

*Estimación de los parámetros
sísmicos de la Ley de Recurrencia
Gutenberg-Richter
en la región Central de Venezuela*

Br. Sinkler E. Tormet G.

Tutores: Dra. Nuri Hurtado

Lic. Leonardo Alvarado (FUNVISIS)

Trabajo Especial de Grado



Caracas, 29 de mayo del año 2014



Universidad Central de Venezuela

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

**ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS
SÍSMICOS DE LA LEY DE RECURRENCIA
GUTENBERG-RICHTER EN LA REGIÓN
CENTRAL DE VENEZUELA**

Br. Sinkler E. Tormet G.

Dra. Nuri Hurtado, Tutora

Lic. Leonardo Alvarado (FUNVISIS), Tutor

Caracas, 29 de mayo del año 2014

**Estimación de los parámetros sísmicos de la Ley de Recurrencia
Gutenberg-Richter en la región Central de Venezuela**

Copyright © 2014

Universidad Central de Venezuela
Sinkler E. Tormet G.

ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS SÍSMICOS DE LA LEY DE
RECURRENCIA GUTENBERG-RICHTER EN LA REGIÓN
CENTRAL DE VENEZUELA

Br. Sinkler E. Tormet G.

*Trabajo Especial de Grado presentado
ante la ilustre Universidad Central de Venezuela
como requisito parcial para optar al título de*
Licenciado en Física.

Dra. Nuri Hurtado, Tutora

Tutora

Lic. Leonardo Alvarado (FUNVISIS), Tutor

Tutor Externo

Quienes suscriben, miembros del Jurado que examinó el trabajo presentado por el Br. Sinkler E. Tormet G., titulado: “ **Estimación de los parámetros sísmicos de la Ley de Recurrencia Gutenberg-Richter en la región Central de Venezuela**” para optar al título de Licenciado en Física, consideramos que dicho trabajo cumple con los requisitos exigidos por los reglamentos respectivos y por lo tanto lo declaramos APROBADO en nombre de la Universidad Central de Venezuela.

Dra. Nuri Hurtado, Tutora Tutor

Lic. Leonardo Alvarado (FUNVISIS), Tutor Tutor

Tutor

Tutor

Caracas, 29 de mayo del año 2014

Universidad Central de Venezuela

Facultad de Ciencias

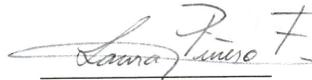
Escuela de Física

VEREDICTO

Quienes suscriben, miembros del jurado que examinó el trabajo presentado por el Br. Sinkler Eduardo Tormet González, titulado: **“Estimación de los parámetros sísmicos de la Ley de Recurrencia Gutenberg-Richter en la región central de Venezuela”**, para optar al título de Licenciado en Física, consideramos que dicho trabajo cumple con los requisitos exigidos por los reglamentos respectivos y por lo tanto lo declaramos APROBADO en nombre de la Universidad Central de Venezuela.



Dra. Lisseta D'Onofrio

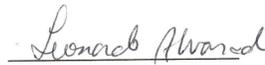


Dra. Laura Piñero



Dra. Nuri Hurtado

Tutora Académica



Lic. Leonardo Alvarado

Tutor Industrial

Caracas, 21 de mayo de 2014.

Etiam si omnes, ego non

Aura

Sinkler

Gabriela

Stephany

Gatos

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a Dios, cuya presencia he sentido cerca en los buenos y malos momentos y a pesar de tanta física...se que esta ahí.

A la UCV por darme la oportunidad de llevar a cabo mi vida académica y por darme valiosas lecciones, porque la formación de un profesional está más allá de las aulas y laboratorios. Una institución que siendo más antigua que la república aun sigue vendiendo la sombra, a pesar de sus mal agradecidos hijos...

A la facultad de ciencias por ser la mas grandiosa facultad de la UCV y porque a pesar de sus burocracia digna de un ente del estado, en serio es lo mejor que tiene la universidad.

A mi Tutor Leonardo Alvarado, por su infinita paciencia y sus buen humor que mas de una vez me alegro el día...gracias por darme la oportunidad de trabajar contigo, fue excelente. Extrañare tomar café hablando sobre la tesis.

A mi tutora Nuri Hurtado, por darme la oportunidad de trabajar con ella y porque siempre estuvo disponible para apoyarme cuando mas lo necesite y para darme esos consejos útiles, desde la burocracia hasta la bibliografía. Extrañare mucho las reuniones a las 7 de la mañana.

A FUNVISIS y todo su personal, por darme la oportunidad de ser pasante y luego tesista, creo que lo que nunca olvidaré es su amabilidad, desde le primer día hasta el último... son tantos nombres, pero quisiera agradecer personaolmente: Iliá, Herbert Rendon, Miguel Palma, Gloria Romero, Ricardo, Ana, Antonio, Sr Edgard, Sr Arturo...a todos, en especial al Departamento de Sismología y al Departamento de Instrumentación Electrónica.

A mi familia por enseñarme que la excelencia, el respeto y hacer lo correcto siempre rinde sus frutos, aunque sea tardíamente. Gracias por hacerme ver que la mediocridad, el amiguismo y la adulación no son las maneras correctas de llevar la vida, un país y mucho menos una universidad.

Gracias mi mamá Aura, por apoyarme y darme la fuerza que necesite en medio de

tantas alegrías, lágrimas y sufrimientos que viví. Sus abrazos siempre fueron oportunos y a la vez necesarios. Gracias Aura, esto también te pertenece.

A mi papá Sinkler por sus consejos y analogías beisbólicas que siempre me dan ánimos todos los días, sus llamadas preguntándome donde estoy o que necesitaba. Gracias por estar siempre cuando más te necesite.

A mi hermana Gabriela, que a pesar de estar lejos espacialmente, siempre estás ahí para llamarte, escribirte y hacerme reír...gracias por el apoyo material también...tu amor por las ciencias me llevo a estudiar física. Siempre recordaré aquellos días en la cola, cuando bajábamos por la autopista escuchando Melendi y hablando sobre cualquier cosa. Lastima que las circunstancias nos mantengan alejados, cada día te extraño mucho más.

A mis gatos: Blanquito, Bangladesh, Colita, Ema, Guti, Renata y Pecas, porque ellos son parte de mi familia, y porque cada vez que estaba estresado una mordida me recordaba que a veces hay otras cosas que hacer. A veces solo quería llegar a la casa para jugar con ellos.

A mis amigos Fabiola, Barbara, Gustavo, Gabriel, Atilio, Raul, Juan Carlos, Jesus Diaz, Johan, Eric, Astrid Pinto, Walter, Edgard, Raamses, y otros compañeros, que fueron parte de esta etapa de mi vida tanto en la facultad como afuera de ella, que me hicieron reírme en clases y mejorar cada día mis chistes, en especial Fabiola, con la cual pasé mis últimas materias teóricas...en todo caso.

A Carlos Romestant, que a pesar del tiempo y la distancia, siempre está disponible para hablar de fútbol, política, música o cualquier cosa.

A Dennis Contreras porque siempre tiene algún chiste, comentario o idea que me hace reír.

Por último pero no menos importante, quiero agradecer a Stephany Contreras, por darme el apoyo moral y sentimental necesario para enfrentar innumerables obstáculos, por inculcarme sus amor por los gatos, por comer conmigo cuando estaba solo...Stephany, lo que me has dado durante este tiempo no lo puedo resumir en estas líneas, simplemente quiero que sepas que pase lo que pase, tu eres lo mejor de todo esto.

Tu ne cede malis sed contra audentior ito

Etiam si omnes, ego non

Who is John Galt?

ÍNDICE GENERAL

Índice General	x
Lista de Figuras	xiii
Resumen	1
1. Introducción	2
2. Marco teórico	6
2.1. Origen de los Terremotos	6
2.1.1. Tectónica de Placas	7
2.1.2. Sistemas de Fallas	7
2.2. Tipos de Eventos sismológicos	10
2.3. Ondas Sísmicas	11
2.4. Localización de un sismo	13
2.5. Intensidades y Magnitudes sismológicas	14
2.5.1. Intensidad sismológica	14

<i>Índice General</i>	xi
2.5.2. Magnitudes sismológicas	15
2.6. Ley de Gutenberg-Richter	19
2.6.1. Método de máxima verosimilitud	22
2.6.2. Método Stepp	23
3. Sismología en Venezuela	25
3.1. Geodinámica Regional	25
3.2. Sistemas de Fallas	26
3.2.1. Sistema de Fallas de Boconó	26
3.2.2. Sistema de Fallas de San Sebastián	27
3.2.3. Sistema de Fallas de El Pilar	27
3.2.4. Sistema de Fallas de Oca-Ancón	28
3.3. Sismicidad en Venezuela	29
3.4. Red Sismológica Nacional	29
3.5. Región Central del País	32
4. Metodología	33
4.1. Unificación del Catálogo Sismológico	33
4.1.1. Selección Catálogos y Eventos	34
4.1.2. Selección de eventos iguales con distinto tipo de magnitud	35
4.1.3. Obtención de relación entre magnitudes	35
4.1.4. Conversión de Magnitudes	36
4.2. Procesamiento de los datos	36
4.3. Depuración del Catálogo Sismológico	37
4.3.1. Selección de polígono a estudiar	37
4.4. División del polígono en sub-polígonos	38

4.4.1.	Calculo de los parámetros a , b y M_c de la Ley de Recurrencia de Gutenberg-Richter	38
4.4.2.	Obtención de los tiempos de recurrencia	39
5.	Resultados	41
5.1.	Unificación del catálogo sísmológico	41
5.1.1.	Relaciones de Conversión obtenidas	42
5.1.2.	Catálogo Unificado	42
5.1.3.	Catálogo Zona Central y Declustering	43
5.2.	Cálculos de los parámetros “a” y “b” de la Ley de Recurrencia de Gutenberg-Richter para la región central del país	44
5.2.1.	Región ZC-01	47
5.2.2.	Región ZC-02	47
5.2.3.	Región ZC-03	48
5.2.4.	Región ZC-04	48
5.3.	Períodos de retorno para la región central del país	48
5.3.1.	Cálculo de los valores a , b y relaciones de recurrencia a través de un ajuste por mínimos cuadrados	50
5.3.2.	Calculo de los valores a , b y relaciones de recurrencia a través del Método Stepp	52
6.	Conclusiones	53
	Bibliografía	55
A.	Magnitud M_w	59
B.	Red Sísmológica Nacional	62
C.	Catálogo	64

LISTA DE FIGURAS

2.1.	Tectónica de placas (modificado de http://www.usgs.gov/)	8
2.2.	Tipos de fallas (tomado de http://concurso.cnice.mec.es/)	9
2.3.	Ondas sísmicas (tomado de http://ies.rayuela.mostoles.educa.madrid.org/)	12
2.4.	Tipos de ondas sísmicas en un sismograma (tomado de http://www.geonet.org.nz/)	13
2.5.	Localización de un sismo (tomado de: Investigación sismológica en Venezuela)	14
2.6.	Escala modificada de Mercalli (modificado de: http://www.http://earthquake.usgs.gov/)	1
2.7.	Relaciones entre las magnitudes m_b , M_s , M_L y M_w [Kanamori, 1983]. Se puede observar como los tipos magnitudes se van saturando a medida que aumenta la magnitud del sismo	20
2.8.	Ley de Recurrencia de Gutenberg-Richter	21
3.1.	Fallas en Venezuela (tomado de FUNVISIS)	26
3.2.	Sismicidad historica 1900-2010 (tomado de ISC)	30
3.3.	Red Sismologica Nacional (cortesía de FUNVISIS)	31
3.4.	Región Central de Venezuela (cortesía de FUNVISIS)	32

4.1.	Ley de recurrencia de Gutenberg-Richter para la región central de Venezuela con sus respectivos parámetros	39
5.1.	Histograma del número de sismos por magnitud	44
5.3.	Constantes a y b para los sub-polígonos ZC-01 (a), ZC-02(b) ZC-03 (c) y ZC-04 (d)	46
B.1.	Red Sismológica Nacional (Cortesía Funvisis)	62
C.1.	Formato de catálogo sismológico	64

RESUMEN

En este trabajo se busca determinar los parámetros a y b de la Ley de Recurrencia Gutenberg-Richter de la región central del país, con la finalidad de estimar la recurrencia sismológica en la zona central de Venezuela. Para este fin, contamos con la información de diferentes eventos sismológicos registrados en dicha región. Para la realización de estos cálculos fué necesario unificar varios catálogos y eventos sismológicos en el tipo de magnitud M_w . A través del método de máxima verosimilitud y un ajuste por mínimos cuadrados, se obtuvieron los parámetros a , b y M_c para la región central de Venezuela, posteriormente se obtuvieron los tiempos de retorno para varias valores de magnitud. Este cálculo es importante ya que permitiría hacer cálculos de velocidades y/o aceleraciones del terreno, valores con los cuales se podría determinar la Amenaza Sísmica de una determinada región.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La recurrencia sismológica de una zona determinada, es un parámetro importante al momento de determinar la amenaza sísmica de dicha zona [Beauval et al., 2013]. Estos estudios nos permiten calcular, de manera estadística, la incidencia de sismos de una magnitud dada, en un periodo de tiempo específico [Gutenberg and Richter, 1944], lo que a su vez sirve para determinar parámetros como las posibles aceleraciones que un sismo generaría en un terreno [Bender, 1983]. Estas aceleraciones son usadas en la elaboración de mapas de amenaza sísmica, que en ingeniería son utilizados para elaborar normas de construcción antisísmica [Quijada, 1993, Covenin, 2001].

Entre las leyes de recurrencia más utilizadas está la de Gutenberg-Richter [Gutenberg and Richter, 1944], la cual proporciona una manera adecuada de relacionar la magnitud y frecuencia de ocurrencia de un sismo, ya que modela el comportamiento entre la cantidad de sismos de cierta magnitud y las veces en que esta magnitud se repite durante cierto periodo de tiempo, es decir, indica la relación entre magnitud y frecuencia. Para que los resultados obtenidos con esta ley puedan ser estadísticamente confiables, es necesario contar con un catálogo sismológico lo más completo posible, tanto en cantidad de sismos como en variedad espacio temporal [Beauval et al., 2013].

Los eventos sismológicos son detectados y registrados por un grupo de sismómetros que forman una red. Esta red proporciona información importante del sismo como por ejemplo: magnitud, localización, profundidad, fecha, hora, entre otros, la cual es almacenada en un catálogo sismológico. Por lo general, una red sismológica detecta todo tipo de evento sin importar su origen, es por eso que la depuración en la elaboración de un catálogo sismológico es de gran importancia, ya que elimina los eventos que no tienen interés desde el punto de vista tectónico o/y estadístico.

Dentro de un catálogo sismológico, es necesario realizar una unificación de las magnitudes sismológicas ya que es posible que en un mismo catálogo aparezcan diferentes tipos de magnitudes. Algunas de las magnitudes existentes pueden ser equivalentes en ciertos rangos [Kanamori, 1983, Utsu, 2002], pero en caso contrario es necesario buscar una relación lineal a partir de eventos registrados de diversas agencias [Ranjit et al., 2012]. Este proceso es realmente importante ya que todos los eventos deben estar en la misma magnitud y además puede modificar los valores de la recurrencia [Beauval et al., 2013].

Desde el punto de vista estadístico los fenómenos como réplicas que ocurren luego de un sismo de gran magnitud no son de nuestro interés, ya que solo los eventos principales son tomados en cuenta para los cálculos de los parámetros a y b . Estos eventos siguen la ley de Omori [Lay and Wallace, 1995], la cual modela el decaimiento de las réplicas en el tiempo y por lo tanto pueden ser removidos de los catálogos sismológicos a través de esta ley empírica y algoritmos específicos [Reasenber, 1985].

