnitud $M_w \geq 4.8$ ocurridos entre 1993-06-01 y 2018-02-28.....	63
Tabla 8. Base de datos de 45 eventos registrados entre el 1 de junio de 1993 y el 28 de febrero de 2018. ..	66
Tabla 9. Valores de M_{xx} , M_{yy} , M_{zz} , M_{xy} , M_{xz} y M_{yz} calculados para cada Ambiente.....	67
Tabla 10. Base de datos de 45 eventos registrados entre el 1 de junio de 1993 y el 28 de febrero de 2018. .	96
Tabla 11. Valores de M_{rr} , M_{tt} , M_{pp} , M_{rt} , M_{rp} y M_{tp} de cada sismo, en cada ambiente.....	98

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema tectónico del Pacífico Colombiano.	11
Figura 2. Zona de convergencia entre las placas Oceánica de Nazca y Continental de Suramérica.	14
Figura 3. Mapa con la distribución espacial de cinco clústeres sismogénicos en la zona marítima del Pacífico Colombiano.	16
Figura 4. Representación gráfica de cuatro ambientes sismotectónicos delimitados por polígonos y etiquetados I, II, III y IV para 49 sismos con magnitud $M_w \geq 4.8$ entre 1978 y 2010.	19
Figura 5. Representación gráfica tridimensional de los mecanismos focales de los 49 terremotos analizados para los cuatro ambientes sismotectónicos determinados.	20
Figura 6. Mapa sismotectónico simplificado de los esfuerzos en la región del Valle del Cauca y zonas aledañas.	21
Figura 7. Mapa de distribución de esfuerzos sismotectónicos para el Valle del Cauca y zonas aledañas, obtenido de los mecanismos focales de 49 terremotos entre 1978 y 2010.	22
Figura 8. Mapa sísmico simplificado de la zona de estudio.	28
Figura 9. Mapa sísmico simplificado en tres dimensiones de la región de estudio.	29
Figura 10. Gráfica de FMD para 3986 sismos entre 1-jun-1993 y 28-feb-2018 en la zona de estudio.	30
Figura 11. Tasa acumulada de eventos en el tiempo para 3986 sismos en el volumen de estudio.	30
Figura 12. Histograma de magnitud para el catálogo instrumental de la región en pasos de 0.1.	30
Figura 13. Histograma de profundidad para el catálogo con intervalos de 5 km. Se observa una anomalía entre 30 y 35 km.	30
Figura 14. Histograma de latitud para pasos de 0.25°.	31
Figura 15. Histograma de longitud para pasos de 0.25°.	31
Figura 16. Histograma de fecha para el catálogo instrumental en pasos de 1/12 de año.	31
Figura 17. Tasa acumulada de liberación de momento para 3986 eventos del catálogo.	31
Figura 18. Gráfico de Magnitud ML contra fecha.	32
Figura 19. Gráfico de profundidad contra fecha.	32
Figura 20. Mapa de la zona de estudio con cinco perfiles sísmicos etiquetados A-A', B-B', C-C', D-D' y E-E'.	33
Figura 21. Perfil A-A', entre las coordenadas (-80.000, 5.250) y (-77.500, 7.000).	33
Figura 22. Perfil B-B', entre las coordenadas (-80.000, 5.720) y (-77.500, 5.720).	34
Figura 23. Perfil C-C', entre las coordenadas (-79.500, 5.000) y (-77.500, 4.800).	34
Figura 24. Perfil D-D', entre las coordenadas (-79.600, 4.000) y (-77.860, 2.6520).	35
Figura 25. Perfil E-E', entre las coordenadas (-80.000, 2.900) y (-78.500, 1.850).	35
Figura 26. Gráfica de logaritmo de número de eventos acumulados contra magnitud del evento para los perfiles A-A', B-B', C-C', D-D' y E-E' del mapa de la Figura 20.	36
Figura 27. Mapa del Ambiente Sismotectónico AST- I.	37
Figura 28. Mapa del Ambiente Sismotectónico AST-II	38
Figura 29. Mapa del ambiente sismotectónico - I en 3D.	39
Figura 30. Mapa del ambiente sismotectónico - II en 3D.	39
Figura 31. Gráfica de FMD para 1605 sismos del subcatálogo del AST-I.	40
Figura 32. Gráfica de FMD para 2390 sismos del subcatálogo del AST-II.	40
Figura 33. Tasa acumulada de eventos para 1605 sismos del subcatálogo AST-I.	40
Figura 34. Tasa acumulada de eventos para 2390 sismos del subcatálogo AST-II.	40
Figura 35. Histograma de magnitud para 1605 sismos del subcatálogo AST-I en pasos de 0.1.	41
Figura 36. Histograma de magnitud para 2390 sismos del subcatálogo AST-II en pasos de 0.1.	41
Figura 37. Distribución de sismos con la profundidad para el AST- I con intervalos de 5 km.	41
Figura 38. Distribución de sismos en profundidad para el AST-II con intervalos de 5 km.	41
Figura 39. Histograma de Latitud para AST-I.	42
Figura 40. Histograma de Latitud para AST-II.	42
Figura 41. Histograma de Longitud para el AST- I.	42

Figura 42. Histograma de Longitud para el AST- II.	42
Figura 43. Histograma de fecha para el subcatálogo del AST- I en intervalos de 1/12 de año entre el 1-jun-1993 y el 28-feb-2018.	43
Figura 44. Histograma de fecha para el subcatálogo del AST- II en intervalos de 1/12 de año entre el 1-jun-1993 y el 28-feb-2018.	43
Figura 45. Tasa acumulada de Liberación de Momento para 1605 eventos del AST-I ocurridos entre el 1-jun-1993 y el 28-feb-2018.	43
Figura 46. Tasa acumulada de Liberación de Momento para 2390 eventos del AST-II ocurridos entre el 1-jun-1993 y el 28-feb-2018.	43
Figura 47. Gráfico de magnitud contra fecha para el subcatálogo de 1605 eventos del AST- I.	44
Figura 48. Gráfico de magnitud contra fecha para el subcatálogo de 2390 eventos del AST - II.	44
Figura 49. Gráfico de profundidad contra fecha para los eventos del subcatálogo del AST - I.	44
Figura 50. Gráfico de profundidad contra fecha para los eventos del AST - II.	44
Figura 51. Mapa del AST – I con los perfiles sísmicos F-F' y G-G'.	45
Figura 52. Mapa del AST – II con los perfiles sísmicos M-M' y N-N'.	45
Figura 53. Perfil F-F', en el Ambiente – I, entre coordenadas (-80.000, 2.240) y (-78.830, 3.600).	45
Figura 54. Perfil G-G', en el AST – I, entre coordenadas (-78.600, 4.100) y (-78.270, 6.000).	46
Figura 55. Perfil M-M', en el ambiente – II, entre coordenadas (-79.800, 1.500) y (-77.440, 3.700).	46
Figura 56. Perfil N-N', en el AST – II, entre coordenadas (-77.780, 3.7800) y (-77.780, 7.000).	47
Figura 57. Gráfica FMD para los perfiles F-F' y G-G' del AST – I, en el mapa de la Figura 51.	47
Figura 58. Gráfica FMD para los perfiles M-M' y N-N' del mapa de la Figura 52, en el AST - II.	48
Figura 59. Mapa sismológico simplificado de la región de estudio.	51
Figura 60. Mapa sismológico simplificado en 3D de la región de estudio.	52
Figura 61. Gráfica de FMD para 45 sismos del GCMT.	52
Figura 62. Tasa acumulada de eventos en el tiempo para los 45 sismos en el volumen de estudio.	52
Figura 63. Histograma de magnitud para el catálogo en intervalos de 0.1.	53
Figura 64. Histograma de profundidad con pasos de 5 km.	53
Figura 65. Histograma de latitud para bins de 0.5°.	53
Figura 66. Histograma de longitud para bins de 0.5°.	53
Figura 67. Gráfica de FMD para 17 sismos del subcatálogo de GCMT en el Ambiente - I.	54
Figura 68. Gráfica de FMD para 28 sismos del Ambiente - II.	54
Figura 69. Tasa acumulada para 17 sismos del subcatálogo GCMT en el AST - I.	54
Figura 70. Tasa acumulada para 28 sismos del subcatálogo GCMT en el AST-II.	54
Figura 71. Distribución de magnitudes para 17 sismos del AST-I en intervalos de 0.1.	55
Figura 72. Distribución de magnitudes para 28 sismos del AST-II en intervalos de 0.1.	55
Figura 73. Distribución de eventos con la profundidad para 17 sismos del AST – I.	55
Figura 74. Distribución de eventos con la profundidad para 28 sismos del AST – II.	55
Figura 75. Distribución de profundidad de los 17 eventos del ambiente – I en el tiempo.	55
Figura 76. Distribución de profundidad de los 28 eventos del ambiente – II en el tiempo.	55
Figura 77. Mapa sismológico simplificado con 17 eventos del Catálogo GCMT con $M_w \geq 4.8$ en el AST– I.	57
Figura 78. Mapa sismológico simplificado con 28 eventos de $M_w \geq 4.8$ en el AST – II.	59
Figura 79. Bloque con un plano de falla donde se muestran los ejes cartesianos.	60

INTRODUCCIÓN

Desde hace décadas se tiene evidencia física que la Placa Oceánica de Nazca embiste y subduce la Placa Continental de Suramérica frente a la Costa Pacífica Colombo-Ecuatoriana y que este fenómeno tectónico produce anualmente cientos de sismos de diferentes magnitudes y profundidades, algunos con gran poder de afectación como los eventos tsunamigénicos de 1906-1-31 (8.6Mw), 1942-5-14 (7.9Mw), 1958-1-19 (7.8Mw) y 1979-12-12 (8.2Mw), todos ellos ubicados cerca de la zona de subducción de la Placa Oceánica de Nazca (Castilla y Sánchez, 2014; Condori y Pérez, 2016; Salcedo y Pérez, 2016). Otros sismos como los de Pizarro en el bajo Baudó en 1991-11-19 (7.2Mw) y de nuevo en 2004-11-15 (7.2Mw), el de Gorgona en 2007-9-10 (6.8Mw) y el de Pedernales en 2016-4-16 (7.8Mw) son tristemente recordados por los severos daños y los cientos de vidas perdidas.

Algunas investigaciones de escala regional realizadas en las últimas décadas dan cuenta de las tasas de esfuerzo sísmico y de deformación continental en los Andes del Norte de Suramérica (Vargas-Jiménez *et al*, 2002; Corredor, 2003); de la actividad sísmica y las fuentes de tsunami en la Costa Pacífica Colombiana (Castilla y Sánchez, 2014) y de la caracterización sismotectónica del Valle del Cauca y sus zonas aledañas usando mecanismos focales de terremotos (Salcedo y Pérez, 2016 y 2017). Otras investigaciones se enfocan en la descripción del movimiento y los procesos geodésicos en las Placas Oceánicas de Nazca y Caribe y en la Placa Continental Suramericana (Pennington, 1981; Kellogg *et al*, 1989; Freymueller *et al*, 1993; Trenkamp *et al*, 2002; Trenkamp *et al*, 2004). La Figura 1 muestra un esquema tectónico del Pacífico Colombiano publicado por el Servicio Geológico Colombiano - SGC (antes INGEOMINAS) en 2010 con el nombre de Mapa Geológico Open Round Colombia 2010. En este mapa se indican las direcciones de movimiento de las diferentes placas, así como la ubicación de la zona de subducción que bordea el Litoral Colombo-Ecuatoriano y de Panamá.

Con el ánimo de reconocer patrones de distribución espacial de terremotos peligrosos ocurridos en las últimas décadas y aportar información para la toma de decisiones de planificación e ingeniería en el Anden Pacífico Colombiano, se propone responder la pregunta: **¿cómo se comporta sísmica y tectónicamente la Placa Oceánica de Nazca en cercanía de la Fosa Colombo-Ecuatoriana y en la zona donde interactúa y se flexiona contra la Placa Continental de Suramérica frente a la Costa Pacífica Colombiana?**

Este estudio aporta a la caracterización de la Placa Oceánica de Nazca y la parte continental sumergida de la Costa Pacífica Colombiana de dos maneras:

- Con Análisis Estadístico de Sismicidad – SSA sobre una base de 4707 eventos con magnitudes ML entre 1.0 y 9.0 y profundidades menores que 100 km. registrados por la Red Sismológica Nacional de Colombia – RSNC del Servicio Geológico Colombiano – SGC, ocurridos entre el 1 de junio de 1993 y el 28 de febrero de 2018 en la región sumergida del Pacífico Colombiano que limita el polígono definido entre los meridianos 80.00° W a 77.50° W y los paralelos 1.50° N a 7.00° N excluyendo la región de los departamentos de Nariño y Cauca que queda dentro del cuadrante. El polígono rojo de la Figura 1 muestra la zona de estudio.
- Calculando la Deformación Sismotectónica Regional con los mecanismos focales de 45 eventos que tienen magnitud momento Mw ≥ 4.8 de la base de datos del Global Centroid Moment Tensor – GCMT registrados en la misma zona y en el mismo intervalo de tiempo.

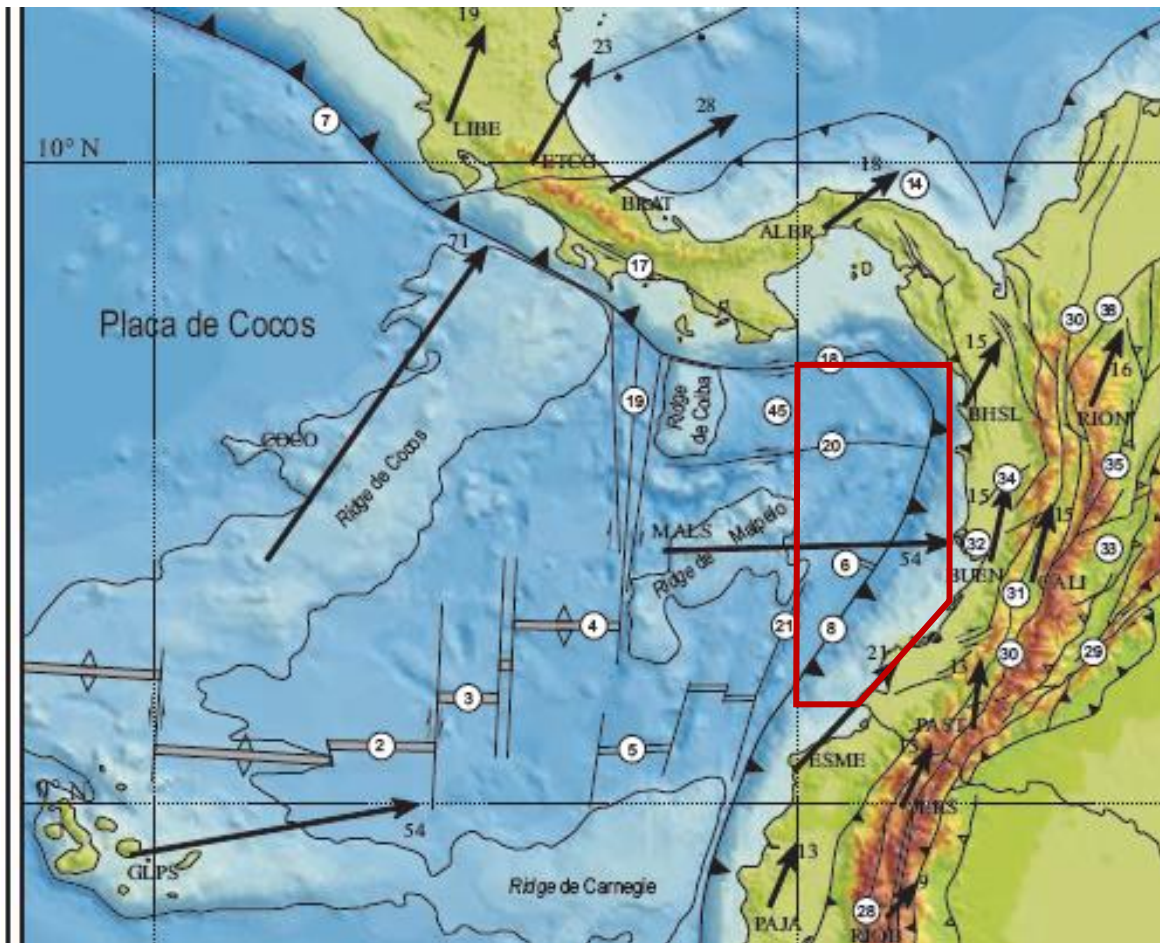


Figura 1. Esquema tectónico del Pacífico Colombiano.

Tomado del Mapa Geológico de Colombia escala 1:2'800.000 segunda edición, 2007, publicado por el Servicio Geológico Colombiano - SGC con el nombre de **Mapa Geológico Open Round Colombia 2010**. <http://www.colombiaround2010.com>. Por simplicidad se omite la explicación de las etiquetas y otros textos. El polígono rojo encierra la zona de estudio de esta tesis.

El objetivo general de esta obra es caracterizar sismotectónicamente la Placa Oceánica de Nazca y la parte continental sumergida frente a la Costa Pacífica Colombiana, entre los meridianos 80.0° W y 77.5° W y entre los paralelos 1.5° N y 7.0° N . haciendo Análisis Estadístico de Sismicidad (SSA) sobre 4707 eventos registrados entre 1 de junio de 1993 y 28 de febrero de 2018 y posteriormente analizando la deformación sismotectónica con los Mecanismos Focales de 45 sismos de este catálogo que tienen magnitud $M_w \geq 4.8$.

Los objetivos específicos de la tesis son:

- Hacer un análisis estadístico de magnitud y completitud del catálogo sismológico propio de la zona de estudio y establecer M_c y los parámetros a y b generales y por ambientes sismotectónicos.
- Hacer perfiles de sismicidad generales y para cada uno de los ambientes sismotectónicos definidos en la zona de estudio.

- Analizar los mecanismos focales de 45 sismos del catálogo con magnitud $M_w \geq 4.8$. Los datos de planos de falla y ejes de deformación de estos sismos se obtienen del Global Centroid Moment Tensor – GCMT.
- Interpretar y caracterizar sismotectónicamente la zona de estudio en general y por ambientes sismotectónicos.
- Divulgar los resultados obtenidos.

Para presentar la caracterización sismológica y tectónica de la Placa Oceánica de Nazca y la parte continental sumergida de la Placa Suramericana frente a la Costa Pacífica Colombiana, dentro del polígono rojo de la **Figura 1** y hasta 100 km. de profundidad se sigue el siguiente plan de obra:

En el primer capítulo se establece un marco sismotectónico para la zona de estudio y se muestra, a manera de estado del arte, los resultados de algunas investigaciones regionales relevantes.

El capítulo dos presenta la base de eventos que configura el catálogo sísmico de la zona y se aplican métodos de Análisis Estadístico de Sismicidad para estudiar la completitud de catálogo, los histogramas para magnitud, profundidad y tiempo y los parámetros valor-*a* y valor-*b* de las relaciones de Gutenberg – Richter y conocer así la distribución espacial de la actividad sismológica regional. También se hacen algunos perfiles de sismicidad generales y por ambientes sismotectónicos.

En el capítulo tres se configura y analiza estadísticamente una base de 45 eventos sísmicos con magnitud $M_w \geq 4.8$ obtenidos del Global Centroid Moment Tensor - GCMT. Con la solución de los mecanismos focales de estos 45 sismos se construyen los tensores de Momento Sísmico y de Deformación para obtener así las tasas y direcciones de deformación en los ambientes sismotectónicos definidos en el área de estudio.

Finalmente el capítulo cuatro contiene una discusión de los resultados obtenidos, las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos.

1. UN MARCO SISMOTECTÓNICO PARA LA REGIÓN

En este primer capítulo se establece un marco tectónico y sismológico para la zona de estudio y se muestran los resultados de tres investigaciones regionales relevantes a manera de estado del arte.

1.1. MARCO TECTÓNICO Y SISMOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

El fenómeno de subducción de las placas oceánicas de Nazca y Caribe bajo la Placa Continental de Suramérica produce procesos geotectónicos complejos que crean sistemas de fallas geológicas y de microplacas que interaccionan con esfuerzos de compresión como el bloque de Panamá–Chocó (Pennington, 1981; Monsalve, 1998; Taboada *et al*, 2000). Estos procesos tectónicos se manifiestan con terremotos asociados a los límites de los bloques y a la colisión entre las placas litosféricas (Vargas y Mann, 2013).

La Placa Oceánica de Nazca se desplaza con un movimiento relativo entre 50 y 78 mm/año, la Placa Caribe entre 10 y 22 mm/año y la Suramericana entre 6 y 16 mm/año (Pennington, 1981; Kellogg *et al*, 1989; Freymueller *et al*, 1993; Trenkamp *et al*, 2002; Trenkamp *et al*, 2004). Estos movimientos relativos produjeron durante la era Cenozoica, por convergencia contra el cratón suramericano, el sistema orogénico de los Andes del Norte (tres cordilleras y sus correspondientes depresiones intramontañosas) con tasas y direcciones que han cambiado muchas veces por la migración de la fosa hacia el oeste y el crecimiento de la corteza oceánica en el margen occidental del continente suramericano durante el Mesozoico y el Cenozoico (Vargas-Jiménez *et al*, 2002; Corredor, 2003). Estas condiciones tectónicas producen un ambiente de esfuerzos y deformaciones en las cortezas continental y oceánica y la actividad volcánica y sísmica en la zona andina, el andén Pacífico y la Costa Caribe. (Vargas-Jiménez *et al*, 2002; Taboada *et al*, 2000).

Del análisis combinado de la densidad de sismos, sus mecanismos focales y la morfología de la Fosa Colombo-Ecuatoriana algunos autores proponen la existencia de tres segmentos tectónicos con régimen sísmico y procesos de acumulación-liberación de esfuerzos propios (Pennington, 1981; Monsalve, 1998; Corredor, 2003; Collot *et al*, 2004; Arcila y Dimaté, 2005; Pedraza, 2006). Estos segmentos descritos por Arcila y Dimaté (2005) y llamados Norte, Centro y Sur se muestran en el mapa de la **Figura 2** tomada de Salcedo y Pérez (2017).

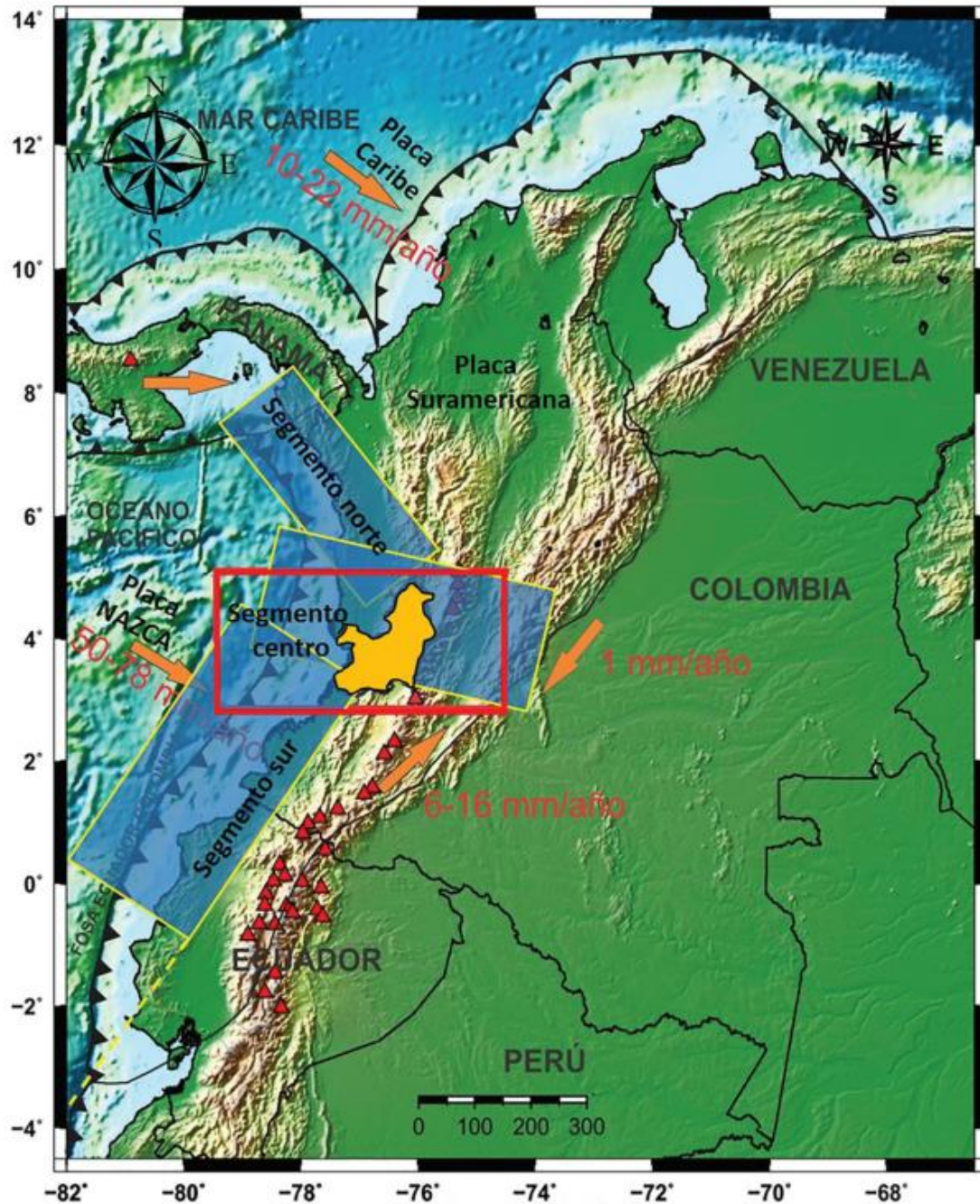
El Segmento Norte corresponde a la subducción del bloque Panamá-Chocó bajo el extremo noroeste de Colombia. Tiene azimuth de 310°, plano de Benioff que buza de 25° hacia 40° y una fosa de 170 km. de longitud. La magnitud máxima estimada para un sismo en este segmento es de 7.8Mw.

El Segmento Centro está orientado a 130° de azimuth, su plano de Benioff se inclina de 40° hacia 110° y la fosa tiene 160 km. La magnitud máxima estimada para un sismo en este segmento centro también es 7.8Mw.

El Segmento Sur, frente a las costas de los departamentos de Cauca y Nariño y norte del Ecuador, tiene azimuth de 40°, plano de Benioff que buza de 30° hacia 130° y la fosa alcanza 550 km. de longitud. La magnitud máxima estimada para un sismo en este segmento es de 8.8Mw.

Los segmentos Centro y Sur tienen alta afectación sobre el Valle del Cauca y sus zonas aledañas. El segmento Sur tiene muy alta afectación sobre las costas de Nariño y Ecuador como lo prueban los sismos históricos con tsunami de enero de 1906, mayo de 1942, enero de 1958 y diciembre 1979

que dejaron miles de víctimas en el litoral y el interior. Recientemente se destaca el terremoto de Pedernales, en 2016, de 7.8Mw (Salcedo y Pérez, 2016; Castilla y Sánchez, 2014).



*Figura 2. Zona de convergencia entre las placas Océánica de Nazca y Continental de Suramérica. Se muestra la segmentación de la zona de subducción en la Fosa Colombo-Ecuatoriana en Norte, Centro y Sur. El rectángulo en rojo corresponde a la zona de estudio del proyecto Caracterización Sismotectónica de la región del Valle del Cauca y zonas aledañas a partir de Mecanismos Focales de Terremotos por Salcedo y Pérez (2016). La figura se toma de Salcedo y Pérez (2017), **Deformación sismotectónica a partir de mecanismos focales de terremotos en el Valle del Cauca, Suroccidente de Colombia**. Revista Geológica de América Central, 57, 23-43. doi: 10.15517/rgac.v0i57.30043.*

Geográficamente se va a considerar la zona de estudio como el polígono limitado con los meridianos de coordenadas -80.00° y -77.50° (longitud oeste) y los paralelos de coordenadas 1.50° y 7.00° (latitud norte) y se establece como límite de profundidad 100 km. En vista que este trabajo se enfoca en el comportamiento elástico de la corteza oceánica frente al litoral pacífico es necesario excluir los sismos de la parte continental emergida.

También, dado que la Fosa Colombo-Ecuatoriana recorre el fondo marino de forma casi paralela al borde de la Costa Pacífica Colombiana, ella genera naturalmente un límite para dos ambientes sismotectónicos bien definidos: el Ambiente I en la Placa Oceánica de Nazca propiamente dicho hasta la línea de fosa y el Ambiente II entre la fosa y la Costa Pacífica Colombiana que corresponde a la zona de flexión e interacción entre las placas oceánica y continental (Salcedo y Pérez, 2016). Esta definición de ambientes sismotectónicos es muy útil al final del capítulo 2 y en el capítulo 3.

1.2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

En este trabajo de caracterización sismotectónica se encuentran dos tipos de antecedentes, primero los asociados con la investigación geológica, geográfica y geodésica de la Costa Pacífica Colombiana donde se describe la evolución espacio-temporal de la Fosa Colombo-Ecuatoriana y de las geoformas del litoral y se hacen mediciones de velocidades relativas y rumbo de las placas y segundo, los antecedentes asociados con investigaciones en distribución espacial de las fuentes sísmicas, mecanismos focales de los eventos de magnitudes grandes, cálculos de esfuerzos y deformaciones tectónicas regionales y completitud de los catálogos sísmicos construidos para esta región.

A manera de antecedentes se resumen los resultados de tres trabajos de investigación realizados con bases de datos sísmicos en la región. El primero corresponde al proyecto **“Reconocimiento de patrones espaciales de eventos sísmicos en el suroccidente colombiano”** financiado por la Pontificia Universidad Javeriana Cali (proyecto de investigación código 00003238) y publicado en Computers & Geosciences (Elsevier) en 2013. El segundo y el tercer trabajo corresponden a una caracterización sismotectónica regional realizada por Salcedo y Pérez del Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano de la Universidad del Valle, en el proyecto **“Caracterización del régimen sísmico y procesos de deformación cortical actual en el Valle del Cauca y zonas aledañas”** financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Valle (registro CI-297) entre 2010 y 2014 y publicados en 2016 y 2017. Estos resultados proporcionan un marco de referencia y una metodología para este estudio.

1.2.1. Un estudio de reconocimiento de patrones sismológicos en el Suroccidente de Colombia

En 2013 fue publicado **“Spatial pattern recognition of seismic events in south west Colombia”** (Benítez *et al*, 2013) como resultado de un estudio donde se consideraron 6945 sismos ocurridos entre 1993 y 2010 a los que se aplicó el algoritmo Gath and Geva fuzzy clustering (Gath y Geva, 1989) para generar doce clústeres en el suroccidente colombiano. Este estudio utilizó el método estadístico multivariado de análisis no supervisado (clustering) muy eficiente para el reconocimiento de patrones de naturaleza espacial desconocida.

La Figura 3 muestra un mapa con la distribución espacial de cinco de 12 clústeres obtenidos para la zona marítima del Pacífico Colombiano. En el se muestran 1266 eventos de los cuales 341 corresponden al clúster 1 en color verde, 141 eventos al clúster 2 en cyan, 81 sismos al 3 en rojo,

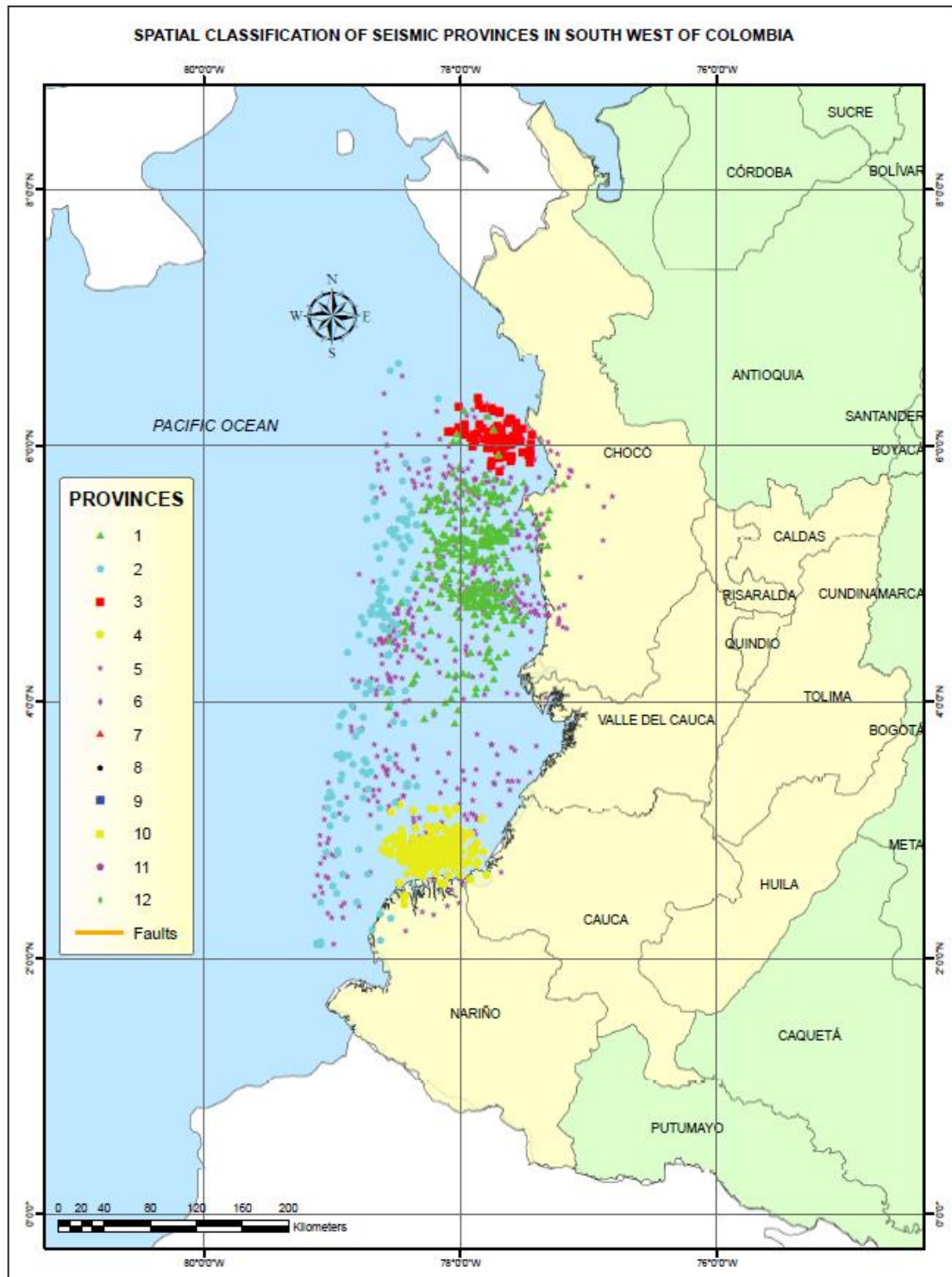


Figura 3. Mapa con la distribución espacial de cinco clústeres sismogénicos en la zona marítima del Pacífico Colombiano. Los clústeres fueron calculados en el proyecto *Spatial pattern recognition of seismic events in south west Colombia* (Benítez et al. 2013). En el mapa se omiten los clústeres 6 al 12 ubicados sobre la corteza continental de Colombia.

211 al clúster 4 en color amarillo y 492 sismos al clúster 5 en violeta. Los clústeres 6 al 12 se ubican sobre la corteza continental de Colombia y se omiten para simplificar este mapa. Los registros de sismos utilizados en esta investigación provienen de la Red Sismológica Nacional de Colombia – RSNC operada por el Servicio Geológico Colombiano – SGC.

La metodología de clústeres para análisis de datos sísmicos y modelamiento de provincias sismotectónicas considera primero la normalización de los datos del catálogo, luego la tendencia de agrupamiento (test de aleatoriedad espacial), después la implementación del clustering (grado de similitud o cercanía y minimización de la función de optimización) y finalmente la validación interna y relativa de los clústeres. Sin embargo el reconocimiento de patrones es un método para generar clústeres con un algoritmo estadístico adecuado, no es un método estadístico propiamente dicho. Actualmente se tienen poderosas herramientas para Análisis Estadístico de Sismicidad (SSA) que se están aplicando a grandes bases de datos como las de NEIC del Servicio Geológico Americano (USGS) y del International Seismological Center (ISC) con mucho éxito.

1.2.2. Caracterización sismotectónica del Valle del Cauca y zonas aledañas a partir de mecanismos focales de terremotos

Los profesores [Salcedo y Pérez, en 2016](#), publicaron un estudio de caracterización sismotectónica de la región del Valle del Cauca y zonas aledañas a partir de las soluciones de los mecanismos focales de 49 terremotos de magnitud $M_w \geq 4.8$ ocurridos entre 1978 y 2010, presentados en la [Tabla 1](#). De las características de sismicidad, distribución en profundidad y solución gráfica del mecanismo focal de estos eventos, [Salcedo y Pérez](#) proponen cuatro ambientes sismotectónicos bien definidos: **Ambiente I** – en la Placa Oceánica de Nazca al occidente de la Fosa Colombo-Ecuatoriana; **Ambiente II** – en la zona de flexión e interacción interplacas; **Ambiente III** – en la zona continental superficial y **Ambiente IV** – en la zona de Benioff intermedia. La [Figura 4](#) muestra los cuatro ambientes sismotectónicos definidos en este estudio de [Salcedo y Pérez \(2016\)](#).

Los ambientes I y II son polígonos sobre la Placa Oceánica de Nazca y la zona de interacción y flexión contra la Placa Continental, uno a cada lado de la Fosa Colombo-Ecuatoriana mientras que los ambientes III y IV están delimitados por el mismo polígono sobre el continente pero se distinguen por la profundidad de los sismos registrados.

En el ambiente sismotectónico I, entre las coordenadas 2.51° y 4.99° de latitud y 79.82° y 78.08° de longitud oeste, lado occidental de la fosa, se localizan 11 eventos superficiales, con profundidades entre 12.0 y 28.6 km. la mayoría de tipo distensivo ya que por un lado responden al empuje de la dorsal meso-oceánica y por otro a la fuerza resistente que aparece por el choque con la Placa continental ([Salcedo y Pérez, 2016](#)).

En el ambiente sismotectónico II, ubicado entre las coordenadas 2.08° y 5.37° de latitud y 79.41° y 77.88° de longitud oeste en la zona de flexión e interacción interplacas, la profundidad de los eventos varía entre 14.0 y 49.4 km. Los 15 sismos de este ambiente tienen magnitudes mayores que los sismos del ambiente I y pueden observarse eventos de tipo normal y de tipo inverso, con ejes de tracción y de compresión orientados casi sub-horizontalmente y perpendiculares al eje de la fosa. La distribución espacial de los eventos de tipo normal y de compresión dentro de la litosfera subducida responden a la flexión de la placa y se explican por modelos que establecen esfuerzos de

TABLA 1. Sismos con magnitud $M_w \geq 4,8$ con solución del mecanismo focal en la región del Valle del Cauca y zonas aledañas, ocurridos durante el periodo 1978 – 2010.

