



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Contaduría,  
Administración e Informática

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS  
FACULTAD DE CONTADURÍA, ADMINISTRACIÓN E INFORMÁTICA  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

“APLICACIÓN DEL MODELO FRAGMENTO-ASPEREZA A FENÓMENOS SÍSMICOS EN  
MÉXICO ENFATIZANDO EN DOS REGIONES: LA ZONA DE SUBDUCCIÓN Y EL  
CINTURÓN VOLCÁNICO MEXICANO”

## **T E S I S**

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN:  
OPTIMIZACIÓN Y CÓMPUTO APLICADO

PRESENTA:

**ERIK DANIEL GARCÍA AQUINO**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. LUIS MANUEL GAGGERO SAGER**

COASESOR DE TESIS:

**DRA. LORENA DÍAZ GONZÁLEZ**

CUERNAVACA, MORELOS

JUNIO, 2021



## CARTA CERTIFICADA DE NO PLAGIO

### A QUIEN CORRESPONDA,

Siendo las 11:00 horas del día 25 de Enero de 2022 en las instalaciones de la Facultad de Contaduría, Administración e Informática de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, declaramos los abajo firmantes, que el trabajo de investigación “Aplicación del Modelo Fragmento-Aspereza a fenómenos sísmicos en México enfatizando en dos regiones: La zona de subducción y el Cinturón Volcánico Mexicano”, desarrollado por el estudiante Erik Daniel García Aquino, de la generación 2019-2021 de la Maestría en Administración de Organizaciones.

1. No tiene plagio.
2. Las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo, por lo que no se ha asumido como propias las ideas vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos como en Internet.
3. No ha sido presentado anteriormente para obtener algún grado académico o título.

Sabemos que este compromiso de autenticidad y no plagio puede tener connotaciones éticas y legales. Por ello, en caso de incumplimiento de esta declaración, el Director de Tesis, Co - director y el estudiante se someten a lo dispuesto en las normas académicas que dictamine el Comité de Ética de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Se firma la presente carta por:

\_\_\_\_\_  
Dr. Luis Manuel Gaggero Sager

Director de Tesis

\_\_\_\_\_  
Dra. Lorena Díaz González

Co- Director de Tesis

\_\_\_\_\_  
  
Erik Daniel García Aquino

Estudiante



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**LUIS MANUEL GAGGERO SAGER | Fecha:2022-01-25 16:04:54 | Firmante**

el5vNulj7ZBjx1td8+OA4qLtavneXeTqXH9rROJTUfo4h2tNCAC4npMdcgqzANPKJ0JAZXzPXajsSHaCcyZk+NBPVX7WeQUo1Y5229bpqyC94x+yAisefA/ohr3J888efkPM03mES3DQ5mKX2QsKGwGC1cjWOWkxpJCv7XeZTjkWWW9hnojLpL7wL8fzsz2Nryym5hs/UucF7nE/IVj8uytnSVa1i57ZngXykrhhNhPiPzqj/pxpABIZNkq/llocbc3xlux4tZKmA/s7I7qtKxxJyRdJBC4pghU7iVRJm3Yua7os3O5UJ571g2FtlqCjMBA8I3TqzJNwsFGpxMAFg==

**LORENA DIAZ GONZALEZ | Fecha:2022-01-25 18:11:09 | Firmante**

A8hP6lUyZXRkpU5jnvjeL2hNHIML8yrjYU/crwSII2xZHKsF0sRZSNcUZ XU+24HjQPIZb+IF5X1akOyKGGk1mxYuCWC4tmCe227tKZUovnxU/t8yr6H8XJjcMydiJe2OipXsxvROKu5bYpiPtWwrXTjrnXJvVpGyp3QtQNcnlnJ08FM8ouSOuPJ26P4RMpBS19iyxndenZAtLPCelIISE962kdy2GnnMWCNeNKVrnfS71O1jwBmDtzFNxZ5zAu7jMERczlToaScQWvZNsjtRbK5bw5eX0heKaNGUjGsGQ3B5eC+9TOTMdd9tpwC7jKE+nYSLKYsgrlaJfzS5PC2D8Q==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[AU4VdfL6a](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/5Y3fpdB5JPqLz9KN0Z9eSkuFYJazTX2A>



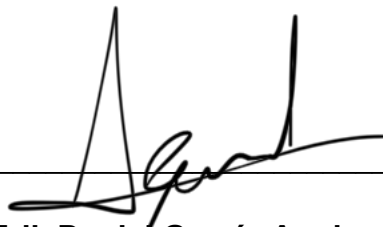
Cuernavaca, Morelos, a 25 de Enero de 2022

## **CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA**

Yo, Erik Daniel García Aquino, certifico que la Disertación titulada, “Aplicación del Modelo Fragmento-Aspereza a fenómenos sísmicos en México enfatizando en dos regiones: La zona de subducción y el Cinturón Volcánico Mexicano” , la cual presento como requisito para optar por el grado de Maestro en Optimización y Cómputo Aplicado en la Facultad de Contaduría, Administración e Informática de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos en el país México, es el producto de mi labor investigativa.

Asimismo, doy fe de que este trabajo ha observado las normas establecidas en el Reglamento de la Universidad y del posgrado de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos para su realización.

Con lo anterior, deslindo a la institución de toda acción que genere plagios y asumo toda responsabilidad.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Erik Daniel García Aquino', is written over a horizontal line.

**Erik Daniel García Aquino**

**10034120**

## ÍNDICE TEMÁTICO

1.1 Introducción .....	1
1.2 Justificación .....	2
1.3 Objetivos .....	2
1.3.1 Objetivo General .....	2
1.3.2 Hipótesis.....	3
1.3.3 Objetivos particulares.....	3

### Capítulo 2. Fundamentación teórica

2.1 Zonas sísmicas en el mundo .....	4
2.1.1 Tectónica de placas .....	4
2.1.2 Placas tectónicas en México .....	5
2.1.3 Cinturón de fuego del Pacífico .....	6
2.2 Regionalización sismotectónica en México .....	7
2.2.1 Zona de Subducción - SUB.....	8
2.2.2 Cinturón Volcánico Mexicano – MVB .....	14
2.3 Modelos para la dinámica de terremotos .....	19
2.3.1 Relación Gutenberg-Richter .....	20
2.3.2 Modelo Aspereza Auto afín .....	22
2.3.3 Modelo Fragmento-Aspereza.....	23

### Capítulo 3. Metodología

Metodología .....	30
-------------------	----

### Capítulo 4. Resultados

4.1 Resultados estadísticos.....	32
4.1.2 Estadísticas del territorio mexicano.....	33
4.1.2 Estadísticas del Cinturón Volcánico Mexicano y la Zona de Subducción.....	37
4.2 Resultados del ajuste utilizando el modelo Fragmento-Aspereza.....	46
4.2.1 Ajuste al territorio mexicano .....	48
4.2.2 Ajuste de las zonas de investigación: MVB vs SUB.....	51

4.2.3 Ajuste al Cinturón Volcánico Mexicano (MVB).....	54
4.2.4 Ajuste al MVB estratificado .....	57
4.2.5 Ajuste a la Zona de Subducción (SUB).....	64
4.2.6 Ajuste a la zona de Subducción estratificada.....	68

## Conclusiones y Recomendaciones

Conclusión.....	87
Bibliografía.....	91

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 2. Fundamentación teórica

Figura 1. Tipos de límites entre placas tectónicas.....	4
Figura 2. Placas tectónicas que interactúan en territorio mexicano .....	5
Figura 3. Cinturón de fuego del pacífico, también conocido como Cinturón Circumpacífico. .....	7
Figura 4. Regionalización sismotectónica de la República Mexicana .....	8
Figura 5. Zona de Subducción del pacífico mexicano. ....	9
Figura 6. Zona SUBR, localizada en la zona de Subducción del pacífico mexicano .....	9
Figura 7. Zona SUB1, localizada en la zona de Subducción del pacífico mexicano, en las zonas costeras de los estados de Jalisco y Colima.....	10
Figura 8. Zona SUB2, localizada en la zona de Subducción del pacífico mexicano, en las costas de los estados de Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca. ....	11
Figura 9. Zona SUB3 de la zona de Subducción, localizada en las zonas costeras de los estados de Jalisco y Oaxaca. ....	12
Figura 10. Zona SUB4 de la zona de Subducción, localizada en las zonas costeras de los estados de Oaxaca y Chiapas. ....	13
Figura 11. Delimitación de la zona del Cinturón Volcánico Mexicano por Verma (2015)..	14
Figura 12. Ubicación de la zona W-MVB, una de las tres divisiones de la Faja Volcánica Mexicana.....	15
Figura 14. Ubicación de la zona C-MVB, una de las tres divisiones de la Faja Volcánica Mexicana.....	17
Figura 15. Ubicación de la zona E-MVB, una de las tres divisiones de la Faja Volcánica Mexicana.....	18
Figura 16. Mapa de distribución espacial de los volcanes en la Cuenca Serdán-Oriental.	19
Figura 17. Ilustración del movimiento relativo de dos irregulares asperezas interactuando una con la otra .....	23
Figura 18. (a) Ejemplo de superficie irregular de los bloques. (b) Boceto de colisión de dos asperezas en una falla.....	23
Figura 19. Boceto de distribución de los fragmentos entre bloques a y b del modelo Fragmento-Aspereza .....	24

## Capítulo 4. Resultados

Figura 20. Mapa de la red de Banda Ancha del SSN (2021) distribuida por toda la República Mexicana.....	32
Figura 21. Mapa de concentración de eventos sísmicos ocurridos en el Cinturón Volcánico Mexicano durante el año 2020.....	40
Figura 22. Localización epicentral de los sismos en México desde el año 1986 a 2021 con magnitudes de 0.6 a 8.2 .....	47



## ÍNDICE DE GRÁFICAS

### Capítulo 2. Fundamentación teórica

Gráfica 1. Distribución de frecuencia acumulada-magnitud para sismos del catálogo de México de 1970 a 2007.....	21
Gráfica 2. Distribución de frecuencia acumulada-magnitud en escala logarítmica para los sismos contenidos en el catálogo de terremotos de OGS (Oklahoma Geological Survey) en el periodo de 2014 a 2015 .....	21
Gráfica 3. Distribución de frecuencia acumulada-magnitud en escala logarítmica para los sismos (con magnitudes menores a 3) contenidos en el catálogo de terremotos de OGS (Oklahoma Geological Survey) en el periodo de 2014 a 2015 .....	21
Gráfica 4. Representación en escala logarítmica de los catálogos de Panamá por Samudio et al. (2014).....	28

### Capítulo 4. Resultados

Gráfica 5. Relación de la excedencia y la magnitud de los eventos sísmicos en el territorio mexicano.....	33
Gráfica 6. Número acumulativo de eventos registrados por año en el territorio mexicano	33
Gráfica 7. Magnitud sísmica de los eventos registrados por el SSN (2021) a través del tiempo .....	34
Gráfica 8. Datos estadísticos de los eventos ocurridos en el territorio nacional.....	34
Gráfica 9. Número acumulativo de sismos registrados por mes con magnitud $m \geq 4$ .....	35
Gráfica 10. Número acumulativo de registros por mes en el territorio mexicano .....	36
Gráfica 11. Distribución de datos estadísticos por mes en el territorio mexicano .....	36
Gráfica 12. Histogramas con magnitud de los eventos en relación con el tiempo de ambas zonas de investigación del territorio mexicano .....	37
Gráfica 13. Distribución de eventos sísmicos en cada zona de investigación con relación al total de registrados desde 1986.....	38
Gráfica 14. Distribución de eventos sísmicos con magnitud $m \geq 4$ en cada zona de investigación con relación al total de registrados .....	38

Gráfica 15. Número acumulativo de eventos registrados por año en la zona de Subducción mexicana.....	39
Gráfica 16. Número acumulativo de sismos registrados con magnitud $m \geq 4$ por año en la zona de Subducción mexicana.....	39
Gráfica 17. Número acumulativo de sismos registrados por año con epicentro en la Faja Volcánica Mexicana.....	40
Gráfica 18. Número acumulativo de sismos por año con magnitud $m \geq 4.5$ con epicentro en el Cinturón Volcánico Mexicano.....	41
Gráfica 19. Datos estadísticos de ambas zonas de investigación, zona de Subducción y Cinturón Volcánico Mexicano.....	42
Gráfica 20. Número acumulativo de sismos por mes con epicentro registrados en la Zona de Subducción.....	43
Gráfica 21. Número acumulativo de sismos por mes con epicentro registrados en la Faja Volcánica Mexicana.....	44
Gráfica 22. Distribución de datos estadísticos por mes en el Cinturón Volcánico Mexicano desde el año 1986.....	45
Gráfica 23. Distribución de datos estadísticos por mes en la Zona de Subducción desde el año 1986.....	46
Gráfica 24. Distribución de la relación excedencia-magnitud de los eventos registrados en el territorio nacional a partir de diferentes años de corte.....	47
Gráfica 25. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, de los datos del territorio nacional SSN (2021) desde el año 1900 al 2021.....	48
Gráfica 26. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, de los datos del territorio nacional SSN (2021) desde el año 1986 al 2021.....	49
Gráfica 27. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, de los datos del territorio nacional SSN (2021) estableciendo un umbral de magnitud mínima de $m \geq 3$ .....	50
Gráfica 28. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, de los datos del territorio nacional SSN (2021) con umbral de magnitud de corte de $3 \leq m \leq 6$ .....	50
Gráfica 29. Distribución de la relación excedencia-magnitud entre las dos zonas de investigación tomando los registros a partir del año 1900 y 1986.....	52
Gráfica 30. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, de los datos de la Zona de Subducción y el Cinturón Volcánico Mexicano.....	53

Gráfica 31. Distribución de la relación entre excedencia y la magnitud en la Faja Volcánica Mexicana al tomarse registros a partir diversos año de inicio .....	55
Gráfica 32. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, de los datos SSN (2021) del Cinturón Volcánico Mexicano desde el año 1900 .....	56
Gráfica 33. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, de los datos SSN (2021) del Cinturón Volcánico Mexicano desde el año 1986 .....	56
Gráfica 34. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, de los datos SSN (2021) del Cinturón Volcánico Mexicano con un umbral de magnitud mínima de corte $m \geq 3$ .....	57
Gráfica 35. Distribución de la relación entre la excedencia y la magnitud en la parte occidente del Cinturón Volcánico Mexicano tomando los registros a partir de distintos años 1900, 1974 y 1986 .....	58
Gráfica 36. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos del Cinturón Volcánico Mexicano desde el año 1900, sin umbral de magnitud de corte ..	60
Gráfica 37. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos del Cinturón Volcánico Mexicano desde el año 1986 sin umbral de magnitud de corte ...	61
Gráfica 38. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos del Cinturón Volcánico Mexicano desde el año 1900 con un umbral de magnitud mínimo: $m \geq 3$ .....	62
Gráfica 39. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos del Cinturón Volcánico Mexicano desde el año 1986 con un umbral de magnitud mínimo: $m \geq 3$ .....	63
Gráfica 40. Distribución de la relación de la excedencia y la magnitud en la zona de Subducción (SUB) con base a los registros disponibles a partir diversos años de inicio: 1900, 1974 y 1986 .....	65
Gráfica 41. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la Zona de Subducción (SUB) desde el año 1900 y 1986 .....	66
Gráfica 42. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la Zona de Subducción (SUB) desde el año 1900 y 1986, con un umbral de corte $m \geq 3$	67
Gráfica 43. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la Zona de Subducción (SUB) desde el año 1900 y 1986, con un umbral de corte $3 \leq m \leq 6$ .....	68

Gráfica 44. Distribución de la relación de la excedencia y la magnitud en la zona SUBR de Subducción con base a los registros disponibles a partir diversos años de inicio: 1900, 1974 y 1986 .....	71
Gráfica 45. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUBR desde el año 1986, sin umbral de magnitud de corte .....	72
Gráfica 46. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUBR desde el año 1900, con un umbral de corte: $m \geq 3$ .....	73
Gráfica 47. Distribución de la relación de la excedencia y la magnitud en la zona SUB1 de Subducción con base a los registros disponibles a partir diversos años de inicio: 1900, 1974 y 1986 .....	74
Gráfica 48. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB1 sin umbral de magnitud de corte, desde el año 1900 y 1986 .....	75
Gráfica 49. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB1 con un umbral de corte: $m \geq 3$ desde el año 1900 y 1986 .....	75
Gráfica 50. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB1 con un umbral de corte: $3 \leq m \leq 6$ , desde el año 1900 y 1986 .....	76
Gráfica 51. Distribución de la relación de la excedencia y la magnitud en la zona SUB2 de Subducción con base a los registros disponibles a partir diversos años de inicio: 1900, 1974 y 1986 .....	77
Gráfica 52. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB2, sin umbral de magnitud de corte, desde el año 1900 y 1986 .....	78
Gráfica 53. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB2, con un umbral de corte: $m \geq 3$ , desde el año 1900 y 1986 .....	78
Gráfica 54. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB2, con un umbral de corte: $3 \leq m \leq 6$ , desde el año 1900 y 1986 .....	79
Gráfica 55. Distribución de la relación de la excedencia y la magnitud en la zona SUB3 de Subducción con base a los registros disponibles a partir diversos años de inicio: 1900, 1974 y 1986 .....	80
Gráfica 56. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB3, sin umbral de magnitud de corte, desde el año 1900 y 1986 .....	81
Gráfica 57. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB3, con un umbral de corte: $m \geq 3$ , desde el año 1900 y 1986 .....	81

Gráfica 58. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB3 desde el año 1900, con un umbral de corte: $3 \leq m \leq 6$ .....	82
Gráfica 59. Distribución de la relación de la excedencia y la magnitud en la zona SUB4 de Subducción con base a los registros disponibles a partir diversos años de inicio: 1900, 1974 y 1986 .....	83
Gráfica 60. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB4, sin umbral de magnitud de corte, desde el año 1900 y 1986.....	84
Gráfica 61. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB4, con un umbral de corte: $m \geq 3$ , desde el año 1900 y 1986.....	85
Gráfica 62. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB4, con un umbral de corte: $3 \leq m \leq 6$ , desde el año 1900 y 1986 .....	86

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Tabla 1. Datos estadísticos de la distribución de magnitudes por mes para el territorio mexicano desde el año 1986.....	36
Tabla 2. Datos estadísticos por mes para el Cinturón Volcánico Mexicano desde el año 1986.....	45
Tabla 3. Datos estadísticos de la distribución de magnitudes por mes para la Zona de Subducción desde el año 1986.....	46
Tabla 4. Resultado del ajuste utilizando el modelo Fragmento-Aspereza a los datos del territorio nacional .....	51
Tabla 5. Resultado del ajuste utilizando el modelo Fragmento-Aspereza a la zona de Subducción (SUB) y el Cinturón Volcánico Mexicano (MVB).....	53
Tabla 6. Resultado del ajuste utilizando el modelo Fragmento-Aspereza a cada región del Cinturón Volcánico Mexicano (W-MVB, C-MVB, E-MVB).....	59
Tabla 7. Resultado del ajuste utilizando el modelo Fragmento-Aspereza a la zona de Subducción (SUB) .....	65
Tabla 8. Resultado del ajuste utilizando el modelo Fragmento-Aspereza cada región del la zona de Subducción (SUBR, SUB1, SUB2, SUB3 y SUB4).....	69

## APÉNDICE

Apéndice 1. Enjambre sísmico ocurrido en los primeros meses del año 2020, con epicentro en las cercanías del Pico de Tancítaro y Uruapan, Michoacán:.....	97
Apéndice 2. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos del territorio nacional disponibles desde el año 1900 y 1986.....	97
Apéndice 3. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos del Cinturón Volcánico Mexicano disponibles desde el año 1900 y 1986.....	98
Apéndice 4. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos de la región Oeste del Cinturón Volcánico Mexicano (W-MVB) disponibles desde el año 1900 y 1986.....	98
Apéndice 5. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos de la región central del Cinturón Volcánico Mexicano (C-MVB) disponibles desde el año 1900 y 1986.....	99
Apéndice 6. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos de la región Este del Cinturón Volcánico Mexicano (E-MVB) disponibles desde el año 1900 y 1986.....	100
Apéndice 7. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos de la Zona de Subducción (SUB) disponibles desde el año 1900 y 1986.....	100
Apéndice 8. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos, de la región SUBR, disponibles desde el año 1900 y 1986.....	101
Apéndice 9. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos, de la región SUB1, disponibles desde el año 1900 y 1986.....	102
Apéndice 10. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos, de la región SUB2, disponibles desde el año 1900 y 1986.....	102
Apéndice 11. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos, de la región SUB3, disponibles desde el año 1900 y 1986.....	103
Apéndice 12. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos, de la región SUB4, disponibles desde el año 1900 y 1986.....	104

# Capítulo 1

## 1.1 Introducción

Por su ubicación geográfica el territorio nacional se encuentra expuesto a eventos sísmicos, que en el transcurso de la historia han sido significativos por las catástrofes que han ocasionado, particularmente los ocurridos en la ciudad de México y el estado de Chiapas en Septiembre de 2017.

El territorio mexicano se sitúa entre la convergencia de cinco placas tectónicas: Caribe, Cocos, Norteamérica, Pacífico y Rivera . Así mismo, posee todas las posibles interacciones entre ellas: las placas de Rivera y Cocos se sumergen por debajo de la placa de Norteamérica. La de Rivera se subduce bajo los estados de Jalisco y Colima. La de Cocos lo hace debajo de Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Mientras que la Placa del Pacífico se desplaza hacia el noroeste con respecto a la Placa de Norteamérica y Rivera (Mendoza-Ponce, 2012).

No obstante, México se encuentra dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico, una de las regiones más sísmicas del mundo, donde se encuentra la mayor liberación de energía del planeta (Cuanalo-Vázquez, 2016). Asimismo, está ubicado sobre la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) o Cinturón Volcánico Mexicano (MVB), la cual abarca desde el océano Pacífico hasta el Golfo de México en dirección Este, donde se localizan entre remanencias volcánicas, las cimas más altas del país (Zúñiga et al., 1997).

En nuestro país, desde que se instalaron los primeros instrumentos de medición en los primeros años del siglo XX (Mendoza-Ponce, 2012), existe un incremento constante en la actividad sísmica. Se tienen registros de sismos (SSN, 2021) para la zona de subducción, donde la mayoría surge por el movimiento de las placas de Caribe, Rivera y Cocos, con magnitud máxima de 8.2. Mientras que para la zona central del territorio, el sismo más grande ocurrió en el año 2017 con una magnitud de 7.1 siendo el epicentro en los límites del estado de Puebla.



## 1.2 Justificación

El alto nivel de exposición al peligro sísmico por encontrarse dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico, la alta ocurrencia de sismos al interior del continente debido a los esfuerzos de interplacas (Mendoza-Ponce, 2012) además de las pérdidas sufridas por el constante movimiento de las mismas en nuestro territorio, hacen evidente la prioridad de estudiar la vulnerabilidad sísmica de nuestro país (Zúñiga et al., 1997).

Sin embargo, aunque el modelo más utilizado para medir la liberación de energía en una zona sismogénica cualquiera (Mendoza-Ponce, 2012), se encuentra basado en la distribución de magnitudes de Gutenberg y Richter (Gutenberg-Richter, 1994), este ha mostrado tener ciertos desajustes para magnitudes pequeñas o muy grandes (Sotolongo-Costa & Posadas, 2002; Sotolongo-Costa & Posadas, 2004; Sotolongo-Costa, 2012; Samudio et al., 2014; Cuanalo-Vázquez, 2016). Por lo tanto, el modelo Fragmento-Aspereza (Sotolongo-Costa & Posadas, 2004) ha mostrado un ajuste mejor a los datos de los sismos tomando en cuenta la interacción de fragmentos y aspereza entre las fallas tectónicas.

Ante tales hechos, se realiza el presente trabajo de investigación en busca de encontrar los parámetros  $q$  y  $k$  del modelo Fragmento Aspereza y analizar la información de registros sísmicos dentro de la república mexicana. Sin embargo, de acuerdo a recientes investigaciones donde se indica que un registro completo de los sismos ocurridos en una región permite una imagen más clara de la liberación de energía y conocer cuán lejos de la extensividad se encuentra (Samudio et al., 2014 ; Antonopoulos et al., 2014) esto se justifica al realizar el ajuste del modelo Fragmento-Aspereza al catálogo de eventos sísmicos en su totalidad por la calibración de los instrumentos de medición sísmica (Mendoza-Ponce, 2012) incluyéndose también con umbral de corte, para bajas y altas magnitudes y así obtener una estimación más confiable del valor de los parámetros.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo General

A partir de los registros sísmicos provenientes de la base de datos del Servicio Sismológico Nacional de México, enfatizando en dos principales regiones: el Cinturón Volcánico Mexicano y la Zona de Subducción, observar, al aplicar el modelo Fragmento-Aspereza, el valor de los parámetros  $q$  y  $k$  a fin de comprobar el estado de equilibrio de las mismas. Es decir, comparar los valores de los parámetros: de no extensividad y de densidad de energía, en las regiones en su totalidad y el obtenido en cada región previamente mencionada al ser estratificada.

### **1.3.2 Hipótesis**

Identificar por el valor de los parámetros  $q$  y  $k$  del modelo Fragmento-Aspereza, el producto del ajuste a los datos del catálogo de sismos en cada región: el Cinturón Volcánico Mexicano y la Zona de Subducción de la costa del pacífico, que el estado en equilibrio es diferente y por lo tanto la fuente de origen de los sismos en cada zona también lo es.

### **1.3.3 Objetivos particulares**

- Utilizando los registros sísmicos del Servicio Sismológico Nacional (SSN) realizar un análisis estadístico de los eventos ocurridos: a nivel nacional, con epicentro en el Cinturón Volcánico Mexicano y en la Zona de Subducción del pacífico mexicano.
- Observar el grado de ajuste de los parámetros  $q$  y  $k$  del modelo Fragmento-Aspereza aplicado a: el catálogo de sismos del territorio nacional, la zona del Cinturón Volcánico Mexicano y la Zona de Subducción.
- Comparar el ajuste de los datos al estratificar el Cinturón Volcánico Mexicano y la Zona de Subducción incluyendo una variación al umbral de corte: sin umbral de magnitud, por umbral de magnitud mínima, umbral mínima y máxima; además de una ajuste por orden de magnitud a fin de obtener un mejor resultado.

Por último, se muestra la comparación de los valores obtenidos en gráficas y se comenta la variación obtenida.

# Capítulo 2. Fundamentación teórica

## 2.1 Zonas sísmicas en el mundo

Posterior a la teoría de la deriva continental de Wegener en 1912, se desarrolla por geólogos y geofísicos, la teoría de tectónica de placas donde se postula mediante el uso del registro instrumental de la ubicación de epicentros sísmicos que la litosfera se encuentra dividida en un número de bloques - placas tectónicas - que son arrastradas por corrientes de convección donde se empujan unas con respecto a otras (Zúñiga et al., 2011).

### 2.1.1 Tectónica de placas

El movimiento de placas, ilustrado en la figura 1, crea principalmente tres tipos de límites tectónicos (Gutiérrez et al., 2011): Convergentes, Divergentes y Transformantes. Convergentes, donde las placas se acercan unas a otras y la de mayor densidad (generalmente las oceánicas) se subduce por debajo de la otra (Zuñiga et al., 2011); Divergentes, donde las placas se separan en dirección opuesta provenientes de corrientes del interior del manto causando temblores débiles en áreas pobladas próximas a ellas; y Transformantes - fallas de transformación - donde las placas se mueven de lado en relativa con las otras en dirección opuesta.

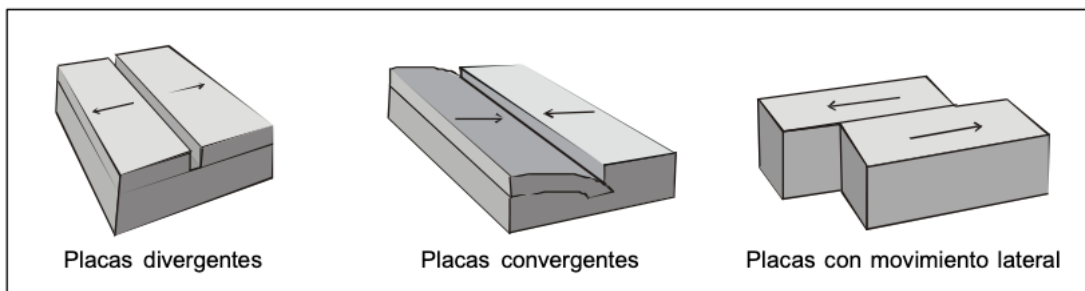


Figura 1. Tipos de límites entre placas tectónicas. Tomada de Gutiérrez et al., 2011.

Estos movimientos relativos entre placas, arrastradas por el material que las suprayace, alcanzan varios centímetros por año, frecuentemente resistidos por fricción cuyo vencimiento

suele dar origen a temblores, es decir, se acumula gradualmente cierta cantidad de tensión hasta que rebasa cierto límite lo que produce un evento sísmico que se propaga a todas direcciones en forma de ondas sísmicas a lo largo de las mismas.

Aunque la mayoría de los "sismos tectónicos" son causados por los esfuerzos de estos bloques, existen otro tipo de sismos asociados a otros fenómenos como los causados por actividad volcánica o el colapso del subsuelo por la extracción de materiales o fluidos mediante la fracturación hidráulica - fracking (Cuanalo-Vázquez, 2016) que dependiendo del tipo de falla o mecanismo causal pueden tener diferentes consecuencias catastróficas en la superficie.

### 2.1.2 Placas tectónicas en México

Por su ubicación geográfica, cuya distribución se ilustra en el mapa de la figura 2, el territorio Mexicano se encuentra dentro de los límites de cinco grandes estructuras tectónicas y posee todas las posibles interacciones entre ellas, que pueden derivar en catástrofe (Gutiérrez et al., 2011).

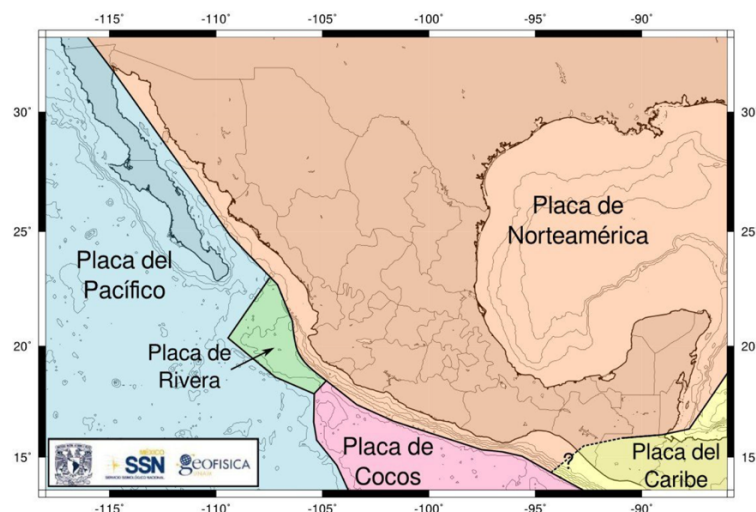


Figura 2. Placas tectónicas que interactúan en territorio mexicano. Tomada de: Grupo de trabajo del Servicio Sismológico Nacional, UNAM, (2018).

Aunque la mayor parte del país se encuentra sobre la **placa Norteamericana** - la cual contiene a todo Norteamérica, parte del océano Atlántico y parte de Asia - al noroeste del territorio mexicano la península de Baja California se encuentra sobre otra gran tectónica - la **placa del Pacífico** - donde existe un movimiento transformante entre estas placas. Se origina

en el estado de California y continúa, alternando con cortos riscos que forman parte del sistema de San Andrés, en el golfo de California en los Estados Unidos en conjunto con el océano Pacífico. Dominando la sismicidad de la península de Baja California y de los estados de Sonora y Sinaloa (Cuanalo-Vázquez, 2016). Además, al este del país, existe una combinación de movimientos de extensión y transformante. La **de Rivera** se encuentra la **placa de Cocos** que se subduce debajo de la Norteamericana. Misma que, además, se mueve horizontalmente con respecto a la de Cocos y del Pacífico.

Así mismo, al sur del país, en los estados de Guerrero, Oaxaca y Chiapas donde se tiene la mayor tasa de sismicidad del país. La **placa** oceánica **de Cocos** se introduce por debajo de la Norteamericana y del **Caribe** - que contiene a gran parte de las islas caribeñas y los países de Centro América -. Misma que tiene un movimiento transformante con respecto a la Norteamericana. Como consecuencia de estos deslizamientos relativos entre placas, es notoria la concentración de sismicidad a lo largo de las costas del Pacífico mexicano, que afectan a la mayor parte del territorio mexicano (Rosenblueth, 1994).

### **2.1.3 Cinturón de fuego del Pacífico**

El desplazamiento de las placas tectónicas de la litosfera crea puntos de contacto entre los límites de las mismas que generan fuerzas de fricción que estorban el libre desplazamiento de una con respecto de la otra. Estos esfuerzos friccionantes propician una ruptura violenta producto de la liberación de energía acumulada entre ellas. Con el transcurso del tiempo, el uso de instrumentos de medición de sismos revela las zonas de alta sismicidad a lo largo del globo terráqueo mostrando que se concentran en zonas bien delimitadas en contraste con otras regiones que están libres o de nulas actividades sísmicas reiterando la teoría de la tectónica de placas, ya mencionada.

Como se observa en la figura 3, el Cinturón de Fuego del Pacífico, una franja ubicada en la periferia del océano pacífico caracterizada por una actividad volcánica intensa, comprende desde la Patagonia, Chile, Centroamérica, México, Estados Unidos, Canadá, Alaska, atraviesa las Islas Aleutianas, continúa por la Península de Kamchatka, Japón, Islas Filipinas y termina al sur de Nueva Zelanda. Región donde se libera, aproximadamente el 90%, la mayor parte de la energía sísmica de la tierra (Cuanalo-Vázquez, 2016).

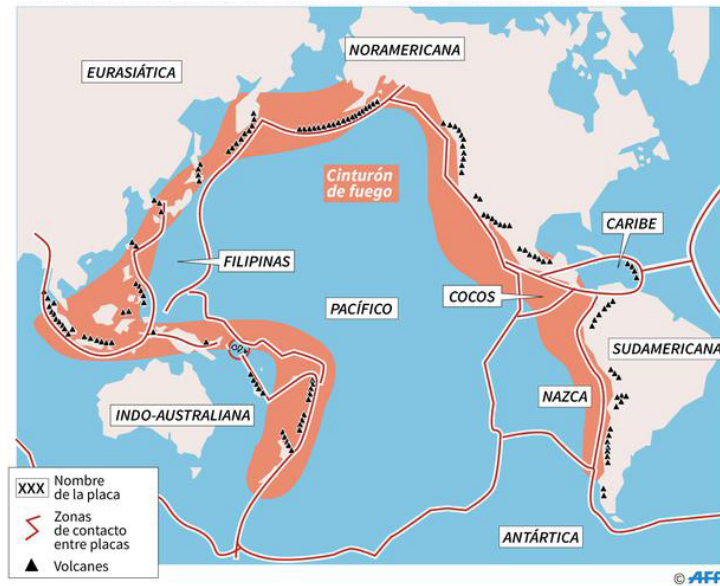


Figura 3. Cinturón de fuego del pacífico, también conocido como Cinturón Circumpacífico. Tomada de Daza, 2017.

## 2.2 Regionalización sismotectónica en México

Basándose en los datos de los catálogos instrumental e histórico a fin de producir mapas de riesgo sísmico homogéneo y consistente, el territorio de mexicano se subdivide en 19 regiones sismotectónicas Zuñiga et al. (1997) contando para aquellas zonas con una alta densidad de registro e historia sísmica, una mayor subdivisión con el propósito de realizar las estimaciones de riesgo sísmico en el país.

Entre las características generales de las regiones que son utilizadas por Zúñiga et al. (1997) para la subdivisión del país así como el criterio empleado en su definición se se encuentran: la historia sísmica de cada región, las características tectónicas comunes de la zona, la sismicidad umbral, los mecanismos focales y/o patrones de fallos, las características principales de la liberación de energía de los sismos dentro de cada una. En otras palabras, evaluar el potencial peligro destructivo de experimentar pérdidas humanas y económicas por efectos de sismos en cada zona.

Esta regionalización sistematizada en las que se ha dividido al país, que abarca de los 12 °N a los 33° N de latitud y de los 85° W a los 120° W de longitud, incorpora la mayor parte de las características generales de los sismos en diferentes sitios de la extensión territorial,

incluyendo los eventos más destructivos que han ocurrido en el pasado. Las zonas en las que se divide el territorio mexicano se presentan en la figura 4.

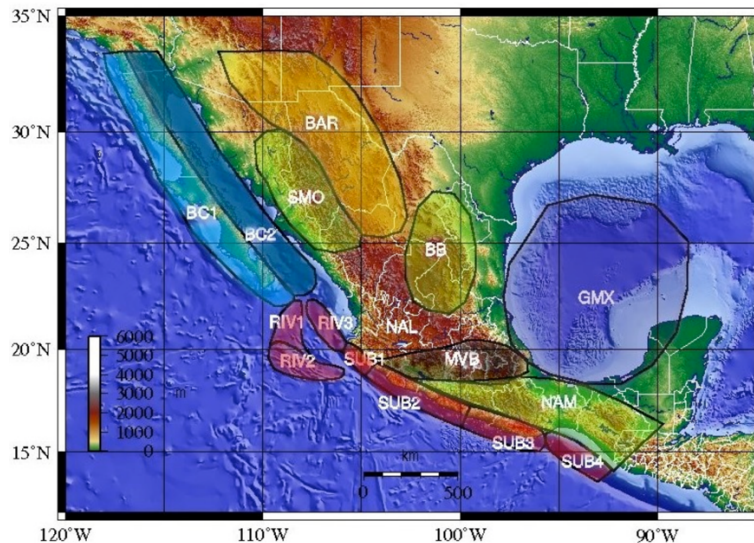


Figura 4. Regionalización sismotectónica de la República Mexicana. Las zonas de interés del presente estudio son: la Zona de Subducción (SUB) y el Cinturón Volcánico Mexicano (MVB). Tomada de Zúñiga (2011).

Aunque esta manera de dividir al país de acuerdo al riesgo sísmico de cada región no es la única (CFE, 1993), esta proporciona una caracterización coherente de las zonas sismogénicas que combina los registros históricos del país para un mejor cálculo de riesgo sísmico en el mismo (López et al., 2014).

### 2.2.1 Zona de Subducción - SUB

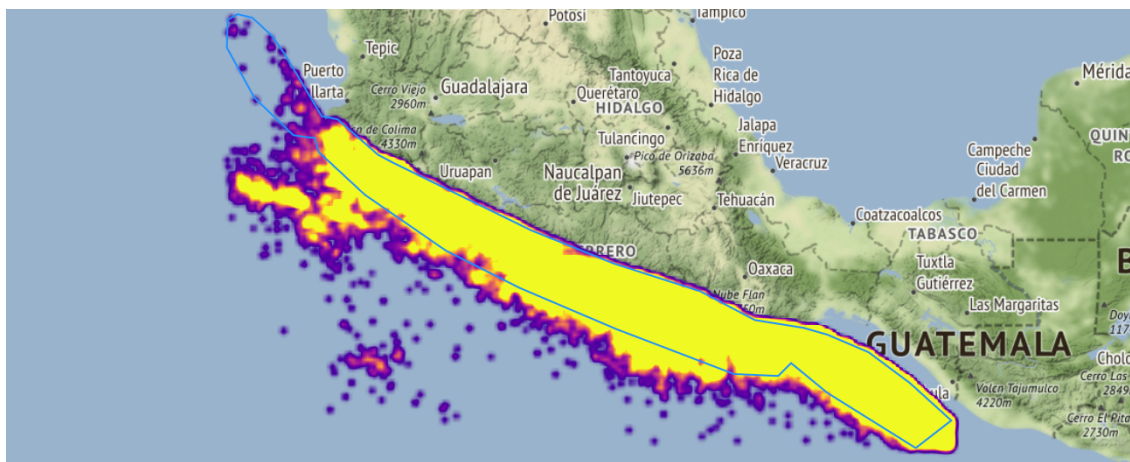


Figura 5. Zona de Subducción del pacífico mexicano.

La Zona de Subducción (SUB), llamado también zona de Wadati-Benioff, es una región compleja que contiene la mayor actividad sísmica de México (figura 5), además de contener los eventos más destructivos e importantes que han ocurrido en el pasado y por considerarse como una de las trincheras más activas en el mundo (Mendoza-Ponce, 2012). Esta zona, de los 12 °N a los 20° N de latitud y de los 90 W a los 105° W de longitud, está ubicada en el pacífico mexicano que comprende los estados de: Colima, Jalisco, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Contiene la zona de mayor acoplamiento entre las placas en subducción Rivera, Cocos por debajo de la del Caribe y Norteamericana con eventos sísmicos que alcanzan magnitudes de 8.2.

Enfocándose en el potencial sísmico del territorio nacional, áreas de réplica de los eventos de mayor magnitud y el historial de los registros sísmicos, se subdivide la zona de subducción de acuerdo con Zuñiga et al. (1997) en cuatro subregiones a fin de un análisis más detallado: SUBR, SUB1, SUB2, SUB3 y SUB4, por las características de la energía liberada por los eventos, así como la capacidad sismotectónica de la región. A continuación, se describen el contenido de estas:

### 2.2.1.1 Región SUBR



Figura 6. Zona SUBR, localizada en la zona de Subducción del pacífico mexicano, en las costas de los estados de Nayarit, Sinaloa y Jalisco.



SUBR (figura 6) que abarca la zona del pacífico de los estados de Nayarit, Sinaloa y Jalisco donde se presenta un acoplamiento débil en la convergencia de la Norteamericana subyacente por la de Rivera. Aunque presenta eventos con magnitudes con pocas variaciones en un rango de  $3 < m < 5.2$ , los de mayor energía ocurren en los años 1989, 1995 y 1999 con magnitudes de 5.1. La tectónica de placas presenta una diversidad de cambios en la configuración tectónica desde su inicio hasta la actualidad (Zúñiga et al., 2017).

### 2.2.1.2 Región SUB1



Figura 7. Zona SUB1, localizada en la zona de Subducción del pacífico mexicano, en las zonas costeras de los estados de Jalisco y Colima.

La región SUB1 (figura 7) incluye las zonas costeras de los estados de Jalisco y Colima, las cuales comprenden puntualmente una interacción triple de placas importantes como: La convergencia de las placas Rivera – Norteamericana; y la convergencia de la parte central y occidental de la de Cocos con la Norteamericana. Aunque la localización precisa de los límites de la placa de Rivera y Cocos no es evidente (Rosas-Palafox, 2016), algunos investigadores (Zúñiga et al., 2017) la definen al oriente por el graben “El Gordo” y aproximadamente 165km al occidente de la fosa Mesoamericana.

De acuerdo con Zuñiga et al. (1997) la dimensiones de los eventos que ocurren en esta área es menor a la de las demás de subducción hacia el suroeste, sin embargo, el potencial sísmico es mayor con respecto al resto de la placa de Rivera al oeste - RIV1 y RIV2 -. Durante los últimos 100 años, el evento más grande ocurrido en esta región sucedió el 09 de Febrero

de 2018, 41 km al sureste de Cihuatlán, Jalisco, con una magnitud de 5.9 (SSN, 2021). Los ángulos de la falla entre las zonas de fracturas Rivera y la dorsal del Pacífico de Jaramillo & Suárez (2011) altamente debatidos por Verma (2015a) y Verma et al. (2016) no serán discutidos en esta investigación.

### 2.2.1.3 Región SUB2

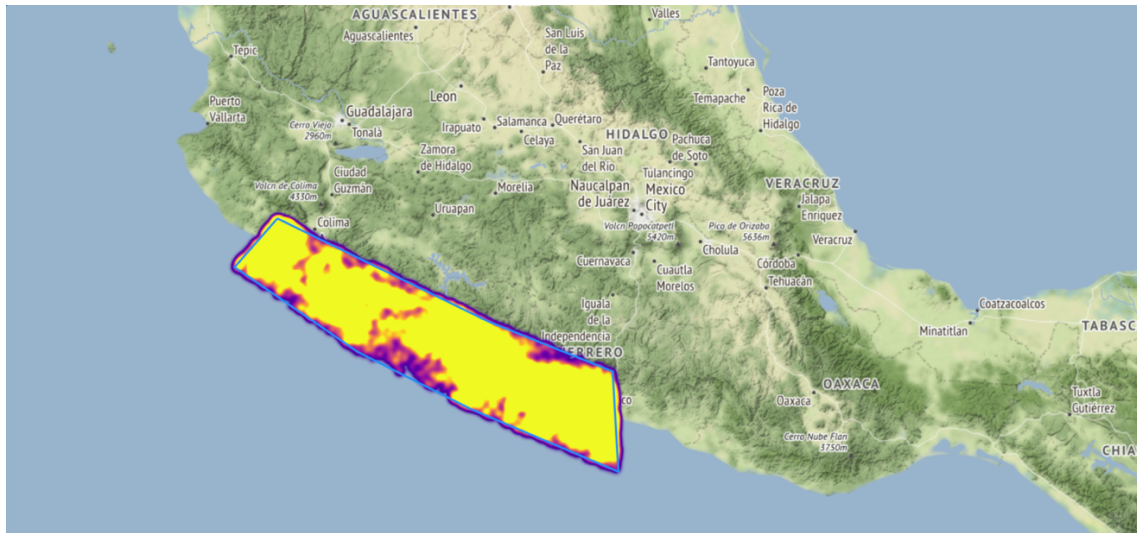


Figura 8. Zona SUB2, localizada en la zona de Subducción del pacífico mexicano, en las costas de los estados de Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca.