Muchos eventos son de origen no tectónico, ya sean debido a explosiones o a la extracción de hidrocarburos, estos eventos, pueden darnos una sismicidad histórica errada para la zona de estudio por lo cual deben ser removidos del catálogo sismológico. Muchos métodos han sido estudiados para discriminar los eventos naturales de los artificiales [Kafka, 1990, Wuster, 1993, Koch and Fah, 2002], pero requieren un

estudio directo de los sismogramas de cada evento. El algoritmo de Wiemer y Baer [Gulia et al., 2012] proporciona una solución desde el punto de vista estadístico para poder filtrar aquellos eventos no tectónicos que no nos interesan.

En general obtener un catálogo final, se usa un ajuste lineal por mínimos cuadrados para poder obtener los parámetros a y b de la ley de recurrencia de Gutenberg-Richter, este método es el más usual y [Gutenberg and Richter, 1944], sin embargo, mas recientemente otros métodos como el de máxima verosimilitud [Bender, 1983, Aki, 1965] han sido usados con éxito y han comprobado ser mejores desde el punto de vista estadístico, ya que dependiendo de las veces que se repite una magnitud se le asignan un mayor peso al momento de realizar el ajuste, asumiendo que es más probable que se repita un evento de dicha magnitud se vuelva a repetir.

Otros autores han realizado trabajos sobre unificaciones de catálogos y cálculos de parámetros de recurrencia con datos de eventos ocurridos en Venezuela [Ramos and Mendoza, 1993, Quijada, 1993]. En este trabajo actualizamos estos datos incluyendo nuevos eventos sismológicos obtenidos de diversas fuentes y agencias internacionales, pertenecientes al periodo 1530-2010. La actividad sismológica local es catalogada de moderada a alta, debido a la intersección de las placas del Caribe y Sudamericana. A través de la comparación entre varios catálogos y usando relaciones ya existentes, pretendemos unificar todos los tipos de magnitudes a la magnitud M_w para finalmente calcularemos los valores a y b [Gutenberg and Richter, 1944] para la región central del país.

Estructura del trabajo: A lo largo del segundo capítulo se introducen los conceptos generales de sismología, esenciales para el entendimiento de este trabajo, así como los aspectos mas importantes de los métodos a ser usados. En el tercer capítulo, se describe la geodinámica regional, los diversos sistemas de fallas y la red sismológica nacional. En el cuarto capítulo se expone la metodología empleada para realizar el proceso de unificación de catálogos, magnitudes, obtención de relaciones de conversión

entre magnitudes así como los programas y rutinas usadas para los cálculos de los parámetros de la Ley de Gutenberg Richter. Así mismo, en el quinto y sexto capítulo se presentan los resultados obtenidos y conclusiones respectivamente.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen conceptos asociados a la sismología y métodos estadísticos de sismos. En primer lugar se mencionaran aspectos relevantes de la sismología y del origen de los terremotos, luego se hace una breve descripción de los tipos de onda y magnitudes, para finalmente introducir los conceptos de catálogo sismológico y la leyes de recurrencia sismológicas.

2.1. Origen de los Terremotos

Un terremoto (del latín: terra «tierra» y motus «movimiento»), también llamado sismo, es un fenómeno de sacudida brusca y pasajera de la corteza terrestre, producido por la liberación de energía acumulada en forma de ondas sísmicas. La causa más común de un movimiento sísmico es debido a la ruptura de fallas geológicas. Otras de las causas pueden ser: fricción en el borde de placas tectónicas, procesos volcánicos, detonaciones nucleares subterráneas, la extracción de hidrocarburos, o la construcción de represas. La sismología (del griego seismos = sismo y logos= estudio) es la rama

de la geofísica que se encarga del estudio de terremotos y la propagación de las ondas mecánicas que se generan en el interior y la superficie de la Tierra.

2.1.1. Tectónica de Placas

Con el estudio de la tectónica de placas se pretende explicar la forma en que está estructurada la litósfera (la porción externa más fría y rígida de la Tierra). Esta teoría tiene su origen en dos teorías que le precedieron:

- La teoría de la deriva continental (propuesta por Alfred Wegener a principios del siglo XX) que intenta explicar el intrigante hecho de que los contornos de los continentes ensamblan entre sí como un rompecabezas y que éstos tienen historias geológicas comunes.
- La teoría de expansión del fondo oceánico (propuesta hacia la mitad del siglo XX por John Tuzo Wilson) que está sustentada en observaciones geológicas y geofísicas que indican que las cordilleras meso-oceánicas funcionan como centros donde se genera nuevo piso oceánico conforme los continentes se alejan entre sí.

Ambas teorías demostraron que los continentes se mueven entre sí y que estos movimientos pueden generar liberación de energía, lo que da una explicación satisfactoria de por qué los terremotos y los volcanes se concentran en regiones concretas del planeta, como el cinturón de fuego del Pacífico, o de por qué las grandes fosas submarinas están junto a islas y continentes y no en el centro de los océanos.

2.1.2. Sistemas de Fallas

Las fallas son fracturas en la corteza a lo largo de las cuales ha tenido lugar un desplazamiento apreciable. Las fallas pueden aparecer en forma más o menos aislada

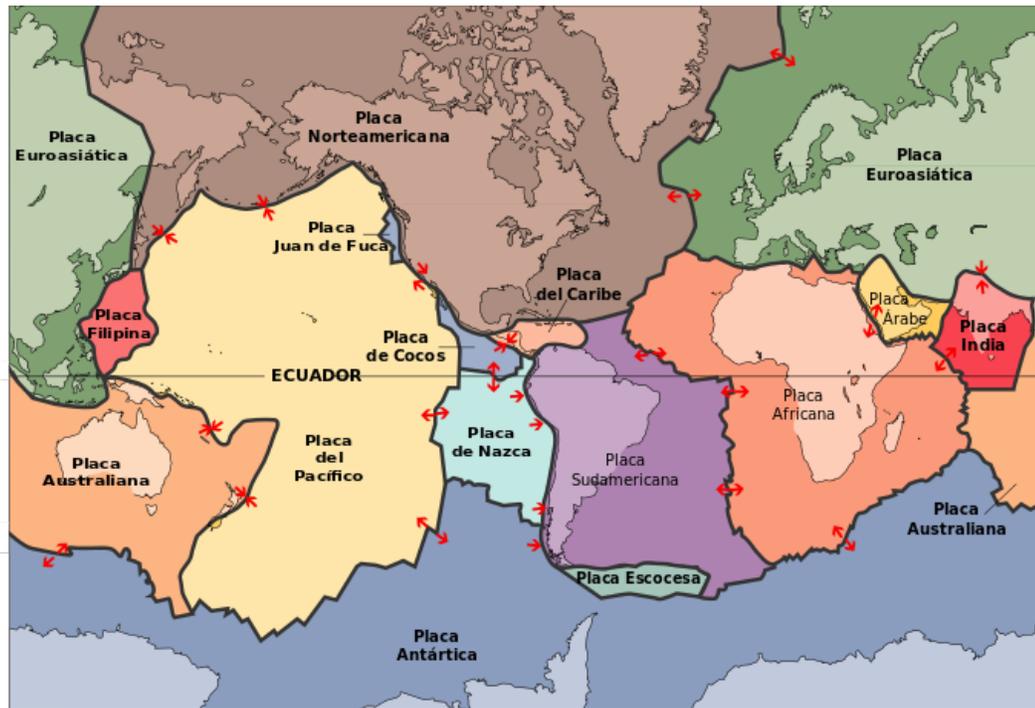


Figura 2.1: Tectónica de placas (modificado de <http://www.usgs.gov/>)

o pertenecer a un gran sistema de fallas o fracturas donde estas se encuentran interconectadas y se les denomina zona de fallas. Podemos definir básicamente 4 tipos de fallas:

- **Fallas de desplazamiento vertical:** presentan el movimiento de los bloques paralelos al buzamiento (o inclinación) y son de dos tipo:
 - Falla Normal: Es aquella en que el bloque hundido se ha deslizado aparentemente hacia abajo con respecto al labio levantado.
 - Falla Inversa: Es aquella en que el bloque de encima o levantado se ha movido aparentemente hacia arriba con respecto al bloque hundido.
- **Fallas de desplazamiento horizontal:** Son fallas en las que el desplazamiento dominante es horizontal y paralelo a la dirección de la superficie de la falla se

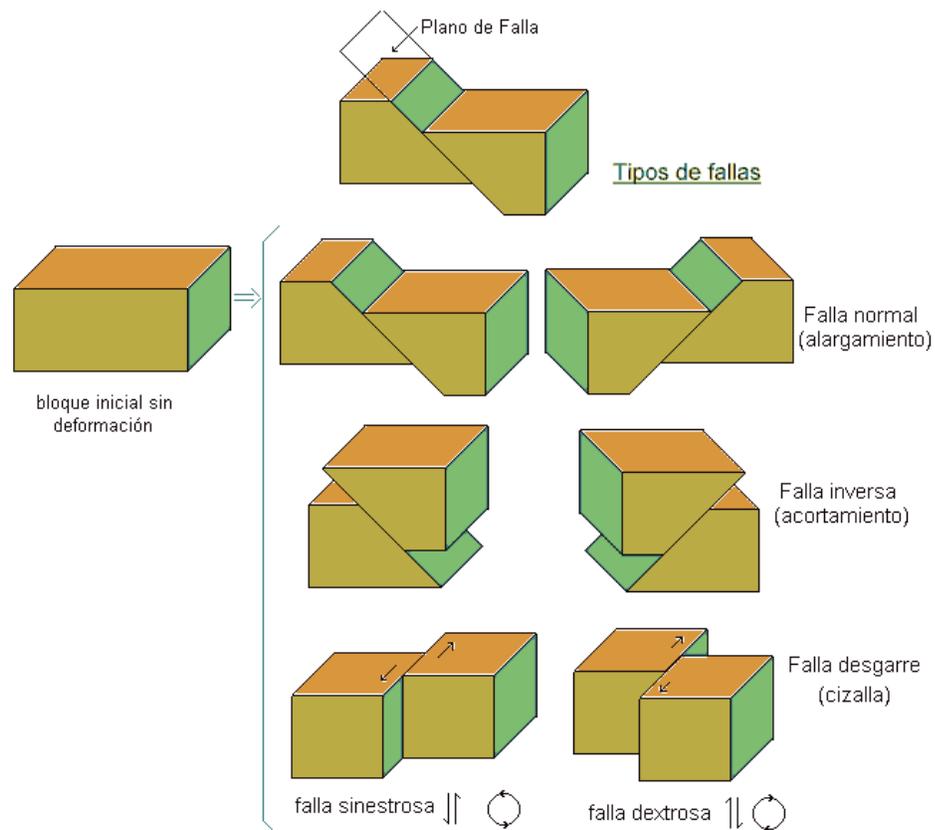


Figura 2.2: Tipos de fallas (tomado de <http://concurso.cnice.mec.es/>)

(fallas de desgarre, de rumbo o fallas transcurrentes) De manera general estas fallas podemos clasificarlas en:

- Falla Dextral: Son aquellas que cuyos desplazamientos relativo es hacia la derecha
- Falla Sinistral: Son aquellas cuyo desplazamiento relativo es hacia la izquierda
- **Fallas de cabalgamiento y corrimiento:** Son fallas inversas, pero con un ángulo de buzamiento pequeño en comparación a estas
- **Fallas de desplazamiento oblicuo** Son fallas cuyo desplazamiento es intermedio entre una falla de desplazamiento vertical y una falla de desplazamiento

horizontal. Por lo tanto, estas fallas combinan esfuerzo de compresión o tensión que originan movimientos verticales, con esfuerzos de desplazamiento vertical.

2.2. Tipos de Eventos sísmológicos

Los eventos sísmológicos se pueden clasificar según su origen en eventos tectónicos, eventos no tectónicos, eventos premonitores y réplicas

- **Eventos Tectónicos:** Son eventos producidos por la liberación de energía de las placas tectónicas. Son producidos por un deslizamiento repentino en una falla, sacudiendo el suelo circundante y radiando energía sísmica. También pueden ser causados por la actividad volcánica o magmática, u otros cambios súbitos en la tierra.
- **Eventos no tectónicos:** Aquellos eventos que no provienen directamente de la actividad geológica de la tierra son denominados eventos no tectónicos, estos pueden deberse a explosiones de minas o nucleares, represas, extracción de hidrocarburos, entre otros. Generalmente los eventos no tectónicos más comunes están asociados a explosiones de minas.
- **Eventos premonitores (foreshocks):** son eventos relativamente pequeños en magnitud que preceden a un evento principal de origen tectónico. Se localizan espacial y temporalmente cerca de un evento principal, sin embargo, no todo evento principal tiene eventos de este tipo.
- **Réplicas (o eventos aftershocks):** son aquellos sismos que están asociados a eventos de mayor magnitud. Estos sismos más pequeños se deben al reajuste de fuerzas en el área de la falla luego de ocurrir un evento de gran magnitud. La frecuencia de estas réplicas viene dada por la Ley de Omori:

$$n = \frac{C}{(K + t)^P} \quad (2.1)$$

donde n es la frecuencia de las réplicas en un tiempo t luego del evento principal y K , C y P son constantes dependientes de la falla. Esta ley por lo general es útil para detectar y posteriormente remover las réplicas luego de un evento grande, ya que para cálculos de amenaza sísmica no son tomados en cuenta.

2.3. Ondas Sísmicas

Se definen las ondas sísmicas como tipos de ondas elásticas que se propagan a través del subsuelo y la superficie terrestre debido a movimientos telúricos naturales o explosiones. En sismología se consideran principalmente cuatro tipos de ondas:

- **Ondas P (primarias):** son ondas longitudinales o compresionales, lo cual significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación. Pueden viajar a través de cualquier tipo de material líquido o sólido. Velocidades típicas son 1450m/s en el agua y cerca de 5000m/s en el granito.
- **Ondas S (secundarias):** son ondas en las cuales el desplazamiento es transversal a la dirección de propagación. Estas ondas son las que generan las oscilaciones durante el movimiento sísmico y las que producen la mayor parte de los daños. Solo se trasladan a través de elementos sólidos. Debido a que su velocidad es menor que la de las ondas primarias aparecen en el terreno algo después que las ondas P.
- **Ondas Love (L):** son ondas superficiales que producen un movimiento horizontal de corte en superficie. La velocidad de las ondas Love es un 90 % del total de la velocidad de las ondas S y es ligeramente superior a la velocidad de las ondas Rayleigh. Estas ondas solo se propagan en superficies.

- **Ondas Rayleigh:** Las ondas Rayleigh, también denominadas “ground roll”, son ondas superficiales que producen un movimiento elíptico retrógrado del suelo. La existencia de estas ondas fue predicha por John William Strutt, Lord Rayleigh, en 1885. Son ondas más lentas que las ondas internas y su velocidad de propagación es casi un 70 % del total de la velocidad de las ondas S.

En la figura 2.3 se ilustra como es el comportamiento de cada una de las ondas descritas anteriormente.

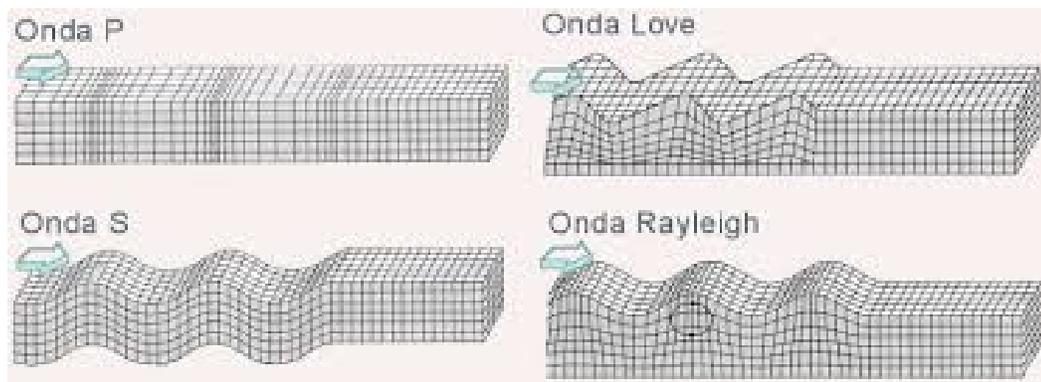


Figura 2.3: Ondas sísmicas (tomado de <http://ies.rayuela.mostoles.educa.madrid.org/>)

Dependiendo de su amplitud y velocidad, cada tipo de onda tiene una forma específica dentro del sismograma. La identificación de cada fase de la onda sísmica es de vital importancia al momento de calcular la magnitud del evento.