No.	FECHA	TIEMPO (UTC)	LOCALIZACIÓN			Magnitud			Momento (Mo)
	d/m/a	hh:mm:ss	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Prof. (Km)	M_w	m_b	M_s	dinas*cm
1	16/02/1978	3:47:12	4,00	78,00	14,0	5,6	5,4	4,9	3,470E+24
2	29/05/1979	12:59:01	5,22	75,80	122,0	5,0	4,9	0,0	4,520E+24
3	23/11/1979	23:40:30	4,81	76,22	105,4	7,2	6,3	6,5	7,890E+24
4	13/12/1979	7:59:00	2,88	79,49	15,0	6,3	5,0	5,8	3,070E+24
5	07/01/1980	0:33:36	2,94	78,77	30,8	5,3	5,0	0,0	9,510E+24
6	25/06/1980	12:04:57	4,44	75,78	159,5	6,3	5,7	5,6	3,920E+24
7	01/07/1980	0:33:38	2,93	78,75	19,0	5,3	0,0	0,0	9,510E+24
8	03/09/1980	22:12:39	3,24	78,19	42,1	6,1	5,7	5,8	1,810E+24
9	08/01/1982	20:38:18	2,57	78,87	25,1	5,3	0,0	0,0	1,070E+24
10	10/06/1985	3:23:39	3,24	78,99	26,0	5,5	5,5	4,9	2,520E+24
11	25/01/1987	10:31:32	3,30	79,31	15,4	5,7	5,6	5,2	5,140E+24
12	20/09/1988	17:56:25	4,99	77,68	24,1	5,8	5,6	5,6	6,560E+24
13	29/11/1988	11:23:38	4,72	77,07	75,0	5,7	5,6	0,0	3,860E+24
14	23/11/1990	22:35:34	4,73	75,60	138,0	6,1	0,0	0,0	1,110E+24
15	19/11/1991	23:06:58	4,80	77,18	14,9	7,2	6,3	7,1	7,320E+24
16	10/12/1991	22:28:01	4,74	77,48	38,4	5,2	5,2	4,6	8,180E+24
17	15/08/1992	19:02:09	5,11	75,61	124,0	5,9	5,6	0,0	7,300E+24
18	12/10/1993	19:51:30	4,15	76,98	102,9	5,2	5,5	0,0	7,540E+24
19	03/06/1994	11:25:07	3,52	78,78	19,0	5,8	5,8	5,2	5,670E+24
20	06/06/1994	20:47:47	2,93	75,94	32,6	6,8	6,3	6,7	1,840E+24
21	26/11/1994	4:48:00	2,87	79,43	15,9	5,3	5,1	4,5	9,430E+24
22	08/02/1995	15:05:04	4,10	76,62	77,1	6,4	6,2	5,6	4,090E+24
23	04/12/1995	18:40:25	2,72	78,32	49,4	5,1	5,2	4,6	4,360E+24
24	19/08/1995	18:22:35	5,22	75,69	128,7	6,5	6,2	5,9	7,720E+24
25	13/11/1995	21:43:32	2,83	79,44	15,0	5,3	5,3	4,5	1,280E+24
26	11/09/1996	6:28:52	4,59	76,90	118,2	5,3	5,0	0,0	1,110E+24
27	19/02/1997	18:25:13	4,56	76,49	105,0	5,8	5,5	0,0	5,800E+24
28	02/09/1997	12:13:23	3,85	75,75	211,0	6,8	6,5	0,0	1,620E+24
29	11/12/1997	7:56:29	3,93	75,79	183,0	6,3	6,0	0,0	4,020E+24
30	25/01/1999	18:19:17	4,58	75,75	27,7	6,1	5,9	5,7	2,010E+24
31	25/01/1999	22:40:23	4,31	75,74	24,3	5,5	5,5	4,7	2,070E+24
32	22/09/2001	3:23:38	3,87	75,97	178,6	5,9	5,9	4,9	9,420E+24
33	02/07/2002	16:24:29	5,02	77,41	45,3	5,4	5,3	4,6	1,400E+24
34	08/08/2002	13:39:58	4,98	77,82	43,3	5,9	5,3	5,0	8,100E+24
35	21/12/2002	00:46:11	3,76	78,90	15,0	5,2	5,3	4,5	9,230E+24
36	22/08/2003	5:29:13	3,07	77,73	31,4	5,0	5,0	4,2	3,560E+24
37	05/11/2003	00:58:51	5,14	77,81	27,6	5,9	5,7	5,4	9,300E+24
38	15/11/2004	9:06:56	4,70	77,51	15,0	7,2	6,5	7,1	7,570E+24
39	08/03/2005	15:59:43	4,50	75,92	64,5	5,0	4,9	5,2	3,561E+24
40	21/04/2005	3:39:24	5,18	76,32	99,7	5,2	4,9	3,9	8,910E+24
41	03/08/2005	15:59:43	2,62	79,40	28,6	4,9	4,9	4,8	2,590E+24
42	17/03/2007	22:43:09	4,61	78,53	13,1	6,0	5,9	5,3	1,278E+24
43	18/03/2007	2:11:05	4,69	78,53	12,0	6,2	6,3	5,7	2,723E+24
44	10/09/2007	1:49:14	3,08	78,12	18,9	6,7	6,0	6,7	1,662E+24
45	23/02/2008	3:23:06	4,06	78,75	12,0	5,1	4,8	4,4	5,334E+24
46	13/09/2008	9:32:02	4,79	75,52	132,9	5,7	5,9	5,7	4,420E+24
47	08/09/2009	8:26:02	4,77	76,71	82,7	4,8	5,0	0,0	2,080E+24
48	18/12/2009	14:30:06	3,08	76,30	169,2	5,1	5,2	3,8	6,490E+24
49	29/01/2010	17:52:23	4,83	76,07	133,4	5,0	4,9	3,7	3,300E+24

Tabla 1. Sismos con magnitud $M_w \geq 4.8$ ocurridos entre 1978 y 2010 en la región del Valle del Cauca y zonas aledañas con solución de mecanismo focal tomados de los catálogos del ISC (International Seismological Centre) y de GCMT (Global Centroid Moment Tensor) de la Universidad de Harvard. La tabla se toma de Salcedo y Pérez (2016), Caracterización sismotectónica de la región del Valle del Cauca y zonas aledañas a partir de mecanismos focales de terremotos. Boletín de Geología, 38(3): 89-107, doi: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v38n3-2016006>

tensión en la litosfera superior y de compresión en una región más profunda (Chapple y Forsyth, 1979; Seno y Yamanaka, 1996; citados por Salcedo y Pérez, 2017).

Los ambientes sismotectónicos III y IV corresponden a la corteza continental (Placa de Suramérica) y agrupan los sismos someros e intermedios entre las coordenadas 2.66° N y 5.59° N y entre 77.44° W y 75.46° W. Los tres eventos del ambiente III tienen profundidades entre 24.3 y 32.6 km. y debido a su carácter cortical se asocian con sistemas de fallas geológicas tanto normales como inversas existentes en la región (Salcedo y Pérez, 2016).

El ambiente IV reconocido como la zona de Benioff intermedia tiene 20 sismos entre 64.5 y 211 km. de profundidad. En este ambiente IV no se puede establecer un tipo predominante de mecanismo focal por las altas temperaturas que causan variabilidad en los tipos de esfuerzos (Salcedo y Pérez, 2016).

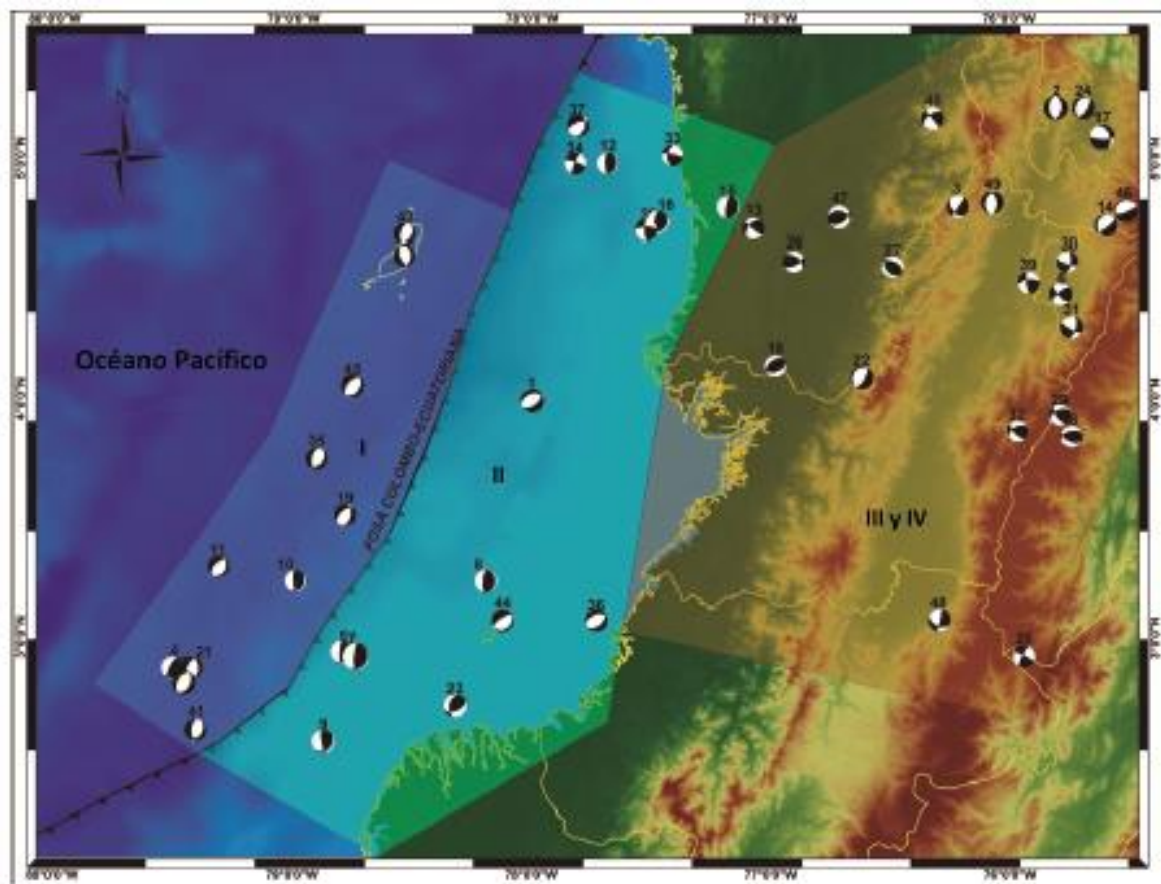


Figura 4. Representación gráfica de cuatro ambientes sismotectónicos delimitados por polígonos y etiquetados I, II, III y IV para 49 sismos con magnitud $M_w \geq 4.8$ entre 1978 y 2010.

*El ambiente I, al occidente de la Fosa Colombo-Ecuatoriana, contiene 11 sismos. El ambiente II al oriente de la fosa en la zona de flexión e interacción interplacas tiene 15 eventos. Los ambientes III y IV están delimitados por el mismo polígono, pero se distinguen por la profundidad de los eventos. La figura se toma de Salcedo y Pérez (2016), **Caracterización sismotectónica de la región del Valle del Cauca y zonas aledañas a partir de mecanismos focales de terremotos**. Boletín de Geología, 38(3): 89-107, doi: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v38n3-2016006>.*

La **Figura 5** es una representación gráfica tridimensional de los mecanismos focales de los 49 sismos en los cuatro ambientes sismotectónicos definidos en el trabajo de [Salcedo y Pérez \(2016\)](#).

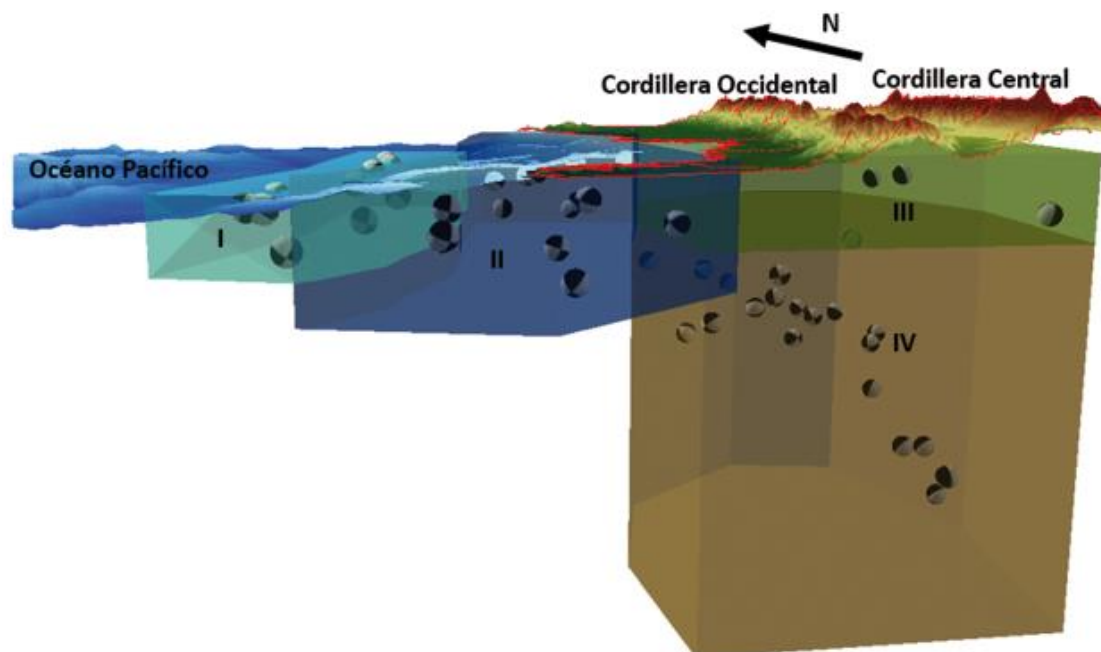


Figura 5. Representación gráfica tridimensional de los mecanismos focales de los 49 terremotos analizados para los cuatro ambientes sismotectónicos determinados.

*La figura se toma de [Salcedo y Pérez \(2016\)](#), **Caracterización sismotectónica de la región del Valle del Cauca y zonas aledañas a partir de mecanismos focales de terremotos**. Boletín de Geología, 38(3): 89-107, doi: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v38n3-2016006>*

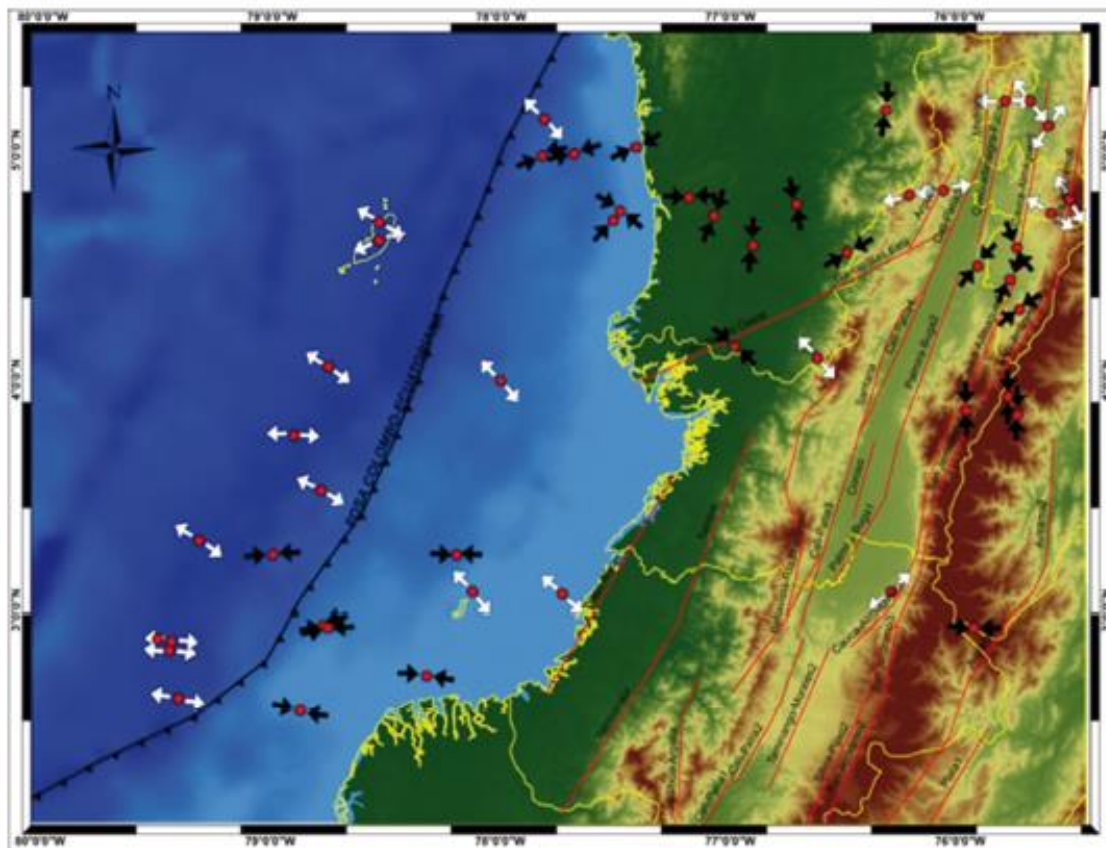
Las características de los ambientes sismotectónicos definidos y estudiados por [Salcedo y Pérez \(2016\)](#) se resumen en la **Tabla 2**.

Ambiente Sismotectónico	Relación M_0 vs M_w	Mecanismo dominante	Dominio ángulo de Inmersión Eje P (grados)	Dominio ángulo de Inmersión Eje T (grados)
Ambiente I: <i>Zona antes de la fosa</i>	$\text{Log}M_0 = 0,63M_w + 24,03$ $R^2 = 0,95$	Normal	70 - 90	0 - 15
Ambiente II: <i>Zona de flexión e interacción interplacas</i>	$\text{Log}M_0 = 0,37M_w + 25,49$ $R^2 = 0,64$	Inverso	20 - 35	55 - 65
Ambiente III: <i>Zona de Benioff intermedia</i>	$\text{Log}M_0 = 0,41M_w + 25,24$ $R^2 = 0,91$	Normal	No distinguido	No distinguido
Ambiente IV: <i>Zona continental superficial</i>	Datos insuficientes	Normal, pocos datos	< 35 pocos datos	< 20 pocos datos

Tabla 2. Resumen de las características de los Ambientes Sismotectónicos definidos.

*Tomada de [Salcedo y Pérez \(2016\)](#), **Caracterización sismotectónica de la región del Valle del Cauca y zonas aledañas a partir de mecanismos focales de terremotos**. Boletín de Geología, 38(3): 89-107, doi: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v38n3-2016006>*

Con la orientación de los ejes de esfuerzos principales, de compresión P y de tensión T, para cada evento considerado, [Salcedo y Pérez \(2016\)](#) realizan un mapa sismotectónico simplificado, **Figura 6**, donde muestran los esfuerzos en la región del Valle del Cauca y zonas aledañas. Las flechas blancas corresponden a esfuerzos de tensión y las negras a esfuerzos de compresión. En el ambiente I predomina un régimen de esfuerzos distensivo. Los terremotos que allí ocurren se deben a la fuerza de empuje desde la dorsal meso-oceánica y a la fuerza resistente que aparece por el choque contra la Placa continental ([Salcedo y Pérez, 2016](#)). La fuerza de empuje de la dorsal meso-pacífica es la responsable del movimiento de la Placa Oceánica de Nazca, que en este caso se mueve con velocidad entre 5 y 8 cm/año ([Pennington, 1981](#); [Kellogg et al, 1989](#); [Freymueller et al, 1993](#); [Trenkamp et al, 2002](#); [Trenkamp et al, 2004](#)).



*Figura 6. Mapa sismotectónico simplificado de los esfuerzos en la región del Valle del Cauca y zonas aledañas. Las flechas blancas son esfuerzos de tensión, las flechas negras son esfuerzos compresivos. La figura se toma de [Salcedo y Pérez \(2016\)](#), **Caracterización sismotectónica de la región del Valle del Cauca y zonas aledañas a partir de mecanismos focales de terremotos**. Boletín de Geología, 38(3): 89-107, doi: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v38n3-2016006>*

[Salcedo y Pérez](#) finalizan su publicación de 2016 con un modelo de transferencia de esfuerzos en la zona de subducción utilizando los planos de falla de los mecanismos focales de los 49 sismos. Para ello utilizan el software de sismología estadística ZMAP6, del Instituto Federal de Tecnología de Zúrich - ETH ([Wiemer, 2001](#)) con el cual modelan el mapa de distribución de esfuerzos de Coulomb de la zona de estudio, **Figura 7**.

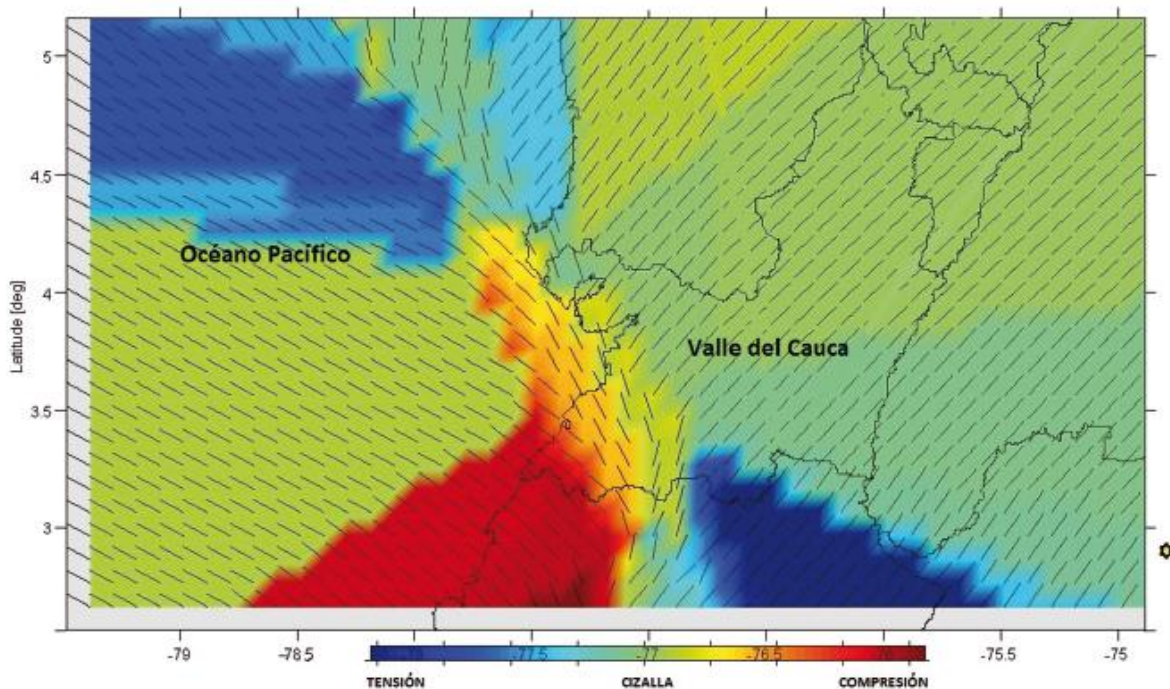


Figura 7. Mapa de distribución de esfuerzos sismotectónicos para el Valle del Cauca y zonas aledañas, obtenido de los mecanismos focales de 49 terremotos entre 1978 y 2010.

La figura se toma de Salcedo y Pérez (2016), *Caracterización sismotectónica de la región del Valle del Cauca y zonas aledañas a partir de mecanismos focales de terremotos*. Boletín de Geología, 38(3): 89-107, doi: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v38n3-2016006>

En la Figura 7 los esfuerzos de compresión P se ubican en la zona del Litoral Pacífico, con orientación predominante SW-NE. Estos esfuerzos reflejan un fuerte contacto entre las placas de Nazca y Suramérica y el fuerte rozamiento al producirse la subducción, no solamente en la zona de la fosa, sino prolongado varios kilómetros al interior del continente. Estos esfuerzos compresivos no se pueden proyectar desde la corteza oceánica al continente porque son impedidos por esfuerzos de cizallamiento (Salcedo y Pérez, 2016).

1.2.3. Deformación sismotectónica a partir de mecanismos focales de terremotos en el Valle del Cauca y alrededores

En 2017 Salcedo y Pérez, del Observatorio Sísmológico y Geofísico del Sur Occidente Colombiano, publicaron un estudio de deformación sismotectónica a partir de las soluciones de los mecanismos focales de 49 terremotos de magnitud $M_w \geq 4.8$ ocurridos entre 1978 y 2010 en la región del Valle del Cauca y sus alrededores. Esta investigación considera los mismos 49 eventos y los mismos cuatro ambientes sismotectónicos de su investigación publicada en 2016. Los parámetros de los mecanismos focales fueron obtenidos de los catálogos de ISC (International Seismological Centre) y de GCMT (Global Centroid Moment Tensor) y corresponden a localización de los eventos, magnitud M_w , planos nodales (ϕ , δ y λ) y ejes de deformación P (compresión) y T (tensión). Estos parámetros se muestran, para los cuatro ambientes, en la Tabla 3 a continuación.

No.	Fecha	Localización			Mag.	Plano de falla			Ejes de deformación*			
									P		T	
	dd:mm:aa	Lat (°N)	Long (°W)	Prof. (km)	Mw	φ	δ	λ	(Φ)	(Θ)	(Φ)	(Θ)
AMBIENTE I: ANTES DE LA FOSA												
4	13/12/1979	2,88	79,49	15,0	6,3	207	72	84	302	27	108	63
10	10/06/1985	3,24	78,99	26,0	5,5	176	74	79	275	29	70	59
11	25/01/1987	3,30	79,31	15,4	5,7	221	60	-79	159	73	303	14
19	03/06/1994	3,52	78,78	19,0	5,8	10	42	-123	196	67	303	7
21	26/11/1994	2,87	79,43	15,9	5,3	206	57	-73	159	72	284	10
25	13/11/1995	2,83	79,44	15,0	5,3	28	45	-90	180	90	118	0
35	21/12/2002	3,76	78,90	15,0	5,2	36	40	-70	50	76	292	7
41	03/08/2005	2,62	79,40	28,6	4,9	34	35	-64	54	70	285	13
42	17/03/2007	4,61	78,53	13,1	6,0	55	37	-67	72	73	308	10
43	18/03/2007	4,69	78,53	12,0	6,2	38	36	-69	64	74	294	10
45	23/02/2008	4,06	78,75	12,0	5,1	31	38	-98	161	81	307	7

AMBIENTE II: ZONA DE FLEXIÓN E INTERACCIÓN INTERPLACAS												
1	16/02/1978	4,00	78,00	14,0	5,6	53	55	-100	289	78	150	9
5	07/01/1980	2,94	78,77	30,8	5,3	185	77	84	280	31	87	58
7	01/07/1980	2,93	78,75	19,0	5,3	185	77	84	280	31	87	58
8	03/09/1980	3,24	78,19	42,1	6,1	186	70	92	275	25	99	65
9	08/01/1982	2,57	78,87	25,1	5,3	171	76	73	247	29	59	56
12	20/09/1988	4,99	77,68	24,1	5,8	179	73	85	272	27	82	62
15	19/11/1991	4,80	77,18	14,9	7,2	188	77	89	279	32	97	58
16	10/12/1991	4,74	77,48	38,4	5,2	186	72	76	287	26	76	60
23	04/12/1995	2,72	78,32	49,4	5,1	65	53	127	129	2	36	61
33	02/07/2002	5,02	77,41	45,3	5,4	185	51	170	46	21	151	33
34	08/08/2002	4,98	77,82	43,3	5,9	200	85	170	246	3	155	11
36	22/08/2003	3,07	77,73	31,4	5,0	50	47	-106	246	78	152	1
37	05/11/2003	5,14	77,81	27,6	5,9	15	38	-137	201	59	317	15
38	15/11/2004	4,70	77,51	15,0	7,2	177	79	85	271	34	81	55
44	10/09/2007	3,08	78,12	18,9	6,7	54	23	-95	153	68	328	22

AMBIENTE III: CONTINENTAL SUPERFICIAL												
20	06/06/1994	2,93	75,94	32,6	6,8	206	76	170	72	3	163	17
30	25/01/1999	4,58	75,75	27,7	6,1	8	65	-21	329	32	236	4
31	25/01/1999	4,31	75,74	24,3	5,5	17	67	-23	337	32	246	2

No.	Fecha	Localización			Mag.	Plano de falla			Ejes de deformación*			
									P		T	
dd:mm:aa	Lat (°N)	Long (°W)	Prof. (km)	Mw	φ	δ	λ	(Φ)	(Θ)	(Φ)	(Θ)	
AMBIENTE IV: ZONA DE BENIOFF INTERMEDIA												
2	29/05/1979	5,22	75,80	122,0	5,0	174	44	-100	350	83	91	1
3	23/11/1979	4,81	76,22	105,4	7,2	137	41	-163	342	42	95	24
6	25/06/1980	4,44	75,78	159,5	6,3	137	76	164	184	1	94	21
13	29/11/1988	4,72	77,07	75,0	5,7	220	51	3	180	24	76	28
14	23/11/1990	4,73	75,60	138,0	6,1	53	75	-72	129	28	346	56
17	15/08/1992	5,11	75,61	124,0	5,9	340	40	-28	322	49	208	19
18	12/10/1993	4,15	76,98	102,9	5,2	234	44	77	154	2	53	81
22	08/02/1995	4,10	76,62	77,1	6,4	30	69	-90	300	66	120	24
24	19/08/1995	5,22	75,69	128,7	6,5	34	61	-85	318	74	120	16
26	11/09/1996	4,59	76,90	118,2	5,3	61	63	45	181	7	280	50
27	19/02/1997	4,56	76,49	105,0	5,8	299	50	77	38	4	150	80
28	02/09/1997	3,85	75,75	211,0	6,8	256	48	62	186	0	95	70
29	11/12/1997	3,93	75,79	183,0	6,3	140	66	139	197	8	99	46
32	22/09/2001	3,87	75,97	178,6	5,9	133	65	139	195	7	97	46
39	08/03/2005	4,50	75,92	64,5	5,0	171	79	159	219	6	127	22
40	21/04/2005	5,18	76,32	99,7	5,2	232	56	1	192	23	91	24
46	13/09/2008	4,79	75,52	132,9	5,7	72	79	-85	349	56	158	33
47	08/09/2009	4,77	76,71	82,7	4,8	60	49	66	166	2	261	72
48	18/12/2009	3,08	76,30	169,2	5,1	14	84	-44	322	34	70	25
49	29/01/2010	4,83	76,07	133,4	5,0	352	51	-105	206	77	93	5

* La deformación en el medio se determina por el eje compresivo P y el eje de tensión T , obtenidos del mecanismo focal. Las direcciones de estos ejes de deformación están definidos por los ángulos azimutales Φ_P y Φ_T y los ángulos de buzamiento Θ_P y Θ_T .
Fuente de los datos: GCMT, ISC

Tabla 3. Sismos con magnitud $M_w \geq 4.8$ ocurridos entre 1978 y 2010 en la región del Valle del Cauca y zonas aledañas con solución de Mecanismo Focal tomada de los catálogos del ISC (International Seismological Centre) y de GCMT (Global Centroid Moment Tensor) de la Universidad de Harvard. La tabla se toma de Salcedo y Pérez (2017), Deformación sismotectónica a partir de mecanismos focales de terremotos en el Valle del Cauca, suroccidente de Colombia. Revista Geológica de América Central, 57, 23-43, doi: <http://dx.doi.org/10.15517/rgac.v0i57.30043>

Así, para cada ambiente tectónico Salcedo y Pérez (2017) calculan el tensor de Momento Sísmico M , la correspondiente matriz de vectores propios, el vector propio asociado con el valor propio mayor y determinan así el esfuerzo dominante y el tensor de deformación con sus valores propios.

Obtienen para el ambiente sismotectónico I que el vector propio asociado al valor propio mayor es sobre el eje T , lo que sugiere un ambiente dominante de extensión. La mayor tasa de deformación es de $2.39 \times 10^{-13} \text{ año}^{-1}$ y se presenta en dirección N-S con una velocidad lineal de deformación de $8.6 \times 10^{-5} \text{ mm/año}$. También calculan que para este ambiente se esperaría un 6.6Mw y un deslizamiento de ruptura promedio $D_{\text{rupt}} = 52 \text{ cm}$. (Salcedo y Pérez, 2017).

Para el ambiente II obtienen que el vector propio asociado al valor propio más grande está sobre el eje P , entonces es dominante un ambiente compresivo. También la tasa de deformación se presenta

N-S y la magnitud calculada para este ambiente es un 7.5Mw y produciría un deslizamiento promedio de ruptura $D_{rupt} = 150$ cm (Salcedo y Pérez, 2017).

Además calculan el esfuerzo tangencial deformante τ_s en la zona de flexión de la placa oceánica subducente, $\tau_s = 7.67 \times 10^{22}$ Pa. Como el valor promedio de la litosfera es 30 km. (profundidad de la actividad sísmica superficial) calculan la fuerza tangencial $F_s = 1.06 \times 10^{27}$ N/m, la fuerza normal $F_n = 1.47 \times 10^{28}$ N/m y la fuerza resultante $F_r = 1.57 \times 10^{28}$ N/m que corresponde a la fuerza de arrastre de las placas en la zona de subducción y puede estar asociado con la posible ocurrencia de un 7.0Mw (Salcedo y Pérez, 2017).

En cuanto a la velocidad de subducción de la placa, calculan las velocidades de dislocación $V_s = 3.68$ cm/año y de hundimiento $V_d = 2.67$ cm/año y estiman un coeficiente de acoplamiento sísmico interplaca $\chi_s = 0.21$ que es una medida de la capacidad de las placas de bloquear el rompimiento (por resistencia o fricción) y acumular esfuerzos y deformación. Este valor 0.21, considerado bajo, puede interpretarse como un acoplamiento débil asociado con heterogeneidad alta y resistencia interplaca baja que favorece fracturamiento de la corteza y ocurrencia de sismos pequeños a moderados y la posibilidad de un sismo grande (7.0Mw) (Salcedo y Pérez, 2017).

Para el ambiente III de zona continental superficial se utiliza un coeficiente de rigidez $\mu = 3 \times 10^{11}$ Dn/cm². Aquí el eje de compresión P es el de mayor valor propio, sin embargo el levantamiento de cordilleras y rasgos estructurales como fallas y formación de un graben sugiere procesos de deformación por extensión T. Entonces, la mayor tasa de deformación es vertical con velocidad de deformación de 3.8×10^{-6} mm/año. Se puede esperar un 7.0Mw (Salcedo y Pérez, 2017).

El ambiente IV corresponde a una zona intermedia de placa subducida. El coeficiente de viscosidad dinámico $\mu = 6.5 \times 10^{23}$ Pa s. Este ambiente es extensivo, hecho coherente con la relajación de los esfuerzos al interior de la placa que se subduce (entre 64 y 211 km.). La velocidad lineal de deformación es 1.9×10^{-4} mm/año y se puede esperar un evento 7.4Mw con desplazamiento promedio de ruptura de $D_{rupt} = 1.3$ m. (Salcedo y Pérez, 2017).

El marco tectónico y la metodología de esta investigación de Salcedo y Perez para el Valle del Cauca y sus zonas aledañas, publicada en 2017, y en particular los resultados obtenidos en los ambientes sismotectónicos I y II son insumo para el capítulo 3 de este estudio sobre la interacción entre la Placa Oceánica de Nazca y la Placa continental de Suramérica frente a la Costa Pacífica Colombiana.

2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CATÁLOGO Y PERFILES DE SISMICIDAD

En este capítulo se presenta la base de eventos que configura el catálogo sísmico propio de la zona y se aplican métodos de Análisis Estadístico de Sismicidad (SSA) para estudiar la completitud del catálogo, los parámetros estadísticos valor- b y valor- a de la relación de Gutenberg – Richter y los histogramas para magnitud, profundidad, tiempo, latitud y longitud para la región y por ambientes sismotectónicos. También se hacen algunos perfiles de sismicidad pertinentes.

2.1. UN ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE SISMICIDAD - SSA

El primer paso en el Análisis Estadístico de Sismicidad de una base de eventos es graficar la distribución de la cantidad de sismos registrados para cada magnitud M (frequency magnitude distribution – FMD en inglés). Esta contabilidad de sismos para cada rango (bin) de magnitud es discreta y puede tener unidades de conteo (número total de eventos en un intervalo de tiempo), tasa (número promedio de eventos en un intervalo de tiempo como conteos/año) o probabilidad (con conteo normalizado para generar una función de densidad de probabilidad). En la literatura esta gráfica de distribución se conoce como FMD. (Naylor *et al*, 2010).

Una gráfica de distribución de frecuencia contra magnitud (FMD) se puede hacer para valores discretos o para valores acumulados de frecuencias (sumando desde la magnitud mayor hacia atrás, hasta la magnitud mínima registrada). Se sabe que el mejor resultado se presenta cuando se grafica el logaritmo de la distribución de frecuencia contra la magnitud M de los eventos, relación conocida como de Gutenberg-Richter (Gutenberg y Richter, 1944) que se expresa así:

$$\text{Log } N (\geq M) = a - b M \quad M \geq M_c \quad (1)$$

La ecuación (1) relaciona la distribución de frecuencia de ocurrencia de los sismos contra magnitud, N es el número acumulado de sismos registrados en la base de datos con magnitud M mayor que un cierto valor umbral M_c y los parámetros valor- b y valor- a son constantes positivas. El valor- b se obtiene por el método de Máxima Verosimilitud (Aki, 1965), o por la solución de Máxima Curvatura, típicamente oscila entre 0.7 y 1.5 y describe la distribución de tamaños de los eventos (proporción de eventos de grandes a pequeños) en la región considerada. Un valor- b grande indica que es probable que se tengan eventos de magnitudes similares, mientras que un valor pequeño indica un rango de magnitudes amplio. El valor- a es una función del número total de cuentas en la muestra cuando la magnitud M es cero en la forma acumulativa y mide entonces el nivel de actividad sísmica (Naylor *et al*, 2010).

Por otro lado el parámetro M_c , conocido como magnitud de corte (umbral) del catálogo, es la magnitud más baja para la cual el 100% de los sismos son detectados exitosamente, dentro de la región y en el intervalo de tiempo definidos (Woessner y Wiemer, 2005). M_c varía en el tiempo y el espacio y depende de la capacidad de detección de la red sismológica y de los factores que la afectan como la distribución de los sensores, el tipo de instrumentación y las prácticas de procesamiento entre otros. Es evidente que los parámetros estadísticos valor- b y valor- a dependen, con mucha sensibilidad, del valor de M_c .

Así entonces, la gráfica más importante del catálogo de una zona de estudio es el logaritmo decimal del número de eventos (discretos y acumulados) contra la magnitud M . Los parámetros estadísticos obtenidos de esta gráfica FMD son valor- b , valor- a y magnitud de corte M_c .

Otra gráfica importante es la evolución de la tasa acumulada de eventos con el tiempo. Ella muestra variaciones en la pendiente que corresponden a cambios en los instrumentos de registro, en el procesamiento de los datos o en la cobertura de las redes sismológicas. También son importantes en el análisis estadístico los histogramas de magnitud, de profundidad, latitud, longitud y fecha y los gráficos de tasa acumulada de liberación de momento, de magnitud contra fecha y magnitud contra profundidad. En este capítulo de Análisis Estadístico de un catálogo propio todas las gráficas e histogramas se elaboran en ZMAP7.

A propósito, ZMAP es una poderosa herramienta gratuita de asistencia al sismólogo que permite hacer análisis de catálogos. Funciona como una Interfaz Gráfica para el Usuario (GUI) en Matlab® R2018a o posterior con los toolbox de: Mapping, Statistics and Machine Learning, Parallel computing y Optimization. ZMAP fue publicada por primera vez en 1994 pero su versión más popular fue la 6.0 de 2001 (Wiemer, 2001), muy utilizada entre la comunidad científica. La versión ZMAP7 (2018) del Swiss Seismological Service – ETHZ, utilizada en este estudio de caracterización fue descargada del sitio de GitHub <https://github.com/CelsoReyes/zmap7>. Desafortunadamente esta versión alfa de ZMAP7 está todavía en construcción y tiene fuertes modificaciones (y grandes vacíos) frente a ZMAP6 (2001) al punto que muchas funciones cambiaron o no son compatibles. Esta versión del software ZMAP7 no tiene tutoriales.

2.2. LA BASE DE DATOS SISMOLÓGICA PARA LA REGIÓN

El Catálogo de Sismicidad Instrumental recopilado para la región de estudio por la Red Sismológica Nacional de Colombia – RSNC contiene los sismos entre el 1 de junio de 1993 y el 28 de febrero de 2018, correspondiente al periodo de casi 25 años en el cual adquieren los registros con el software Earthworm (desarrollado por ISTI) y los procesan con SEISAN, (desarrollado por GEUS). A partir del 1 de marzo de 2018 la red adquiere y procesa los registros con SEISCOMP3, desarrollado por GFZ y GEMPA, por ello la restricción de fecha final el 28 de febrero de 2018.

De la consulta al sitio web Visor de Sismos de la Red Sismológica Nacional de Colombia – RSNC, en <https://www2.sgc.gov.co/sgc/sismos/Paginas/catalogo-sismico.aspx>, realizada el 25 de septiembre de 2018 se obtiene el archivo de Excel® reporte.xlsx, que contiene la base de datos de 4707 eventos en el cuadrante definido por -80.00° a -77.50° de longitud y por 1.50° a 7.00° de latitud, registrados entre el 1 de junio de 1993 y el 28 de febrero de 2018, con rango de magnitudes entre $1 < ML < 9$ y con profundidades $0 \leq h < 100$ km. En este polígono 238 eventos tienen magnitudes ML y Mw (el 5.06 % de la base).

Con el archivo reporte.xlsx, descargado de la RSNC, se genera el archivo Excel® Datos_RSNC.xlsx de 16 columnas con información de fecha, hora_UTC, longitud (grados), latitud (grados), profundidad (km), Magnitud ML, Magnitud Mw, Departamento, Municipio, Nro de fases, RMS (seg), GAP (grados), error en latitud (km), error en longitud (km), error en profundidad (km) y estado (revisado). La fecha está en formato AAAA-MM-DD y la hora UTC en formato HH:MM:SS. Primero se eliminan 414 eventos que tienen profundidad $h = 0$ quedando 4293 sismos en la base. Aquí hay que tener en cuenta que debido a la distribución espacial irregular de los sismógrafos de la red no se tiene una cobertura uniforme para registrar correctamente las profundidades de muchos eventos, por esto es frecuente encontrar sismos con $ML = 0$, con $h = 0$ km. o con $h = 33$ km. como valor asignado cuando no se puede determinar la profundidad por falta de cobertura de la red. Luego, se organizan las columnas para que sean compatibles con el formato de entrada del software ZMAP7. Las diez columnas de dicho formato son, en estricto orden, Longitud, Latitud, Año, Mes, Día, ML,

Profundidad, Hora, Minuto y Segundo. Finalmente la hoja se convierte a un archivo ASCII separado por espacios con el nombre Datos_RSNC.txt.