La región SUB2 (figura 8) es la zona de transición entre las placas de Cocos y la Norteamericana que abarcan las costas de los estados de: Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca. Zúñiga et al. (2011) señala que en esta región se presenta la más alta periodicidad de sismos relacionados a un fuerte acoplamiento de convergencia entre las placas de Cocos - Norteamericana con magnitudes  $\sim 7$ . Por los eventos de grandes magnitudes en esta región que frecuentemente son precedidos por temblores precursoros, Zúñiga et al. (2017) sugiere que grandes rupturas rompen las sucesivas asperezas de la interfaz de la placa generando eventos posteriores.

Asimismo, las diversas mejoras de redes sismográficas locales puestas en operación aunado a recientes investigaciones permiten una mejor comprensión de las propiedades y características de esta región frente a las demás de Subducción. Mientras que algunas como las primeras como Suárez et al. (1990), Pardo & Suárez (1995) y Pacheco & Singh (2010) sugieren teorías e hipótesis, por la interpretación de los datos (Suárez et al, 1990), la

trayectoria y geometría de la placa oceánica al converger con la norteamericana, las más recientes de Verma (2002, 2004, 2009, 2015a), hacen evidente las características de la región en múltiples resultados geológicos, geofísicos y geoquímicos publicados.

En la zona SUB2 se suscitan los eventos devastadores de 1985 y 1995, el primero sucede a 45 km al noreste de La Mira en el estado de Michoacán con una magnitud de 8.1. El segundo, a 10 km al sureste de Manzanillo, Colima con una magnitud de 8.0.

#### 2.2.1.4 Región SUB3

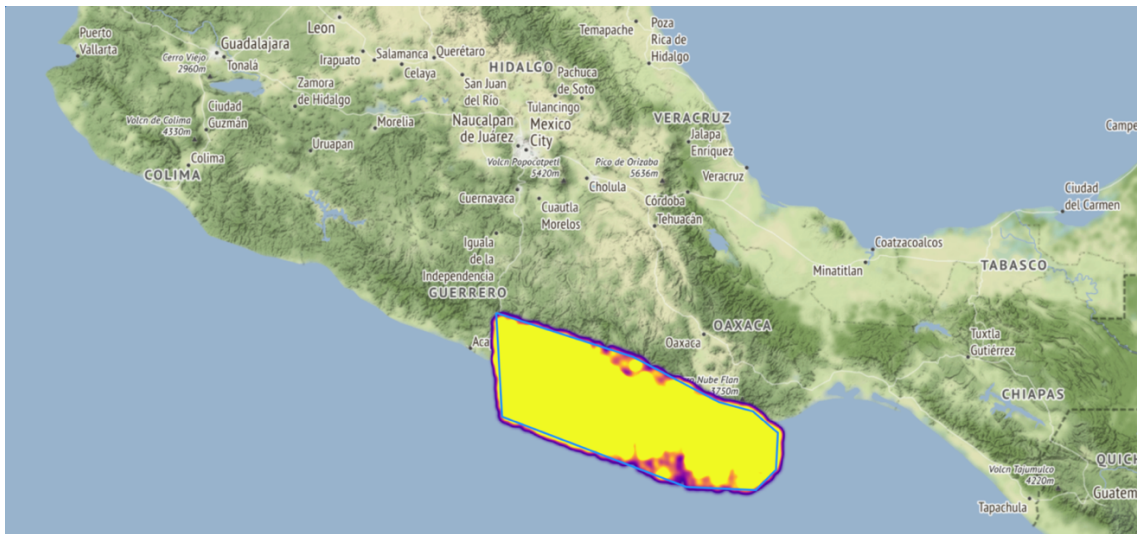


Figura 9. Zona SUB3 de la zona de Subducción, localizada en las zonas costeras de los estados de Jalisco y Oaxaca.

Los eventos de la zona SUB3 (figura 9), localizada en las zonas costeras de los estados de Jalisco y Oaxaca. Es una zona de transición que se relacionan a un fuerte acoplamiento en la convergencia de las placas de Cocos - Norteamérica. Igualmente, la frontera oriental de esta área se define con base a un cambio de sismicidad sismotectónica donde la cordillera submarina de Tehuantepec se intersecta a la trinchera subyacente - zona de fractura O'Gorman - . Aunque la frecuencia con la que se dan los eventos con grandes magnitudes en esta región es menor a la región SUB2, es posible que los eventos en la zona de Subducción SUB3 contengan eventos que generen mayor energía (Zúñiga et al., 2017).

Durante el presente siglo se han suscitado eventos de fuerte magnitud que han repercutido especialmente en ciudades como Acapulco, Oaxaca y la Ciudad de México, tales

como: el 20 de Marzo de 2012 con una magnitud de 7.5 con epicentro a 46 km al sur de Ometepec en el estado de Guerrero; el 23 de junio de 2020 con una magnitud de 7.4, 4 km al norte de Crucecita, Oaxaca; el 16 de Febrero de 2018, 14 km al sureste de Pinotepa Nacional, Oaxaca con una magnitud de 7.2.

#### 2.2.1.5 Región SUB4



Figura 10. Zona SUB4 de la zona de Subducción, localizada en las zonas costeras de los estados de Oaxaca y Chiapas.

La región SUB4 (figura 10), es una zona que consta de áreas costeras en los estados de Oaxaca y Chiapas, los dos estados con mayor sismicidad en la República Mexicana por el contacto convergente entre las placas del Caribe, Norteamérica y de Caribe. Donde, la interacción de las dos últimas tiene lugar en la costa del Pacífico, frente a dichos estados, y continúa hacia el sureste hasta los países localizados en Centro América.

Es necesario hacer hincapié que esta zona se caracteriza por la ausencia eventos de gran magnitud y no se habían presentado eventos de magnitud mayores a 6.6 de acuerdo con los registros del SSN (2021). El evento más grande del siglo en el territorio nacional se reporta por el Servicio Sismológico Nacional (SSN, 2021) al suroeste del municipio de Pijijiapan el 7 de Septiembre de 2017 a las 23:49:17 horas (04:49 UTM) con una magnitud de 8.2. No obstante, previo a este evento que causa la muerte de decenas de miles de personas y graves daños en los estados de Chiapas y Oaxaca, los que ocurren de mayor liberación de energía son de magnitud menor: 6.6, 6.4 y 6.1, en los años de 2008, 2019 y 2012,

correspondientemente. Por esta razón, se especula la existencia de una extraña subducción asísmica en la zona SUB4 (Zúñiga et al., 2017).

## 2.2.2 Cinturón Volcánico Mexicano – MVB

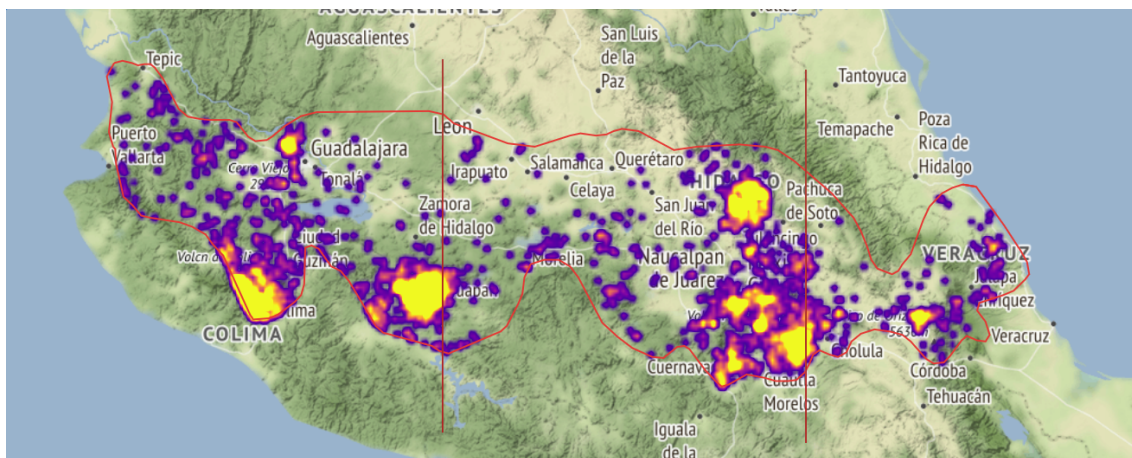


Figura 11. Delimitación de la zona del Cinturón Volcánico Mexicano por Verma (2015). Las líneas verticales color marrón representan las limitaciones del área. De oeste a este: W-MVB, C-MVB, E-MVB. Los puntos de calor indican la concentración de eventos sísmicos.

El Eje Volcánico Mexicano, Cinturón Volcánico Mexicano o Mexican Volcanic Belt (MVB, por sus siglas en inglés) abarca el país de manera horizontal. Tiene aproximadamente 1,000 km de longitud y su irregular amplitud varía desde los 200 km a los 500 km, el cual se distribuye con una dirección preferencial E-O desde Veracruz hasta Puerto Vallarta (Verma, 2015a) albergando los más de ocho mil volcanes del país. Aunque existen diversos estudios que han analizado esta área del país, únicamente los importantes serán mencionados a continuación.

El origen y la ubicación del Cinturón Volcánico Mexicano ha sido motivo de gran discusión, varios estudios como los de Pardo & Suárez (1995); Verma (2002); Pérez-Campos et al. (2008); Pacheco & Singh (2010); Córdoba Montiel et al. (2014); Verma (2015); Verma (2015a); Verma et al. (2016) que han realizado investigaciones para explicar la geometría de la corteza continental en ella. Mientras que algunos como Pardo & Suárez (1995); Pérez-Campos et al. (2008); Pacheco & Singh (2010) siguen teorías e hipótesis que la Faja Volcánica es un sistema de arco volcánico e infieren la ubicación de la placa que se subduce en la costa del pacífico por debajo del territorio nacional, Verma (2002, 2004, 2009, 2015a) presenta en múltiples trabajos la complejidad de analizar al MVB en su totalidad e indica de acuerdo a las

características geológicas, geofísicas y geoquímicas de cada región, al Eje Volcánico Mexicano como una zona de extensión continental.

La recopilación de las investigaciones geológicas descritas anteriormente se toman como base para dividir la parte central de la República Mexicana en tres porciones, de acuerdo con Verma: 1) W-MVB: una porción occidental en las costas de Jalisco donde la placa de Rivera y la de Cocos se encuentran con la de Norteamericana Verma et al. (2016); 2) C-MVB: la parte central que comprende una predominante zona de extensión de norte a sur; 3) una porción oriental en la costa del Golfo de México caracterizado principalmente por un sistema de fallas. Las delimitaciones de la zona que se han elegido para la subdivisión del Eje Volcánico Mexicano se presentan en la figura 11.

Las ondas sísmicas en esta región han sido las más destructivas debido a la ubicación de las ciudades como la Ciudad de México, Puebla y el estado de Morelos. Entre los sismos con mayor magnitud se encuentran: el 18 de junio de 1932 ( $m = 7.8$ ); el 07 de Agosto de 1925 ( $m = 6.7$ ); y el 16 de Octubre de 1995 ( $m = 5.1$ ).

### 2.2.2.1 W-MVB

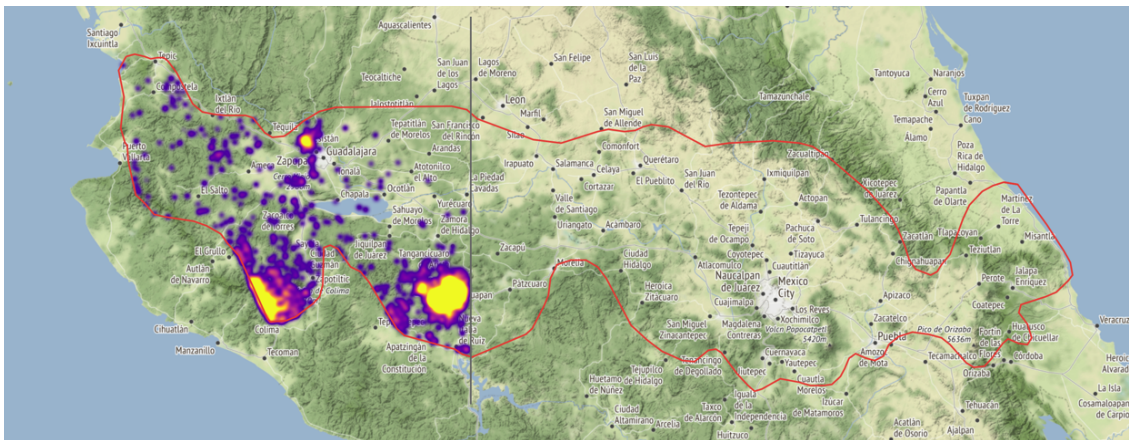


Figura 12. Ubicación de la zona W-MVB, una de las tres divisiones de la Faja Volcánica Mexicana. Se delimita de acuerdo a Verma et al. (2016).

En la zona Oeste del Cinturón Volcánico Mexicano (MVB) se encuentra la W-MVB (figura 12). En esta región la placa de Rivera y parte de la de Cocos, convergen en el océano pacífico oriental con la Norteamericana en la fosa mesoamericana. En esta parte occidental del territorio, existe una triple zona de extensión o *rift* simultáneamente activa que ha causado el

desplazamiento del bloque de Jalisco hacia el Océano Pacífico Oriental: Colima *rift*, Chapala *rift* y Tepic-Zacoalco *rift*.

Los resultados del análisis de la diversidad de composiciones de las evidencias volcánicas en esta área oriental por Verma et al. (2016), al evaluar las anomalías de las rocas ígneas y compararlas con las ubicadas en otras zonas (zona de *rift*, *no-rift*, cerca y lejos de la trinchera) para una mejor comprensión del régimen tectónico dominante en el magma del W-MVB, demuestran que la configuración tectónica del área presenta características propias de un arco continental de transición o de una brecha continental.

Verma et al. (2016) a través de estudios geoquímicos en las zonas de extensión, demuestra similitudes y diferencias entre las características de cada zona dependiendo del tipo de roca que se analiza, revelando la complejidad de la tectónica en la región. Para Tepic-Zacoalco, define la presencia de configuraciones de extensión continental en las rocas básicas, sin embargo, las intermedias y ácidas no las hacen de manera coherente o clara. De igual manera, en la zona de Chapala *rift*, se presenta una configuración de extensión para las rocas básicas, no obstante, para las intermedias y ácidas, se presenta una configuración de arco volcánico.

Esta área oriental registra una cantidad de eventos que supera el total de las dos otras regiones juntas, es decir, 4'724 han ocurrido en la zona W-MVB frente a los 1'590 de la parte central y 258 de la sección del Este. Entre los sismos de mayor magnitud registrados, se encuentran los ocurridos el 10 de Octubre de 1995 ( $m = 5.1$ ); el 5 de Marzo de 1998 ( $m = 4.5$ ); y el 11 de Noviembre de 2016 ( $m = 4.8$ ).

### 2.2.2.2 C-MVB

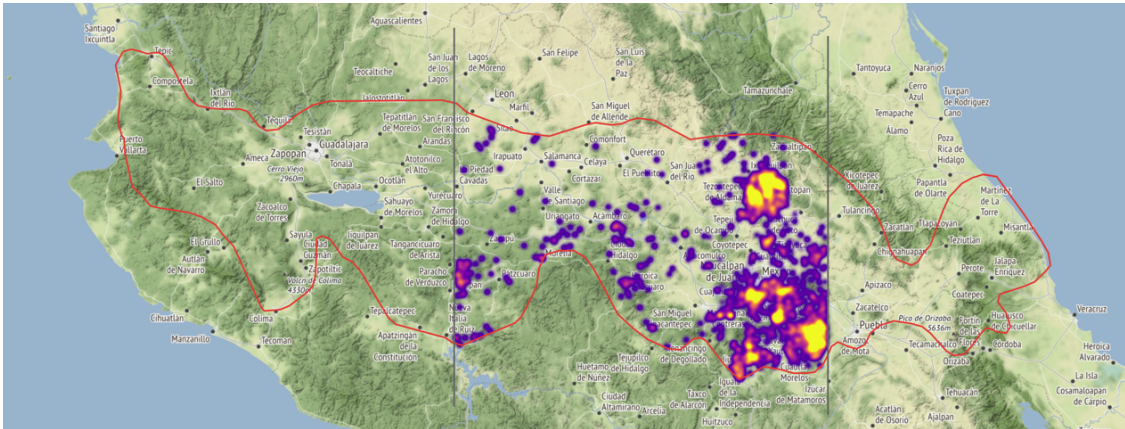


Figura 13. Ubicación de la zona C-MVB, una de las tres divisiones de la Faja Volcánica Mexicana Verma (2015).

El volcanismo en la parte central del MVB (figura 14) contiene un registro del período Plioceno al Holoceno donde se destacan las erupciones históricas del volcán Popocatepetl Verma (2015). Sin embargo, el origen del magma en esta zona, como en las demás regiones de la Faja Volcánica, ha sido altamente debatido.

Las evidencias geológicas, geoquímicas y geofísicas de Verma (2015) concluyen que en la configuración tectónica de la parte central del Eje Volcánico Mexicano, se presenta una configuración predominante de extensión - *rift* - en la que la parte central demuestra ser un área clave para la comprensión de los complejos procesos magmáticos y tectónicos de los volcanes en la Faja Mexicana.

Las características de la predominante extensión continental de este-oeste del C-MVB incluyen la totalidad de las evidencias sísmicas disponibles a la fecha englobando la orientación y distribución de los más de 200 volcanes monogenéticos en la Sierra de Chichinautzin; los sistemas de fosas tectónicas subparalelos a la Faja Volcánica Mexicana dominadas por una extensión norte-sur cuyas cartografías y documentación muestran una dirección de este a oeste; las estadísticas de resultados geoquímicos de Verma (2015); y las interpretaciones de Pérez-Campos et al. (2008) y Pacheco & Singh (2010).

En esta zona central se observa un gran número de sismos registrados en la parte central del Cinturón Volcánico Mexicano en los estados de: México, Hidalgo, Morelos y Puebla. De acuerdo con Zúñiga et al. (2000) existe un incremento anormal de la actividad sísmica en esta



región que inicia a principios del año de 1996. Aunque a principios del año de 1993 fueron puestas en operación nuevos instrumentos sismológicos en la zona del Valle de México, a las que se pudiera atribuir la mejora de detección de estos eventos, las magnitudes son lo suficientemente grandes para ser registradas en las estaciones de la red regional.

### 2.2.2.3 E-MVB

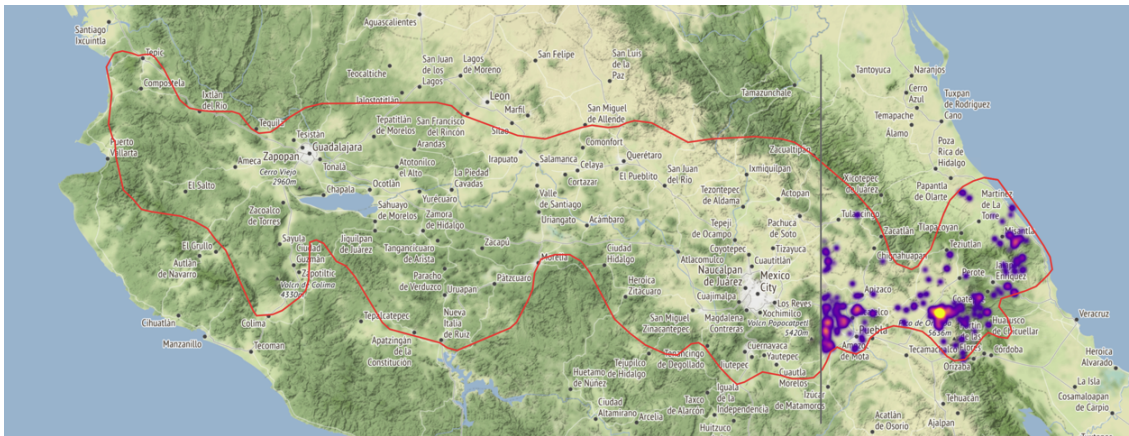


Figura 14. Ubicación de la zona E-MVB, una de las tres divisiones de la Faja Volcánica Mexicana Verma (2015a).

En la parte oriental del Cinturón Volcánico Mexicano (W-MVB) se encuentra una cordillera de volcanes que contiene al Cofre de Perote con altura de 4,200 msnm y el Pico de Orizaba de 5,700 msnm (figura 15). Es necesario señalar, aunque dentro estos campos volcánicos no se presentan eventos de magnitud mayor a 4.6, de acuerdo a los registros de la historia reciente, otros eventos han ocurrido en la zona, tales como: en el año 1937, se suscita uno de intraplaca con epicentro entre las localidades de Acutzingo y Maltrata con una magnitud de 7 (Jiménez & Ponce, 1978); el 28 de agosto de 1973, el sismo de Orizaba con una magnitud de 7.1 (Singh & Wyss, 1976); entre otros.

Además, dentro de esta región se observa una agrupación concentrada de eventos sísmicos próximos a los domos gemelos de Las Derrumbadas en la Cuenca Serdán-Oriental (Ferriz & Mahood, 1986). De acuerdo a Pérez-Méndez & De la Paz (2017) determinan que aunque el sistema volcánico en esta área se describe como volcanes monogenéticos, las evidencias la determinan como un sistema volcánico complejo (figura 16). Las implicaciones geológicas en las diversas configuraciones tectónicas y estructurales, en el ascenso del magma que es afectada por la disponibilidad de abundante agua subterránea y superficial en la cuenca, sugieren un sistema complicado. Siebe & Verma (1988); Verma (2000) concluyen,

por las propiedades geoquímicas de la zona, que en esta región se presenta una extensión territorial donde la fuente de calor, de poca profundidad, involucra la reserva de magma rico en óxido de silicio.

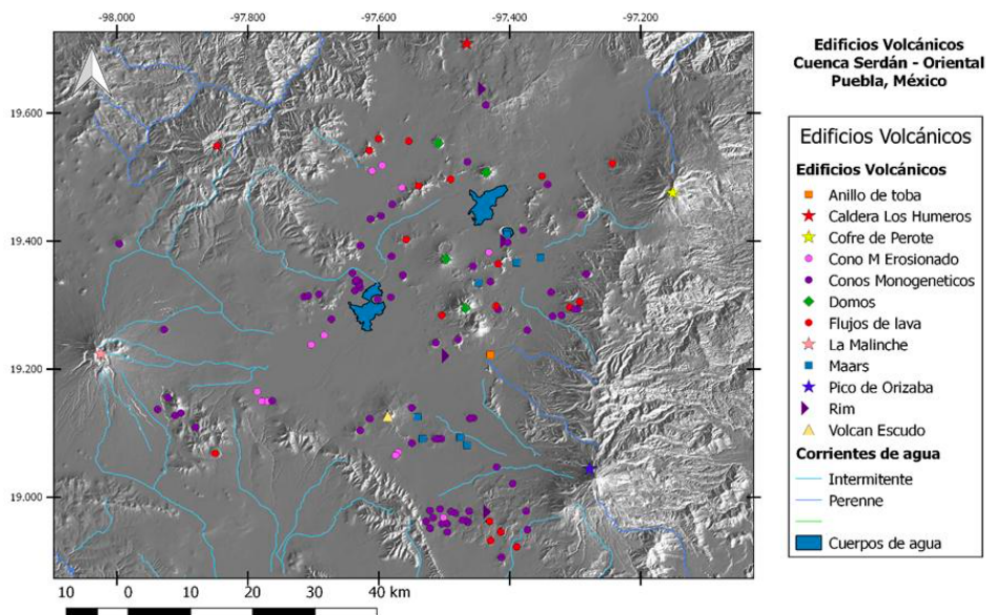


Figura 15. Mapa de distribución espacial de los volcanes en la Cuenca Serdán-Oriental, tomado de Pérez-Méndez & De la Paz (2017).

De acuerdo con Verma (2015a) las firmas geoquímicas exhiben características que constituyen un sistema de fallas y de fractura extensiva, en otras palabras, las evidencias analizadas se utilizan para inferir la presencia de una zona de extensión continental para el lado oriental del MVB. Las restricciones geoquímicas presentadas en la investigación, cambian el paradigma que representa esta cordillera de volcanes como un arco marginal, es decir, se cuestiona que la Faja Volcánica Mexicana se denomine como un arco continental por las evidencias en las características de las configuraciones geofísicas, geológicas y geoquímicas (Verma 2002, 2004, 2009, 2015, 2015a; Verma et al., 2016). No obstante, puesto que los periodos de retorno de los sismos corticales por lo general desconocidos, se desconoce si esta región muestra un periodo de ausencia de sismos.

## 2.3 Modelos para la dinámica de terremotos

### 2.3.1 Relación Gutenberg-Richter

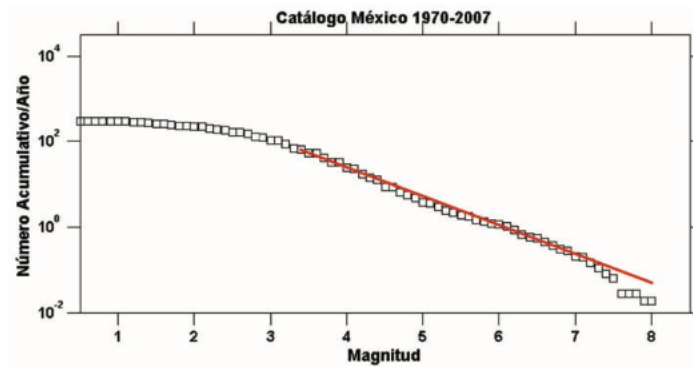
Inicialmente propuesta por Ishimoto e Ida (1939) en Japón, la relación Gutenberg-Richter (Gutenberg-Richter, 1944) es uno de los modelos estadísticos más usados en la sismología (Mendoza-Ponce, 2012) al estudiar la liberación de energía de una región. Esta, desarrollada mediante observaciones estadísticas sobre la distribución de la frecuencia acumulada del tamaño de eventos sísmicos en California, Estados Unidos (a fin de separar el gran número de eventos sísmicos pequeños del reducido grupo de grandes originados al sur del mismo) muestra la distribución relativa del tamaño de los sismos (Cuanalo-Vázquez, 2016). Expone la relación logarítmica-lineal entre la cantidad de sismos  $N$  con una magnitud mayor a  $m$  y el valor de esta magnitud (Sotolongo-Costa & Posadas, 2002) de manera lineal mediante las constantes  $a$  y  $b$ . (Mendoza-Ponce, 2012).

La expresión matemática del modelo Gutenberg-Richter, permite cuantificar la magnitud de la actividad sísmica de una región a través de la siguiente ecuación lineal:

$$\text{Log}_{10}(\geq m) = a - bm, \quad (1)$$

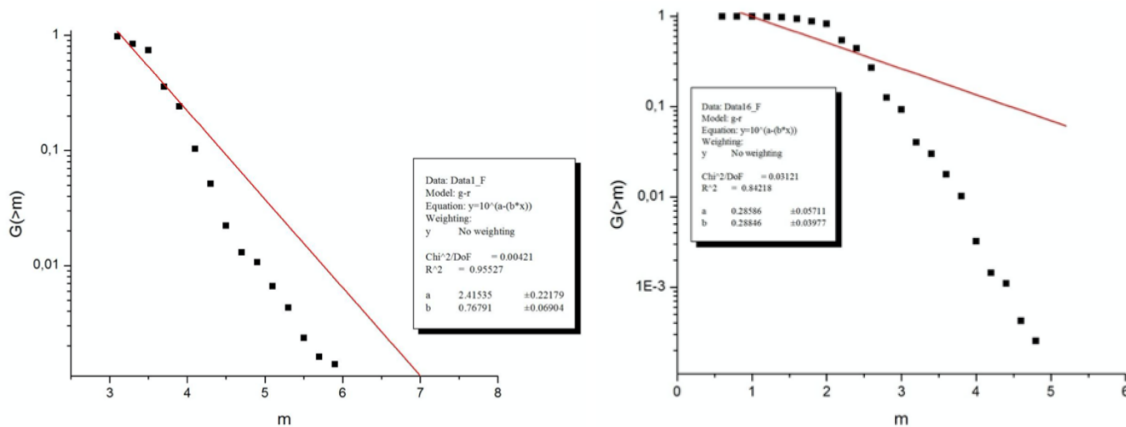
Donde  $N$ : es el número acumulado de eventos en una región de mayor o igual magnitud que  $m$  en un tiempo específico. Los coeficientes  $a$  y  $b$ , obtenidos por algún método de regresión lineal. El parámetro  $a$  indica el nivel de actividad sísmica de la región, es decir, el total esperado de eventos en el área. El índice  $b$  (el cual suele variar obedeciendo a cada zona (Mendoza-Ponce, 2012)): la proporción logarítmica de eventos de baja magnitud con respecto a los grandes (Kossobokov y Keilis-Borok, 2000) a mayor número de sismos pequeños, mayor será el valor de  $b$ .

De acuerdo con Samudio et al., 2014, algunos investigadores le han intentado utilizar como un parámetro precursor debido a que se incrementa y decrementa, aunque generalmente el valor de  $b$  se encuentra en un rango alrededor de  $1 \pm 0.2$  ( $0.8 < b < 1.2$ ) (Frohlich y Davis, 1993) suele incrementarse tras una intensa liberación de energía - secuencia de réplicas, de sismos grandes y superficiales Olami et al. (1992). De igual manera, al haber poca actividad de sismos de baja magnitud, suele decaer drásticamente.



Gráfica 1. Distribución de frecuencia acumulada-magnitud para sismos del catálogo de México de 1970 a 2007. La línea roja representa la relación Gutenberg-Richter correspondiente a esta distribución (tomada de Mendoza-Ponce, 2012).

Sin embargo, aunque la mayor parte de los datos se describen adecuadamente mediante la relación GR (gráfica 1), la representación gráfica de esta Ley, ha mostrado significativos desajustes para distribuciones con magnitudes muy pequeñas o demasiado grandes, es decir, la relación lineal no se mantiene en el caso de distintos órdenes de magnitud (Sotolongo-Costa & Posadas, 2004). Como se representa en las gráficas 2 y 3 la presentación de este modelo para diferentes catálogos refleja que la dependencia no se cumple:



Gráfica 2. Distribución de frecuencia acumulada-magnitud en escala logarítmica para los sismos contenidos en el catálogo de terremotos de OGS (Oklahoma Geological Survey) en el periodo de 2014 a 2015. La línea roja representa la relación Gutenberg-Richter ajustada a los datos dando los

valores  $a=2.41535$ ,  $b=0.76791$ , para el catálogo completo (tomada de Cuanalo-Vázquez, 2016).

Gráfica 3. Distribución de frecuencia acumulada-magnitud en escala logarítmica para los sismos (con magnitudes menores a 3) contenidos en el catálogo

*de terremotos de OGS (Oklahoma Geological Survey) en el periodo de 2014 a 2015. La línea roja representa la relación Gutenberg-Richter ajustada a*

*los datos dando los valores  $a=0.28586$ ,  $b=0.28846$ , para el catálogo completo (tomada de Cuanalo-Vázquez, 2016).*

En la gráfica 3, Cuanalo-Vázquez (2016) revela, al igual que similares investigaciones (Samudio et al., 2014; Sotolongo-Costa & Posadas, 2004) la incapacidad de esta fórmula empírica para cubrir todo el rango de magnitudes, demostrando la limitación del modelo tanto para las magnitudes pequeñas  $m < 3$  (se debe a que los sismos de baja magnitud no alcanzan a ser registrados en todas las estaciones) como para las grandes  $m > 7.5$  (a que ocurren con poca frecuencia, por lo que muchas veces no están suficientemente cuantificados) la dependencia frecuencia-magnitud utilizando este modelo no se cumple (Samudio et al., 2014).

Recientemente, Sotolongo-Costa & Posadas, 2004) , proponen el Modelo Fragmento-Aspereza el cual modela la dinámica de terremotos desde la perspectiva de la física-estadística no extensiva tomando en cuenta las interacciones, caracterizadas por ser de largo alcance, de fragmentos y asperezas entre las fallas tectónicas en toda una región sísmica a diferencia de la Ley Gutenberg-Richter que se desarrolla sobre la distribución de la frecuencia acumulada del tamaño de los sismos, es decir, mediante observaciones estadísticas que no contemplan aspectos físicos involucrados en el mecanismo de generación de eventos sísmicos ni se encuentra conectada con principios o propiedades que constituyen a este tipo de sistemas altamente complejos.

### **2.3.2 Modelo Aspereza Auto afín**

Algunos modelos como el de bloques deslizantes como el de Burridge-Knopoff (1967) o el de Olami et al. (1992) a fin de explicar la dinámica entre las placas tectónicas se concentran en capturar los aspectos esenciales de la naturaleza al enfocarse en el deslizamiento relativo dos superficies de fallo para el desencadenamiento de energía. Entre estos, el propuesto por De Rubeis et al (1996) - SAM.

El modelo de Aspereza Auto Afín (Self-affine Asperity Model, SAM) presentado por Rubeis et al. (1996), describe la actividad sísmica considerando el mecanismo, reconocido como una de las principales causas de desencadenamiento de terremotos, de placas o bloques deslizándose relativamente uno sobre el otro a una velocidad constante. Propone que

la superficies interiores de las placas tectónicas no son lisas sino que presentan irregulares asperezas con irregulares formas, de modo que al interactuar un bloque con otro se originan puntos de colisión que obstruyen el movimiento relativo de las placas (figura 18). En estos puntos donde la morfología de la falla evita el deslizamiento libre se crea una acumulación de tensión, y por lo consiguiente, un aumento en la presión. Cuando la presión supera cierto umbral se produce una liberación de energía proporcional al tamaño de dicha aspereza es decir, un evento sísmico (figura 17).

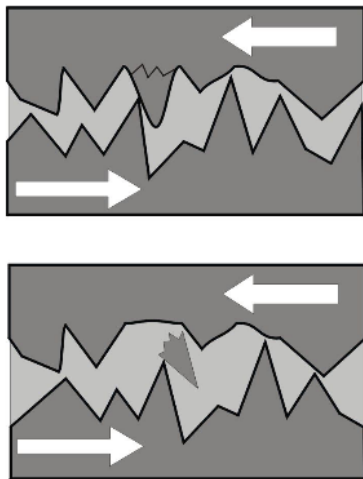


Figura 16. Ilustración del movimiento relativo de dos irregulares asperezas interactuando una con la otra. El límite de tensión producto de la acumulación de fricción entre la constante interacción de las estructuras crea una liberación de energía cuando la aspereza se rompe. Tomado de Sotolongo-Costa & Posadas (2002).

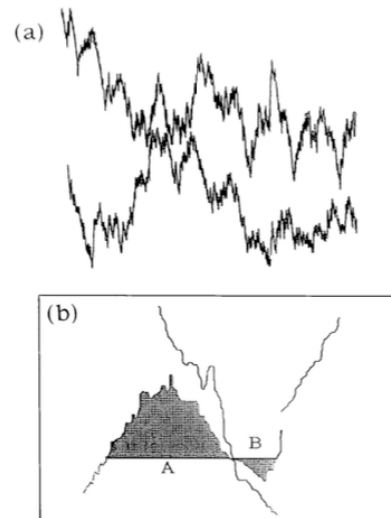


Figura 17. (a) Ejemplo de superficie irregular de los bloques. (b) Boceto de colisión de dos asperezas en una falla. Tomado de Cuanalo-Vázquez (2016).

### 2.3.3 Modelo Fragmento-Aspereza

Inspirados por el modelo **Aspereza Auto Afín** de Rubeis et al. (1996) surge un modelo que combina las irregularidades de las placas tectónicas con la distribución de los fragmentos entre ellas para reflejar la **distribución de energía** de los mismos (Sotolongo-Costa & Posadas, 2002). El modelo **Fragmento-Aspereza** presentado por Sotolongo-Costa & Posadas (2004) analiza el proceso sísmico desde la perspectiva de la física-estadística no extensiva, a través de la maximización de la entropía de Tsallis (Tsallis 1988). La idea fundamental de este

modelo consiste en **los residuos fragmentos** de material de la dinámica de ruptura entre los bloques tectónicos de irregulares formas y tamaños, que rellenan el espacio relativo entre los planos de falla irregular son un rol importante en la activación de eventos sísmicos.

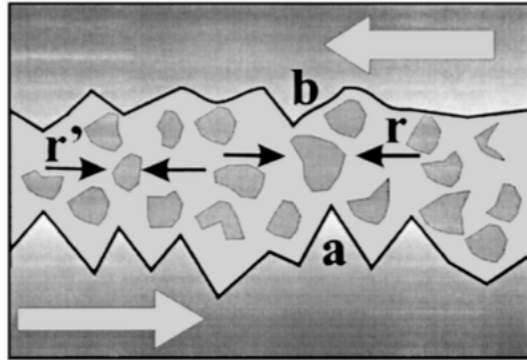


Figura 18. Boceto de distribución de los fragmentos entre bloques a y b. El modelo Fragmento-Aspereza fundamenta que la distribución de energía de terremotos se encuentra relacionado con el tamaño de los fragmentos rotos. Tomado de Sotolongo-Costa & Posadas (2004).

La constante fragmentación de las asperezas producto de la interacción las mismas crean fragmentos que rellenan el espacio que existe en ellas contribuyendo al mecanismo de activación de sismos por este mismo mecanismo (figura 19). La posición relativa de estos fragmentos pueden actuar, como rodamientos de rodillos que facilitan el desplazamiento relativo de las placas o bien obstruir el movimiento relativo de las mismas hasta un punto en que el incremento de tensión de la resistencia de los fragmentos interpuestos entre las asperezas se vence produciendo una liberación de energía que ocasiona la activación subsiguiente de un evento sísmico (Sotolongo-Costa & Posadas, 2004). Como los fragmentos grandes son más difíciles de liberar que los pequeños, se explica que esta energía  $\varepsilon$ , liberada durante un evento sísmico, es proporcional a al tamaño de los fragmentos  $r$  rotos (Sotolongo-Costa & Posadas, 2002). De tal manera que, como lo indica Samudio et al., 2014, la distribución de energía de terremotos ocasionados por esta mecánica de ruptura de rocas revela la distribución de los fragmentos en una determinada región.

$$\varepsilon \propto r, \quad (2)$$

Por otro lado, por la rotura intempestiva y violenta de dichos fragmentos que provienen de un fenómeno de interacción de largo alcance como se sugiere por Sotolongo-Costa et al.

(2000), se debe acudir a una descripción no extensiva como lo es la entropía propuesta por Constantino Tsallis (Tsallis, 1988): una herramienta adecuada para describir la función de distribución de tamaño de los fragmentos. Donde extremizando la entropía de Tsallis se consigue una función de distribución de energía de los sismos por mecanismo de ruptura a causa del fraccionamiento - un paradigma de la física extensiva - (Sotolongo-Costa & Posadas, 2002).

De modo que la distribución de energía de terremotos generados por este mecanismo de ruptura evidencia la distribución de tamaño de los fragmentos entre placas en un área, se debe obtener una función de distribución de fragmentos a partir del principio de máxima entropía de Tsallis  $S_q$ . Para este caso se utiliza la forma continua de la entropía de Tsallis:

$$S_q = k \frac{1 - \int p^q(\sigma) d\sigma}{q - 1}, \quad (3)$$

Donde  $p(\sigma)$  es la probabilidad de encontrar un fragmento de superficie relativa  $\sigma$  dentro de una falla,  $q$  es el índice entrópico de no extensividad de Tsallis - un parámetro que permite cuantificar la complejidad del sistema - y  $k$  es la constante de Boltzmann. No obstante, el sistema sólo podrá considerarse como complejo cuando  $q \neq 1$  (Sotolongo-Costa & Posadas, 2002). Es decir, la entropía de Tsallis  $S_q$  se transforma en la entropía de Boltzmann-Gibbs  $S_{BG}$  en el límite cuando se obtiene  $q \rightarrow 1$ .

Entonces, la función de distribución de tamaño de fragmentos (FSDF) se obtiene al extremizar  $S_q$  por el método de los multiplicadores de Lagrange - escritos como  $\alpha$  y  $\beta$  - mediante:

$$\Gamma = \frac{S_q}{k} + \alpha \int_0^\infty p(\sigma) d\sigma + \beta \int_0^\infty \sigma p^q(\sigma) d\sigma, \quad (4)$$

A fin de encontrar la probabilidad  $p(\sigma)$  la formulación de máxima entropía de Tsallis se encuentra sujeta a las restricciones dadas por las fórmulas (5) y (6). La primera: la normalización de la distribución de  $p(\sigma)$ ; y la segunda la condición del valor medio o valor esperado de  $q$ .



$$\int_0^{\infty} p(\sigma)d(\sigma) = 1, \quad (5)$$

$$\int_0^{\infty} \sigma p^{\sigma}(\sigma)d\sigma = \langle \sigma \rangle_q = \sigma_q, \quad (6)$$

Donde, la extremización de  $\Gamma$  conduce a la función de la distribución de los fragmentos entre las placas tectónicas (Sotolongo-Costa & Posadas, 2002):

$$p(\sigma)d\sigma = \frac{(2 - q)^{1/(2-q)}d\sigma}{[1 + (q - 1)(2 - q)(q - 1)/(2 - q)\sigma]^{1/(q-1)}}, \quad (7)$$

Además, se toma por Sotolongo-Costa & Posadas (2004) que la energía relativa liberada  $\varepsilon$  es proporcional al tamaño de los fragmentos rotos  $r$ , donde la expresión resultante para la función de distribución de energía de los sismos por mecanismo de ruptura se define como:

$$p(\varepsilon)d\varepsilon = \frac{C_1 \varepsilon d\varepsilon}{[1 + C_2 \varepsilon^2]^{1/(q-1)}}, \quad (8)$$

Donde la probabilidad de liberación de energía de un sismo  $p(\varepsilon) = \frac{n(\varepsilon)}{N}$ ,  $n(\varepsilon)$  expresa la cantidad sismos con energía  $\varepsilon$ ,  $N$  el número de eventos sísmicos en la región y con  $C_1 = (2 - q)^{1/(2-q)}$ ,  $C_2 = (q - 1)(2 - q)^{(q-1)/(2-q)}$ .

Puesto que la energía es una medida de magnitud, para utilizar la distribución de frecuencia-magnitud, el número acumulativo de sismos se calcula como la integral de  $\varepsilon$  a  $\infty$  de la ecuación (8):

$$N(\varepsilon >)N = \int_0^{\infty} p(\varepsilon)d(\varepsilon), \quad (9)$$

$N$  es la cantidad total de sismos y  $N(\varepsilon >)$  el total de sismos con energía superior al umbral  $\varepsilon$ . Entonces, al sustituir las expresiones (8) dentro de la (9) es posible calcular la integral de la misma.

$$m \propto \log(\varepsilon), \quad (10)$$

Finalmente, considerando que la magnitud es proporcional al logaritmo de la energía  $\varepsilon$  como lo indica la expresión (10) es posible obtener, para el número acumulado de sismos, la función de distribución de energía de sismos por mecanismo de ruptura - el modelo de Sotolongo-Costa & Posadas (2004) - de la siguiente manera:

$$\log(N(\geq m)) = \frac{(2-q)}{(1-q)} \times \log[1 + k_1(q-1) \times (2-q)^{(1-q)/(q-2)} \times 10^{2m}] \quad (11)$$

Donde,  $N$  es el número total de terremotos en la región,  $N(\geq m)$  es el número de eventos sísmicos con mayor magnitud que  $m$  - a esta cantidad o magnitud se le conoce como "excedencia"  $G(\geq m)$  en otros términos el número relativo acumulado de sismos con energía mayor a  $\varepsilon$  -,  $q$  es el parámetro de no extensividad de la entropía de Tsallis, y  $k$  es el parámetro de densidad de energía, es decir, la constante de proporción entre energía  $\varepsilon$  y el tamaño de los fragmentos rotos  $r$ . A medida que aumenta el valor del parámetro de no extensividad, el estado físico de la región se vuelve más inestable. Es decir, valores altos de  $q$  indican que la zona no se encuentra en equilibrio y por lo tanto más eventos sísmicos pueden esperarse.

Asimismo, es necesario destacar que recientemente otros autores, como Silva et al. (2006), Vilar et al. (2007), Telesca & Chen (2010) o Antonopoulos et al. (2014), han calculado una nueva función de distribución de energía Silva et al. (2006) con una formulación mediante la maximización de la entropía de Tsallis (Tsallis 1988) como lo es el presentado por Sotolongo-Costa & Posadas (2004) para modelar la dinámica de terremotos desde una formulación físico-estadística no extensiva tomando en cuenta las interacciones de fragmentos y asperezas entre las fallas tectónicas.

De manera general otras proporcionalidades son asumidas. Al maximizar la entropía de Tsallis  $S_q$  la última restricción (4) es cambiada siendo la energía liberada  $\varepsilon$  proporcional a la superficie de los fragmentos rotos  $r^3$  por medio de otra distribución (Abe, 2003) como consecuencia una nueva ley de escala entre la energía relativa liberada y el volumen de los fragmentos es introducida obteniendo muy buenas propiedades de ajuste en diversas regiones Antonopoulos et al. (2014).

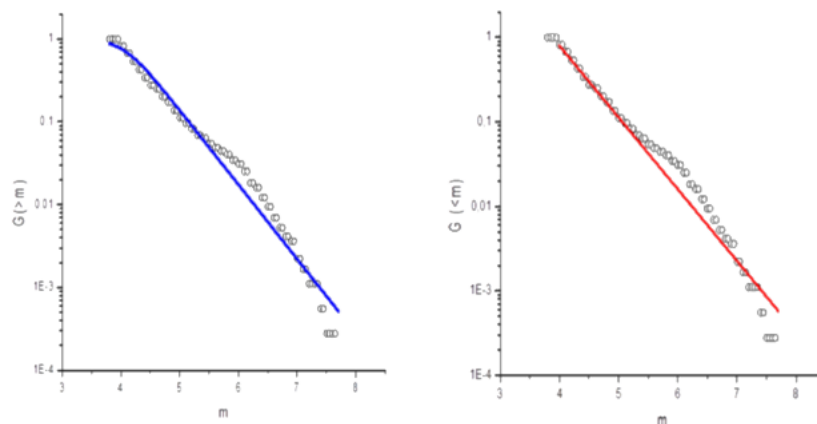
Sin embargo, aunque se obtienen valores similares para el parámetro de no extensividad  $q$ , el parámetro de densidad de energía  $k$  difiere por varios órdenes de magnitud.