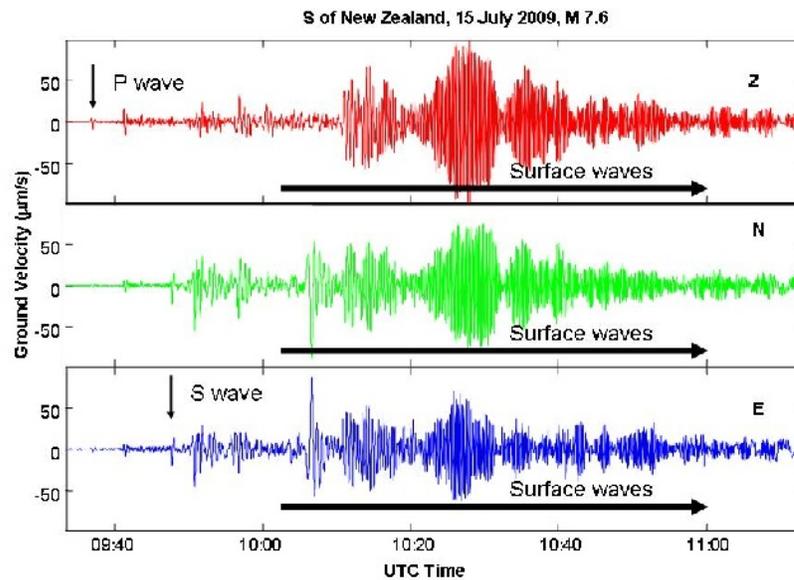


Figura 2.4: Tipos de ondas sísmicas en un sismograma (tomado de <http://www.geonet.org.nz/>)

2.4. Localización de un sismo

Localizar un sismo significa saber su ubicación geográfica y la profundidad a la cual se produjo. Los sismos se localizan a partir del tiempo que tardan las ondas en viajar desde el foco o hipocentro hasta el sismómetro. El lugar donde se produce un sismo se llama **foco**, su proyección sobre la superficie terrestre recibe el nombre de **epicentro** y la distancia entre el epicentro y la estación sismológica es la **distancia epicentral**. El sismómetro amplifica e inscribe los movimientos del suelo y los envía como señal digital a un computador donde se analiza, dando como resultado la localización del sismo, su magnitud y tiempo de origen, entre otros factores.

La ubicación del epicentro de un sismo se realiza analizando, al menos, los sismogramas de 4 estaciones e identificando los diferentes tiempos de llegada de las ondas a cada estación sismológica. Como la velocidad de las ondas P es mayor

que la de las ondas S y ambas se generan en el mismo punto (foco), el tiempo de arribo de cada onda a las estaciones sismológicas sirve para calcular el lugar de origen del sismo, como se puede ver en la figura 2.5

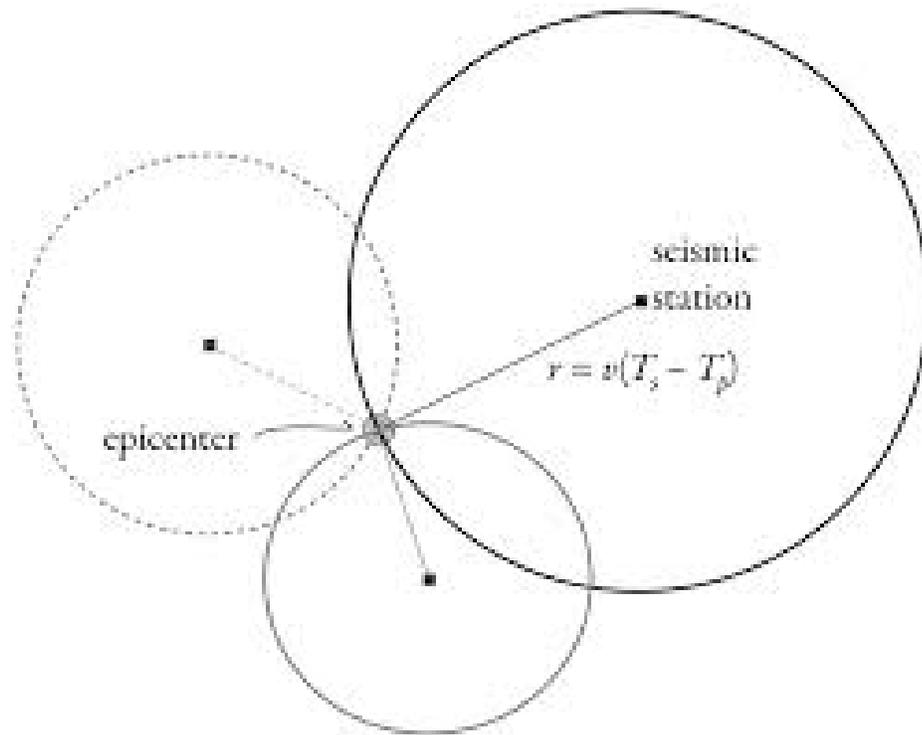


Figura 2.5: Localización de un sismo (tomado de: Investigación sismológica en Venezuela)

2.5. Intensidades y Magnitudes sismológicas

2.5.1. Intensidad sismológica

La intensidad es una medida subjetiva de los daños ocasionados por un sismo sobre la población, las construcciones y la naturaleza misma. En 1902, el sismólogo italiano Giuseppe Mercalli propuso una tabla de escala de intensidad basada en 10 grados, posteriormente fue modificada y ampliada hasta 12 grados, por lo que que actualmente es conocida como **escala modificada de Mercalli**. Esta

escala de intensidades se muestra a continuación en la figura 2.6

Grado	Descripción
I. Muy débil	Imperceptible para la mayoría excepto en condiciones favorables. Aceleración menor a 0.5 Gal.
II. Débil	Perceptible sólo por algunas personas en reposo, particularmente aquellas que se encuentran ubicadas en los pisos superiores de los edificios. Los objetos colgantes suelen oscilar. Aceleración entre 0.5 y 2.5 Gal.
III. Leve	Perceptible por algunas personas dentro de los edificios, especialmente en pisos altos. Muchos no lo reconocen como terremoto. Los automóviles detenidos se mueven ligeramente. Sensación semejante al paso de un camión pequeño. Aceleración entre 2.5 y 6.0 Gal.
IV. Moderado	Perceptible por la mayoría de personas dentro de los edificios, por pocas personas en el exterior durante el día. Durante la noche algunas personas pueden despertarse. Perturbación en cerámica, puertas y ventanas. Las paredes suelen hacer ruido. Los automóviles detenidos se mueven con más energía. Sensación semejante al paso de un camión grande. Aceleración entre 6.0 y 10 Gal.
V. Poco Fuerte	La mayoría de los objetos se caen, caminar es dificultoso, las ventanas suelen hacer ruido. Aceleración entre 10 y 20 Gal.
VI. Fuerte	Lo perciben todas las personas, muchas personas asustadas suelen correr al exterior, paso insostenible. Ventanas, platos y cristalería dañadas. Los objetos se caen de sus lugares, muebles movidos o caídos. Revoque dañado. Daños leves a estructuras. Aceleración entre 20 y 35 Gal.
VII. Muy fuerte	Pararse es dificultoso. Muebles dañados. Daños insignificantes en estructuras de buen diseño y construcción. Daños leves a moderados en estructuras ordinarias bien construidas. Daños considerables estructuras pobremente construidas. Mampostería dañada. Perceptible por personas en vehículos en movimiento. Aceleración entre 35 y 60 Gal.
VIII. Destructivo	Daños leves en estructuras especializadas. Daños considerables en estructuras ordinarias bien construidas, posibles colapsos. Daño severo en estructuras pobremente construidas. Mampostería seriamente dañada o destruida. Muebles completamente sacados de lugar. Aceleración entre 60 y 100 Gal.
IX. Ruinoso	Pánico generalizado. Daños considerables en estructuras especializadas, paredes fuera de plomo. Grandes daños en importantes edificios, con colapsos parciales. Edificios desplazados fuera de las bases. Aceleración entre 100 y 250 Gal.
X. Desastroso	Algunas estructuras de madera bien construida destruidas. La mayoría de las estructuras de mampostería y el marco destruido con sus bases. Rieles doblados. Aceleración entre 250 y 500 Gal.
XI. Muy desastroso	Pocas, si las hubiera, estructuras de mampostería permanecen en pie. Puentes destruidos. Rieles curvados en gran medida. Aceleración mayor a 500 Gal.
XII. Catastrófico	Destrucción total con pocos sobrevivientes. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionadas.

Figura 2.6: Escala modificada de Mercalli (modificado de: <http://www.http://earthquake.usgs.gov/>)

2.5.2. Magnitudes sismológicas

La mejor manera de cuantificar la magnitud de un sismo es determinando su momento sísmico M_0 . Esto puede ser realizado recobrando la función temporal de la onda (ya sea superficial o interna), pero esto requiere un modelo matemático completo del tipo de onda en cuestión. Es deseable tener una medida de la magnitud de un sismo que sea lo más simple posible, por ejemplo usando una fase sísmica. Se sabe que la amplitud y la forma de las ondas P y S son proporcionales al momentum [Lay and Wallace, 1995] así que diferentes eventos pueden

tener el mismo momento sísmico, lo cual puede producir diferentes amplitudes de señal. La función temporal se podría ver afectada por el ancho de banda de la medición, por lo que una misma fase sísmica puede variar proporcionalmente en varios instrumentos.

A pesar de las limitaciones antes descritas, las mediciones por amplitud de la onda sísmica suelen ser bastante útiles al momento de definir relaciones entre fases sísmicas. Estas relaciones entre fases se denominan **magnitudes sismológicas**. Toda esta información sobre magnitudes es incluida en un catálogo sismológico. Un catálogo sismológico es una colección de sismos ocurridos en una zona específica durante un periodo determinado de tiempo. En el catálogo se ven reflejados datos como: fecha, hora, duración, localización epicentral (donde ocurrió el sismo), profundidad, magnitud, poblaciones más cercanas y/o afectadas por el sismo. Los tipos de magnitudes que se usan están basadas en dos principios:

- El obtenido con una geometría fuente-receptor y dos sismos de diferentes magnitudes. El “mayor” evento producirá en promedio mayores amplitudes de onda al arribar.
- El segundo principio es donde se considera que todas las amplitudes de arriba deben comportarse de manera similar.

Los efectos geométricos de propagación y atenuación son conocidos de manera estática. La forma general para todas las escalas de magnitudes está dada por:

$$M = \log(A/T) + f(\Delta, h) + C_s + C_r \quad (2.2)$$

donde A es el desplazamiento del suelo de la fase en la que la amplitud de la escala está basada; T es periodo de la señal; f es la corrección para la distancia epicentral (Δ) y profundidad focal (h); C_s es una corrección por el basamento de la estación sismológica (por ejemplo, amplificación de la señal debido al tipo

de roca subyacente), y C_s es una corrección para la región. La escala logarítmica es usada debido a que las amplitudes de las ondas sísmicas pueden ser de varios ordenes de magnitud (cada unidad de incremento de la magnitud, se incrementa 10 veces respecto al desplazamiento del suelo). Las magnitudes son obtenidas, en general desde varias estaciones. Actualmente se usan cinco tipos básicos de magnitudes, los cuales describiremos a continuación:

– **Magnitud Local M_L :**

Richter en la década de los 30 observó que el logaritmo del máximo desplazamiento del suelo medido por un sismómetro de torsión Wood-Anderson decaía con la distancia y de forma paralela entre varios sismos. Richter propuso una ecuación logarítmica que relaciona el tamaño relativo de cada evento por comparación con un evento de referencia:

$$\log A - \log A_0 = M_L \quad (2.3)$$

donde A son los desplazamientos del sismo y A_0 un evento sísmico de referencia a una cierta distancia. Richter, tomó como sismo de referencia con $M_L = 0$ tal que A_0 era 1×10^{-3} y a distancia epicentral de 100 Km. Usando el evento de referencia, Richter obtuvo la siguiente ecuación empírica para el área de California:

$$M_L = \log A - 2,48 + 2,76 \log \Delta \quad (2.4)$$

– **Magnitud de ondas de cuerpo m_b :**

Aunque la magnitud local (M_L) es útil, las limitaciones impuestas por el tipo de instrumento y el rango distancia la hacen un poco impráctica para la caracterización global de la magnitud de un sismo. Más allá de distancias regionales donde una onda P directa llega con una fase distinta, es conveniente definir una magnitud basada en la amplitud de la onda P la cual es denominada m_b . Esta magnitud está basada en los primeros ciclos de llegada de la onda P y está dada por:

$$m_b = \log(A/T) + Q(h, \Delta) \quad (2.5)$$

donde A es la amplitud del desplazamiento del suelo en micrómetros, T es el correspondiente periodo en segundos y $Q(h, \Delta)$ es una corrección para la distancia y profundidad la cual es determinada empíricamente. La razón de usar las primeras llegadas de la onda P es que los efectos de un patrón de radiación y las fases de la profundidad pueden resultar en complicadas formas de onda.

– **Magnitud de ondas superficiales M_S :**

Más allá de 600 km los sismogramas de largo periodo son dominados por ondas superficiales, usualmente por un periodo de aproximadamente 20s. La amplitud de estas ondas dependen en distancia de manera diferente a las ondas de cuerpo ya que se ven fuertemente afectadas por la profundidad. Sismos muy profundos no generan muchas amplitud de ondas superficiales y por lo tanto no hay una buena corrección para una gran profundidad. La ecuación para la magnitud de ondas superficiales está dada por:

$$M_S = \log A_{20} + 1,66 \log \Delta + 2,0 \quad (2.6)$$

donde A_{20} es la amplitud para el periodo de los 20s de la onda superficial en micrómetros. En general, la amplitud de la onda Rayleigh en la componente vertical es usada en esta última ecuación. Tanto M_s como m_b fueron diseñados para ser lo mas compatible posible con M_L , por lo que algunas veces las tres magnitudes dan el mismo valor para un mismo evento sísmico.

– **Magnitud de coda M_c :**

Tambien llamada magnitud de duración, es la magnitud mas simple para sismos locales. Las ondas de coda son ondas dispersivas que radían desde el hipocentro del sismo y son la ultima fase del sismo en llegar. Una

definición comun de la longitud de la coda t_c es la duración total en segundos del sismo desde la onda P hasta el final de la señal definido como el punto donde la onda S no se ve mas respecto al ruido de la señal [Havskov and Ottemoller, 2010]. También es posible estimar magnitudes de sismos mayores usando la coda de la onda P solamente. Esta magnitud esta definida por:

$$M_c = a \log(t_c) + br + c \quad (2.7)$$

donde t_c es la longitud de la coda en segundos, r es la distancia hipocentral, a , b y c constantes.

– **Magnitud de momento M_W :**

La magnitud total de un sismo está mejor representada por el momento sísmico M_0 . Consiste en calcular la energía liberada. Considerando la historia de la respuesta de una partícula ante una onda sísmica. A medida que la onda pasa, la partícula que tiene una energía potencial, también tendrá una velocidad y por lo tanto una energía cinética. La suma de la energía potencial y la energía cinética integrada en el tiempo nos daría el trabajo o la energía liberada (ver apéndice A):

$$M_W = \left(\frac{\log M_0}{1,5} \right) - 10,73 \quad (2.8)$$

En la figura 2.7 se muestra una gráfica donde se puede observar la relación existente entre las diversas magnitudes descritas anteriormente.