De los 4293 eventos de la base de datos que cumplen con los parámetros de consulta se identifican 307 sobre la plataforma continental emergida de Colombia, en los departamentos de Nariño y de Cauca. Dado que estos 307 sismos continentales están dentro del polígono pero no hacen parte de este estudio de caracterización de corteza oceánica, se retiran del catálogo con el software ZMAP7. Así quedan 3986 eventos en el catálogo propio de sismicidad instrumental de la zona de estudio. En la **Figura 8** se presenta un mapa sísmico simplificado de la zona de estudio. El polígono rojo limita 3986 sismos del catálogo RSNC con profundidades hasta 100 km. La línea magenta es la Fosa Colombo-Ecuatoriana, zona de interacción entre las placas Nazca y de Suramérica, que recorre el fondo oceánico casi paralela a la Costa Pacífica Colombiana. La **Figura 9** muestra el mismo mapa sísmico en tres dimensiones.

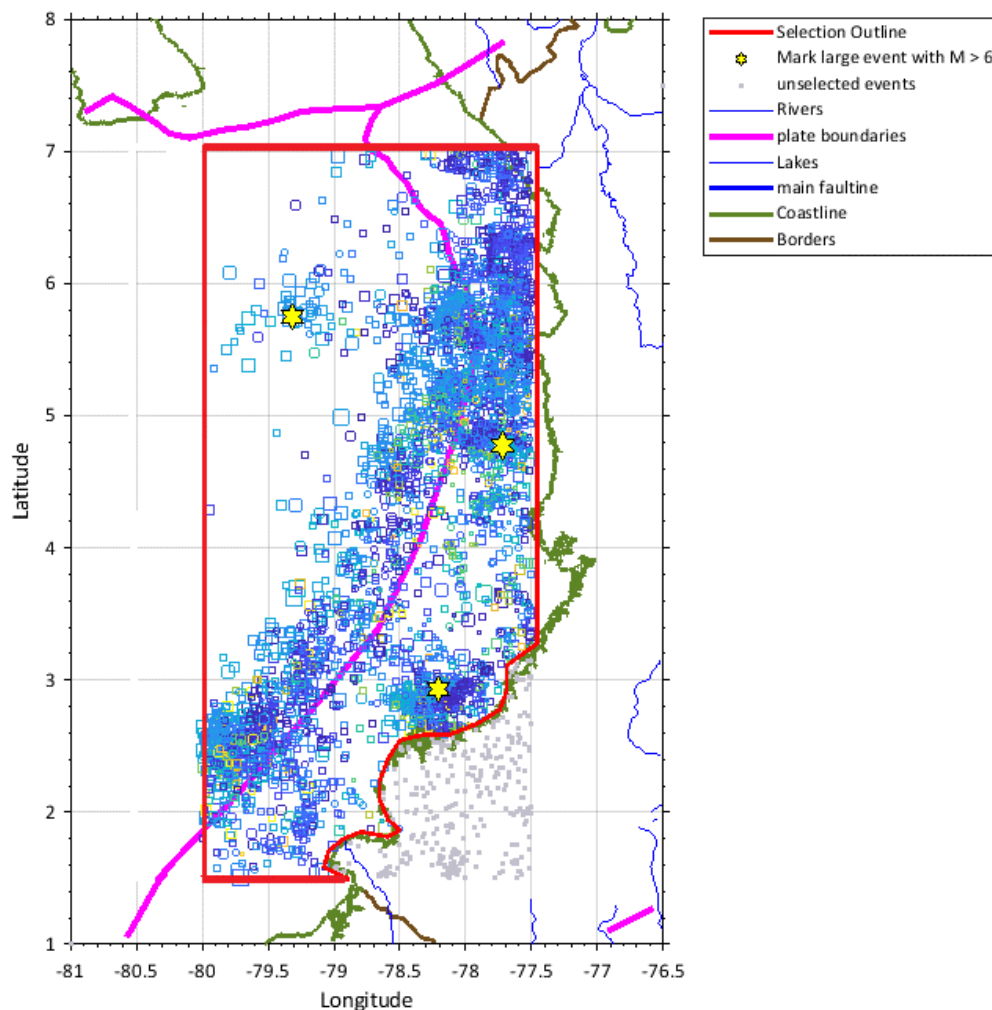


Figura 8. Mapa sísmico simplificado de la zona de estudio.

En el polígono rojo quedan inscritos 3986 eventos con profundidades hasta 100 km registrados entre el 1 de junio de 1993 y el 28 de febrero de 2018. La línea magenta corresponde a la frontera entre las Placas Tectónicas de Nazca y de Suramérica frente al Litoral Pacífico Colombiano conocida como Fosa Colombo-Ecuatoriana. Se destacan con estrellas amarillas los sismos con $M_L > 6$. Este mapa se construye con ZMAP7.

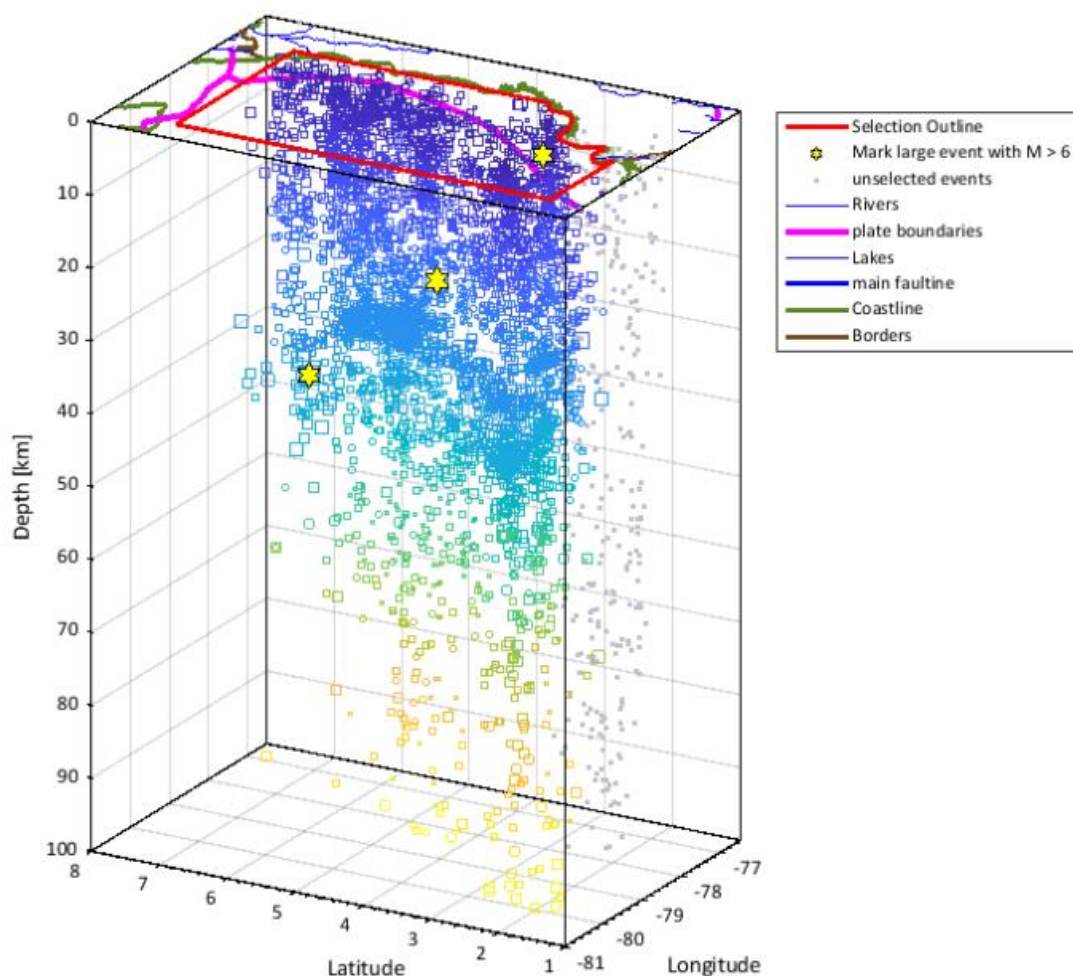


Figura 9. Mapa sísmico simplificado en tres dimensiones de la región de estudio. En el volumen limitado por el polígono rojo y 100 km de profundidad quedan inscritos 3986 eventos. La línea magenta corresponde a la Fosa Colombo-Ecuatoriana. El mapa en 3D se construye con ZMAP7.

2.3. UN ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CATÁLOGO SISMOLÓGICO PROPIO

De los mapas de las Figuras 8 y 9 se observa que 3986 sismos del catálogo propio de la zona de estudio, en el periodo considerado, tienen un comportamiento espacial donde la cantidad de eventos por unidad de área (o volumen) no es constante, es decir, no corresponde a un Proceso Homogeneo de Poisson (Cardenas, et al, 2010). Entonces los datos se van a tratar como un Proceso Agregado de Poisson, con agrupaciones individuales de eventos ubicados en el espacio de forma aleatoria.

Así, una gráfica del logaritmo decimal del número de eventos (discretos y acumulados) contra la magnitud registrada para los 3986 sismos del catálogo propio de la zona de estudio, en el periodo 1-jun-1993 a 28-feb-2018, se muestra en la Figura 10. La tasa acumulada de eventos en función del tiempo se muestra en la Figura 11.

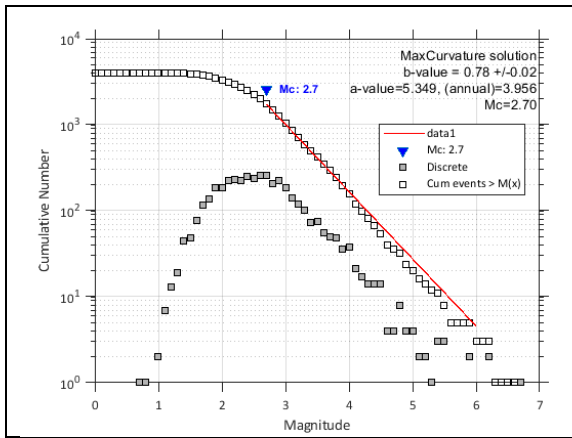


Figura 10. Gráfica de FMD para 3986 sismos entre 1-jun-1993 y 28-feb-2018 en la zona de estudio.

Los parámetros estadísticos obtenidos son: valor- $b = 0.78$, valor- $a = 5.349$ y $M_c = 2.70$

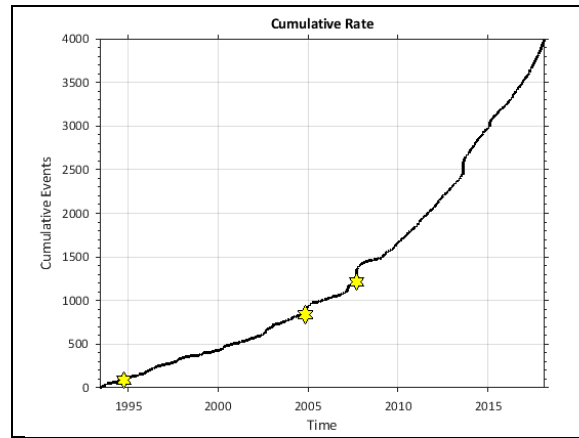


Figura 11. Tasa acumulada de eventos en el tiempo para 3986 sismos en el volumen de estudio.

La pendiente cambia con el evento de 2007-9-10. Las estrellas amarillas muestran sismos con $M_L > 6.0$.

De la gráfica FMD (Figura 10) se destaca la magnitud de corte $M_c = 2.70$ para el catálogo propio y el valor- $b = 0.78 \pm 0.02$. Una proyección de la recta que corte el eje de las magnitudes propone un evento máximo esperado para la región de 6.8ML. De la Figura 11 se destaca que la tasa acumulada en el tiempo ha variado al menos tres veces y en particular aumentó notablemente desde el evento de 2007-9-10 (6.2ML). Los histogramas de magnitud y de profundidad para la zona de estudio se presentan en las Figuras 12 y 13.

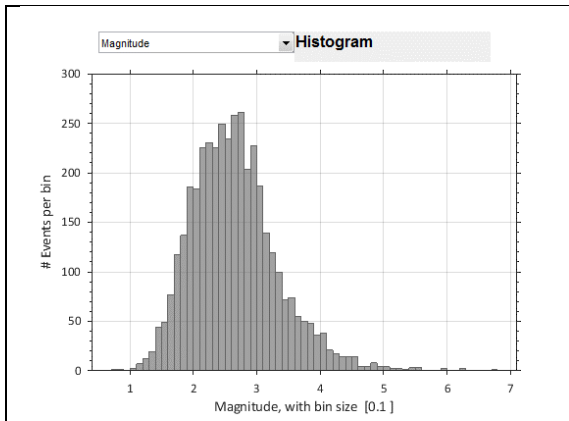


Figura 12. Histograma de magnitud para el catálogo instrumental de la región en pasos de 0.1.

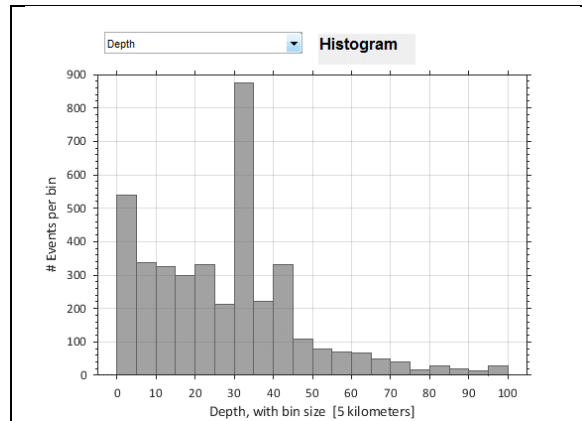


Figura 13. Histograma de profundidad para el catálogo con intervalos de 5 km. Se observa una anomalía entre 30 y 35 km.

Del histograma de magnitudes para la región (Figura 12) se observa que los eventos que más se repiten tienen magnitudes 2.4, 2.6 y 2.7 con más de 250 registros cada uno. Por otro lado el histograma de profundidad (Figura 13) muestra una tendencia decreciente que empieza con 550 eventos entre 0 y 5 km, alcanza 100 eventos a 45 km. y menos de 20 eventos a los 90 km. de

profundidad pero esta tendencia es rota por una anomalía de casi 900 sismos entre 30 y 35 km. que como se explicó corresponde a la incertidumbre por la distribución irregular de los sensores y la cobertura de la red sismológica al monitorear sismos de fondo oceánico.

Otra información muy apreciada del Análisis Estadístico en Sismología se presenta en los histogramas de latitud (Figura 14), longitud (Figura 15), fecha (Figura 16) y tasa acumulada de liberación de momentum (Figura 17).

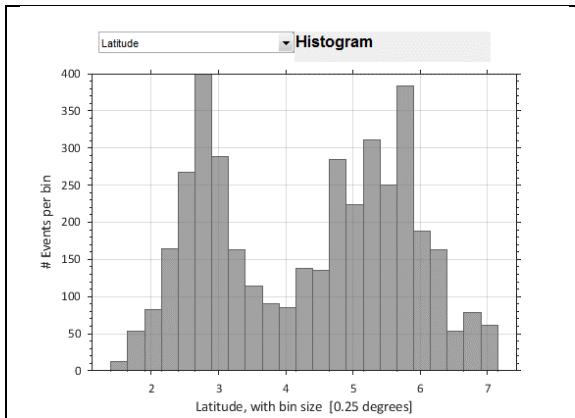


Figura 14. Histograma de latitud para pasos de 0.25°. Los eventos que más se presentan (más de 380 registros cada uno) se sitúan cerca de las latitudes 2.8° y 5.8°.

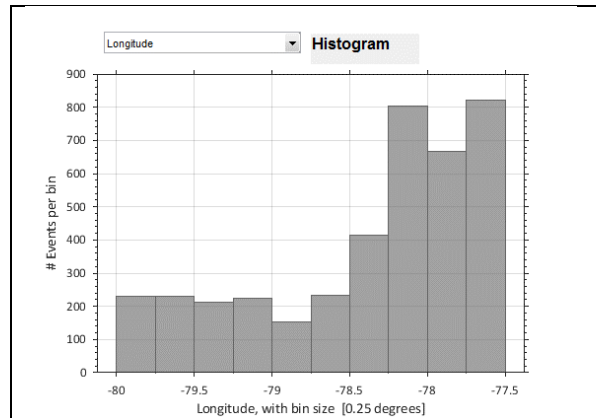


Figura 15. Histograma de longitud para pasos de 0.25°. Se observa una importante acumulación de eventos hacia la costa (Andén Pacífico Colombiano).

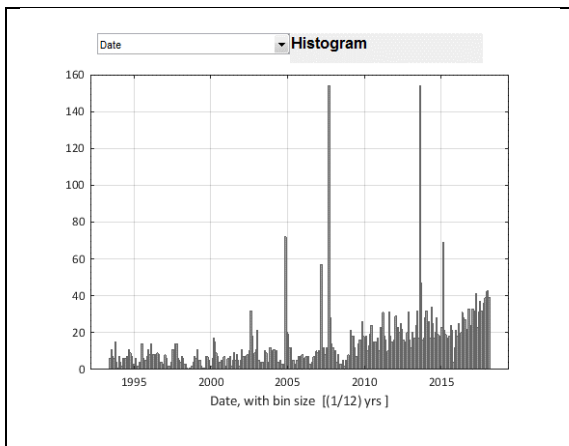


Figura 16. Histograma de fecha para el catálogo instrumental en pasos de 1/12 de año. A mediados de 2007 y de 2013 se presentaron más de 150 registros.

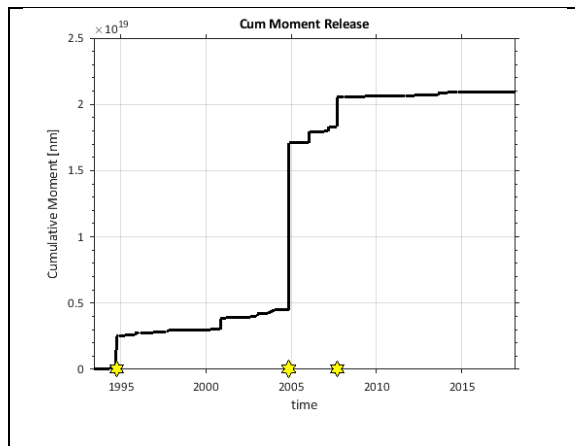
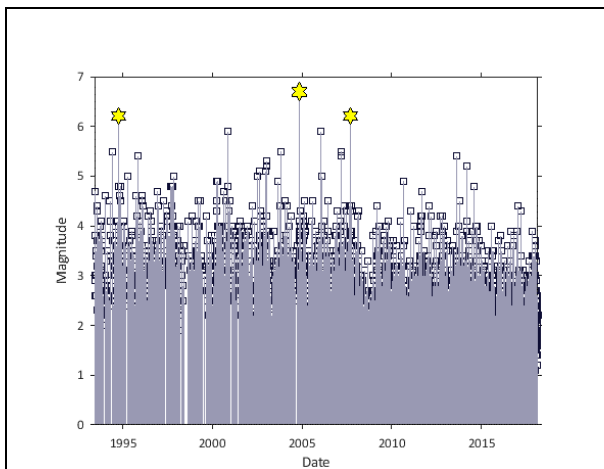
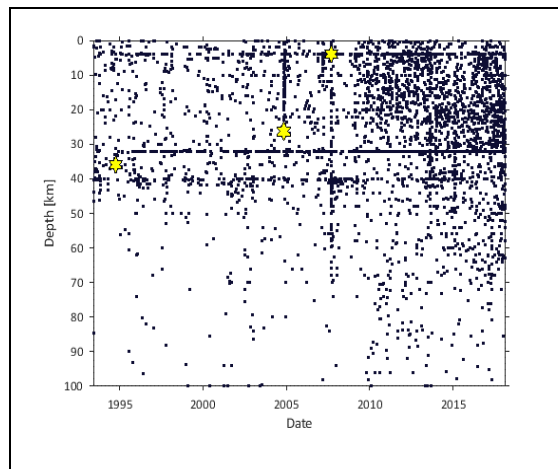


Figura 17. Tasa acumulada de liberación de momento para 3986 eventos del catálogo. Se destaca que el evento de 2004-11-15 (6.7ML) produjo un incremento mayor a 1.2×10^{19} Nm. en la tasa acumulada de liberación de momento.

Además de los histogramas para el catálogo instrumental de la región también se elaboran gráficas de magnitud contra fecha (Figura 18) y profundidad del sismo contra fecha (Figura 19) en ZMAP7.



*Figura 18. Gráfico de Magnitud ML contra fecha.
Se destacan los eventos de 1994-9-27 (6.2ML), de 2004-11-15 (6.7ML) y de 2007-9-10 (6.2ML).*



*Figura 19. Gráfico de profundidad contra fecha.
Se destacan tres sismos con ML > 6.0 a 35.9 km, 26.2 km y 4.0 km de profundidad respectivamente.*

En las Figuras 18 y 19 se destacan tres eventos con magnitudes ML mayores que 6.0, el sismo de 1994-9-27 (con 6.2ML y 35.9 km. de profundidad), el sismo de 2004-11-15 (con 6.7ML y 26.2 km.) y el sismo de 2007-9-10 (con 6.2ML y profundidad 4.0 km.).

En el gráfico de profundidad contra fecha (Figura 19) se observan segmentos rectos horizontales a 4, 10, 33 y 40 km. aproximadamente que pueden asociarse con ruido de la retícula utilizada en el software SEISAN de adquisición de datos. También se observa que la densidad de sismos registrados aumenta en el año 2009 para todas las profundidades como consecuencia del aumento en la cantidad de receptores, mejoramiento en la tecnología y ampliación de la cobertura red sismológica.

2.4. ALGUNOS PERFILES SÍSMICOS PARA LA ZONA DE ESTUDIO.

Para conocer la distribución vertical (en profundidad) de los eventos en la zona de estudio se construyeron en el software ZMAP7 cinco perfiles sísmicos etiquetados **A-A'**, **B-B'**, **C-C'**, **D-D'** y **E-E'**.

El mapa regional de las cinco secciones sísmicas se muestra en la Figura 20. En la elaboración de los perfiles (Figuras 21 a 25) se ha cuidado que la sección sea tan perpendicular a la Fosa Colombo-Ecuatoriana como sea posible, que la profundidad del perfil sea de 100 km. para facilitar las comparaciones y que cruce al menos un clúser o contenga un evento de magnitud ML > 6.0. Todos los perfiles elaborados tienen 20 km. ancho.

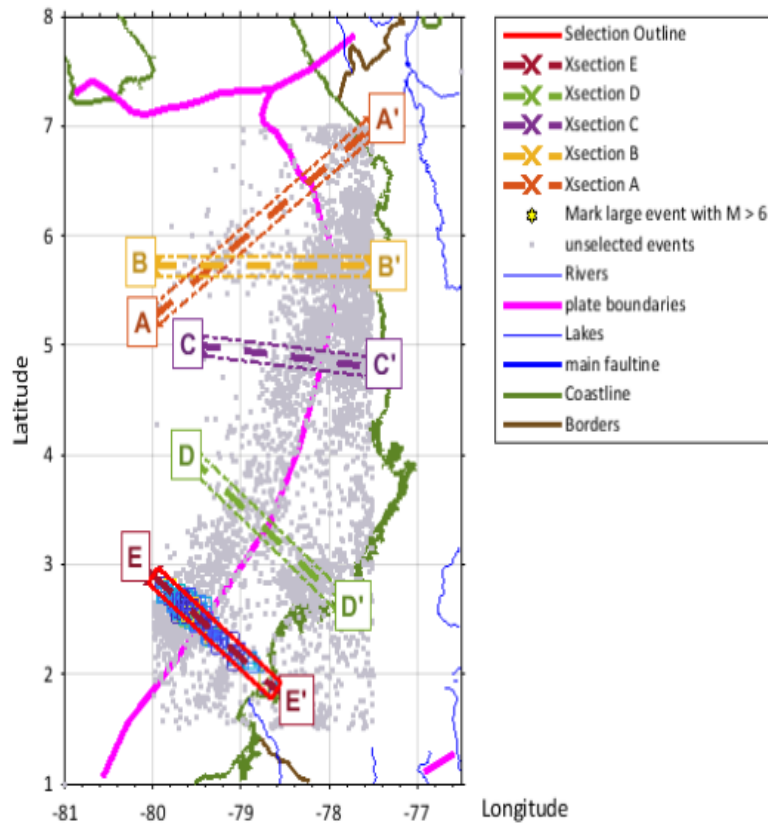


Figura 20. Mapa de la zona de estudio con cinco perfiles sísmicos etiquetados A-A', B-B', C-C', D-D' y E-E'. Los criterios para el trazado de los perfiles son perpendicularidad con la Fosa, 100 km de profundidad y que cruce al menos un clúster o tenga un evento con ML > 6. Cada perfil tiene 20 km. de ancho.

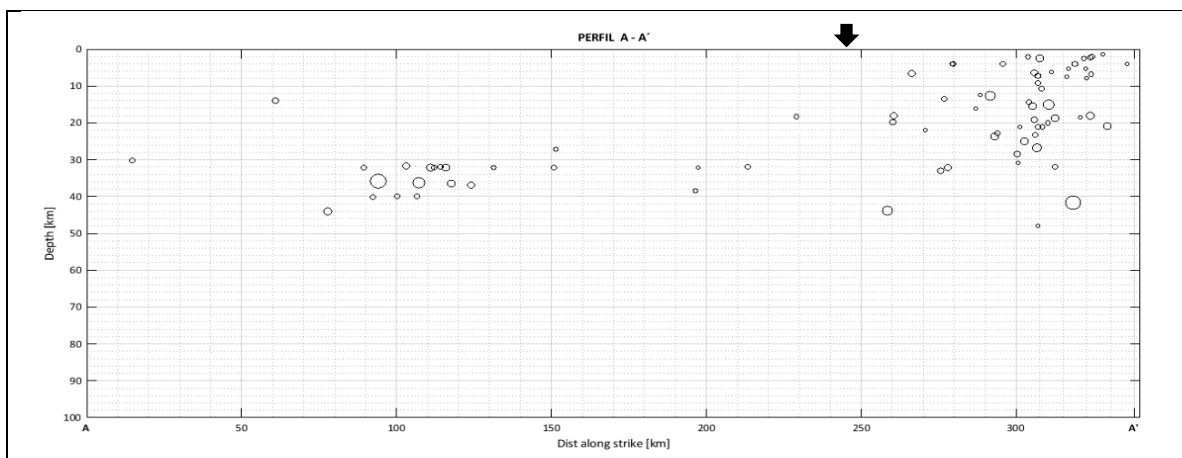
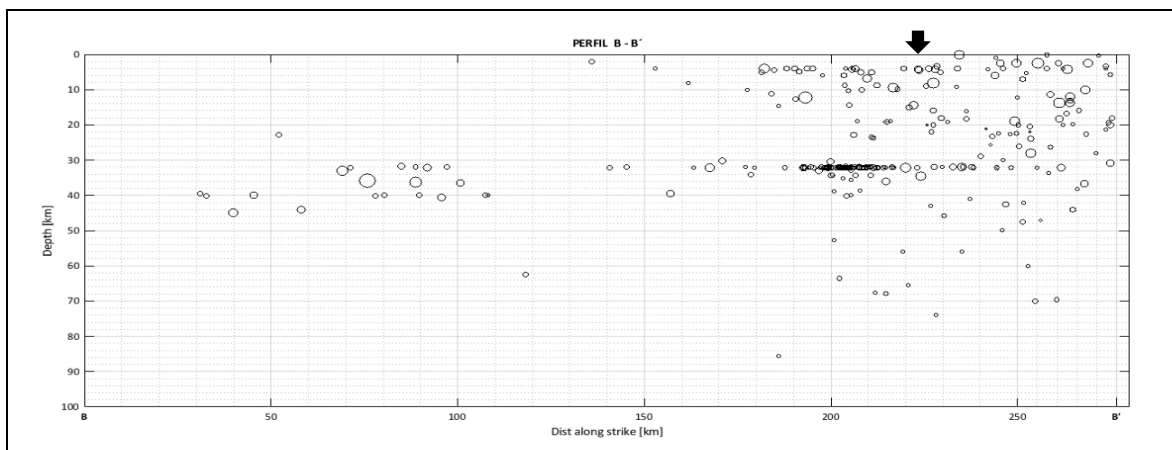
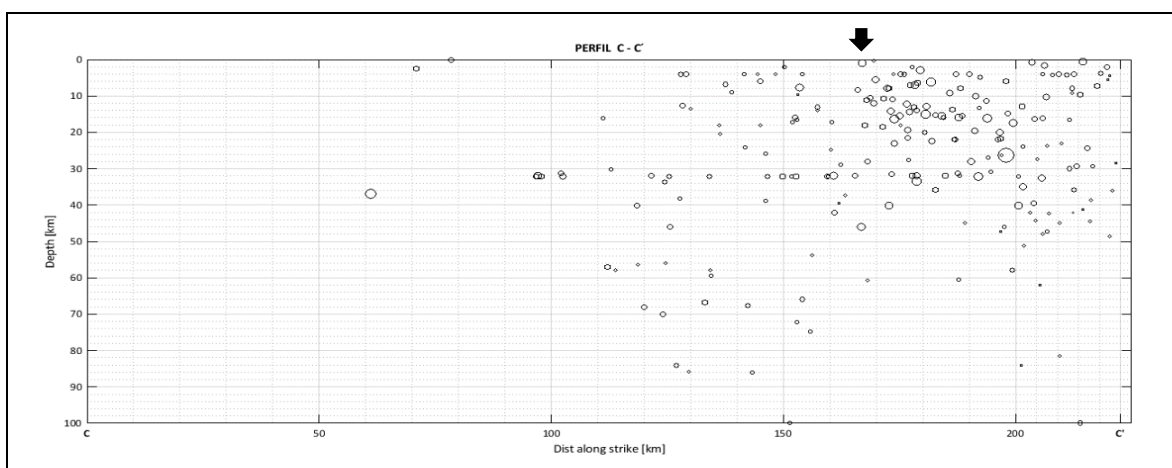


Figura 21. Perfil A-A', entre las coordenadas (-80.000, 5.250) y (-77.500, 7.000). Tiene más de 330 km. de longitud, contiene el sismo de **1994-9-27** (6.2ML y profundidad 35.9 km). Se presentan cuatro eventos importantes con profundidades entre 30 y 45 km. y no hay sismos por debajo de 50 km. Es evidente un clúster de eventos pequeños y someros hasta 30 km. cerca de la costa chocoana en A'.



*Figura 22. Perfil B-B', entre las coordenadas (-80.000, 5.720) y (-77.500, 5.720). De más de 270 km. de longitud, contiene el sismo de **1994-9-27** (6.2ML con profundidad 35.9 km). Se presenta una interesante aglomeración de sismos con menos de 30 km. de profundidad frente al golfo de Tribugá en B'. La actividad sísmica por debajo de 50 km. se presenta cerca a la costa y es muy pequeña.*



*Figura 23. Perfil C-C', entre las coordenadas (-79.500, 5.000) y (-77.500, 4.800). Con longitud de 222 km, contiene el sismo de **2004-11-15** de 6.7ML con $h = 26.2$ km. Se aprecia importante actividad en los últimos 70 km. del perfil antes de la costa con eventos de magnitud pequeña y media hasta 50 km. de profundidad.*

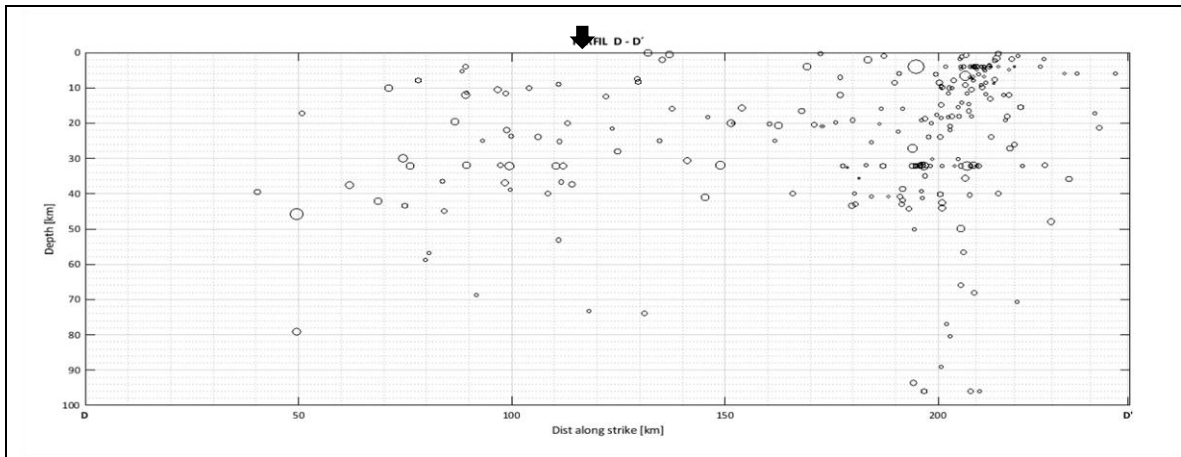


Figura 24. Perfil **D-D'**, entre las coordenadas (-79.600, 4.000) y (-77.860, 2.6520). Tiene 245 km. de longitud. Contiene el sismo de **2007-9-10** de 4 km. de profundidad. Se observa moderada actividad hasta 50 km. de profundidad en todo el perfil. También se presenta acumulación de eventos cerca de la costa caucana. La actividad por debajo de 50 km. es baja.

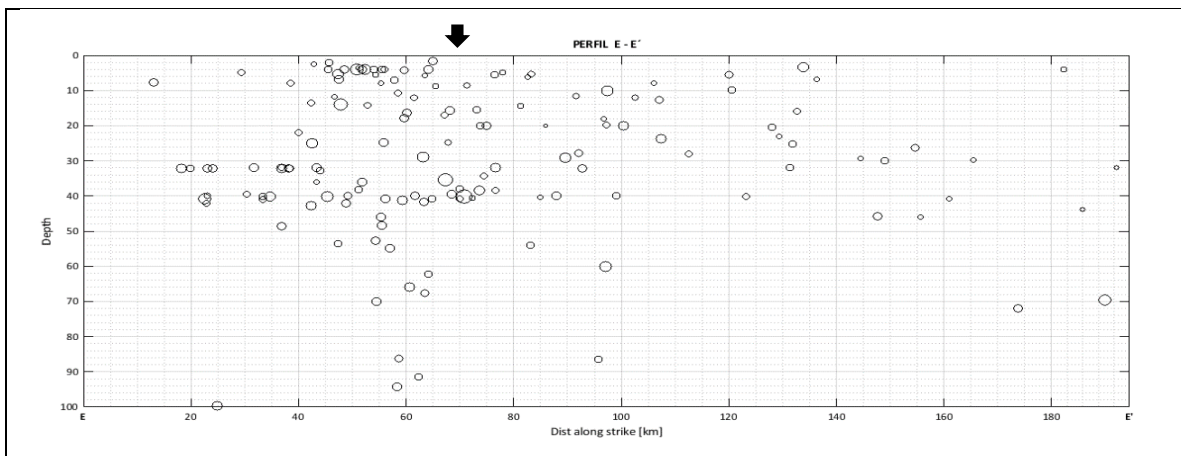


Figura 25. Perfil **E-E'**, entre las coordenadas (-80.000, 2.900) y (-78.500, 1.850). Tiene 222 km de longitud. Hay eventos de magnitudes intermedias a varias profundidades y pocos eventos de magnitudes pequeñas.

En la **Figura 26** se muestra la gráfica de distribución de frecuencias contra magnitud (FMD) para los cinco perfiles del mapa de la **Figura 20** y se ha dejado como referencia la curva del catálogo propio. Para cada perfil se establecen los parámetros estadísticos M_c (con el método de solución por máxima curvatura), valor- b y valor- a resaltados con el color correspondiente.

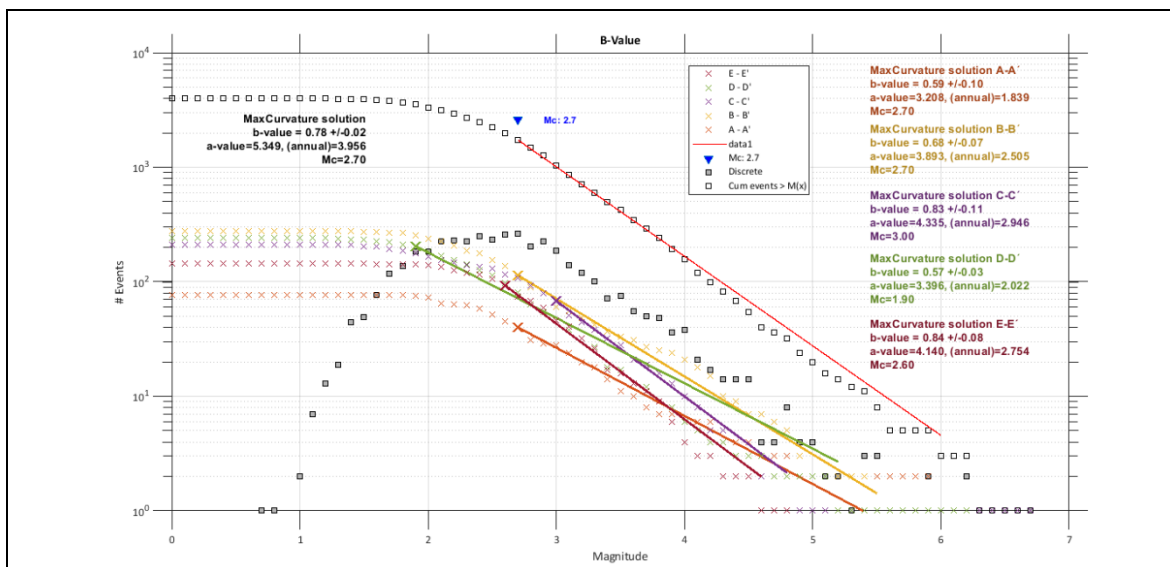


Figura 26. Gráfica de logaritmo de número de eventos acumulados contra magnitud del evento para los perfiles A-A', B-B', C-C', D-D' y E-E' del mapa de la Figura 20. Se deja la curva del catálogo propio como referencia. Para cada perfil se establece el valor-b, el valor-a y la magnitud de corte M_c .

De la Figura 26 los valores obtenidos de magnitud de corte y parámetros valor-b y valor-a con el método de máxima curvatura son:

Perfil Catálogo Propio:	$M_c = 2.70$;	valor-b = 0.78;	valor-a = 3.956
Perfil A-A':	$M_c = 2.70$;	valor-b = 0.59;	valor-a = 3.208
Perfil B-B':	$M_c = 2.70$;	valor-b = 0.68;	valor-a = 3.893
Perfil C-C':	$M_c = 3.00$;	valor-b = 0.83;	valor-a = 4.335
Perfil D-D':	$M_c = 1.90$;	valor-b = 0.57;	valor-a = 3.396
Perfil E-E':	$M_c = 2.60$;	valor-b = 0.84;	valor-a = 4.140

Los perfiles que arrojan valores-b más altos son C-C' y E-E' con 0.83 y 0.84 pero no son significativamente mayores que el valor-b más bajo del perfil D-D' con 0.57.

2.5. DOS AMBIENTES SISMOTECTÓNICOS SUBMARINOS

En el trabajo de caracterización sismotectónica para el Valle del Cauca y regiones aledañas de Salcedo y Pérez (2016) se definen cuatro ambientes sismotectónicos, dos submarinos (I y II) y dos sobre la plataforma continental emergida a diferentes profundidades (III y IV) como se mostró en las Figuras 4, 5 y 6 de la sección 1.2.2. Considerando la idea y conservando la nomenclatura se definen entonces, para la zona de estudio de esta tesis, dos ambientes submarinos separados por la Fosa Colombo-Ecuatoriana así:

Ambiente Sismotectónico I (AST- I) es el volumen cuya expresión superficial es el polígono definido entre el meridiano -80.00° y la Fosa Colombo-Ecuatoriana y entre 1.50° y 7.00° de latitud. Corresponde a la Placa Oceánica de Nazca y contiene 1605 eventos, (40.27%) del catálogo de sismicidad instrumental. Comprende aproximadamente 92407.5 km^2 de superficie (**Figura 27**).