Aunque los estudios en el área de la sismología empleando la entropía de Tsallis no serán discutidas a detalle aquí, la literatura en este aspecto es abundante y vale la pena mencionar la bibliografía más cercana al tema.

Por último cabe señalar que en investigaciones recientes (Samudio et al., 2014; Antonopoulos et al., 2014) se expone, al comparar los resultados de ajuste de catálogos depurados contra completos, que el modelo Fragmento-Aspereza realiza un mejor ajuste cuando no se eliminan los acontecimientos contribuyentes de liberación de energía faltante - como réplicas por la ruptura principal o eventos sísmicos debajo de cierto umbral de magnitud - responsables del incremento del valor de  $q$ .

Los valores de  $q$  obtenidos en casos donde se depuran registros de bajas magnitudes de los catálogos no pueden considerarse definitivos (Samudio et al., 2014). Para determinar la relación de excedencia-magnitud para los sismos estos deben ser tomados en cuenta y no ser eliminados del catálogo, pues la idea fundamental del modelo Fragmento-Aspereza es la activación de terremotos por ruptura fragmentos donde la interacción de los fragmentos y asperezas se cumple a lo largo de todo el catálogo incluyendo bajas y altas magnitudes, es decir, en todo el rango de magnitudes.

Como se muestra en la gráfica 4, la curva del modelo FA y la recta del modelo GR coinciden en gran parte del recorrido de la gráfica cuando se analizan catálogos depurados o incompletos.



Gráfica 4. Representación en escala logarítmica de los catálogos de Panamá por Samudio et al. (2014). La curva azul representa los valores obtenidos por el modelo Fragmento-Aspereza mientras que la línea roja grafica los de Gutenberg-Richter.

En trabajos recientes puede verse en detalle de excelentes resultados que se obtienen aplicando el modelo de Sotolongo-Costa & Posadas (2004), a la distribución de energía de terremotos de diferentes catálogos, proporcionando un excelente ajuste en varias regiones como California, Península Ibérica, y Andalucía (Sotolongo-Costa & Posadas, 2004), China (Sotolongo-Costa, 2012); aplicado incluso por otros investigadores en regiones como el Istmo de Panamá (Samudio et al., 2014); México y Oklahoma (Cuanalo-Vázquez, 2016); entre otros (Araujo, 2017).

En ellos, los **valores del parámetro de no extensividad  $q$  obtenidos se encuentran en el rango de 1.60 y 1.65** mientras que los del parámetro de densidad de energía  $k$  lo hacen entre  $5.73 \times 10^{-6}$  y  $3 \times 10^{-5}$ . Este modelo se ajusta a los datos observados en todo el rango de energías, donde otras funciones de distribuciones como la Gutenberg-Richter fallan.

Por ello, se propone aplicar el modelo Fragmento-Aspereza a los eventos registrados, por el Servicio Sismológico Nacional, en el territorio mexicano estratificando la Zona de Subducción y el Cinturón Volcánico Mexicano de acuerdo a los límites de Zúñiga et al., 1997 y Verma, 2015 para un análisis más detallado incluyendo el ajuste a ambas regiones de acuerdo a sus estratificaciones analizando este fenómeno desde la perspectiva de la física-estadística.

Obtener los valores de  $q$  y  $k$  nos permite validar las características de no extensividad que presenta cada región y conocer cuán lejos de la extensividad se encuentran las subdivisiones de cada una de ellas. Además, aplicar dicho modelo a las zonas de interés previamente mencionadas servirá como referencia a futuras hipótesis y criterios sobre los procesos geológicos de México en esas regiones.

# Capítulo 3. Metodología

Se propone aplicar el modelo Fragmento-Aspereza a los registros de eventos sísmicos en México. Particularmente, al Cinturón Volcánico Mexicano y a la Zona de Subducción del pacífico. Considerándolas regiones complejas, dado a que los sismos asociados con ella corresponden a la subducción de la placa de Rivera y Cocos por debajo de la Norteamericana y del Caribe; otra que corresponde a los asociados a movimientos de interplacas del Cinturón Volcánico Mexicano en la parte central.

El desarrollo de este trabajo se realiza de la siguiente manera:

1. Se obtienen los eventos sísmicos registrados en la base del catálogo de sismos Servicio Sismológico Nacional (SSN, 2021) de todo México, interrumpidamente a partir del año 1900: Se recopilan los datos (Fecha, Hora, Magnitud, Latitud, Longitud, Profundidad, Fecha UTC, Hora UTC y Referencia de localización) de los registros disponibles desde el año 1900 y 1986 a Marzo 2021.

Es importante resaltar que en otras investigaciones las magnitudes menores a cierto umbral no se analizan debido a la dificultad para identificar con certidumbre la energía medida en los instrumentos (Cuanalo-Vázquez, 2016). Sin embargo, de acuerdo a recientes investigaciones (Samudio et al., 2014 ; Antonopoulos et al., 2014) se indica que un registro completo de los sismos ocurridos en una región permite una imagen más clara de la liberación de energía y conocer cuán lejos de la extensividad se encuentran. Además, Sotolongo-Costa (2012) obtiene excelentes resultados de ajuste aplicando el modelo Fragmento-Aspereza al catálogo de China, el cual contiene registros de sismos con un umbral de magnitud mínima de  $m > 6$ . No obstante, recorta los datos en Sotolongo-Costa & Posadas (2004) donde por el umbral de sensibilidad de los instrumentos al medir los movimientos de la Tierra considera como detectables a los eventos con magnitud  $m \geq 3$ .

Por esta razón, se realiza el ajuste del modelo Fragmento-Aspereza al catálogo de eventos sísmicos del SSN (2021) en su totalidad. Además, se incluyen ajustes con umbral de magnitud de corte mínima de 3 y con umbral de magnitud máxima de 6.

2. Se preparan los conjuntos de datos por regiones de interés - Zona de Subducción (Zúñiga et al., 1997) y Cinturón Volcánico Mexicano (Verma, 2015).
3. Se calcula el parámetro no extensividad  $q$  y el parámetro de densidad  $k$  del modelo Fragmento-Aspereza para cada región mencionada previamente.
4. Se estratifican cada una de las anteriores regiones de acuerdo a la literatura (Zúñiga et al., 1997; Verma, 2015).
5. Se realiza un estudio comparativo de los parámetros ajustados del modelo Fragmento-Aspereza para cada subregión.
6. Se procesan los datos: primero se genera el conteo de frecuencias absolutas por magnitud. Posteriormente se genera la frecuencia acumulada, que es la suma de las frecuencias absolutas de todos los valores inferiores o iguales al valor considerado, de las mismas. A continuación, se normaliza dicha frecuencia acumulada de 0 a 1 (restricción del modelo Fragmento-Aspereza (3)). Después, se genera la excedencia de los datos normalizados. Luego, se representa el ajuste tanto en escala logarítmica como lineal para ilustrar la bondad del ajuste utilizando el algoritmo no lineal de mínimos cuadrados de Levenberg-Marquadt, por ser el método más usado debido a sus propiedades, utilizando la librería *Scipy*.

El coeficiente de  $R^2$ , determinado por la diferencia de la suma de los cuadrados de los residuos entre la curva de ajuste, los puntos de datos del catálogo y el promedio de éstos, nos indicará la bondad de ajuste. Por lo tanto, cuanto más cerca está  $R^2$  de 1, mejor es el ajuste de los datos por el modelo.

7. Se toma como valores iniciales del estudios previo de Cuanalo-Vázquez (2016) al territorio mexicano ( $q = 1.61$  y  $k=7.3363e-7$ ) para realizar el ajuste de los parámetros  $q$  y  $k$ , por: umbral de magnitud mínima, umbral de magnitud máxima, sin umbral de corte y orden de magnitud para cada zona de investigación usando el modelo Fragmento-Aspereza.
8. Se construyen los resultados en forma de tablas y gráficas producto del ajuste para cada conjunto de datos.

# Capítulo 4. Resultados

## 4.1 Resultados estadísticos

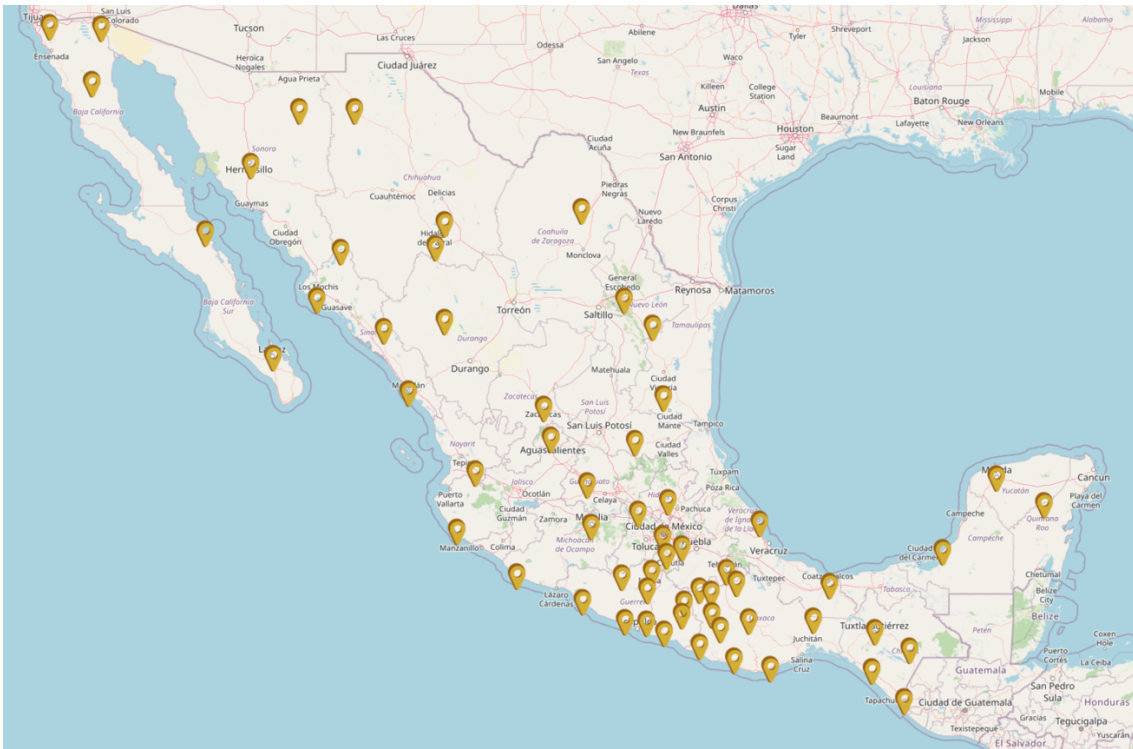
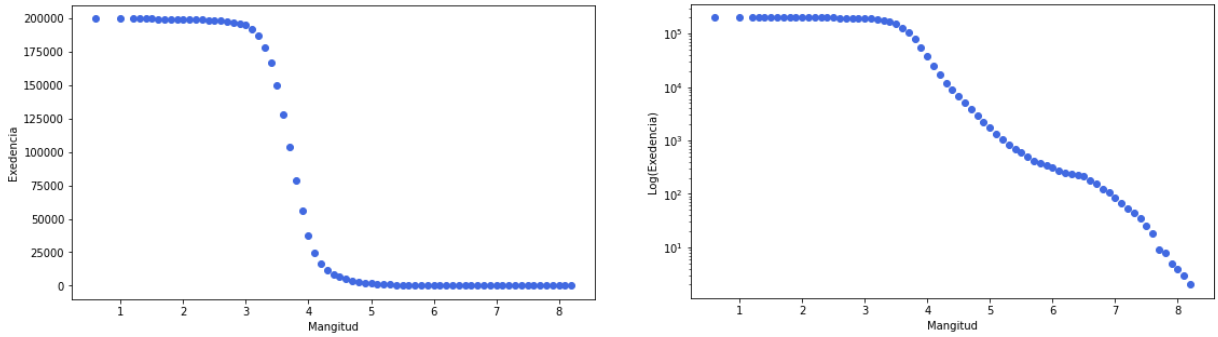


Figura 19. Mapa de la red de Banda Ancha del SSN (2021) distribuida por toda la República Mexicana para el monitoreo continuo de eventos sísmicos.

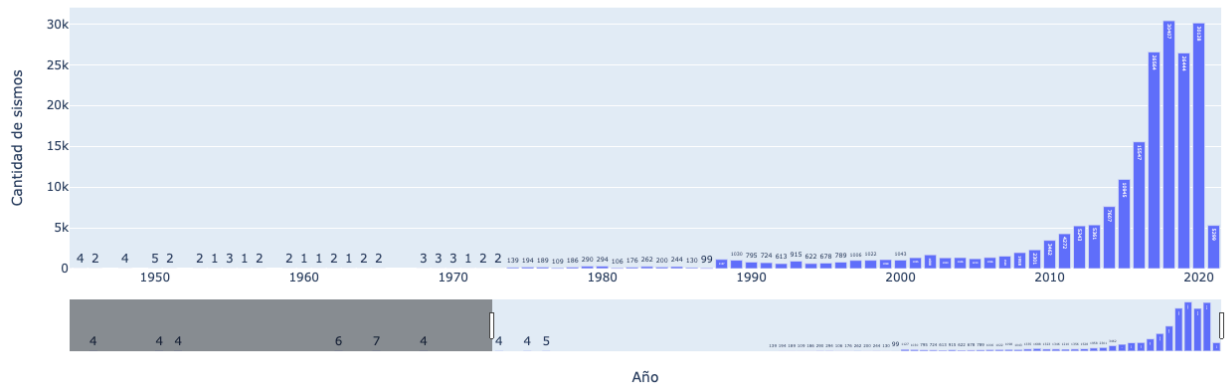
Los datos para este estudio se obtienen del catálogo sísmico del Servicio Sismológico Nacional (SSN, 2021) proveniente de 61 estaciones sismológicas (figura 20). Este catálogo comprende los eventos sísmicos registrados en el territorio mexicano desde el año 1900 hasta el 10 de Marzo del 2021. Contiene 217'189 registros con valores de magnitud entre 0.6 y 8.2. La distribución acumulada estos sismos en función de su excedencia se muestra en la gráfica 5, se observa que predominan los eventos sísmicos con magnitud mayor a  $m \geq 4$  y los de mayor magnitud a  $m \geq 7.5$  son escasos.



Gráfica 5. Relación de la excedencia y la magnitud de los eventos sísmicos en el territorio mexicano. Del lado izquierdo en escala lineal, del derecho, en escala logarítmica.

El número acumulativo de eventos registrados ha aumentado desde que se instalaron los primeros instrumentos de medición (gráfica 6), siendo los últimos 4 años los que contienen la mayor cantidad de sismos registrados. 2018, 2020, 2017 y 2019 con 30'407, 30'128, 26'564, 26'444 respectivamente.

#### 4.1.2 Estadísticas del territorio mexicano

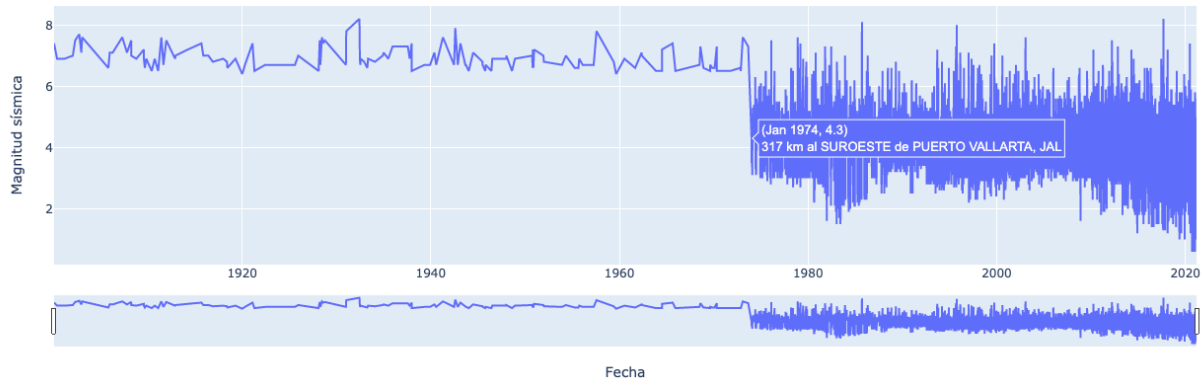


Gráfica 6. Número acumulativo de eventos registrados por año SSN (2021) en el territorio mexicano. El año 2020 contiene la mayor número de registros con más de treinta mil eventos sísmicos.

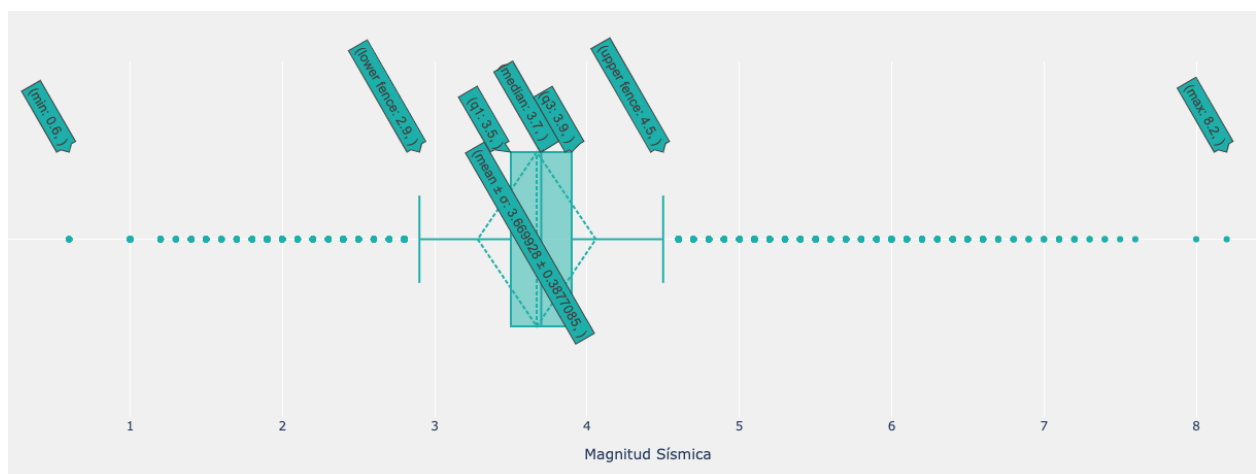
En el catálogo de SSN, los registros de sismos con magnitudes  $m \geq 3.0$  se incorporan a partir del año 1974. Además a partir del terremoto de 8.1 ocurrido en Septiembre de 1985, que causó daños en la ciudad de México sin precedentes, que la red de aceleración, el monitoreo y la calibración de estos instrumentos en la región fue fortalecida (Pacheco y Singh, 2010b) además de instalarse nuevos aparatos de medición. Por ello, se aprecia un marcado



incremento de los registros de la sismicidad a partir de los años 1974 y 1986 principalmente (gráfica 7).



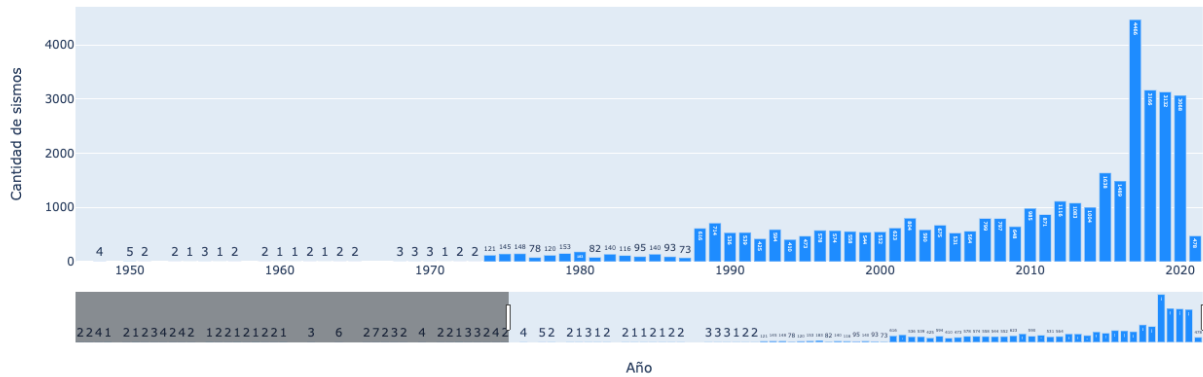
Gráfica 7. Se muestra la magnitud sísmica de los eventos registrados por el SSN (2021) a través del tiempo desde el año 1900.



Gráfica 8. Datos estadísticos de los eventos ocurridos en el territorio nacional. Se observa una magnitud promedio de  $\sim 3.66$  con una desviación estándar de  $\sim 0.387$ , una mediana de 3.7, un cuartil superior con un valor de 4.5, en tanto que el opuesto obtiene  $m = 2.9$ .

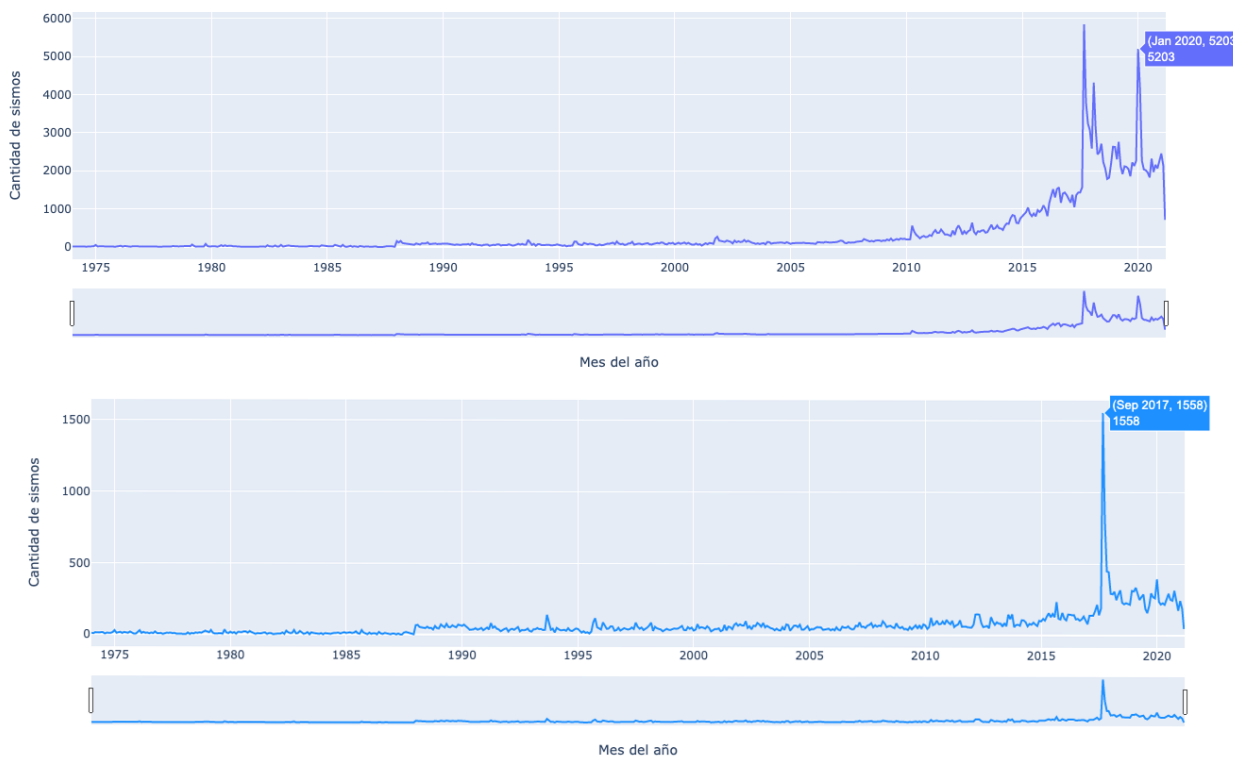
Al realizar la depuración de los eventos registrados con una magnitud inferiores a  $m \leq 4$ , a partir del año de 1986, por la incertidumbre de medición de los instrumentos (gráfica 9). Se nota una disminución considerable en el total de registros acumulados por año en comparación con la totalidad de los mismos en la gráfica 6. El año que contiene el mayor número acumulativo de eventos es el 2017 con 4'466, esto es, aproximadamente el 16.8% de los registrados. Los que prosiguen son del 2018 al 2020 con 3'166, 3'132, 3'068 ordenadamente. La cantidad de eventos en la base de datos previo al año 2015 no superan 1'116 registros, es

decir, menos de la mitad de los registros del último lustro. Lo mismo sucede previo a los años 1988 y 1974 donde el número de eventos almacenados en la base de datos del SSN se reduce drásticamente.



Gráfica 9. Número acumulado de sismos registrados por mes con magnitud  $m \geq 4$  desde 1986.

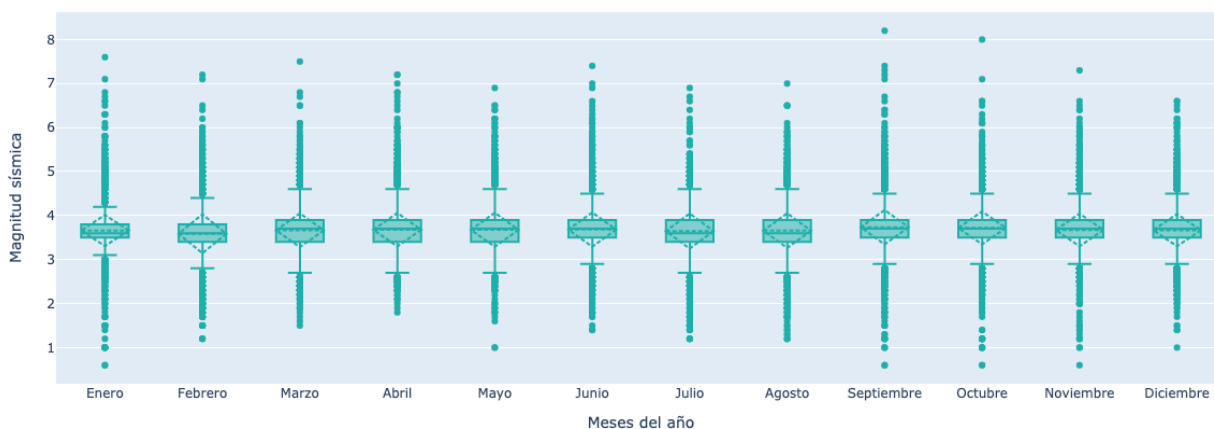
De igual manera se contabilizan los eventos registrados por mes (gráfica 9), el mes de Septiembre del 2017 contiene la mayor cantidad de sismos registrados con 5'845. Le siguen los meses Enero de 2020 y Febrero de 2018 (con 5'203 y 4'316 eventos registrados).



Gráfica 10. Número acumulativo de eventos registrados por mes (gráfica superior) y sismos registrados por mes con magnitud  $\geq 4$  (gráfica inferior) en el territorio mexicano.

También, se depuran los catálogos para realizar el conteo de los sismos con magnitudes mayores a  $m \geq 4$ . El mes que contiene el mayor número acumulativo de registros de manera trascendente es Septiembre 2017 con 1'558 eventos. Los meses posteriores no superan 394 registros y los anteriores la cantidad de 234.

Los datos estadísticos de cada mes, como se observa en la gráfica 11 y la tabla 1, muestran un promedio en la magnitud de los eventos sísmicos en el rango de 3.58 - 3.73 con una desviación estándar variable inferiores a 0.39. Además, si bien los meses en los que se han presentado los eventos sísmicos más devastadores son Septiembre y Noviembre, los que registran una menor menor magnitud en los de mayor liberación de energía son Julio y Mayo con  $m = 6.9$ .



Gráfica 11. Distribución de datos estadísticos por mes en el territorio mexicano desde el año 1986.

**Tabla 1**

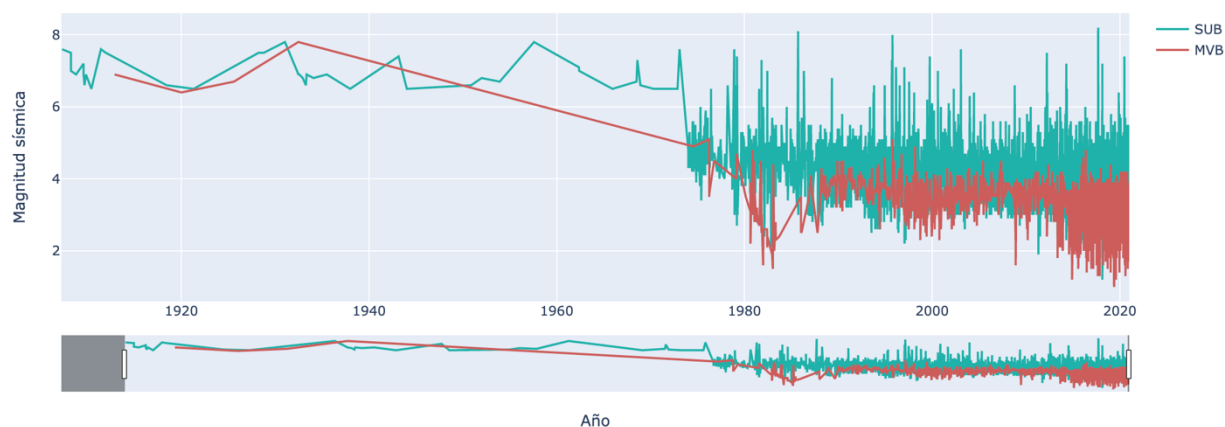
*Datos Estadísticos de la Distribución de Magnitudes Por Mes Para el Territorio Mexicano Desde el Año 1986*

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Noviembre	Diciembre
Máximo	7.6	7.2	7.5	7.2	6.9	7.4	6.9	7	8.2	8	7.3
Q3	3.8	3.8	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
Mediana	3.6	3.6	3.7	3.7	3.7	3.7	3.6	3.6	3.7	3.7	3.7
Promedio	3.666	3.586	3.666	3.667	3.676	3.681	3.646	3.657	3.734	3.718	3.672
	$\pm 0.352$	$\pm 0.442$	$\pm 0.383$	$\pm 0.379$	$\pm 0.386$	$\pm 0.388$	$\pm 0.397$	$\pm 0.393$	$\pm 0.39$	$\pm 0.372$	$\pm 0.37$

Q1	3.5	3.4	3.4	3.4	3.4	3.5	3.4	3.4	3.5	3.5	3.5
Mínimo	0.6	1.2	1.5	1.8	1	1.4	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6

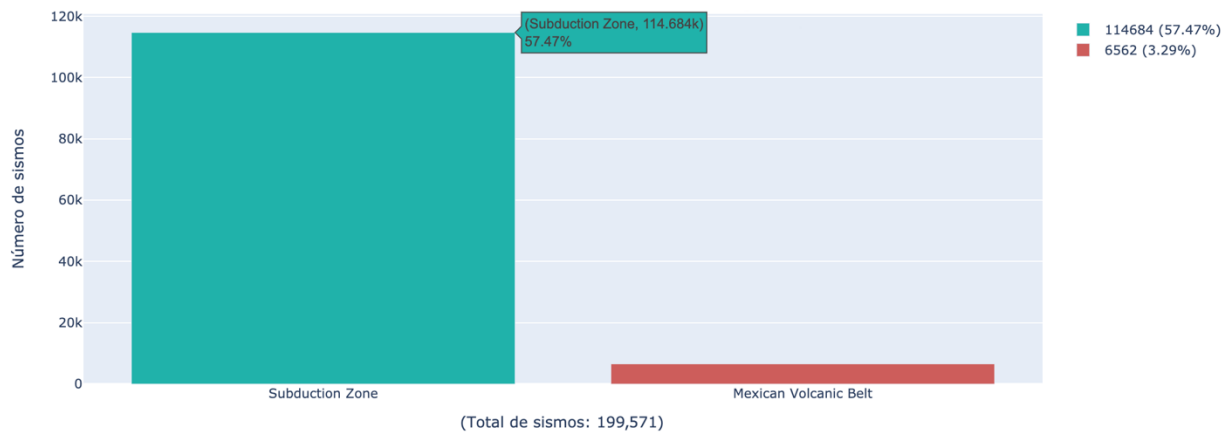
#### 4.1.2 Estadísticas del Cinturón Volcánico Mexicano y la Zona de Subducción

Los registros del SSN se separan ahora en dos conjuntos de acuerdo a su localidad: 6,562 son registrados con epicentro en el Cinturón Volcánico Mexicano y 114,684 de la Zona de Subducción del pacífico. En el histograma XX se visualiza la magnitud de los eventos registrados en cada zona a través del tiempo. Como se observa en la gráfica 12, por la capacidad de detección de la red sismológica, la magnitud mínima para el catálogo antes del período 1974-2021 es  $m \geq 6.4$ .



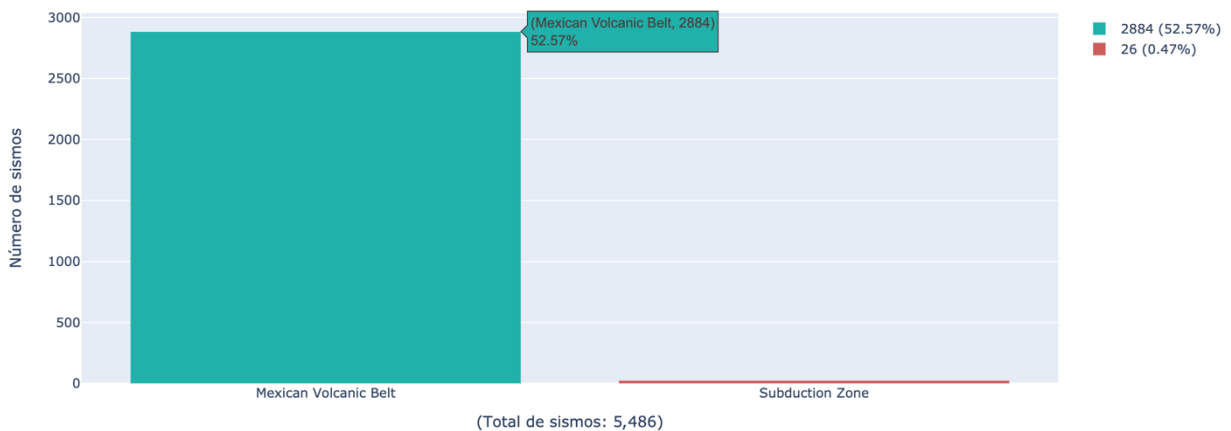
Gráfica 12. Histogramas con magnitud de los eventos en relación con el tiempo de ambas zonas de investigación del territorio mexicano: los rojos representan la zona del Cinturón Volcánico Mexicano; los verdes, la zona de Subducción.

De los 217,189 eventos registrados en el territorio nacional desde el año 1900, los ocurridos en la zona de Subducción representan más de la mitad de ellos, con un 57.47% con respecto a la totalidad de los mismos. Por otro lado, los suscitados en el Cinturón Volcánico Mexicano representan el 3.29% con un total de 6,562 eventos (gráfica 13).



Gráfica 13. Distribución de eventos sísmicos en cada zona de investigación con relación al total de registrados desde 1986.

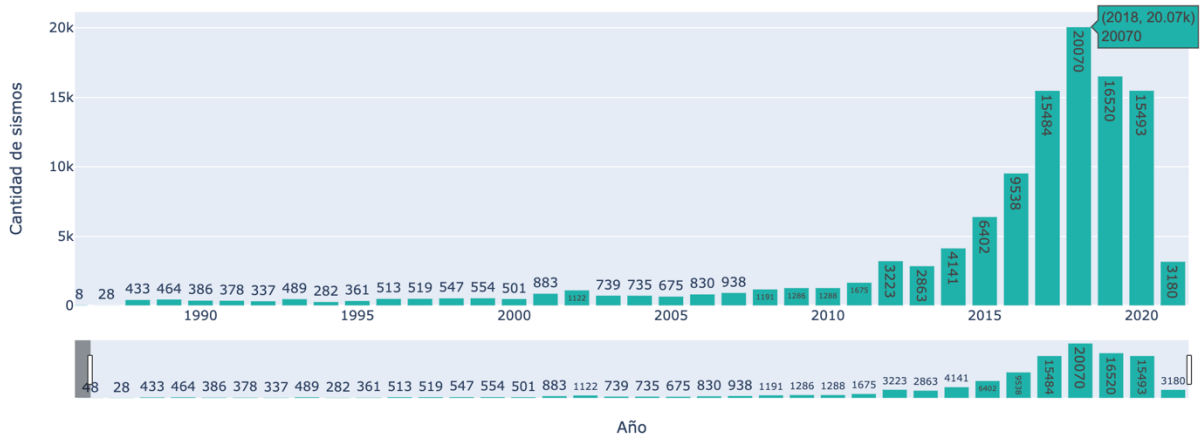
Al eliminar los registros con magnitudes menores a 4.5, debido al umbral de incertidumbre en la medición de los datos tomando como referencia a Mendoza Ponce (2012), los sismos con epicentro en la zona de Subducción representan el 52.57% del total de los ocurridos en el territorio nacional. En comparación con los localizados en el Cinturón Volcánico Mexicano lo hacen con menos del uno por ciento, puntualmente, el 0.47%.



Gráfica 14. Distribución de eventos sísmicos con magnitud  $m \geq 4$  en cada zona de investigación con relación al total de registrados desde 1986.

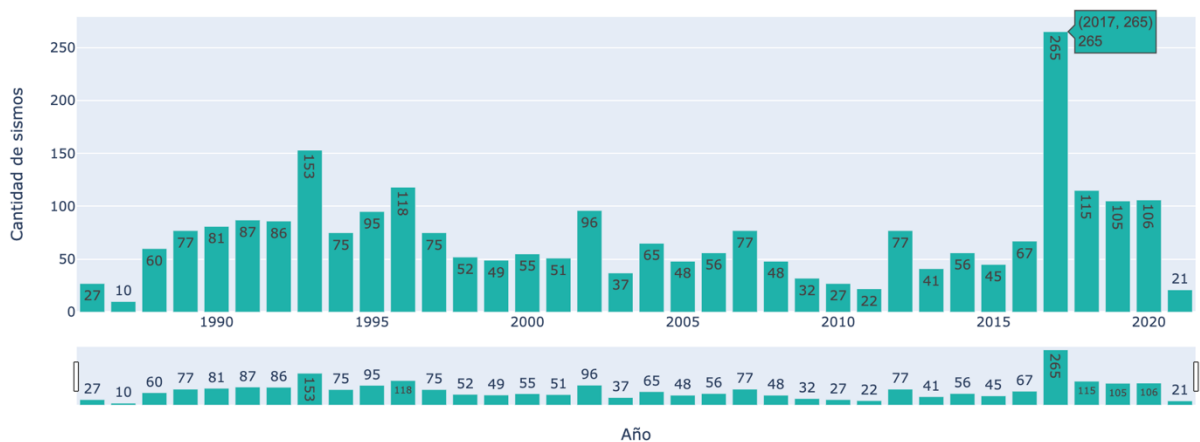
Para los datos analizados de la zona de Subducción, en el año 2018 se registra la mayor cantidad de eventos sísmicos de toda historia con 20'070. El segundo lugar es ocupado por el 2019 con un total de 16'520 eventos. Es necesario enfatizar que la disminución de los eventos registrados posteriores al anterior indica que a pesar de la mejora en la calibración de los instrumentos de medición, el número de sismos ocurridos en la zona pacífica varía

dependiendo del año y no aumenta exponencialmente producto de la mejora de los mismos.



Gráfica 15. Número acumulado de eventos registrados por año en la zona de Subducción mexicana.

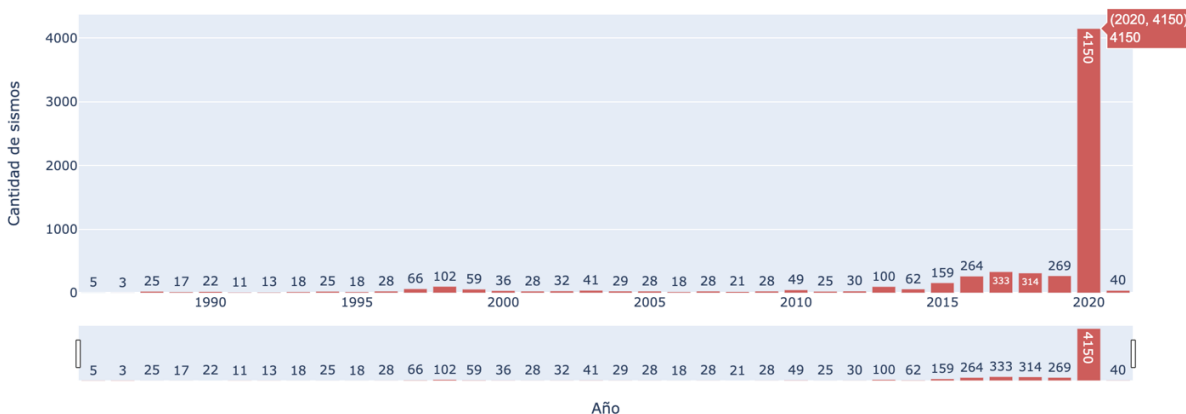
De igual manera, los datos de esta región se limitan a los que tengan una magnitud  $m \geq 4.5$  como se muestra en la gráfica 16. El año que contiene el mayor número de eventos es el 2017 con 265 registros. A diferencia de los datos mostrados anteriormente donde se observa una variación de cantidades totales por año disminuyendo el número acumulado de sismos después de un año máximo de registros, por ejemplo, después del año 2017 la cantidad de eventos registrados son 115.



Gráfica 16. Número acumulado de sismos registrados con magnitud  $m \geq 4$  por año en la zona de Subducción mexicana.

Por el contrario, el total de registros por año, cuyo epicentro se localiza en la zona del Cinturón Volcánico Mexicano, del 2020 supera el número de registros previos. El año con mayor número de eventos por año fue el 2017 con 333 eventos (gráfica 17).

Cantidad de sismos por año - Cinturón Volcánico Mexicano



Gráfica 17. Número acumulado de sismos registrados por año con epicentro en la Faja Volcánica Mexicana.

En la figura 21 se muestra un mapa de calor del año 2020 para la zona del Cinturón Volcánico Mexicano delimitado de acuerdo con Verma, (2015). Se observa una cantidad de eventos sísmicos en varios puntos de la zona volcánica, especialmente próximo a: el Volcán de Colima (Jalisco) y el Pico de Tancítaro (Michoacán). También se presentan muestras de calor en Mixquiahuala de Juárez (Hidalgo), Jilotzingo (Estado de México), los domos Las Derrumbadas y Yecuatla (Veracruz).

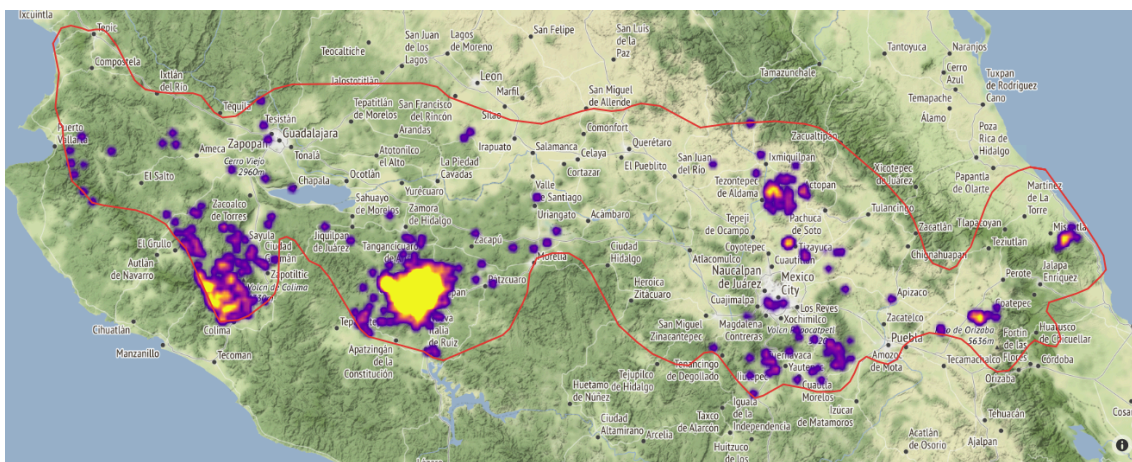
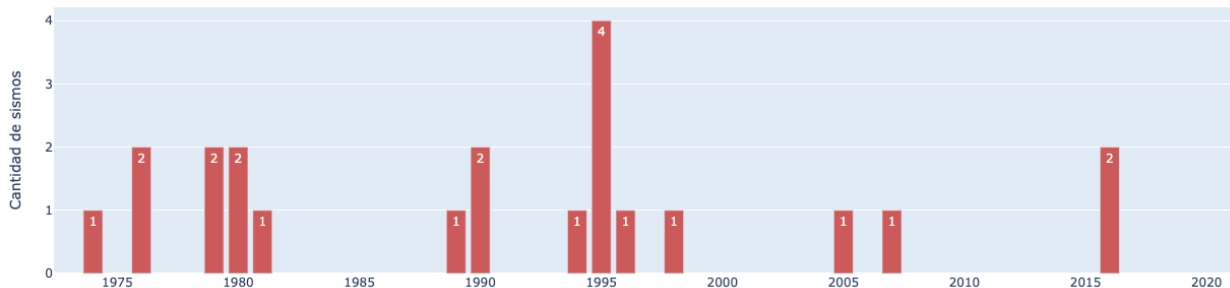


Figura 20. Mapa de concentración de eventos sísmicos ocurridos en el cinturón Volcánico Mexicano durante el año 2020. Se observa una agrupación de sismos cerca de los volcanes de los estados de Jalisco, Michoacán, Ciudad de México y Veracruz.