2.6. Ley de Gutenberg-Richter

Luego de analizar sismos de un catálogo del sur de California, Gutenberg y Richter descubrieron la existencia de una relación entre la magnitud de un sismo y su

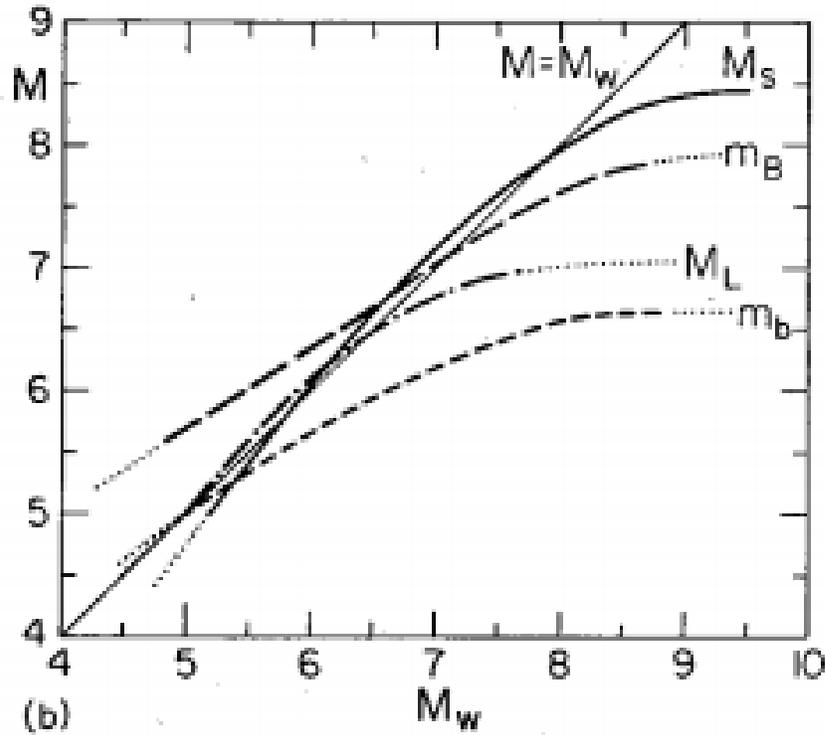
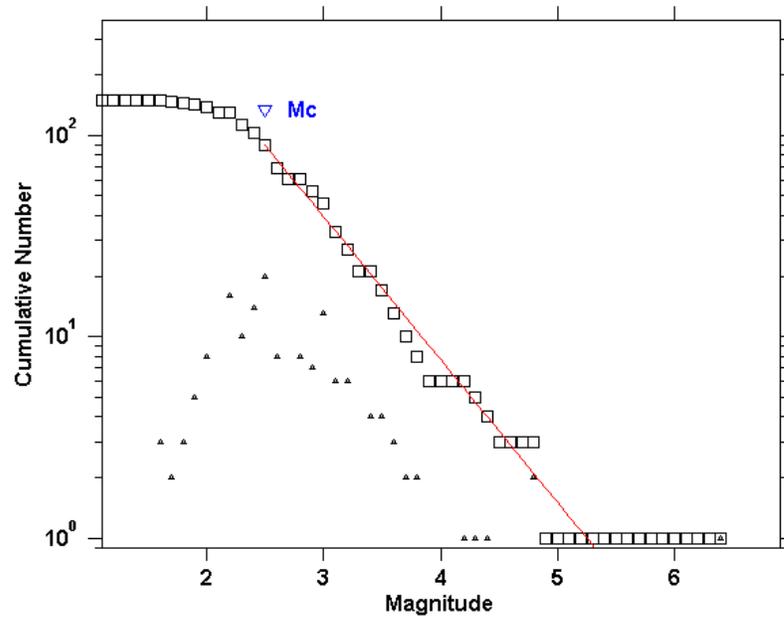


Figura 2.7: Relaciones entre las magnitudes m_b , M_s , M_L y M_w [Kanamori, 1983]. Se puede observar como los tipos magnitudes se van saturando a medida que aumenta la magnitud del sismo

frecuencia de ocurrencia. La relación magnitud-frecuencia puede ser representada en dos formas equivalentes: de manera incremental o de manera acumulativa. La medición de estas frecuencias puede hacerse de diferentes maneras; según el número de eventos totales en un periodo de tiempo, (número total de eventos/años) o según las probabilidades (generalmente normalizadas para obtener la función de densidad de probabilidad). Graficando las magnitudes versus el logaritmo de la frecuencia, como se muestra en la figura 2.8,

se observa que la relación relación exponencial es de la siguiente forma:

$$\log N = a - bM_s \tag{2.9}$$



Maximum Likelihood Solution
 b-value = 0.709 +/- 0.08, a value = 3.72, a value (annual) = 2.85
 Magnitude of Completeness = 2.5

Figura 2.8: Ley de Recurrencia de Gutenberg-Richter

donde N es el número de sismos con una magnitud dentro de un rango fijo, alrededor de la magnitud M_s , a representa el número total de sismos y b una constante llamada “valor b ” o “valor β ” (si usamos la base del logaritmo natural). La ecuación 2.9 se puede reescribir de la siguiente manera :

$$N(M_0) = aM_0^{-(b/1,5)} \tag{2.10}$$

Un mayor valor de b significa que una menor fracción de los sismos ocurridos tienen magnitudes grandes, mientras que un bajo valor de b implica una mayor fracción de estos sismos tuvieron altas magnitudes. A partir de estas constantes a y b , se pueden hacer cálculos de recurrencia de sismos, útiles para cálculos de

amenaza sísmica de una zona específica.

Un parámetro importante dentro de la ley de recurrencia de Gutenberg-Richter es la llamada **magnitud de completitud** M_c , la cual se define como el valor mínimo de magnitud sobre la cual se considera que todos los sismos son registrados de manera confiable, graficamente se puede observar en 2.8. Una estimación correcta de M_c es crucial ya que un valor demasiado alto conduce a menor muestreo de sismos, descartando datos utilizables, mientras que un valor demasiado bajo conduce a valores erróneos de los parámetros de sísmicidad que puede generar parámetros sísmicos incorrectos [Mignan and Woessner, 2012]. Este valor puede ser calculado de manera automática por paquetes de análisis sismológico como Zmap [Wys et al., 2001] o calcularse de manera manual observando la la regresión obtenida de la Ley de Gutenberg Richter.

2.6.1. Método de máxima verosimilitud

Una de las formas mas usuales de calcularlos valores de "a" y "b" es a través del método de máxima verosimilitud para datos agrupados[Bender, 1983]. A partir de una distribución de N eventos con vlaores de magnitud agrupados en n intervalos de ancho δm . usando esta distribución de magnitudes se obtuvo una nueva expresión de la estimación del valor "b".

Suponiendo que se han observado N eventos sísmicos con magnitudes en el rango $m_{max} - m_{min}$ que esta dividido en n intervalos de ancho Δm considerando que los eventos son una distribución multinomial en la cual $f(k_1, k_2, \dots, k_n)$ es la probabilidad de que k_1 magnitudes esten en el primer intervalo, k_2 en el segundo intervalo y k_n en el n-ésimo intervalo y viene dada por:

$$f(k_1, k_2, \dots, k_n) = \frac{N!}{\prod_{i=1}^n k_i} \prod_{i=1}^n p_i^{k_i} \quad (2.11)$$

donde k_i es el número de terremotos en el i -ésimo intervalo de magnitud con el vínculo $\sum_{i=1}^n k_i = N$ y p_i la probabilidad de que un evento ocurra en el i -ésimo intervalo con el vínculo $\sum_{i=1}^n p_i = N$.

Luego de algunas manipulaciones, [Bender, 1983] obtuvo la siguiente expresión:

$$f(k_1, k_2, \dots, k_n) = \frac{N!}{\prod_{i=1}^n k_i} \left[\frac{1 - \exp(-\beta \Delta m)}{1 - \exp(-n\beta \Delta m)} \right]^N \exp \left[-\beta \Delta m \sum_{i=1}^n (i-1)k_i \right] \quad (2.12)$$

siendo $\beta = b \ln(10)$. Luego la función de verosimilitud se define como el logaritmo de esta función y derivando con respecto a β e igualando a 0 se obtiene la ecuación:

$$\frac{q}{1-q} - \frac{nq^n}{1-q^n} = \sum_{i=1}^n \frac{(i-1)k_i}{N} \quad (2.13)$$

donde $q = \exp(-\beta \Delta m)$

la ecuación 2.13 muestra que para una suma constante $\sum_{i=1}^n (i-1)k_i$ y un intervalo Δm fijo, estimados dependen sólo del número de intervalos n .

El valor de "a" puede obtenerse a través de la siguiente ecuación (Bath 1981)

$$a = \log_{10} \sum_{i=1}^n N_i - \log_{10} \sum_{i=1}^n 10^{-bM_i} \quad (2.14)$$

2.6.2. Método Stepp

El método Stepp [Stepp, 1972] basa sus análisis de completitud en un estudio estadístico agrupando los datos por clases de intensidades. En este método, se propone dividir el intervalo completo de tiempo del catálogo en sub-intervalos, para luego determinar la tasa de recurrencia anual ($\lambda = N/\text{año}$) por rango de

magnitud, en cada uno de los sub-intervalos de tiempo considerados. Posteriormente se determina en cual de los intervalos, λ permanece constante y con estos valores se calcula un λ promedio. Sean k_1, k_2, \dots, k_n el número de sismos por unidad de tiempo en cada uno de los intervalos, entonces el valor medio viene dado por:

$$\lambda = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i \quad (2.15)$$

y su varianza por:

$$\sigma_\lambda^2 = \frac{\lambda}{n} \quad (2.16)$$

siendo n el número de intervalos. Si el intervalo de tiempo T se toma de 1 año, entonces la desviación estándar se obtiene de la ecuación:

$$\sigma_\lambda = \sqrt{\frac{\lambda}{T}} \quad (2.17)$$

donde T es el tamaño del período de tiempo. Para el caso de procesos estacionarios es de esperar que σ_λ se comporte como $1/\sqrt{T}$ en el intervalo de tiempo donde la tasa de recurrencia permanece constante. Si la tasa de recurrencia es constante, entonces se considera que el proceso alcanza estabilidad lo que le permitiría una buena estimación del parámetro λ . Con este valor estimado, se crea un catálogo artificial que se utilizara para la determinación de λ .

CAPÍTULO 3

SISMOLOGÍA EN VENEZUELA

En este capítulo trataremos lo relacionado con la dinámica geológica de Venezuela, en especial la de la región central de Venezuela, que es nuestra zona de interés. Se comenzará discutiendo el contexto geodinámico en el continente que afecta directamente a Venezuela, hasta llegar a los principales sistemas de fallas que existen en el país y su sismicidad. Por último se describirá la composición de la Red Sismológica Nacional.

3.1. Geodinámica Regional

La tectónica activa de Venezuela se relaciona con la interacción entre las placas Caribe, Suramérica y Nazca, e igualmente con otros bloques continentales de menor dimensión entrapan las placas antes indicadas. Esta interacción varía drásticamente del este hacia el oeste, a lo largo del límite de placas Caribe-Sudamérica, la zona norte de Venezuela está esencialmente afectada por la interacción directa entre estas placas, mientras que la zona occidental de Venezuela muestra un contexto geodinámico más complejo.

3.2. Sistemas de Fallas

En gran medida, la actividad sísmica del país está asociada al sistema de fallas activo predominante: Oca-Ancón-Boconó-San Sebastián-El Pilar, generada por el continuo movimiento este-oeste de la placa Caribe con respecto a la de América del Sur [Paolini et al., 2012]. Estos sistemas de fallas han sido el causante de los sismos más severos que han ocurrido en el territorio nacional, entre los que se destacan los de 1812, 1900 y 1967 entre otros.



Figura 3.1: Fallas en Venezuela (tomado de FUNVISIS)

3.2.1. Sistema de Fallas de Boconó

El sistema de fallas de Boconó se extiende unos 500 km en la parte central de los Andes venezolanos, entre la depresión del Táchira y el Mar Caribe. Corre

aproximadamente en dirección noreste pasando bajo el pueblo que le da nombre. Este sistema se ramifica al este de Morón y a lo largo de la costa del Mar Caribe dando origen a las fallas de Morón y El Pilar. Hacia el suroeste termina en una serie de corrimientos y fallamientos inversos en la depresión del Táchira en el extremo norte de la Cordillera Oriental de Colombia.

3.2.2. Sistema de Fallas de San Sebastián

Este sistema de fallas costero constituye el accidente estructural de mayor potencial sismogénico de la región de interés [Audemard, 2000] por su longitud (400 km) y por pertenecer a una franja de deformaciones tectónicas en gran parte submarina, de unos 30 a 35 km de ancho (Fallas de Oca-Chirinos, Morón, entre otros), que concentra lo esencial del movimiento relativo entre el Caribe y Suramérica, constituyendo así el límite principal entre ambas placas tectónicas.

Por lo dicho anteriormente se puede afirmar que el sistema de fallas de San Sebastián pertenece al conjunto de accidentes de tipo transcurrente dextral, que se extienden a través del territorio nacional, desde la frontera con Colombia (falla de Boconó) hasta la región oriental (falla de El Pilar). Siendo la franja de fallas costeras la prolongación del sistema de Boconó. Su alta velocidad de desplazamiento alrededor de 1 cm/año, unida con la longitud del sistema, explica la importancia de la amenaza planteada por la falla de San Sebastián para la Región Central y el área Metropolitana de Caracas en particular.

3.2.3. Sistema de Fallas de El Pilar

El sistema de Fallas de El Pilar, es probablemente el más activo e importante desde el punto de vista tectónico. Tiene una longitud de 350 Km (de los cuales solo 80 Km están en superficie) y se extiende desde el Golfo de Cariaco en su extremo Oeste hasta el Golfo de Paria, llegando hasta Trinidad en el extremo Este

[Beltran et al., 1996]. Presenta un desplazamiento relativo de entre 1 y 2cm/a (centímetros/año) en dirección noroeste y una compleja zona de deformación litosférica.

Este sistema dextral se origina debido a la subducción de la porción oceánica de la placa Sudamerica por debajo de la placa del Caribe, a lo largo del arco de las Antillas Menores. La subducción también genera puntos calientes que son responsables por la presencia de emanaciones termales en las áreas circundantes al sistema. Muchos de sismos de gran envergadura han ocurrido en el área que abarca el sistema como el de Cariaco en 1997 [Schmitz et al., 2005] y el de Cumana en 1530, que destruyó por completo a la ciudad.

3.2.4. Sistema de Fallas de Oca-Ancón

El sistema de Fallas de Oca-Ancón se extiende 650 km desde el noreste de la costa caribeña colombiana, cerca de la ciudad de Santa Marta de manera continua hacia la zona noroccidental del país a través de la Península de la Guajira, pasando por la salida del Lago de Maracaibo hasta Boca de Aroa estado Falcón. Observaciones a lo largo del sistema sugieren que pudo haber existido actividad paleo-sísmica durante el holoceno [Audemard, 1996]. El sistema Oca-Ancón converge con los sistemas Boconó-San Sebastián San Sebastián-El Pilar, donde el conjunto es considerado como el mayor borde en el sur de la placa del Caribe.

Este sistema ha sido subestimado o incluso considerado inactivo debido a su poca actividad reciente, sin embargo, mucha evidencia geológica demuestra una cierta actividad durante la era Cuaternaria y Holocena. En la década de 1960, se observó evidencia paleo-sísmica en Sinamaica, al norte de Maracaibo [Cluff and Hansen, 1969] por lo que se puede establecer que el último evento sísmico pudo haber ocurrido en un periodo de 2700 años anteriores a su estudio. Por otro lado se encontró

evidencia de otros eventos sísmicos entre 7775 ± 320 , 624 ± 39 y 1945 ± 630 años [Audemard and Romero, 1993] , lo cual puede ser evidencia de que no es un sistema del todo inactivo.

3.3. Sismicidad en Venezuela

Esencialmente, la sismicidad a nivel del territorio nacional se concentra lo largo de los sistemas de fallas antes descritos (ver figura 3.2), es superficial y se presenta en los primeros 40 Km de profundidad; exceptuando la sismicidad profunda asociada a la zona de subducción en el noreste de Venezuela entre los 20 y 120 Km [Audemard, 2002, Singer and Audemard, 1997].