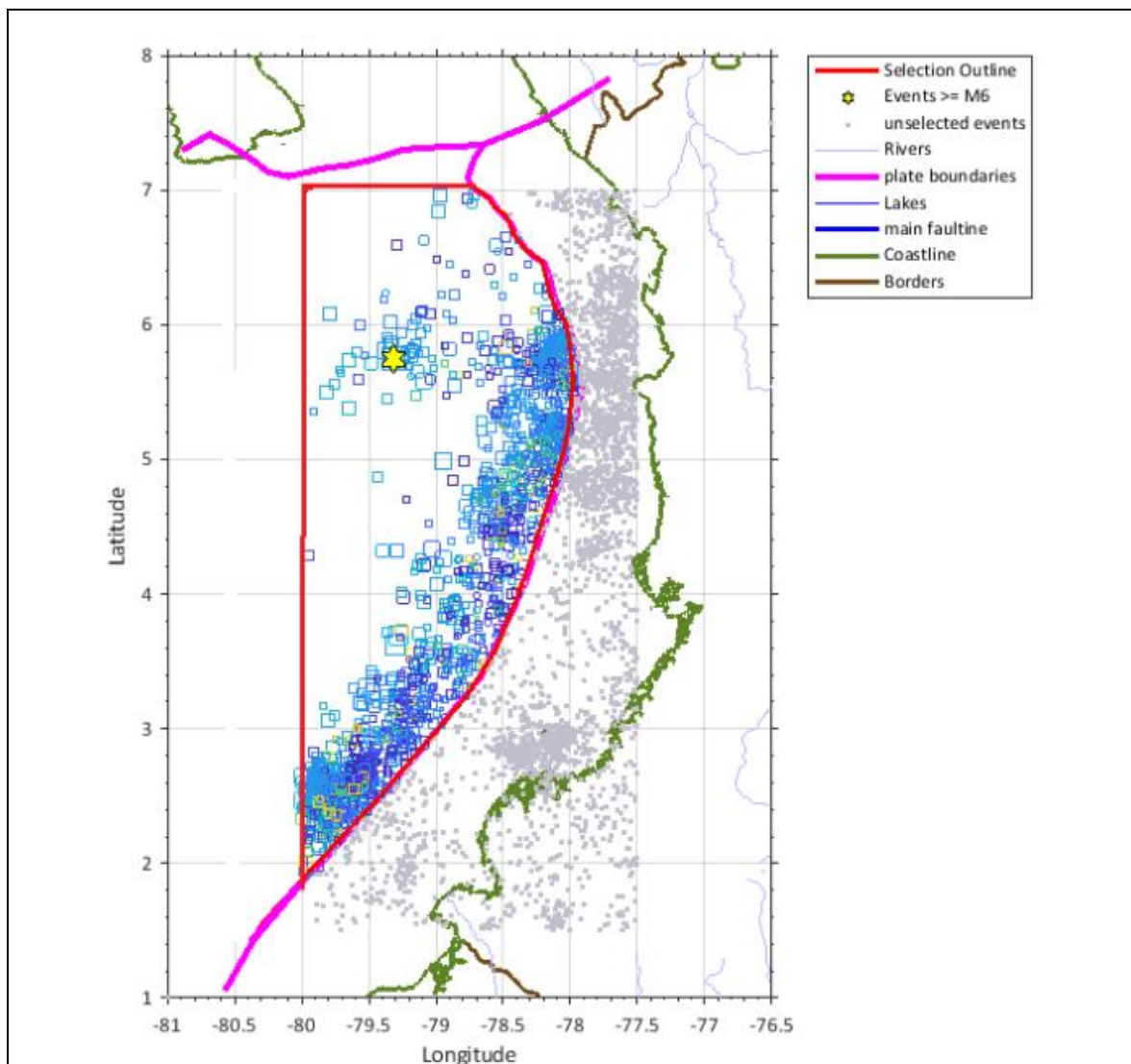


Figura 27. Mapa del Ambiente Sismotectónico AST- I.

Abarca el volumen entre el meridiano -80.00 y la Fosa Colombo-Ecuatoriana, los paralelos 1.50 y 7.00 y 100 km . de profundidad. Contiene 1605 eventos sobre la Placa Oceánica de Nazca y comprende 92407.5 km^2 de superficie aproximadamente.

Ambiente Sismotectónico II (AST- II) es el volumen cuya superficie está contenida en el polígono definido entre la Fosa Colombo-Ecuatoriana y el meridiano -77.50° y entre 1.50° y 7.00° de latitud excluyendo la parte emergida de los departamentos de Cauca y Nariño. Corresponde a la zona de flexión e interacción interplacas y contiene 2390 eventos (59.96%) del catálogo. Son aproximadamente 58524.75 km² de superficie (Figura 28).

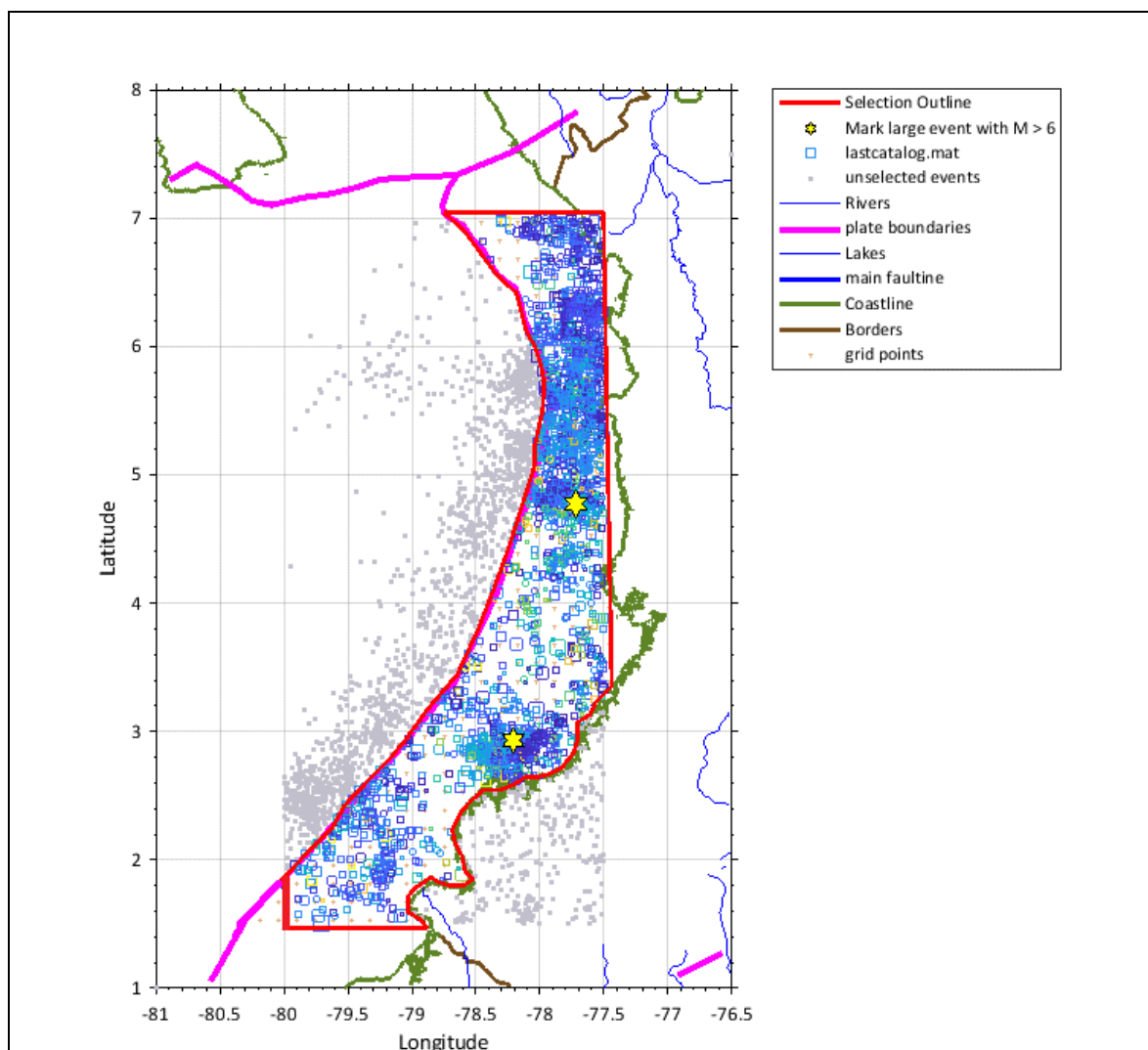


Figura 28. Mapa del Ambiente Sismotectónico AST-II.

Contiene 2390 eventos sobre la zona de flexión e interacción interplacas. Comprende el volumen entre la Fosa Colombo-Ecuatoriana desde el meridiano -80.00 y la Costa Pacífica Colombiana, en Valle y Chocó hasta el meridiano -77.50 con 100 km. de profundidad. Son aproximadamente 58524.75 km² de superficie.

Así, de los 3986 sismos del catálogo instrumental recopilado para la zona de estudio quedan 1605 (40.27%) en el Ambiente Sismotectónico I y 2390 (59.96%) en el Ambiente Sismotectónico II. Al menos nueve sismos quedaron traslapados en ambos ambientes muy seguramente bajo la frontera común de la Fosa Colombo-Ecuatoriana de color magenta en las figuras.

Dado que los ambientes sismotectónicos son volúmenes, se consideró que la profundidad para estos es el límite que se declaró en el catálogo instrumental de la zona de estudio y en los perfiles sísmicos, 100 km. Las Figuras 29 y 30 muestran los mapas de los ambientes I y II en 3D.

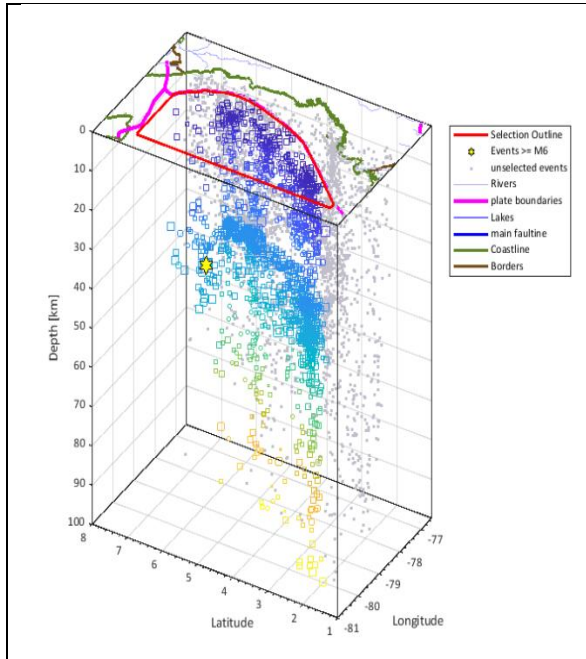


Figura 29. Mapa del ambiente sismotectónico - I en 3D. Contiene 1605 eventos sobre la Placa Oceánica de Nazca hasta 100 km. de profundidad.

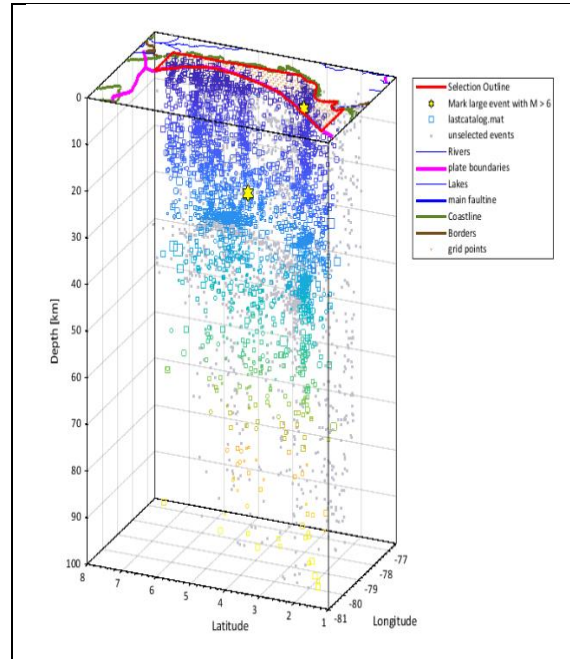


Figura 30. Mapa del ambiente sismotectónico - II en 3D. Contiene 2390 eventos sobre la zona de flexión e interacción interplacas hasta 100 km. de profundidad.

2.5.1. Comparación estadística entre los Ambientes Sismotectónicos.

A cada ambiente sismotectónico I y II se le asocia un subcatálogo al cual se le hacen las gráficas de FMD, los histogramas de magnitud, profundidad, latitud, longitud y fecha, la tasa acumulada de liberación de momento y las gráficas de magnitud contra fecha y profundidad contra fecha. En las Figuras 31 y 32 se muestran los parámetros estadísticos M_c , valor- a y valor- b para los ambientes sismotectónicos I a la izquierda y II a la derecha.

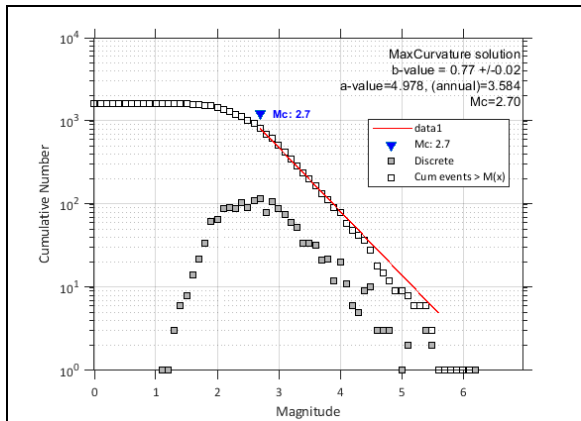


Figura 31. Gráfica de FMD para 1605 sismos del subcatálogo del AST-I.
Los parámetros estadísticos son $Mc = 2.70$; valor- $a = 4.978$ y valor- $b = 0.77 \pm 0.02$

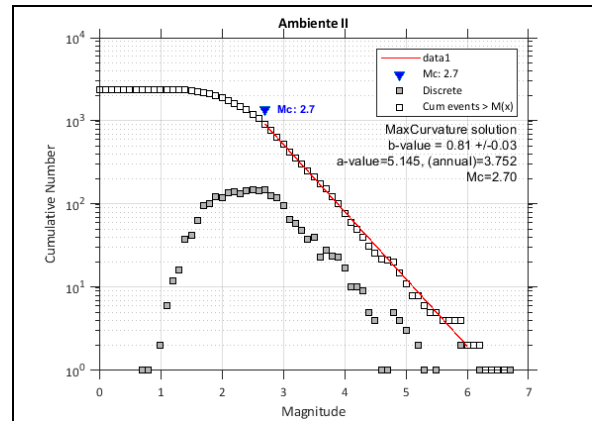


Figura 32. Gráfica de FMD para 2390 sismos del subcatálogo del AST-II.
Los parámetros son $Mc = 2.70$; valor- $a = 5.145$ y valor- $b = 0.81 \pm 0.03$

De las gráficas se destaca que los valores de magnitud de corte Mc para ambos ambientes coinciden con el valor $Mc = 2.70$ del catálogo propio de la zona de estudio. También puede decirse que el valor- b del ambiente I (0.77) es muy cercano al valor- b obtenido para toda la zona de estudio (0.78) en la Figura 10) mientras que el valor- b del AST- II (0.81) es un 3.9% mayor. De la Figura 31 se tiene que el evento máximo estadísticamente esperado es un 6.5ML (de la extrapolación de la recta roja al eje de magnitudes) mientras que en la Figura 32 el máximo esperado corresponde a un 6.3ML pero en el 2004-11-15 ocurrió un sismo 6.7ML. Las tasas de eventos acumuladas para cada ambiente sismotectónico se muestran en las Figuras 33 y 34.

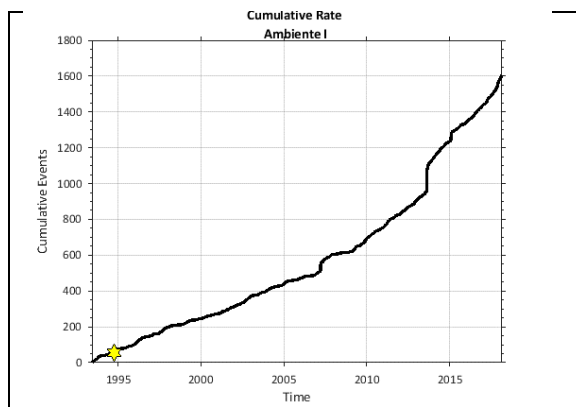


Figura 33. Tasa acumulada de eventos para 1605 sismos del subcatálogo AST-I.
Se detectan cambios en la pendiente a mediados de 2007 y finales de 2013. La estrella amarilla corresponde al sismo de 1994-9-27 (6.2 ML).

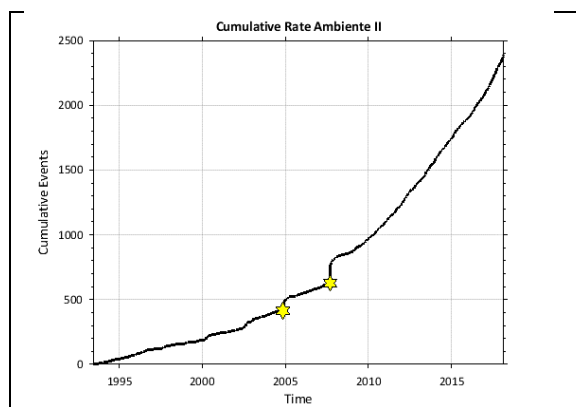


Figura 34. Tasa acumulada de eventos para 2390 sismos del subcatálogo AST-II.
Se detectan cambios en la pendiente luego de los sismos de 2004-11-15 (6.7 ML) y de 2007-9-10 (6.2 ML).

A continuación se presentan, para comparación, los histogramas de magnitud (Figuras 35 y 36), de profundidad (Figuras 37 y 38), de latitud (Figuras 39 y 40), de longitud (Figuras 41 y 42) y de fecha (Figuras 43 y 44) para cada ambiente sismotectónico, AST-I a la izquierda y AST-II a la derecha.

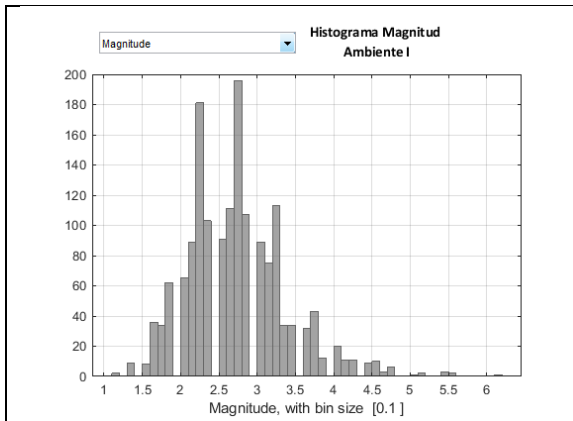


Figura 35. Histograma de magnitud para 1605 sismos del subcatálogo AST-I en pasos de 0.1. Eventos de magnitudes 2.2 y 2.8 se han presentado más de 180 veces en este ambiente.

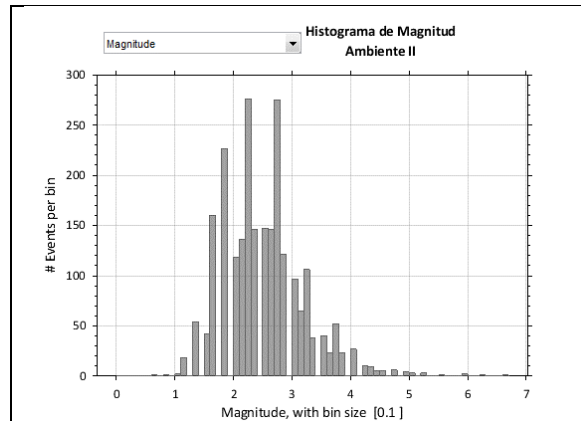


Figura 36. Histograma de magnitud para 2390 sismos del subcatálogo AST-II en pasos de 0.1. Sismos de magnitud 2.2 y 2.7 se han registrado más de 270 veces.

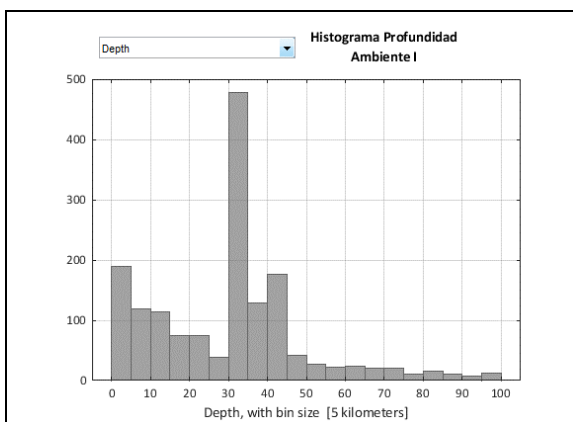


Figura 37. Distribución de sismos con la profundidad para el AST- I con intervalos de 5 km. Eventos con profundidad mayor que 50 km. son poco frecuentes. Hay una marcada anomalía en 33 km. consecuencia del diseño de la red y el software de adquisición.

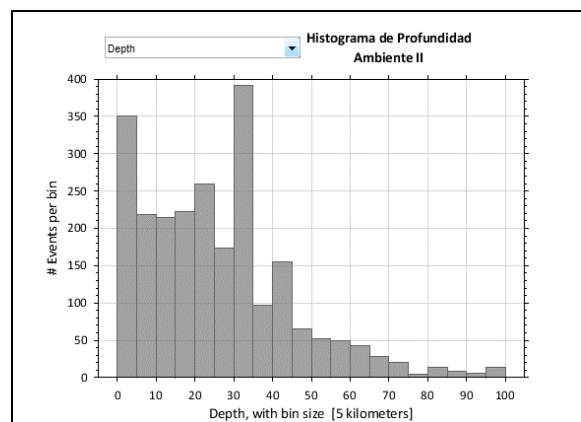


Figura 38. Distribución de sismos en profundidad para el AST-II con intervalos de 5 km. Aparece alta densidad de sismos someros y baja densidad para profundidades mayores que 75 km. Hay una clara anomalía en 33 km.

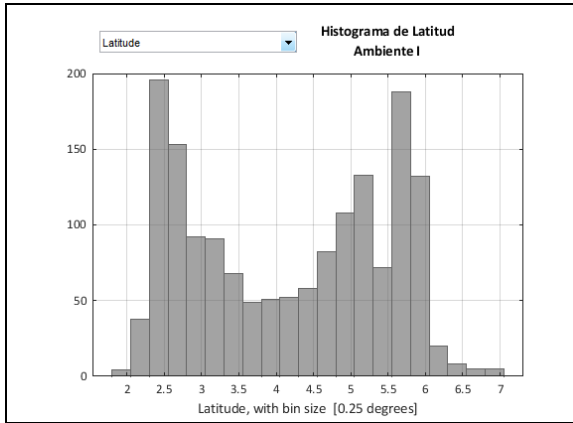


Figura 39. Histograma de Latitud para AST-I. Los eventos que más se presentan están cerca de 2.5° y 5.7° con más de 180 sismos.

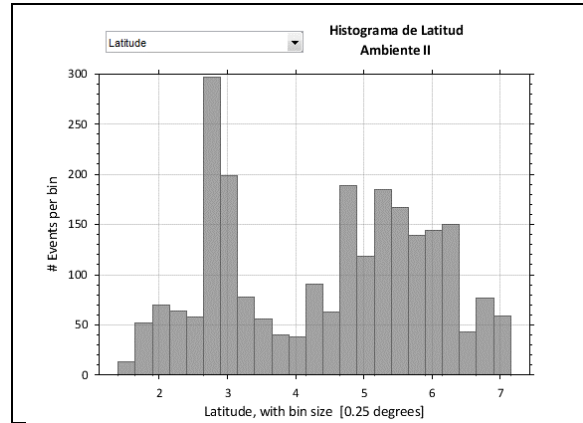


Figura 40. Histograma de Latitud para AST-II. Los eventos que más se presentan están entre 2.8° y 3.0° (casi 500). La densidad también es apreciable entre 4.5° y 6.5° con más de 120 sismos por bin.

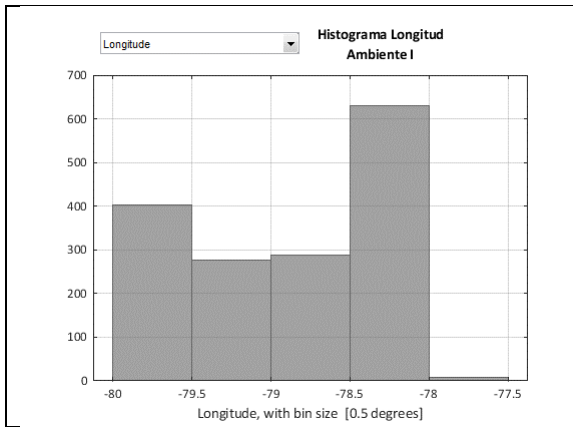


Figura 41. Histograma de Longitud para el AST-I. La acumulación de eventos hacia la costa chocoana, entre -78.5° y -78.0° se explica por el trazo de la fosa Colombo-Ecuatoriana entre 5° y 6° de latitud (Figura 27).

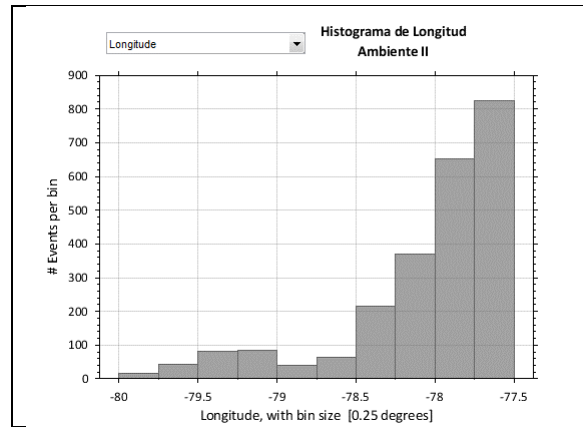


Figura 42. Histograma de Longitud para el AST-II. Aparece una acumulación de eventos hacia la costa chocoana, entre -78.5° y -77.5°. Como un grado de longitud corresponde aproximadamente a 111 km. entonces 2.5° son 277.5 km.

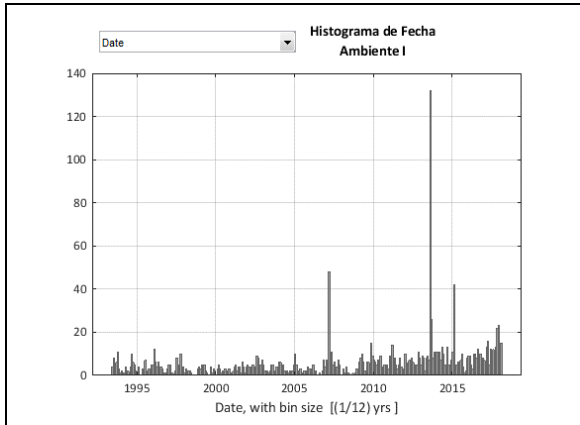


Figura 43. Histograma de fecha para el subcatálogo del AST- I en intervalos de 1/12 de año entre el 1-jun-1993 y el 28-feb-2018.

Se presentan más de 40 registros a mediados de 2007 y más de 130 a finales de 2013.

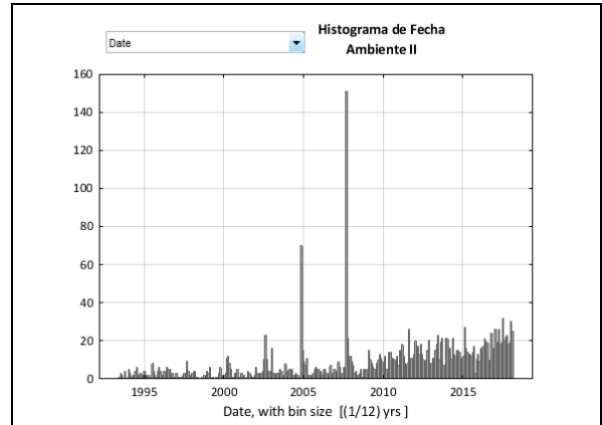


Figura 44. Histograma de fecha para el subcatálogo del AST- II en intervalos de 1/12 de año entre el 1-jun-1993 y el 28-feb-2018.

Se presentan más de 70 registros a finales de 2004 y mas de 150 a mediados de 2007.

La tasa acumulada de liberación de momento para cada uno de los ambientes sismotectónicos se muestra en las Figuras 45 y 46.

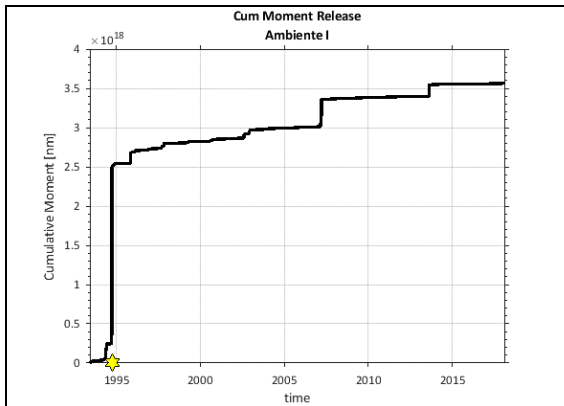


Figura 45. Tasa acumulada de Liberación de Momento para 1605 eventos del AST-I ocurridos entre el 1-jun-1993 y el 28-feb-2018.

Se destaca el efecto del sismo 1994-9-27 en la tasa acumulada.

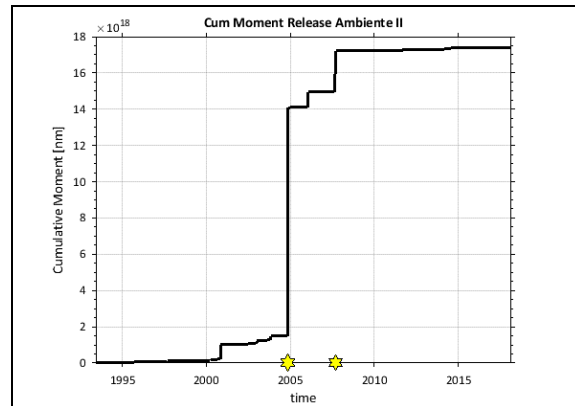


Figura 46. Tasa acumulada de Liberación de Momento para 2390 eventos del AST-II ocurridos entre el 1-jun-1993 y el 28-feb-2018.

Se destaca el efecto de los sismos 2004-11-15 y 2007-9-10 en la tasa de momento acumulada.

Los gráficos de magnitud contra fecha se presentan en las Figuras 47 y 48 y de profundidad contra fecha en las Figuras 49 y 50.

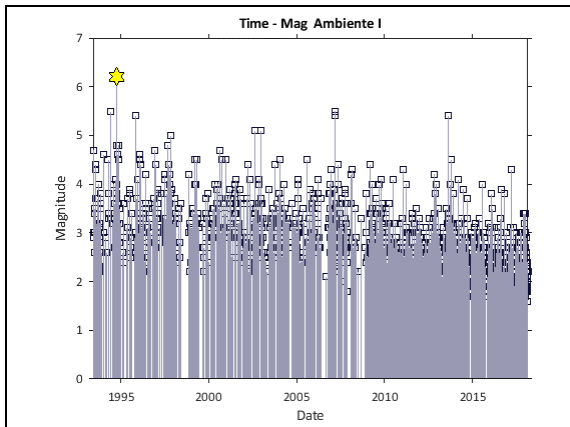


Figura 47. Gráfico de magnitud contra fecha para el subcatálogo de 1605 eventos del AST- I. En este ambiente se destaca el sismo 1994-9-27 (6.2ML).

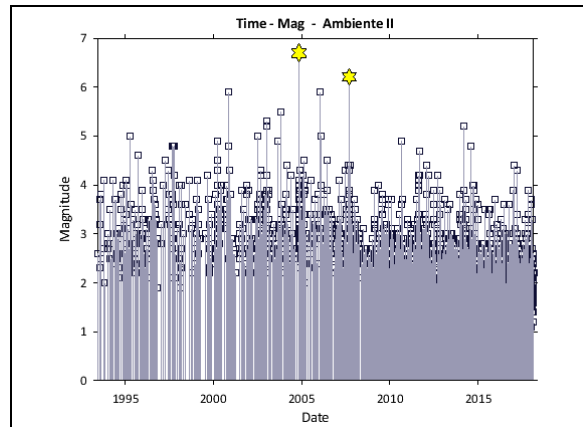


Figura 48. Gráfico de magnitud contra fecha para el subcatálogo de 2390 eventos del AST - II. Se destacan los sismos de 2004-11-15 (6.7ML) y 2007-9-10 (6.2ML).

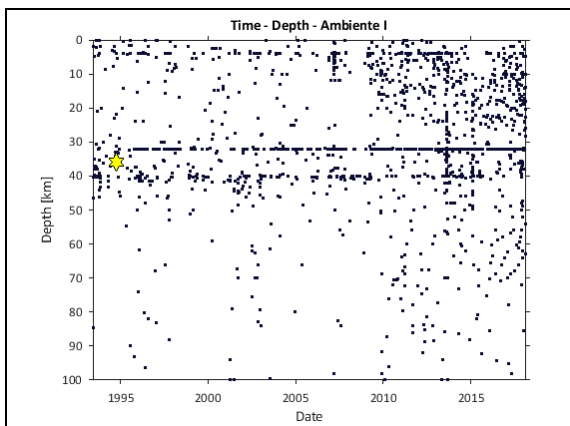


Figura 49. Gráfico de profundidad contra fecha para los eventos del subcatálogo del AST - I. Se destaca el sismo de 1994-9-27 (6.2 ML) a 35.9 km. de profundidad. Se observa la anomalía de 33 km. en la gráfica de profundidad y un incremento en la densidad de los registros desde 2010.

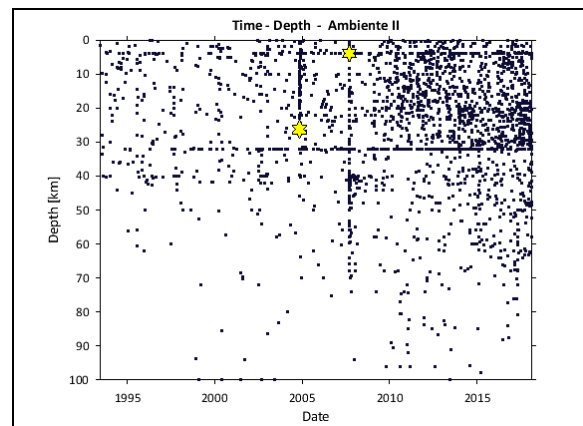


Figura 50. Gráfico de profundidad contra fecha para los eventos del AST - II. Se destacan los sismos de 2004-11-15 (6.7ML) y 2007-9-10 (6.2ML) con 26.2 km. y 4.0 km. respectivamente. Se observa la anomalía de 33 km. de profundidad.

2.5.2. Perfiles de Sismicidad en los Ambientes Sismotectónicos.

Para conocer la distribución en profundidad de los eventos en cada ambiente sismotectónico se trazaron en ZMAP7 dos perfiles sísmicos para el Ambiente – I, etiquetados **F-F'** y **G-G'**, y otros dos perfiles para el Ambiente – II etiquetados **M-M'** y **N-N'**.

Los perfiles trazados intentan seguir el flanco occidental de la Fosa Colombo-Ecuatoriana y de la Costa Pacífica Colombiana respectivamente. Los mapas de las secciones sísmicas se muestran en la **Figura 51 y 52** y los perfiles en los ambientes en las **Figuras 53 a 56**.

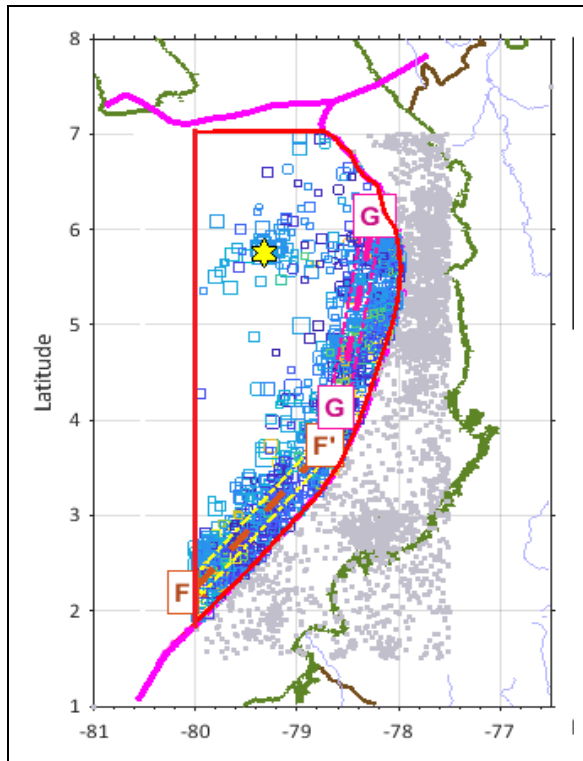


Figura 51. Mapa del AST – I con los perfiles sísmicos F-F' y G-G'. El criterio de trazado para los perfiles F-F' y G-G' es el seguimiento del flanco occidental de la Fosa Colombo-Ecuatoriana.

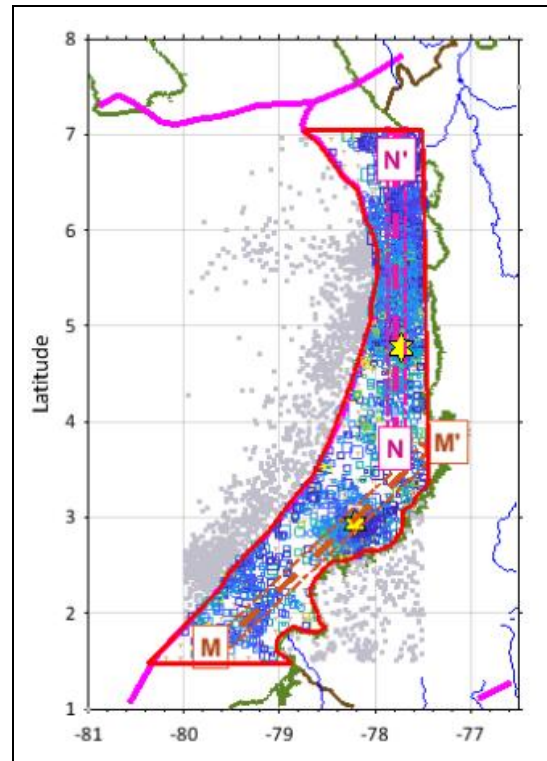


Figura 52. Mapa del AST – II con los perfiles sísmicos M-M' y N-N'. El criterio de trazado para los perfiles M-M' y N-N' es el seguimiento del flanco occidental de la Costa Pacífica Colombiana. Cada perfil tiene un sismo de ML > 6.

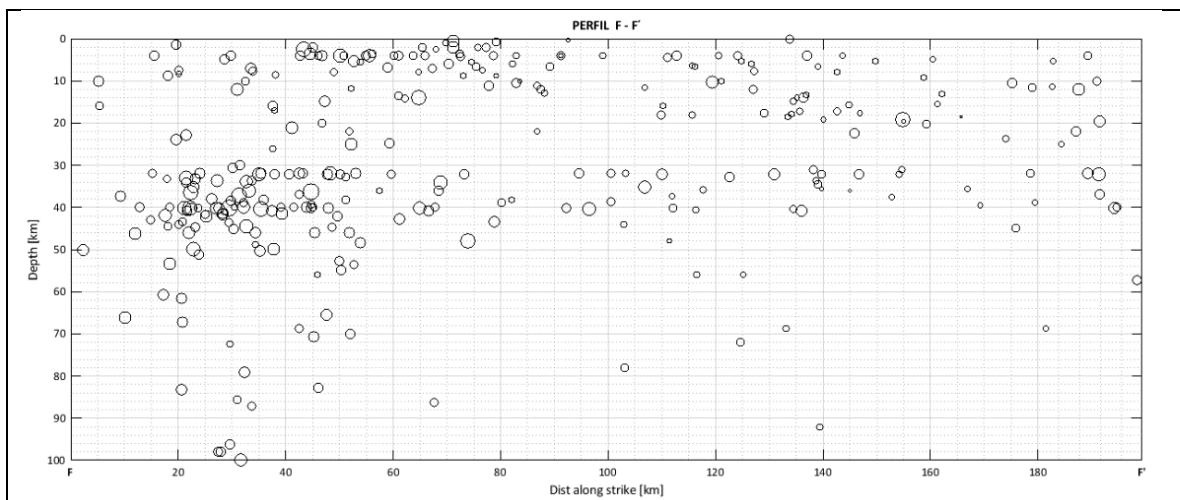


Figura 53. Perfil F-F', en el Ambiente – I, entre coordenadas (-80.000, 2.240) y (-78.830, 3.600). Tiene 213 km. de longitud aproximadamente. Se identifica una alta concentración de eventos de magnitudes grandes en la parte sur del perfil con profundidades entre 30 y 50 km. También se observan varios eventos superficiales entre los kilómetros 40 y 80 desde el punto F. Hacia el noreste la sismicidad disminuye en cantidad e intensidad aunque aparecen eventos intermedios a profundidades menores que 45 km.