En el apéndice 1 se presenta un mapa de calor del año 2020 muestra una acumulación de eventos sísmicos en la región de Uruapan - Pico de Tancítaro producto del enjambre sísmico durante los primeros meses del año de acuerdo con SSN (2020, marzo).

Así mismo, en la gráfica 18 se establece un umbral de magnitud mínima de  $m = 4.5$  para la zona de la Faja Volcánica Mexicana, se observa una ausencia de eventos por encima de este umbral. El año con mayor número de sismos es 1995, le siguen 2016 y 1990. Nótese que los eventos eventos ocurridos durante el enjambre sísmico de Michoacán en el año 2020 no se representan puesto que la magnitud máxima registrada fue  $m = 4.2$ .

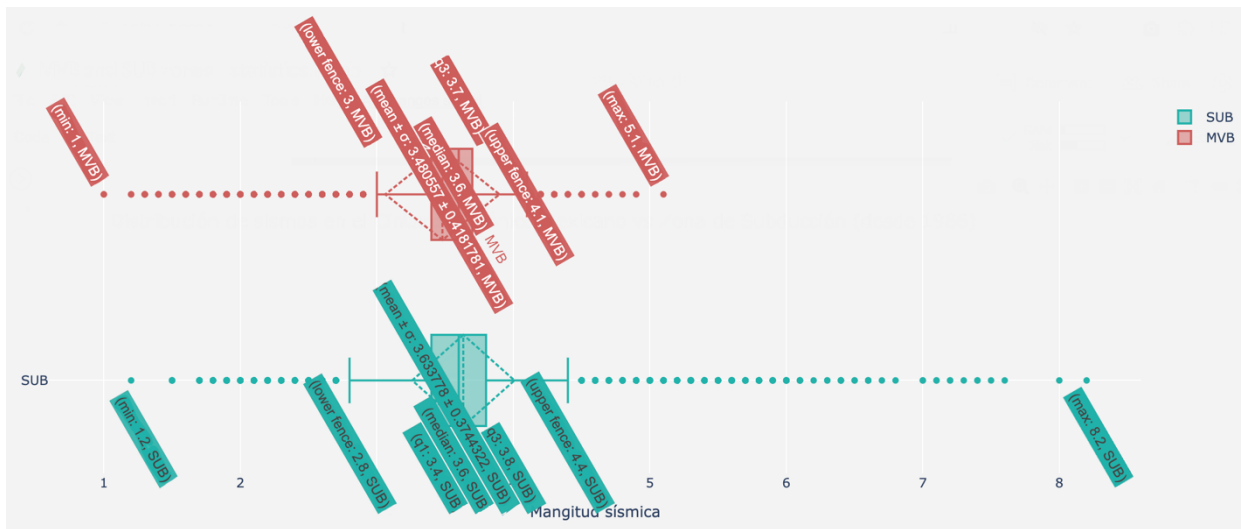


Gráfica 18. Número acumulado de sismos por año con magnitud  $m \geq 4.5$  con epicentro en el Cinturón Volcánico Mexicano.

Los datos estadísticos de la Zona de Subducción se comparan con los de la Faja Volcánica como se observa en la gráfica 19. Mientras que la magnitud máxima registrada en la zona de Subducción es  $m = 8.2$ , para la zona de los volcanes es  $m = 5.1$ . Así mismo, el promedio de los sismos que ocurren en el pacífico es  $m = 3.633778$  con una desviación estándar de  $\pm 0.3744322$ , para la zona central del territorio nacional la magnitud promedio de ellos es  $m = 3.48057$  con una desviación estándar de  $\pm 0.4181781$ . Además, en ambas regiones la media es  $m = 3.6$ .

Es preciso señalar que en la Zona de Subducción los instrumentos de medición no han registrado eventos con una magnitud inferior a  $m < 1.2$ , en comparación con la Zona Volcánica donde la magnitud mínima registrada es  $m = 1$ .

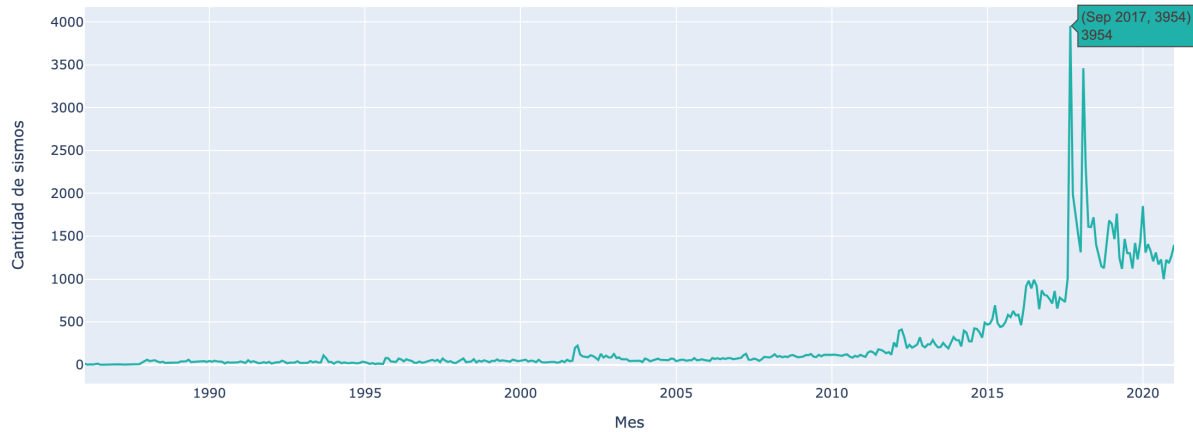




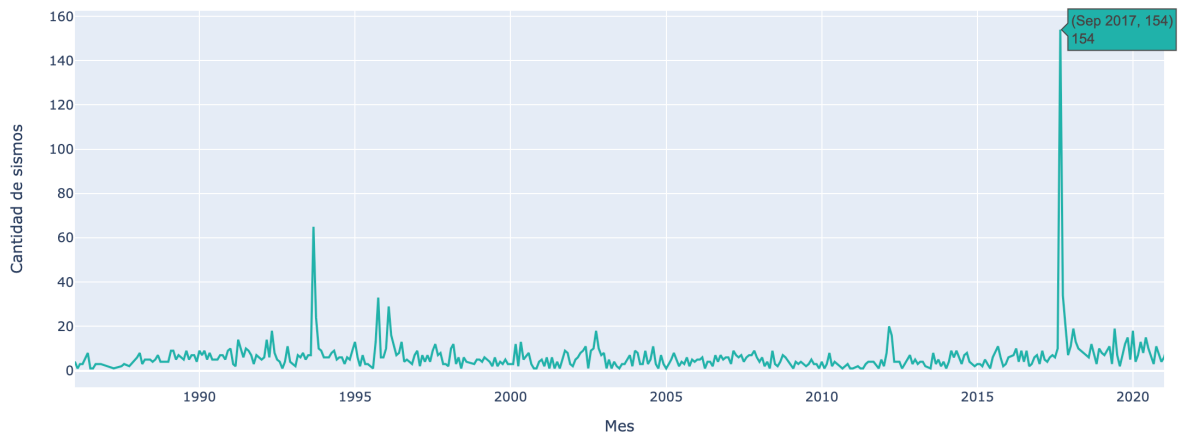
Gráfica 19. Datos estadísticos de ambas zonas de investigación, zona de Subducción y Cinturón Volcánico Mexicano, de los registros a partir del año 1986.

De mismo modo se contabilizan los eventos registrados por mes para cada zona. Para la Zona de Subducción del Pacífico mexicano, como se muestra en la gráfica 20, el mes de Septiembre del 2017 presenta la mayor cantidad de eventos registrados con 3'954. Le subsigue el mes de Febrero de 2018 con 3'461 registros. De mismo modo, se eliminan los eventos cuya magnitud se encuentre por debajo del umbral de  $m = 4.5$ . El mes con mayor número de eventos mayores a este umbral es Septiembre de 2017 con 154 eventos, continúan los meses de Septiembre de 1993 y Octubre de 1995; con 65 y 33 registros correspondientemente.

Cantidad de sismos por mes - Zona de Subducción (desde 1986)

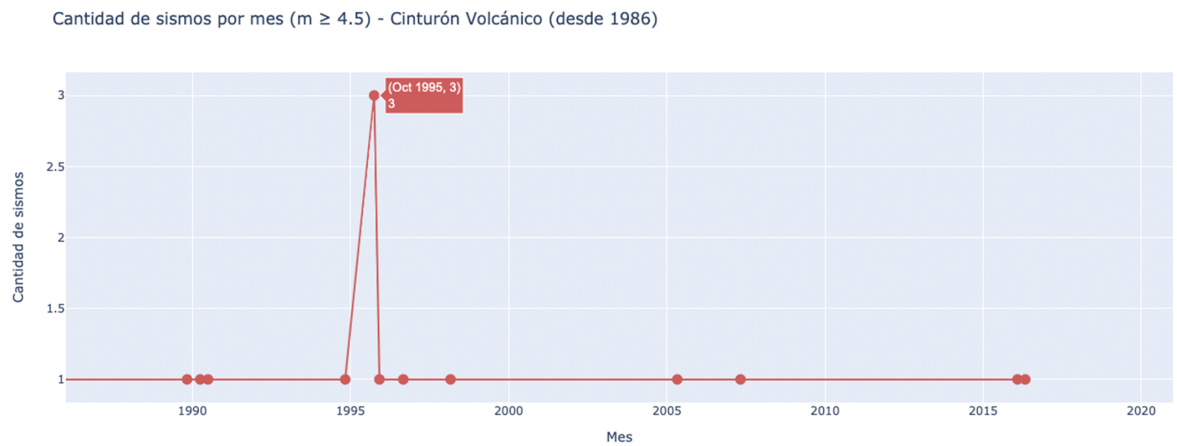
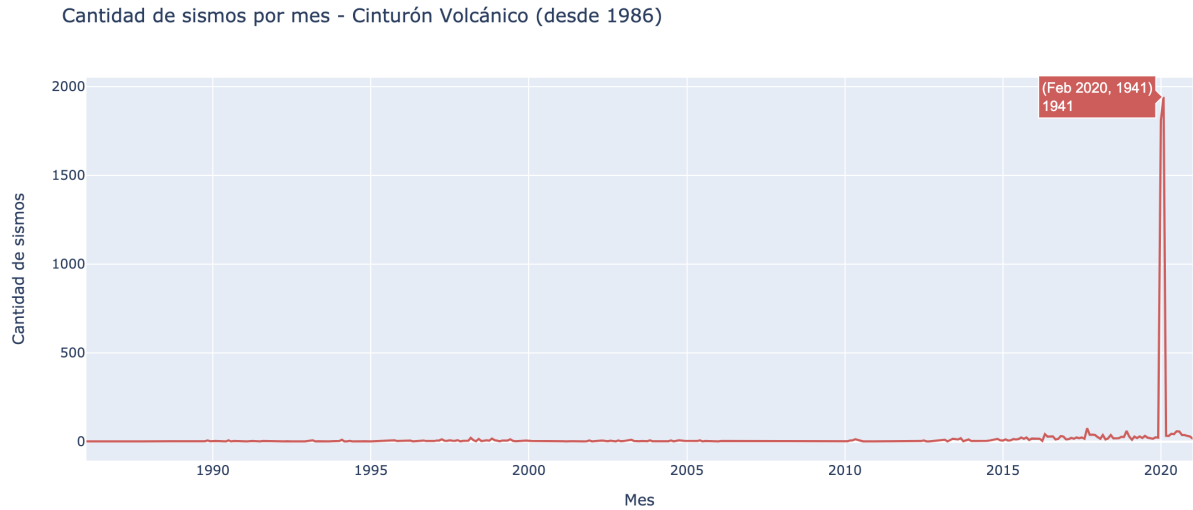


Cantidad de sismos por mes ( $m \geq 4.5$ ) - Zona de Subducción (desde 1986)



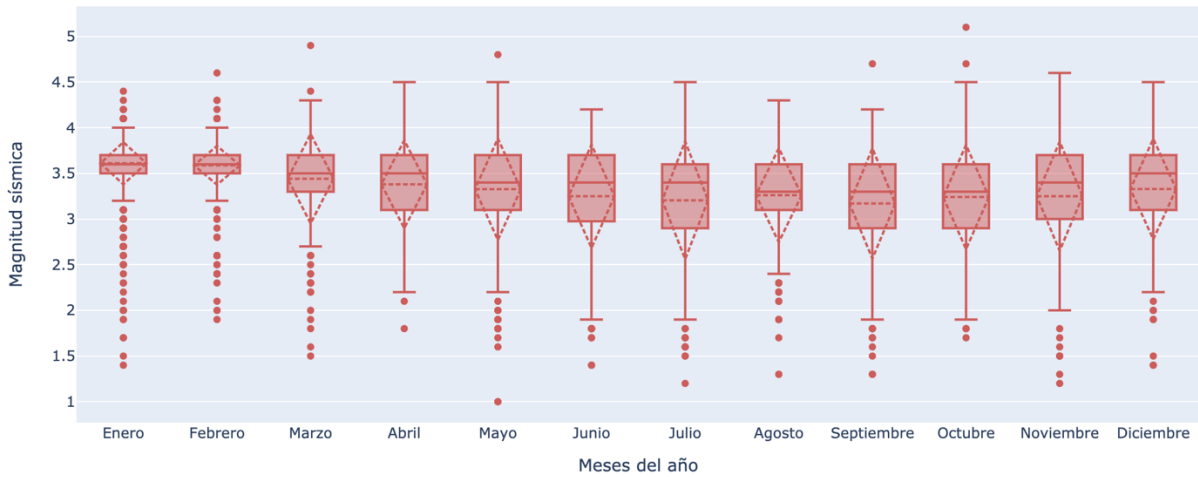
Gráfica 20. Número acumulativo de sismos por mes con epicentro registrados en la Zona de Subducción desde 1986.

Por el contrario, como se expone en la gráfica 21, el mayor número de registros por año para la Zona del Cinturón Volcánico Mexicano sucede en el mes de Febrero de 2020 con 1'941, anteriores a esta fecha, el máximo anual era 75 en Septiembre de 2017. Adicionalmente, al eliminarse los registros con magnitudes por encima del umbral de  $m = 4.5$ , el mes de Octubre de 1995 contiene 3 eventos con magnitudes mayores a dicho umbral, le siguen los que registran solamente un evento mayor como: Mayo de 2016, Febrero de 2016, Mayo de 2007, Mayo de 2005, y Marzo de 1998, por mencionar los últimos 5 eventos hacia el pasado.



Gráfica 21. Número acumulativo de sismos por mes con epicentro registrados en la Faja Volcánica Mexicana desde 1986.

Entonces, se realizan las estadísticas de la Zona de Subducción aunado a las de la Faja Volcánica Mexicana por mes, de rojo en la gráfica 23 y en la Tabla 3 las de la Zona SUB; con un color verde en la gráfica 22 y Tabla 2 las del MVB. Para la zona MVB la magnitud en promedio de los eventos ocurridos en esta región se encuentra en un rango de  $m = 3.205 \pm 0.645$  (Julio) a  $m = 3.61 \pm 0.230$  (Enero); con una Mediana mínima en los meses de Agosto, Septiembre y Octubre, y una máxima de 3.6 en Enero y Febrero. Además, la magnitud máxima se registra en el mes de Octubre con  $m = 5.1$  y la mínima en Mayo con  $m = 1$ .



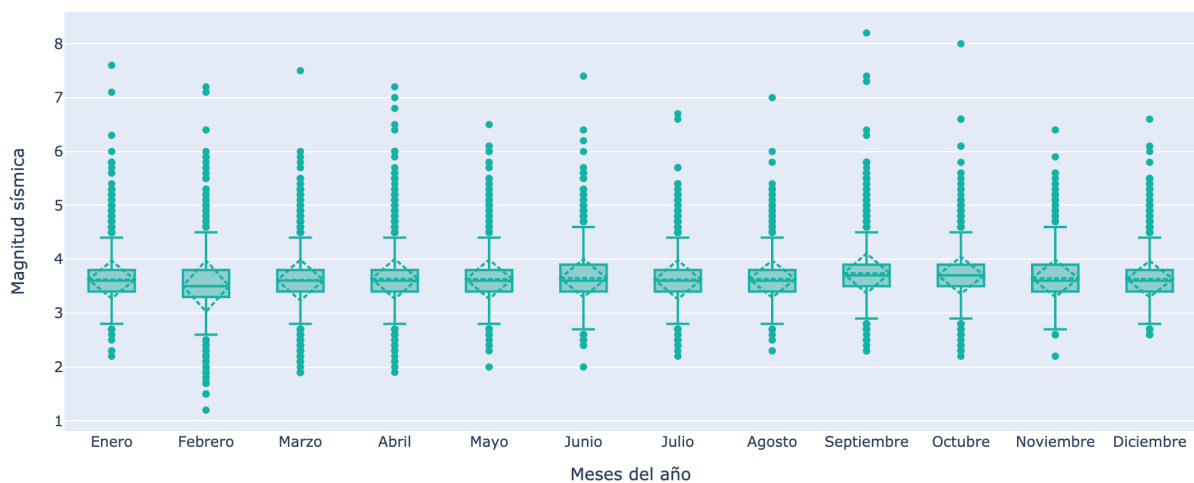
Gráfica 22. Distribución de datos estadísticos por mes en el Cinturón Volcánico Mexicano desde el año 1986.

Tabla 2

Datos estadísticos por mes para el Cinturón Volcánico Mexicano desde el año 1986

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem bre	Octubre	Noviemb re	Diciembr e
Máximo	4.4	4.6	4.9	4.5	4.8	4.2	4.5	4.3	4.7	5.1	4.6	4.5
Q3	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.6	3.6	3.6	3.6	3.7	3.7
Mediana	3.6	3.6	3.5	3.5	3.4	3.4	3.4	3.3	3.3	3.3	3.4	3.5
Promedi o	3.610 $\pm 0.230$	3.588 $\pm 0.212$	3.441 $\pm 0.489$	3.380 $\pm 0.480$	3.326 $\pm 0.555$	3.249 $\pm 0.565$	3.205 $\pm 0.645$	3.261 $\pm 0.513$	3.170 $\pm 0.603$	3.240 $\pm 0.570$	3.250 $\pm 0.597$	3.328 $\pm 0.549$
Q1	3.5	3.5	3.3	3.1	3.1	2.975	2.9	3.1	2.9	2.9	3	3.1
Mínimo	1.4	1.9	1.5	1.8	1	1.4	1.2	1.3	1.3	1.7	1.2	1.4

Para la zona del pacífico SUB, la magnitud en promedio de los eventos suscitados en el área están en el rango de  $m = 3.502 \pm 0.475$  (Febrero) a  $m = 3.738 \pm 0.368$  (Septiembre); con una Mediana mínima de 3.5 (en Agosto), y una máxima de 3.7 en los meses de Septiembre y Octubre. Asimismo, el evento con la magnitud máxima sucede en mes de Septiembre con  $m = 8.2$ , y la mínima con  $m = 1.2$  en Febrero .



Gráfica 23. Distribución de datos estadísticos por mes en la Zona de Subducción desde el año 1986.

**Tabla 3**

Datos estadísticos de la distribución de magnitudes por mes para la Zona de Subducción desde el año 1986

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Máximo	7.6	7.2	7.5	7.2	6.5	7.4	6.7	7	8.2	8	6.4	6.6
Q3	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.9	3.8	3.8	3.9	3.9	3.9	3.8
Mediana	3.6	3.5	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.7	3.7	3.6	3.6
	3.621	3.502	3.611	3.635	3.628	3.649	3.619	3.632	3.738	3.701	3.645	3.632
Promedio	±0.349	±0.475	±0.379	±0.369	±0.364	±0.355	±0.360	±0.342	±0.368	±0.345	±0.347	±0.334
Q1	3.4	3.3	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.5	3.5	3.4	3.4
Mínimo	2.2	1.2	1.9	1.9	2	2	2.2	2.3	2.3	2.2	2.2	2.6

## 4.2 Resultados del ajuste utilizando el modelo Fragmento-Aspereza

Se procesa el catálogo sísmico actualizado hasta marzo de 2021 compilados por el Servicio Sismológico Nacional SSN (2021) el cual consta de 217'189 sismos desde el año 1900, 199'406 sismos desde 1974 y 197'015 desde 1986. En la figura 22 se presenta un mapa donde se muestra la actividad sísmica de la región delimitadas por el área de estudio, el color representa la intensidad de la energía de los sismos.

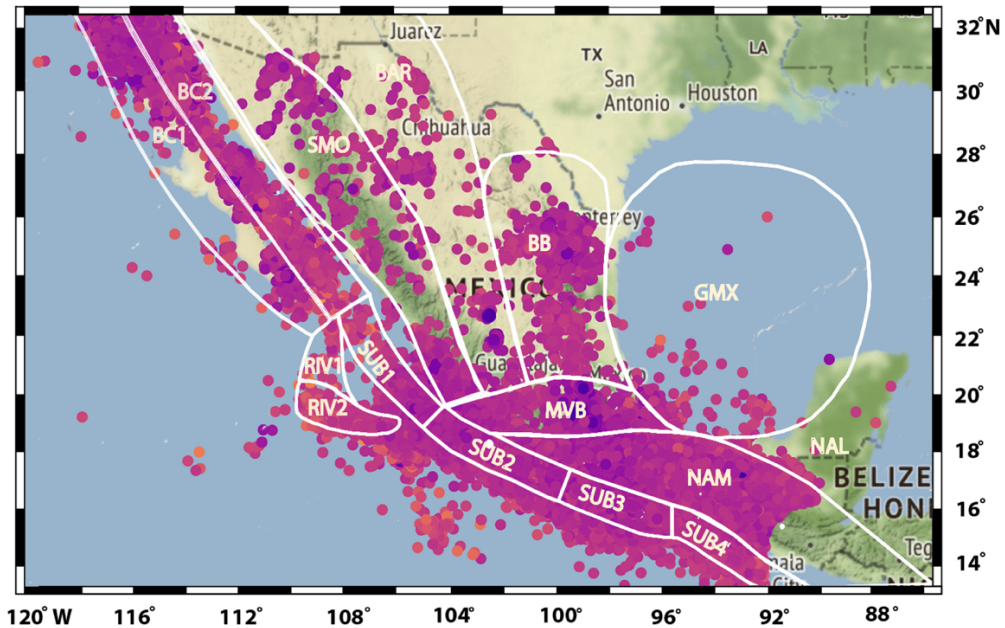
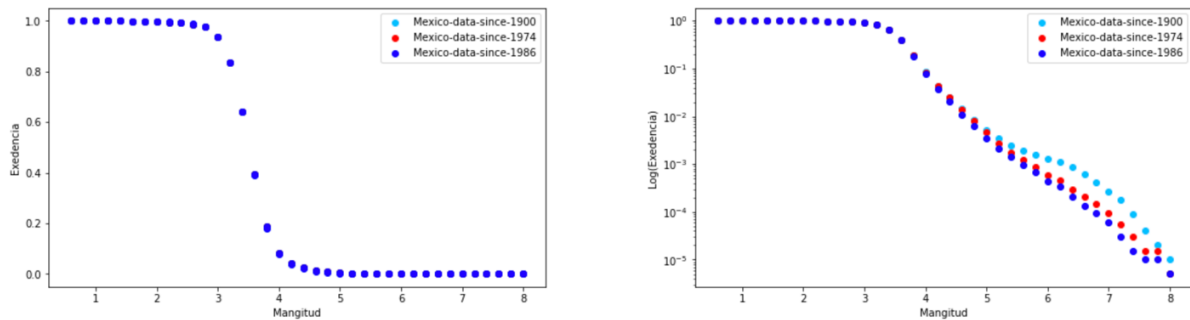


Figura 21. Localización epicentral de los sismos en México desde el año 1986 a 2021 con magnitudes de 0.6 a 8.2 proporcionados por el Servicio Sismológico Nacional (2021). Los colores representan la energía liberada, mayor tonalidad azul magnitud más baja, mayor tonalidad amarilla sismos de mayor intensidad.

Para corroborar los datos resultados del ajuste, se toman los registros a partir de tres años diferentes: 1900, 1974 y 1986. Como se ilustra en la gráfica 24, al comparar la relación entre excedencia y la magnitud de los registros a diferentes años de corte, se revela que las distribuciones difieren en las órdenes de magnitud de  $3.5 \leq m \leq 8$ . Esto es importante ya que demuestra que la distribución de los datos a ciertos períodos de tiempo es diferente.

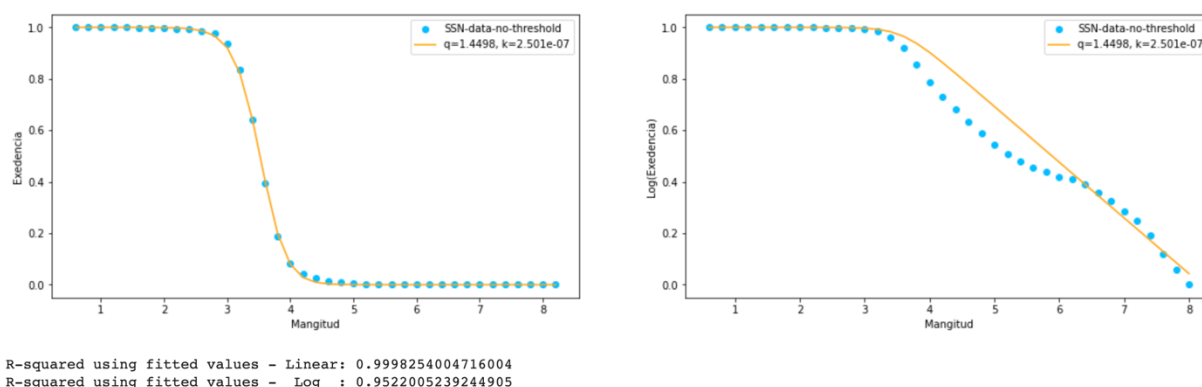


Gráfica 24. Distribución de la relación excedencia-magnitud de los eventos registrados en el territorio nacional a partir de diferentes años de corte: 1900, 1974 y 1986. Del lado izquierdo se presentan los datos en escala lineal; del lado derecho, en escala logarítmica.

## 4.2.1 Ajuste al territorio mexicano

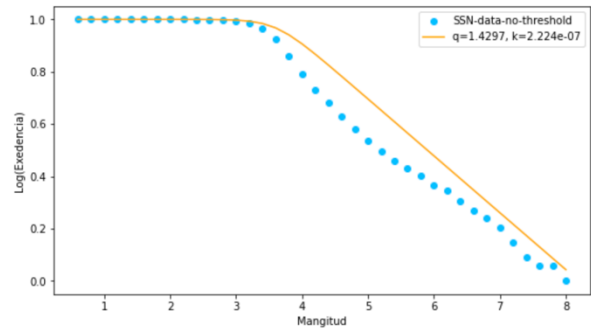
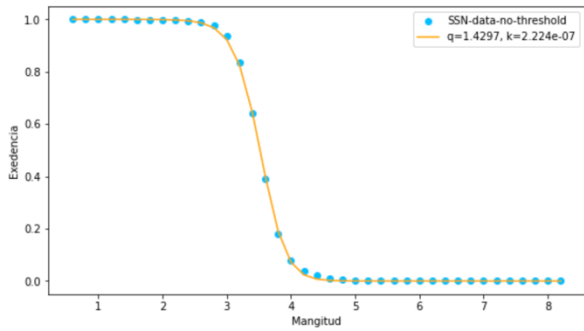
Se han ajustado las constantes de la ecuación (10) con la información de la base de datos proporcionado por el SSN (2021) que abarca toda la extensión territorial mexicana. El ajuste se realiza con: 1) los datos del catálogo completo sin umbral de magnitud de corte; 2) se corta el catálogo tomando únicamente aquellos con una magnitud con  $m \geq 3$ ; 3) se establece un umbral de magnitud corte con  $3 \leq m \leq 6$ ; para todos, no se han eliminado las réplicas.

Para el valor inicial de los parámetros  $q$  y  $k$  se toma de referencia los obtenidos por Cuanalo-Vázquez (2016) al realizar el ajuste a los datos del catálogo sísmico mexicano ( $q=1.61$  y  $k=7.3363e-7$ ) en el 2016. Los resultados del ajuste utilizando el modelo Fragmento-Aspereza al catálogo completo sin corte de umbral ni eliminación de réplicas, desde Enero de 1900 a Marzo de 2021, se muestran en la gráfica 25. El valor obtenido para  $q$  es 1.4498 y  $k=2.501e-07$  con un factor de correlación igual a  $R^2 = 0.9998$ .



Gráfica 25. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, de los datos del territorio nacional SSN (2021) desde el año 1900 al 2021. La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha. El valor de correlación es de 0.9998 y 0.9522 respectivamente.

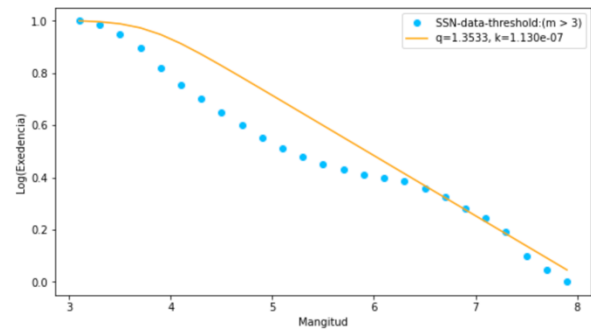
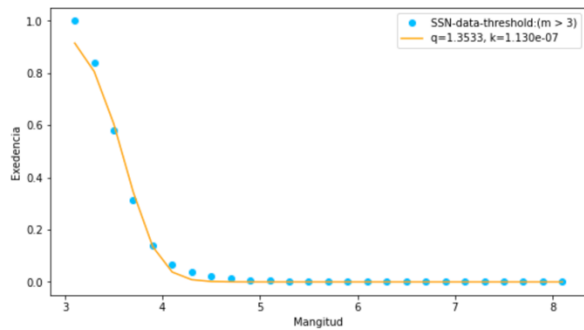
Por otro lado, se realiza el ajuste para la misma totalidad de la extensión territorial pero con año de inicio de 1986. En la gráfica 26, se presentan los valores obtenidos para  $q$  es 1.4297 y  $k=2.224e-07$ .



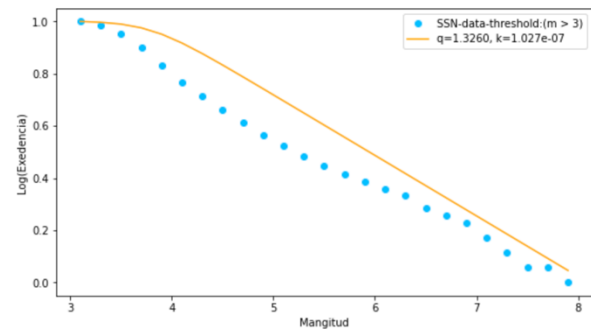
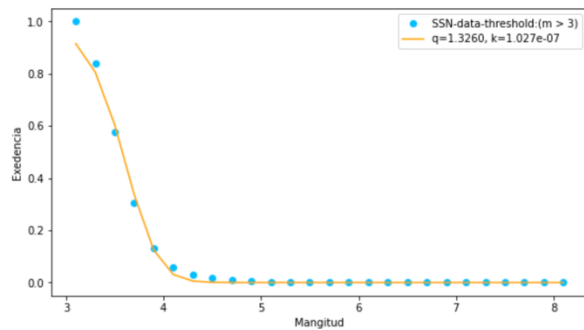
R-squared using fitted values - Linear: 0.9998562838445105  
 R-squared using fitted values - Log : 0.9403121783041205

Gráfica 26. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, de los datos del territorio nacional SSN (2021) desde el año 1986 al 2021. La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha. El valor de correlación es de 0.9998 y 0.9522 respectivamente.

Posteriormente, se toman los datos únicamente con magnitudes  $m \geq 3$  a partir de los mismos años de comienzo: 1900 y 1986 (gráfica 27); el valor obtenido para  $q$  es: 1.3533 y 1.326; mientras que para el parámetro de densidad de energía  $k = 1.130e-07$  y  $1.027e-07$ .



R-squared using fitted values - Linear: 0.9931791861211087  
 R-squared using fitted values - Log : 0.8530536734738741

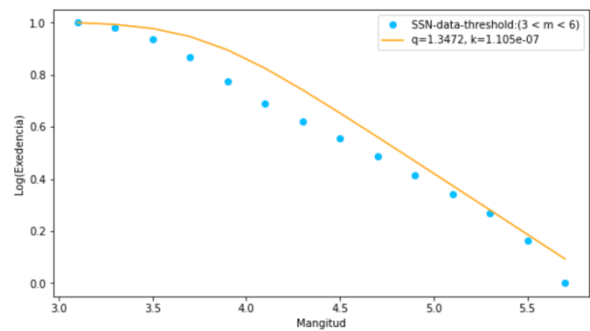
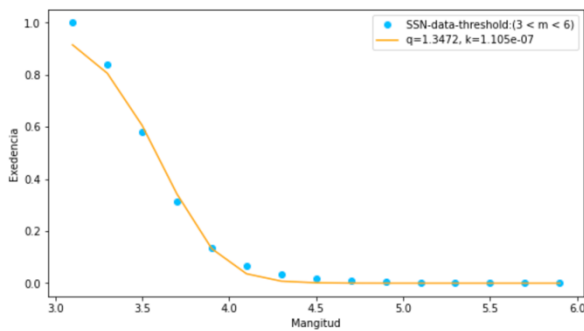


R-squared using fitted values - Linear: 0.9935342740107267  
 R-squared using fitted values - Log : 0.853211812515368

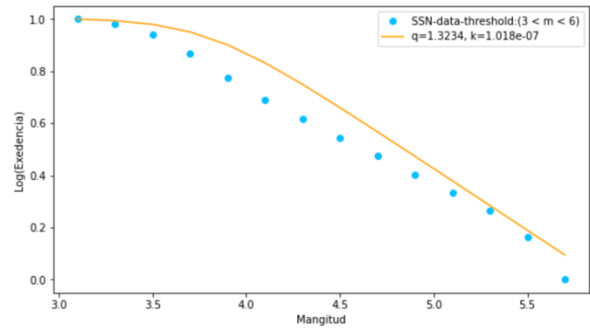
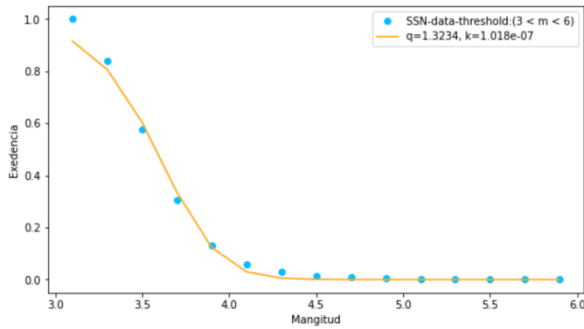


Gráfica 27. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, de los datos del territorio nacional SSN (2021) desde el año 1900 al 2021 (gráficas superiores) desde el año 1986 al 2021 (gráficas inferiores) estableciendo un umbral de magnitud mínima de  $m \geq 3$ . La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha.

Más tarde, se agrega un umbral de magnitud máxima de  $m \leq 6$  tomando los mismos años de inicio: 1900 y 1986 (gráfica 28). El valor obtenido, para los datos con año inicial 1900, es  $q = 1.3472$  y  $k = 1.105e-07$ ; los que inician en 1986 obtienen para  $q = 1.3234$  y  $k = 1.018e-07$ .



R-squared using fitted values - Linear: 0.9922489828063332  
R-squared using fitted values - Log : 0.93569191328426



R-squared using fitted values - Linear: 0.9925692848527502  
R-squared using fitted values - Log : 0.9222745462081331

Gráfica 28. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, de los datos del territorio nacional SSN (2021) desde el año 1900 (gráficas superiores) y 1986 (gráficas inferiores) con umbral de magnitud de corte de  $3 \leq m \leq 6$ . La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha. El valor de correlación es de 0.9922 y 0.9356 respectivamente.

A continuación se incluye en la tabla 4, un resumen de los datos obtenidos para cada valor del modelo Fragmento-Aspereza, dependiendo de cada umbral de magnitud y año de corte, así como la bondad del ajuste usando mínimos cuadrados.

**Tabla 4***Resultado del ajuste utilizando el modelo Fragmento-Aspereza a los datos del territorio nacional*

Año de inicio	umbral de corte	q	k	R-squared
1900	sin umbral de corte	1.4498	2.501e-07	0.9998254
1974	sin umbral de corte	1.4480	2.475e-07	0.9998348
1986	sin umbral de corte	1.4297	2.224e-07	0.9998562
1900	m > 3	1.3533	1.130e-07	0.9931791
1974	m > 3	1.3506	1.119e-07	0.9932549
1986	m > 3	1.3260	1.027e-07	0.9935342
1900	3 < m < 6	1.3472	1.105e-07	0.9922489
1974	3 < m < 6	1.3472	1.105e-07	0.9922489
1986	3 < m < 6	1.3234	1.018e-07	0.9925692

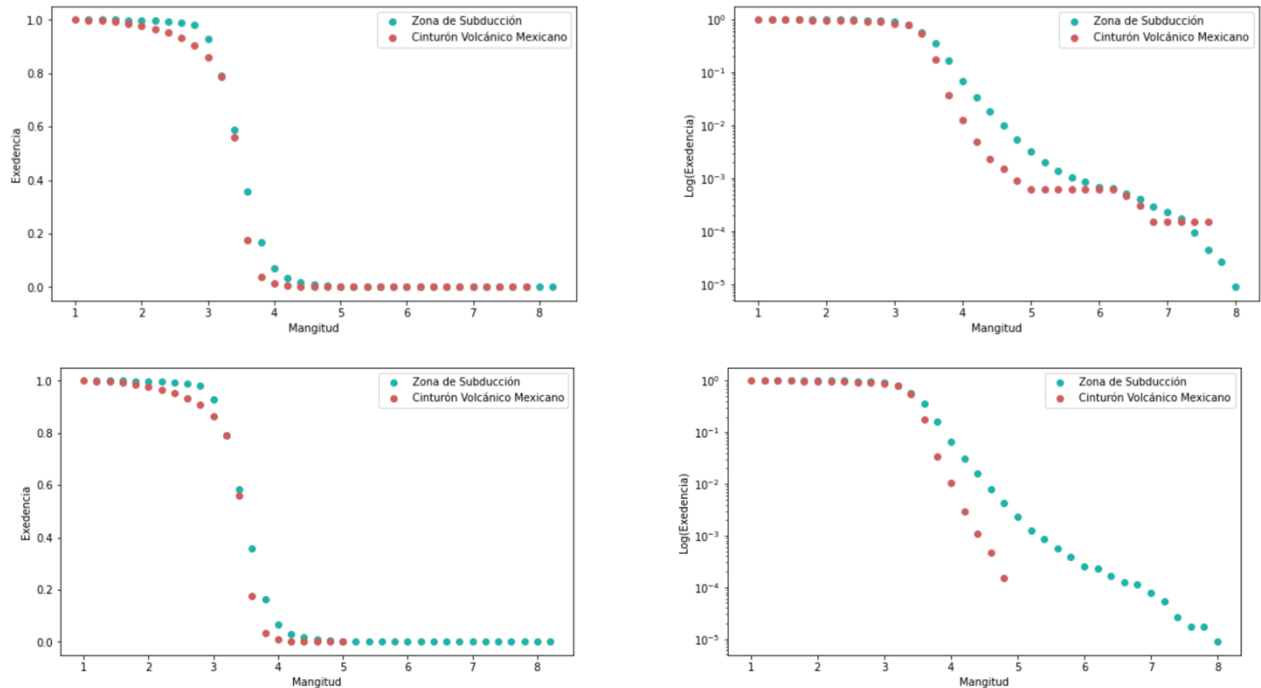
También, se realiza el ajuste de los datos de acuerdo a cada orden de magnitud para los mismo previos intervalos de tiempo. Se presentan en el apéndice 2 la relación de la excedencia con la magnitud de los eventos integrando colores que representan el valor de los parámetros del modelo de Sotolongo-Costa & Posadas (2004). Se aprecia que el valor obtenido tanto para el parámetro de no extensividad como para el de densidad de energía, es diferente, excepto para el intervalo de magnitud de 0 a 1.

#### **4.2.2 Ajuste de las zonas de investigación: MVB vs SUB**

Se investiga además la funcionalidad de la expresión Fragmento-Aspereza para dos regiones con características sísmicas diferentes (ilustrados en los mapas XX y XX): la zona del Cinturón Volcánico Mexicano (MVB) y la Zona de Subducción (SUB). Para la primera zona - MVB - se analizan 6'562 eventos desde el año 1900, 6'558 eventos desde 1974 y 6'496 desde 1986; para la segunda - SUB - son analizados 114'684 registros desde el año 1900, 114'645 registros desde 1974 y 114'116 desde 1986.

Para ratificar la información de los resultados del ajuste se toman los registros a partir de tres años mencionados previamente, como se ilustra en la gráfica 29. La comparación de la relación entre la excedencia y la magnitud entre ambas regiones revelan el cambio en su distribución de acuerdo a distintos años de corte donde las órdenes de mayor magnitud se

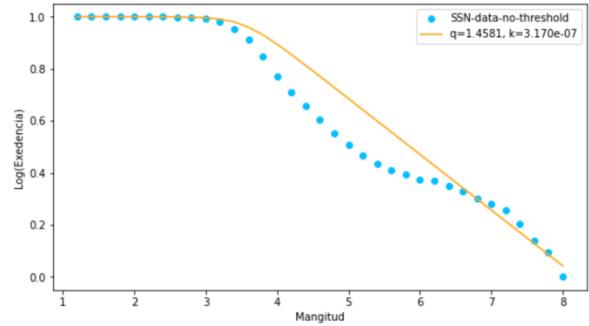
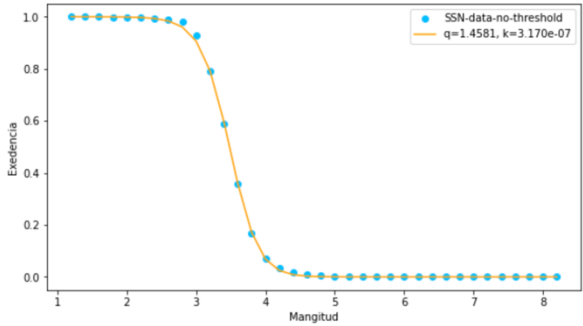
pierden. La zona del Cinturón Volcánico Mexicano no presenta eventos de magnitud superiores a  $m = 5.1$ , al omitir los registros previos al año 1986, estos no se presentan. De la misma manera para la Zona de Subducción al depurar los catálogos por la incertidumbre de medición de los instrumentos sismológicos, se observa una atenuación de los registros entre las órdenes de magnitud 5 a 6, de 6 a 7 y de 7 a 8.



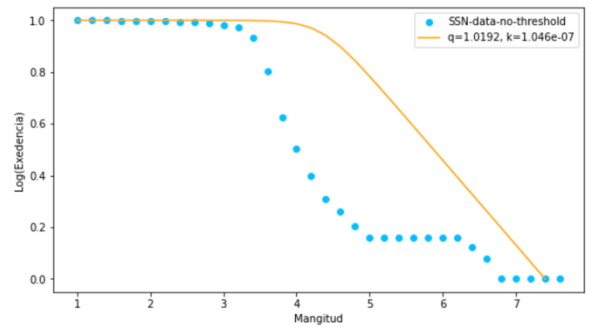
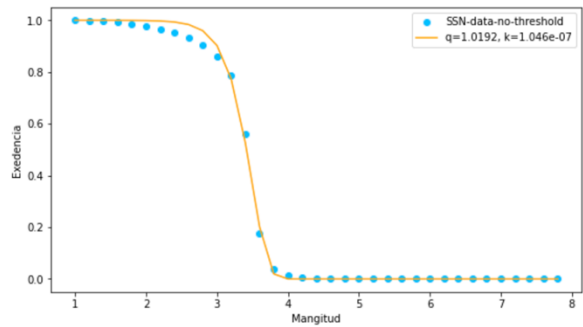
Gráfica 29. Distribución de la relación excedencia-magnitud entre las dos zonas de investigación tomando los registros a partir del año 1900 (gráficas superiores) y 1986 (gráficas inferiores). Los puntos rojos representan los registros del Cinturón Volcánico Mexicano; los verdes los de la zona de Subducción. Del lado izquierdo se presentan los datos en escala lineal. Del lado derecho, en escala logarítmica.

Se aplica el modelo no extensivo para cada una de las zonas tomando dos años de inicio diferentes: 1900 y 1986. En ambos catálogos, se observa un buen ajuste de la curva en todo el rango de magnitudes utilizando el modelo Fragmento-Aspereza en su escala lineal, pero no en la logarítmica. Concretamente, se tiene mayor cobertura en la zona de Subducción que su similar Volcánica con un valor de correlación de  $R^2 = 0.9263$  frente a  $R^2 = 0.364$ . Como se expone en la gráfica 30, al utilizar el modelo Fragmento-Aspereza sobre ambas zonas, el valor del parámetro de no extensividad para los sismos de cinturón Volcánico Mexicano es  $q = 1.0192$ ; para los sismos de la Zona de Subducción es  $q = 1.4581$ . Ambos obtenidos al realizar

el ajuste de los datos sin umbral mínimo o máximo de corte y tomando los registros desde el año 1900.



R-squared using fitted values - Linear: 0.9998097065099207  
 R-squared using fitted values - Log : 0.9263307455112937



R-squared using fitted values - Linear: 0.9980533392874859  
 R-squared using fitted values - Log : 0.3647367291633631

Gráfica 30. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, de los datos SSN (2021) desde el año 1900 al 2021. La Zona de Subducción en la parte superior, el Cinturón Volcánico Mexicano en la parte inferior. La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha.