La sismicidad en Venezuela está caracterizada por una alta tasa de micro sismicidad (eventos de magnitud = 3) y eventos de magnitud intermedia (entre 3 y 5) aunque la historia sísmica del país revela que han ocurrido más de 130 sismos que han causado algún tipo de daño importante, el más destructivo de todos fue el que ocurrió el 26 de marzo de 1812 y que afectó seriamente ciudades importantes como Mérida, Barquisimeto y Caracas, causando más de 20.000 víctimas, es decir, un 5 % de la población estimada para la época [Grases, 1990].

3.4. Red Sismológica Nacional

Con el propósito de conocer con exactitud cuándo y dónde ocurren los terremotos en el planeta se han diseñado redes de estaciones sismológicas. Estas redes reportan en conjunto los datos registrados por instrumentos (sismómetros) a una estación central para su análisis. Venezuela cuenta con la Red Sismológica Nacional, la cual está constituida por 35 estaciones banda ancha de tres componentes, distribuidas en las zonas de mayor actividad sísmica del país, la cual podemos ver en la figura 3.3. Adicionalmente, se cuenta con las Redes Locales, que son pe-

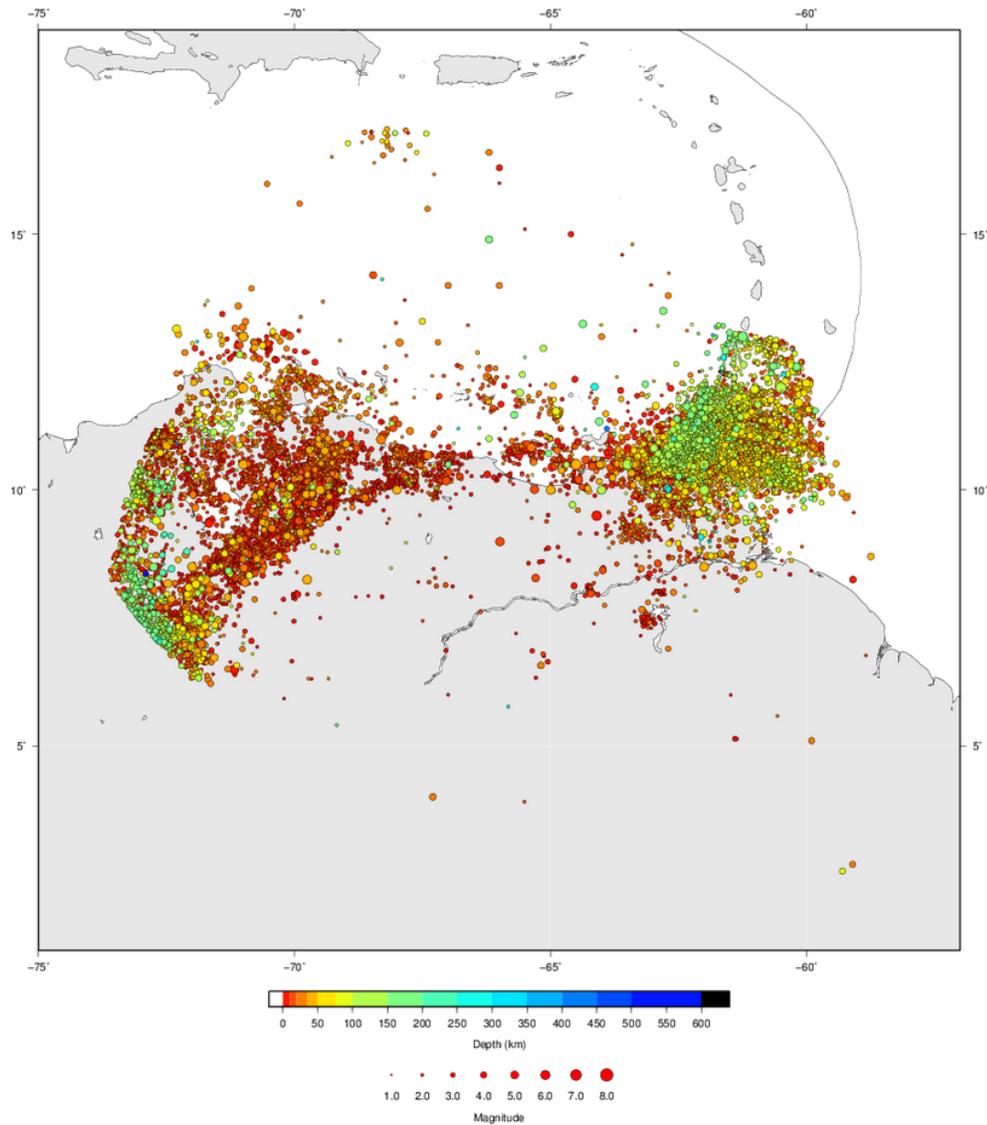


Figura 3.2: Sismicidad histórica 1900-2010 (tomado de ISC)

queñas redes acelerográficas ubicadas en puntos clave como hospitales y centros educativos que complementan a la Red Sismológica Nacional con información de carácter local registrado en nuestro país.

La Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológica (FUNVISIS) es el organismo encargado de la instalación y mantenimiento de La Red Sismológica

Nacional. La información adquirida por la red está destinada al estudio de la sismicidad en Venezuela como producto de la interacción de las placas tectónicas, y los resultados que se derivan de esta investigación son un valioso aporte para la estimación del riesgo sísmico en Venezuela. La versión más reciente de esta red fue instalada en el año 2000 y realiza un registro continuo de la sismicidad en todo el territorio nacional, lo que ha permitido la conformación y constante actualización de un catálogo sísmológico de gran precisión y completitud.

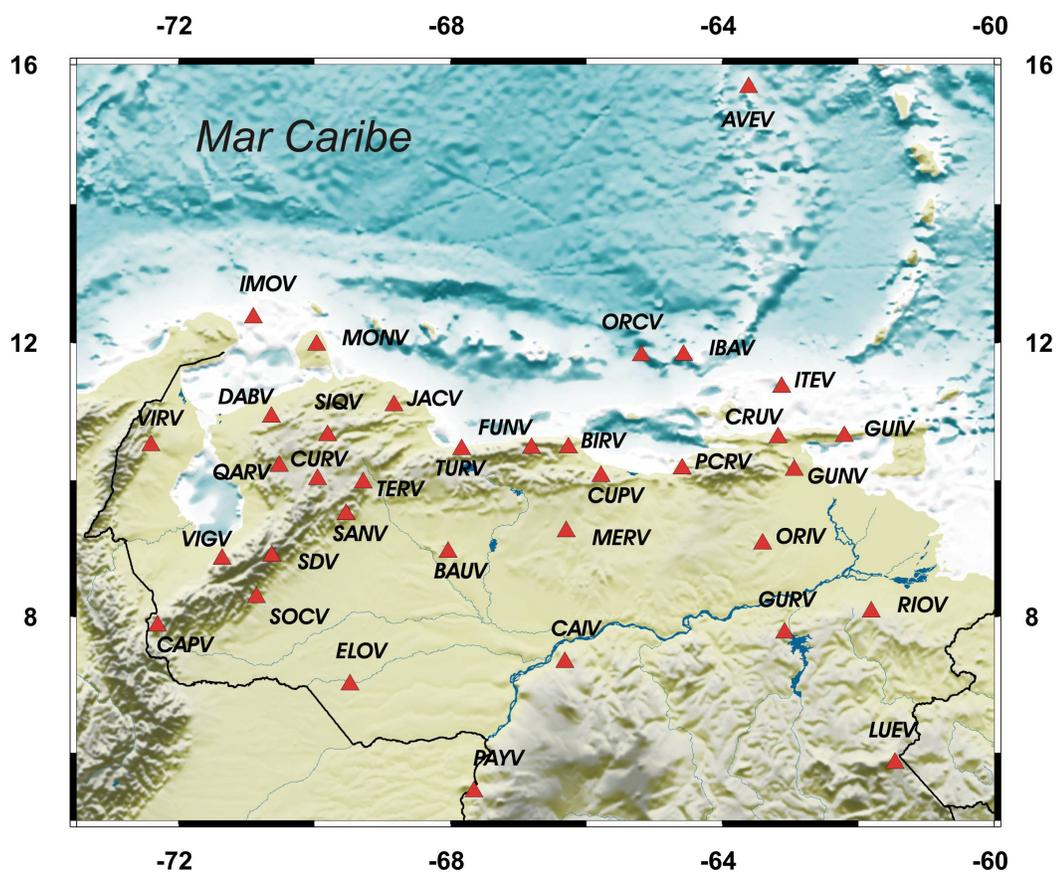


Figura 3.3: Red Sismologica Nacional (cortesía de FUNVISIS)

3.5. Región Central del País

La zona a estudiar en este trabajo es la región central del país (ver figura 3.4), que por su alta densidad poblacional, es importante hacer cálculos de amenaza y recurrencia sísmológica. Esta región está compuesta por los siguientes accidentes estructurales: Sistema de Fallas de San Sebastián, Sistema de fallas de La Victoria, (Falla de Guacamaya, Fallas de La Cabrera y El Horno, Sistema de Fallas de La Victoria, Falla de Pichao), Falla de Táchata, Falla de Tacagua - El Ávila, Falla de Río Guárico, Falla de El Limón, Falla de Santa Rosa. La mayoría de los sismos de esta región son debido al régimen transcurrente, por lo que su profundidad va desde la superficie hasta 40km de profundidad.

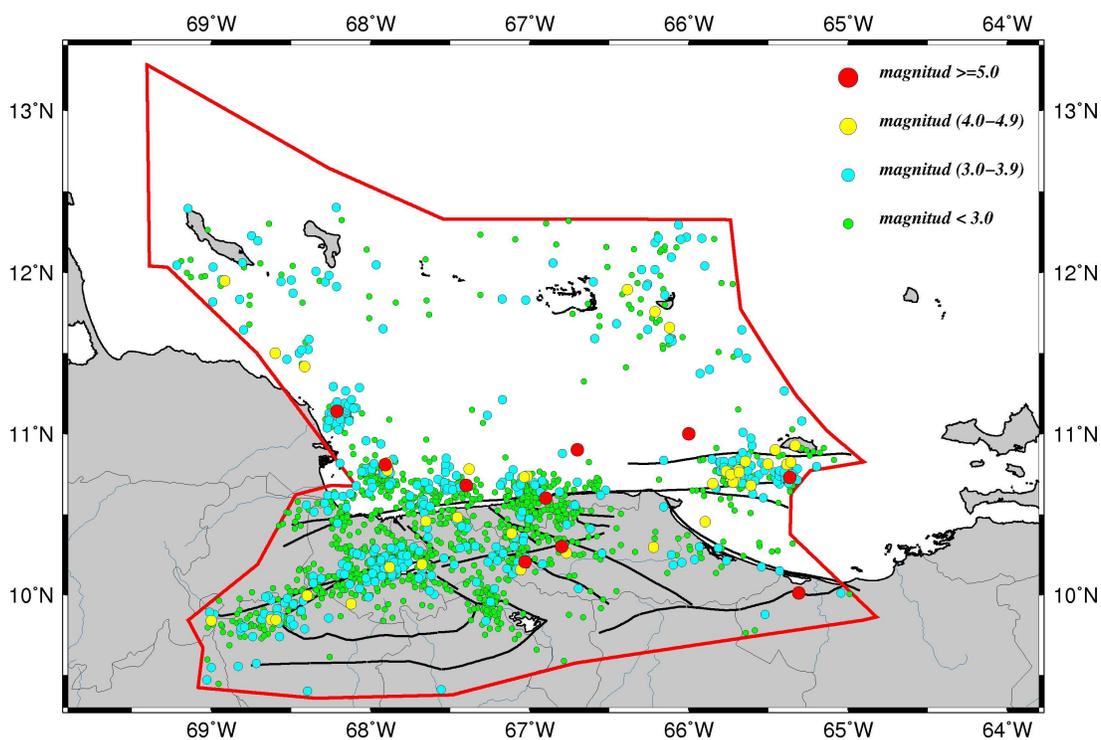


Figura 3.4: Región Central de Venezuela (cortesía de FUNVISIS)

CAPÍTULO 4

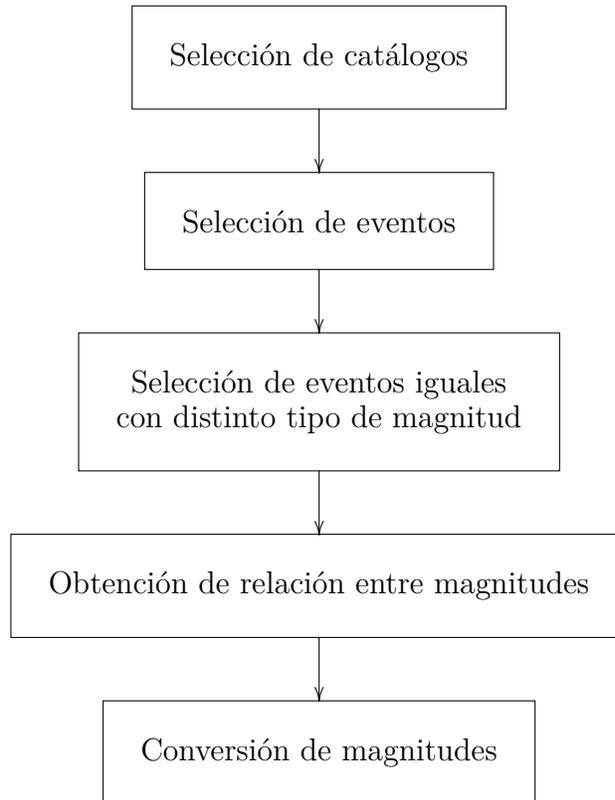
METODOLOGÍA

En este capítulo mostraremos la metodología utilizada para la realización de cada una de las etapas de este trabajo como lo son: la selección de eventos, obtención de relaciones de conversión entre magnitudes, obtención de un catálogo final unificado, el filtrado de los datos y por último el cálculo de los valores a y b de la Ley de Recurrencia de Gutenberg-Richter

4.1. Unificación del Catálogo Sismológico

El objetivo principal de este trabajo es determinar los valores a y b de la Ley de G-R, para esto, es necesario contar con un catálogo sismológico con una gran cantidad de eventos, los cuales sean extensos y descritos en un mismo tipo de magnitud. El siguiente esquema muestra los pasos a seguir para obtener un catálogo sismológico con dichas

Unificación de magnitudes

**4.1.1. Selección Catálogos y Eventos**

Para seleccionar los eventos incorporados en el catálogo construido fue necesario hacer una revisión documental de los principales catálogos internacionales que incluían eventos sísmicos ocurridos en Venezuela. En primer lugar se hizo una división entre los periodos de tiempo en los cuales no se hicieron mediciones instrumentales de los sismos (1530-1899) y en los que si fueron detectados por alguna red sismológica, ya sea mundial o local (1900-2010). Al obtener los eventos detectados para Venezuela, fue necesario revisar la mayor cantidad de catálogos disponibles para evitar repetir u omitir eventos, ya que, este tipo de errores pueden alterar considerablemente los cálculos que posteriormente se realizaran. En nuestro caso, se usaron dos catalogos internacionales (ISC y HVRD),

Tabla 4.1: Catálogos y magnitudes usadas para sismos en Venezuela desde 1530 hasta 2010

Período de tiempo	Catálogo	Tipo de magnitud
1530-1899	Fuentes históricas	varias
1900-1959	ISC	M_s
1960-1981	ISC	m_b
1982-1999	FUNVISIS I-HVRD	m_b y M_w
2000-2010	FUNVISIS II	m_c y M_w

2 nacionales(ambos de FUNVISIS) y varias fuentes pre-instrumentales, como se puede ver en la tabla ??.