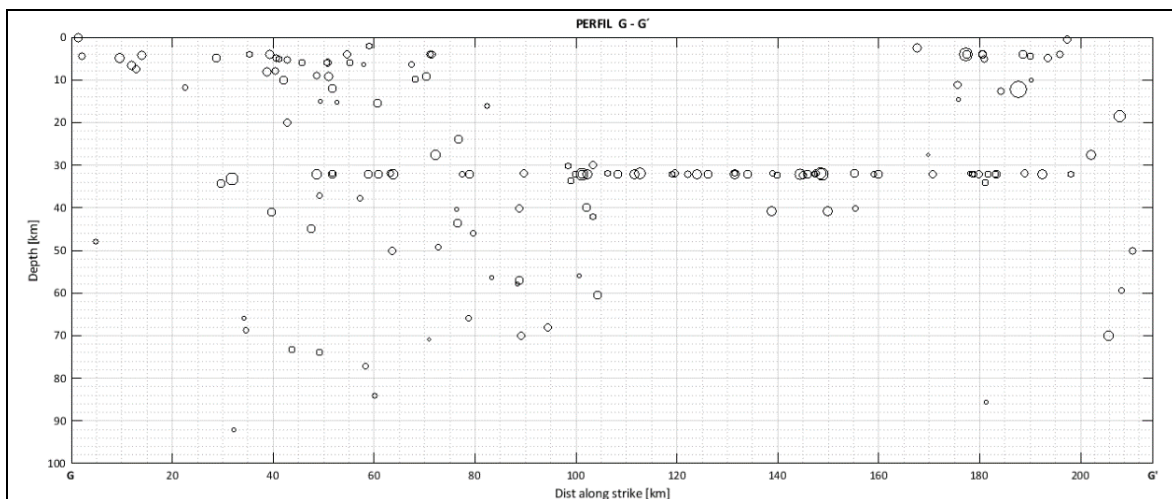


Figura 54. Perfil G-G', en el AST – I, entre coordenadas (-78.600, 4.100) y (-78.270, 6.000). Tiene aproximadamente 240 km de longitud y se observan sismos someros de baja magnitud en los primeros 80 km. del perfil, al sur. Hacia el norte de la fosa, entre los kilómetros 170 y 220 hay registros de baja actividad pero con eventos importantes a distintas profundidades. Se registra baja actividad por debajo de 50 km. y muchos datos con 33 km de profundidad a lo largo del perfil.

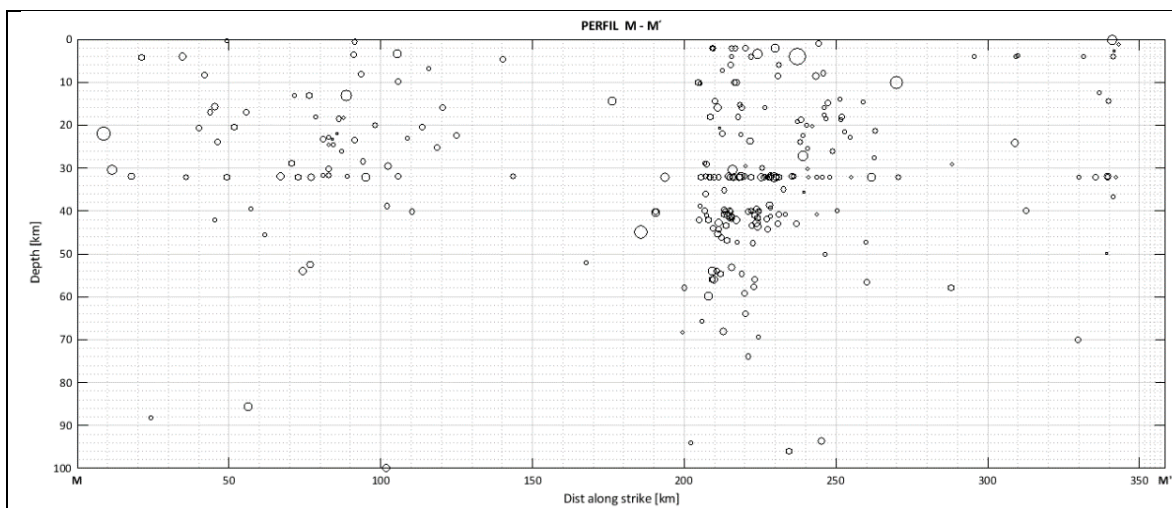


Figura 55. Perfil M-M', en el ambiente – II, entre coordenadas (-79.800, 1.500) y (-77.440, 3.700).

La mayor actividad en este perfil, paralelo a la costa de los departamentos de Nariño y Cauca, se concentra en cercanía de Gorgona entre los kilómetros 170 y 270 desde el punto M con sismos de variadas magnitudes y profundidades hasta 70 km. Los sismos de mayor magnitud están a profundidades menores que 45 km.

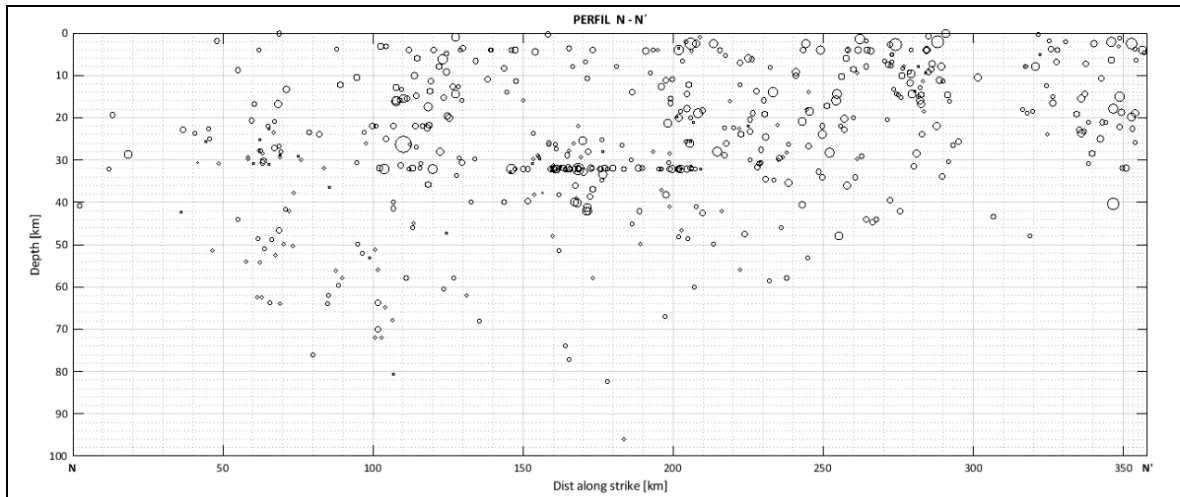


Figura 56. Perfil N-N', en el AST – II, entre coordenadas (-77.780, 3.7800) y (-77.780, 7.000). Este perfil, paralelo a la cosa chocona de sur a norte, muestra una distribución de magnitudes pequeñas e intermedias hasta 40 km. de profundidad. Se destacan pocos sismos de magnitudes intermedias a menos de 10 km. de profundidad. Para profundidades mayores que 50 km. las magnitudes son pequeñas.

En las Figuras 57 y 58 se presentan los gráficos FMD para los perfiles de los mapas del Ambiente – I (Figura 51) y Ambiente – II (Figura 52) respectivamente. Para cada perfil se establecen sus parámetros estadísticos y se resaltan en el color correspondiente. En las gráficas se ha dejado la curva del catálogo general, en color negro, para que sirva de referencia.

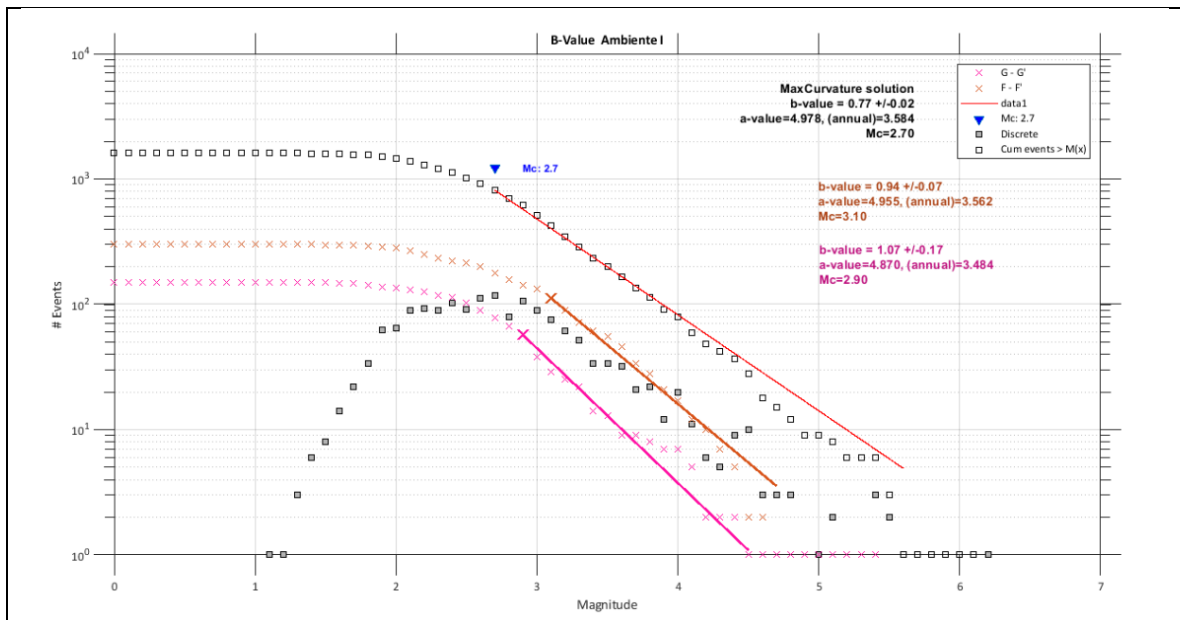


Figura 57. Gráfica FMD para los perfiles F-F' y G-G' del AST – I, en el mapa de la Figura 51. Para el perfil F-F' se tiene que $Mc = 3.10$; valor- $b = 0.94$ y valor- $a = 4.955$. Para el perfil G-G' se tiene que $Mc = 2.90$; valor- $b = 1.07$ y valor- $a = 4.870$. Se dejó como referencia la curva del FMD para el AST-I con $Mc = 2.70$; el valor- $b = 0.77$ y valor- $a = 4.978$.

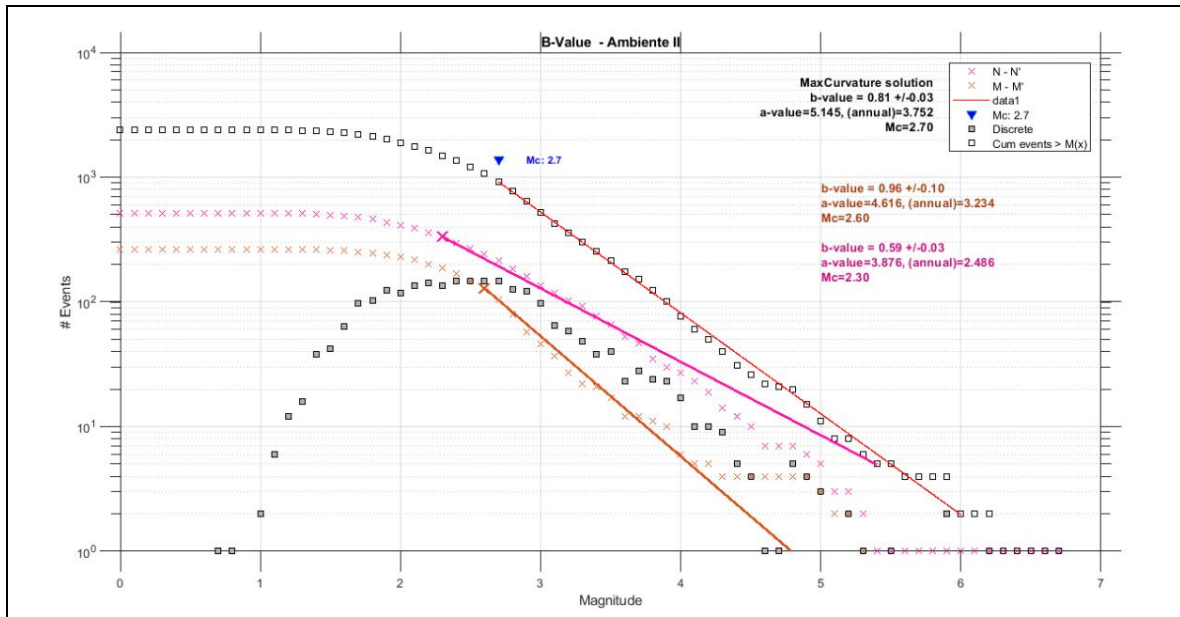


Figura 58. Gráfica FMD para los perfiles **M-M'** y **N-N'** del mapa de la Figura 52, en el AST - II. Para el perfil **M-M'** se tiene que $Mc = 2.60$; valor- $b = 0.96$ y valor- $a = 4.616$. Para el perfil **N-N'** se tiene que $Mc = 2.30$; valor- $b = 0.59$ y valor- $a = 3.867$. Se dejó como referencia la curva del FMD para el AST-II con $Mc = 2.70$; el valor- $b = 0.81$ y valor- $a = 5.145$.

Como se sabe, el parámetro valor- b de la relación de [Gutenberg-Richter \(1944\)](#) además de describir la distribución de los eventos por magnitud (en este caso ML), también se relaciona con las características mecánicas de la región (indicadores de resistencia y de heterogeneidad de los materiales) y distribución del stress. Se espera que el valor- b abarque un rango entre 0.7 y 1.5.

Si el valor- b es grande, cercano a 1.5, los eventos tienen menor espectro de magnitudes, pero si el valor- b es pequeño, el espectro de eventos es mas amplio y la probabilidad de ocurrencia de un sismo grande aumenta.

En particular, los valores- b 0.94 y 1.07 para los perfiles **F-F'** y **G-G'** en el AST – I son mayores que 0.77 correspondiente al ambiente sismotectónico. Por otro lado los valores- b de 0.96 y 0.59 para los perfiles **M-M'** y **N-N'** en el AST – II son el primero mayor y el segundo menor que 0.81 correspondiente al ambiente sismotectónico - II.

De los resultados arrojados por los perfiles se puede sugerir que sobre la costa chocoana hay mayor probabilidad de ocurrencia de un evento de magnitud grande, seguido de la costa nariñense y del segmento sur de la Fosa Colombo-Ecuatoriana.

3. CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS SISMOTECTÓNICO

En la introducción a este estudio de caracterización sismotectónica de la Placa Oceánica de Nazca y la plataforma continental sumergida de la Costa Pacífica Colombiana se mencionó que se utilizan 45 sismos con magnitud $M_w \geq 4.8$ para calcular la Deformación Sismotectónica Regional. Estos eventos pertenecen a una base de datos nueva y complementaria, descargada del Global Centroid Moment Tensor – GCMT que se describe en el Anexo A. Se realiza entonces un Análisis Estadístico de Sismicidad para este catálogo complementario en la zona de estudio y en los ambientes sismotectónicos definidos antes de utilizarlos para calcular la Deformación Sismotectónica Regional.

3.1. UN ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA SISMOS DE $M_w \geq 4.8$

3.1.1. El catálogo de sismos de $M_w \geq 4.8$

El Catálogo de Sismicidad Instrumental para la zona de estudio se descarga del sitio web de Global Centroid Moment Tensor Catalog, <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> el 01 de octubre de 2018 con los siguientes criterios de búsqueda:

Start date: 1993/6/1	End date: 2018/2/28	
1.5 <=lat<= 7.0	-80.0 <=lon<= -77.5	
0 <=depth<= 100	-9999 <=time shift<= 9999	
0 <=mb<= 10	0<=Ms<= 10	4.8<=Mw<= 10
0 <=tension plunge<= 90	0 <=null plunge<= 90	

Así se obtiene un listado de 45 sismos con el cual se construye el archivo Excel® **Datos_GCMT.xlsx** con las columnas: longitud, latitud, año, mes, día, M_w , profundidad, hora, minuto y segundo el cual se convierte a un archivo ASCII separado por espacios con el nombre **Datos_GCMT.txt**. compatible con el software ZMAP7 del Swiss Seismological Service – ETH Zürich.

Los sismos del catálogo GCMT ocurridos entre el 1 de junio de 1993 y el 28 de febrero de 2018, en el polígono definido por 1.50° a 7.00° de latitud, -80.00° a -77.50° de longitud, profundidad $h < 100$ km. y magnitudes $M_w \geq 4.8$ se etiquetan cronológicamente de 1 a 45 y se muestran en la **Tabla 4** con las variables fecha, hora UTC, longitud, latitud, profundidad, magnitud M_w , momento escalar M_o y ambiente sismotectónico (I para el lado occidental de la Fosa Colombo-Ecuatoriana y II para el lado oriental de la misma hasta la Costa Colombiana).

	Fecha AA-MM-DD	Hora UTC hh:mm:ss	Longitud [grados]	Latitud [grados]	Profundidad [km.]	Magnitud M_w	Momento Escarlar M_o	Ambiente Sismotect.
1	1994-06-03	11:25:9.80	-78.78	3.21	15	5.8	5.67e+24	II
2	1994-09-27	23:4:51.70	-78.92	5.90	16	6.1	2.07e+25	I
3	1994-11-26	4:48:3.20	-79.32	2.65	15	5.2	9.43e+23	I
4	1995-04-12	18:22:32.60	-78.11	3.02	54	5.0	4.36e+23	II
5	1995-04-13	15:0:28.40	-79.80	5.29	15	5.4	1.4e+24	I
6	1995-10-10	17:29:23.30	-78.97	1.64	55	5.1	5.68e+23	II
7	1995-11-13	12:36:53.40	-79.44	2.83	15	5.3	1.28e+24	I

8	1996-04-27	8:40:41.80	-79.42	2.47	15	6.1	1.56e+25	II
9	1996-05-23	1:57:22.90	-77.56	6.06	16	5.7	3.82e+24	II
10	1997-09-09	5:45:47.40	-77.82	5.47	24	5.1	5.34e+23	II
11	1997-10-05	0:54:57.90	-79.56	2.15	15	5.3	1.05e+24	II
12	1999-03-11	16:56:34.70	-79.86	2.97	33	4.9	2.78e+23	I
13	2000-03-19	12:23:40.90	-77.61	5.69	15	5.2	8.85e+23	II
14	2000-05-23	16:36:46.10	-78.68	1.65	34	5.2	7.58e+23	II
15	2000-07-12	22:12:19.80	-77.80	6.54	15	5.2	8.62e+23	II
16	2002-08-08	13:39:58.30	-77.62	5.17	22	5.7	4.58e+24	II
17	2002-12-21	0:46:7.60	-78.90	3.76	15	5.2	9.23e+23	I
18	2003-08-22	5:29:13.10	-77.73	3.07	31	5.0	3.56e+23	II
19	2003-11-05	0:58:51.10	-77.81	5.14	28	5.9	9.33e+24	II
20	2004-01-12	14:14:30.10	-79.08	5.76	18	5.3	1.01e+24	I
21	2004-11-15	9:6:56.60	-77.57	4.72	16	7.2	7.57e+26	II
22	2005-08-03	21:20:50.50	-79.46	2.64	13	4.9	2.59e+23	I
23	2006-01-23	20:50:45.00	-77.77	6.97	15	6.2	2.73e+25	II
24	2006-01-24	2:15:44.80	-77.73	6.96	24	5.4	1.34e+24	II
25	2006-01-29	17:49:14.20	-77.82	6.88	27	5.2	8.15e+23	II
26	2007-03-17	22:43:9.60	-78.53	4.61	13	6.0	1.28e+25	I
27	2007-03-18	2:11:5.50	-78.53	4.69	12	6.2	2.72e+25	I
28	2007-09-10	1:49:14.20	-78.12	3.08	19	6.7	1.66e+26	II
29	2007-09-22	11:44:39.30	-77.53	6.06	20	5.0	3.97e+23	II
30	2008-01-30	12:44:54.60	-79.53	6.28	13	4.9	3.05e+23	I
31	2008-02-10	7:36:5.80	-77.95	5.76	24	5.0	4.2e+23	II
32	2008-02-23	3:23:6.60	-78.75	4.06	12	5.1	5.33e+23	I
33	2010-08-21	20:20:15.00	-78.04	6.08	19	5.4	1.83e+24	II
34	2011-08-17	8:2:7.80	-77.75	5.66	21	5.0	3.57e+23	II
35	2011-09-13	4:38:48.70	-77.75	5.77	12	5.2	8.37e+23	II
36	2011-09-13	4:49:35.00	-77.66	5.73	13	5.5	2.48e+24	II
37	2013-08-13	15:43:15.20	-78.19	5.77	21	6.6	1.1e+26	I
38	2013-10-24	14:44:33.60	-78.05	5.21	22	5.0	4.24e+23	I
39	2014-03-09	20:29:52.60	-79.49	1.67	15	5.6	3.39e+24	II
40	2014-06-16	6:9:32.30	-79.52	1.73	16	5.7	4.87e+24	II
41	2015-07-19	11:6:21.50	-79.26	2.96	12	5.0	4.45e+23	I
42	2016-01-22	2:41:15.20	-78.26	5.14	19	5.0	4.34e+23	I
43	2017-01-12	16:6:31.90	-77.97	6.08	18	5.2	8.03e+23	II
44	2017-03-21	8:31:21.00	-77.61	6.22	15	5.0	4.51e+23	II
45	2017-03-24	9:0:56.00	-79.59	3.31	12	5.2	8.07e+23	I

Tabla 4. Se presentan 45 sismos con magnitud $M_w \geq 4.8$.

Ocurridos entre 1993-06-01 y 2018-02-28 en la región comprendida por 1.50° a 7.00° de latitud y por -80.00° a -77.50° de longitud y hasta 100 km. de profundidad en orden cronológico. Los datos se descargaron del **GCMT (Global Centroid Moment Tensor)** en el sitio <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.

3.1.2. Un análisis estadístico de sismicidad para los eventos de $M_w \geq 4.8$

Con el software ZMAP7 se grafica un mapa sismológico simplificado de la región de estudio en 2D (Figura 59) y una versión en 3D (Figura 60).

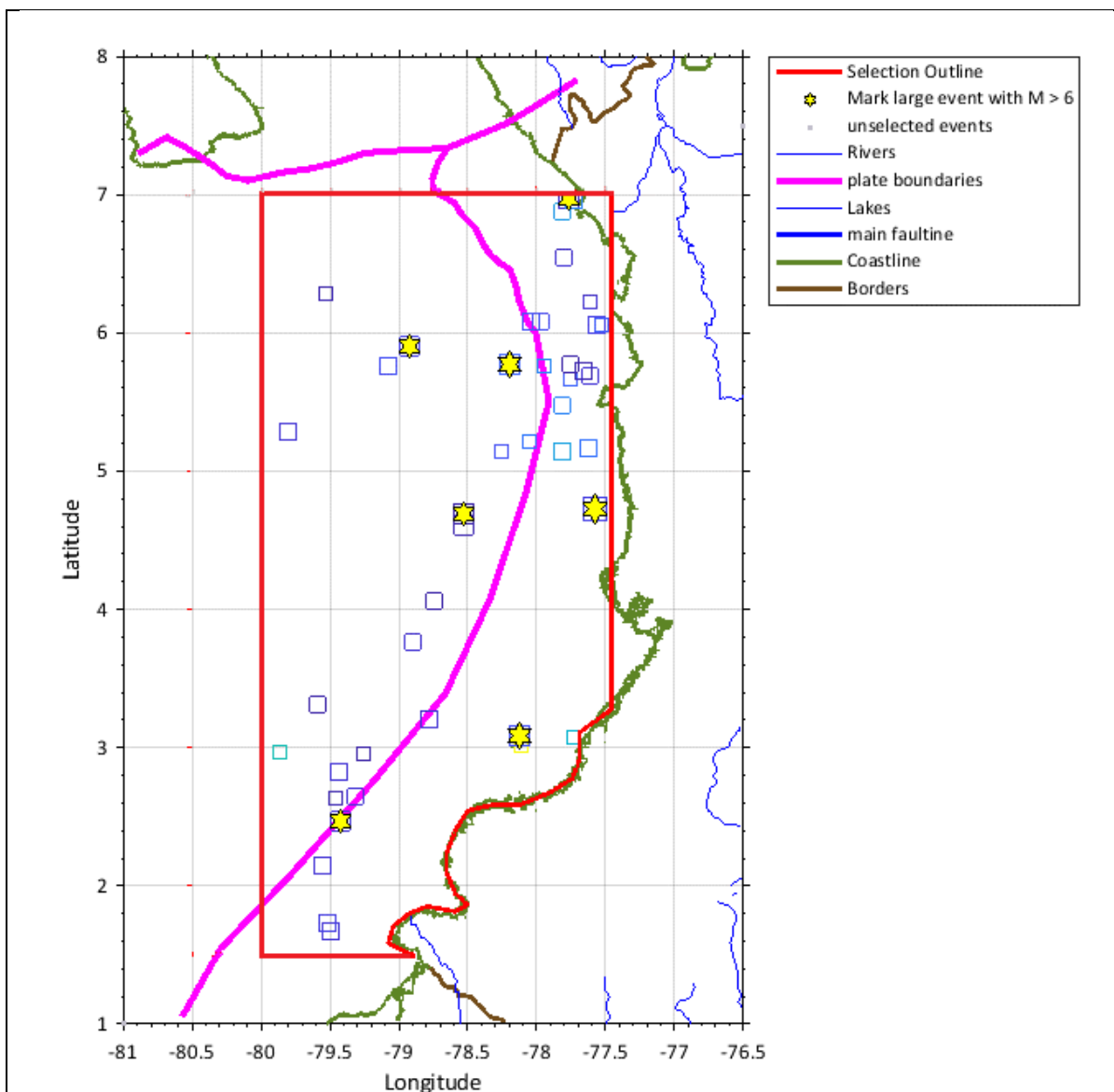


Figura 59. Mapa sismológico simplificado de la región de estudio.

En el polígono rojo quedan inscritos 45 eventos con $M_w \geq 4.8$. La línea magenta corresponde a la Fosa Colombo-Ecuatoriana. Se destacan con estrellas amarillas los sismos con magnitud $M_w > 6.0$.

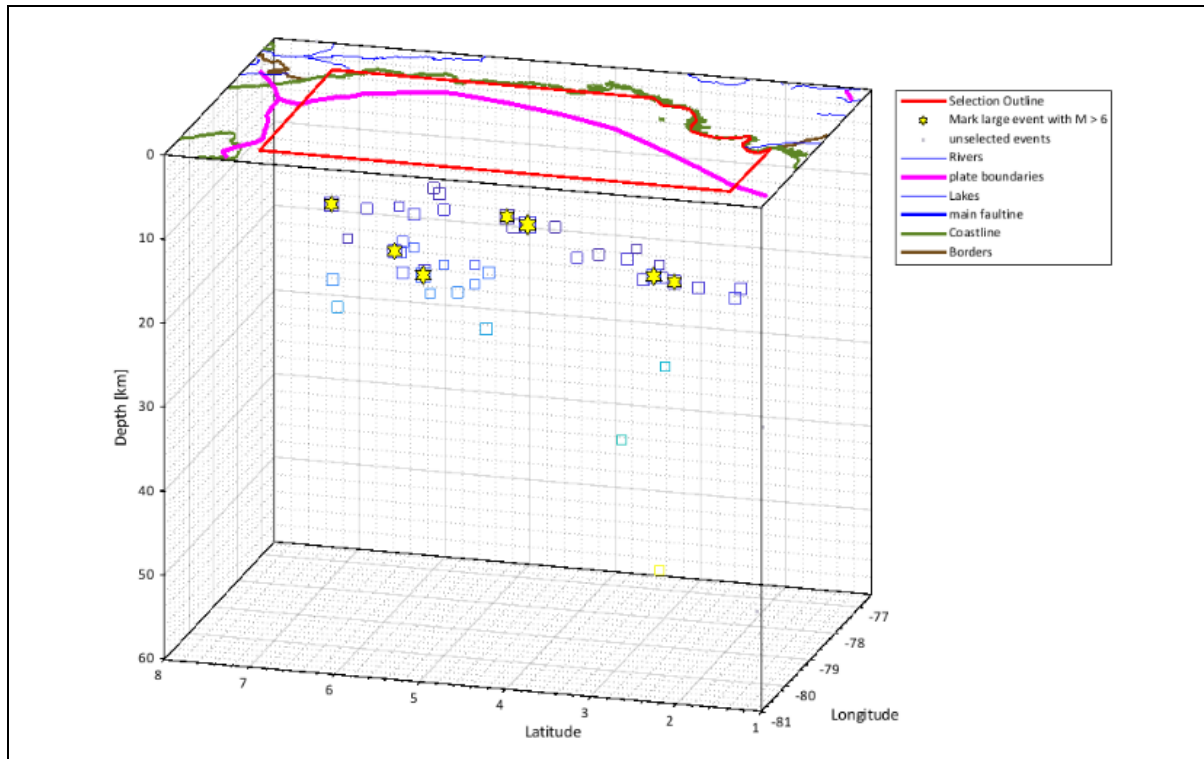


Figura 60. Mapa sísmológico simplificado en 3D de la región de estudio.

En el volumen limitado por el polígono rojo y 100 km de profundidad quedan inscritos 45 eventos con magnitud $M_w \geq 4.8$. Los mapas en 2D y 3D se construyen con ZMAP7.

Ahora se generan las gráficas de FMD (Figura 61) y tasa acumulada de eventos (Figura 62) para los 45 sismos del catálogo GCMT en la zona de estudio.

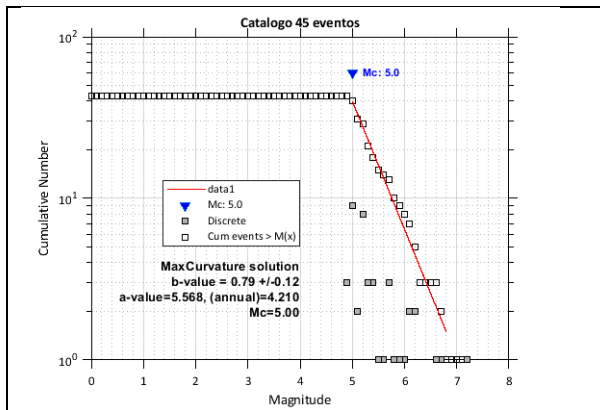


Figura 61. Gráfica de FMD para 45 sismos del GCMT. Entre el 1-jun-1993 y el 28-feb-2018 en la zona de estudio. Los parámetros estadísticos de este catálogo son: $M_c = 5.0$, valor- $b = 0.79$ y valor- $a = 5.568$

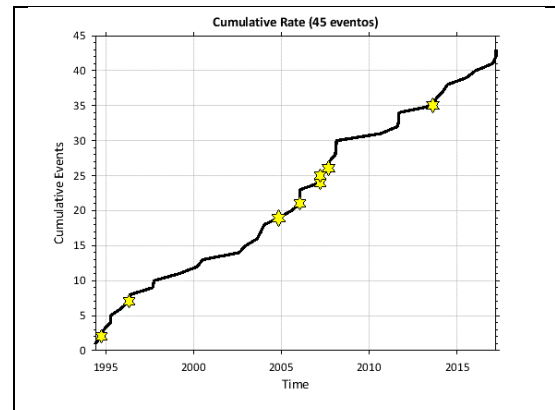
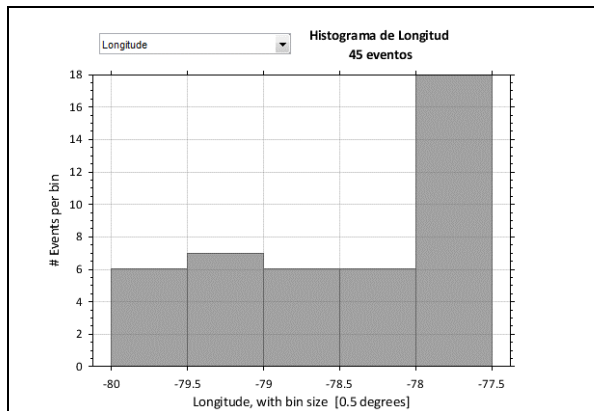
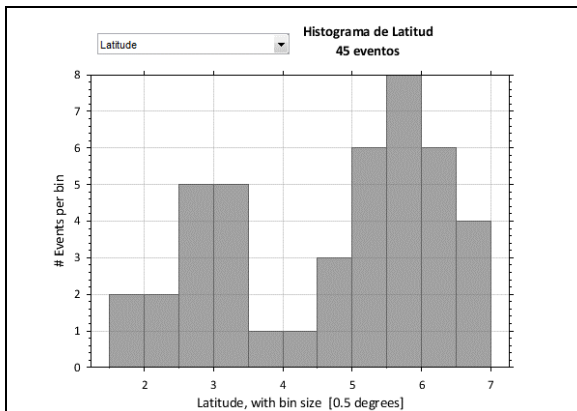
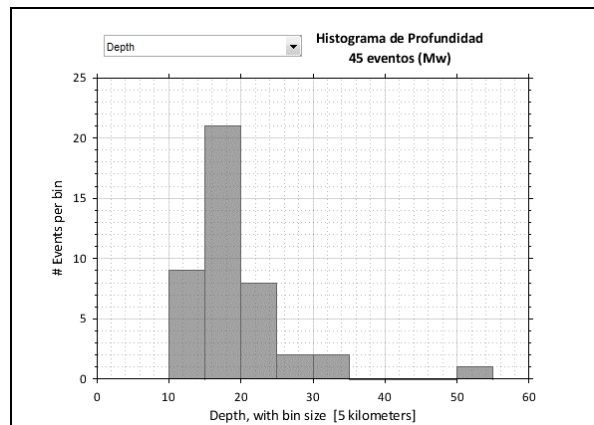
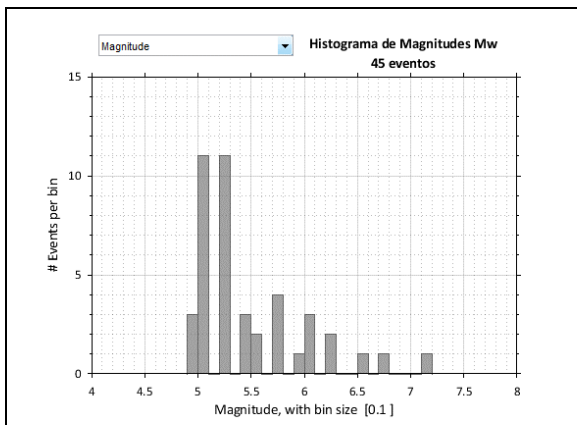


Figura 62. Tasa acumulada de eventos en el tiempo para los 45 sismos en el volumen de estudio.

A continuación se presentan los histogramas de magnitud (Figura 63), de profundidad (Figura 64), latitud (Figura 65) y longitud (Figura 66) para el catálogo general. Todos están elaborados en ZMAP7.



Hasta aquí en esta sección, se han generado curvas e histogramas para 45 eventos de magnitud $M_w \geq 4.8$ registrados entre el 1 de junio de 1993 y el 28 de febrero de 2018 en el catálogo del GCMT para la región de estudio completa. Ahora el catálogo se va a dividir en dos subcatálogos uno para cada ambiente sismotectónico estudiado en el capítulo dos. Se construyen entonces las curvas de FMD y los histogramas correspondientes. En esta sección se presentan y se comparan los parámetros estadísticos de los ambientes sismotectónicos, a la izquierda el ambiente I con 17 eventos y a la derecha el ambiente II con 28.

En la [Figura 67](#) y [68](#) se presentan las curvas de FMD para los ambientes I y II y se explicitan las magnitudes de corte y los valores- b y valores- a .

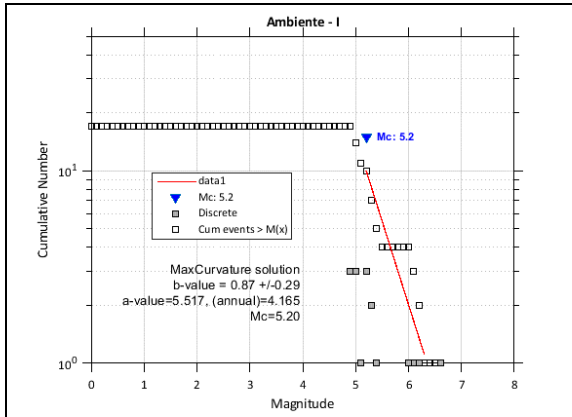


Figura 67. Gráfica de FMD para 17 sismos del subcatálogo de GCMT en el Ambiente - I. Los parámetros estadísticos son: $M_c = 5.2$, valor- $b = 0.87$ y valor- $a = 5.517$

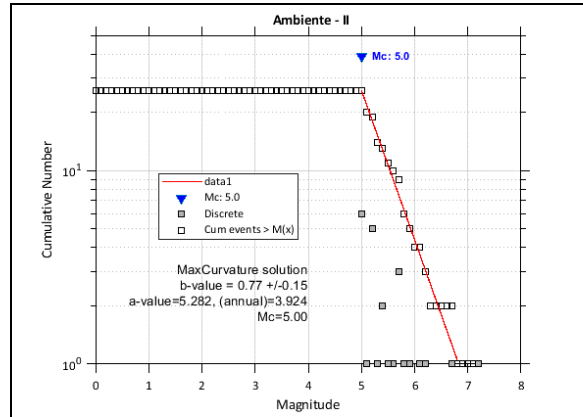


Figura 68. Gráfica de FMD para 28 sismos del Ambiente - II. Los parámetros estadísticos son: $M_c = 5.0$, valor- $b = 0.77$ y valor- $a = 5.282$

Las tasas acumuladas de eventos en los subcatálogos del GCMT para los ambientes I y II se muestran en las Figuras 69 y 70.

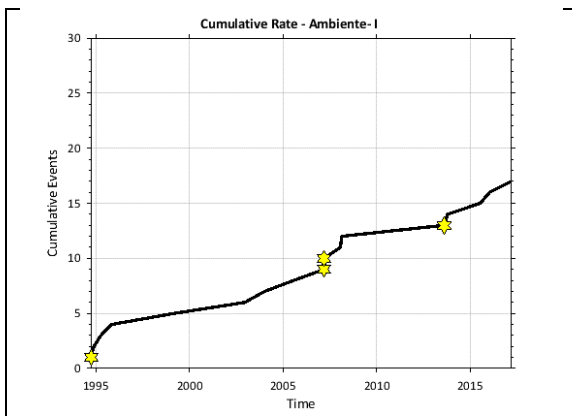


Figura 69. Tasa acumulada para 17 sismos del subcatálogo GCMT en el AST - I.

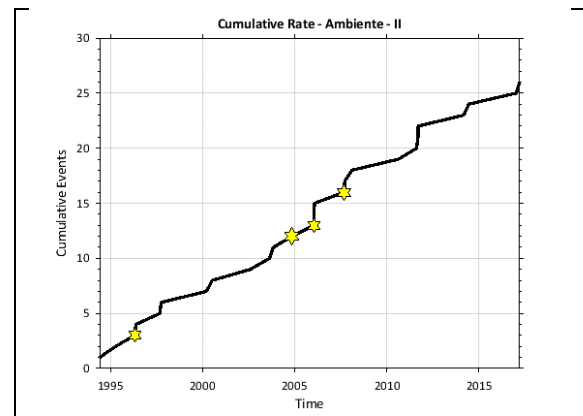


Figura 70. Tasa acumulada para 28 sismos del subcatálogo GCMT en el AST-II.

A continuación se presentan los histogramas de magnitud (Figuras 71 y 72), histogramas de profundidad (Figuras 73 y 74) y gráficos de profundidad contra fecha (Figuras 75 y 76) para los ambientes sismotectónicos I y II.

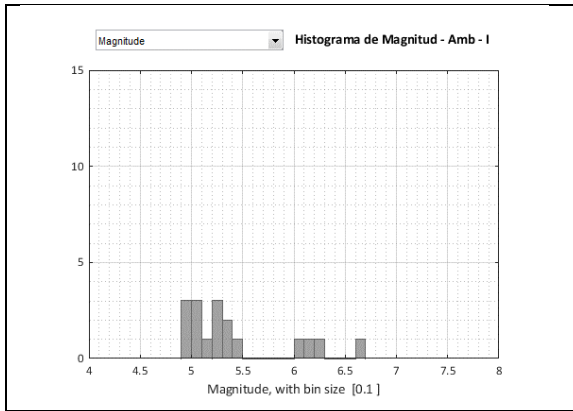


Figura 71. Distribución de magnitudes para 17 sismos del AST-I en intervalos de 0.1.

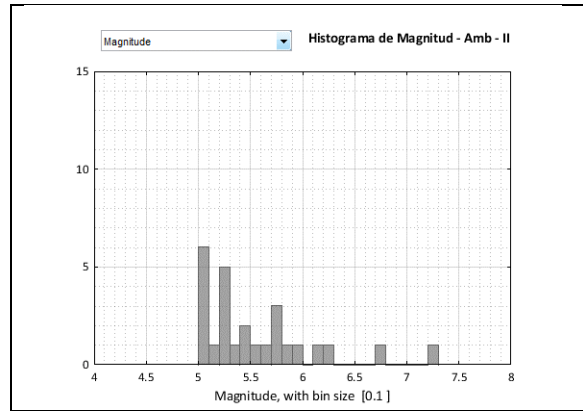


Figura 72. Distribución de magnitudes para 28 sismos del AST-II en intervalos de 0.1.