A continuación, se presentan en la tabla 5 los valores de los parámetros del modelo Fragmento-Aspereza resultado del ajuste aplicado a ambas zonas dependiendo de cada umbral de magnitud y año de corte, así como la bondad del ajuste con mínimos cuadrados.

Tabla 5

Resultado del ajuste utilizando el modelo Fragmento-Aspereza a la zona de Subducción (SUB) y el Cinturón Volcánico Mexicano (MVB).

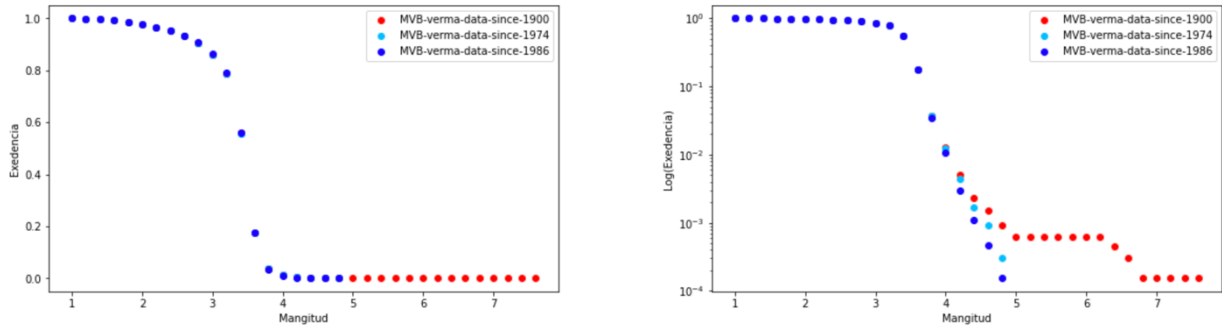
Zona	Año de inicio	umbral de corte	q	k	Mínimos cuadrados
MVB	1900	sin umbral de corte	1.0192	1.046e-07	0.9980533

MVB	1974	sin umbral de corte	1.0158	1.042e-07	0.9967314
MVB	1986	sin umbral de corte	0.999	1.009e-07	0.9969207
MVB	1900	$m \geq 3$	1.0	7.354e-08	0.9819463
MVB	1974	$m \geq 3$	0.9991	7.351e-08	0.9782199
MVB	1986	$m \geq 3$	0.9991	7.377e-08	0.9780665
MVB	1900	$3 \leq m \leq 6$	0.9991	7.351e-08	0.9782199
MVB	1974	$3 \leq m \leq 6$	0.9991	7.351e-08	0.9782199
MVB	1986	$3 \leq m \leq 6$	0.9991	7.377e-08	0.9780665
SUB	1900	sin umbral de corte	1.4581	3.170e-07	0.9998097
SUB	1974	sin umbral de corte	1.4573	3.155e-07	0.9998131
SUB	1986	sin umbral de corte	1.4501	3.028e-07	0.9998243
SUB	1900	$m \geq 3$	1.3492	1.252e-07	0.9929916
SUB	1974	$m \geq 3$	1.3479	1.246e-07	0.9930228
SUB	1986	$m \geq 3$	1.3364	1.197e-07	0.9931371
SUB	1900	$3 \leq m \leq 6$	1.3459	1.237e-07	0.9919880
SUB	1974	$3 \leq m \leq 6$	1.3459	1.237e-07	0.9919880
SUB	1986	$3 \leq m \leq 6$	1.3348	1.191e-07	0.9921192

### 4.2.3 Ajuste al Cinturón Volcánico Mexicano (MVB)

Se realiza el ajuste a los datos del catálogo sísmico mexicano para la zona del Cinturón Volcánico Mexicano, MVB por sus siglas en inglés, tomando los registros a partir de dos principales años: 1900 y 1986; así mismo, se tratan los datos por umbral de magnitud de corte, con  $m \geq 3$  y  $3 \leq m \leq 6$ .

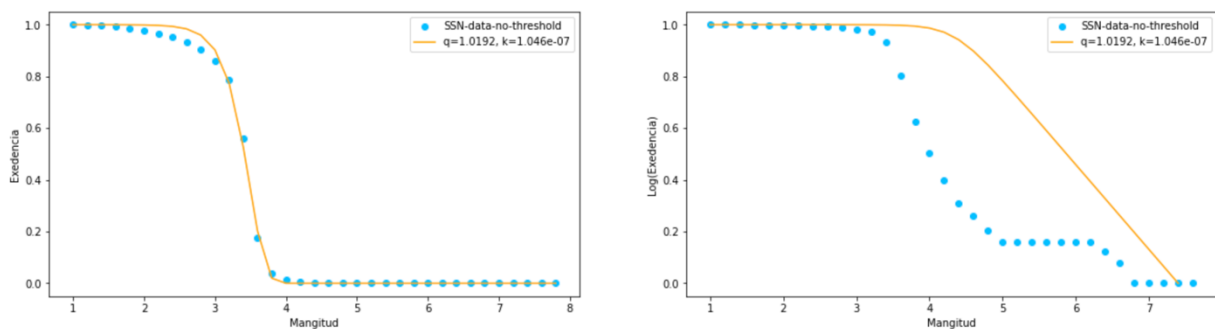
Debido a la importancia que demuestra la distribución de los datos en ciertos períodos de tiempo, en la gráfica 31 se presenta el acumulado número de eventos relativos en relación con su magnitud a partir de los años: 1900, 1974 y 1986. Se observa una pérdida de eventos de magnitudes mayores, como el capturado de  $m = 7.8$ , cuando se ignoran los registros antes del año 1974. Así mismo, disminuye la cantidad de eventos cuando se omiten datos anteriores a 1986.



Gráfica 31. Distribución de la relación entre excedencia y la magnitud en la Faja Volcánica Mexicana al tomarse registros a partir diversos año de inicio: 1900, 1974 y 1986. Del lado izquierdo los datos en escala lineal, del derecho, en escala logarítmica.

Se realiza el ajuste de las constantes del modelo Fragmento-Aspereza con la información de la base de datos para esta región. El ajuste se lleva a cabo sin eliminar las réplicas de los eventos con: 1) datos del catálogo completo sin umbral de magnitud de corte por año; 2) datos del catálogo tomando únicamente aquellos con una magnitud con  $m \geq 3$  por año. Dado que los eventos sísmicos en esta región no superan la magnitud de  $m > 6$ , no se realiza un ajuste con umbral de magnitud de corte  $3 \leq m \leq 6$ .

Los resultados del ajuste utilizando el modelo Fragmento-Aspereza al catálogo completo sin corte de umbral ni eliminación de réplicas desde enero de 1900 a Marzo de 2021, se muestran en la gráfica 32. El valor para el parámetro de no extensividad es  $q = 1.0192$ ; para el parámetro de densidad de energía  $k = 1.0460e-07$ .

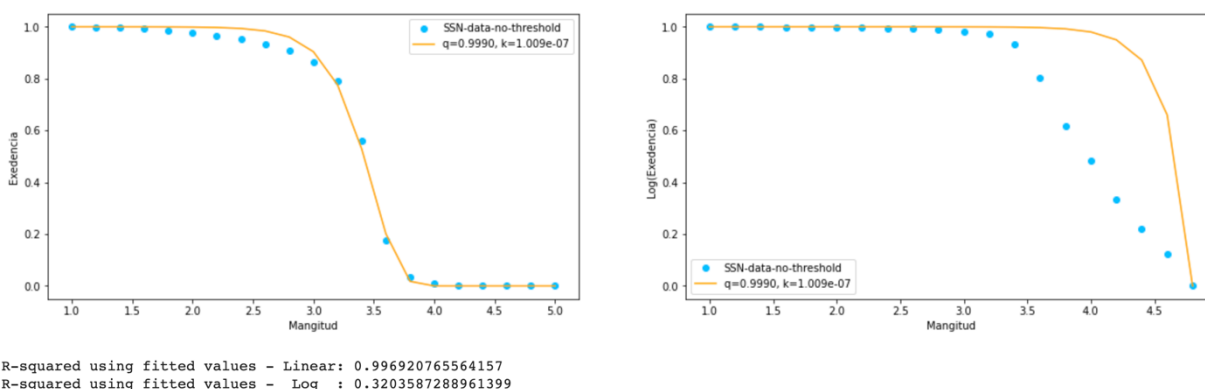


R-squared using fitted values - Linear: 0.9980533392874859  
R-squared using fitted values - Log : 0.3647367291633631

Gráfica 32. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, de los datos SSN (2021) del Cinturón Volcánico Mexicano desde el año 1900 al 2021. La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha. El valor de correlación indica 0.998 y 0.3647 respectivamente.

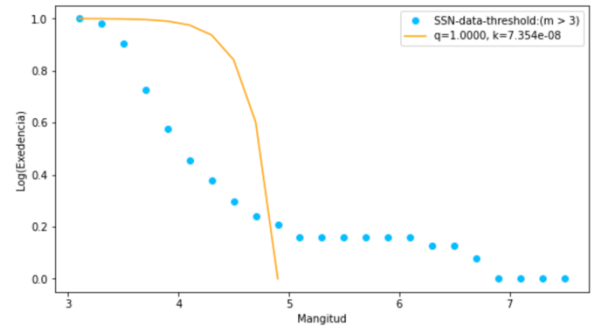
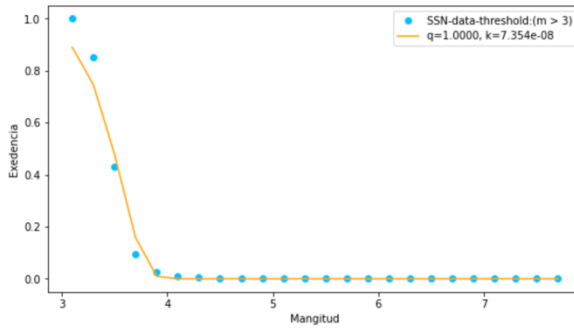
Los valores obtenidos al realizar el ajuste para la misma extensión pero con datos a partir de 1986, se presenta en la gráfica 33. El parámetro no extensivo obtiene un valor de  $q = 1.4297$  y  $k = 2.224e-07$ .

Es necesario señalar que en ambos casos se observa un buen ajuste de la información únicamente en escala lineal, pero no en la logarítmica. Concretamente, para los datos que se toman a partir del año 1900, se adquiere en la escala lineal un valor de  $R^2 = 0.998$ , sin embargo, para su equivalente logarítmico, el factor de correlación es  $R^2 = 0.3647$ . Lo mismo sucede para los registros a partir del año 1986 donde el valor de  $R^2 = 0.9969$  en la escala lineal, mientras que en la logarítmica se reduce a  $R^2 = 0.3203$ .

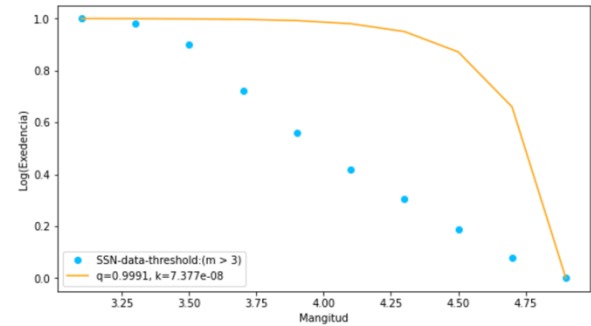
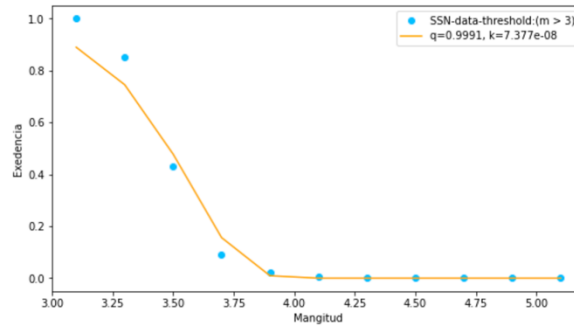


Gráfica 33. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, de los datos SSN (2021) del Cinturón Volcánico Mexicano desde el año 1986 al 2021. La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha. El valor de correlación indica 0.9996 y 0.3203 respectivamente.

Después, se realiza el ajuste de los datos con un umbral de magnitud mínimo de  $m \geq 3$ . En la gráfica 34, para los datos disponibles a partir del año 1900, el parámetro de no extensividad es  $q = 1.00$  y el de densidad de energía  $k = 7.354e-08$ ; mientras usando los datos desde 1986, el valor de  $q$  es 0.991 y  $k = 7.377e-08$ .



R-squared using fitted values - Linear: 0.981946395059717  
 R-squared using fitted values - Log : -0.5366809839329558



R-squared using fitted values - Linear: 0.9780665507054422  
 R-squared using fitted values - Log : -0.43215556344150086

Gráfica 34. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, de los datos SSN (2021) del Cinturón Volcánico Mexicano con un umbral de magnitud mínima de corte  $m \geq 3$  desde el año 1900 al 2021 (gráficas superiores) y desde el año 1986 (gráficas inferiores). La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha.

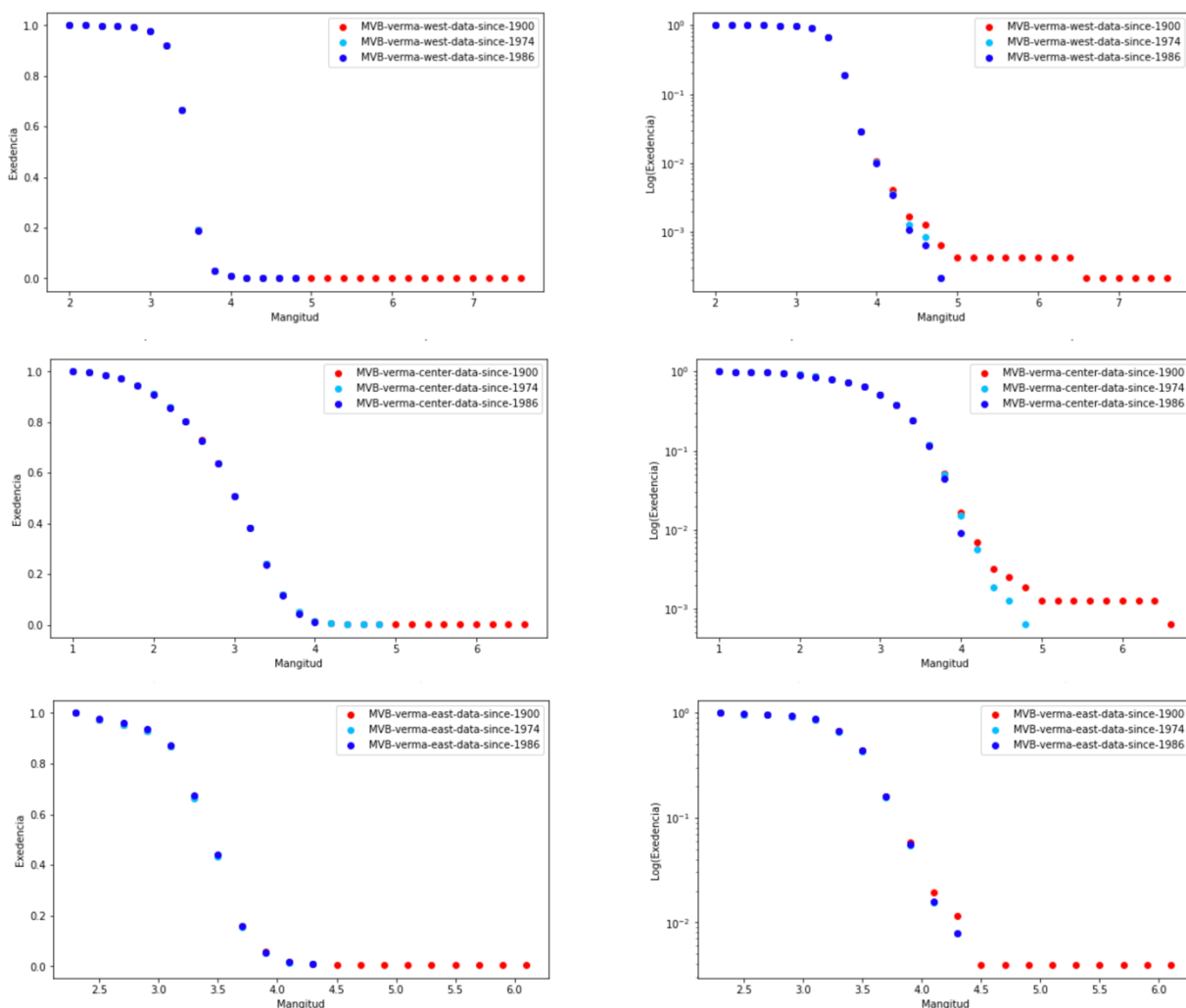
Finalmente, al realizar el ajuste de la información por cada orden de magnitud, se observa que los valores de los parámetros del modelo Fragmento-Aspereza son diferentes en cada una de ellas (apéndice 3). Por ejemplo, para los datos disponibles desde el año 1900, el valor del parámetro no extensivo es  $q = 1.52$ ; mientras que para los registros desde 1986, se obtiene  $q = 1.4225$  en el orden de magnitud de 4 a 5.

#### 4.2.4 Ajuste al MVB estratificado

A fin de obtener un mejor resultado de ajuste, se divide la zona del Cinturón Volcánico Mexicano en tres regiones de acuerdo con Verma (2015, 2015a); Verma et al. (2016): el área del occidente (W-MVB) dispone de 4'727 registros; la zona central (C-MVB) 1'590 y finalmente la restante (E-MVB) de 258 eventos. Ahora, cuando se establece el año de corte de 1986, los



registros disponibles disminuyen ligeramente a 4'724 para el W-MVB, 1'527 para C-MVB y 253 para E-MVB. El cambio en la distribución de los eventos en su relación magnitud-excedencia se presentan en las siguiente gráfica 35. Se observa que después de los años 1974 y 1986, no se registran eventos sísmicos con magnitudes superiores a 5.1 en todas las regiones: en C-MVB y E-MVB no existen mayores a 4.6 después de 1986; y en W-MVB se ausentan los superiores a 5.1 desde el 16 de Octubre de 1995.



Gráfica 35. Distribución de la relación entre la excedencia y la magnitud en la parte occidente del Cinturón Volcánico Mexicano tomando los registros a partir de los años 1900, 1974 y 1986. De manera descendente W-MVB, C-MVB, E-MVB. Del lado izquierdo se encuentran los datos en escala lineal; del derecho, en escala logarítmica.

En las tablas 6 se exhiben los valores de los parámetros del modelo Fragmento-Aspereza producto del ajuste a cada una de estas zonas – W-MVB, C-MVB, E-MVB.

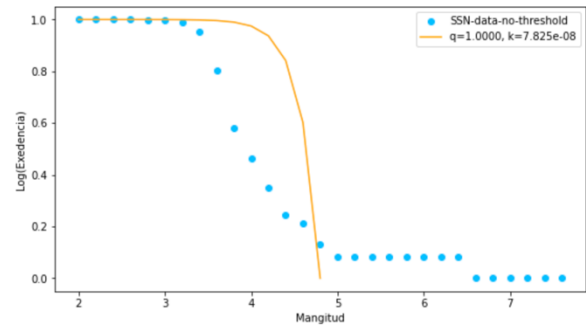
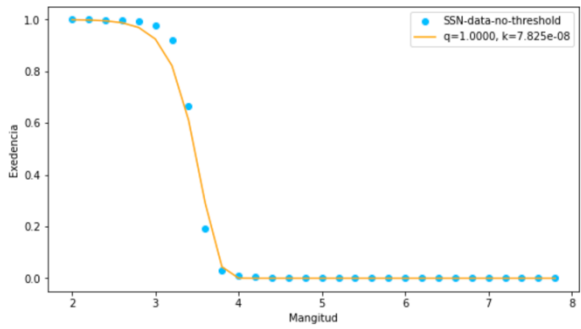
**Tabla 6**

*Resultado del ajuste utilizando el modelo Fragmento-Aspereza a cada región del Cinturón Volcánico Mexicano (W-MVB, C-MVB, E-MVB).*

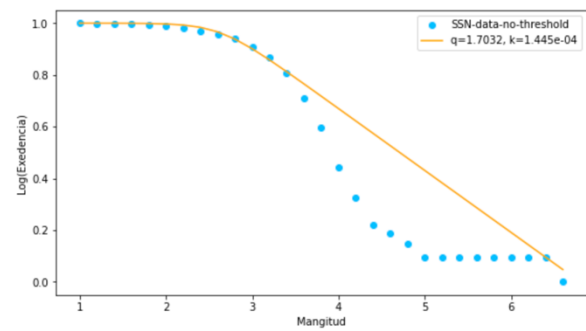
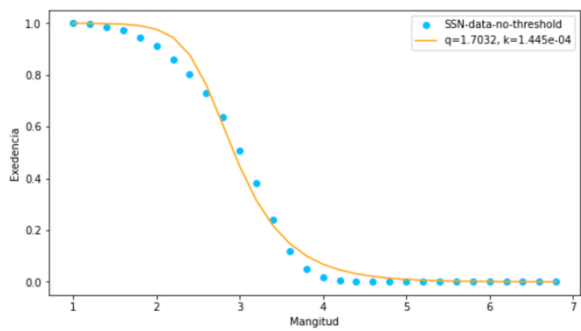
Zona	Año de inicio	umbral de corte	q	k	Mínimos cuadrados
W-MVB	1900	sin umbral de corte	1.0	7.825e-08	0.9948851
W-MVB	1974	sin umbral de corte	0.9987	7.816e-08	0.9922859
W-MVB	1986	sin umbral de corte	0.9987	7.819e-08	0.9922818
W-MVB	1900	$m \geq 3$	1.0	7.321e-08	0.9772726
W-MVB	1974	$m \geq 3$	0.9991	7.323e-08	0.9727244
W-MVB	1986	$m \geq 3$	0.9991	7.321e-08	0.9727117
W-MVB	1900	$3 \leq m \leq 6$	0.9991	7.323e-08	0.9727244
C-MVB	1900	sin umbral de corte	1.7032	1.445e-04	0.9918943
C-MVB	1974	sin umbral de corte	1.7023	1.413e-04	0.9884018
C-MVB	1986	sin umbral de corte	1.7059	1.596e-04	0.9825750
C-MVB	1900	$m \geq 3$	1.1968	1.168e-07	0.9849463
C-MVB	1974	$m \geq 3$	1.1841	1.138e-07	0.9823638
C-MVB	1986	$m \geq 3$	1.1197	1.012e-07	0.9780103
C-MVB	1900	$3 \leq m \leq 6$	1.1841	1.138e-07	0.9823638
E-MVB	1900	sin umbral de corte	1.3244	1.917e-07	0.9993473
E-MVB	1974	sin umbral de corte	1.3120	1.840e-07	0.9990647
E-MVB	1986	sin umbral de corte	1.2949	1.674e-07	0.9992415
E-MVB	1900	$m \geq 3$	1.0670	7.196e-08	0.9909395
E-MVB	1974	$m \geq 3$	1.0394	6.936e-08	0.9879750
E-MVB	1986	$m \geq 3$	1.0263	6.706e-08	0.9882318
E-MVB	1900	$3 \leq m \leq 6$	1.0394	6.936e-08	0.9879750

El valor obtenido para el parámetro no extensivo del modelo Fragmento-Aspereza al catálogo completo sin establecer un corte de umbral de magnitud mínimo se detalla a continuación:

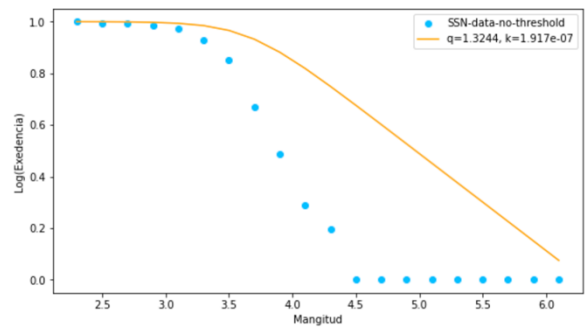
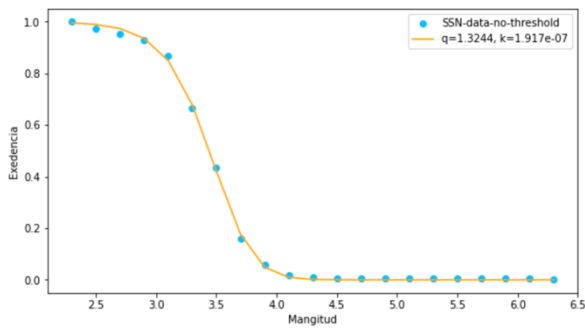
Para cada región de los eventos disponibles a partir del año 1900, como se muestra en la gráfica 36, el valor del parámetro no extensivo es: para la zona W-MVB  $q = 1.00$ ; para C-MVB:  $q = 1.7032$ ; y para la región E-MVB:  $q = 1.3244$ .



R-squared using fitted values - Linear: 0.9948851719824683  
R-squared using fitted values - Log : 0.19179975749855904



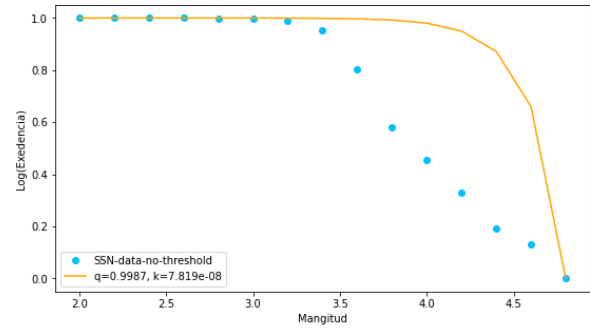
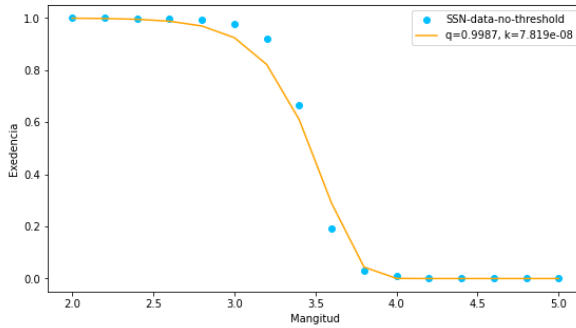
R-squared using fitted values - Linear: 0.991894350761838  
R-squared using fitted values - Log : 0.8191159180052647



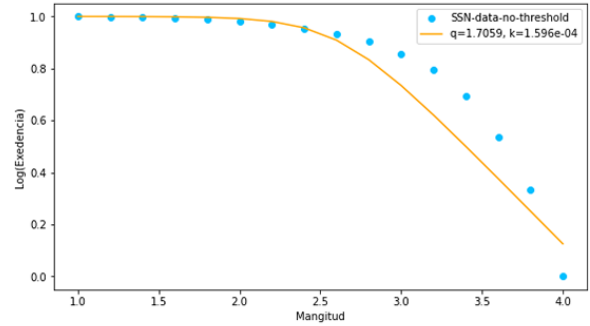
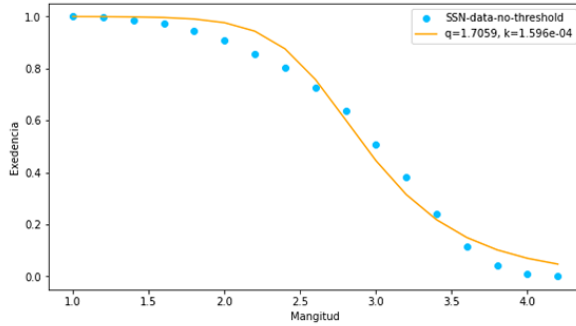
R-squared using fitted values - Linear: 0.9993473330721669  
R-squared using fitted values - Log : 0.35559306506214505

Gráfica 36. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos del Cinturón Volcánico Mexicano desde el año 1900, sin umbral de magnitud de corte. La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha. Ordenados de manera descendente se encuentran W-MVB, C-MVB y E-MVB.

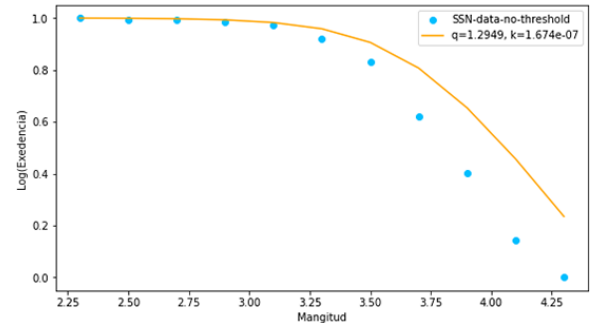
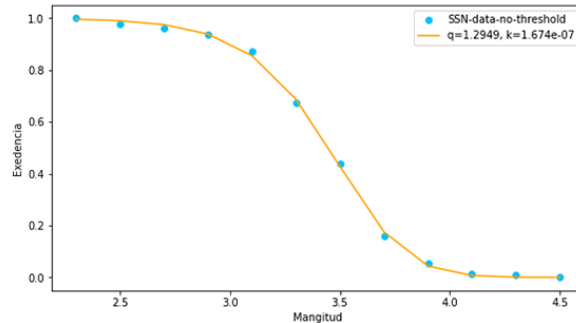
Posteriormente, tomando los eventos a partir del año 1986, la gráfica 37 se muestra que el parámetro de Tsallis tiene los valores:  $q = 0.9987$  para la zona W-MVB;  $q = 1.7059$  para C-MVB; y  $q = 1.2949$  para la región E-MVB.



R-squared using fitted values - Linear: 0.9922818922602238  
R-squared using fitted values - Log : 0.1841782515304473



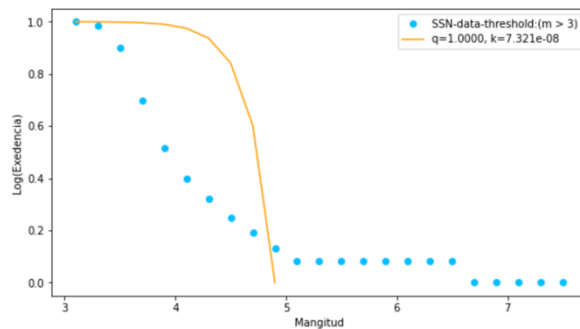
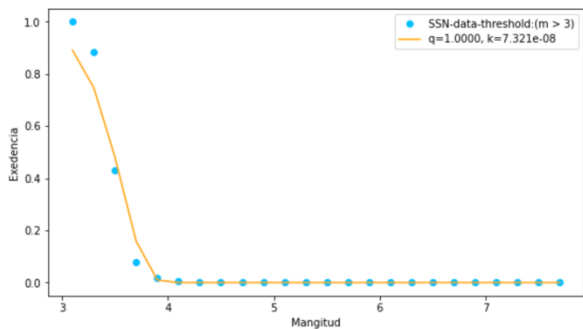
R-squared using fitted values - Linear: 0.982575073419992  
R-squared using fitted values - Log : 0.8899468646671345



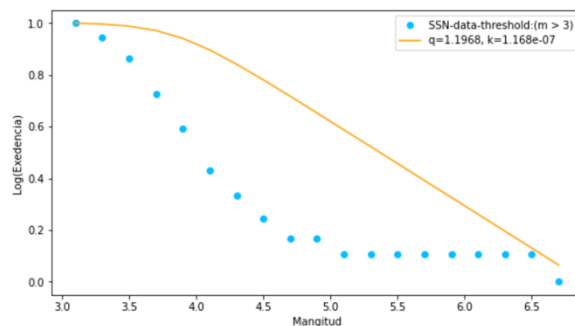
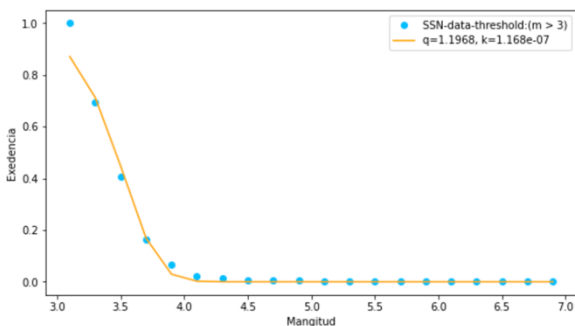
R-squared using fitted values - Linear: 0.9992415215974767  
R-squared using fitted values - Log : 0.8105836952747325

Gráfica 37. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos del Cinturón Volcánico Mexicano desde el año 1986 sin umbral de magnitud de corte. La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha. Ordenados de manera descendente se encuentran W-MVB, C-MVB y E-MVB.

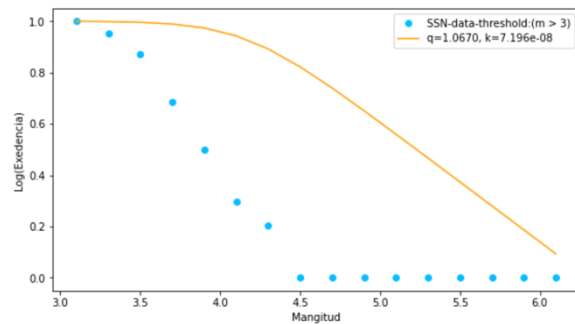
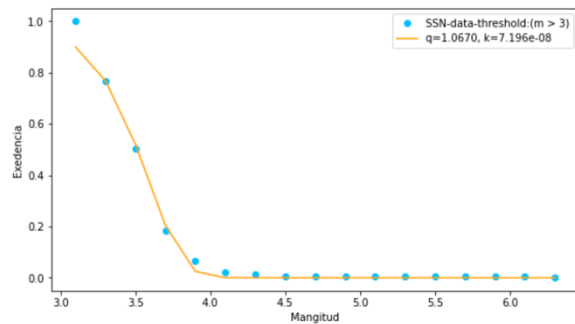
Ahora, se realiza el ajuste de los datos para cada zona incluyendo un umbral de magnitud de corte mínimo de  $m \geq 3$  para cada cada año (gráfica 38). El resultado del ajuste de los datos, a partir del año 1900, para la zona W-MVB es  $q = 1$ ; para C-MVB es  $q = 1.1968$ ; y para la región E-MVB es  $q = 1.067$ .



R-squared using fitted values - Linear: 0.9772726880123507  
R-squared using fitted values - Log : -0.5614542947889829



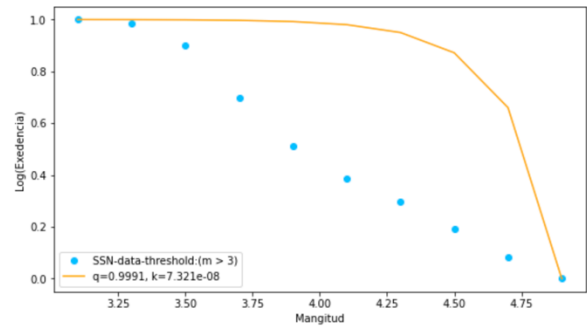
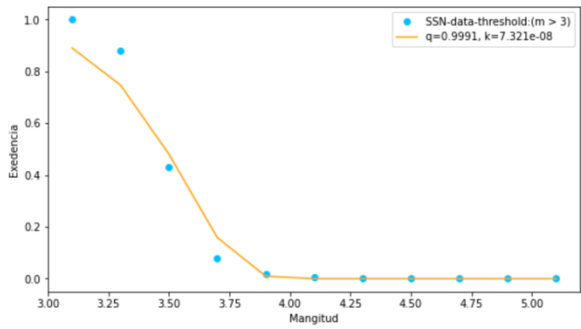
R-squared using fitted values - Linear: 0.9849463685636728  
R-squared using fitted values - Log : -0.14628757822156846



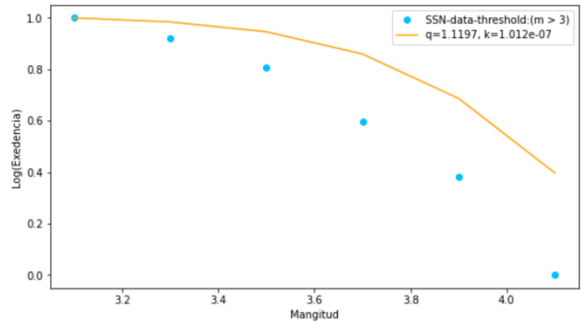
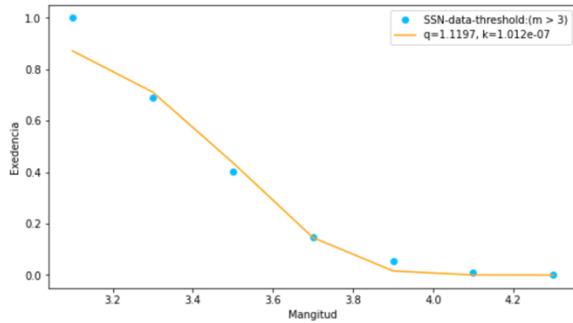
R-squared using fitted values - Linear: 0.9909395272838623  
R-squared using fitted values - Log : -0.6325457287741143

Gráfica 38. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos del Cinturón Volcánico Mexicano desde el año 1900 con un umbral de magnitud mínimo:  $m \geq 3$ . La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha. Ordenados de manera descendente se encuentran W-MVB, C-MVB y E-MVB.

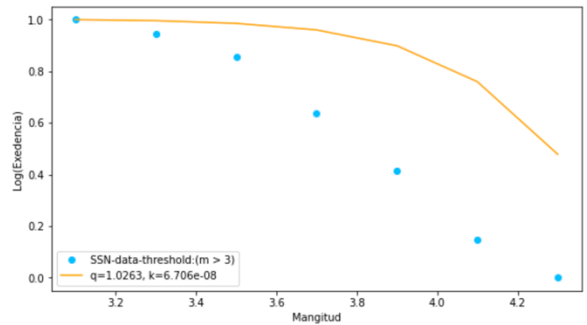
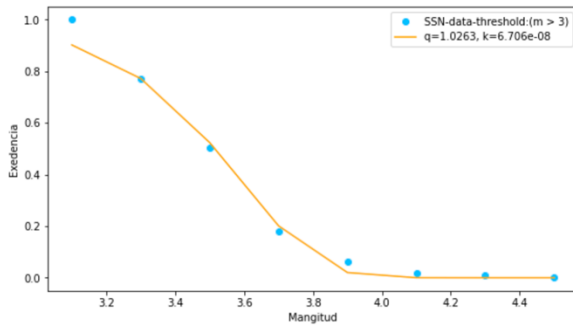
Por otra parte, el resultado del ajuste tomando los datos a partir del año 1986, usando el mismo umbral de magnitud de corte mínimo el valor del parámetro no extensivo es: para la zona W-MVB es  $q = 0.9991$ ; para C-MVB es  $q = 1.1197$ ; y para la región E-MVB,  $q = 1.0263$  (gráfica 39).



R-squared using fitted values - Linear: 0.9727117011269266  
R-squared using fitted values - Log : -0.5172425450330065



R-squared using fitted values - Linear: 0.978010372269353  
R-squared using fitted values - Log : 0.5197057928693456



R-squared using fitted values - Linear: 0.9882318746748698  
R-squared using fitted values - Log : -0.02495262279923849

Gráfica 39. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos del Cinturón Volcánico Mexicano desde el año 1986 con un umbral de magnitud mínimo:  $m \geq 3$ . La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha. Ordenados de manera descendente se encuentran W-MVB, C-MVB y E-MVB.

Además, se realiza el ajuste de los datos para cada región volcánica por orden de magnitud usando dos intervalos de tiempo: 1900 y 1986. Es necesario mencionar que los resultados del ajuste para cada orden, muestran diferentes valores dependiendo del año de corte, en todas las subdivisiones - W-MVB, C-MVB, E-MVB -.

Para los eventos disponibles de W-MVB, el valor del parámetro  $q$  del modelo Fragmento-Aspereza toma diferentes valores dependiendo del orden de magnitud y año de corte. Precisamente para el intervalo de 4 a 5, se tiene para los datos desde el año 1900 un valor de  $q = 1.5082$ , mientras que se obtiene un valor de  $q = 1.4596$  cuando se establece un año de inicio de 1986 (apéndice 4).

Con los eventos de la zona central C-MVB, el valor del parámetro no extensivo  $q$  toma aproximadamente el mismo valor para los órdenes de magnitud de 4 a 6 (apéndice 5), concretamente, para los eventos sísmicos disponibles desde el año 1900, se obtiene el valor de  $q = 1.8966$ ,  $q = 1.6309$ ,  $q = 1.5485$ ,  $q = 1.8571$  en los intervalos de 2 a 3, de 3 a 4 y de 4 a 5, respectivamente. Para los disponibles a partir de 1986 se tiene para el orden de magnitud de 2 a 3, el valor de  $q = 1.8968$ ; y para el de 3 a 4,  $q = 1.6226$ .

De forma semejante, se realiza el ajuste de los datos por orden de magnitud para zona oriente del Cinturón Volcánico Mexicano: E-MVB. Del mismo modo que con la zona central del MVB los valores del parámetro de no extensividad toman valores cercanos en los distintos años de corte, sobretodo, en los intervalos de 3 a 4 y de 4 a 5.

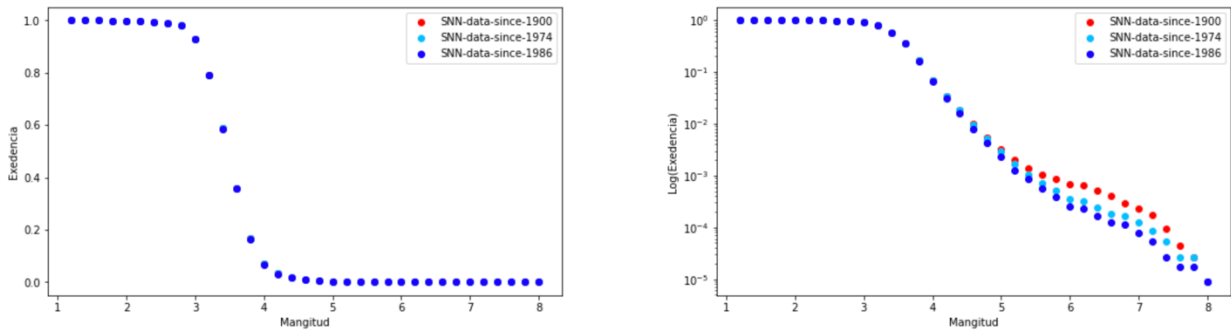
El resultado del ajuste para el orden de magnitud de 3 a 4, como se presenta en el apéndice 6, refleja que de los datos disponibles a partir del año 1900 se obtiene un valor de  $q = 1.3066$ ; y para el orden de 4 a 5,  $q = 1.6153$ . Cuando se toman únicamente los datos desde el año de 1986, para el rango de 3 a 4, el valor del parámetro de Tsallis tiene un valor de  $q = 1.2827$ ; y para el intervalo de 4 a 5,  $q = 1.5699$ . Sin embargo, cabe señalar que para el resto de órdenes de magnitud no se obtienen valores óptimos al ajustar los datos.

#### **4.2.5 Ajuste a la Zona de Subducción (SUB)**

Se prosigue a realizar el ajuste de la expresión Fragmento-Aspereza a la zona de Subducción, se analizan 114'684 eventos desde el año 1900, 114'645 eventos desde 1974 y

114'116 desde 1986. De igual manera, se tratan los datos por umbral de magnitud de corte con:  $m \geq 3$  y  $3 \leq m \leq 6$ .

En la gráfica 40, se presenta el número de eventos en relación con su magnitud a partir de los años previamente mencionados. Se observa, una pérdida de eventos con magnitudes mayores de  $m > 5$  cuando se omiten los registros antes del año 1986.



Gráfica 40. Distribución de la relación de la excedencia y la magnitud en la zona de Subducción (SUB) con base a los registros disponibles a partir de diversos años de inicio: 1900, 1974 y 1986. Del lado izquierdo están los datos en escala lineal; en el derecho, en escala logarítmica.

Distribución de la relación excedencia-magnitud en la zona de Subducción de los datos disponibles a partir de los años 1900, 1975 y 1986. Del lado izquierdo se presentan los datos en escala lineal, a la derecha, en escala logarítmica.

A continuación se presentan en la tabla 9 los valores de los parámetros del modelo Fragmento-Aspereza resultado del ajuste aplicado a la zona de Subducción del Pacífico, variando el umbral de magnitud y año de corte, así como el la verificación del resultado de ajuste al utilizar mínimos cuadrados. Se observa un mejor ajuste de los datos en todo el rango de magnitudes, en la escala lineal que en la logarítmica.