4.1.2. Selección de eventos iguales con distinto tipo de magnitud

Luego de seleccionar los catálogos a usar, se hizo una revisión/comparación entre cada uno de ellos, buscando la mayor cantidad de sismos en común. El fin de esta búsqueda fue obtener una población de sismos iguales pero con diferentes tipos de magnitud, ya que esta condición es necesaria para obtener las relaciones empíricas que estamos buscando. Estas búsquedas de eventos similares se dividieron temporalmente basados en las magnitudes presentes en cada uno, en la tabla 4.1 se ve la división realizada.

4.1.3. Obtención de relación entre magnitudes

Haciendo un ajuste por mínimos cuadrados en excel se determina la relación lineal entre la magnitud M_w y los otros tipos de magnitud (m_b , M_s , m_c , M_L ,

entre otros) a fin de obtener las ecuaciones empíricas necesarias para la homogeneización del catálogo. El valor de R^2 determina el grado de linealidad entre las diferentes magnitudes.

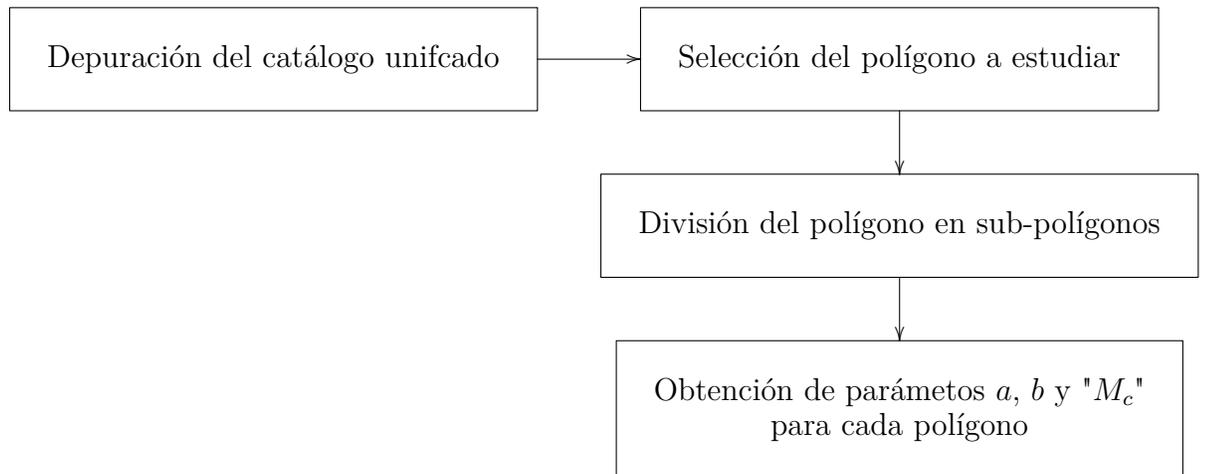
4.1.4. Conversión de Magnitudes

Luego de definidas las relaciones de conversión entre magnitudes, se procede a aplicar las mismas a los eventos sismológicos que queremos convertir y llevarlos a la magnitud de interés, que para este trabajo fue la magnitud M_w , debido a que es la magnitud que presenta un umbral mas alto de saturación con sismos grandes y es la mas habitual para el estudio de la amenaza sísmica. Posteriormente los eventos convertidos se colocan en un archivo de texto, en el cual se construye el catálogo final unificado.

4.2. Procesamiento de los datos

Luego de obtenido el catálogo final unificado, es necesario procesar los datos para obtener los parámetros " a " " b " de la Ley de Recurrencia de Gutenberg-Richter. El procesamiento de los datos se hizo a través del programa de análisis sismológico ZMAP, por lo que en esta sección describiremos algunas funcionalidades de esta plataforma basados en su manual [Wys et al., 2001]. Los pasos llevados a cabo para el procesamiento de los datos fueron los siguientes:

Procesamiento de los datos



4.3. Depuración del Catálogo Sismológico

Como se menciona en el capítulo 2, en un catálogo sismológico no todos los eventos son de interés. Fenómenos como eventos no tectónicos (por ejemplo explosiones), eventos premonitores y réplicas no son necesarios al momento de hacer el cálculo de los valores de la Ley de G-R. El proceso de depuración o filtrado de estos eventos no deseados es llamado también "declustering". Para realizar este procedimiento, se usa el programa ZMAP, que usa el algoritmo de Reasenberg [Reasenberg, 1985], el cual se encarga de filtrar los eventos como réplicas y premonitores.

4.3.1. Selección de polígono a estudiar

Luego de la realización de la depuración de datos, definimos una región de interés se basados en parámetros como densidad de población y las fallas presentes en el área. Las zonas escogidas son delimitadas por polígonos de coordenadas geográficas en los cuales deben estar contenidos los eventos sismológicos y fallas existentes.

Las coordenadas del polígono se introducen en un archivo de texto para luego ser

cargadas directamente en el programa ZMAP. A través del programa se busca el archivo que contiene el polígono, se selecciona y posteriormente aparece una nueva ventana que muestra el número de sismos ocurridos en la zona delimitada de manera acumulativa a lo largo del tiempo. Para la utilización de esta zona, se construye un nuevo catálogo con la opción “keep as new catalog”.

4.4. División del polígono en sub-polígonos

Un polígono, puede ser dividido en partes menores, ya que de esta manera se pueden hacer cálculos de recurrencia mas específicos para la zona. En nuestro caso, el polígono principal fue dividido en 4 sub-polígonos, basados en las 4 principales fallas de la región central, ya que de esta forma se puede determinar y comparar el grado de actividad geológica entre ellas. La subdivisión del polígono principal se hizo siguiendo el mismo procedimiento usado en el paso 2.

4.4.1. Calculo de los parámetros a , b y M_c de la Ley de Recurrencia de Gutenberg-Richter

El programa Zmap posee una serie de funciones que pueden ser usadas cuando se va a calcular la magnitud de completitud M_c así como los parámetros a y b . Para realizar el cálculo de estos parámetros, se va hasta la ventana Ztools del programa y se selecciona realizar el calculo de a y b de manera automática como se ve en la figura ???. Esta opción usa el algoritmo de máxima verosimilitud descrito en el capitulo 2. Este proceso debe ser realizado tantas veces sea necesario, es decir, para cada uno de los polígonos seleccionados de la región central.

Por último, el programa desplegará una gráfica que contendrá todos los parámetros anteriormente mencionados junto con una curva que representa gráficamente la Ley de Recurrencia de Gutenberg-Richter 4.1.

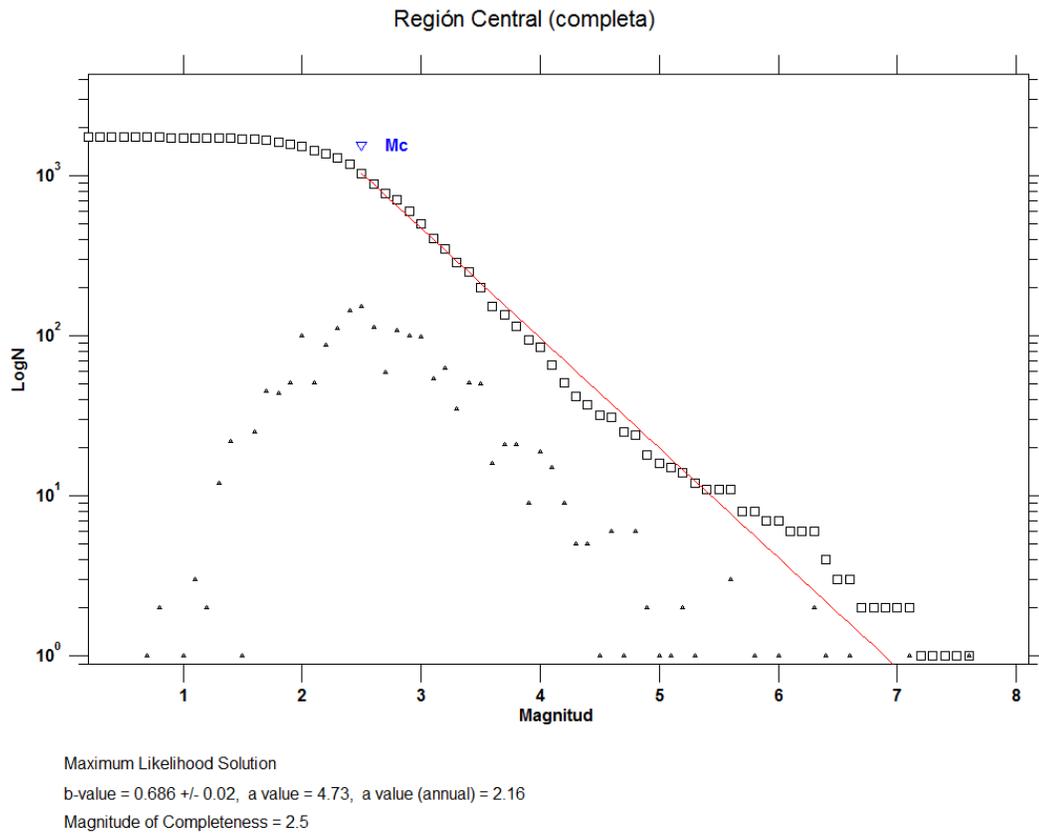


Figura 4.1: Ley de recurrencia de Gutenberg-Richter para la región central de Venezuela con sus respectivos parámetros

4.4.2. Obtención de los tiempos de recurrencia

Luego de obtenidos las ley de recurrencia de la Región Central, es importante obtener los tiempos de recurrencia correspondiente al área. Esta recurrencia temporal, se obtiene sustituyendo en la ecuación de Gutenberg-Richer el valor de "m" por cualquier valor de magnitud que se quiera estudiar, luego de despejar se obtiene un valor de "N", el cual esta dado en número total de sismos por todo el período de tiempo.

$$N = \frac{\text{número total de sismos}}{\text{período de tiempo}} \tag{4.1}$$

de esta forma, con valor de n el número total de sismos es posible obtener los períodos de recurrencia de la zona.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos a partir de la metodología descrita en el capítulo anterior. En primer lugar se reportaran los resultados respecto a los catálogos usados y unificados, luego se muestran los parámetros de la Ley de Recurrencia de Gutenberg-Richter obtenidos para la Zona Central de Venezuela y por último los períodos de recurrencia para sismos de diferentes magnitudes.

5.1. Unificación del catálogo sismológico

La obtención de un catálogo unificado es el paso fundamental para realizar cualquier tipo de estudio de recurrencia sismológica. En este trabajo, se hizo una revisión exhaustiva de varios catálogos, específicamente los correspondientes a ISC (International Seismological Center), Global CMT (HVRD) y FUNVISIS. Los sismos pre-instrumentales fueron verificados a través del catálogo sismológico de la Universidad de los Andes (ULA). A partir de estos catálogos se obtuvieron las relaciones de conversión necesarias (ver tabla ??) para la obtención de un catálogo final unificado en la magnitud de M_w (Ver apéndice C) .

5.1.1. Relaciones de Conversión obtenidas

Las relaciones de conversión para cada período de tiempo estudiado, son los siguientes:

Entre los años 1530 y 1900 el catálogo fue pre-instrumental, por lo que sus magnitudes fueron calculadas por métodos estadísticos basados en la intensidad y la escala de daño registrado. Varios autores han desarrollado métodos para obtener estas magnitudes [Beauval et al., 2013, Funvisis, 2002]. Para los períodos 1900-1959 y 1959-1981 se usó el catálogo del ISC (International Seismological Center) basado en la magnitud M_s y m_b respectivamente, por lo que fue necesario buscar relaciones empíricas basadas en registros mundiales de sismicidad [Ranjit et al., 2012], ya que para estos períodos, la red sismológica nacional era prácticamente inexistente.

Para el periodo 1982-1999 FUNVISIS activa una nueva red sismológica nacional, por lo que muchos sismos fueron registrados. Usando los datos de la nueva red y comparándolos con el catálogo de la universidad de Harvard(HVRD) [?] se obtuvo una relación empírica de conversión entre las magnitudes m_b (FUNVISIS) y M_w (Harvard)

Por último, durante el período 2000-2010 FUNVISIS inaugura una nueva red sismológica. Los sismos en el catálogo están en dos magnitudes distintas: m_c y M_w , por lo que se pudo obtener una relación entre ambas magnitudes usando solo datos de la red de FUNVISIS.

5.1.2. Catálogo Unificado

Luego de obtenidas las relaciones de conversión para cada período de tiempo, se procedió a aplicar las ecuaciones obtenidas a las magnitudes en los períodos de tiempo correspondientes. El total de sismos del catálogo fue de 24690. En la

Tabla 5.1: Relaciones de conversión entre magnitudes para sismos en Venezuela desde 1530 hasta 2010

Período de tiempo	Relación de conversión	R^2	Catálogo
1530-1899	Fuentes históricas	–	–
1900-1959	$M_w = 0,6700M_s + 2,3300$	0,8100	ISC
1960-1981	$M_w = 0,6060m_b - 2,5384$	0,5400	ISC
1982-1999	$M_w = 0,4096m_b + 3,367$	0,5034	FUNVISIS I-HVRD
2000-2010	$M_w = 0,6595m_c + 1,4915$	0,8446	FUNVISIS II

figura 5.1 se puede observar un histograma del número de sismos por el valor de la magnitud, la barra de sismos con magnitud 0 corresponde a sismos no medidos pero si reportados. En el apéndice **C** se muestra parte del catálogo obtenido. Es importante señalar que este catálogo corresponde a los sismos ocurridos en Venezuela desde 1530 hasta 2010.

5.1.3. Catálogo Zona Central y Declustering

Del catálogo obtenido, correspondiente a toda Venezuela, se seleccionó una zona en particular para el resto del trabajo. Esta zona, correspondiente a la región Central de Venezuela, está dada por una serie de coordenadas geográficas que se pueden ver en el apéndice **D**, este conjunto de coordenadas se denomina **polígono**. EL polígono que caracteriza a la región central cuenta con aproximadamente 2172 eventos, los cuales, luego del proceso de eliminación de replicas y sismos premonitores (declustering) se redujo en un 21 %, lo que resultó en 1722 eventos sismológicos en total.

5.2. Cálculos de los parámetros “a” y “b” de la Ley de Recurrencia de Gutenberg-Richter para la región central del país

El polígono de coordenadas que corresponde a la región central fue analizado para poder obtener los parámetros de la Ley de Recurrencia de Gutenberg-Richter correspondientes. La curva obtenida se puede ver en la figura ??, de donde además se determinan los parámetros de interés.