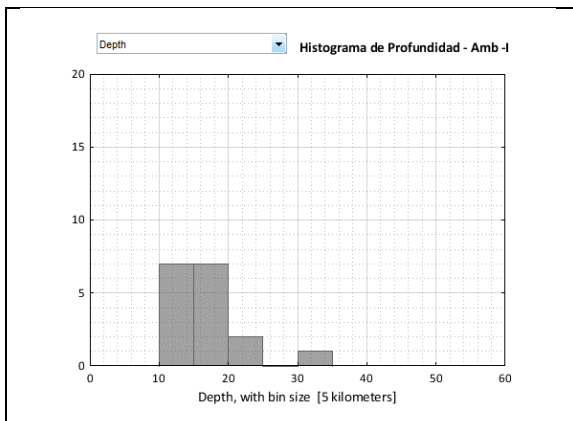


Figura 73. Distribución de eventos con la profundidad para 17 sismos del AST – I. Con intervalos de 5 km. Se presentan 14 eventos entre 10 y 20 km. de profundidad.

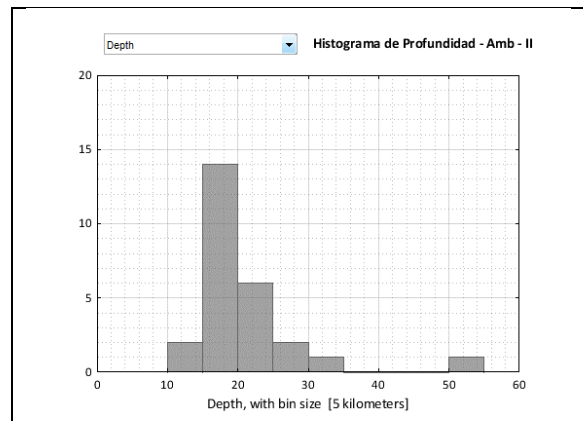


Figura 74. Distribución de eventos con la profundidad para 28 sismos del AST – II. Con intervalos de 5 km. Se registran 20 eventos entre 15 y 25 km. y un evento a 54 km. de profundidad.

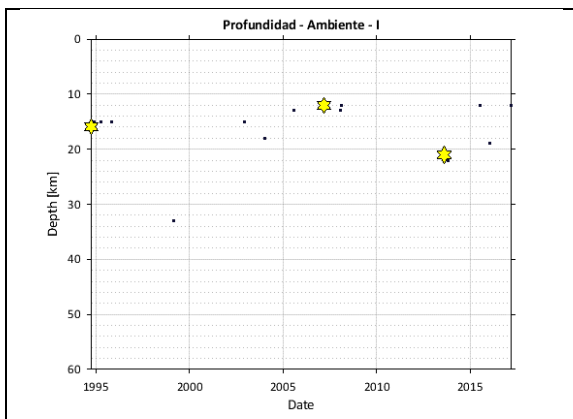


Figura 75. Distribución de profundidad de los 17 eventos del ambiente – I en el tiempo.

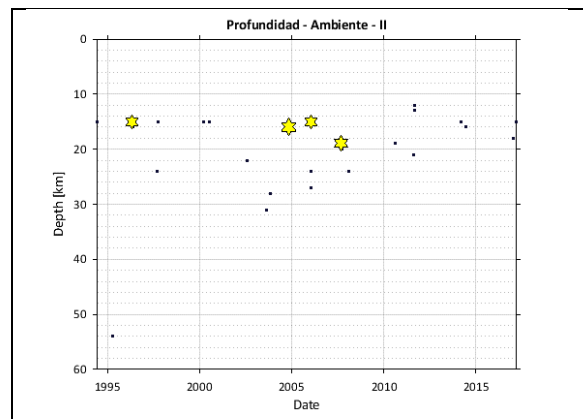


Figura 76. Distribución de profundidad de los 28 eventos del ambiente – II en el tiempo.

3.1.3. Nuevos Ambientes Sismotectónicos en la zona de estudio

Una inspección visual de la distribución en el espacio de los 45 eventos del GCMT sobre el mapa sismológico de la zona de estudio (**Figura 59**) sugiere usar el paralelo 5.00° (norte) como una frontera natural de la distribución espacial de los sismos en la dirección norte-sur. Se define entonces, para esta obra, una partición de los Ambientes Sismotectónicos I y II en partes norte y sur respecto del paralelo 5.00°. Para efecto de los subcatálogos y los mapas se declaran cuatro ambientes sismotectónicos: ambiente I-norte, ambiente I-sur, ambiente II-norte y ambiente II-sur con referencia en el paralelo 5.00°.

Así, los 17 eventos del catálogo GCMT que se ubican en el Ambiente Sismotectónico – I, sobre la Placa Oceánica de Nazca al occidente de la Fosa Colombo-Ecuatoriana (unos 92407.50 km²) quedan distribuidos en siete (7) eventos en el AST-I-norte (aproximadamente 46203.75 km² de superficie por 35 km. de profundidad) y diez (10) eventos en el AST-I-sur (46203.75 km² de superficie y 35 km. de profundidad). La **Tabla 5** clasifica los sismos del ambiente AST- I en partes norte y sur y la **Figura 77** muestra el mapa sismológico de la partición.

	Fecha AA-MM-DD	Hora UTC hh:mm:ss	Longitud [grados]	Latitud [grados]	Profundidad [km.]	Magnitud Mw	Momento Escarlar Mo	Ambiente Sismotect.
2	1994-09-27	23:4:51.70	-78.92	5.90	16	6.1	2.07e+25	I-norte
5	1995-04-13	15:0:28.40	-79.80	5.29	15	5.4	1.4e+24	I-norte
20	2004-01-12	14:14:30.10	-79.08	5.76	18	5.3	1.01e+24	I-norte
30	2008-01-30	12:44:54.60	-79.53	6.28	13	4.9	3.05e+23	I-norte
37	2013-08-13	15:43:15.20	-78.19	5.77	21	6.6	1.1e+26	I-norte
38	2013-10-24	14:44:33.60	-78.05	5.21	22	5.0	4.24e+23	I-norte
42	2016-01-22	2:41:15.20	-78.26	5.14	19	5.0	4.34e+23	I-norte
	Fecha AA-MM-DD	Hora UTC hh:mm:ss	Longitud [grados]	Latitud [grados]	Profundidad [km.]	Magnitud Mw	Momento Escarlar Mo	Ambiente Sismotect.
3	1994-11-26	4:48:3.20	-79.32	2.65	15	5.2	9.43e+23	I-sur
7	1995-11-13	12:36:53.40	-79.44	2.83	15	5.3	1.28e+24	I-sur
12	1999-03-11	16:56:34.70	-79.86	2.97	33	4.9	2.78e+23	I-sur
17	2002-12-21	0:46:7.60	-78.90	3.76	15	5.2	9.23e+23	I-sur
22	2005-08-03	21:20:50.50	-79.46	2.64	13	4.9	2.59e+23	I-sur
26	2007-03-17	22:43:9.60	-78.53	4.61	13	6.0	1.28e+25	I-sur
27	2007-03-18	2:11:5.50	-78.53	4.69	12	6.2	2.72e+25	I-sur
32	2008-02-23	3:23:6.60	-78.75	4.06	12	5.1	5.33e+23	I-sur
41	2015-07-19	11:6:21.50	-79.26	2.96	12	5.0	4.45e+23	I-sur
45	2017-03-24	9:0:56.00	-79.59	3.31	12	5.2	8.07e+23	I-sur

Tabla 5. Se presentan 17 sismos con magnitud $M_w \geq 4.8$ del AST-I clasificados en AST-I-norte y AST-I-sur. ocurridos entre 1993-06-01 y 2018-02-28 en orden cronológico. Los datos se descargaron del **GCMT (Global Centroid Moment Tensor)** en el sitio <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.

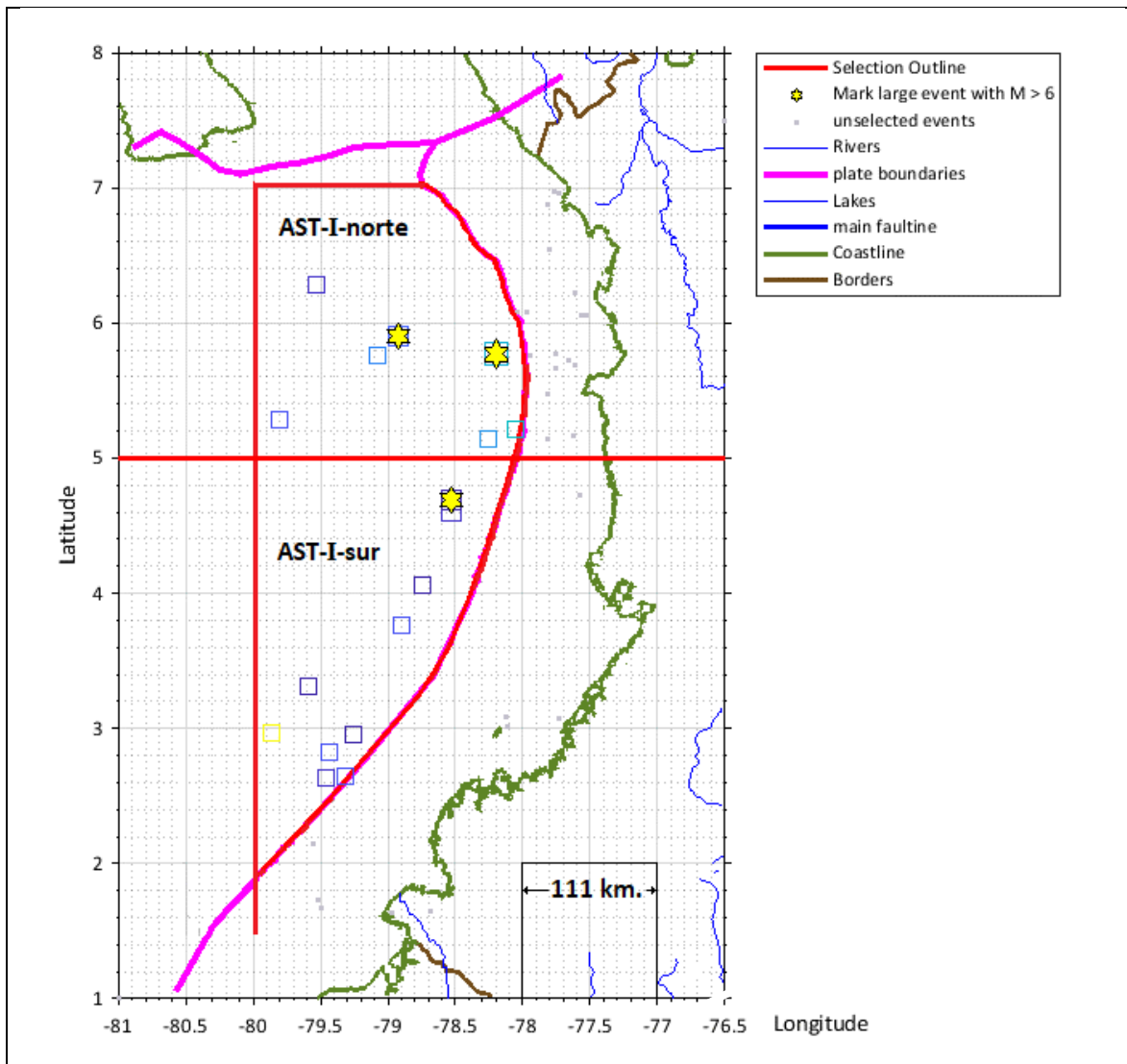


Figura 77. Mapa sísmológico simplificado con 17 eventos del Catálogo GCMT con $M_w \geq 4.8$ en el AST-I. La línea de 5.00° de latitud norte separa el AST-I en parte norte con 7 sismos y parte sur con 10. De los casi 92407.50 km² se estima que el AST-I-norte queda con 46203.75 km² y el AST-I-sur con otros 46203.75 km². La profundidad estimada para estos ambientes es $h = 35$ km.

Los 28 eventos del Ambiente Sismotectónico – II, entre la Fosa Colombo-Ecuatoriana y el Litoral Pacífico Colombiano, en la parte sumergida de la Placa Continental de Suramérica (unos 58524.75 km².) quedan clasificados en 17 sismos en el AST-II-norte (aproximadamente 15401.25 km² de superficie y 50 km. de profundidad) y once (11) sismos en el AST-II-sur (43123.50 km² por 50 km. de profundidad). La **Tabla 6** muestra la clasificación de los sismos del ambiente AST- II en sus partes norte y sur.

	Fecha AA-MM-DD	Hora UTC hh:mm:ss	Longitud [grados]	Latitud [grados]	Profundidad [km.]	Magnitud Mw	Momento Escarlar Mo	Ambiente Sismotect.
9	1996-05-23	1:57:22.90	-77.56	6.06	16	5.7	3.82e+24	II-norte
10	1997-09-09	5:45:47.40	-77.82	5.47	24	5.1	5.34e+23	II-norte
13	2000-03-19	12:23:40.90	-77.61	5.69	15	5.2	8.85e+23	II-norte
15	2000-07-12	22:12:19.80	-77.80	6.54	15	5.2	8.62e+23	II-norte
16	2002-08-08	13:39:58.30	-77.62	5.17	22	5.7	4.58e+24	II-norte
19	2003-11-05	0:58:51.10	-77.81	5.14	28	5.9	9.33e+24	II-norte
23	2006-01-23	20:50:45.00	-77.77	6.97	15	6.2	2.73e+25	II-norte
24	2006-01-24	2:15:44.80	-77.73	6.96	24	5.4	1.34e+24	II-norte
25	2006-01-29	17:49:14.20	-77.82	6.88	27	5.2	8.15e+23	II-norte
29	2007-09-22	11:44:39.30	-77.53	6.06	20	5.0	3.97e+23	II-norte
31	2008-02-10	7:36:5.80	-77.95	5.76	24	5.0	4.2e+23	II-norte
33	2010-08-21	20:20:15.00	-78.04	6.08	19	5.4	1.83e+24	II-norte
34	2011-08-17	8:2:7.80	-77.75	5.66	21	5.0	3.57e+23	II-norte
35	2011-09-13	4:38:48.70	-77.75	5.77	12	5.2	8.37e+23	II-norte
36	2011-09-13	4:49:35.00	-77.66	5.73	13	5.5	2.48e+24	II-norte
43	2017-01-12	16:6:31.90	-77.97	6.08	18	5.2	8.03e+23	II-norte
44	2017-03-21	8:31:21.00	-77.61	6.22	15	5.0	4.51e+23	II-norte
	Fecha AA-MM-DD	Hora UTC hh:mm:ss	Longitud [grados]	Latitud [grados]	Profundidad [km.]	Magnitud Mw	Momento Escarlar Mo	Ambiente Sismotect.
1	1994-06-03	11:25:9.80	-78.78	3.21	15	5.8	5.67e+24	II-sur
4	1995-04-12	18:22:32.60	-78.11	3.02	54	5.0	4.36e+23	II-sur
6	1995-10-10	17:29:23.30	-78.97	1.64	55	5.1	5.68e+23	II-sur
8	1996-04-27	8:40:41.80	-79.42	2.47	15	6.1	1.56e+25	II-sur
11	1997-10-05	0:54:57.90	-79.56	2.15	15	5.3	1.05e+24	II-sur
14	2000-05-23	16:36:46.10	-78.68	1.65	34	5.2	7.58e+23	II-sur
18	2003-08-22	5:29:13.10	-77.73	3.07	31	5.0	3.56e+23	II-sur
21	2004-11-15	9:6:56.60	-77.57	4.72	16	7.2	7.57e+26	II-sur
28	2007-09-10	1:49:14.20	-78.12	3.08	19	6.7	1.66e+26	II-sur
39	2014-03-09	20:29:52.60	-79.49	1.67	15	5.6	3.39e+24	II-sur
40	2014-06-16	6:9:32.30	-79.52	1.73	16	5.7	4.87e+24	II-sur

*Tabla 6. Se presentan 28 sismos con magnitud $M_w \geq 4.8$ del AST-II clasificados en AST-II-norte y AST-II-sur, ocurridos entre 1993-06-01 y 2018-02-28 en orden cronológico. Los datos se obtienen del **GCMT (Global Centroid Moment Tensor)** en el sitio <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.*

La **Figura 78** muestra 28 eventos en el Ambiente Sismotectónico – II entre la Fosa Colombo-Ecuatoriana y el Corredor Pacífico Colombiano, en la parte sumergida de la Placa Continental de Suramérica (unos 58524.75 km².) separados por el paralelo 5.00° de latitud norte.

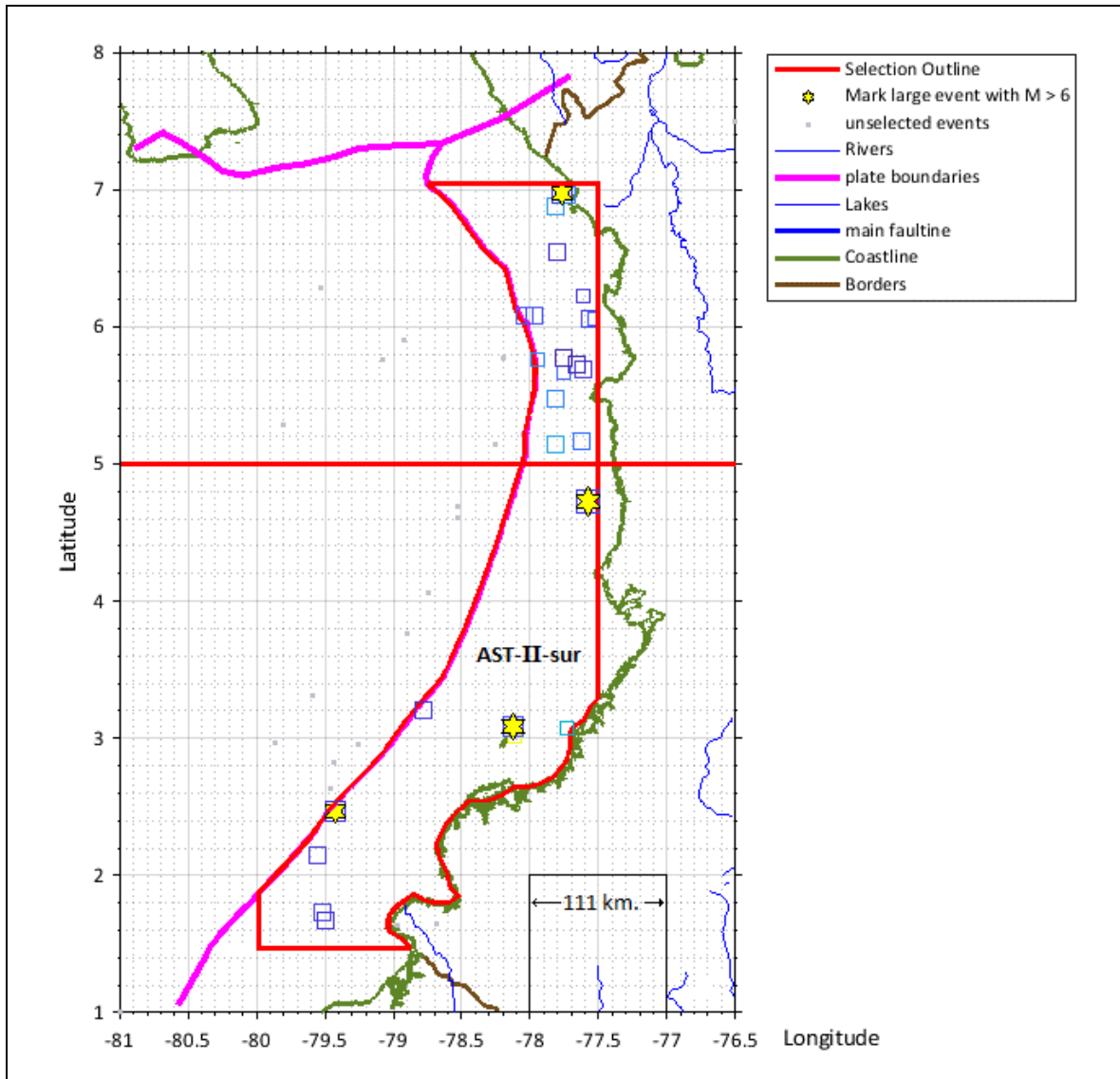


Figura 78. Mapa sismológico simplificado con 28 eventos de $M_w \geq 4.8$ en el AST – II. La línea de 5.00° norte separa el AST –II en zona norte (AST–II-norte) con 17 sismos y zona sur (AST–II-sur) con 11. El Ambiente – II tiene aproximadamente 58524.75 km² de los cuales el AST –II–norte tiene 15401.25 km² y el AST –II–sur los 43123.5 km² restantes. La profundidad estimada para estos ambientes es de 50 km.

Ahora que se tiene una nueva distribución de los 45 sismos del catálogo GCMT sobre cuatro ambientes sismotectónicos se quiere estudiar la solución de los Mecanismos Focales (MF) para determinar los procesos mecánicos ocurridos en el sitio del foco. Cada mecanismo focal se describe en sus tres ejes ortogonales de esfuerzo (P, N y T) y con sus tres ángulos de orientación del plano de falla (azimuth o rumbo ϕ , buzamiento δ y dirección de deslizamiento λ). Conocer el plano de falla es muy interesante en una caracterización tectónica regional y en estudios de geología estructural.

3.2. MECANISMOS FOCALES Y DEFORMACIÓN SISMOTECTÓNICA

3.2.1. Mecanismos Focales en los Ambientes Sismotectónicos

Se sabe que los sismos ocurren principalmente por la repentina dislocación (o ruptura) de una masa rocosa en una falla geológica y que en el foco del sismo se presentan una deformación volumétrica y un patrón de radiación de energía que responden a un mecanismo de ruptura que se quiere caracterizar. Por tradición se sitúa un sistema cartesiano con origen en el foco, orientado con el eje **X** al norte, el eje **Y** hacia el este y el eje **Z** vertical hacia el centro de la tierra. Así, el plano de la falla sobre el cual ocurre el sismo presenta una orientación espacial que puede describirse con tres ángulos: de azimuth, rumbo o “strike” (ϕ), de buzamiento o “dip” (δ) y de deslizamiento o “slip” (λ) (Jost y Herrmann, 1989).

El ángulo de azimuth, rumbo o strike (ϕ) de una falla geológica se mide en grados sobre el horizonte desde el norte, en el sentido de las manecillas del reloj y varía entre 0° y 360° . Así el norte tiene azimuth 0° y el occidente 270° . El ángulo de buzamiento o dip (δ) mide en grados la pendiente del plano de la falla, siendo el horizonte 0° y un acantilado 90° . El deslizamiento o slip (λ) mide en grados la dirección relativa del movimiento del bloque sobre el plano de la falla, respecto de la horizontal en la dirección contraria a las manecillas del reloj. Este ángulo λ varía entre -180° y 180° y da cuenta si la falla es normal, inversa o de rumbo (Figura 79).

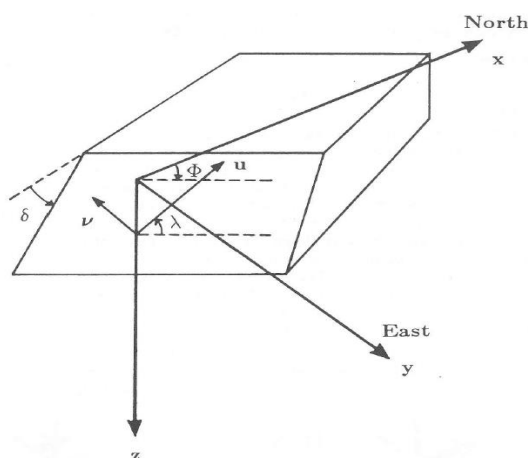


Figura 79. Bloque con un plano de falla donde se muestran los ejes cartesianos.

El origen de coordenadas se sitúa en el foco del terremoto. **X** apunta al norte, **Y** va en dirección oriente y **Z** va hacia el centro de la Tierra. Se muestran los ángulos ϕ , δ y λ y los vectores **u** para el slip y **v** para la normal al plano de falla. Imagen tomada de Jost y Herrmann, 1989, adaptada de Aki y Richards, 1980.

Como cada sismo tiene asociados dos planos de falla, cada uno descrito con tres ángulos ϕ , δ y λ , se tienen entonces dos ternas de ángulos para cada sismo. En el Anexo A se presentan, para los 45 eventos del catálogo del GCMT, los dos planos de falla con los seis ángulos en el siguiente formato:

Plano de falla 1:	strike 1 (ϕ_1)	dip 1 (δ_1)	slip 1 (λ_1).
Plano de falla 2:	strike 2 (ϕ_2)	dip 2 (δ_2)	slip 2 (λ_2).

Estas ternas de ángulos, etiquetadas 1 ó 2, permiten obtener sendas soluciones gráficas del Mecanismo Focal Puntual del evento conocidas como balones de playa (Beach Ball). Se utiliza el sitio

web de George Helffrich <http://www1.gly.bris.ac.uk/~george/focmec.html> para obtener, en línea, los dos balones de playa de cada sismo. En la **Tabla 10** del **Anexo B** se muestran, para referencia, los seis ángulos y las dos soluciones gráficas de cada uno de los 45 sismos. Dado que se tienen dos soluciones, se debe escoger el mecanismo focal correcto con criterios geológicos, geográficos y conocimiento del contexto tectónico regional.

La **Tabla 7** es una versión depurada de la **Tabla 10** del **Anexo B** donde se escoge el plano de falla adecuado para cada sismo. Se muestra fecha, magnitud M_w , momento escalar M_0 , profundidad, azimuth (ϕ), buzamiento (δ), deslizamiento (λ), el balón de playa (BB) y el tipo de mecanismo correspondiente para cada sismo en los ambientes sismotectónicos I norte y sur y II norte y sur.

Fecha	M_w	Momento escalar M_0	Prof [km]	Strike ϕ	Dip δ	Slip λ	Beach Ball	Tipo de Mecanismo
Ambiente Sismotectónico I – norte.								
2	1994-09-27	6.1	2.07e+25	16	7	69	-167	Transcurrente dextral.
5	1995-04-13	5.4	1.4e+24	15	348	80	158	Inverso oblicuo dextral.
20	2004-01-12	5.3	1.01e+24	18	7	87	174	Transcurrente dextral.
30	2008-01-30	4.9	3.05e+23	13	265	60	-79	Normal
37	2013-08-13	6.6	1.1e+26	21	222	68	-148	Normal oblicua dextral
38	2013-10-24	5.0	4.24e+23	22	175	82	-160	Transcurrente dextral
42	2016-01-22	5.0	4.34e+23	19	15	42	-121	Normal oblicua dextral
Ambiente Sismotectónico I – sur.								
Fecha	M_w	Momento escalar M_0	Prof [km]	Strike ϕ	Dip δ	Slip λ	Beach Ball	Tipo de Mecanismo
3	1994-11-26	5.2	9.43e+23	15	206	57	-73	Normal
7	1995-11-13	5.3	1.28e+24	15	28	45	-90	Normal
12	1999-03-11	4.9	2.78e+23	33	27	43	-61	Normal oblicua lateral izq.
17	2002-12-21	5.2	9.23e+23	15	36	40	-70	Normal
22	2005-08-03	4.9	2.59e+23	13	34	35	-64	Normal
26	2007-03-17	6.0	1.28e+25	13	55	37	-67	Normal

27	2007-03-18	6.2	2.72e+25	12	38	36	-69		Normal
32	2008-02-23	5.1	5.33e+23	12	31	38	-98		Normal
41	2015-07-19	5.0	4.45e+23	12	186	81	88		Inversa
45	2017-03-24	5.2	8.07e+23	12	255	65	-103		Normal
Fecha		Mw	Momento escalar Mo	Prof [km]	Strike ϕ	Dip δ	Slip λ	Beach Ball	Tipo de Mecanismo
Ambiente Sismotectónico II – norte.									
9	1996-05-23	5.7	3.82e+24	16	176	82	91		Inversa
10	1997-09-09	5.1	5.34e+23	24	211	73	112		Inverso oblicuo dextral.
13	2000-03-19	5.2	8.85e+23	15	156	75	-90		Normal
15	2000-07-12	5.2	8.62e+23	15	167	59	-75		Normal
16	2002-08-08	5.7	4.58e+24	22	251	63	-52		Desgarre sinistral
19	2003-11-05	5.9	9.33e+24	28	15	38	-137		Normal oblicuo
23	2006-01-23	6.2	2.73e+25	15	174	79	98		Inversa
24	2006-01-24	5.4	1.34e+24	24	170	68	110		Inversa
25	2006-01-29	5.2	8.15e+23	27	167	71	103		Inversa
29	2007-09-22	5.0	3.97e+23	20	188	70	90		Inversa
31	2008-02-10	5.0	4.2e+23	24	194	79	-161		Transcurrente dextral
33	2010-08-21	5.4	1.83e+24	19	149	58	-24		Transcurrente sinistral
34	2011-08-17	5.0	3.57e+23	21	164	65	90		Inversa
35	2011-09-13	5.2	8.37e+23	12	182	76	88		Inversa
36	2011-09-13	5.5	2.48e+24	13	181	72	90		Inversa
43	2017-01-12	5.2	8.03e+23	18	112	59	-81		Normal
44	2017-03-21	5.0	4.51e+23	15	168	78	95		Inversa

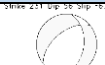
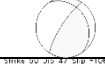
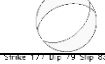
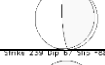
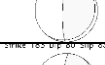
Fecha	Mw	Momento escalar Mo	Prof [km]	Strike ϕ	Dip δ	Slip λ	Beach Ball	Tipo de Mecanismo
Ambiente Sismotectónico II – sur.								
1	1994-06-03	5.8	5.67e+24	15	10	42	-123	 Normal oblicuo
4	1995-04-12	5.0	4.36e+23	54	65	53	127	 Inverso oblicuo
6	1995-10-10	5.1	5.68e+23	55	53	46	76	 Inversa
8	1996-04-27	6.1	1.56e+25	15	203	76	85	 Inversa
11	1997-10-05	5.3	1.05e+24	15	218	74	-71	 Normal oblicua dextral.
14	2000-05-23	5.2	7.58e+23	34	213	78	115	 Inverso oblicuo dextral.
18	2003-08-22	5.0	3.56e+23	31	50	47	-106	 Normal oblicuo
21	2004-11-15	7.2	7.57e+26	16	177	79	85	 Inverso
28	2007-09-10	6.7	1.66e+26	19	54	23	-95	 Normal
39	2014-03-09	5.6	3.39e+24	15	182	80	83	 Inversa
40	2014-06-16	5.7	4.87e+24	16	183	80	85	 Inversa

Tabla 7. Sismos con magnitud $M_w \geq 4.8$ ocurridos entre 1993-06-01 y 2018-02-28.

Los datos se descargaron del GCMT en <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>. Se presentan los ángulos de azimuth (ϕ), buzamiento (δ), deslizamiento (λ), la solución gráfica del mecanismo focal (balón de playa) y el tipo de mecanismo para cada sismo registrado en los ambientes I–norte, I–sur, II–norte y II–sur.

3.2.2. Momento sísmico, deformación y tasa de deformación

Para obtener la Deformación Sísmica en un volumen de corteza terrestre V se utiliza el método de [Kostrov \(1974\)](#), que considera que si toda la deformación en el volumen V es sísmica, entonces el tensor de Deformación Sísmico Promedio en la región ε se calcula con la contribución de todos los eventos al tensor Momento Sísmico M en el volumen ([Kostrov, 1974](#)). La expresión es:

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2\mu V} \sum_{n=1}^N M_{ij} \quad (2)$$

Los M_{ij} son los componentes del tensor de Momento Sísmico de cada evento en el volumen V , μ es el módulo shear de la roca (estimado en 3.3×10^{10} N/m²) y V es el volumen de la roca calculado como el área superficial por la profundidad promedio.

Para obtener el tensor de Tasa de Deformación Promedio se usa la ecuación (Jost y Herrmann, 1989; Corredor, 2003; Guzmán-Speziale *et al*, 2005):

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{d\varepsilon_{ij}}{dt} = \frac{1}{2\mu V T} \sum_{n=1}^N M_{ij} \quad (3)$$

Donde T es el tiempo de registro de los sismos en años.

Los elementos M_{ij} del tensor de Momento Sísmico M se obtienen de los seis parámetros M_{rr} , M_{tt} , M_{pp} , M_{rt} , M_{rp} y M_{tp} de cada sismo que al sumarse correspondientemente dan:

$$M_{ij} = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & M_{yy} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & M_{zz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Los términos M_{xx} , M_{yy} y M_{zz} corresponden a las componentes M_{rr} , M_{tt} y M_{pp} respectivamente y los términos mixtos M_{xy} , M_{xz} y M_{yz} se asocian con M_{rt} , M_{rp} y M_{tp} respectivamente.

El tensor de Momento Sísmico M describe las fuerzas equivalentes de una fuente sísmica puntual a partir de pares de fuerzas en un patrón de radiación. Como es un tensor real y simétrico, tiene autovalores reales y autovectores ortogonales (Jost y Herrmann, 1989; Corredor, 2003; Guzmán-Speziale *et al*, 2005).

Para obtener los ejes de compresión P y tensión T en el volumen V, se reduce el tensor Momento Sísmico M a una matriz diagonal D donde sus elementos son los autovalores de M.

$$\frac{d\varepsilon_{ij}}{dt} = \frac{1}{2\mu V T} D_{ij} \quad (5)$$

Entonces los tres valores propios se asocian con los ejes principales de deformación del tensor así: el autovalor positivo corresponde con el eje principal de tensión T; el autovalor cero se asocia con el eje principal nulo N y el negativo con el eje principal de compresión P. También, el autovector asociado con el eje de tensión T va en la primera columna y el de compresión en la tercera. El autovector asociado con el autovalor mayor entre T y P sugiere la componente dominante en el ambiente sismotectónico (Salcedo y Pérez, 2017).

Para calcular el valor M_w promedio en cada ambiente se aplica la relación de Kanamori (1977).

$$M_w = \frac{2}{3} \log(\mu V T \varepsilon) - 10.7 \quad (6)$$

Donde ε es el máximo valor propio del tensor de deformación. El deslizamiento promedio de la ruptura (slip) se calcula con la ecuación de Kanamori y Astiz (1985).

$$\bar{D} = \xi 10^{(0.5 M_w + 5.37)} \quad (7)$$

Donde

$$\xi = 1.1 \times 10^{-7} Dn^{-\frac{1}{3}} cm^{\frac{2}{3}}$$

3.2.3. Deformación y tasas de deformación en los nuevos ambientes sismotectónicos

En el [Anexo A](#) se tienen, para cada uno de los 45 sismos del catálogo del GCMT, las seis componentes Mrr, Mtt, Mpp, Mrt, Mrp y Mtp para construir el tensor de Momento Sísmico M y los autovalores, los ángulos de plunge (Θ) y de azimuth (Φ) para cada eje de tensión T, neutro N y de presión P. El catálogo usa el siguiente formato:

Tensor Momento en Dn cm.

Mrr Mtt Mpp Mrt Mrp Mtp

Autovector para el eje T: autovalor τ plunge Θ_T azimuth Φ_T

Autovector para el eje N: autovalor ν plunge Θ_N azimuth Φ_N

Autovector para el eje P: autovalor ρ plunge Θ_P azimuth Φ_P

En la [Tabla 8](#) se presenta para cada evento, además del identificador y la fecha, las seis componentes para el tensor Momento M_{ij} con el exponente correspondiente y los ángulos de azimuth (Φ) y de plunge (Θ) para los ejes P y T, en los cuatro ambientes sismotectónicos.

	Fecha	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp	iexp	Φ_P	Θ_P	Φ_T	Θ_T
Ambiente Sismotectónico – I – norte.												
2	1994-09-27	-0.35	0.50	-0.15	0.65	-0.40	1.88	25	228	23	321	6
5	1995-04-13	-0.15	-0.38	0.54	0.34	0.70	1.14	24	36	8	303	23
20	2004-01-12	-0.22	0.37	-0.15	0.10	0.11	0.96	24	53	3	322	6
30	2008-01-30	-2.85	2.21	0.64	1.55	-0.29	0.59	23	202	73	346	14
37	2013-08-13	-0.54	1.19	-0.65	0.09	0.31	0.33	26	83	38	349	5
38	2013-10-24	-1.01	-0.43	1.44	-0.30	1.21	3.90	23	40	20	307	8
42	2016-01-22	-3.77	1.04	2.73	1.85	-0.08	2.03	23	197	68	306	7
	Fecha	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp	iexp	Φ_P	Θ_P	Φ_T	Θ_T
Ambiente Sismotectónico – I – sur.												
3	1994-11-26	-8.26	-0.30	8.56	2.89	2.57	1.80	23	159	72	284	10
7	1995-11-13	-1.10	0.05	1.05	0.00	0.00	0.77	24	180	90	118	0
12	1999-03-11	-2.42	-0.25	2.66	-0.85	0.58	0.44	23	21	70	277	5
17	2002-12-21	-8.13	0.28	7.85	-0.74	2.59	3.84	23	50	76	292	7
22	2005-08-03	-2.17	0.06	2.11	-0.34	1.20	0.75	23	54	70	285	13
26	2007-03-17	-1.12	0.45	0.67	0.03	0.51	0.65	25	72	73	308	10
27	2007-03-18	-2.46	0.45	2.02	-0.15	1.10	1.01	25	64	74	294	10
32	2008-02-23	-5.20	1.82	3.38	1.15	0.77	2.38	23	161	81	307	7
41	2015-07-19	1.40	0.04	-1.44	-0.42	-4.19	-0.31	23	278	36	94	54
45	2017-03-24	-0.65	0.60	0.05	0.46	0.23	-0.01	24	140	68	354	19
	Fecha	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp	iexp	Φ_P	Θ_P	Φ_T	Θ_T
Ambiente Sismotectónico II – norte.												
9	1996-05-23	1.06	-0.09	-0.98	0.23	-3.68	0.13	24	265	37	88	53
10	1997-09-09	2.80	0.96	-3.76	-2.59	-3.19	-0.38	23	284	25	150	57

13	2000-03-19	-4.99	1.50	3.48	-3.17	6.95	-1.07	23	65	60	246	30
15	2000-07-12	-7.64	1.77	5.86	0.48	4.12	-3.08	23	113	72	246	13
16	2002-08-08	-2.91	1.18	1.73	2.22	-0.26	3.12	24	210	55	315	10
19	2003-11-05	-0.64	0.24	0.40	0.59	-0.04	0.46	25	201	59	317	15
23	2006-01-23	0.98	-0.04	-0.93	0.20	-2.50	0.50	25	257	34	94	55
24	2006-01-24	0.83	-0.07	-0.76	0.04	-0.90	0.59	24	246	21	111	62
25	2006-01-29	4.75	-0.65	-4.10	0.95	-6.17	2.76	23	247	25	96	62
29	2007-09-22	2.55	-0.01	-2.54	-0.44	-3.00	-0.36	23	278	25	99	65
31	2008-02-10	-1.54	2.32	-0.78	0.04	0.95	3.72	23	58	21	326	5
33	2010-08-21	-0.76	1.53	-0.77	0.56	0.58	-0.98	24	114	38	18	7
34	2011-08-17	2.92	-0.56	-2.36	0.64	-2.21	0.58	23	254	20	74	70
35	2011-09-13	4.09	-0.34	-3.75	-0.20	-7.37	-0.50	23	274	31	89	59
36	2011-09-13	1.50	-0.08	-1.43	-0.03	-2.00	-0.01	24	271	27	91	63
43	2017-01-12	-0.72	0.67	0.05	-0.31	0.20	-0.16	24	46	75	196	13
44	2017-03-21	1.78	-0.20	-1.58	0.80	-4.03	0.76	23	253	33	84	57
Fecha		Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp	iexp	Φ_P	Θ_P	Φ_T	Θ_T
Ambiente Sismotectónico II – sur.												
1	1994-06-03	-4.72	0.82	3.90	2.35	0.03	2.75	24	196	67	303	7
4	1995-04-12	3.53	-1.31	-2.22	2.15	-1.47	-1.95	23	129	2	36	61
6	1995-10-10	5.35	-4.51	-0.83	-0.50	0.77	-2.58	23	153	0	243	80
8	1996-04-27	0.70	-0.16	-0.54	-0.51	-1.27	-0.41	25	298	31	106	59
11	1997-10-05	-5.47	-0.94	6.40	6.21	5.95	1.19	23	152	56	292	27
14	2000-05-23	2.93	1.84	-4.77	-4.08	-4.85	0.16	23	283	29	151	51
18	2003-08-22	-3.31	2.77	0.54	0.22	-0.61	1.68	23	246	78	152	1
21	2004-11-15	2.80	-0.13	-2.67	0.53	-7.03	-0.46	26	271	34	81	55
28	2007-09-10	-1.13	0.84	0.29	1.01	0.58	0.62	26	153	68	328	22
39	2014-03-09	1.07	0.03	-1.10	-0.05	-3.18	-0.44	24	278	35	84	54
40	2014-06-16	1.68	-0.00	-1.68	-0.14	-4.54	-0.50	24	277	35	86	55

Tabla 8. Base de datos de 45 eventos registrados entre el 1 de junio de 1993 y el 28 de febrero de 2018. Descargados del GCMT, <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>. Se presentan las componentes Mrr, Mtt, Mpp, Mrt, Mrp y Mtp para el tensor de Momento Sísmico M y los ángulos de azimuth (Φ) y de plunge (Θ) para el eje P y el eje T en los ambientes sismotectónicos I–norte, I–sur, II–norte y II–sur.