Tabla 7

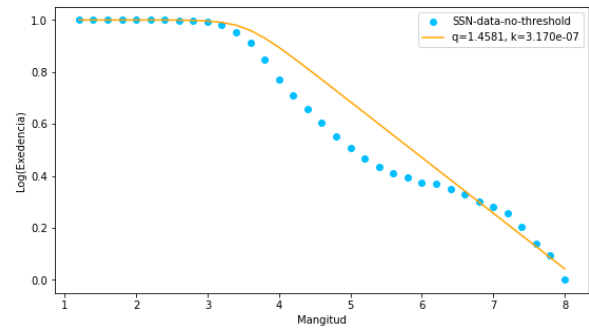
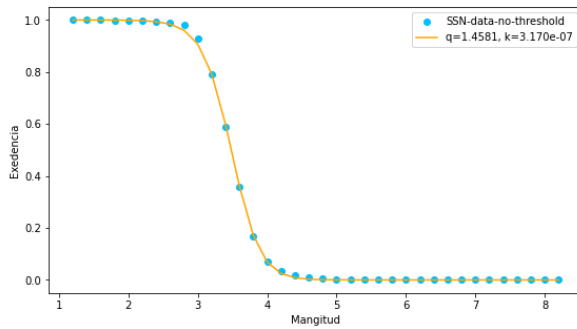
Resultado del ajuste utilizando el modelo Fragmento-Aspereza a la zona de Subducción (SUB)

Año de inicio	umbral de corte	q	k	R <sup>2</sup>
1900	sin umbral de corte	1.4581	3.170e-07	0.9998097

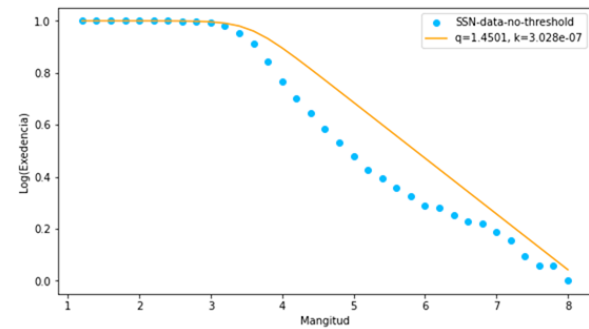
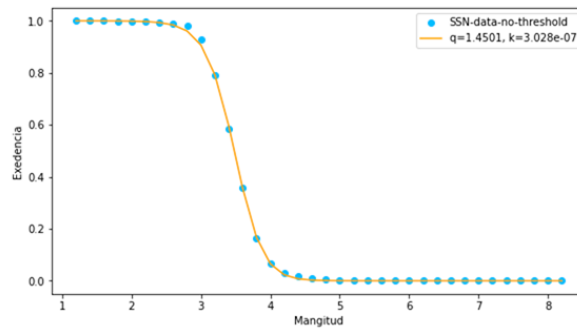


1974	sin umbral de corte	1.4573	3.155e-07	0.9998131
1986	sin umbral de corte	1.4501	3.028e-07	0.9998243
1900	$m \geq 3$	1.3492	1.252e-07	0.9929916
1974	$m \geq 3$	1.3479	1.246e-07	0.9930228
1986	$m \geq 3$	1.3364	1.197e-07	0.9931371
1900	$3 \leq m \leq 6$	1.3459	1.237e-07	0.9919880
1974	$3 \leq m \leq 6$	1.3459	1.237e-07	0.9919880
1986	$3 \leq m \leq 6$	1.3348	1.191e-07	0.9921192

Como se muestra en la gráfica 41, se ajustan los datos usando el modelo Fragmento-Aspereza. Para los eventos registrados a partir del año 1900, el valor del parámetro de no extensividad  $q = 1.4573$ ; mientras que, para los registros de la Zona de Subducción a partir del año 1986, el valor de  $q = 1.4501$ .



R-squared using fitted values - Linear: 0.9998097065099207  
R-squared using fitted values - Log : 0.9263307455112937

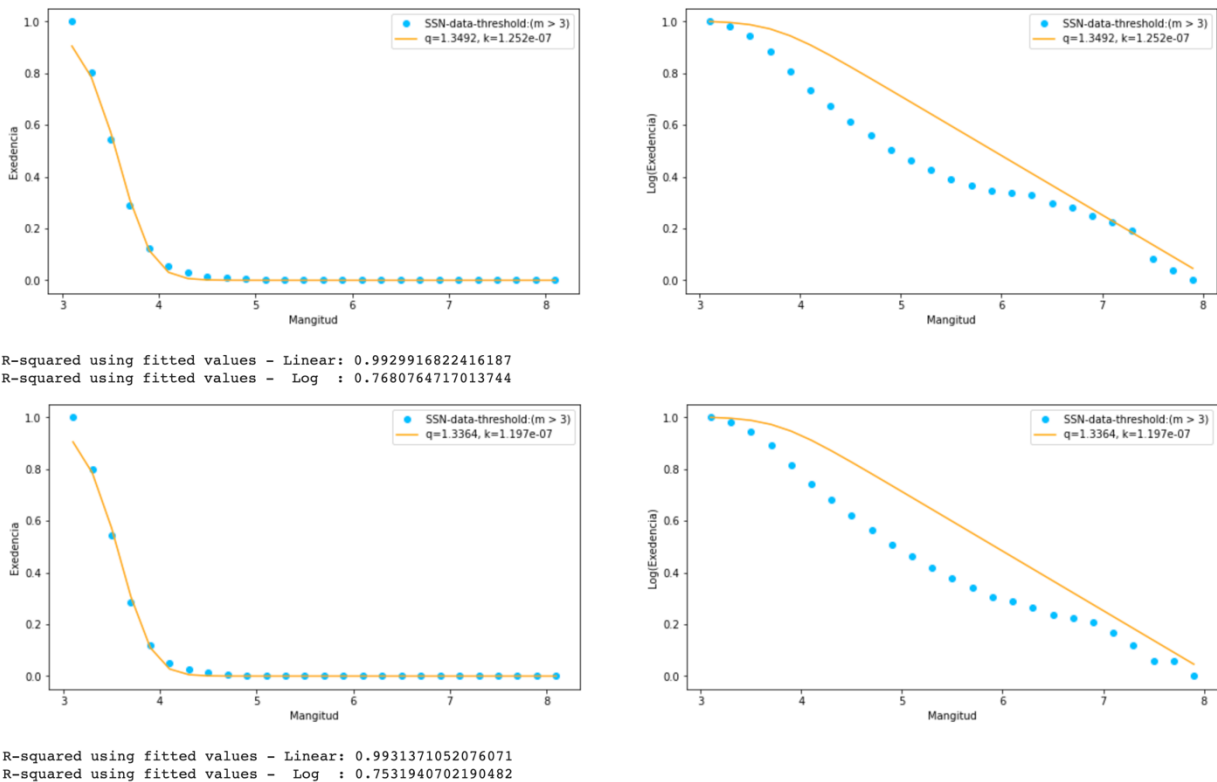


R-squared using fitted values - Linear: 0.9998243705336278  
R-squared using fitted values - Log : 0.8931264784317983

Gráfica 41. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la Zona de Subducción (SUB) desde el año 1900 (gráficas en la parte superior) y desde 1986 (gráficas en la parte inferior), sin umbral de

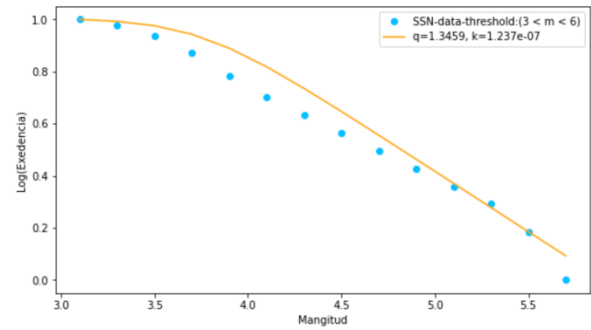
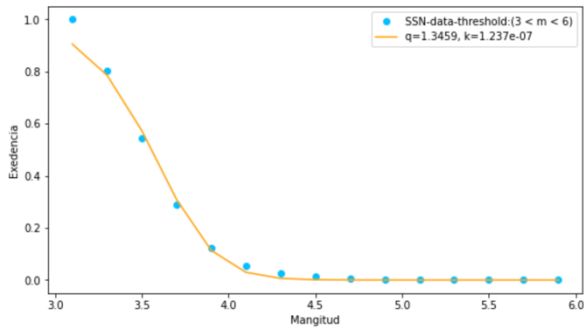
magnitud de corte. La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha.

Después, se realiza el ajuste de los datos estableciendo un umbral mínimo de corte  $m \geq 3$  por cada intervalo de tiempo (gráfica 42). El valor obtenido para los datos a partir de 1900 del parámetro de no extensividad es  $q = 1.3492$  y el de densidad de energía  $k = 1.252e-07$ ; para los registros a partir de 1986, el valor de  $q$  es 1.3364 con  $k = 1.197e-07$ .

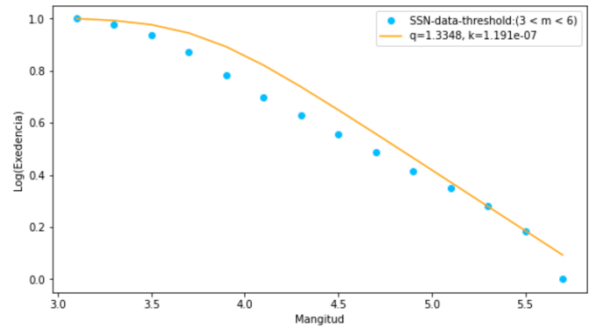
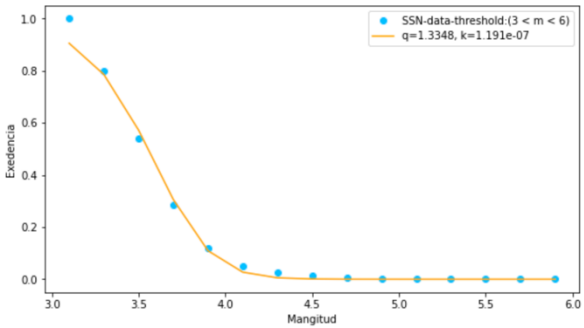


Gráfica 42. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la Zona de Subducción (SUB) desde el año 1900 (gráficas superiores) y 1986 (gráficas inferiores), con un umbral de corte  $m \geq 3$ . La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha. El valor de correlación indica 0.9929 y 0.7680 respectivamente.

Enseguida, se agrega un umbral de magnitud máxima de corte de  $m \leq 6$  tomando los mismos años anteriores (gráfica 43). El valor obtenido, a partir del año 1900, para el parámetro de no extensividad  $q$  es 1.3459; para el parámetro de densidad de energía  $k = 1.237-07$ . De ello, se realiza el ajuste para la misma extensión pero con datos a partir de 1986. Los valores obtenidos para el parámetro no extensivo obtiene un valor de  $q = 1.3348$  y  $k = 1.191e-07$ .



R-squared using fitted values - Linear: 0.9919880456342849  
 R-squared using fitted values - Log : 0.9500817779262831



R-squared using fitted values - Linear: 0.9921192339667019  
 R-squared using fitted values - Log : 0.9450885833346168

Gráfica 43. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la Zona de Subducción (SUB) desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde 1986 (gráficas inferiores), con un umbral de corte  $3 \leq m \leq 6$ . La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha. El valor de correlación indica 0.9919 y 0.9500 respectivamente.

Igualmente, se realiza el ajuste de los datos de acuerdo a cada orden de magnitud para cada intervalo de tiempo tomado. Se presentan en el apéndice 7, del lado izquierdo en escala lineal y en la derecha en escala logarítmica, la relación de la excedencia con la magnitud de los eventos. Los colores representan el valor de los parámetros del modelo de Sotolongo-Costa & Posadas (2004) en cada intervalo de magnitud. Se aprecia que el valor obtenido en cada orden es diferente, tanto para el parámetro de no extensividad como para el de densidad de energía.

#### 4.2.6 Ajuste a la zona de Subducción estratificada

Para ratificar la información de los resultados del ajuste se toman los registros mencionados previamente. Se investiga la funcionalidad del modelo Fragmento-Aspereza para

las regiones del Zona de Subducción (SUB) al ser estratificada. Se aplica el modelo de Sotolongo-Costa & Posadas (2004) en 5 regiones: SUBR, SUB1, SUB2, SUB3 y SUB4. Donde se tienen registros disponibles desde el año 1900: 105 eventos para la zona SUBR, 2'306 para la SUB1, 26'948 para la SUB2, 57'067 para la SUB3 y 28'258 para la SUB4, mismos que posteriormente serán depurados de acuerdo al año y umbral de magnitud de corte para cada ajuste respectivamente.

Se aprecia al comparar los valores de los parámetros del modelo Fragmento-Aspereza de cada zona, que los valores ajustados de las constantes se encuentran por debajo de los obtenidos por otros autores en otras regiones del globo terrestre, pero no difieren esencialmente de lo obtenido entre ellas, es decir, de las otras regiones de subducción subyacentes. Sin embargo, llama la atención el bajo valor de  $q$  en la zona sureste del país en SUB4, lo cual puede estar revelando la existencia de interacciones de alcance menor al de las otras zonas.

Finalmente, en todas las regiones se obtuvo un buen ajuste en todo el rango de magnitudes. En seguida se presenta, en la tabla 10, los valores de los parámetros del modelo Fragmento-Aspereza, resultado del ajuste a cada una de estas zonas incluyendo los obtenidos al depurar los catálogos.

**Tabla 8**

*Resultado del ajuste utilizando el modelo Fragmento-Aspereza cada región del la zona de Subducción (SUBR, SUB1, SUB2, SUB3 y SUB4).*

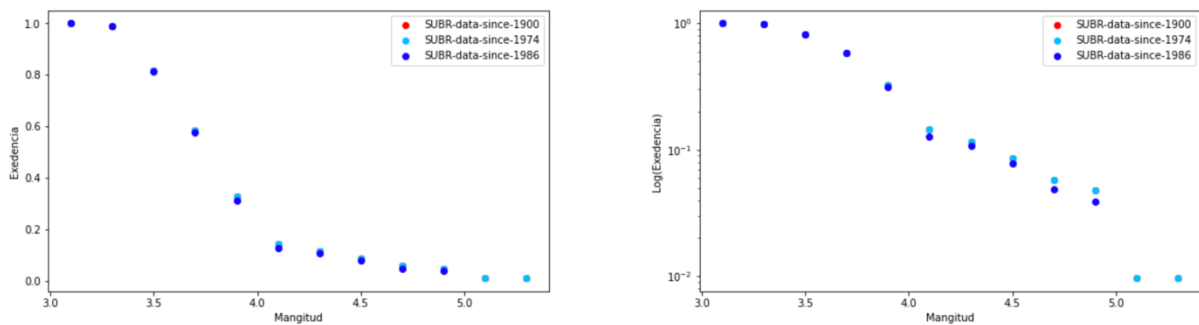
Zona	Año de inicio	umbral de corte	$q$	$k$	$R^2$
SUBR	1900	sin umbral de corte	1.4877	9.752e-08	0.9880710
SUBR	1974	sin umbral de corte	1.4877	9.752e-08	0.9880710
SUBR	1986	sin umbral de corte	1.4476	7.637e-08	0.9870211
SUBR	1900	$m \geq 3$	1.4877	9.752e-08	0.9880710
SUBR	1974	$m \geq 3$	1.4877	9.752e-08	0.9880710
SUBR	1986	$m \geq 3$	1.4476	7.637e-08	0.9870211
SUBR	1900	$3 \leq m \leq 6$	1.4877	9.752e-08	0.9880710
SUBR	1974	$3 \leq m \leq 6$	1.4877	9.752e-08	0.9880710
SUBR	1986	$3 \leq m \leq 6$	1.4476	7.637e-08	0.9870211

SUB1	1900	sin umbral de corte	1.3334	2.868e-07	0.99795599
SUB1	1974	sin umbral de corte	1.3318	2.852e-07	0.9978223
SUB1	1986	sin umbral de corte	1.3216	2.757e-07	0.9979137
SUB1	1900	$m \geq 3$	1.1346	1.102e-07	0.9780852
SUB1	1974	$m \geq 3$	1.1311	1.095e-07	0.9771305
SUB1	1986	$m \geq 3$	1.1077	1.053e-07	0.9774967
SUB1	1900	$3 \leq m \leq 6$	1.1311	1.095e-07	0.9771305
SUB1	1974	$3 \leq m \leq 6$	1.1311	1.095e-07	0.9771305
SUB1	1986	$3 \leq m \leq 6$	1.1077	1.053e-07	0.9774967
SUB2	1900	sin umbral de corte	1.4065	2.281e-07	0.9992698
SUB2	1974	sin umbral de corte	1.4041	2.255e-07	0.9992923
SUB2	1986	sin umbral de corte	1.3914	2.132e-07	0.9993333
SUB2	1900	$m \geq 3$	1.3179	1.190e-07	0.9900328
SUB2	1974	$m \geq 3$	1.3143	1.176e-07	0.9901370
SUB2	1986	$m \geq 3$	1.296	1.113e-07	0.9902794
SUB2	1900	$3 \leq m \leq 6$	1.3101	1.160e-07	0.9887884
SUB2	1974	$3 \leq m \leq 6$	1.3101	1.160e-07	0.9887884
SUB2	1986	$3 \leq m \leq 6$	1.2932	1.104e-07	0.9890050
SUB3	1900	sin umbral de corte	1.4324	4.728e-07	0.9993360
SUB3	1974	sin umbral de corte	1.4319	4.714e-07	0.9993272
SUB3	1986	sin umbral de corte	1.4267	4.591e-07	0.9993282
SUB3	1900	$m \geq 3$	1.3045	1.627e-07	0.9826188
SUB3	1974	$m \geq 3$	1.3035	1.622e-07	0.9825164
SUB3	1986	$m \geq 3$	1.2944	1.579e-07	0.9825931
SUB3	1900	$3 \leq m \leq 6$	1.3017	1.613e-07	0.9807046
SUB3	1974	$3 \leq m \leq 6$	1.3017	1.613e-07	0.9807046
SUB3	1986	$3 \leq m \leq 6$	1.2930	1.573e-07	0.9807970
SUB4	1900	sin umbral de corte	1.1005	2.956e-08	0.9960565
SUB4	1974	sin umbral de corte	1.0998	2.953e-08	0.9960618
SUB4	1986	sin umbral de corte	1.0673	2.814e-08	0.9961866
SUB4	1900	$m \geq 3$	1.0871	2.850e-08	0.9922642
SUB4	1974	$m \geq 3$	1.0864	2.846e-08	0.9922740
SUB4	1986	$m \geq 3$	1.0523	2.712e-08	0.9924993

SUB4	1900	$3 \leq m \leq 6$	1.0838	2.836e-08	0.9908777
SUB4	1974	$3 \leq m \leq 6$	1.0838	2.836e-08	0.9908777
SUB4	1986	$3 \leq m \leq 6$	1.0495	2.702e-08	0.9911607

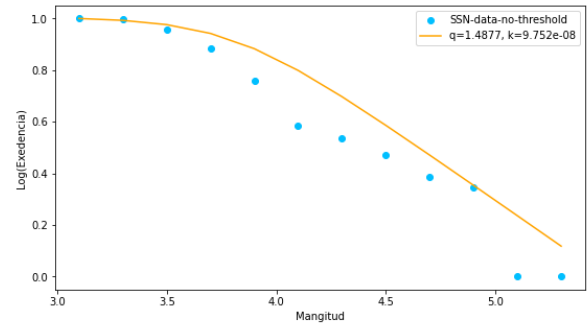
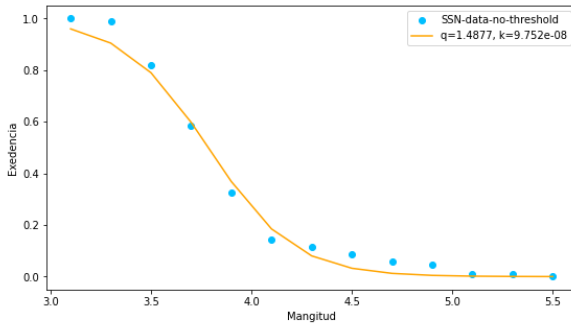
#### 4.2.6.1 Resultado del ajuste a SUBR

Para la región SUBR se toman los registros a partir de tres años diferentes: 1900, 1974 y 1986. Como se ilustra en la gráfica 44, al comparar la relación entre excedencia y la magnitud de los registros a diferentes años de corte se revela que las distribuciones difieren entre los años de 1900 y 1986.

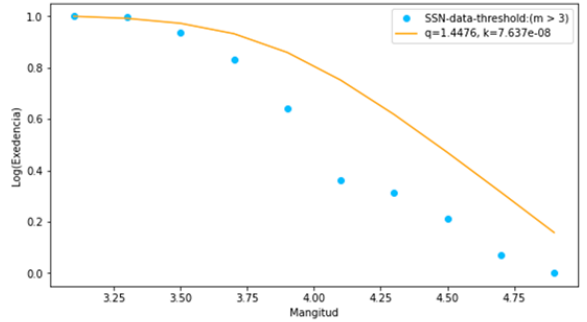
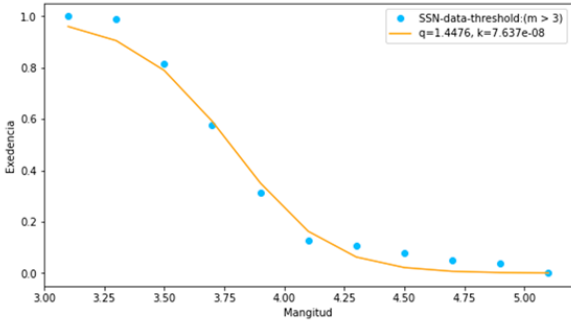


Gráfica 44. Distribución de la relación de la excedencia y la magnitud en la zona SUBR de Subducción con base a los registros disponibles a partir diversos años de inicio: 1900, 1974 y 1986. Del lado izquierdo están los datos en escala lineal; en el derecho, en escala logarítmica.

Los resultados del ajuste utilizando el modelo Fragmento-Aspereza al catálogo completo sin corte de umbral ni eliminación de réplicas desde Enero de 1900 a Marzo de 2021, se muestran en la gráfica 45. El valor obtenido para  $q$  es 1.4877 y  $k = 9.752e-08$  con un factor de correlación igual a  $R^2 = 0.9888$  en la escala lineal. Cuando se realiza el ajuste pero con año de inicio 1986, los valores obtenidos son:  $q = 1.4476$  y  $k = 7.637e-08$ .



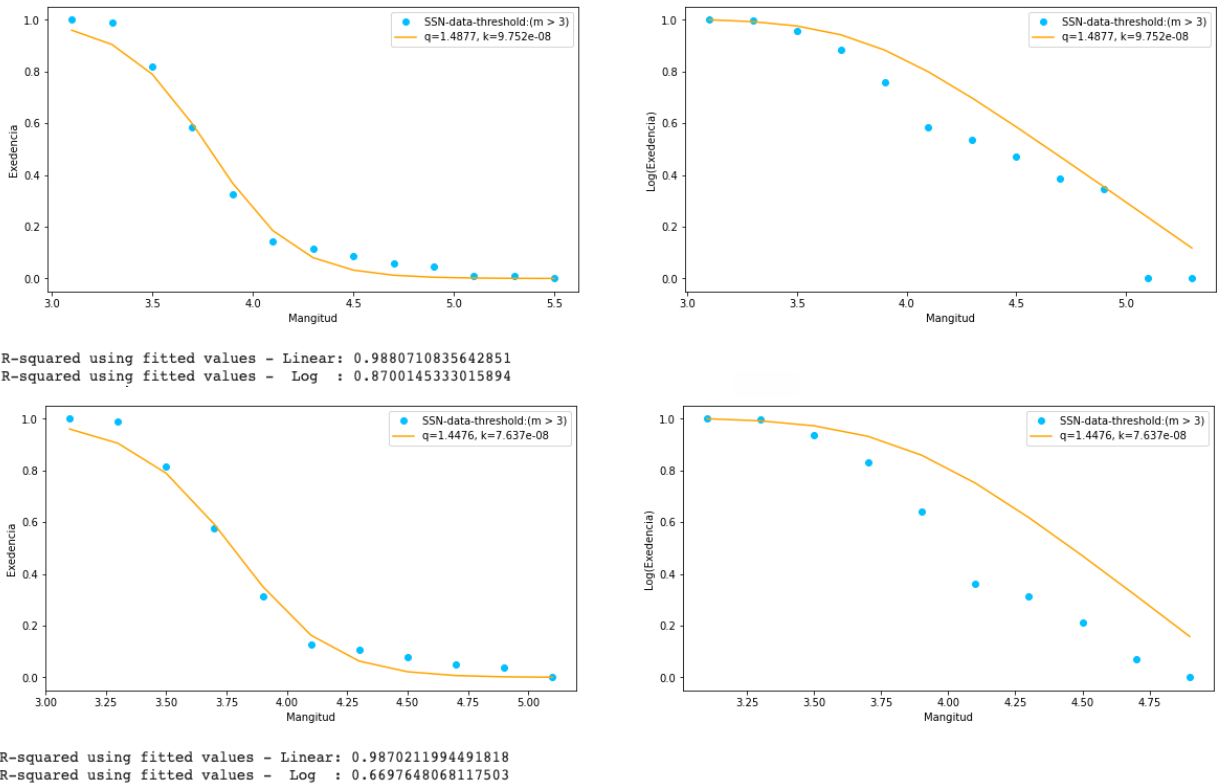
R-squared using fitted values - Linear: 0.9880710835642851  
 R-squared using fitted values - Log : 0.8700145333015894



R-squared using fitted values - Linear: 0.9870211994491818  
 R-squared using fitted values - Log : 0.6697648068117503

Gráfica 45. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUBR desde el año 1986, sin umbral de magnitud de corte. La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha. El valor de correlación indica 0.9870 y 0.6697 respectivamente.

Después, como se observa que no se tienen registrados eventos sísmicos con magnitudes superiores a  $m \geq 6$ , únicamente se establece como umbral de corte mínimo para los registros con  $m \geq 3$  (gráfica 46). El valor que se obtiene, a partir de los mismos años de comienzo: 1900 y 1986, para  $q$  es: 1.4877 y 1.4476; mientras que para el parámetro de densidad de energía  $k = 9.752e-08$  y  $7.637e-08$ .



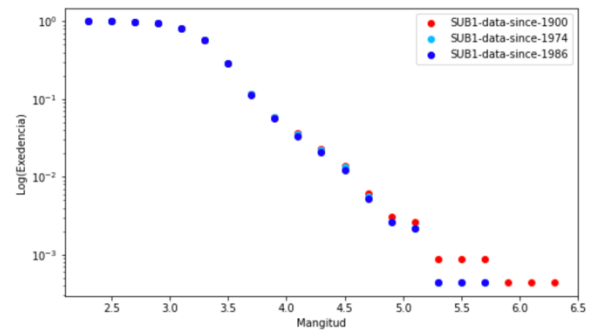
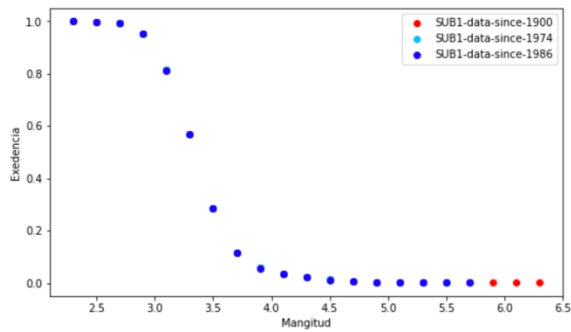
Gráfica 46. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUBR desde el año 1900, con un umbral de corte:  $m \geq 3$ . La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha. El valor de correlación indica 0.9880 y 0.8700 respectivamente.

También se realiza el ajuste de los datos de acuerdo a cada orden de magnitud para cada previo intervalo de tiempo. Se presentan en el apéndice 8, la relación de la excedencia con la magnitud de los eventos y el valor de los parámetros del modelo de Sotolongo-Costa & Posadas (2004), con colores para cada uno. Se aprecia que los valores que se obtienen de los parámetros del modelo en cada orden de magnitud, es diferente.

#### 4.2.6.2 Resultado del ajuste a SUB1

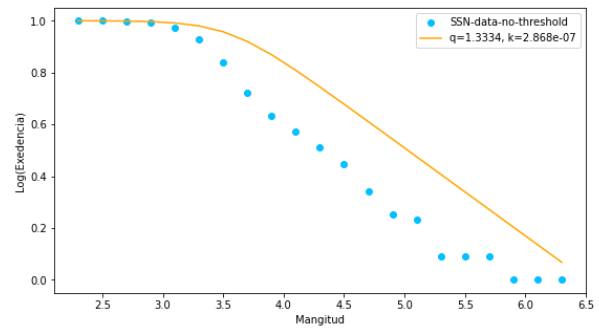
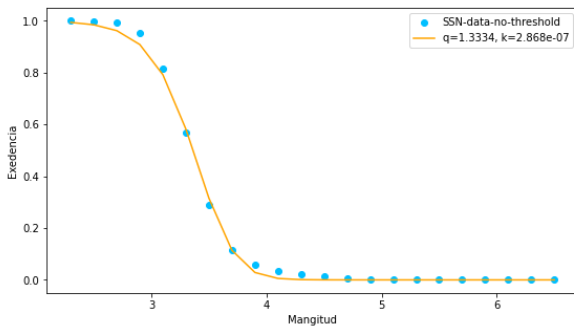
Para la región SUB1 se analizan los registros a partir de los años: 1900, 1974 y 1986. Se ilustra en la gráfica 47, al comparar la relación entre excedencia y la magnitud de los registros, que las distribuciones entre los últimos años, 1900 y 1974, difieren de 1900. Por esto, se realiza el análisis de los años 1900 y 1986.



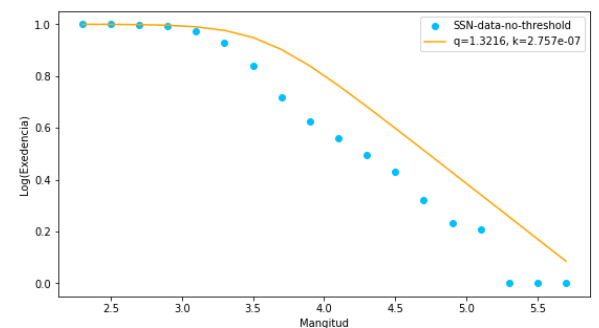
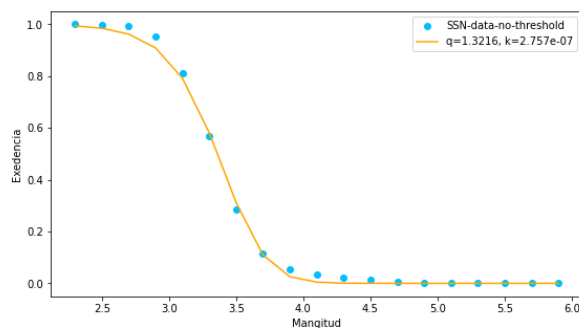


Gráfica 47. Distribución de la relación de la excedencia y la magnitud en la zona SUB1 de Subducción con base a los registros disponibles a partir diversos años de inicio: 1900, 1974 y 1986. Del lado izquierdo están los datos en escala lineal; en el derecho, en escala logarítmica.

Al utilizar el modelo Fragmento-Aspereza, como se presenta en la gráfica 48, el valor del parámetro de no extensividad  $q$  es igual a 1.3334; cuando se toman los disponibles a partir de 1986, se tiene que  $q = 1.4581$ . Ambos obtenidos al realizar el ajuste de los datos sin umbral mínimo o máximo de corte y tomando los registros desde el año 1900 y 1986.



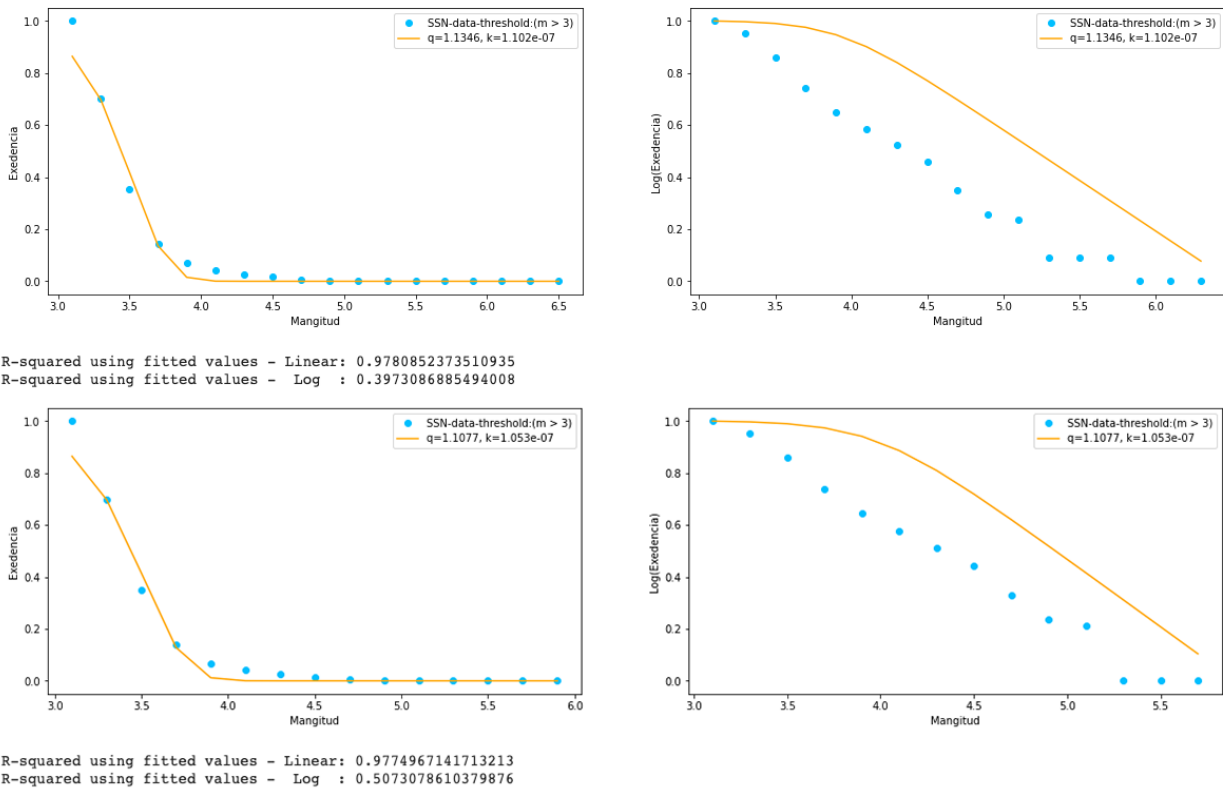
R-squared using fitted values - Linear: 0.9979559912989424  
 R-squared using fitted values - Log : 0.7485128092472039



R-squared using fitted values - Linear: 0.997913701492447  
 R-squared using fitted values - Log : 0.8376051492743095

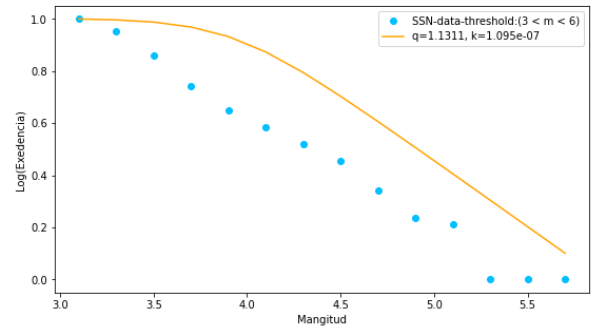
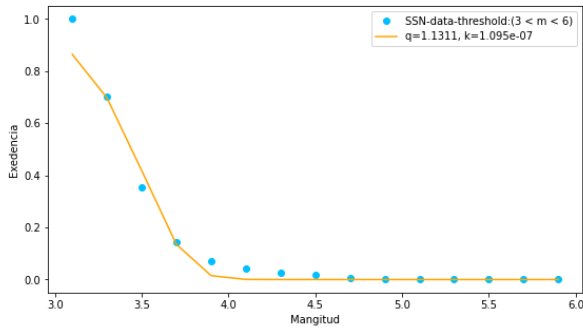
Gráfica 48. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB1 sin umbral de magnitud de corte, desde el año 1900 (en las gráficas superiores) y desde 1986 (gráficas inferiores). La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha.

Así, se realiza el ajuste de los datos de acuerdo estableciendo un umbral de magnitud mínimo de corte de  $m \geq 3$  (gráfica 49). El valor que se obtiene, para los eventos desde el año 1900, para  $q$  es: 1.1346; mientras que para los registros tomados a partir de 1986,  $q = 1.1077$ .

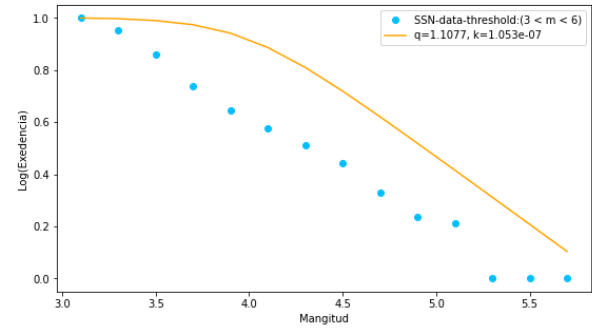
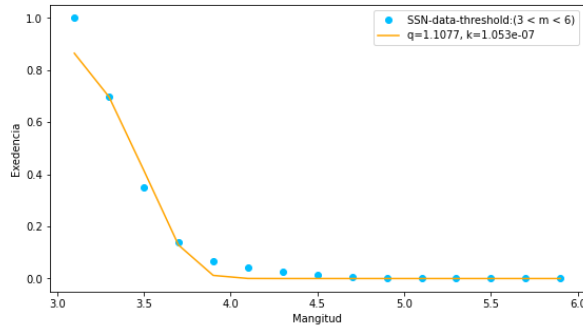


Gráfica 49. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB1 con un umbral de corte:  $m \geq 3$  desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde 1986 (gráficas inferiores). La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha.

Posteriormente, cuando se agrega un umbral de magnitud máxima de  $m \leq 6$  con los mismos años de inicio (gráfica 50). El valor de  $q = 1.3472$  y  $k = 1.105e-07$ , para los datos con año inicial 1900; para los disponibles a partir de 1986, se tiene que  $q = 1.3234$  y  $k = 1.018e-07$ .



R-squared using fitted values - Linear: 0.9771305089546194  
 R-squared using fitted values - Log : 0.564265546836391



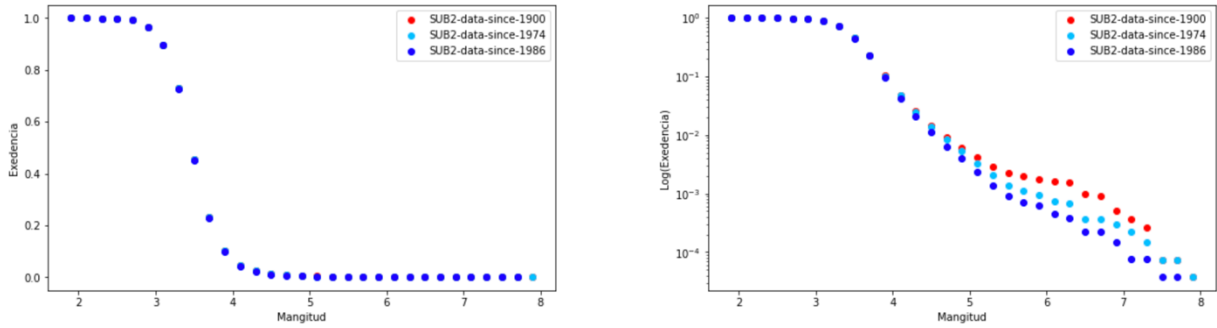
R-squared using fitted values - Linear: 0.9774967141713213  
 R-squared using fitted values - Log : 0.5073078610379876

Gráfica 50. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB1 con un umbral de corte:  $3 \leq m \leq 6$ , desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde 1986 (gráficas inferiores). La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha.

De igual manera, se realiza el ajuste de los datos por orden de magnitud para cada intervalo de tiempo desde 1900 y 1986. Se presentan en el apéndice 9 la relación de la excedencia con la magnitud y con colores el valor de los parámetros del modelo de Sotolongo-Costa & Posadas (2004) para cada intervalo. Se observa igualmente que el valor del parámetro de no extensividad y de densidad de energía para cada orden de magnitud difiere.

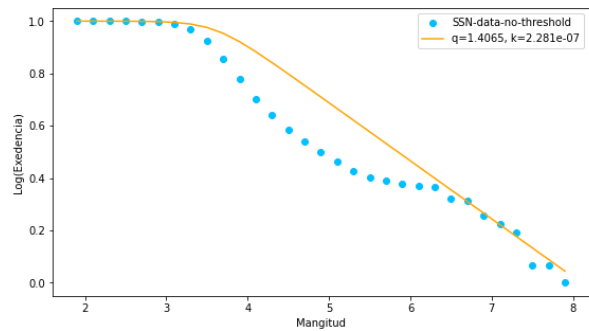
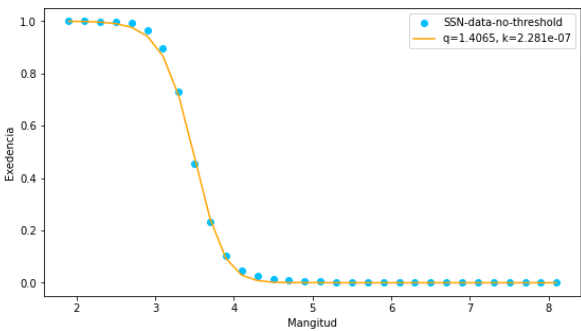
#### 4.2.6.3 Resultado del ajuste a SUB2

Para la zona SUB2 se analizan los registros a partir de los mismos años de inicio: 1900, 1974 y 1986. Se ilustra en la gráfica 51, al comparar la relación entre la excedencia y la magnitud de los registros a diferentes años de corte que las distribuciones no son iguales en todos los años. Siguiendo los previos intervalos de tiempo, se analizan los datos disponibles a partir de 1900 y 1986, es decir, los de mayor discordancia.

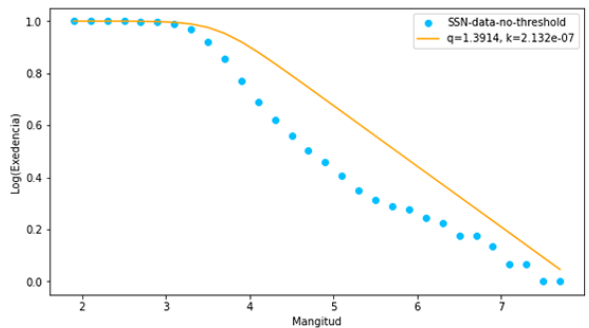
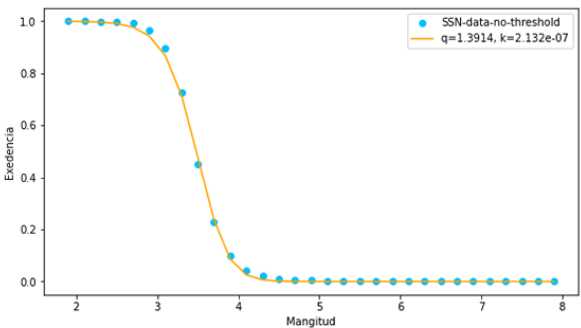


Gráfica 51. Distribución de la relación de la excedencia y la magnitud en la zona SUB2 de Subducción con base a los registros disponibles a partir diversos años de inicio: 1900, 1974 y 1986. Del lado izquierdo están los datos en escala lineal; en el derecho, en escala logarítmica.

Al realizar el ajuste de los datos utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, como se expone en la gráfica 52, el valor del parámetro de no extensividad para los sismos tomados a partir del año 1900, es  $q = 1.4065$ ; para los eventos a partir de 1986 el valor de  $q = 1.3914$ . Ambos obtenidos al ajustar los datos sin establecer un umbral mínimo o máximo de corte.



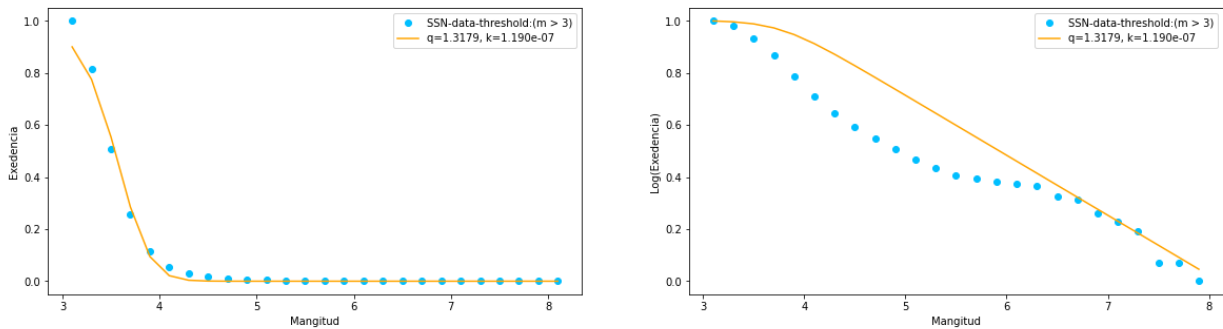
R-squared using fitted values - Linear: 0.9992698076716957  
 R-squared using fitted values - Log : 0.8774747134851064



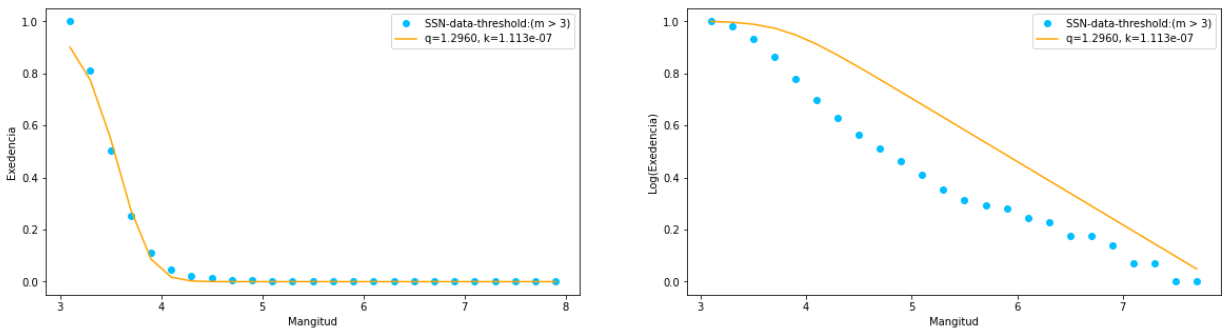
R-squared using fitted values - Linear: 0.999333311116672  
 R-squared using fitted values - Log : 0.8232110968484241

Gráfica 52. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB2, sin umbral de magnitud de corte, desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde 1986 (gráficas inferiores). La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha.

Entonces, se realiza el ajuste de los datos estableciendo un umbral de magnitud mínima de  $m \geq 3$  (gráfica 53). Donde el valor obtenido de los registros, a partir del año 1900, es  $q = 1.3179$ ; y para los disponibles desde de 1986, el parámetro no extensivo tiene un valor de  $q = 1.2960$ .