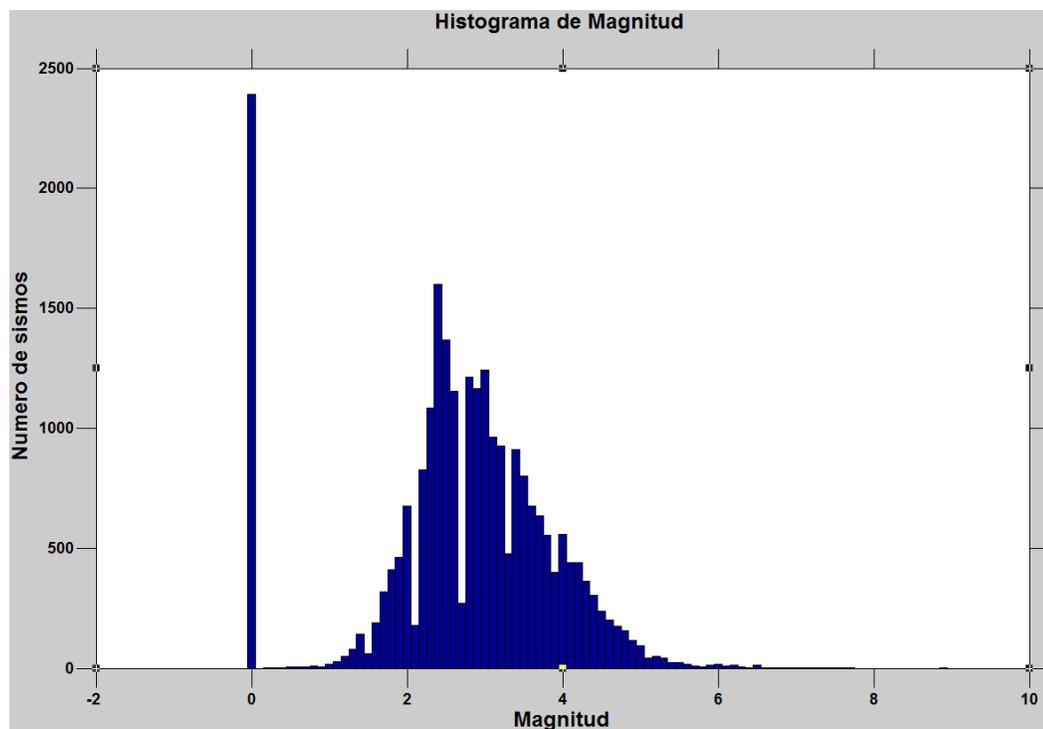


Figura 5.1: Histograma del número de sismos por magnitud

Los parámetros obtenidos fueron los siguientes:

- $a = (4,75 \pm 0,01)$
- $a(\text{annual}) = (2,18 \pm 0,01)$
- $b = (0,694 \pm 0,002)$
- $M_c = (2,5 \pm 0,1)$

Con los parámetros calculados por el software, se construye la ecuación de recurrencia de Gutenberg-Richter para la región central de Venezuela:

$$\log_{10} N = (4,75 \pm 0,01) - (0,694 \pm 0,02)M_w \quad (5.1)$$

Para un análisis mas detallado de la región central, dividimos esta región en cuatro sub-polígonos caracterizados cada uno de ellos por encontrarse sobre un sistema de fallas particular dentro de la región central, como se puede ver en la figura ???. Para cada uno de estos polígonos, se obtuvieron los parámetros de la ley de recurrencia de Gutenberg-Richter. En las figuras 5.3 y ??? se puede observar las curvas de cada zona. Para designar a cada curva se usaron las siglas **ZC** correspondientes a la **Zona Central** y los números **01**, **02**, **03** y **04** para designar el polígono correspondiente.

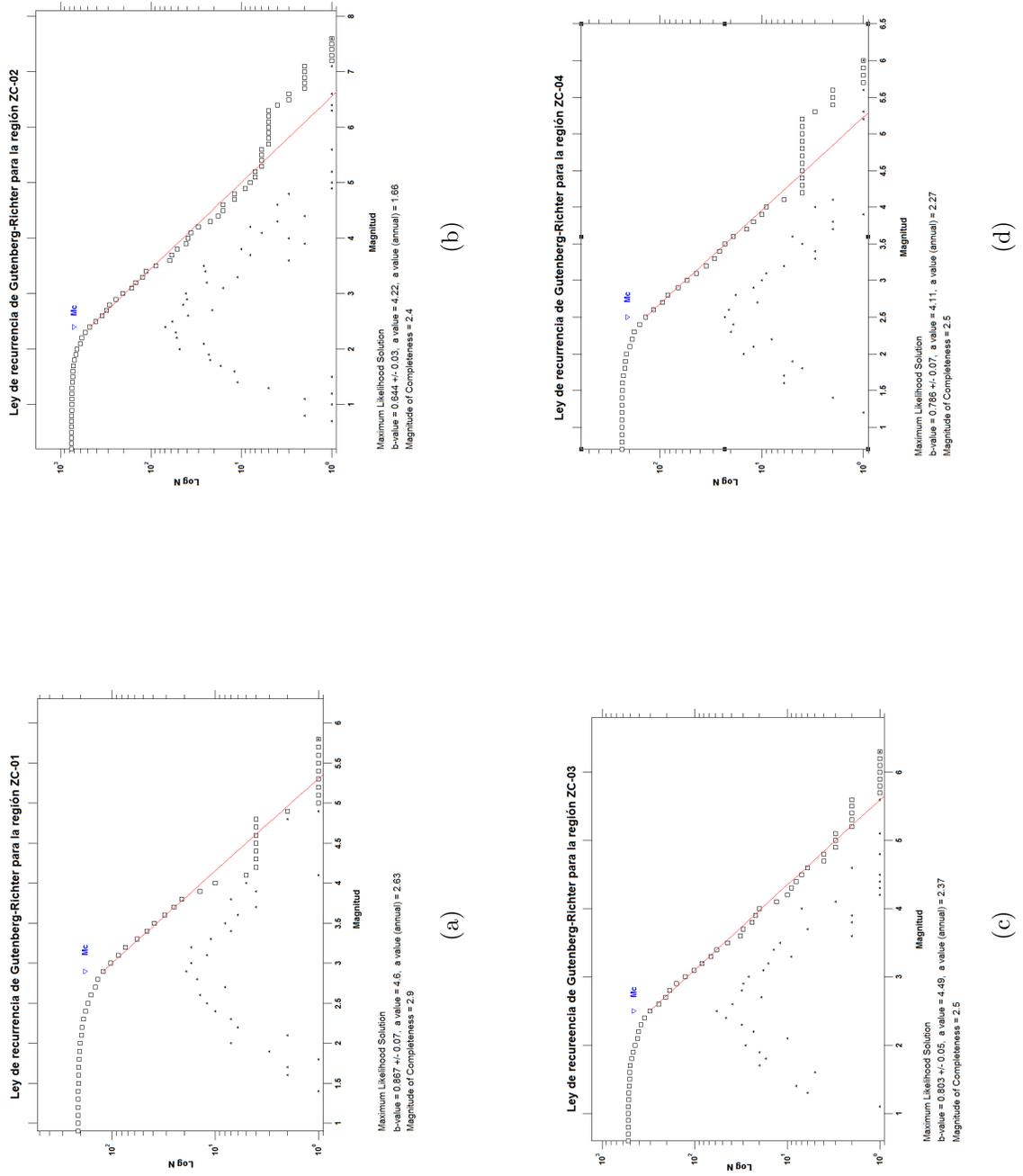


Figura 5.3: Constantes a y b para los sub-polígonos ZC-01 (a), ZC-02(b) ZC-03 (c) y ZC-04 (d)

Tabla 5.2: Relaciones de recurrencia para la región Central de Venezuela por el método de máxima verosimilitud

Zona	Recurrencia	a(anual)	M_c
ZC	$\log_{10} N = (4,75 \pm 0,01) - (0,694 \pm 0,02)M_w$	$2,18 \pm 0,01$	$2,5 \pm 0,01$
ZC-01	$\log_{10} N = (4,66 \pm 0,01) - (0,867 \pm 0,06)M_w$	$2,63 \pm 0,01$	$2,9 \pm 0,1$
ZC-02	$\log_{10} N = (4,39 \pm 0,01) - (0,677 \pm 0,03)M_w$	$1,82 \pm 0,01$	$2,4 \pm 0,1$
ZC-03	$\log_{10} N = (4,50 \pm 0,1) - (0,806 \pm 0,05)M_w$	$2,38 \pm 0,01$	$2,5 \pm 0,1$
ZC-04	$\log_{10} N = (3,94 \pm 0,1) - (0,732 \pm 0,06)M_w$	$2,10 \pm 0,01$	$2,5 \pm 0,1$

Los parámetros de la Ley de recurrencia de Gutenberg-Richter obtenidos para cada zona se presentan en la tabla 5.2.

5.2.1. Región ZC-01

Esta región esta ubicada en la parte marina de la región central, incluye las islas ABC (Aruba, Bonaire y Curazao) así como parte del territorio insular de Venezuela. Presentó 212 eventos sismológicos, siendo la mayor magnitud registrada de $5.8 M_w$.

5.2.2. Región ZC-02

Esta región es la que presenta el menor valor de "b", debido a un sismo de magnitud $7.6 M_w$ ocurrido en el año de 1900. Este sub-poligono posee 761 sismos siendo el de mayor magnitud el de $7.6 M_w$ antes mencionado. Una particularidad es que esta zona fue la que genero el terremoto de Caracas de 1967 de magnitud $6.6 M_w$

Tabla 5.3: Períodos de retorno para la región Central de Venezuela por el método de máxima verosimilitud

	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
ZC	1 mes	4 meses	2 años	8 años	41 años	90 años
ZC-01	6 días	1 mes	1 año	6,1 años	45 años	122 años
ZC-02	1 mes	4 meses	2 años	8 años	40 años	87 años
ZC-03	15 días	3 meses	2 años	11 años	70 años	175 años
ZC-04	1 mes	4 meses	2 años	10 años	54 años	124 años

5.2.3. Región ZC-03

Esta zona presento el mayor valor de " b ", por lo que puede ser considerada la zona con menor probabilidad de ocurrencia de sismos de gran magnitud. Presento un total de 522 sismos, siendo la mayor magnitud registrada 6.3 M_w

5.2.4. Región ZC-04

Esta zona presento un total de 239 sismos, siendo la mayor magnitud registrada 6.0 M_w , por el valor de su valor " b " se le puede considerar la tercera zona geológicamente mas activa de la región central de Venezuela.

5.3. Períodos de retorno para la región central del país

Con las leyes de recurrencia calculados anteriormente en la región, se puede determinar el periodo de retorno de un sismo de acuerdo a su magnitud, en la tabla 5.3 se pueden observar los valores obtenidos.

- Se pudo observar en el total de la región central que de acuerdo a la ley de recurrencia de Gutenberg-Richter, los sismos entre las magnitudes intermedias y bajas (entre 3.0 y 5.0) son las que tienen un mayor predominio, ya que su ocurrencia puede variar entre un mes y dos años, mientras que para sismos mayores a 6.0 los períodos de recurrencia aumentan dramáticamente (varios años).

- Un ejemplo de estas recurrencias se puede observar en dos eventos sismológicos de magnitud 4.0 ocurridos en la región central en el año de 1995, específicamente con fechas 14-02-1995 y un segundo evento ocurrido el 21-06-1995, lo cual da una recurrencia de aproximadamente 4 meses. Para la magnitud 3.0 se presenta por ejemplo dos eventos en el mes de julio de 1995, específicamente el 01-07-1995 y otro el 11-07-1995

- La zona ZC-01, presenta poca correlación con la zona ZC, probablemente debido a su gran área y pocos eventos sísmicos asociados a esta zona. Presenta valores de recurrencia similares a los obtenidos por [Ramos and Mendoza, 1993] para todo el país . Esta zona posee grandes períodos de retorno para sismos de gran magnitud, debido a que es muy poco probable que este presentes en la zona.

- Se puede observar como en la región ZC-02 hay una alta correlación respecto a toda la región central, esto es debido a que tiene los sismos de mayor magnitud, y por lo tanto es dominante al momento de realizar los cálculos en general. Esta zona puede considerarse la mas amenazada desde el punto de vista sismológico, ya que su distribución de magnitudes es mas amplia.

- Las regiones ZC-03 y ZC-04, presentan grandes períodos de retorno para

sismos de gran magnitud, ya que de igual forma que ZC-01, es muy poco probable que estos sismos estén presentes. Sin embargo, la obtención de alguna evidencia de grandes sismos en la zona, así como su cuantificación, pueden cambiar dramáticamente estos períodos de retorno.

- Una mejora en la completitud del catálogo (una mayor cantidad de eventos en períodos pre-instrumentales y de la primera mitad del siglo XX) podría mejorar estos tiempos.

5.3.1. Cálculo de los valores a , b y relaciones de recurrencia a través de un ajuste por mínimos cuadrados

Tomando los datos de M_c del programa Zmap, el catálogo de la Región Central y sus respectivo sub-catálogos se procedió a realizar los cálculos de los valores a y b de la ley de Recurrencia de Gutenberg-Richter, pero usando un ajuste lineal por mínimos cuadrados. En las tablas B.1 y 5.5 se muestran las leyes de recurrencia y los tiempos de retorno respectivamente

Tabla 5.4: Relaciones de recurrencia para la región Central de Venezuela por ajuste de mínimos cuadrados

Zona	Recurrencia	M_c
ZC	$\log_{10} N = (4, 27 \pm 0, 01) - (0, 585 \pm 0, 02)M_w$	$2, 5 \pm 0, 01$
ZC-01	$\log_{10} N = (4, 30 \pm 0, 01) - (0, 809 \pm 0, 06)M_w$	$2, 9 \pm 0, 1$
ZC-02	$\log_{10} N = (3, 604 \pm 0, 01) - (0, 495 \pm 0, 03)M_w$	$2, 4 \pm 0, 1$
ZC-03	$\log_{10} N = (4, 06 \pm 0, 1) - (0, 700 \pm 0, 05)M_w$	$2, 5 \pm 0, 1$
ZC-04	$\log_{10} N = (3, 34 \pm 0, 1) - (0, 577 \pm 0, 06)M_w$	$2, 5 \pm 0, 1$

Tabla 5.5: Períodos de retorno para la región Central de Venezuela por ajuste de mínimos cuadrados

	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
ZC	2 meses	8 meses	3 años	10 años	40 años	77 años
ZC-01	5 días	1 mes	6 meses	4 años	21 años	55 años
ZC-02	5 meses	1 año	4 años	11 años	35 años	63 años
ZC-03	1 mes	6 meses	3 años	13 años	64 años	143 años
ZC-04	2 meses	9 meses	3 años	11 años	43 años	84 años

Al igual que en el cálculo por máxima verosimilitud, se mantuvo la misma tendencia. Las zona ZC-02 y ZC-04 fueron las que presentaron un menor valor de b y por lo tanto son las que presentan una mayor posibilidad de ocurrencia de sismos de mayor magnitud en toda la región central. De igual forma, ZC-03 y ZC-04 presentan un mayor valor de b por lo que habrá un mayor predominio de magnitudes medias y bajas.

En la zona central completa, los períodos de retorno presentaron un gran parecido con los obtenidos en el cálculo por máxima verosimilitud, siendo en algunos casos ligeramente mayor. Para los sub-poligonos se presentaron tiempos de retorno bastante altos, sin embargo se mantuvo la tendencia que en el cálculo por máxima verosimilitud ya que para zonas con predominio de sismos de baja y media magnitud los períodos de retorno de sismos de gran magnitud fueron bastante altos, lo cual puede interpretarse como una baja probabilidad de ocurrencia de los mismos.

5.3.2. Cálculo de los valores a , b y relaciones de recurrencia a través del Método Stepp

tabla maxima

Tabla 5.6: Relaciones de recurrencia para la región Central de Venezuela por ajuste de mínimos cuadrados

Zona	Recurrencia	M_c
ZC	$\log_{10} N = (4,304 \pm 0,01) - (0,977 \pm 0,02)M_w$	$2,5 \pm 0,01$
ZC-01	$\log_{10} N = (3,154 \pm 0,01) - (0,855 \pm 0,06)M_w$	$2,9 \pm 0,1$
ZC-02	$\log_{10} N = (3,951 \pm 0,01) - (0,996 \pm 0,03)M_w$	$2,4 \pm 0,1$
ZC-03	$\log_{10} N = (4,526 \pm 0,1) - (1,220 \pm 0,05)M_w$	$2,5 \pm 0,1$
ZC-04	$\log_{10} N = (3,283 \pm 0,1) - (0,948 \pm 0,06)M_w$	$2,5 \pm 0,1$

tabla minimos:

Tabla 5.7: Relaciones de recurrencia para la región Central de Venezuela por ajuste de mínimos cuadrados

Zona	Recurrencia	M_c
ZC	$\log_{10} N = (4,01 \pm 0,01) - (0,91 \pm 0,02)M_w$	$2,5 \pm 0,01$
ZC-01	$\log_{10} N = (3,1541 \pm 0,01) - (0,855 \pm 0,06)M_w$	$2,9 \pm 0,1$
ZC-02	$\log_{10} N = (3,604 \pm 0,01) - (0,495 \pm 0,03)M_w$	$2,4 \pm 0,1$
ZC-03	$\log_{10} N = (4,06 \pm 0,1) - (0,700 \pm 0,05)M_w$	$2,5 \pm 0,1$
ZC-04	$\log_{10} N = (3,34 \pm 0,1) - (0,577 \pm 0,06)M_w$	$2,5 \pm 0,1$

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

- Se construyó un catálogo unificado en magnitud (M_w) en el período 1530-2010 en Venezuela. Este catálogo podrá ser usado tanto para cálculos de recurrencia sísmológica así como de amenaza sísmica en Venezuela.
- Los cálculos de recurrencia proporcionan información sobre la frecuencia de un sismo de cierta magnitud. Este tipo de información es necesaria para la elaboración de normas antisísmicas en edificaciones.
- La zona estudiada, presenta una sismicidad con magnitudes mayoritariamente media y baja. Eventos de gran magnitud, es decir, mayores a 6.0, están poco presentes en los catálogos.
- A pesar de existir algunas diferencias entre los valores de a , b y períodos de retorno calculados con método de máxima verosimilitud y con el ajuste por mínimos cuadrados, ambas técnicas presentaron tendencias similares.
- Para la región Central del Venezuela, los sismos con magnitudes entre 3.0 y 4.0 son de ocurrencia multianual, variando su frecuencia en días y meses, esto pudo comprobarse a través de ambos métodos. Los sismos mayores a 5.0 tienen un período de de varios años.
- La zona ZC-02 puede considerarse la zona con mas probabilidad de sismos

de gran magnitud de toda la región central debido a que tiene el menor valor de " b " de las zonas estudiadas, es decir, presencia de sismos de mayor magnitud, la ocurrencia del sismo de Caracas de 1967 y el sismo de 1900 lo demuestra.