Con las seis componentes Mrr, Mtt, Mpp, Mrt, Mrp y Mtp de cada evento del catálogo se calculan las sumas correspondientes y se obtienen los valores de Mxx, Myy, Mzz, Mxy, Mxz y Myz en cada ambiente. Los resultados de las contribuciones al Tensor Momento Sísmico M se muestran en la Tabla 9. Los cálculos completos están disponibles en el Anexo C, en la Tabla 11. Estos valores son descargados de <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>

Ambiente Sismotectónico – I – Norte.						
Cant.	Mxx	Myy	Mzz	Mxy	Mxz	Myz
7	-5.86 E+25	1.24 E+26	-6.56 E+25	1.63 E+25	2.79 E+25	5.46 E+25

Ambiente Sismotectónico – I – Sur.						
Cant.	Mxx	Myy	Mzz	Mxy	Mxz	Myz
10	-4.00 E+25	9.82 E+24	3.03 E+25	-5.71 E+23	1.67 E+25	1.83 E+25
Ambiente Sismotectónico – II – Norte.						
Cant.	Mxx	Myy	Mzz	Mxy	Mxz	Myz
17	2.87 E+24	5.62 E+24	-8.41 E+24	1.03 E+25	-3.29 E+25	1.25 E+25
Ambiente Sismotectónico – II – Sur.						
Cant.	Mxx	Myy	Mzz	Mxy	Mxz	Myz
11	1.72 E+26	7.00 E+25	-2.42 E+26	1.51 E+26	-6.65 E+26	1.36 E+25

Tabla 9. Valores de Mxx, Myy, Mzz, Mxy, Mxz y Myz calculados para cada Ambiente con las componentes Mrr, Mtt, Mpp, Mrt, Mrp y Mtp de cada sismo del catálogo GCMT. El cálculo está disponible en el Anexo C.

Se construyen entonces los tensores de Momento Sísmico M con la estructura de la ecuación (4) para cada ambiente sismotectónico I-norte, I-sur, II-norte y II-sur.

Así para el **Ambiente Sismotectónico I-norte** se tiene el tensor de Momento Sísmico:

$$M_{ij} \text{ I – norte} = \begin{bmatrix} -5.86 & 1.63 & 2.79 \\ 1.63 & 12.4 & 5.46 \\ 2.79 & 5.46 & -6.56 \end{bmatrix} \times 10^{25} \text{ Dn cm.}$$

La matriz de vectores propios en el Ambiente I-norte es:

$$V_{ij} \text{ I – norte} = \begin{bmatrix} 0.5508 & 0.8266 & 0.1154 \\ 0.1629 & -0.2421 & 0.9565 \\ -0.8186 & 0.5081 & 0.2680 \end{bmatrix}$$

La matriz diagonal DI -norte que contiene los valores propios del tensor M es:

$$DI \text{ – norte} = \begin{bmatrix} -0.9524 \\ -0.4623 \\ 1.4127 \end{bmatrix} \times 10^{26} \text{ Dn cm.}$$

El mayor valor propio es 1.4127×10^{26} Dn cm. que corresponde a la dirección z , en profundidad. Dado que el volumen de la roca en el Ambiente I-norte es $V = 1.62 \times 10^6 \text{ km}^3$, el coeficiente $\mu = 5.0 \times 10^{11} \text{ Dn/cm}^2$. y el tiempo de captura de datos es $T = 24.75$ años entonces el tensor Tasa de Deformación queda

$$\dot{\epsilon}_{ij} \text{ I – norte} = \begin{bmatrix} -0.1461 & 0.0407 & 0.0696 \\ 0.0407 & 0.3093 & 0.1362 \\ 0.0696 & 0.1362 & -0.1636 \end{bmatrix} \times 10^{-8} \text{ año}^{-1}.$$

Los valores propios del tensor Tasa de Deformación son:

$$\dot{\epsilon} \text{ I – norte} = \begin{bmatrix} -0.2375 \\ -0.1153 \\ 0.3523 \end{bmatrix} \times 10^{-8} \text{ año}^{-1}.$$

Donde el valor propio más grande es $0.3523 \times 10^{-8} \text{ año}^{-1}$ en dirección de profundidad. Ahora se calcula con la relación (6) de [Kanamori \(1977\)](#) el valor de M_w esperado en el Ambiente I – norte:

$$M_w \text{ I – norte} = \frac{2}{3} \log(7.0627 \times 10^{25}) - 10.7 = 6.5$$

El deslizamiento promedio de la ruptura (slip) para el Ambiente I – norte se calcula de (7)

$$\bar{D} \text{ I – norte} = 1.1 \times 10^{-7} D_n^{-\frac{1}{3}} \text{ cm}^{\frac{2}{3}} \times 10^{(0.5 (6.5) + 5.37)} = 46 \text{ cm}.$$

Para el **Ambiente Sismotectónico I-sur** el tensor de Momento Sísmico es:

$$M_{ij} \text{ I – sur} = \begin{bmatrix} -4.00 & -0.057 & 1.67 \\ -0.057 & 0.982 & 1.83 \\ 1.67 & 1.83 & 3.03 \end{bmatrix} \times 10^{25} D_n \text{ cm}.$$

La matriz de vectores propios en el Ambiente I-sur es:

$$V_{ij} \text{ I – sur} = \begin{bmatrix} -0.9667 & 0.1911 & 0.1702 \\ -0.0912 & -0.8787 & 0.4685 \\ 0.2392 & 0.4374 & 0.8669 \end{bmatrix}$$

La matriz diagonal $D \text{ I-sur}$ que tiene los valores propios del tensor M es:

$$D \text{ I – sur} = \begin{bmatrix} -4.4185 \\ 0.0835 \\ 4.3471 \end{bmatrix} \times 10^{25} D_n \text{ cm}.$$

El mayor valor propio, en valor absoluto, es $4.4185 \times 10^{25} D_n \text{ cm}$. que corresponde a la dirección norte. Dado que el volumen de la roca en el Ambiente I-sur es $V = 1.62 \times 10^6 \text{ km}^3$, el coeficiente $\mu = 5.0 \times 10^{11} D_n/\text{cm}^2$. y el tiempo de captura de datos es $T = 24.75$ años entonces el tensor Tasa de Deformación queda

$$\dot{\epsilon}_{ij} \text{ I – sur} = \begin{bmatrix} -0.9976 & -0.0142 & 0.4165 \\ -0.0142 & 0.2449 & 0.4564 \\ 0.4165 & 0.4564 & 0.7557 \end{bmatrix} \times 10^{-9} \text{ año}^{-1}.$$

Los valores propios del tensor Tasa de Deformación son:

$$\dot{\epsilon} \text{ I – sur} = \begin{bmatrix} -0.1102 \\ 0.0021 \\ 0.1084 \end{bmatrix} \times 10^{-8} \text{ año}^{-1}.$$

Donde el valor propio más grande, en valor absoluto, es $0.1102 \times 10^{-8} \text{ año}^{-1}$ en dirección norte. Ahora se calcula el valor de M_w esperado con la relación (6)

$$M_w \text{ I – sur} = \frac{2}{3} \log(2.209 \times 10^{25}) - 10.7 = 6.2$$

El deslizamiento promedio de la ruptura para el Ambiente I – sur se calcula de (7)

$$\bar{D} \text{ I – sur} = 1.1 \times 10^{-7} D_n^{-\frac{1}{3}} \text{ cm}^{\frac{2}{3}} \times 10^{(0.5 (6.2) + 5.37)} = 32.5 \text{ cm}$$

En el **Ambiente Sismotectónico II-norte** se tiene el tensor de Momento Sísmico:

$$M_{ij} \text{ II – norte} = \begin{bmatrix} 0.287 & 1.03 & -3.29 \\ 1.03 & 0.562 & 1.25 \\ -3.29 & 1.25 & -0.841 \end{bmatrix} \times 10^{25} D_n \text{ cm.}$$

La matriz de vectores propios en el Ambiente II-norte es:

$$V_{ij} \text{ II – norte} = \begin{bmatrix} 0.6092 & -0.2156 & 0.7631 \\ -0.3239 & -0.9461 & -0.0087 \\ 0.7238 & -0.2419 & -0.6462 \end{bmatrix}$$

La matriz diagonal $D \text{ II-norte}$ que contiene los valores propios del tensor M es:

$$D \text{ II – norte} = \begin{bmatrix} -4.1694 \\ 1.1162 \\ 3.0612 \end{bmatrix} \times 10^{25} D_n \text{ cm.}$$

El mayor valor propio en valor absoluto es $4.1694 \times 10^{25} D_n \text{ cm.}$ que corresponde a la dirección norte. Como el volumen de la roca en el Ambiente II-norte es $V = 7.70 \times 10^5 \text{ km}^3$, el coeficiente $\mu = 5.0 \times 10^{11} D_n/\text{cm}^2$. y el tiempo de captura de datos es $T = 24.75$ años entonces el tensor Tasa de Deformación es

$$\dot{\epsilon}_{ij} \text{ II – norte} = \begin{bmatrix} 0.0151 & 0.0540 & -0.1726 \\ 0.0540 & 0.0295 & 0.0656 \\ -0.1726 & 0.0656 & 0.0441 \end{bmatrix} \times 10^{-8} \text{ año}^{-1}.$$

Los valores propios del tensor Tasa de Deformación son:

$$\dot{\epsilon} \text{ II – norte} = \begin{bmatrix} -0.2188 \\ 0.0586 \\ 0.1606 \end{bmatrix} \times 10^{-8} \text{ año}^{-1}.$$

Donde el valor propio más grande, en valor absoluto, es $0.2188 \times 10^{-8} \text{ año}^{-1}$ en dirección norte. El valor de M_w esperado con la ecuación (6) es

$$M_w \text{ II – norte} = \frac{2}{3} \log(2.0849 \times 10^{25}) - 10.7 = 6.2$$

El deslizamiento promedio de la ruptura en este ambiente es

$$\bar{D}II - \text{norte} = 1.1 \times 10^{-7} \text{ Dn}^{-\frac{1}{3}} \text{ cm}^{\frac{2}{3}} \times 10^{(0.5 (6.2) + 5.37)} = 32.5 \text{ cm}$$

Para el **Ambiente Sismotectónico II -sur** se tiene el tensor de Momento Sísmico:

$$M_{ij}II - \text{sur} = \begin{bmatrix} 17.2 & 15.1 & -66.5 \\ 15.1 & 7.00 & 1.36 \\ -66.5 & 1.36 & -24.2 \end{bmatrix} \times 10^{25} \text{ Dn cm.}$$

La matriz de vectores propios en el Ambiente II-sur es:

$$V_{ij}II - \text{sur} = \begin{bmatrix} -0.5962 & -0.0753 & 0.7993 \\ 0.1239 & 0.9750 & 0.1843 \\ -0.7932 & 0.2089 & -0.5720 \end{bmatrix}$$

La matriz diagonal DII-sur que contiene los valores propios del tensor M es:

$$DII - \text{sur} = \begin{bmatrix} -7.4401 \\ 0.6125 \\ 6.8276 \end{bmatrix} \times 10^{26} \text{ Dn cm.}$$

En valor absoluto el mayor valor propio es 7.4401×10^{26} Dn cm. que corresponde a la dirección norte. Dado que el volumen de la roca en el Ambiente II-sur es $V = 2.16 \times 10^6 \text{ km}^3$, el coeficiente $\mu = 5.0 \times 10^{11} \text{ Dn/cm}^2$. y el intervalo de tiempo es $T = 24.75$ años entonces el tensor Tasa de Deformación queda

$$\dot{\epsilon}_{ij}II - \text{sur} = \begin{bmatrix} 0.0322 & 0.0282 & -0.1244 \\ 0.0282 & 0.0131 & 0.0025 \\ -0.1244 & 0.0025 & -0.0453 \end{bmatrix} \times 10^{-7} \text{ año}^{-1}.$$

Los valores propios del tensor Tasa de Deformación son:

$$\dot{\epsilon} II - \text{sur} = \begin{bmatrix} -0.1392 \\ 0.0115 \\ 0.1277 \end{bmatrix} \times 10^{-7} \text{ año}^{-1}.$$

Donde el valor propio más grande es $0.1392 \times 10^{-7} \text{ año}^{-1}$ en dirección norte.

El valor de M_w esperado en el Ambiente II-sur es

$$M_w II - \text{sur} = \frac{2}{3} \log(3.7208 \times 10^{26}) - 10.7 = 7.0$$

El deslizamiento promedio de la ruptura (slip) en el Ambiente II-sur es:

$$\bar{D}II - \text{sur} = 1.1 \times 10^{-7} \text{ Dn}^{-\frac{1}{3}} \text{ cm}^{\frac{2}{3}} \times 10^{(0.5 (7.0) + 5.37)} = 81.5 \text{ cm}$$

4. RESUMEN, DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. UN RESUMEN A MANERA DE CIERRE

En este trabajo se hace un aporte a la Caracterización Sismotectónica de la Placa Oceánica de Nazca y la parte sumergida de la Placa Continental de Suramérica frente a la Costa Pacífica Colombiana, analizando un catálogo de 3986 sismos de magnitud ML entre 1 y 9 registrados por la Red Sismológica Nacional de Colombia - RSNC entre el 1 de junio de 1993 y el 28 de febrero de 2018. La zona de estudio se inscribe en el polígono limitado por 80.00° W y 77.50° W y por 1.50° N y 7.00° N con 100 km. de profundidad.

Primero se hace un análisis estadístico de magnitud (FMD) sobre el catálogo de la RSNC para establecer los parámetros valor-*b*, valor-*a* y magnitud de corte *Mc*, luego se obtiene la tasa acumulada de eventos, los histogramas de magnitud, de profundidad y de tiempo inicialmente para toda la zona de estudio y después para los Ambientes Sismotectónicos I y II al occidente y al oriente de la Fosa Colombo-Ecuatoriana ([Salcedo y Pérez, 2016](#)) dentro del polígono definido, con ZMAP7. Aprovechando las virtudes de ZMAP se realizan nueve perfiles de 20 km. de ancho y 100 km. de profundidad intentando cruzar clústeres o capturar eventos de $ML > 6$. Cinco de los nueve perfiles son perpendiculares a la Fosa Colombo-Ecuatoriana y cuatro paralelos a ella o a la Costa.

Posteriormente se descarga un segundo catálogo de 45 sismos con magnitudes $M_w \geq 4.8$ con sus correspondientes soluciones del Global Centroid Moment Tensor – GCMT, en la misma región y para el mismo rango tiempo. A este catálogo también se le realiza, con ZMAP7, un análisis estadístico de magnitudes (FMD) y se establecen los valores-*b*, valores-*a*, magnitudes de corte *Mc*, tasas acumuladas de eventos, histogramas de magnitud, profundidad y tiempo para los Ambientes Sismotectónicos I y II. En este punto de la investigación se realiza una partición estratégica del polígono que encierra la zona de estudio: los Ambientes Sismotectónicos I y II, al occidente y oriente de la Fosa Colombo-Ecuatoriana se subdividen por el paralelo 5.00° N. para establecer las correspondientes partes norte y sur de cada ambiente.

Partiendo del análisis de los mecanismos focales de los 45 eventos del catálogo GCMT, los planos de falla, los beach ball para cada sismo y el modelo de [Kostrov \(1974\)](#) se calculan los tensores de momento sísmico *M*, de deformación sísmica promedio y de tasa de deformación para el volumen de roca considerado en cada uno de los cuatro Ambientes Sismotectónicos. De aquí se deduce si los ambientes son compresivos o distensivos, las magnitudes *M_w* esperadas con la ecuación de [Kanamori \(1977\)](#) y el deslizamiento promedio de ruptura con la ecuación de [Kanamori y Astiz \(1985\)](#).

4.2. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE SISMICIDAD REALIZADO CON ZMAP

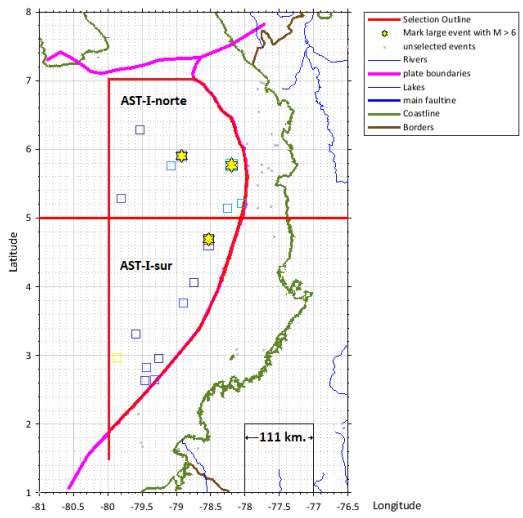
Del Análisis Estadístico realizado al **catálogo de la RSNC** con ZMAP7 se puede concluir que:

- Los sismos que más se repiten están en el rango de **2.4 a 2.7 ML** con más de 250 veces.
- En latitud, de sur a norte, la mayor concentración de sismos está en 2.8° N y en 5.8° N.

- En longitud, de occidente a oriente, la concentración de sismos se dispara entre -78.5° y -77.5° alcanzando hasta 800 eventos por bin.
- La magnitud de corte para el catálogo propio y para los ambientes I y II es la misma: **Mc = 2.7**
- El parámetro estadístico **valor-*b*** para toda región de estudio es **0.78 ± 0.02** .
- El **valor-*b*** para el ambiente - I es **0.77 ± 0.02**
- El **valor-*b*** para el ambiente - II es **0.81 ± 0.03** .
- Para los cinco **perfiles transversales a la Fosa Colombo-Ecuatoriana**, de norte a sur, los **valores-*b*** son: **0.59, 0.68, 0.83, 0.57 y 0.84** respectivamente.
- Para los **perfiles paralelos a la Fosa Colombo-Ecuatoriana**, en el AST-I, los **valores-*b*** son: al norte **1.07** y al sur **0.94**
- Para los **perfiles paralelos a la Costa Pacífica Colombiana**, en el AST-II, los **valores-*b*** son: al norte **0.59** y al sur **0.96**

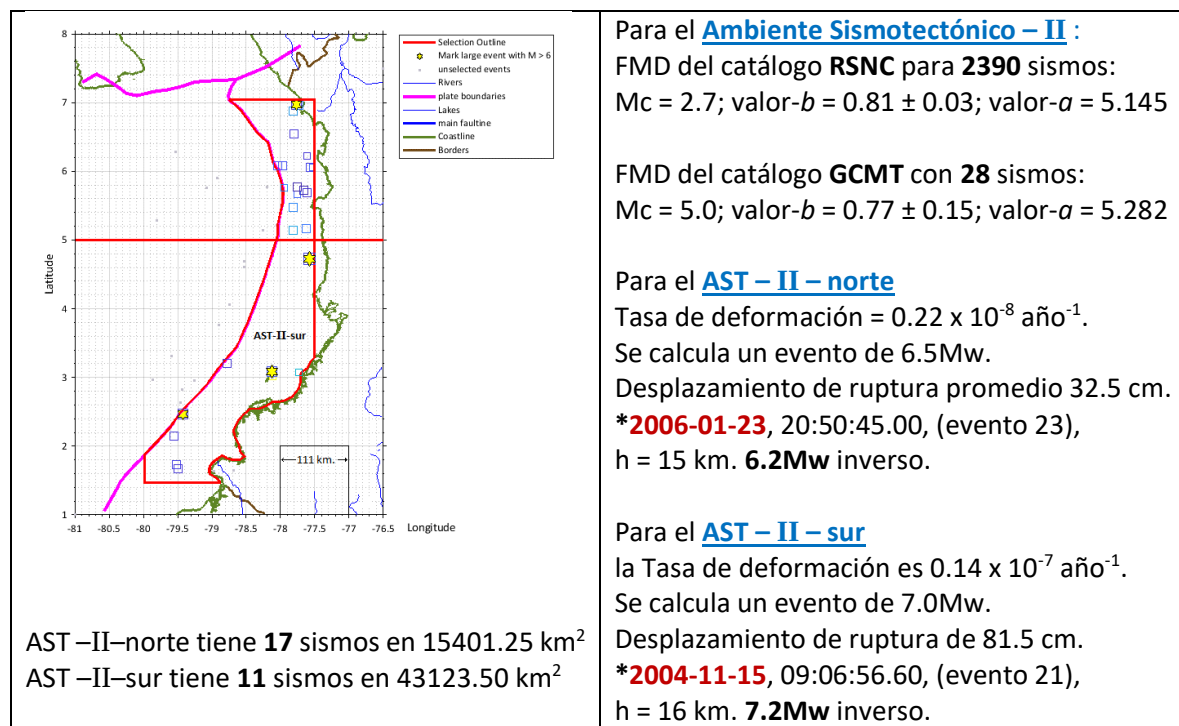
4.3 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE DEFORMACIÓN SISMOTECTÓNICA

El siguiente cuadro resume los principales parámetros estadísticos, los resultados de tasa de deformación, evento esperado y desplazamiento de ruptura para el Ambiente Sismotectónico I.

 AST-I – norte tiene 7 sismos en 46203.75 km^2 AST-I – sur tiene 10 sismos en 46203.75 km^2	Para el Ambiente Sismotectónico - I: FMD del catálogo RSNC para 1605 sismos: $Mc = 2.7$; $\text{valor-}b = 0.77 \pm 0.02$; $\text{valor-}a = 4.978$ FMD del catálogo GCMT para 17 sismos: $Mc = 5.2$; $\text{valor-}b = 0.87 \pm 0.29$; $\text{valor-}a = 5.517$ Para el AST – I – norte: Tasa de deformación = $0.35 \times 10^{-8} \text{ año}^{-1}$. Se espera un sismo de 6.5Mw. Desplazamiento de ruptura promedio 46 cm. *2013-08-13, 15:43:15.20, (evento 37), $h = 21 \text{ km}$. 6.6Mw con mecanismo normal. En el AST – I – sur: Tasa de deformación = $0.11 \times 10^{-8} \text{ año}^{-1}$. Se calcula un sismo de 6.2Mw. Desplazamiento de ruptura promedio 32.5 cm. *2007-03-17, 22:43:9.60, (evento 26), $h = 13 \text{ km}$. 6.0Mw con mecanismo normal. *2007-03-18, 02:11:5.50, (evento 27), $h = 12 \text{ km}$. 6.2Mw con mecanismo normal.
--	--

Se destaca que en **2013-08-13**, a las 15:43:15.20 ocurrió un evento **6.6Mw** a 21 km. de profundidad en el **AST –I –norte** donde se esperaba un Mw promedio de 6.5. Se destaca también que en **2007-03-17**, a las 22:43:9.60 se presentó un sismo **6.0Mw** con profundidad 13 km. y pocas horas después, el **2007-03-18** a las 02:11:5.50, otro sismo **6.2Mw** con $h = 12$ km. en el **AST –I –sur** donde se esperaba un Mw promedio de 6.2.

El cuadro siguiente presenta un resumen de los parámetros estadísticos y los resultados de la deformación sismotectónica en el Ambiente Sismotectónico II, partes norte y sur.



El **2006-01-23**, a las 20:50:45.00, se ocurrió un sismo de **6.2Mw** con mecanismo inverso a 15 km de profundidad en el **AST – II – norte** donde se esperaba un evento promedio de 6.5 Mw. También el **2004-11-15**, a las 09:06:56.60, se presentó un evento de **7.2Mw** con mecanismo inverso a $h=16$ km. en el ambiente **AST – II – sur** donde se esperaba un sismo promedio de **7.0Mw**.

4.4 RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS

En este estudio de caracterización no se discriminó entre evento principal, réplica, y premonitorio. Se utilizaron todos los eventos registrados en los catálogos que cumplieron las condiciones. Un estudio posterior podría depurar las réplicas de los catálogos y entonces comparar los resultados.

Aunque ZMAP puede hacer Análisis Estadístico de Sismicidad con pocos datos, es deseable repetir este estudio con más datos de la misma región y el mismo intervalo de tiempo, por ejemplo, bajando la restricción de Mw a 4.5 o 4.0.

Es posible que con argumentos mas geológicos y geodésicos se pueda proponer otra partición para los Ambientes I y II definidos en el trabajo de [Salcedo y Pérez \(2016\)](#). Tal vez una partición por el paralelo 4.00° norte pueda arrojar resultados interesantes que puedan proyectarse al continente suramericano.

Finalmente, Ambientes Sismotectónicos más pequeños, más regionales, donde el volumen en la ecuación de Kostrov sea más pequeño y donde se tenga mejor información sobre la constante viscoelástica μ pueden arrojar mejores resultados. Se recomienda entonces particiones espaciales mas pequeñas en particular cerca de la Costa Pacífica Colombiana.

5. BIBLIOGRAFÍA.

- Aki, K. (1965). **Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N=a-bM$ and its confidence limits**. Bull. Earthquake Res. Inst., 43, 237-239.
- Arcila, M. (2010). **Sismicidad en el Pacífico Colombiano y su potencial tsunamigénico**. Servicio Geológico Colombiano, 1-37.
- Arcila, M. y Dimaté, C. (2010). **Caracterización de fuentes sísmicas**. En: Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali. Informe No. 1-6. INGEOMINAS – DAGMA. Bogotá, pp. 38.
- Benítez, H.D., Flórez, J.F., Duque, D.P., Benavides, A., Baquero, O.L., and Quintero, J. (2013). **Spatial pattern recognition of seismic events in South West Colombia**. Computers & Geosciences 59 (2013) 60-77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2013.04.028>
- Cardenas, C.M., Garzón, Y.D., Santa, L.F., and Castillo, L.E. (2010). **Modelo de Poisson para la ocurrencia y magnitud espacio-temporal de los sismos en Colombia**. Revista UD y la Geomática, 4: 28-43.
- Castilla, E. y Sánchez, R. (2014). **Análisis de la sismicidad en la Costa Pacífica colombiana: herramienta para definir fuentes de tsunami**. Bol. Cient. CIOH 2014; 32: 135-147.
- Condori, C. y Pérez, J.L., (2015). **Análisis de la variación espacio-temporal del valor de b en el valle del Cauca, suroccidente de Colombia**. GEOS, Vol. 35, No. 2.
- Corredor, F. (2003). **Seismic strain rates and distributed continental deformation in the northern Andes and three-dimensional seismotectonics of northwestern South America**. Tectonophysics, 372: 147-166.
- Dziewonski, A. M., T.-A. Chou and J. H. Woodhouse (1981). **Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity**, J. Geophys. Res., 86, 2825-2852, 1981. [doi:10.1029/JB086iB04p02825](https://doi.org/10.1029/JB086iB04p02825)
- Ekström, G., Nettles M., and Dziewonski A. M, **The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes**. Phys. Earth Planet. Inter., 200-201, 1-9, 2012. [doi:10.1016/j.pepi.2012.04.002](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002)
- Ekström, G., England, P. (1989). **Seismic strain rates in región of distributed continental deformation**. PJ. Geophys. Res 94(B8), 10231-10257.
- Freymueller, J.T., Kellogg, J.N. and Vega, V. (1993). **Plate motions in the North Andean region**. Journal of Geophysical Research, 98(B12): 21.853-21.863.
- Gath, I. and Geva, A., (1989). **Unsupervised optimal fuzzy clustering**. IEEE - Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 11, 733-780.

Guzmán-Speziale, M. (2001). **Active seismic deformation in the grabens of northern Central America and its relationship to the relative motion of the North America-Caribbean plate boundary.** Tectonophysics, 337(1-2): 39-51.

Guzmán-Speziale, M., Valdés-González, C., Molina, E., and Gómez, J.M. (2005). **Seismic activity along the Central America volcanic arc: Is it related to subduction of the Cocos plate?** Tectonophysics, 400(1-4): 241-254.

Gutenberg, R. and Richter, C.F. (1944). **Frequency of earthquakes in California.** Bull. Seism. Soc. Am. 34, 185-188.

Global Centroid Moment Tensor Catalog - GCMT. en <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> consultada el 1 de octubre de 2018.

Helffrich, G. en <http://www1.gly.bris.ac.uk/~george/focmec.html> consultada el 14 de diciembre de 2018.

Jost, M.L. and Herrmann, R.B. (1989). **A student's guide to and review of Moment Tensors.** Seismological Research Letters. 60(2), 37-57.

Kanamori, H. (1977). **The energy release in great earthquakes.** Journal of Geophysical Research, 82, 2981-2986.

Kanamori, H. and Astiz, L. (1985). **The Akita-Oki Earthquake (Mw=7.8) and its implications for systematic of subduction earthquakes.** Earthquake Prediction Research, 3, 305-317.

Kellogg, J.N., Dixon, T., and Neiland, R. (1989). **Central and South American GPS Geodesy.** EOS Transactions, 70: 649-656.

Kostrov, V.V. (1974). **Seismic Moment and energy of earthquakes, and seismic flow of rock.** Izv. Acad. Sci. USSR. Phys. Solid Earth I, 23-44.

Michael, A.J., and S. Wiemer (2010). **CORSSA: the Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis, Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis.** doi:10.5078/corssa-39071657. Available at <http://www.corssa.org>

Monsalve, H. (1998). **Geometría de la Subducción de la Placa Nazca en el Noroeste de Colombia, implicaciones Tectónicas y sísmicas** (Tesis de Maestría). Ciudad de México: Universidad Autónoma de México.

Monsalve, H. y Mora, H. (2005). **Esquema Geodinámico Regional para el Noroccidente de Suramérica (Modelo de Subducción y Desplazamientos Relativos).** Boletín de Geología, Vol. 27, No. 44., 26-53.

Monsalve, H., Lomnitz, C. y Pacheco, J. (1999). **Geometría de la Subducción de la Placa Nazca en el Noroeste de Colombia: Implicaciones Tectónicas y Sísmicas.** I Seminario Internacional de Riesgo Sísmico, Armenia- Quindío.

Mora, H. (1995). **Central and South America GPS Geodesy: Relative plate motions determined from 1991 and 1994 measurements in Colombia, Costa Rica, Ecuador, Panama and Venezuela** (MSc Thesis). Columbia, Carolina del Sur: University of South Carolina.

Naylor, M., K. Orfanogiannaki, and D. Harte (2010). **Exploratory data analysis: magnitude, space, and time, Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis**. doi:10.5078/corssa-92330203. Available at <http://www.corssa.org>

Page, W. (1986). **Geología Sísmica y Sismicidad del Noroeste de Colombia**. San Francisco, California: Woodward-Clyde Consultants Report for ISA and Integral Ltda, 200 p.

Paris, G., Machette, M.N., Dart, R.L. and Haller, K.M. (2000). **Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions**. Denver, Colorado, USA: U.S. Geological Survey (U.S.G.S).

Pedraza, P. (2006). **Geometría de la Subducción de la Placa Nazca en el Suroeste de Colombia, implicaciones tectónicas y sísmicas**. (Tesis de Maestría). Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias.

Pedraza, P., Vargas, C. y Monsalve., H. (2007). **Geometric model of the Nazca plate subduction in southwest Colombia**. Earth Sciences Research Journal, 117-130.

Pennington. W. D. (1981). **La subducción de la cuenca Oriental de panamá y la sismotectónica del noroeste de Sur América**. Investigaciones Geofísicas sobre las estructuras Oceano - Continentales del Occidente Colombiano, 97-137.

Red Sismológica Nacional de Colombia – RSNC del Servicio Geológico Colombiano - SGC en <https://www2.sgc.gov.co/sgc/sismos/Paginas/catalogo-sismico.aspx> consultada el 25 de septiembre de 2018.

Salcedo, E., and Pérez J. L. (2016). **Caracterización sismotectónica de la región del Valle del Cauca y zonas aledañas a partir de mecanismos focales de terremotos**. Boletín de Geología, 38(3): 89-107, doi: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v38n3-2016006>

Salcedo, E., and Pérez J. L. (2017). **Deformación sismotectónica a partir de mecanismos focales de terremotos en el Valle del Cauca, Suroccidente de Colombia**. Revista Geológica de América Central, 57, 23-43. doi: [10.15517/rgac.v0i57.30043](https://doi.org/10.15517/rgac.v0i57.30043)

Servicio Geológico Colombiano. (2010). **Mapa Geológico de Colombia** escala 1:2'800.000 segunda edición: [http://srvags.sgc.gov.co/Flexviewer/Mapa Geologico Colombia 2015/](http://srvags.sgc.gov.co/Flexviewer/Mapa_Geologico_Colombia_2015/)
<http://www.colombiaround2010.com>

Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya.J., and Rivera, C. (2000). **Geodynamics of Northern Andes: Subduction and Intra-Continental deformation (Colombia)**. Tectonics, Vol. 19, No. 5, 787-813.

Trenkamp, R., Kellogg J.N., Freymueller, J.T. and Mora, H. (2002). **Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations.** Journal of South American Earth Sciences, 15: 157-171.

Vargas, C. A. and Mann, P. (2013). **Tearing and Breaking Off of Subducted Slabs as the Result of Collision of the Panama Arc-Indenter with Northwestern South America.** Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 103, No. 3, 2025–2046, doi: [10.1785/0120120328](https://doi.org/10.1785/0120120328).

Vargas-Jimenez, C. A., Pujades, L. G., Ugalde, A., Canas, J. A. (2002). **Estado de deformación y esfuerzos en el territorio Colombiano.** Rev. Acad. Colomb. Cienc, Vol. 26(100), 373-391.

Wiemer, S. (2001). **A software package to analyze seismicity: ZMAP.** Seismological Research Letters, 72(3): 373-382. <https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373>

Woessner, J., and Wiemer, S. (2005). **Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty.** Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 95, No. 2: 684–698.

Wyss, M., Wiemer, S., and Zúñiga, R. (2001). **ZMAP a tool for analyses of Seismicity patterns. Typical applications and uses: a cookbook.** <http://www.geociencias.unam.mx/~ramon/cookbook.pdf>

Yarce, J., Monsalve, G., Becker, T. W., Cardona, A., Poveda, E., Alvira, D., and Ordoñez, O. (2014). **Seismological observations in Northwestern South America: Evidence for two subduction segments, contrasting crustal thicknesses and upper mantle flow.** Tectonophysics, 637: 57-67.

ANEXO A.

El 01 de octubre de 2018 se consulta el sitio web de **Global Centroid Moment Tensor Catalog**, <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> con los siguientes criterios de búsqueda:

Global CMT Catalog

Search criteria:

Start date: 1993/6/1	End date: 2018/2/28	
1.5 <=lat<= 7	-80 <=lon<= -77.5	
0 <=depth<= 100	-9999 <=time shift<= 9999	
0 <=mb<= 10	0<=Ms<= 10	4.8<=Mw<= 10
0 <=tension plunge<= 90	0 <=null plunge<= 90	

Se despliega un listado de 45 eventos registrados entre el 1 de junio de 1993 y el 28 de febrero de 2018, en el polígono definido por 1.50° a 7.00° de latitud y -80.00° a -77.50° de longitud, profundidad $h < 100$ km. y magnitudes $M_w \geq 4.8$ en estricto orden cronológico.

Cada registro de la base presenta la siguiente estructura:

Número y nombre del evento

Región donde ocurre

Fecha (año/mes/día)

Información de tiempo (hr, min, sec), Información de localización (lat, lon, depth, mb, Ms)

Información del mecanismo:

Exponente del Tensor Momento en Dn-cm.

Mrr Mtt Mpp Mrt Mrp Mtp

Mw Momento Escalar

Plano de falla 1: strike 1 (ϕ_1) dip 1 (δ_1) slip 1 (λ_1)

Plano de falla 2: strike 2 (ϕ_2) dip 2 (δ_2) slip 2 (λ_2)

Autovector para el eje T: autovalor_T plunge Θ_T azimut Φ_T

Autovector para el eje N: autovalor_N plunge Θ_N azimut Φ_N

Autovector para el eje P: autovalor_P plunge Θ_P azimut Φ_P

Se destaca que la metodología y el enfoque básicos para la determinación de los parámetros de la fuente en este catálogo son de [Dziewonski et al \(1981\)](#) y la descripción del análisis del global CMT Project 2004-2010: Centroid-moment tensor for 13017 earthquakes, son de [Ekström et al \(2012\)](#).