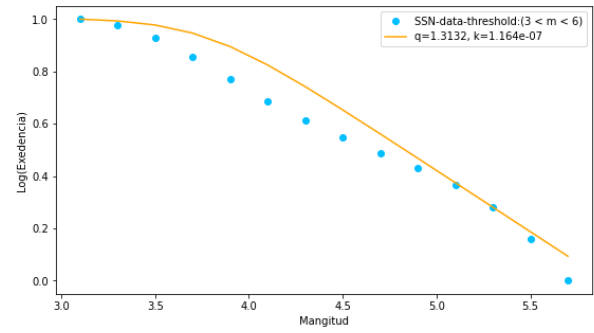
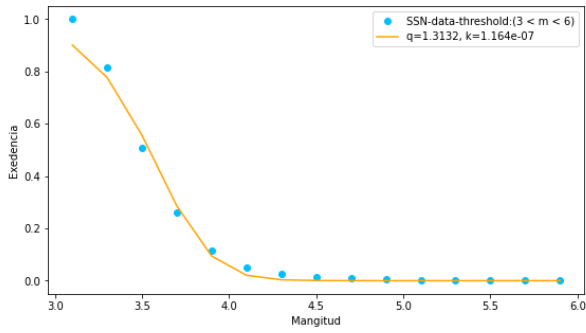
R-squared using fitted values - Linear: 0.9900328158390608  
R-squared using fitted values - Log : 0.7456825340016654



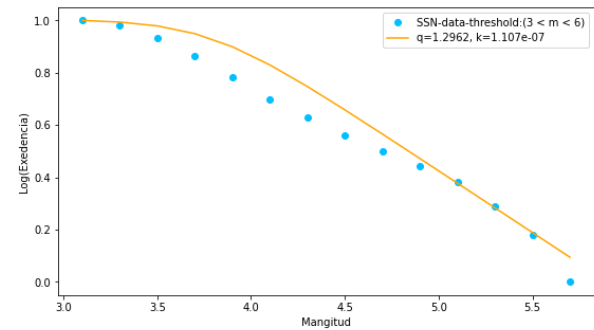
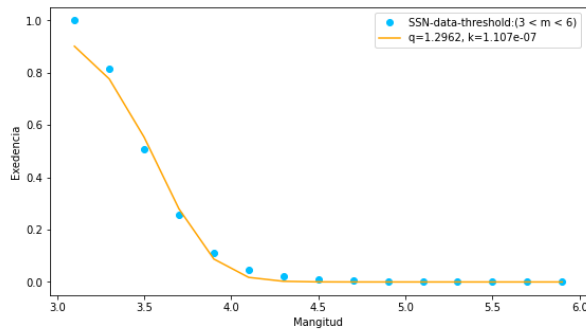
R-squared using fitted values - Linear: 0.9902794768292678  
R-squared using fitted values - Log : 0.6435137100037842

Gráfica 53. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB2, con un umbral de corte:  $m \geq 3$ , desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde el año 1986 (gráficas inferiores). La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha.

Enseguida, se agrega un umbral de magnitud máxima de  $m \leq 6$  a partir de los mismos intervalos de inicio (gráfica 54). El valor obtenido, desde el año 1900, para el parámetro de no extensividad  $q$  es 1.3132; con los datos a partir de 1986, se obtiene un valor de  $q = 1.2962$ .



R-squared using fitted values - Linear: 0.9888663647198326  
 R-squared using fitted values - Log : 0.9288289168741837



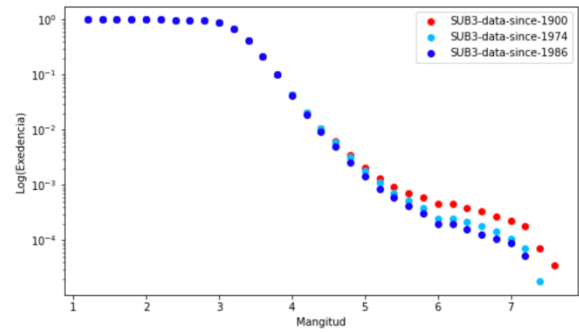
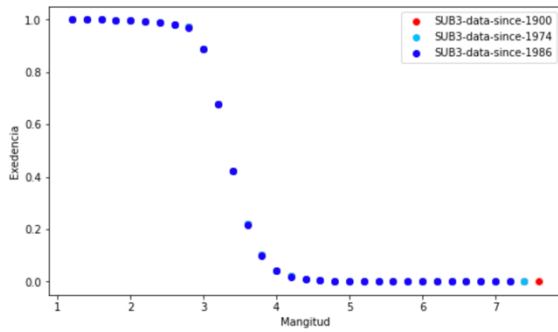
R-squared using fitted values - Linear: 0.9890838702241876  
 R-squared using fitted values - Log : 0.9363433527024035

Gráfica 54. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB2, con un umbral de corte:  $3 \leq m \leq 6$ , desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde 1986 (gráficas inferiores). La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha.

Además, se realiza el ajuste de los datos por orden de magnitud. Se presentan en la gráfica 55, del lado izquierdo en escala lineal y en la derecha en escala logarítmica la relación de la excedencia con la magnitud de los eventos. Los colores indican el valor de los parámetros del modelo de Sotolongo-Costa & Posadas (2004) para cada orden de magnitud. De igual manera, se puede observar que el valor tanto del parámetro de no extensividad como el de densidad de energía, para cada orden es diferente.

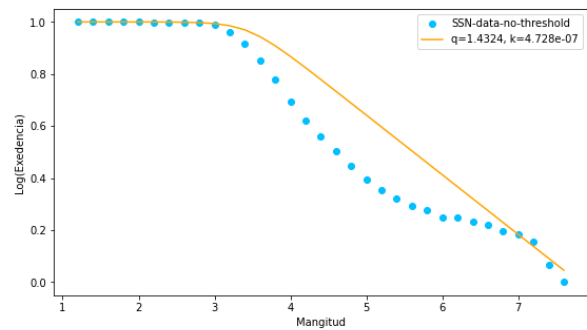
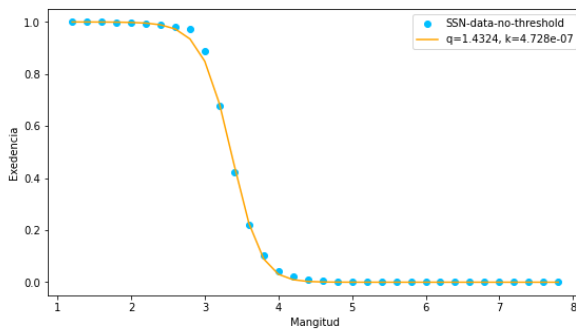
#### 4.2.6.4 Resultado del ajuste a SUB3

Para la región SUBR se toman los registros a partir de tres años diferentes de inicio: 1900, 1974 y 1986. Como se ilustra en el apéndice 10, al comparar la relación entre excedencia y la magnitud de los registros a diferentes años de corte, se revela que las distribuciones difieren entre estos años principalmente entre 1900 y 1986.

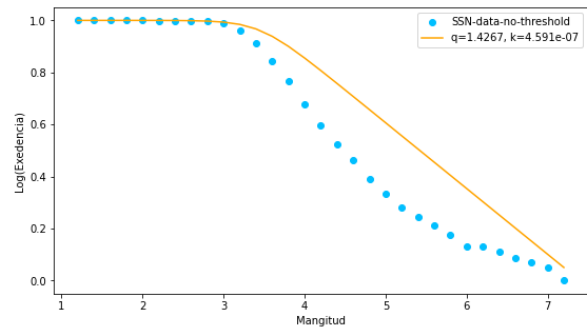
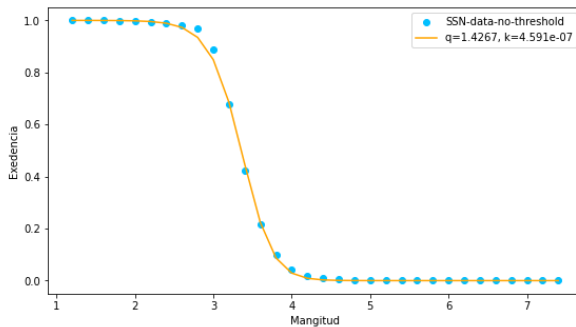


Gráfica 55. Distribución de la relación de la excedencia y la magnitud en la zona SUB3 de Subducción con base a los registros disponibles a partir diversos años de inicio: 1900, 1974 y 1986. Del lado izquierdo están los datos en escala lineal; en el derecho, en escala logarítmica.

Se realiza el ajuste de los datos utilizando el modelo Fragmento-Aspereza al catálogo completo y sin corte de umbral ni eliminación de réplicas a Marzo de 2021 (gráfica 56). El valor obtenido de los datos a partir del año 1900, es  $q = 1.4324$ ; para los disponibles desde 1986, el valor que se consigue es  $q = 1.4267$ .



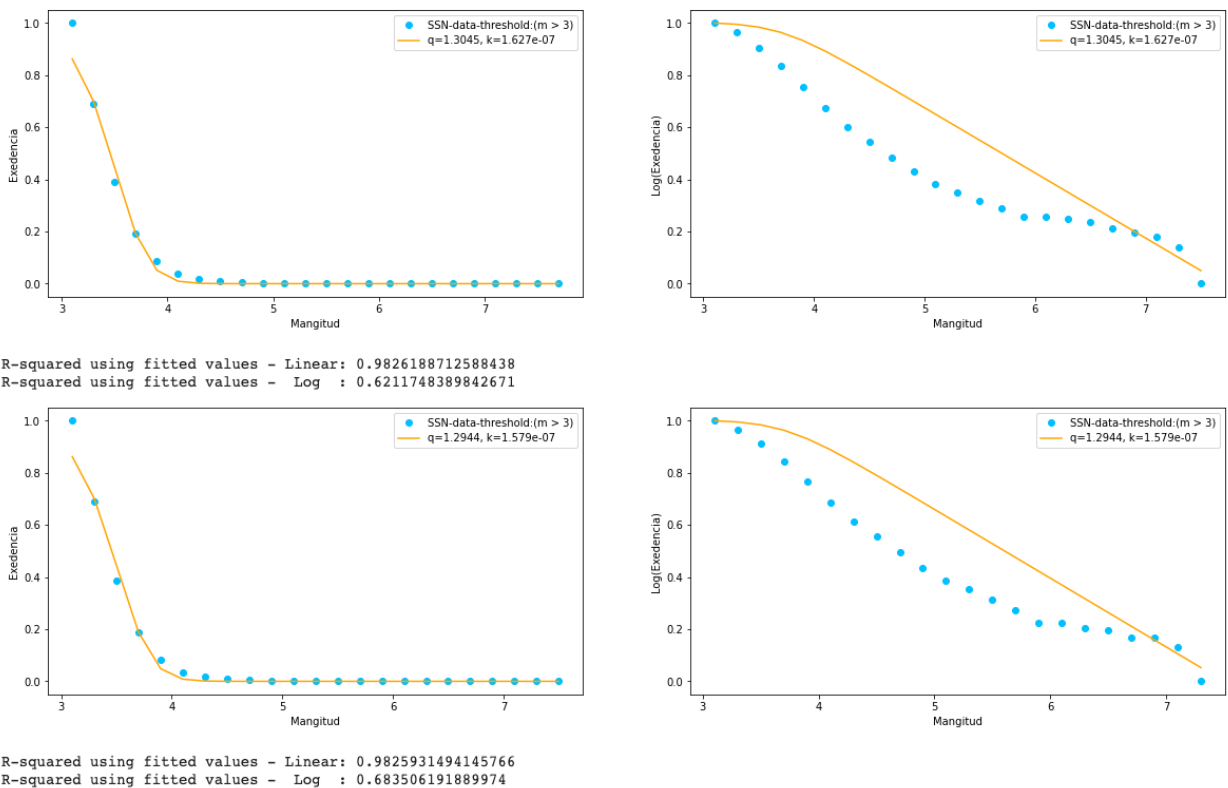
R-squared using fitted values - Linear: 0.9993360020430416  
 R-squared using fitted values - Log : 0.8603512494142418



R-squared using fitted values - Linear: 0.999328265318843  
 R-squared using fitted values - Log : 0.8334488193509213

Gráfica 56. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB3, sin umbral de magnitud de corte, desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde 1986 (gráficas inferiores). La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha.

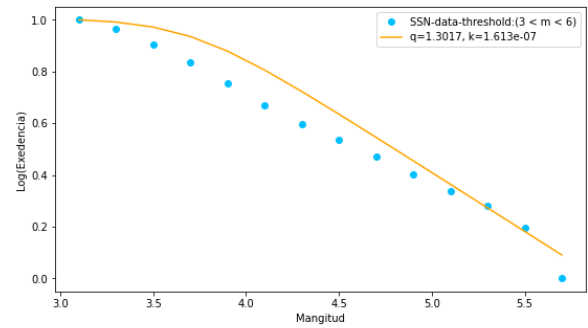
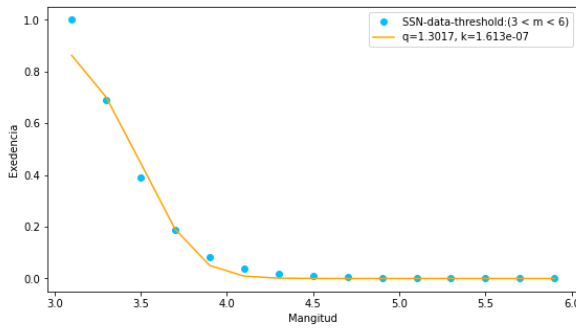
Posteriormente, se establece un umbral de corte mínimo de  $m \geq 3$  (gráfica 57). El valor que se obtiene, a partir de los mismos años de comienzo: 1900, es  $q = 1.3045$ ; mientras que para los registros desde 1986, se encuentra  $q = 1.2944$ . Para ambos casos, se aprecia un mejor factor de correlación en la escala lineal con respecto a la logarítmica, para los datos desde 1900 se tiene que  $R^2 = 0.9826$ , al contrario, en la escala logarítmica  $R^2 = 0.6211$ .



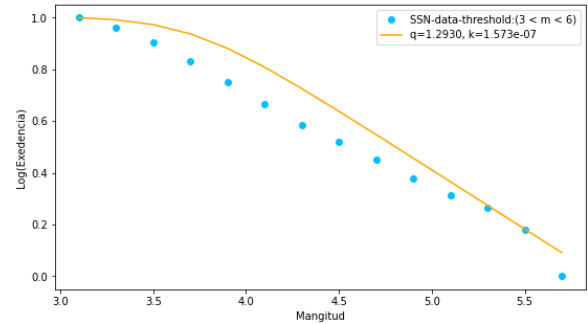
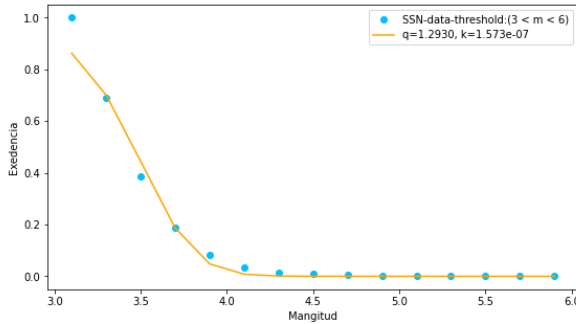
Gráfica 57. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB3, con un umbral de corte:  $m \geq 3$ , desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde 1986 (gráficas inferiores). La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha.

De modo que cuando se agrega un umbral de magnitud máxima de  $m \leq 6$  (gráfica 58) con los mismos años de inicio, el valor del parámetro no extensivo tiene un valor de  $q = 1.3017$ , para los disponibles a partir del año 1900; y para los datos con año inicial 1986, se tiene  $q = 1.2930$ .





R-squared using fitted values - Linear: 0.9807046655293713  
 R-squared using fitted values - Log : 0.9231625435080247



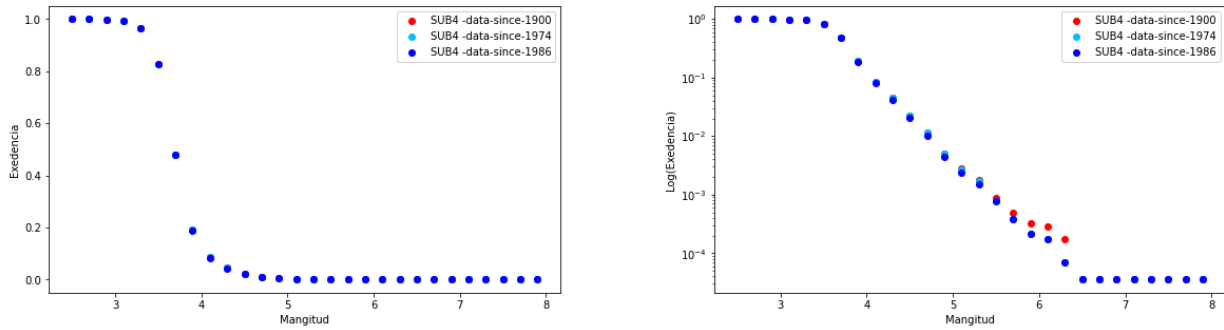
R-squared using fitted values - Linear: 0.9807970693025245  
 R-squared using fitted values - Log : 0.9087420102238446

Gráfica 58. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB3 desde el año 1900, con un umbral de corte:  $3 \leq m \leq 6$ . La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha. El valor de correlación indica 0.9807 y 0.9231 respectivamente.

De la misma manera, se realiza el ajuste de los datos de acuerdo a cada orden de magnitud para cada previo intervalo de tiempo. Se presentan en el apéndice 11 la relación de la excedencia-magnitud de los eventos. Puede observarse que los valores de los parámetros  $q$  y  $k$  del modelo Fragmento-Aspereza para cada orden de magnitud obtenido, es distinto.

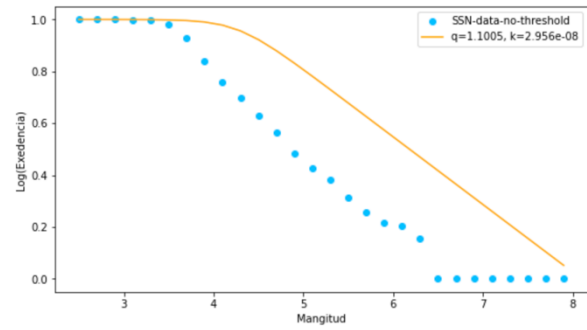
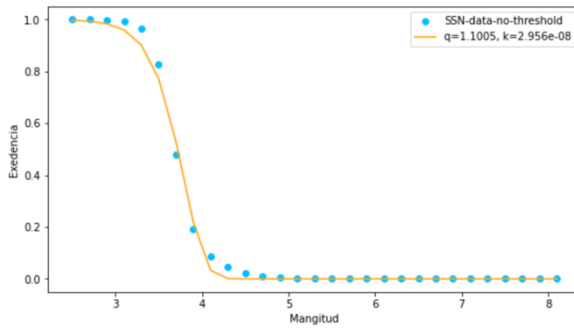
#### 4.2.6.5 Resultado del ajuste a la zona SUB4

Para la zona SUB4 se analizan los registros a partir de los años de inicio: 1900, 1974 y 1986. Se ilustra en la gráfica 59 al comparar la relación entre la excedencia y la magnitud de los registros a diferentes intervalos de tiempo, que existe poca diferencia con respecto a las anteriores regiones, sin embargo, ya que en esta región se presenta el evento sísmico más grande del siglo, los registros muestran magnitudes superiores a 6.5 para los disponibles a partir de 1986.

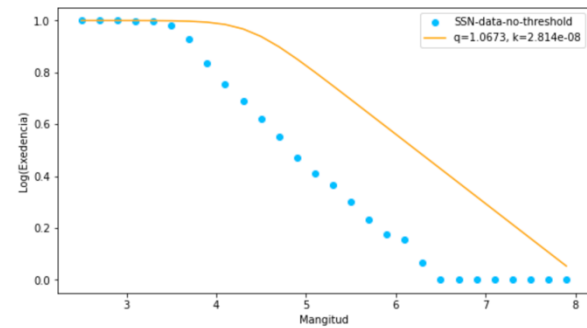
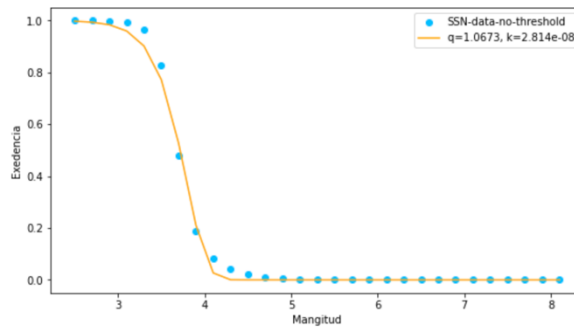


Gráfica 59. Distribución de la relación de la excedencia y la magnitud en la zona SUB4 de Subducción con base a los registros disponibles a partir diversos años de inicio: 1900, 1974 y 1986. Del lado izquierdo están los datos en escala lineal; en el derecho, en escala logarítmica.

Al realizar el ajuste de los datos utilizando el modelo Fragmento-Aspereza sin umbral mínimo o máximo de corte, como se expone en la gráfica 60, el valor del parámetro de no extensividad para los sismos tomados a partir del año 1900, es  $q = 1.1005$ ; mientras que para los eventos a partir de 1986 se tiene un valor de  $q = 1.0673$ . Se destaca que en ambos casos se aprecia un mejor factor de correlación en la escala lineal con respecto a la logarítmica, para los datos desde 1900 se tiene que  $R^2 = 0.996$ , al contrario, en su escala logarítmica  $R^2 = 0.5666$ .



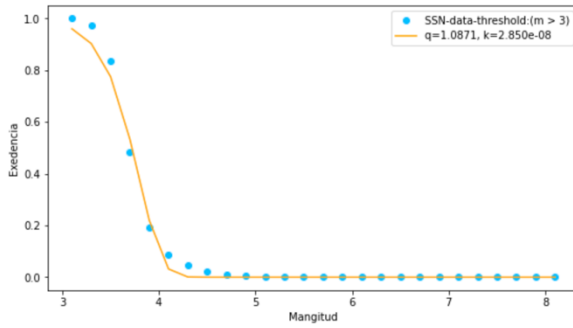
R-squared using fitted values - Linear: 0.9960565288243165  
 R-squared using fitted values - Log : 0.5666622033303651



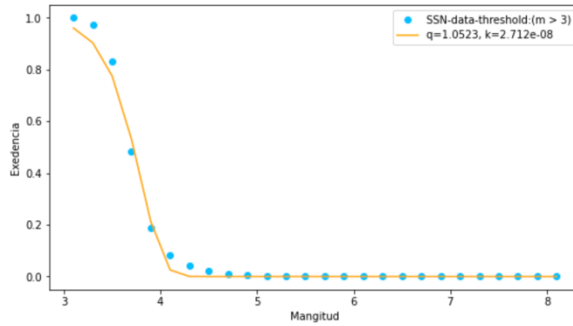
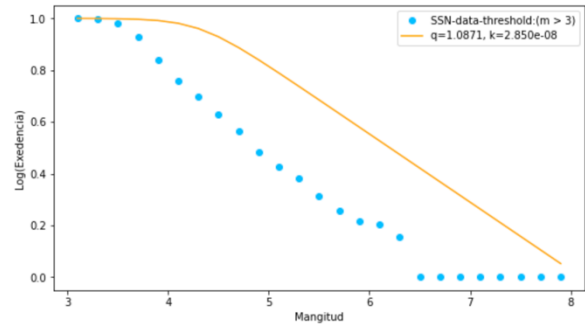
R-squared using fitted values - Linear: 0.9961866938168613  
 R-squared using fitted values - Log : 0.4928974267786559

Gráfica 60. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB4, sin umbral de magnitud de corte, desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde 1986 (gráficas inferiores). La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha.

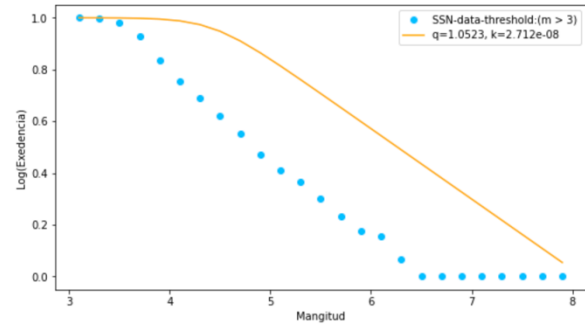
Entonces, se realiza el ajuste de los datos estableciendo un umbral de magnitud mínima de  $m \geq 3$  (gráfica 61). Donde, el valor obtenido de los registros a partir del año 1900, es  $q = 1.0871$ ; y para los disponibles desde de 1986, el parámetro no extensivo tiene un valor de  $q = 1.0523$ . De igual manera se presenta un mejor factor de correlación en la escala lineal con respecto a la logarítmica. Para los datos disponibles a partir de 1986, se tiene que  $R^2 = 0.9924$ , mientras que en la escala logarítmica  $R^2 = 0.3057$ .



R-squared using fitted values - Linear: 0.9922642342187223  
 R-squared using fitted values - Log : 0.4186199009720033

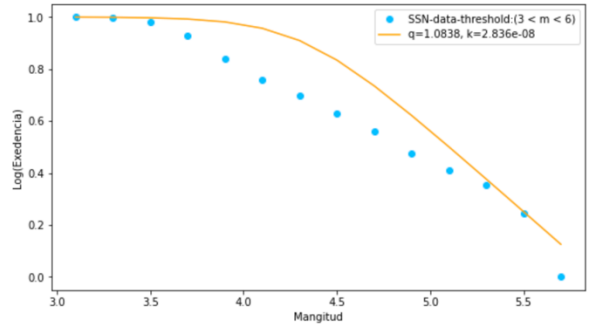
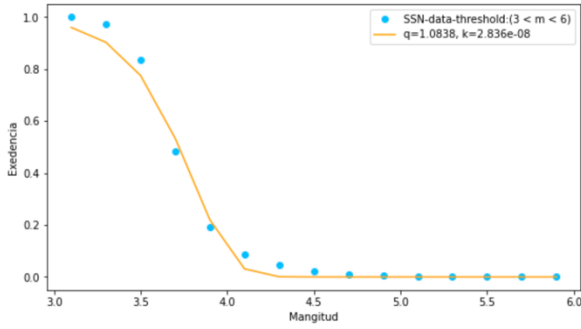


R-squared using fitted values - Linear: 0.9924993327041444  
 R-squared using fitted values - Log : 0.30574058892904743

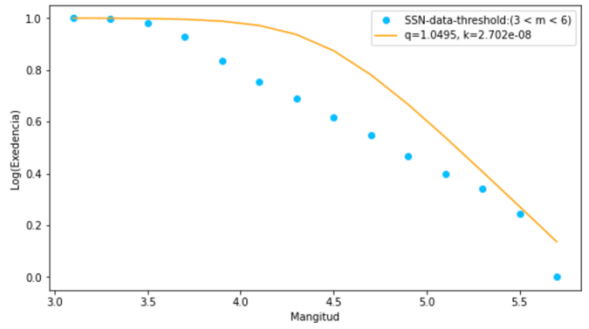
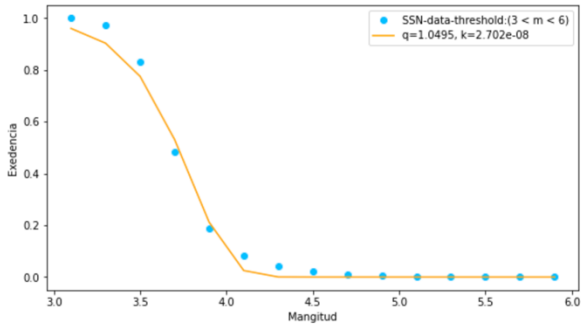


Gráfica 61. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB4, con un umbral de corte:  $m \geq 3$ , desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde 1986 (gráficas inferiores). La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha.

Posteriormente, se agrega un umbral de magnitud máxima de  $m \leq 6$  a partir de los mismos intervalos de inicio (gráfica 62). El valor obtenido a partir del año 1900, para el parámetro de no extensividad es  $q = 1.0838$ ; con los datos a partir de 1986 se obtiene un valor de  $q = 1.0495$ . Para los registros disponibles a partir de 1986, el factor de correlación de los datos en la escala lineal es  $R^2 = 0.9911$  mientras que para la correlación logarítmica es  $R^2 = 0.7303$ .



R-squared using fitted values - Linear: 0.990877725174295  
 R-squared using fitted values - Log : 0.8180386430185183



R-squared using fitted values - Linear: 0.991160784319922  
 R-squared using fitted values - Log : 0.7303022713958317

Gráfica 62. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, a los datos de la región SUB4, con un umbral de corte:  $3 \leq m \leq 6$ , desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde 1986 (gráficas inferiores). La relación excedencia-magnitud se presenta en escala lineal, izquierda, y en escala logarítmica a la derecha.

Así mismo, como se presentan en el apéndice 12, los datos se tratan por orden de magnitud para cada intervalo de tiempo usado previamente. El valor de los parámetros del modelo Fragmento-Aspereza dependiendo del orden de magnitud que se analiza se representa usando diferentes colores. Se puede observar que los valores obtenidos de los parámetros del modelo para cada orden de magnitud varían.

# Conclusiones y Recomendaciones

## Conclusión

En la presente investigación se aplica el modelo Fragmento-Aspereza a la totalidad del catálogo del Servicio Sismológico Nacional, el cual está basado en compilaciones automáticas de los reportes de sismicidad en toda la extensión del territorio mexicano. Además, a dos regiones estratificadas: la zona de Subducción del pacífico y el Cinturón Volcánico Mexicano, con el propósito de investigar los valores de los parámetros del modelo de Sotolongo-Costa & Posadas (2004).

El parámetro de no extensividad del modelo Fragmento-Aspereza toma un valor de  $q=1.449$  para la totalidad de eventos registrados en la república mexicana desde el año 1900 y  $q=1.4297$  cuando se toman a partir del año de 1986. Para ello, ambos resultan en un valor menor comparado al que se ha obtenido al aplicar el modelo en otros catálogos sísmicos alrededor del mundo.

Para el catálogo donde se cortan los datos con un umbral de magnitud mínima de  $m \geq 3$  el valor de  $q = 1.3533$  y cuando se añade un umbral de magnitud máxima de corte de  $m \leq 6$  el valor es  $q = 1.3472$ . Se observa el decremento del valor de  $q$  cuando se establece un umbral de corte de magnitud de los datos o ignora información de los registros almacenados en años anteriores. En lo que respecta al parámetro de densidad de energía  $k$ , el valor que se obtiene para los sismos del territorio mexicano es  $k = 2.501e-07$  para el catálogo, desde el año 1900 y de  $k = 2.224e-07$  desde 1986.

El valor de  $q = 1.0192$  para los sismos de la zona volcánica es menor que  $q = 1.4585$  para los sismos de la zona de subducción. Puesto que el mecanismo de generación de sismos del MVB no está completamente esclarecido (Verma 2002; 2004; 2009; 2015; 2016) se podría inferir que el parámetro no extensivo  $q$  puede indicar efectivamente una diferencia en la fuente de origen de los tipos de sismos. Sin embargo, el análisis de cada zona a detalle se discute a continuación:

Para el Cinturón Volcánico Mexicano, el resultado del ajuste da los valores de  $q$  varían dependiendo del año de corte y de la región que se analiza. Para el área completa el valor de  $q$  es 1.0192 y  $q = 0.990$  tomando los datos a partir de los años 1900 y 1986 respectivamente. Es importante señalar que el ajuste en la parte central del Cinturón Volcánico Mexicano conlleva a un valor de  $q = 1.7032$  a diferencia de sus regiones adyacentes donde  $q$  vale 1.3244 para la zona este y  $q = 1$  en la zona oeste.

Este es un resultado muy interesante porque aunque se considera una investigación profunda para la interpretación de estos resultados, nos informa acerca de la escala de interacciones en cada una de estas áreas. Se conoce que cuando el valor de  $q \approx 1$  significa que las correlaciones espaciales de corto alcance y los estados físicos se encuentran cerca del estado de equilibrio mientras que un valor de  $q = 1.7032$  implica que la zona examinada se encuentra lejos del equilibrio y más eventos sísmicos pueden esperarse (Sotolongo-Costa & Posadas, 2002). Siendo esto de utilidad para hipótesis y criterios sobre la intensidad y extensión de los procesos geológicos en estas regiones.

Es interesante observar los valores similares del valor de no extensividad  $q$  para las zonas de subducción, mientras que difieren de los obtenidos en la zona Volcánica estratificada. Esto reitera que, el modelo de Sotolongo-Costa & Posadas no es una herramienta solamente de ajuste sino expone las propiedades no extensivas de la dinámica de los terremotos en una representación más real utilizando una perspectiva físico-estadística.

Los resultados del ajuste a la zona de Subducción estratificada arrojan los valores para  $q$  de 1.4877, 1.3438, 1.4065, 1.1005 para las regiones SUBR, SUB1, SUB2, SUB3 y SUB4 respectivamente. Dado que el parámetro de no extensividad  $q$  se interpreta como una medida cuantitativa de escala en las interacciones espaciales de las regiones, el alto valor de  $q$  en la región SUBR respecto al resto de las otras sub-regiones sísmicas, en especial en contraste con el bajo de la región SUB4 (llama la atención el bajo valor de  $q$  en la zona sureste del país en SUB4 lo cual puede estar revelando la existencia de interacciones de alcance menor al de las otras), se explicaría que la totalidad de los eventos en el área norte de la zona de Subducción se producen por diversos fenómenos interrelacionados como son la triple trinchera donde la placa de Cocos se encuentra la placa de Rivera, mismas que se subducen debajo de la Norteamericana, que además se mueven horizontalmente con respecto de la otra.

El aporte más importante de los resultados de este estudio, es mostrar que, a diferencia del análisis de datos de otros catálogos donde se restringe solamente a las magnitudes por debajo o superiores a cierto umbral, se realiza el análisis a todo el rango. Se incluye la comparación de su ajuste por umbral de magnitud y año de corte a diversas zonas del territorio nacional verificando el estado en equilibrio en cada una de ellas. También, durante el análisis se comprueba que  $q$  se decrementa al realizar el ajuste a los catálogos que se depuran. Esto respalda la idea que los valores obtenidos en estos casos no pueden considerarse definitivos.

No obstante, se ha encontrado que la relación entre los datos y los parámetros es caótica. Es un modelo donde los valores de los parámetros son susceptibles a cambios por: la delimitación del perímetro de la zona, la incertidumbre en la medición de la energía liberada de los registros, la curva de sensibilidad de los sismogramas, el número de eventos a los que se tiene acceso, la cantidad de estaciones sismológicas instaladas en el área (figura 20), el año y el umbral de magnitud de corte. Para el caso de energías pequeñas: el umbral de sensibilidad de los instrumentos sismológicos afecta la correcta medición de estos sismos poco energéticos, por lo que que no se alcanzan a ser registradas en todas las estaciones correctamente. Para las magnitudes mayores: la poca frecuencia con la que ocurren no están suficientemente cuantificadas. A costa de confiabilidad en la precisión de los instrumentos de medición anteriores, a cierta fecha, existe una reducción del número de datos a analizar, es decir, cuando el número de registros al que se tiene acceso es menor también afecta al cambio de los valores en  $q$  ocasionando en algunos casos que las incertidumbres del valor estimado del parámetro de no extensividad sean mayores.

Por lo tanto, cualquier pequeño cambio en las características mencionadas anteriormente, lleva consigo un gran cambio en el valor de los parámetros del modelo y no porque sea algo esencial al fenómeno del terremoto. Por lo anteriormente descrito la función de distribución de energía del modelo Fragmento-Aspereza no es lo suficientemente robusta para poder determinar claramente una precisa relación causa-efecto como se propone en la hipótesis de esta investigación.

Por ello, se necesita construir una nueva función de distribución de energía, desde la perspectiva de la física estadística no extensiva empleando la maximización de la entropía de Tsallis, que combine las restricciones utilizadas por Sotolongo-Costa & Posadas (2004) y Silva



et al. (2006) que permita calcular la expresión para el número relativo acumulado de sismos en función de magnitud, como lo realizado en las investigaciones de los autores ya mencionados.

## Bibliografía

Abe, S. (2003). Geometry of escort distributions. *Physical Review E*, 68(3), 11.  
<https://doi.org/10.1103/physreve.68.031101>

Antonopoulos, C. G., Michas, G., Vallianatos, F., Bountis, T. (2014) Evidence of q-exponential statistics in Greek Seismicity *Physica A* 409 (2014) 71-72.

Araujo, S., (2017). Computation of Nonextensivity Parameter in the Fragment-Asperity model for the Ecuadorian Seismic Catalog by a Bayesian Approach. *Revista Cubana de Física*, 34(2), pp.112-115.

Burridge, R., L. Knopoff (1967) Model and Theoretical Seismicity, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 57, 3, 341-371.

C. Tsallis, *Introduction to Nonextensive Statistical Mechanics - Approaching a Complex World*, (Springer, 2009).

C. Tsallis (1988) Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics *J. Stat. Phys.* 52, 1-2, 479- 487 DOI: 10.1007/BF01016429.

Comisión Federal de Electricidad "CFE". (1993). *Manual de diseño de obras civiles: diseño por sismo*. Instituto de investigaciones eléctricas. Pag. 152.

Córdoba Montiel, F., Iglesias Mendoza, A., Singh, S. K., Spica, Z., & Legrand, D. (2014). Tomografía de Velocidad de Grupo de Ondas de Rayleigh para el Oriente de México y el Istmo de Tehuantepec. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(3), 441-457.

Cuanalo-Vázquez, J. A. (2016). *Estadística de Tsallis a fenómenos sísmicos en México*. Tesis de Licenciatura en Ciencias (computación). Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Rosas-Palafox, A. C. (2016). *Modelo Geofísico-Estructural de la porción Norte del Graben de Colima*. Tesis de Maestría en Geociencias Aplicadas. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.

Daza, D. (Septiembre, 2017). Qué es el Cinturón del Pacífico y por qué produce fuertes terremotos?. [Figura]. <http://peru21.pe/ciencia/cinturon-fuego-pacific>

De Rubeis, V., Hallgas, R., Loreto, V., Paladin, G., Pietronero, L., & Tosi, P., (1996). Self-affinity asperity model for earthquakes. *Phys. Rev. Lett.* 76, 2599- 2602 ISSN 1079-7114 (online), 0031-9007

Ferriz, H. & Mahood, G.A. (1986). Volcanismo riolítico en el Eje Neovolcánico Mexicano. *Geof. Int.* Vol. 25- I, 1986, pp. 117-156.

Frohlich, C. y Davis, S.C., (1993). Teleseismic b values: or much ado about 1.0. *J. Geophys. Res.*, 98, 631-644.

Grupo de trabajo del Servicio Sismológico Nacional, UNAM. (2018, febrero). Mexico Earthquake of 20 March 2012 (Mw7.5): A Preliminary Report. *Ometepec-Pinotepa Nacional, Geofísica Internacional*, 52(2), 173-196, 2013. <http://ojs.geofisica.unam.mx/ojs6/index.php/RGI/article/view/1532>

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

Gutiérrez, C. M., Quaas, R., Ordaz, M., Guevara, E., Muriá, D., y Singh, S. (2011). *Sísmos* (5.a ed., Vol. 2). Centro Nacional de Prevención de Desastres. ISBN: 970-628-876-7.

Jaramillo, S. H., & Suárez, G. (2011). The 4 December 1948 earthquake (Mw 6.4): Evidence of reverse faulting Beneath the Tres Mariás escarpment and its implications for the Rivera-North American relative plate motion. *Geofísica internacional*, 50(3), 313-317.

Jiménez, Z., & Ponce, L. (1978). FOCAL MECHANISM OF SIX LARGE EARTHQUAKES IN NORTHERN OAXACA, MEXICO. FOR THE PERIOD 1928-1973. *Geofísica Internacional*, 17(3).

Kossobokov, V.G. y Keilis-Borok, V.I., (2000). Implications of a Statistical Physics Approach for Earthquake Hazard Assessment and Forecasting. *Pure Appl. Geophys.*, 157, 11, 2323-2349.

López Briceño, Ernesto & Zúñiga, F. (2014). Estudio de la probabilidad de concatenación de rupturas en segmentos de la zona de subducción del pacífico en México a partir de una simulación estocástica de sismicidad. 10.13140/RG.2.2.23931.77608.

Mendoza-Ponce, A. R. (2012). Estudio de la estabilidad del valor de b para regiones sismotectónicas de México. Tesis de maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra. UNAM.

Pardo, M., & Suárez, G. (1995). Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B7), 12357-12373.

Pacheco, J. F., & Singh, S. K. (2010). Seismicity and state of stress in Guerrero segment of the Mexican subduction zone. *Journal of Geophysical Research*, 115(B1), 1. <https://doi.org/10.1029/2009jb006453>.

Pérez-Campos X, Kim Y, Husker A, Davis PM, Clayton RW, Iglesias A, Pacheco JF, Singh SK, Manea VC, Gurnis M (2008). Horizontal subduction and truncation of the Cocos plate beneath central Mexico. *Geophys Res Lett* 35: L18303.

Pérez-Méndez, N. D. L. P. (2017). Estudio regional del campo volcánico de la cuenca Serdán-Oriental a través de métodos potenciales (Master's thesis).

Rosenblueth, E., García, V., Rojas, T., Javier, F., y Orozco, J. (1994) *Macrosismos: aspectos físicos, sociales, económicos y políticos*. Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social. ISBN:968-496-211-8

Samudio, D., Weigandt, P., Toral B, J., & Sotolongo-Costa, O. (2014). No extensividad en catálogos sísmicos de Panamá. *Nova Scientia*, 7(13), 149. <https://doi.org/10.21640/ns.v7i13.119>

Sarlis, N.V., E.S. Skordas, and P.A. Varotsos (2010), Nonextensivity and natural time: The case of seismicity, *Phys. Rev. E* 82, 2, 021110, DOI: 10.1103/PhysRevE.82.021110.

Siebe, C., & Verma, S. P. (1988). Major element geochemistry and tectonic setting of Las Derrumbadas rhyolitic domes, Puebla, Mexico, *Chem. Erde*, 48(3), 177–189.

Silva, R., G.S. França, C.S. Vilar, and J.S. Alcaniz (2006), Nonextensive models for earthquakes, *Phys. Rev. E* 73, 026102, DOI: 10.1103/PhysRevE.73.026102.

Singh, S. K., & Wyss, M. (1978). Source parameters of the Orizaba earthquake of August 28, 1973. *Geofísica Internacional*, 16(3).

Sotolongo-Costa, O., Rodriguez, A., & Rodgers, G. (2000). Tsallis Entropy and the Transition to Scaling in Fragmentation. *Entropy*, 2(4), 172–177. <https://doi.org/10.3390/e2040172>

Sotolongo-Costa, O. & Posadas, A. (2002). Tsallis' entropy: a non-extensive frequency-magnitude distribution of earthquakes. *Phys. Rev. Lett.*, 92, 048501, 2004.

Sotolongo-Costa, O., & Posadas, A. (2004). Fragment-asperity interaction model for earthquakes, *Phys. Rev. Lett.* 92, 4, 048501, DOI: 10.1103/Phys. Rev. Lett. 92.048501

Sotolongo-Costa, O. (2012). Non-extensive framework for earthquakes: The role of fragments. *Acta Geophysica*, 60(3), 526-534. <https://doi.org/10.2478/s11600-012-0010-3>.

Suárez, G., Monfret, T., Wittlinger, G., & David, C. (1990). Geometry of subduction and depth of the seismogenic zone in the Guerrero gap, Mexico. *Nature*, 345(6273), 336-338.

SSN (2020, marzo). Reporte especial: Sismos del 5 de enero al 10 de marzo de 2020, Michoacán (M 3.9). IGEF - UNAM. [http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2020/SSNMX\\_rep\\_esp\\_20200113\\_secuenciaMichoacan\\_M39.pdf](http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2020/SSNMX_rep_esp_20200113_secuenciaMichoacan_M39.pdf)

SSN (2020). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Servicio Sismológico Nacional, México. Extraído el 02 de diciembre de 2020 desde: <http://www.ssn.unam.mx>. 10.21766/SSNMX/EC/MX

Telesca, L., and C.-C. Chen (2010), Nonextensive analysis of crustal seismicity in Taiwan, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10, 1293-1297, DOI: 10.5194/nhess10-1293-2010.

Verma, S.P. (2002). Absence of Cocos plate subduction-related basic volcanism in southern Mexico: a unique case on Earth? *Geology* 30: 1095–1098.

Verma SP (2004). Solely extension-related origin of the eastern to west-central Mexican Volcanic Belt (Mexico) from partial melting inversion model. *Current Science* 86: 713–719.

Verma SP (2009). Continental rift setting for the central part of the Mexican Volcanic Belt: a statistical approach. *Open Geology Journal* 3: 8–29.

Verma, S. P. (2015). Present state of knowledge and new geochemical constraints on the central part of the Mexican Volcanic Belt and comparison with the Central American Volcanic Arc in terms of near and far trench magmas. *TURKISH JOURNAL OF EARTH SCIENCES*, 24, 399–460. <https://doi.org/10.3906/yer-1504-20>

Verma, S. P. (2015a). Origin, evolution, and tectonic setting of the eastern part of the Mexican Volcanic Belt and comparison with the Central American Volcanic Arc from conventional multielement normalized and new multidimensional discrimination diagrams and discordancy and significance tests. *TURKISH JOURNAL OF EARTH SCIENCES*, 24, 111-164. <https://doi.org/10.3906/yer-1412-31>

Verma, S. P., Pandarinath, K., & Rivera-Gómez, M. A. (2016). Evaluation of the ongoing rifting and subduction processes in the geochemistry of magmas from the western part of the Mexican Volcanic Belt. *Journal of South American Earth Sciences*, 66, 125–148. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.12.007>

Vilar, C. S., França, G. S., Silva, R., & Alcaniz, J. S. (2007). Nonextensivity in geological faults? *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 377(1), 285-290. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2006.11.017>

Zúñiga, F.R., (2011) *Sismología, Posgrado en ciencias de la tierra*. Centro de Geociencias UNAM-Campus Juriquilla.

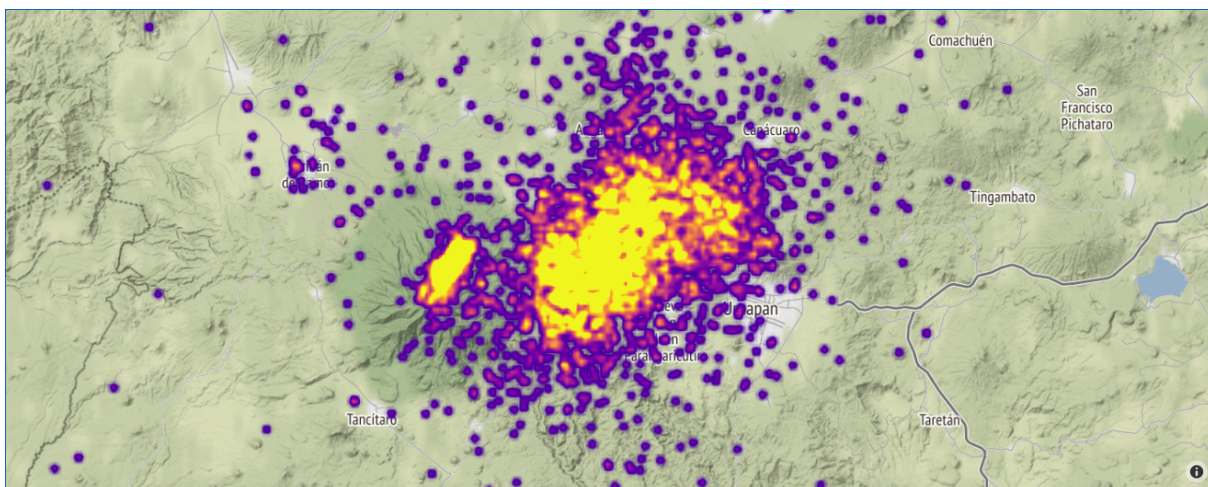
Zúñiga, F.R., Suárez, G., Ordaz, M. y García-Acosta, V. (1997). Proyecto: Peligro Sísmico en Latinoamérica y el Caribe, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, proyecto 89-0190.

Zúñiga, F. R., Reyes, M. A., & Valdés, C. (2000). A general overview of the catalog of recent seismicity compiled by the Mexican Seismological Survey. *Geofísica Internacional*, 39(2), 161-170.

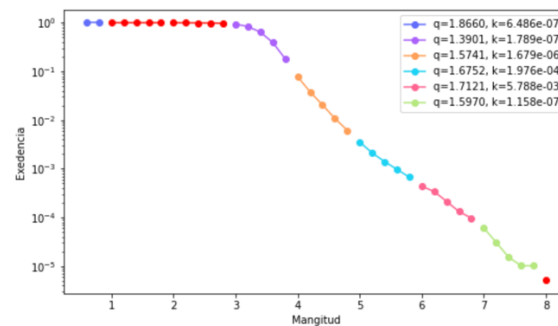
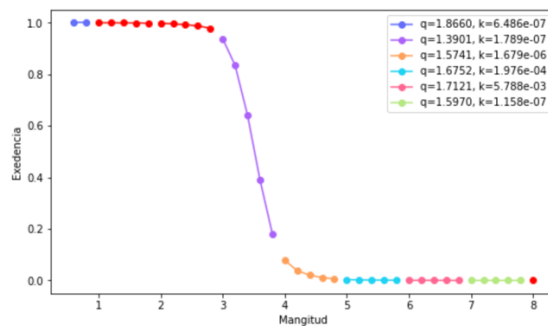
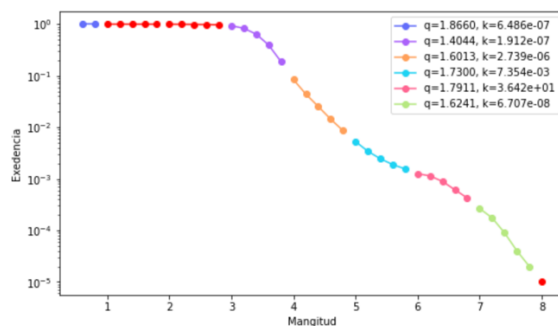
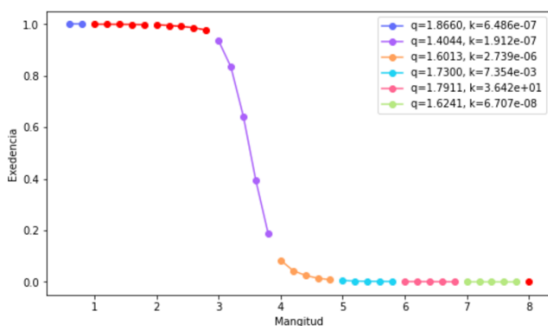
Zúñiga, F. R., Suárez, G., Figueroa-Soto, Á., & Mendoza, A. (2017). A first-order seismotectonic regionalization of Mexico for seismic hazard and risk estimation. *Journal of Seismology*, 21(6), 1295-1322.

# Apéndice

Apéndice 1. Enjambre sísmico ocurrido en los primeros meses del año 2020, con epicentro en las cercanías del Pico de Tancitaro y Uruapan, Michoacán:

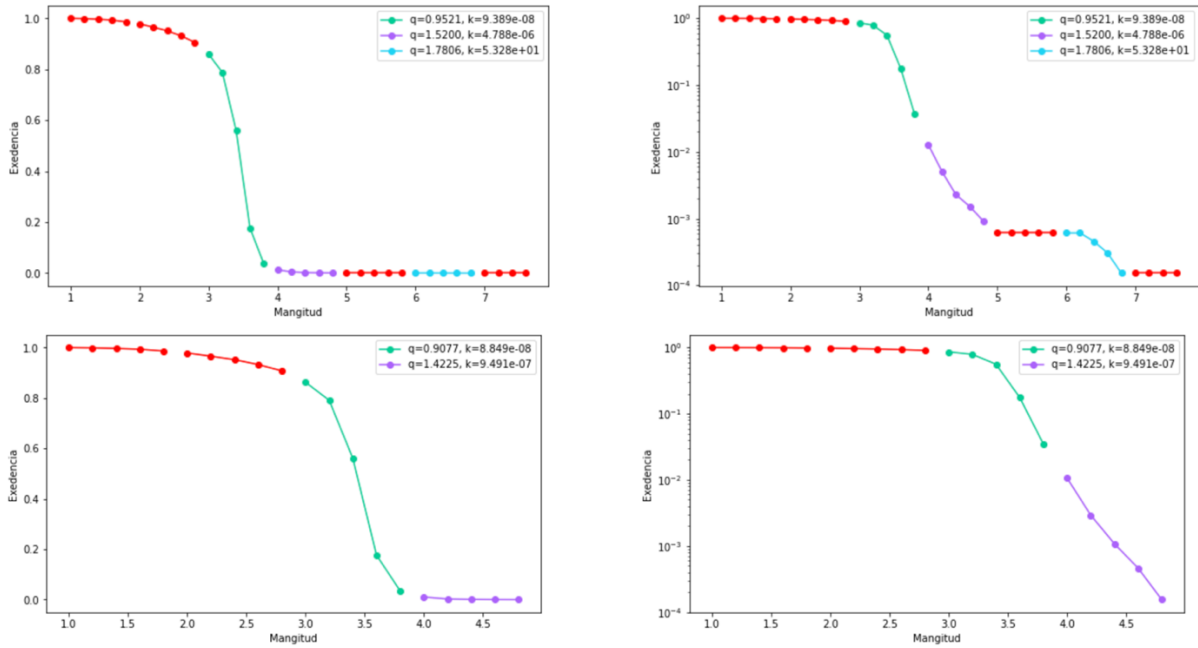


Apéndice 2. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos del territorio nacional disponibles desde el año 1900 (gráficas superiores) y 1986 (gráficas inferiores). Los colores indican el valor de los parámetros obtenidos para cada orden. De rojo las zonas donde no se alcanzaron valores óptimos de ajuste.

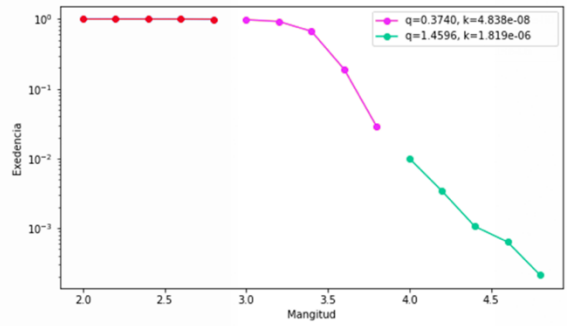
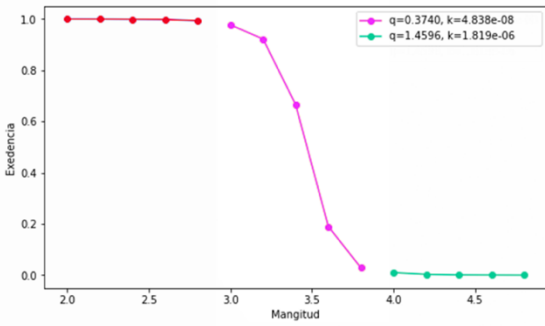
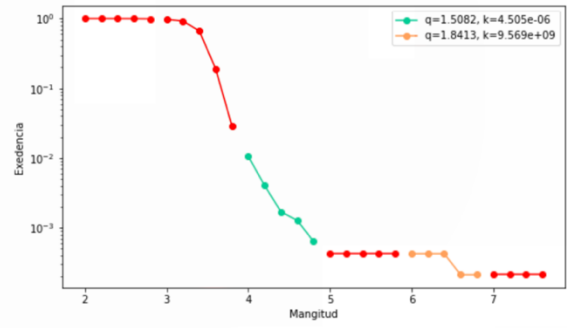
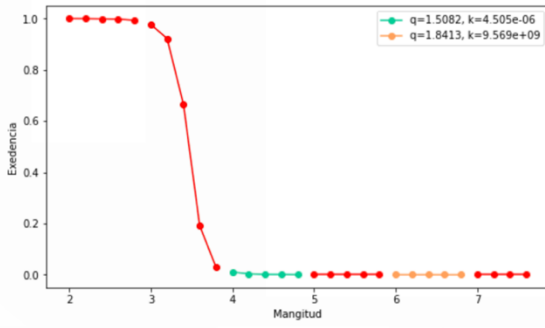




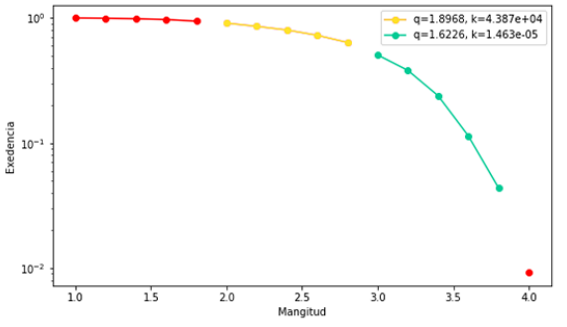
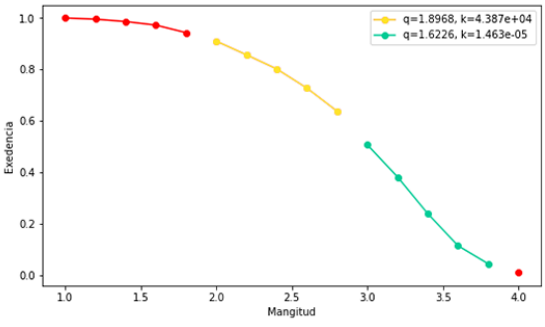
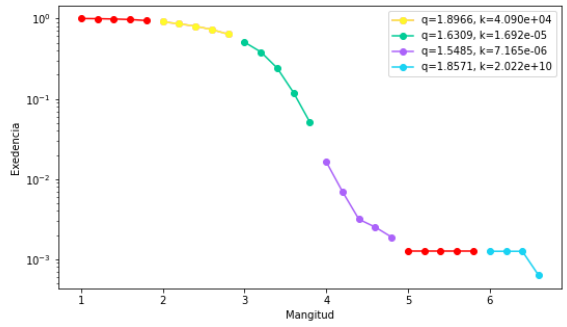
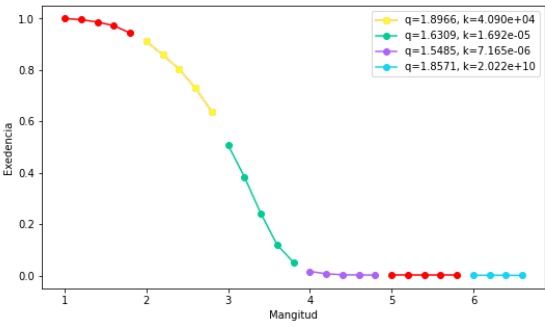
Apéndice 3. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos del Cinturón Volcánico Mexicano disponibles desde el año 1900 (gráficas superiores) y 1986 (gráficas inferiores). Los colores indican el valor de los parámetros obtenidos para cada orden. De rojo las zonas donde no se alcanzaron valores óptimos de ajuste.



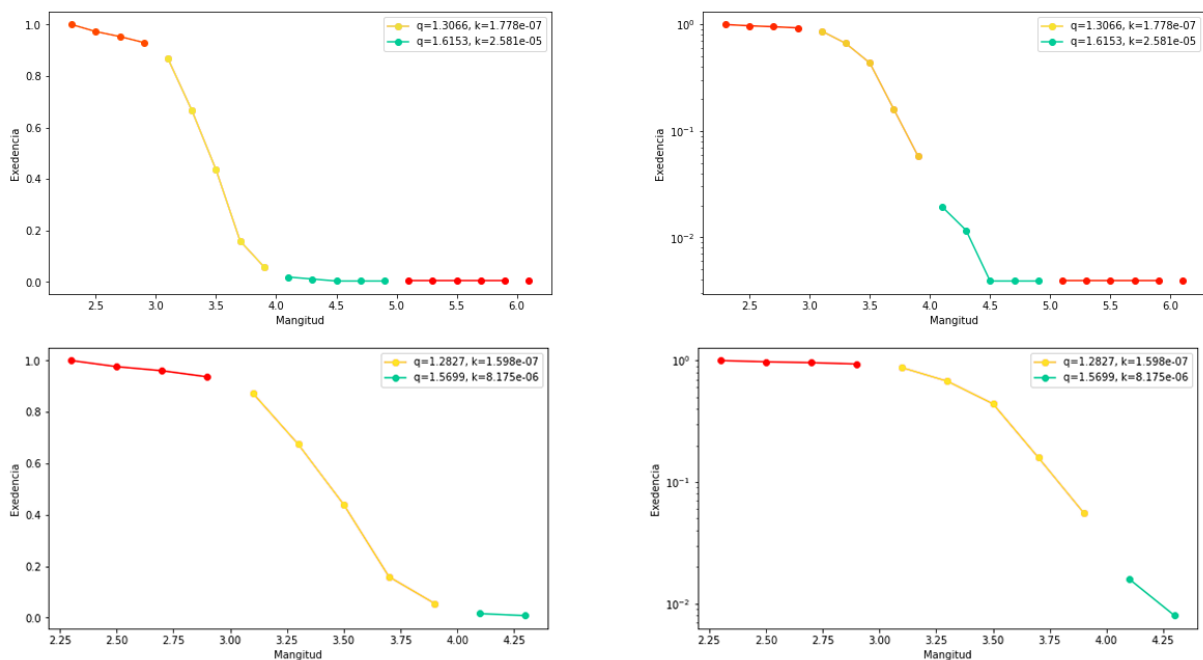
Apéndice 4. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos de la región Oeste del Cinturón Volcánico Mexicano (W-MVB) disponibles desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde el año 1986 (gráficas inferiores). Los colores indican el valor de los parámetros obtenidos para cada orden. De rojo las zonas donde no se alcanzaron valores óptimos de ajuste.



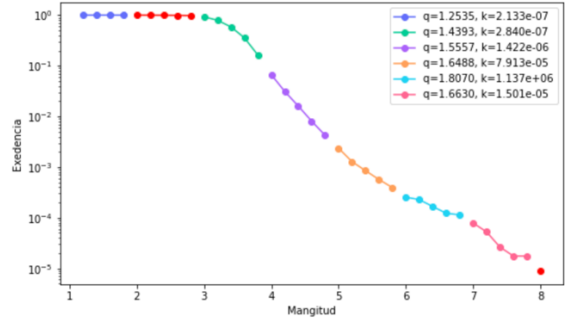
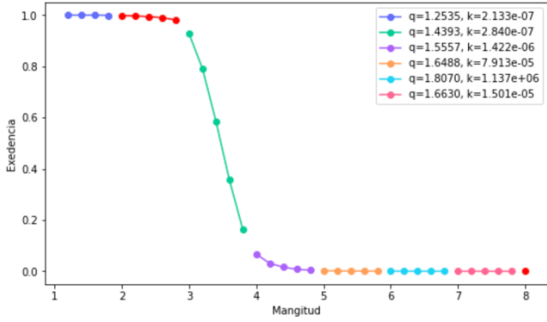
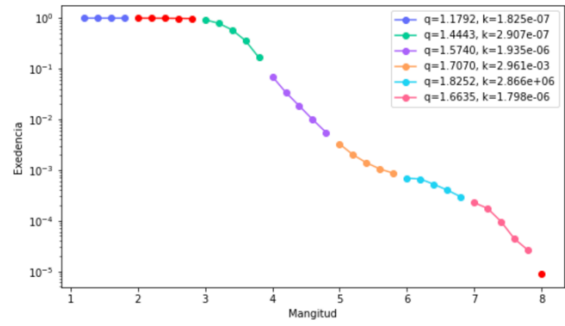
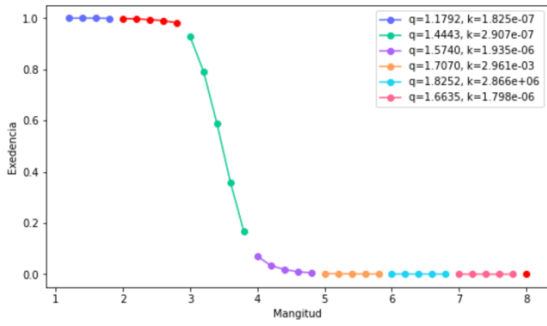
Apéndice 5. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos de la región central del Cinturón Volcánico Mexicano (C-MVB) disponibles desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde el año 1986 (gráficas inferiores). Los colores indican el valor de los parámetros obtenidos para cada orden. De rojo las zonas donde no se alcanzaron valores óptimos de ajuste.



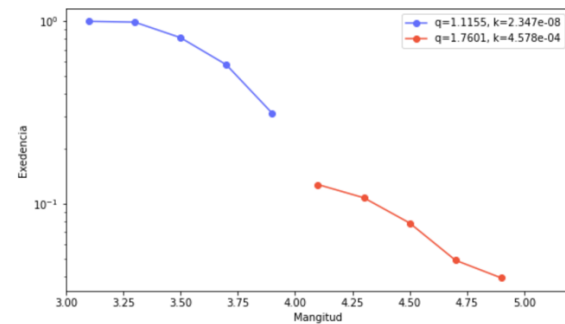
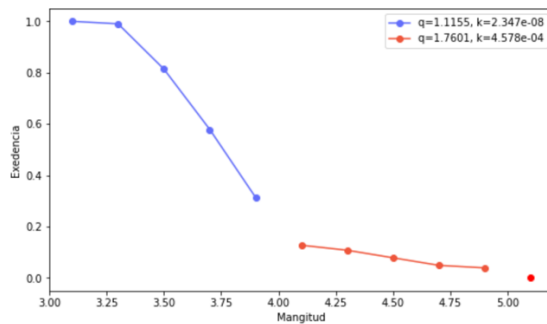
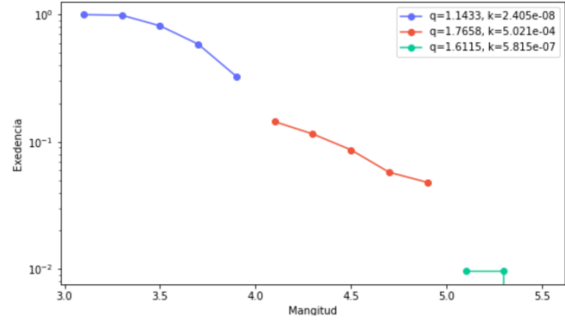
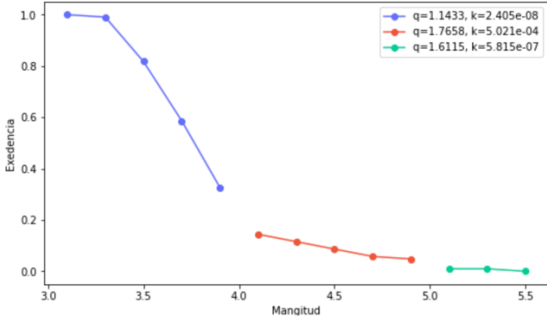
Apéndice 6. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos de la región Este del Cinturón Volcánico Mexicano (E-MVB) disponibles desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde el año 1986 (gráficas inferiores). Los colores indican el valor de los parámetros obtenidos para cada orden. De rojo las zonas donde no se alcanzaron valores óptimos de ajuste.



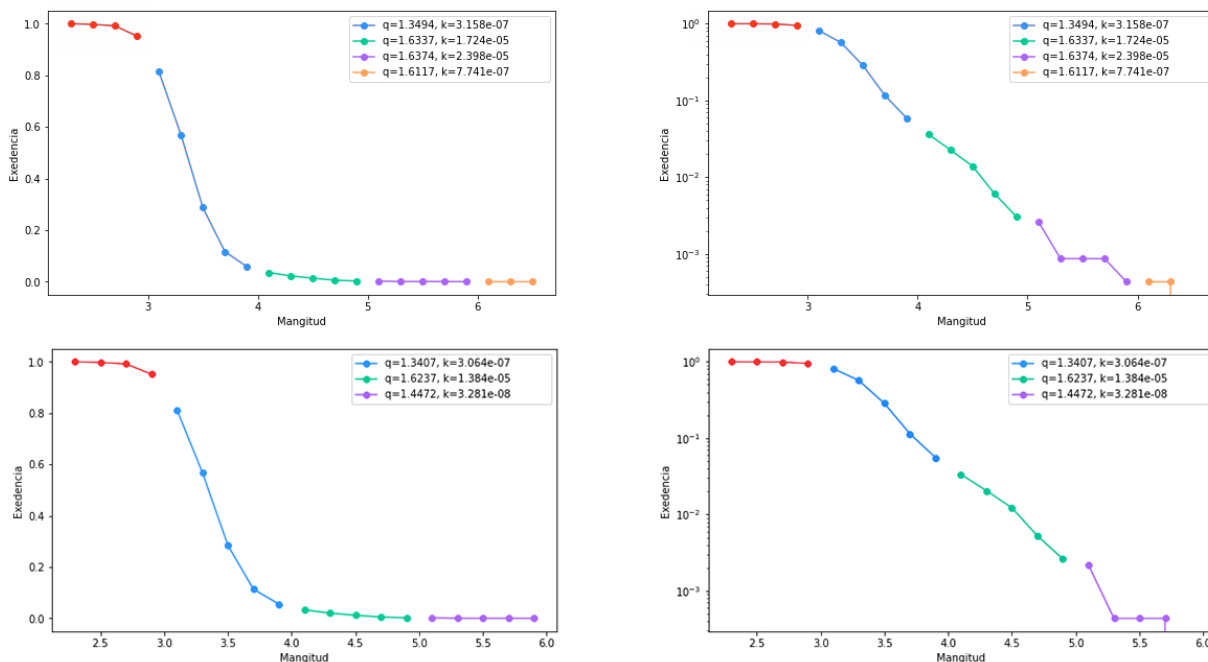
Apéndice 7. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos de la Zona de Subducción (SUB) disponibles desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde 1986 (gráficas inferiores). Los colores indican el valor de los parámetros obtenidos para cada orden. De rojo las zonas donde no se alcanzaron valores óptimos de ajuste.



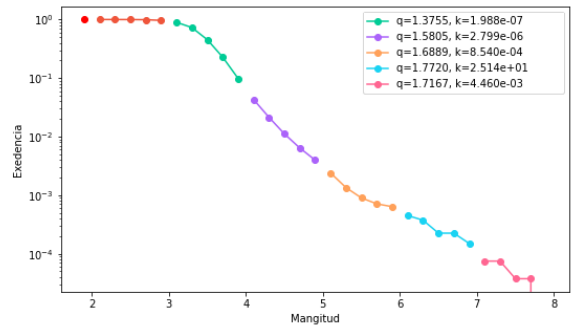
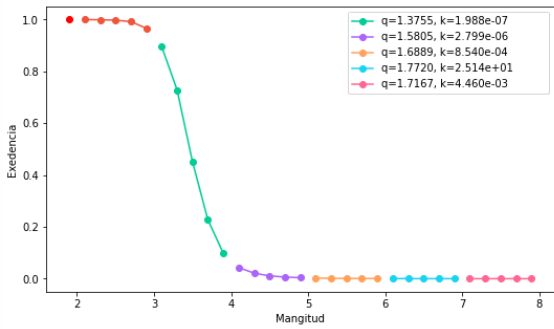
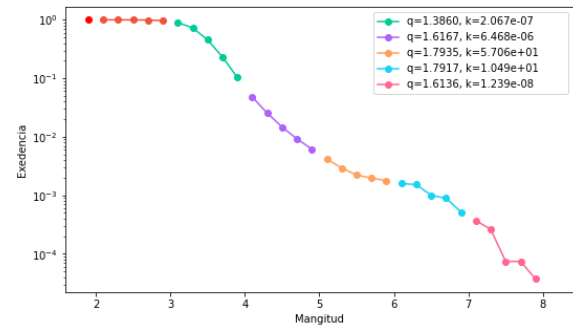
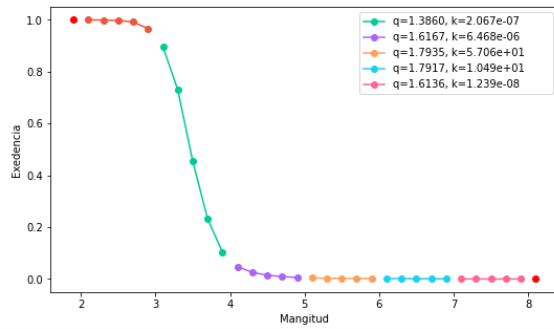
Apéndice 8. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos, de la región SUBR, disponibles desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde el año 1986 (gráficas inferiores). Los colores indican el valor de los parámetros obtenidos para cada orden. De rojo las zonas donde no se alcanzaron valores óptimos de ajuste.



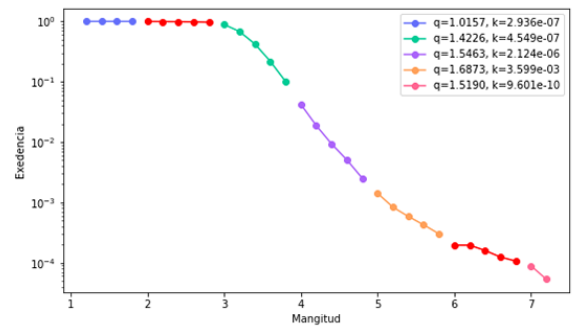
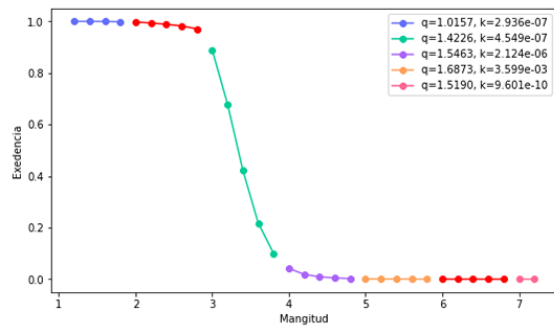
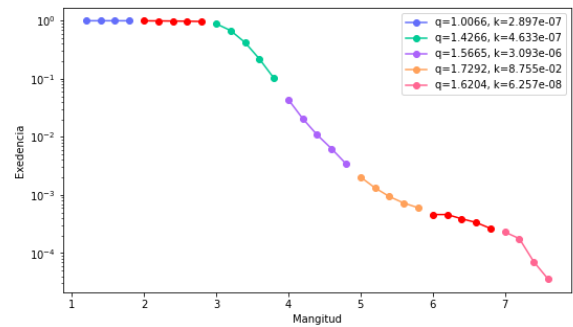
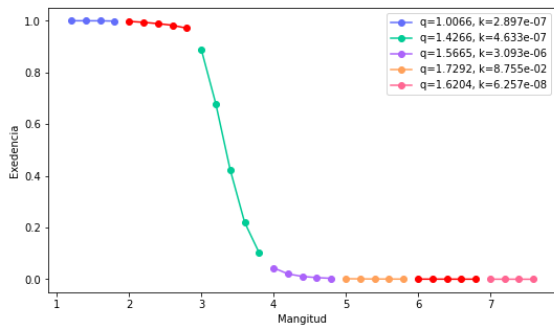
Apéndice 9. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos, de la región SUB1, disponibles desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde 1986 (gráficas inferiores). Los colores indican el valor de los parámetros obtenidos para cada orden. De rojo las zonas donde no se alcanzaron valores óptimos de ajuste.



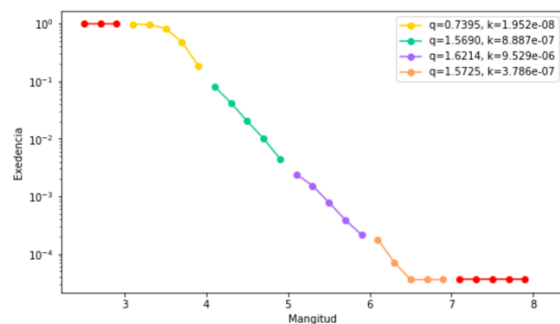
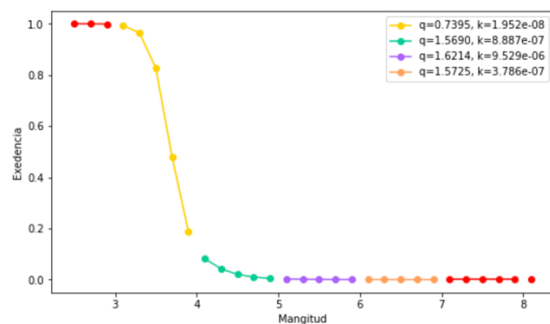
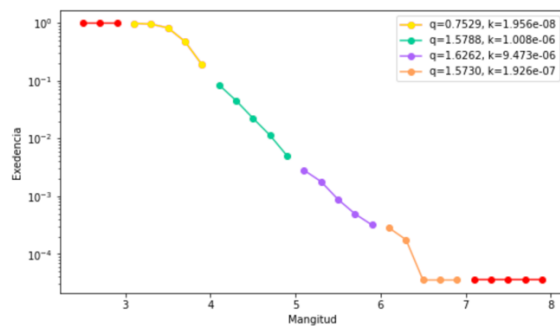
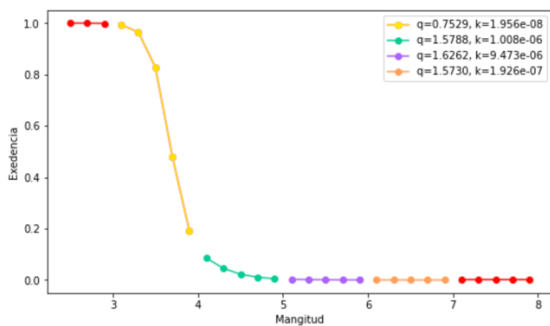
Apéndice 10. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos, de la región SUB2, disponibles desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde 1986 (gráficas inferiores). Los colores indican el valor de los parámetros obtenidos para cada orden.



Apéndice 11. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos, de la región SUB3, disponibles desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde 1986 (gráficas inferiores). Los colores indican el valor de los parámetros obtenidos para cada orden. De rojo las zonas donde no se alcanzaron valores óptimos de ajuste.



Apéndice 12. Resultado del ajuste, utilizando el modelo Fragmento-Aspereza, por orden de magnitud a los datos, de la región SUB4, disponibles desde el año 1900 (gráficas superiores) y desde 1986 (gráficas inferiores). Los colores indican el valor de los parámetros obtenidos para cada orden. De rojo las zonas donde no se alcanzaron valores óptimos de ajuste.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



Cuernavaca, Morelos a 15 de Febrero del 2022.

**DR. AUGUSTO RENATO PÉREZ MAYO**  
**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN DE LA F.C.A.e I.**  
**PRESENTE**

En mi carácter de revisor de Tesis, hago de su conocimiento que he leído con interés la tesis para obtener el grado de la Maestría en Optimización y Cómputo Aplicado, del estudiante **Erik Daniel García Aquino**, con matrícula **10034120**, con el título **“APLICACIÓN DEL MODELO FRAGMENTO-ASPEREZA A FENÓMENOS SÍSMICOS EN MÉXICO ENFATIZANDO EN DOS REGIONES: LA ZONA DE SUBDUCCIÓN Y EL CINTURÓN VOLCÁNICO MEXICANO”** por lo cual, me permito informarle que después de una revisión cuidadosa de dicha tesis, concluyo que el trabajo se caracteriza por el establecimiento de objetivos académicos pertinentes y una metodología adecuada para su logro. Además construye una estructura coherente y bien documentada, por lo cual considero que los resultados obtenidos contribuyen al conocimiento del tema tratado.

Con base en los argumentos precedentes me permito expresar mi **VOTO APROBATORIO** por lo que de mi parte no existe inconveniente para que el estudiante continúe con los trámites que esta Secretaría de Investigación tenga establecidos para obtener el grado mencionado.

Atentamente  
***Por una humanidad culta***  
*Una universidad de excelencia*

**Dr. Diego Seuret Jiménez**  
**Profesor- investigador Titular A**  
**Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas**





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**DIEGO SEURET JIMENEZ | Fecha:2022-02-15 19:40:51 | Firmante**

nfRdi1XXIKk3kPv8SvBaqGy04iVAiordlca7m4jRR6YUX5swZr3clA/5Jtrj2xp/5VGitvkrLcXHzhFjuRWH61m8n9DnvGcb0AWKfBjkbZZMZb+2AllhtuXlImtf0Y+enCzZmLi4npXCnjm8t  
THmv4dvoF4lwLdKaj+AHqdfgaSKhY6dMYJxQoW6PBicMMBI3q/beWZhmnBz2HbDm7K2+uuo/U9KRpGxKQRUnCu13LtSM+rvX8ilUodGe4/gxRwyfh7n+mBse0zAISi0t8zieJBmu  
T8OVoc/YPLofZEBTfUfsK0Rwd8aSzdptizZwe2P8h7ooRLjT9XBsz+qktUv9A==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o  
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[yjnGXQ6mE](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/vP2l29wCXoONQ624Efbv3sdTeA1syT4q>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



Cuernavaca, Morelos a 15 de Febrero del 2022.

**DR. AUGUSTO RENATO PÉREZ MAYO**  
**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN DE LA F.C.A.e I.**  
**PRESENTE**

En mi carácter de revisor de Tesis, hago de su conocimiento que he leído con interés la tesis para obtener el grado de la Maestría en Optimización y Cómputo Aplicado, del estudiante **Erik Daniel García Aquino**, con matrícula **10034120**, con el título **“APLICACIÓN DEL MODELO FRAGMENTO-ASPEREZA A FENÓMENOS SÍSMICOS EN MÉXICO ENFATIZANDO EN DOS REGIONES: LA ZONA DE SUBDUCCIÓN Y EL CINTURÓN VOLCÁNICO MEXICANO”** por lo cual, me permito informarle que después de una revisión cuidadosa de dicha tesis, concluyo que el trabajo se caracteriza por el establecimiento de objetivos académicos pertinentes y una metodología adecuada para su logro. Además construye una estructura coherente y bien documentada, por lo cual considero que los resultados obtenidos contribuyen al conocimiento del tema tratado.

Con base en los argumentos precedentes me permito expresar mi **VOTO APROBATORIO** por lo que de mi parte no existe inconveniente para que el estudiante continúe con los trámites que esta Secretaría de Investigación tenga establecidos para obtener el grado mencionado.

Atentamente  
***Por una humanidad culta***  
*Una universidad de excelencia*

**Dr. Isaac Rodríguez Vargas**  
**Docente-Investigador**

**Unidad Académica de Ciencia y Tecnología de la Luz y la Materia**

Av. Universidad 1001 Chamilpa Cuernavaca Morelos México C.P. 62209, Edificio 19  
Tel. (777) 329 7917, Ext. 3038, 3039/ posgrado.fcaei@uaem.mx





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**ISAAC RODRÍGUEZ VARGAS** | Fecha:2022-02-15 22:00:36 | Firmante

0ZOuvz/vSY2dvpGAH0I4v+Cw9KJ9bTz6PjhB1vnDAH51rlGnsPwzRHxgPCunVzGuZsZqsM5zOPCcFakRRrb8rsdAj25QhFrD6grCI268fZKvzWxCrDbOrexMZVhWNewtX4fv8j7g  
e4HsG7ZycRpm2YmLN0Y2Td2GF1UaJzniGt40AEyuP/yWMOGcbFawiFgfKdGD/ks0IE9dzB9rC1jlkCH4MeLj1hUCTK9rkU1E3Q1ibw8Rp/UAArl+hVBvV94J8ZJNNW3ZCTnc1G6  
SV3tvF3EUxtfa7fXyBogcPr98deWnZYPUrIWEhwFlqHkjBkopUvHp4Evj/2RbII8GT3gw==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o  
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[sIB1oV50x](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/53D0XcJyDNFZGD8vdKn4NccNvzZdQcUv>



Cuernavaca, Morelos a 15 de Febrero del 2022.

**DR. AUGUSTO RENATO PÉREZ MAYO**  
**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN DE LA F.C.A.e I.**  
**PRESENTE**

En mi carácter de revisor de Tesis, hago de su conocimiento que he leído con interés la tesis para obtener el grado de la Maestría en Optimización y Cómputo Aplicado, del estudiante **Erik Daniel García Aquino**, con matrícula **10034120**, con el título **“APLICACIÓN DEL MODELO FRAGMENTO-ASPEREZA A FENÓMENOS SÍSMICOS EN MÉXICO ENFATIZANDO EN DOS REGIONES: LA ZONA DE SUBDUCCIÓN Y EL CINTURÓN VOLCÁNICO MEXICANO”** por lo cual, me permito informarle que después de una revisión cuidadosa de dicha tesis, concluyo que el trabajo se caracteriza por el establecimiento de objetivos académicos pertinentes y una metodología adecuada para su logro. Además construye una estructura coherente y bien documentada, por lo cual considero que los resultados obtenidos contribuyen al conocimiento del tema tratado.

Con base en los argumentos precedentes me permito expresar mi **VOTO APROBATORIO** por lo que de mi parte no existe inconveniente para que el estudiante continúe con los trámites que esta Secretaría de Investigación tenga establecidos para obtener el grado mencionado.

Atentamente  
***Por una humanidad culta***  
*Una universidad de excelencia*

**Dr. José Alberto Hernández Aguilar**  
**Profesor- investigador**  
**Facultad de Contaduría, Administración e Informática**

Av. Universidad 1001 Chamilpa Cuernavaca Morelos México C.P. 62209, Edificio 19  
Tel. (777) 329 7917, Ext. 3038, 3039/ posgrado.fcaei@uaem.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**JOSE ALBERTO HERNANDEZ AGUILAR | Fecha:2022-02-15 22:07:20 | Firmante**

cSHIZYCX Ae8TKsxoIE91V/Y9T7qHCQL76tcukgiJCS6e+RdQPzdUv2VtG6HBtaal5Z8Gpu4KbECQzt5pi4WeVTNvssOJ4am4fABTEwia5MDQW/vkZCPcxTmbTnGAR9ha7yJ1IK182FvrgvjWmcJmMQHlnPQMInrmUGwvVYptX0BgVWR59WSKZrusmhdgAj/HWBOxNg5NcOtlLbp08g6Q/HLAKA9TecX7BHy4u2aYnsulvENYHxvyosxG94zFJWtqouKkZz8eL4OkFNqj2QvbAfk2BH1uU2hlDAq+j/9KL243vPRbaNn+BfTjJPZdJL6alp3P/4TqIfHUJ+LW0I0Nj1w==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[E4r7QaGvg](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/wR4SMSyTx3L3xB6TEcXFeHGT7VZ5rdm>



Cuernavaca, Morelos a 15 de Febrero del 2022.

**DR. AUGUSTO RENATO PÉREZ MAYO**  
**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN DE LA F.C.A.e I.**  
**PRESENTE**

En mi carácter de revisor de Tesis, hago de su conocimiento que he leído con interés la tesis para obtener el grado de la Maestría en Optimización y Cómputo Aplicado, del estudiante **Erik Daniel García Aquino**, con matrícula **10034120**, con el título **“APLICACIÓN DEL MODELO FRAGMENTO-ASPEREZA A FENÓMENOS SÍSMICOS EN MÉXICO ENFATIZANDO EN DOS REGIONES: LA ZONA DE SUBDUCCIÓN Y EL CINTURÓN VOLCÁNICO MEXICANO”** por lo cual, me permito informarle que después de una revisión cuidadosa de dicha tesis, concluyo que el trabajo se caracteriza por el establecimiento de objetivos académicos pertinentes y una metodología adecuada para su logro. Además construye una estructura coherente y bien documentada, por lo cual considero que los resultados obtenidos contribuyen al conocimiento del tema tratado.

Con base en los argumentos precedentes me permito expresar mi **VOTO APROBATORIO** por lo que de mi parte no existe inconveniente para que el estudiante continúe con los trámites que esta Secretaría de Investigación tenga establecidos para obtener el grado mencionado.

Atentamente  
***Por una humanidad culta***  
*Una universidad de excelencia*

**Dra. Lorena Díaz González**  
**Profesora - investigadora Titular A**  
**Centro de Investigación en Ciencias**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**LORENA DIAZ GONZALEZ** | Fecha:2022-02-15 11:35:58 | Firmante

a9aTn1iqdWZU1+0D70bcrzQInm33rqaJ4oJIAALQumVbRufRWYy/9WJ76wDmjRs4UzGQ6q713WISCeVXxIl4J5opLG6DCeXzm7zwKwN1UrLNbyyFciVqW8f/ORXglal7KjbbGStMxRrccQyRyYTAWIDwiq4+9c3nulv7X2/kBw/lyBgzVk3hwBMvjDvrgleg02s+87PvKQ8YUXCsEp6QIDb9nv7QnDsEx95ZKEY9RC37q2hchxmR1kgXDYFWpgWXt1N1IRFjsugREowjrdxfETo1jil+Pao/CeCUEWrwS3vNli4d5kqc9ND8BPTZe0H/aKCBUJ7rYJ06EeKGU6ZY2Q==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[YGOLp7xko](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/M9VWSsOrUbFPxXmmim4tBr3zy6YpvOKi>



Cuernavaca, Morelos a 15 de Febrero del 2022.

**DR. AUGUSTO RENATO PÉREZ MAYO**  
**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN DE LA F.C.A.e I.**  
**PRESENTE**

En mi carácter de revisor de Tesis, hago de su conocimiento que he leído con interés la tesis para obtener el grado de la Maestría en Optimización y Cómputo Aplicado, del estudiante **Erik Daniel García Aquino**, con matrícula **10034120**, con el título **“APLICACIÓN DEL MODELO FRAGMENTO-ASPEREZA A FENÓMENOS SÍSMICOS EN MÉXICO ENFATIZANDO EN DOS REGIONES: LA ZONA DE SUBDUCCIÓN Y EL CINTURÓN VOLCÁNICO MEXICANO”** por lo cual, me permito informarle que después de una revisión cuidadosa de dicha tesis, concluyo que el trabajo se caracteriza por el establecimiento de objetivos académicos pertinentes y una metodología adecuada para su logro. Además construye una estructura coherente y bien documentada, por lo cual considero que los resultados obtenidos contribuyen al conocimiento del tema tratado.

Con base en los argumentos precedentes me permito expresar mi **VOTO APROBATORIO** por lo que de mi parte no existe inconveniente para que el estudiante continúe con los trámites que esta Secretaría de Investigación tenga establecidos para obtener el grado mencionado.

Atentamente  
***Por una humanidad culta***  
*Una universidad de excelencia*

**Dr. Luis Manuel Gaggero Sager**  
**Profesor Titular C**  
**SIN III**

**Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas**

Av. Universidad 1001 Chamilpa Cuernavaca Morelos México C.P. 62209, Edificio 19  
Tel. (777) 329 7917, Ext. 3038, 3039/ posgrado.fcaei@uaem.mx





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**LUIS MANUEL GAGGERO SAGER** | Fecha:2022-02-17 11:01:56 | Firmante

w6fzAp1zmq3l0Zm8aDFKvrotLl1fOrVxa7snKyBhpOR0RchxTbvZhocLsrWokeur5hPctsu35PCJINZESTdl1s3mhP/PkSsul6R3Yl2cizkhqF9B6uUSV8VdbQhCo0/0NbUwUaCCBqsi3ctsK9eTZwYY3R2dkThsCs8CMOWeXNpHxvst4GbY7p202yL552q+H0UpW1xe4THloTOZHDAvILbw2VyiKexmtUBOLjQ8Bvq+KB6pxVnN3exF1id61Sb3lBzG8SYroWQbHHGIgSrWLKc3/vP06KMKFLG3QQrILKar4XQCiwVtQy3wXK6S+8nKCCO196YgLwED06LuuG5Ow==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[wAkFfcKaP](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/mr9GuxGvsWzYelNrnEe70MaSbHzIE8wo>