Los resultados de la consulta son:

1. Event name: 060394C

Region name: SOUTH OF PANAMA

Date (y/m/d): **1994/6/3**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	11	25	9.80	3.60	-78.77	28.0	5.9	5.1
CMT	11	25	10.20	3.21	-78.78	15.0		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 24 units: dyne-cm
Mrr Mtt Mpp Mrt Mrp Mtp
CMT -4.723 0.823 3.900 2.345 0.032 2.748
Mw = **5.8** Scalar Moment = 5.67e+24
Fault plane 1: strike=10 dip=42 slip=-123
Fault plane 2: strike=231 dip=56 slip=-63
Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 5.66 plunge: 7 azimuth: 303
Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.02 plunge: 22 azimuth: 35
Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -5.68 plunge: 67 azimuth: 196

2. Event name: 092794D
Region name: SOUTH OF PANAMA
Date (y/m/d): **1994/9/27**
Timing and location information
hr min sec lat lon depth mb Ms
PDE 23 4 51.70 5.71 -79.22 33.0 5.3 5.4
CMT 23 4 54.80 5.90 -78.92 16.3
Mechanism information
Exponent for moment tensor: 25 units: dyne-cm
Mrr Mtt Mpp Mrt Mrp Mtp
CMT -0.350 0.500 -0.150 0.654 -0.399 1.877
Mw = **6.1** Scalar Moment = 2.07e+25
Fault plane 1: strike=7 dip=69 slip=-167
Fault plane 2: strike=273 dip=78 slip=-21
Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 2.11 plunge: 6 azimuth: 321
Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.06 plunge: 66 azimuth: 65
Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -2.04 plunge: 23 azimuth: 228

3. Event name: 112694B
Region name: SOUTH OF PANAMA
Date (y/m/d): **1994/11/26**
Timing and location information
hr min sec lat lon depth mb Ms
PDE 4 48 3.20 2.89 -79.49 10.0 5.1 4.5
CMT 4 48 7.50 2.65 -79.32 15.0
Mechanism information
Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm
Mrr Mtt Mpp Mrt Mrp Mtp
CMT -8.262 -0.297 8.559 2.887 2.566 1.801
Mw = **5.2** Scalar Moment = 9.43e+23
Fault plane 1: strike=357 dip=37 slip=-114
Fault plane 2: strike=206 dip=57 slip=-73
Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 9.46 plunge: 10 azimuth: 284
Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.06 plunge: 14 azimuth: 16
Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -9.40 plunge: 72 azimuth: 159

4. Event name: 041295B
Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM
Date (y/m/d): **1995/4/12**
Timing and location information
hr min sec lat lon depth mb Ms
PDE 18 22 32.60 2.76 -78.35 41.0 5.2 4.6
CMT 18 22 39.40 3.02 -78.11 54.1
Mechanism information
Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm
Mrr Mtt Mpp Mrt Mrp Mtp
CMT 3.525 -1.309 -2.217 2.146 -1.472 -1.946
Mw = **5.0** Scalar Moment = 4.36e+23
Fault plane 1: strike=193 dip=50 slip=51

Fault plane 2: strike=65 dip=53 slip=127
Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 4.96 plunge: 61 azimuth: 36
Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -1.19 plunge: 29 azimuth: 220
Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -3.77 plunge: 2 azimuth: 129

5. Event name: 041395D

Region name: SOUTH OF PANAMA

Date (y/m/d): **1995/4/13**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	15	0	28.40	5.45	-79.88	10.0	5.1	0.0
CMT	15	0	33.20	5.29	-79.80	15.0		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 24 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-0.153	-0.385	0.537	0.340	0.697	1.141

Mw = **5.4** Scalar Moment = 1.4e+24

Fault plane 1: strike=82 dip=68 slip=11

Fault plane 2: strike=348 dip=80 slip=158

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 1.64 plunge: 23 azimuth: 303

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.47 plunge: 65 azimuth: 144

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -1.17 plunge: 8 azimuth: 36

6. Event name: 101095C

Region name: NEAR COAST OF ECUADOR

Date (y/m/d): **1995/10/10**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	17	29	23.30	1.06	-79.30	56.0	5.1	0.0
CMT	17	29	29.30	1.64	-78.97	55.1		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	5.349	-4.513	-0.835	-0.499	0.767	-2.579

Mw = **5.1** Scalar Moment = 5.68e+23

Fault plane 1: strike=253 dip=46 slip=104

Fault plane 2: strike=53 dip=46 slip=76

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 5.51 plunge: 80 azimuth: 243

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.33 plunge: 10 azimuth: 63

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -5.84 plunge: 0 azimuth: 153

7. Event name: 111395I

Region name: SOUTH OF PANAMA

Date (y/m/d): **1995/11/13**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	12	36	53.40	2.92	-79.41	10.0	5.3	4.5
CMT	12	36	56.40	2.83	-79.44	15.0		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 24 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-1.100	0.048	1.051	0.000	0.000	0.769

Mw = **5.3** Scalar Moment = 1.28e+24

Fault plane 1: strike=208 dip=45 slip=-90

Fault plane 2: strike=28 dip=45 slip=-90

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 1.47 plunge: 0 azimuth: 118

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.37 plunge: 0 azimuth: 28

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -1.10 plunge: 90 azimuth: 180

8. Event name: 042796B
Region name: SOUTH OF PANAMA
Date (y/m/d): **1996/4/27**
Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	8	40	41.80	2.37	-79.34	10.0	4.8	5.9
CMT	8	40	49.20	2.47	-79.42	15.0		

Mechanism information
Exponent for moment tensor: 25 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	0.701	-0.159	-0.542	-0.513	-1.266	-0.408

Mw = **6.1** Scalar Moment = 1.56e+25
Fault plane 1: strike=44 dip=15 slip=110
Fault plane 2: strike=203 dip=76 slip=85
Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 1.52 plunge: 59 azimuth: 106
Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.08 plunge: 5 azimuth: 204
Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -1.60 plunge: 31 azimuth: 298

9. Event name: 052396A
Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM
Date (y/m/d): **1996/5/23**
Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	1	57	22.90	5.90	-77.58	33.0	5.5	4.9
CMT	1	57	26.90	6.06	-77.56	15.9		

Mechanism information
Exponent for moment tensor: 24 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	1.061	-0.086	-0.975	0.226	-3.677	0.128

Mw = **5.7** Scalar Moment = 3.82e+24
Fault plane 1: strike=349 dip=8 slip=82
Fault plane 2: strike=176 dip=82 slip=91
Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 3.86 plunge: 53 azimuth: 88
Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.07 plunge: 1 azimuth: 356
Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -3.79 plunge: 37 azimuth: 265

10. Event name: 090997A
Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM
Date (y/m/d): **1997/9/9**
Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	5	45	47.40	5.79	-77.52	21.4	5.1	0.0
CMT	5	45	50.10	5.47	-77.82	24.1		

Mechanism information
Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	2.801	0.962	-3.763	-2.587	-3.194	-0.378

Mw = **5.1** Scalar Moment = 5.34e+23
Fault plane 1: strike=338 dip=28 slip=40
Fault plane 2: strike=211 dip=73 slip=112
Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 5.31 plunge: 57 azimuth: 150
Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.05 plunge: 21 azimuth: 24
Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -5.36 plunge: 25 azimuth: 284

11. Event name: 100597A
Region name: SOUTH OF PANAMA
Date (y/m/d): **1997/10/5**
Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	0	54	57.90	2.62	-79.79	10.0	5.1	4.3
CMT	0	55	4.80	2.15	-79.56	15.0		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-5.467	-0.936	6.404	6.214	5.948	1.192

Mw = **5.3** Scalar Moment = 1.05e+24

Fault plane 1: strike=345 dip=25 slip=-140

Fault plane 2: strike=218 dip=74 slip=-71

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 10.14 plunge: 27 azimuth: 292

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.77 plunge: 19 azimuth: 32

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -10.91 plunge: 56 azimuth: 152

12. Event name: 031199D

Region name: SOUTH OF PANAMA

Date (y/m/d): **1999/3/11**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	16	56	34.70	2.65	-79.82	33.0	4.9	0.0
CMT	16	56	40.50	2.97	-79.86	33.0		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-2.418	-0.246	2.664	-0.847	0.582	0.441

Mw = **4.9** Scalar Moment = 2.78e+23

Fault plane 1: strike=27 dip=43 slip=-61

Fault plane 2: strike=170 dip=53 slip=-115

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 2.77 plunge: 5 azimuth: 277

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.03 plunge: 20 azimuth: 185

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -2.80 plunge: 70 azimuth: 21

13. Event name: 031900A

Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM

Date (y/m/d): **2000/3/19**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	12	23	40.90	5.65	-77.63	37.2	5.0	4.6
CMT	12	23	43.30	5.69	-77.61	15.0		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-4.988	1.505	3.483	-3.174	6.946	-1.072

Mw = **5.2** Scalar Moment = 8.85e+23

Fault plane 1: strike=337 dip=15 slip=-89

Fault plane 2: strike=156 dip=75 slip=-90

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 8.33 plunge: 30 azimuth: 246

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 1.04 plunge: 0 azimuth: 156

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -9.37 plunge: 60 azimuth: 65

14. Event name: 052300F

Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM

Date (y/m/d): **2000/5/23**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	16	36	46.10	2.12	-78.39	33.0	5.0	4.5
CMT	16	36	50.00	1.65	-78.68	33.6		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	2.931	1.837	-4.768	-4.077	-4.851	0.158

Mw = **5.2** Scalar Moment = 7.58e+23
 Fault plane 1: strike=327 dip=27 slip=27
 Fault plane 2: strike=213 dip=78 slip=115
 Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 7.73 plunge: 51 azimuth: 151
 Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.29 plunge: 24 azimuth: 27
 Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -7.44 plunge: 29 azimuth: 283

15. Event name: 071200K
 Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM
 Date (y/m/d): **2000/7/12**
 Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	22	12	19.80	6.17	-77.79	33.0	5.2	4.5
CMT	22	12	24.40	6.54	-77.80	15.0		

Mechanism information
 Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-7.636	1.774	5.862	0.477	4.118	-3.079

Mw = **5.2** Scalar Moment = 8.62e+23
 Fault plane 1: strike=319 dip=34 slip=-114
 Fault plane 2: strike=167 dip=59 slip=-75
 Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 8.27 plunge: 13 azimuth: 246
 Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.68 plunge: 13 azimuth: 339
 Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -8.96 plunge: 72 azimuth: 113

16. Event name: 080802D
 Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM
 Date (y/m/d): **2002/8/8**
 Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	13	39	58.30	4.98	-77.82	43.3	5.4	5.0
CMT	13	39	58.90	5.17	-77.62	22.3		

Mechanism information
 Exponent for moment tensor: 24 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-2.908	1.181	1.726	2.221	-0.261	3.123

Mw = **5.7** Scalar Moment = 4.58e+24
 Fault plane 1: strike=12 dip=45 slip=-140
 Fault plane 2: strike=251 dip=63 slip=-52
 Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 4.83 plunge: 10 azimuth: 315
 Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.49 plunge: 33 azimuth: 52
 Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -4.34 plunge: 55 azimuth: 210

17. Event name: 122102A
 Region name: SOUTH OF PANAMA
 Date (y/m/d): **2002/12/21**
 Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	0	46	7.60	3.71	-79.00	10.0	5.4	0.0
CMT	0	46	11.70	3.76	-78.90	15.0		

Mechanism information
 Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-8.132	0.285	7.847	-0.739	2.593	3.839

Mw = **5.2** Scalar Moment = 9.23e+23
 Fault plane 1: strike=36 dip=40 slip=-70
 Fault plane 2: strike=191 dip=53 slip=-106

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 9.71 plunge: 7 azimuth: 292
Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.95 plunge: 12 azimuth: 200
Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -8.76 plunge: 76 azimuth: 50

18. Event name: 082203C
Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM
Date (y/m/d): **2003/8/22**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	5	29	13.10	3.13	-77.87	24.1	5.0	0.0
CMT	5	29	16.71	3.07	-77.73	31.4		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-3.310	2.770	0.536	0.215	-0.614	1.680

Mw = **5.0** Scalar Moment = 3.56e+23

Fault plane 1: strike=253 dip=45 slip=-73

Fault plane 2: strike=50 dip=47 slip=-106

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 3.67 plunge: 1 azimuth: 152

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.23 plunge: 12 azimuth: 62

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -3.45 plunge: 78 azimuth: 246

19. Event name: 110503B
Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM
Date (y/m/d): **2003/11/5**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	0	58	51.10	4.97	-77.77	33.0	5.7	5.4
CMT	0	58	55.17	5.14	-77.81	27.6		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 25 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-0.642	0.240	0.402	0.589	-0.038	0.462

Mw = **5.9** Scalar Moment = 9.33e+24

Fault plane 1: strike=15 dip=38 slip=-137

Fault plane 2: strike=248 dip=65 slip=-60

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 0.88 plunge: 15 azimuth: 317

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.10 plunge: 27 azimuth: 55

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -0.98 plunge: 59 azimuth: 201

20. Event name: 011204B
Region name: SOUTH OF PANAMA
Date (y/m/d): **2004/1/12**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	14	14	30.10	5.61	-79.09	21.9	5.2	0.0
CMT	14	14	31.87	5.76	-79.08	18.1		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 24 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-0.223	0.368	-0.145	0.099	0.114	0.964

Mw = **5.3** Scalar Moment = 1.01e+24

Fault plane 1: strike=98 dip=84 slip=3

Fault plane 2: strike=7 dip=87 slip=174

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 1.13 plunge: 6 azimuth: 322

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.24 plunge: 83 azimuth: 166

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -0.89 plunge: 3 azimuth: 53

21. Event name: 111504C

Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM

Date (y/m/d): **2004/11/15**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	9	6	56.60	4.70	-77.51	15.0	6.6	7.1
CMT	9	7	1.54	4.72	-77.57	16.0		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 26 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	2.800	-0.126	-2.670	0.531	-7.030	-0.457

Mw = **7.2** Scalar Moment = 7.57e+26

Fault plane 1: strike=21 dip=11 slip=114

Fault plane 2: strike=177 dip=79 slip=85

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 7.67 plunge: 55 azimuth: 81

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.19 plunge: 5 azimuth: 178

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -7.48 plunge: 34 azimuth: 271

22. Event name: 200508032120A

Region name: SOUTH OF PANAMA

Date (y/m/d): **2005/8/3**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	21	20	50.50	2.62	-79.40	28.6	4.9	4.8
CMT	21	20	53.13	2.64	-79.46	13.2		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-2.170	0.061	2.110	-0.336	1.200	0.747

Mw = **4.9** Scalar Moment = 2.59e+23

Fault plane 1: strike=34 dip=35 slip=-64

Fault plane 2: strike=183 dip=59 slip=-107

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 2.59 plunge: 13 azimuth: 285

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.00 plunge: 15 azimuth: 191

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -2.59 plunge: 70 azimuth: 54

23. Event name: 200601232050A

Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM

Date (y/m/d): **2006/1/23**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	20	50	45.00	6.86	-77.79	14.0	6.1	5.9
CMT	20	50	49.99	6.97	-77.77	15.0		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 25 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	0.975	-0.044	-0.931	0.196	-2.500	0.496

Mw = **6.2** Scalar Moment = 2.73e+25

Fault plane 1: strike=316 dip=14 slip=53

Fault plane 2: strike=174 dip=79 slip=98

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 2.70 plunge: 55 azimuth: 94

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.05 plunge: 8 azimuth: 352

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -2.75 plunge: 34 azimuth: 257

24. Event name: 200601240215A

Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM

Date (y/m/d): **2006/1/24**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDE	2	15	44.80	6.91	-77.65	24.2	5.3	4.7

CMT 2 15 48.06 6.96 -77.73 23.7
Mechanism information
Exponent for moment tensor: 24 units: dyne-cm
Mrr Mtt Mpp Mrt Mrp Mtp
CMT 0.831 -0.067 -0.764 0.042 -0.903 0.592
Mw = **5.4** Scalar Moment = 1.34e+24
Fault plane 1: strike=307 dip=29 slip=50
Fault plane 2: strike=170 dip=68 slip=110
Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 1.27 plunge: 62 azimuth: 111
Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.13 plunge: 18 azimuth: 343
Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -1.41 plunge: 21 azimuth: 246

25. Event name: 200601291749A
Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM
Date (y/m/d): **2006/1/29**
Timing and location information
hr min sec lat lon depth mb Ms
PDE 17 49 14.20 6.75 -77.70 7.6 5.3 4.4
CMT 17 49 20.42 6.88 -77.82 27.0
Mechanism information
Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm
Mrr Mtt Mpp Mrt Mrp Mtp
CMT 4.750 -0.649 -4.100 0.945 -6.170 2.760
Mw = **5.2** Scalar Moment = 8.15e+23
Fault plane 1: strike=313 dip=23 slip=58
Fault plane 2: strike=167 dip=71 slip=103
Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 7.94 plunge: 62 azimuth: 96
Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.41 plunge: 12 azimuth: 343
Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -8.35 plunge: 25 azimuth: 247

26. Event name: 200703172243A
Region name: SOUTH OF PANAMA
Date (y/m/d): **2007/3/17**
Timing and location information
hr min sec lat lon depth mb Ms
PDEW 22 43 9.60 4.55 -78.54 10.0 6.0 6.0
CMT 22 43 15.68 4.61 -78.53 13.1
Mechanism information
Exponent for moment tensor: 25 units: dyne-cm
Mrr Mtt Mpp Mrt Mrp Mtp
CMT -1.120 0.448 0.670 0.029 0.506 0.651
Mw = **6.0** Scalar Moment = 1.28e+25
Fault plane 1: strike=55 dip=37 slip=-67
Fault plane 2: strike=206 dip=56 slip=-107
Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 1.29 plunge: 10 azimuth: 308
Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.03 plunge: 14 azimuth: 216
Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -1.27 plunge: 73 azimuth: 72

27. Event name: 200703180211A
Region name: SOUTH OF PANAMA
Date (y/m/d): **2007/3/18**
Timing and location information
hr min sec lat lon depth mb Ms
PDEW 2 11 5.50 4.59 -78.50 8.0 6.4 6.2
CMT 2 11 11.47 4.69 -78.53 12.0
Mechanism information
Exponent for moment tensor: 25 units: dyne-cm
Mrr Mtt Mpp Mrt Mrp Mtp
CMT -2.460 0.446 2.020 -0.147 1.100 1.010

Mw = **6.2** Scalar Moment = 2.72e+25
 Fault plane 1: strike=38 dip=36 slip=-69
 Fault plane 2: strike=193 dip=57 slip=-104
 Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 2.68 plunge: 10 azimuth: 294
 Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.08 plunge: 12 azimuth: 201
 Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -2.76 plunge: 74 azimuth: 64

28. Event name: 200709100149A
 Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM
 Date (y/m/d): **2007/9/10**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDEW	1	49	14.20	2.98	-77.97	31.0	6.1	6.8
CMT	1	49	21.10	3.08	-78.12	18.9		

Mechanism information
 Exponent for moment tensor: 26 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-1.130	0.839	0.294	1.010	0.580	0.618

Mw = **6.7** Scalar Moment = 1.66e+26
 Fault plane 1: strike=54 dip=23 slip=-95
 Fault plane 2: strike=239 dip=67 slip=-88
 Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 1.72 plunge: 22 azimuth: 328
 Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.11 plunge: 2 azimuth: 58
 Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -1.61 plunge: 68 azimuth: 153

29. Event name: 200709221144A
 Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM
 Date (y/m/d): **2007/9/22**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDEW	11	44	39.30	5.76	-77.44	24.3	5.0	4.3
CMT	11	44	43.16	6.06	-77.53	20.3		

Mechanism information
 Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	2.550	-0.006	-2.540	-0.439	-3.000	-0.363

Mw = **5.0** Scalar Moment = 3.97e+23
 Fault plane 1: strike=8 dip=20 slip=90
 Fault plane 2: strike=188 dip=70 slip=90
 Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 3.95 plunge: 65 azimuth: 99
 Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.05 plunge: 0 azimuth: 8
 Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -4.00 plunge: 25 azimuth: 278

30. Event name: 200801301244A
 Region name: SOUTH OF PANAMA
 Date (y/m/d): **2008/1/30**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDEW	12	44	54.60	6.17	-79.57	6.3	4.9	0.0
CMT	12	44	58.98	6.28	-79.53	13.4		

Mechanism information
 Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-2.850	2.210	0.641	1.550	-0.293	0.589

Mw = **4.9** Scalar Moment = 3.05e+23
 Fault plane 1: strike=63 dip=32 slip=-109
 Fault plane 2: strike=265 dip=60 slip=-79
 Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 2.76 plunge: 14 azimuth: 346
 Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.58 plunge: 10 azimuth: 79

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -3.34 plunge: 73 azimuth: 202

31. Event name: 200802100736A

Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM

Date (y/m/d): **2008/2/10**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDEW	7	36	5.80	5.58	-77.96	36.5	4.9	0.0
CMT	7	36	6.32	5.76	-77.95	23.7		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-1.540	2.320	-0.783	0.045	0.945	3.720

Mw = **5.0** Scalar Moment = 4.2e+23

Fault plane 1: strike=100 dip=72 slip=-12

Fault plane 2: strike=194 dip=79 slip=-161

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 4.85 plunge: 5 azimuth: 326

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -1.30 plunge: 68 azimuth: 223

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -3.56 plunge: 21 azimuth: 58

32. Event name: 200802230323A

Region name: SOUTH OF PANAMA

Date (y/m/d): **2008/2/23**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDEW	3	23	6.60	3.97	-78.75	10.0	4.9	0.0
CMT	3	23	11.94	4.06	-78.75	12.0		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-5.200	1.820	3.380	1.150	0.771	2.380

Mw = **5.1** Scalar Moment = 5.33e+23

Fault plane 1: strike=31 dip=38 slip=-98

Fault plane 2: strike=221 dip=52 slip=-84

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 5.27 plunge: 7 azimuth: 307

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.14 plunge: 5 azimuth: 37

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -5.40 plunge: 81 azimuth: 161

33. Event name: 201008212020A

Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM

Date (y/m/d): **2010/8/21**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDEW	20	20	15.00	6.03	-77.97	14.5	5.4	4.9
CMT	20	20	20.31	6.08	-78.04	19.0		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 24 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-0.759	1.530	-0.767	0.564	0.577	-0.982

Mw = **5.4** Scalar Moment = 1.83e+24

Fault plane 1: strike=149 dip=58 slip=-24

Fault plane 2: strike=252 dip=70 slip=-146

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 1.94 plunge: 7 azimuth: 18

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.22 plunge: 51 azimuth: 279

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -1.72 plunge: 38 azimuth: 114

34. Event name: 201108170802A

Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM

Date (y/m/d): **2011/8/17**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDEW	8	2	7.80	5.65	-77.53	50.9	4.8	0.0
CMT	8	2	7.14	5.66	-77.75	21.0		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	2.920	-0.560	-2.360	0.642	-2.210	0.581

Mw = **5.0** Scalar Moment = 3.57e+23

Fault plane 1: strike=343 dip=25 slip=90

Fault plane 2: strike=164 dip=65 slip=90

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 3.76 plunge: 70 azimuth: 74

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.39 plunge: 0 azimuth: 344

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -3.37 plunge: 20 azimuth: 254

35. Event name: 201109130438A

Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM

Date (y/m/d): **2011/9/13**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDEW	4	38	48.70	5.60	-77.53	18.0	5.1	0.0
CMT	4	38	52.41	5.77	-77.75	12.0		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	4.090	-0.344	-3.750	-0.205	-7.370	-0.495

Mw = **5.2** Scalar Moment = 8.37e+23

Fault plane 1: strike=13 dip=14 slip=100

Fault plane 2: strike=182 dip=76 slip=88

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 8.52 plunge: 59 azimuth: 89

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.31 plunge: 2 azimuth: 183

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -8.21 plunge: 31 azimuth: 274

36. Event name: 201109130449A

Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM

Date (y/m/d): **2011/9/13**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDEW	4	49	35.00	5.62	-77.47	10.0	5.2	5.7
CMT	4	49	39.99	5.73	-77.66	12.8		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 24 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	1.500	-0.079	-1.430	-0.034	-2.000	-0.008

Mw = **5.5** Scalar Moment = 2.48e+24

Fault plane 1: strike=360 dip=18 slip=89

Fault plane 2: strike=181 dip=72 slip=90

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 2.51 plunge: 63 azimuth: 91

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.08 plunge: 0 azimuth: 1

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -2.44 plunge: 27 azimuth: 271

37. Event name: 201308131543A

Region name: SOUTH OF PANAMA

Date (y/m/d): **2013/8/13**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDEW	15	43	15.20	5.77	-78.20	12.0	0.0	6.7
CMT	15	43	21.11	5.77	-78.19	20.9		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 26 units: dyne-cm
Mrr Mtt Mpp Mrt Mrp Mtp
CMT -0.542 1.190 -0.647 0.086 0.313 0.331
Mw = **6.6** Scalar Moment = 1.1e+26
Fault plane 1: strike=119 dip=61 slip=-25
Fault plane 2: strike=222 dip=68 slip=-148
Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 1.26 plunge: 5 azimuth: 349
Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.33 plunge: 52 azimuth: 254
Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -0.93 plunge: 38 azimuth: 83

38. Event name: 201310241444A
Region name: SOUTH OF PANAMA
Date (y/m/d): **2013/10/24**
Timing and location information
hr min sec lat lon depth mb Ms
PDEW 14 44 33.60 5.05 -78.00 29.0 0.0 5.0
CMT 14 44 34.66 5.21 -78.05 22.5
Mechanism information
Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm
Mrr Mtt Mpp Mrt Mrp Mtp
CMT -1.010 -0.425 1.440 -0.299 1.210 3.900
Mw = **5.0** Scalar Moment = 4.24e+23
Fault plane 1: strike=82 dip=71 slip=-9
Fault plane 2: strike=175 dip=82 slip=-160
Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 4.62 plunge: 8 azimuth: 307
Eigenvector para el eje N: eigenvalue: -0.77 plunge: 69 azimuth: 196
Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -3.85 plunge: 20 azimuth: 40

39. Event name: 201403092029A
Region name: NEAR COAST OF ECUADOR
Date (y/m/d): **2014/3/9**
Timing and location information
hr min sec lat lon depth mb Ms
PDEW 20 29 52.60 1.66 -79.35 6.0 0.0 5.6
CMT 20 29 59.09 1.67 -79.49 15.0
Mechanism information
Exponent for moment tensor: 24 units: dyne-cm
Mrr Mtt Mpp Mrt Mrp Mtp
CMT 1.070 0.031 -1.100 -0.051 -3.180 -0.441
Mw = **5.6** Scalar Moment = 3.39e+24
Fault plane 1: strike=38 dip=12 slip=126
Fault plane 2: strike=182 dip=80 slip=83
Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 3.36 plunge: 54 azimuth: 84
Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.06 plunge: 7 azimuth: 183
Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -3.42 plunge: 35 azimuth: 278

40. Event name: 201406160639A
Region name: NEAR COAST OF ECUADOR
Date (y/m/d): **2014/6/16**
Timing and location information
hr min sec lat lon depth mb Ms
PDEW 6 39 32.30 1.64 -79.26 15.0 0.0 5.7
CMT 6 39 38.94 1.73 -79.52 16.0
Mechanism information
Exponent for moment tensor: 24 units: dyne-cm
Mrr Mtt Mpp Mrt Mrp Mtp
CMT 1.680 -0.004 -1.680 -0.142 -4.540 -0.500
Mw = **5.7** Scalar Moment = 4.87e+24
Fault plane 1: strike=29 dip=11 slip=116

Fault plane 2: strike=183 dip=80 slip=85
 Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 4.85 plunge: 55 azimuth: 86
 Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.04 plunge: 5 azimuth: 184
 Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -4.89 plunge: 35 azimuth: 277

41. Event name: 201507191116A
 Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM
 Date (y/m/d): **2015/7/19**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDEW	11	16	21.50	2.76	-78.90	10.0	0.0	4.9
CMT	11	16	26.62	2.96	-79.26	12.0		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	1.400	0.045	-1.440	-0.424	-4.190	-0.307

Mw = **5.0** Scalar Moment = 4.45e+23

Fault plane 1: strike=17 dip=10 slip=101

Fault plane 2: strike=186 dip=81 slip=88

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 4.41 plunge: 54 azimuth: 94

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.09 plunge: 2 azimuth: 186

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -4.50 plunge: 36 azimuth: 278

42. Event name: 201601220241A
 Region name: SOUTH OF PANAMA
 Date (y/m/d): **2016/1/22**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDEW	2	41	15.20	4.86	-78.22	37.3	0.0	4.9
CMT	2	41	15.96	5.14	-78.26	18.9		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-3.770	1.040	2.730	1.850	-0.076	2.030

Mw = **5.0** Scalar Moment = 4.34e+23

Fault plane 1: strike=15 dip=42 slip=-121

Fault plane 2: strike=234 dip=55 slip=-65

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 4.21 plunge: 7 azimuth: 306

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.27 plunge: 20 azimuth: 39

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -4.48 plunge: 68 azimuth: 197

43. Event name: 201701121606A
 Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM
 Date (y/m/d): **2017/1/12**

Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDEW	16	6	31.90	6.05	-77.93	4.5	0.0	5.2
CMT	16	6	37.14	6.08	-77.97	17.5		

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 24 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-0.719	0.669	0.050	-0.313	0.200	-0.157

Mw = **5.2** Scalar Moment = 8.03e+23

Fault plane 1: strike=275 dip=32 slip=-104

Fault plane 2: strike=112 dip=59 slip=-81

Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 0.79 plunge: 13 azimuth: 196

Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.03 plunge: 7 azimuth: 287

Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -0.82 plunge: 75 azimuth: 46

44. Event name: 201703210831A
 Region name: NEAR WEST COAST OF COLOM
 Date (y/m/d): **2017/3/21**
 Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDEW	8	31	21.00	6.29	-77.52	7.1	0.0	5.0
CMT	8	31	25.46	6.22	-77.61	15.0		

Mechanism information
 Exponent for moment tensor: 23 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	1.780	-0.204	-1.580	0.803	-4.030	0.758

Mw = **5.0** Scalar Moment = 4.51e+23
 Fault plane 1: strike=324 dip=13 slip=67
 Fault plane 2: strike=168 dip=78 slip=95
 Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 4.48 plunge: 57 azimuth: 84
 Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.05 plunge: 5 azimuth: 347
 Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -4.53 plunge: 33 azimuth: 253

45. Event name: 201703240900A
 Region name: SOUTH OF PANAMA
 Date (y/m/d): **2017/3/24**
 Timing and location information

	hr	min	sec	lat	lon	depth	mb	Ms
PDEW	9	0	56.00	3.31	-79.41	9.5	0.0	5.2
CMT	9	0	59.53	3.31	-79.59	12.0		

Mechanism information
 Exponent for moment tensor: 24 units: dyne-cm

	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
CMT	-0.651	0.602	0.049	0.458	0.233	-0.010

Mw = **5.2** Scalar Moment = 8.07e+23
 Fault plane 1: strike=103 dip=28 slip=-65
 Fault plane 2: strike=255 dip=65 slip=-103
 Eigenvector para el eje T: eigenvalue: 0.76 plunge: 19 azimuth: 354
 Eigenvector para el eje N: eigenvalue: 0.10 plunge: 12 azimuth: 260
 Eigenvector para el eje P: eigenvalue: -0.86 plunge: 68 azimuth: 140

ANEXO B.

En la **Tabla 10** se destacan para cada evento las variables fecha, magnitud M_w , momento escalar M_0 , los parámetros del plano de falla 1 (azimuth 1, buzamiento 1, deslizamiento 1), del plano de falla 2 (azimuth 2, buzamiento 2, deslizamiento 2) y las soluciones gráficas de los mecanismos focales BB1 y BB2. La beach ball se obtiene del sitio web de George Helffrich:

<http://www1.gly.bris.ac.uk/~george/focmec.html>

	Fecha	M_w	Momento Escalar M_0	ϕ_1	δ_1	λ_1	BB1	ϕ_2	δ_2	λ_2	BB2
1	1994-06-03	5.8	5.67e+24	10	42	-123	Strike 10 Dip 42 Slip -123	231	56	-63	Strike 231 Dip 56 Slip -63
2	1994-09-27	6.1	2.07e+25	7	69	-167	Strike 7 Dip 69 Slip -167	273	78	-21	Strike 273 Dip 78 Slip -21
3	1994-11-26	5.2	9.43e+23	357	37	-114	Strike 357 Dip 37 Slip -114	206	57	-73	Strike 206 Dip 57 Slip -73
4	1995-04-12	5.0	4.36e+23	193	50	51	Strike 193 Dip 50 Slip 51	65	53	127	Strike 65 Dip 53 Slip 127
5	1995-04-13	5.4	1.4e+24	82	68	11	Strike 82 Dip 68 Slip 11	348	80	158	Strike 348 Dip 80 Slip 158
6	1995-10-10	5.1	5.68e+23	253	46	104	Strike 253 Dip 46 Slip 104	53	46	76	Strike 53 Dip 46 Slip 76
7	1995-11-13	5.3	1.28e+24	208	45	-90	Strike 208 Dip 45 Slip -90	28	45	-90	Strike 28 Dip 45 Slip -90
8	1996-04-27	6.1	1.56e+25	44	15	110	Strike 44 Dip 15 Slip 110	203	76	85	Strike 203 Dip 76 Slip 85
9	1996-05-23	5.7	3.82e+24	349	8	82	Strike 349 Dip 8 Slip 82	176	82	91	Strike 176 Dip 82 Slip 91
10	1997-09-09	5.1	5.34e+23	338	28	40	Strike 338 Dip 28 Slip 40	211	73	112	Strike 211 Dip 73 Slip 112
11	1997-10-05	5.3	1.05e+24	345	25	-140	Strike 345 Dip 25 Slip -140	218	74	-71	Strike 218 Dip 74 Slip -71
12	1999-03-11	4.9	2.78e+23	27	43	-61	Strike 27 Dip 43 Slip -61	170	53	-115	Strike 170 Dip 53 Slip -115
13	2000-03-19	5.2	8.85e+23	337	15	-89	Strike 337 Dip 15 Slip -89	156	75	-90	Strike 156 Dip 75 Slip -90
14	2000-05-23	5.2	7.58e+23	327	27	27	Strike 327 Dip 27 Slip 27	213	78	115	Strike 213 Dip 78 Slip 115
15	2000-07-12	5.2	8.62e+23	319	34	-114	Strike 319 Dip 34 Slip -114	167	59	-75	Strike 167 Dip 59 Slip -75
16	2002-08-08	5.7	4.58e+24	12	45	-140	Strike 12 Dip 45 Slip -140	251	63	-52	Strike 251 Dip 63 Slip -52
17	2002-12-21	5.2	9.23e+23	36	40	-70	Strike 36 Dip 40 Slip -70	191	53	-106	Strike 191 Dip 53 Slip -106

18	2003-08-22	5.0	3.56e+23	253	45	-73		50	47	-106	
19	2003-11-05	5.9	9.33e+24	15	38	-137		248	65	-60	
20	2004-01-12	5.3	1.01e+24	98	84	3		7	87	174	
21	2004-11-15	7.2	7.57e+26	21	11	114		177	79	85	
22	2005-08-03	4.9	2.59e+23	34	35	-64		183	59	-107	
23	2006-01-23	6.2	2.73e+25	316	14	53		174	79	98	
24	2006-01-24	5.4	1.34e+24	307	29	50		170	68	110	
25	2006-01-29	5.2	8.15e+23	313	23	58		167	71	103	
26	2007-03-17	6.0	1.28e+25	55	37	-67		206	56	-107	
27	2007-03-18	6.2	2.72e+25	38	36	-69		193	57	-104	
28	2007-09-10	6.7	1.66e+26	54	23	-95		239	67	-88	
29	2007-09-22	5.0	3.97e+23	8	20	90		188	70	90	
30	2008-01-30	4.9	3.05e+23	63	32	-109		265	60	-79	
31	2008-02-10	5.0	4.2e+23	100	72	-12		194	79	-161	
32	2008-02-23	5.1	5.33e+23	31	38	-98		221	52	-84	
33	2010-08-21	5.4	1.83e+24	149	58	-24		252	70	-146	
34	2011-08-17	5.0	3.57e+23	343	25	90		164	65	90	
35	2011-09-13	5.2	8.37e+23	13	14	100		182	76	88	
36	2011-09-13	5.5	2.48e+24	360	18	89		181	72	90	
37	2013-08-13	6.6	1.1e+26	119	61	-25		222	68	-148	
38	2013-10-24	5.0	4.24e+23	82	71	-9		175	82	-160	
39	2014-03-09	5.6	3.39e+24	38	12	126		182	80	83	

40	2014-06-16	5.7	4.87e+24	29	11	116	Strike 29 Dip 1 Slip 16	183	80	85	Strike 183 Dip 80 Slip 85
41	2015-07-19	5.0	4.45e+23	17	10	101	Strike 17 Dip 10 Slip 101	186	81	88	Strike 186 Dip 81 Slip 88
42	2016-01-22	5.0	4.34e+23	15	42	-121	Strike 15 Dip 42 Slip -121	234	55	-65	Strike 234 Dip 55 Slip -65
43	2017-01-12	5.2	8.03e+23	275	32	-104	Strike 275 Dip 32 Slip -104	112	59	-81	Strike 112 Dip 59 Slip -81
44	2017-03-21	5.0	4.51e+23	324	13	67	Strike 324 Dip 13 Slip 67	168	78	95	Strike 168 Dip 78 Slip 95
45	2017-03-24	5.2	8.07e+23	103	28	-65	Strike 103 Dip 28 Slip -65	255	65	-103	Strike 255 Dip 65 Slip -103

Tabla 10. Base de datos de 45 eventos registrados entre el 1 de junio de 1993 y el 28 de febrero de 2018.

En el polígono definido por 1.50° a 7.00° de latitud y -80.00° a -77.50° de longitud, profundidad $h < 100$ km. y magnitudes $M_w \geq 4.8$ descargados del sitio web del **Global Centroid Moment Tensor Catalog**, <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>. Se presentan los ángulos de azimuth, buzamiento y deslizamiento para cada plano de falla y la correspondiente solución gráfica del mecanismo focal (BB) del sitio de George Helffrich: <http://www1.gly.bris.ac.uk/~george/focmec.html>.

ANEXO C.

En la **Tabla 11** se calculan, para cada ambiente sismotectónico, los valores de M_{xx} , M_{yy} , M_{zz} , M_{xy} , M_{xz} y M_{yz} que contribuyen al tensor Momento Sísmico **M** con las seis componentes M_{rr} , M_{tt} , M_{pp} , M_{rt} , M_{rp} y M_{tp} de cada evento. Estos valores son descargados de <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.

Ambiente Sismotectónico – I – Norte.						
#	M _{rr}	M _{tt}	M _{pp}	M _{rt}	M _{rp}	M _{tp}
2	-3.50 E+24	5.00 E+24	-1.50 E+24	6.50 E+24	-4.00 E+24	1.88 E+25
5	-1.50 E+23	-3.80 E+23	5.40 E+23	3.40 E+23	7.00 E+23	1.14 E+24
20	-2.20 E+23	3.70 E+23	-1.50 E+23	1.00 E+23	1.10 E+23	9.60 E+23
30	-2.85 E+23	2.21 E+23	6.40 E+22	1.55 E+23	-2.90 E+22	5.90 E+22
37	-5.40 E+25	1.19 E+26	-6.50 E+25	9.00 E+24	3.10 E+25	3.30 E+25
38	-1.01 E+23	-4.30 E+22	1.44 E+23	-3.00 E+22	1.21 E+23	3.90 E+23
42	-3.77 E+23	1.04 E+23	2.73 E+23	1.85 E+23	-8.00 E+21	2.03 E+23
	-5.86 E+25	1.24 E+26	-6.56 E+25	1.63 E+25	2.79 E+25	5.46 E+25
	M_{xx}	M_{yy}	M_{zz}	M_{xy}	M_{xz}	M_{yz}
Ambiente Sismotectónico – I – Sur.						
#	M _{rr}	M _{tt}	M _{pp}	M _{rt}	M _{rp}	M _{tp}
3	-8.26 E+23	-3.00 E+22	8.56 E+23	2.89 E+23	2.57 E+23	1.80 E+23
7	-1.10 E+24	5.00 E+22	1.05 E+24	0.00 E+00	0.00 E+00	7.70 E+23
12	-2.42 E+23	-2.50 E+22	2.66 E+23	-8.50 E+22	5.80 E+22	4.40 E+22
17	-8.13 E+23	2.80 E+22	7.85 E+23	-7.40 E+22	2.59 E+23	3.84 E+23
22	-2.17 E+23	6.00 E+21	2.11 E+23	-3.40 E+22	1.20 E+23	7.50 E+22
26	-1.12 E+25	4.50 E+24	6.70 E+24	3.00 E+23	5.10 E+24	6.50 E+24
27	-2.46 E+25	4.50 E+24	2.02 E+25	-1.50 E+24	1.10 E+25	1.01 E+25
32	-5.20 E+23	1.82 E+23	3.38 E+23	1.15 E+23	7.70 E+22	2.38 E+23
41	1.40 E+23	4.00 E+21	-1.44 E+23	-4.20 E+22	-4.19 E+23	-3.10 E+22
45	-6.50 E+23	6.00 E+23	5.00 E+22	4.60 E+23	2.30 E+23	-1.00 E+22
	-4.00 E+25	9.82 E+24	3.03 E+25	-5.71 E+23	1.67 E+25	1.83 E+25
	M_{xx}	M_{yy}	M_{zz}	M_{xy}	M_{xz}	M_{yz}
Ambiente Sismotectónico – II – Norte.						
#	M _{rr}	M _{tt}	M _{pp}	M _{rt}	M _{rp}	M _{tp}
9	1.06 E+24	-9.00 E+22	-9.80 E+23	2.30 E+23	-3.68 E+24	1.30 E+23
10	2.80 E+23	9.60 E+22	-3.76 E+23	-2.59 E+23	-3.19 E+23	-3.80 E+22
13	-4.99 E+23	1.50 E+23	3.48 E+23	-3.17 E+23	6.95 E+23	-1.07 E+23
15	-7.64 E+23	1.77 E+23	5.86 E+23	4.80 E+22	4.12 E+23	-3.08 E+23
16	-2.91 E+24	1.18 E+24	1.73 E+24	2.22 E+24	-2.60 E+23	3.12 E+24
19	-6.40 E+24	2.40 E+24	4.00 E+24	5.90 E+24	-4.00 E+23	4.60 E+24
23	9.80 E+24	-4.00 E+23	-9.30 E+24	2.00 E+24	-2.50 E+25	5.00 E+24
24	8.30 E+23	-7.00 E+22	-7.60 E+23	4.00 E+22	-9.00 E+23	5.90 E+23
25	4.75 E+23	-6.50 E+22	-4.10 E+23	9.50 E+22	-6.17 E+23	2.76 E+23

29	2.55 E+23	-1.00 E+21	-2.54 E+23	-4.40 E+22	-3.00 E+23	-3.60 E+22
31	-1.54 E+23	2.32 E+23	-7.80 E+22	4.00 E+21	9.50 E+22	3.72 E+23
33	-7.60 E+23	1.53 E+24	-7.70 E+23	5.60 E+23	5.80 E+23	-9.80 E+23
34	2.92 E+23	-5.60 E+22	-2.36 E+23	6.40 E+22	-2.21 E+23	5.80 E+22
35	4.09 E+23	-3.40 E+22	-3.75 E+23	-2.00 E+22	-7.37 E+23	-5.00 E+22
36	1.50 E+24	-8.00 E+22	-1.43 E+24	-3.00 E+22	-2.00 E+24	-1.00 E+22
43	-7.20 E+23	6.70 E+23	5.00 E+22	-3.10 E+23	2.00 E+23	-1.60 E+23
44	1.78 E+23	-2.00 E+22	-1.58 E+23	8.00 E+22	-4.03 E+23	7.60 E+22
	2.87 E+24	5.62 E+24	-8.41 E+24	1.03 E+25	-3.29 E+25	1.25 E+25
	Mxx	Myy	Mzz	Mxy	Mxz	Myz
Ambiente Sismotectónico – II – Sur.						
#	Mrr	Mtt	Mpp	Mrt	Mrp	Mtp
1	-4.72 E+24	8.20 E+23	3.90 E+24	2.35 E+24	3.00 E+22	2.75 E+24
4	3.53 E+23	-1.31 E+23	-2.22 E+23	2.15 E+23	-1.47 E+23	-1.95 E+23
6	5.35 E+23	-4.51 E+23	-8.30 E+22	-5.00 E+22	7.70 E+22	-2.58 E+23
8	7.00 E+24	-1.60 E+24	-5.40 E+24	-5.10 E+24	-1.27 E+25	-4.10 E+24
11	-5.47 E+23	-9.40 E+22	6.40 E+23	6.21 E+23	5.95 E+23	1.19 E+23
14	2.93 E+23	1.84 E+23	-4.77 E+23	-4.08 E+23	-4.85 E+23	1.60 E+22
18	-3.31 E+23	2.77 E+23	5.40 E+22	2.20 E+22	-6.10 E+22	1.68 E+23
21	2.80 E+26	-1.30 E+25	-2.67 E+26	5.30 E+25	-7.03 E+26	-4.60 E+25
28	-1.13 E+26	8.40 E+25	2.90 E+25	1.01 E+26	5.80 E+25	6.20 E+25
39	1.07 E+24	3.00 E+22	-1.10 E+24	-5.00 E+22	-3.18 E+24	-4.40 E+23
40	1.68 E+24	0.00 E+00	-1.68 E+24	-1.40 E+23	-4.54 E+24	-5.00 E+23
	1.72 E+26	7.00 E+25	-2.42 E+26	1.51 E+26	-6.65 E+26	1.36 E+25
	Mxx	Myy	Mzz	Mxy	Mxz	Myz

Tabla 11. Valores de Mrr, Mtt, Mpp, Mrt, Mrp y Mtp de cada sismo, en cada ambiente.

Para el cálculo de los elementos Mxx, Myy, Mzz, Mxy, Mxz y Myz que contribuyen al tensor Momento Sísmico **M**. Estos valores son descargados del sitio web del **Global Centroid Moment Tensor Catalog**, <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.