- Las zonas ZC-01, ZC-03 y ZC-04 analizadas con el método de máxima verosimilitud presentan grandes períodos de retorno para sismos grandes, por lo que es poco probable que ocurran en dichas zonas.
- Las zonas ZC-01, ZC-03 y ZC-04 analizadas con ajuste por mínimos cuadrados presentan períodos de retorno menores para sismos grandes, respecto al método de máxima verosimilitud.
- Una mayor cantidad de sismos en el catálogo podría aumentar la precisión de los tiempos de recurrencia, ya que el número total de sismos es parte de las variables en la ley de Recurrencia de Gutenberg-Richter.
- Los valores de recurrencia, a , b y M_c podrían variar en caso de que algún evento o paleo-evento de gran magnitud sea incorporado.

BIBLIOGRAFÍA

- [Aki, 1965] Aki, K. (1965). Maximum Likelihood Estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 43:237–239.
- [Audemard, 1996] Audemard, F. (1996). Paleoseismicity studies on the Oca-Ancon fault system, northwestern Venezuela. *Tectophysics*, 259:67–80.
- [Audemard, 2000] Audemard, F. (2000). Major Active Faults of Venezuela. *31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brasil (extended abstract)*.
- [Audemard, 2002] Audemard, F. (2002). Ruptura de los grandes sismos históricos venezolanos de los siglos XIX y XX, revelados por la sismicidad instrumental contemporánea. *XI Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, Venezuela*, page 8.
- [Audemard and Romero, 1993] Audemard, F. and Romero, G. (1993). The Chugurara area Seismic evidence of the Oca-Ancón system. *Caribbean Conference on Natural Hazards: Volcanoes, Earthquakes, Windstorms, Floods. St. Augustine, Trinidad*, pages 21–32.
- [Beauval et al., 2013] Beauval, C., Yopez, H., Palacios, P., Segovia, M., Alvarado, A., Font, Y., Agilar, J., Troncoso, L., and Vaca, S. (2013). An Earthquake

- Catalog for Seismic Hazard Assessment in Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103:773–786.
- [Beltran et al., 1996] Beltran, C., Singer, A., and Rodriguez, J. (1996). The pillar fault active trace (Northeastern Venezuela): Neotectonic Evidence and Paleoseismic Data. *Third ISAG, St Malo (France)*, pages 153–155.
- [Bender, 1983] Bender, B. (1983). Maximum Likelihood Estimation of b values for magnitude grouped data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73:831–851.
- [Cluff and Hansen, 1969] Cluff, L. and Hansen, W. (1969). Seismicity and seismic geology of northwestern Venezuela. *MARAVEN S.A.*
- [Covenin, 2001] Covenin (2001). Norma COVENIN 1756-98: Edificaciones Sismorresistentes. page 123.
- [Funvisis, 2002] Funvisis (2002). La investigación sísmológica en Venezuela .
- [Grases, 1990] Grases, J. (1990). Terremotos destructores del Caribe 1502-1990. *UNESCO-RELACIS*, page 132.
- [Gulia et al., 2012] Gulia, L., Wiemer, S., and Wyss, M. (2012). Catalog artifacts and quality controls. *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*.
- [Gutenberg and Richter, 1944] Gutenberg, B. and Richter, C. F. (1944). Frequency of Earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34:185–188.
- [Havskov and Ottemoller, 2010] Havskov, J. and Ottemoller, L. (2010). Routine Data Processing in Earthquake Seismology. *Springer*.
- [Kafka, 1990] Kafka, A. (1990). Rg as a depth discriminant for earthquakes and explosions: a case study in New England. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(2):373–394.

- [Kanamori, 1983] Kanamori, H. (1983). Magnitude scale and quantification of earthquakes. *Tectonophysics*, 93:185-199.
- [Koch and Fah, 2002] Koch, K. and Fah, D. (2002). Identification of earthquakes and explosions using amplitude ratios: The Vogtland area revisited. *Pure and Applied Geophysics*, 159:735–757.
- [Lay and Wallace, 1995] Lay, T. and Wallace, T. C. (1995). Modern Global Seismology. *Academic Press*.
- [Mignan and Woessner, 2012] Mignan, A. and Woessner, J. (2012). Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs, Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis. *doi:10.5078/corssa-00180805*. Available at <http://www.corssa.org>.
- [Paolini et al., 2012] Paolini, M., Rodriguez, L., and Olbrich, F. (2012). Actualización de las fallas activas de Venezuela como aporte a la evaluación de la amenaza sísmica. *Informe técnico Funvisis*.
- [Quijada, 1993] Quijada, P. (1993). Analisis de amenaza sísmica de Venezuela para el nuevo mapa de zonificación con fines de ingeniería. *VIII Seminario Latino-americano de Ingeniería Sísmorresistente*.
- [Ramos and Mendoza, 1993] Ramos, C. and Mendoza, J. (1993). Return Periods for Venezuelan Earthquakes Based on the Analysis of instrumental Seismicity 1910-1990. *Seismological Research Letters*, 64(1):55–70.
- [Ranjit et al., 2012] Ranjit, D., Wason, H., and Sharma, M. (2012). Homogenization of Earthquake Catalog for Northeast India and Adjoining Region. *Pure and Applied Geophysics*, 169:725–731.
- [Reasenber, 1985] Reasenber, P. (1985). Second-Order Moment of Central California Seismicity, 1969-1982. *Journal of Geophysical Research*, 90:5479–5495.
- [Schmitz et al., 2005] Schmitz, M., Alvarado, L., and Luth, S. (2005). The velocity structure of the Cariaco sedimentary basin, northeastern Venezuela,

from refraction seismic data and possible relationship to earthquake hazard. *Journal of South American Earth Sciences*, xx:1–17.

[Singer and Audemard, 1997] Singer, A. and Audemard, F. (1997). Aportes de Funvisis al desarrollo de la geología de fallas activas y de la paleosismología para los estudios de amenaza y riesgo sísmico. *Publicación Especial Academia de las Ciencias Naturales, Matemáticas y Físicas*, 33:25–38.

[Stepp, 1972] Stepp, J. (1972). Analisis of completeness of earthquake sample in the Puget Sound area and its effects on statistical estimates of earthquake hazard . *Proc. Microzonification Conf. Seattle WA*, 2:898–909.

[Utsu, 2002] Utsu, T. (2002). Relationships between Magnitude Scales. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Academic Press*, Part A:733–746.

[Wuster, 1993] Wuster, J. (1993). Discrimination of chemical explosions and earthquakes in Central Europea case study. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(4):1184–1212.

[Wys et al., 2001] Wys, M., Wiemer, S., and Zuniga, R. (2001). ZMAP Typycal applications and uses: A Cookbook .

APÉNDICE A

MAGNITUD M_W

A continuación se describe la demostración de la magnitud M_w . Consideraremos como ejemplo un desplazamiento del suelo de una estación sismológica dada por:

$$x = A \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (\text{A.1})$$

donde A es la amplitud de la onda de periodo T . La velocidad del suelo esta dada por:

$$v = A \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (\text{A.2})$$

La energía por unidad de masa en una estacion viene dada por $1/2\rho v^2$. Si promediamos esta energia en un ciclo completo, obtenemos la densidad de energia cinetica:

$$e = \frac{1}{2T} \rho \int_0^T v^2 dt \quad (\text{A.3})$$

$$e = \rho \pi^2 \frac{A^2}{T^2} \quad (\text{A.4})$$

La densidad de energía es proporcional a A^2 que es el resultado esperado. Como la energía potencia media y la energía mecánica media son iguales, podemos escribir: $E = 2e$. si integramos sobre un frente de ondas esférico para corregir la propagación geométrica, obtenemos una ecuación de la siguiente forma:

$$E = F(\gamma, \rho, c) \left(\frac{A}{T} \right)^2 \quad (\text{A.5})$$

donde r es la distancia viajada, ρ es la densidad y c es la velocidad del tipo de onda. esta ecuación puede ser reescrita en forma similar a la ecuación general para escalas de magnitud

$$\log E = \log T F(\gamma, \rho, c) + 2 \log \left(\frac{A}{T} \right) \quad (\text{A.6})$$

Así es posible relacionar la energía con la magnitud si $F(r, \rho, c)$ es conocida. Gutenberg y Richter consiguieron relaciones empíricas para m_b y M_s

$$\log E = 5,8 + 2,4m_b \quad (\text{A.7})$$

$$\log E = 11,8 + 1,5M_s \quad (\text{A.8})$$

Es posible relacionar el momento sísmico con la energía sísmica. Kostrov (1974) mostró que la radiación sísmica es proporcional al “stress drop”

$$E_s \approx \frac{1}{2} \Delta \sigma \bar{D} A \quad (\text{A.9})$$

Arreglando esta ecuación y usando la definición de M_0

$$E_s \approx \frac{\Delta \sigma}{2\mu} M_0 \quad (\text{A.10})$$

Por lo tanto, de la relación empírica de M_s y asumiendo que el stress drop es constante

$$\log M_0 = 1,5M_s + 16,1 \quad (\text{A.11})$$

Esta última ecuación nos da una manera simple de relacionar la magnitud de momento sísmico y definir una nueva magnitud llamada M_W llamada magnitud de momento:

$$M_W = \left(\frac{\log M_0}{1,5} \right) - 10,73 \quad (\text{A.12})$$

APÉNDICE B

RED SISMOLÓGICA NACIONAL

En la figura siguiente se muestra un mapa con las estaciones sismológicas que componen a la Red Sismológica Nacional:

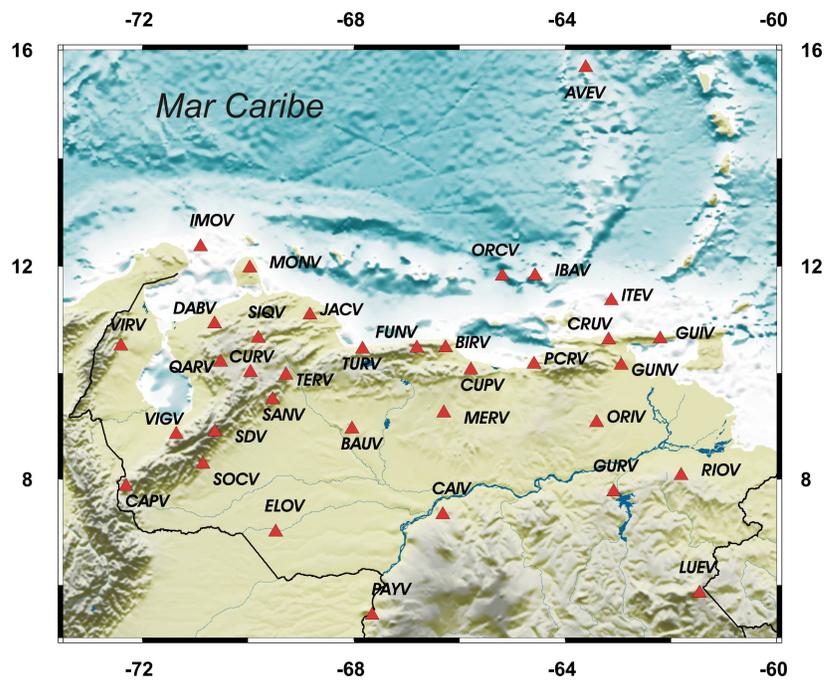


Figura B.1: Red Sismológica Nacional (Cortesía Funvisis)

A continuación se muestra una tabla con las estaciones que componen la red

sismológica nacional:

Tabla B.1: Lista de estaciones sismológicas pertenecientes a la Red Sismológica Nacional

Sigla	Estación	Localidad
BAUV	EL BAÚL	Edo. Cojedes
BIRV	BIRONGO	Edo. Miranda
CAIV	CAICARA	Edo. Bolívar
CAPV	CAPACHO	Edo. Táchira
CRUV	CARÚPANO	Edo. Sucre
CUPV	CÚPIRA	Edo. Miranda
CURV	CURARIGUA	Edo. Lara
DABV	DABAJURO	Edo. Falcón
ELOV	ELORZA	Edo. Apure
FUNV	LLANITO	Dtto. Capital
GUIV	GÜIRIA	Edo. Sucre
GUNV	GUANOCO	Edo. Sucre
GURV	EL GURI	Edo. Bolívar
IADV	ISLA DE AVES	Isla de Aves
IBAV	ISLA LA BLANQUILLA	Isla la Blanquilla
IMOV	ISLA LOS MONJES	Isla los Monjes
ITEV	ISLA LOS TESTIGOS	Isla los Testigos
JACV	JACURA	Edo. Falcón
LUEV	LUEPA	Edo. Bolívar
MERV	LAS MERCEDES	Edo. Guárico
MONV	MONTECANO	Edo. Falcón
ORCV	LA ORCHILA	Isla la Orchila
ORIV	ORITUPANO	Edo. Monagas
PARV	PARIAGUÁN	Edo. Anzoátegui
PAYV	PUERTO AYACUCHO	Edo. Amazonas
PCRV	PUERTO LA CRUZ	Edo. Anzoátegui
QARV	QUEBRADA ARRIBA	Edo. Lara
RIOV	RÍO GRANDE	Edo. Bolívar
SANV	SANARITO	Edo. Portuguesa
SIQV	SIQUISIQUE	Edo. Lara
SOCV	SOCOPO	Edo. Barinas
TEPV	TEREPAIMA	Edo. Lara
TURV	TURIAMO	Edo. Aragua
VIGV	EL VIGIA	Edo. Mérida
VIRV	VILLA DEL ROSARIO	Edo. Zulia

APÉNDICE C

CATÁLOGO

A continuación se presenta el formato de catálogo usado por FUNVISIS:

1	1530	09	01	14	30	0.00	10.700	-64.100	0.0	PREI	7.3
2	1597	00	00	00	00	0.00	7.800	-72.300	0.0	PREI	0
3	1610	02	03	19	30	0.00	8.450	-71.650	0.0	PREI	7.6
4	1629	00	00	00	00	0.00	10.470	-64.170	0.0	PREI	0
5	1641	06	11	12	45	0.00	10.900	-66.700	0.0	PREI	6.3
6	1644	01	16	10	00	0.00	7.400	-72.700	0.0	PREI	7.0
7	1673	12	08	08	30	0.00	9.330	-70.640	0.0	PREI	0
8	1674	01	16	20	00	0.00	8.950	-70.800	0.0	PREI	7.4
9	1684	05	05	00	30	0.00	10.480	-63.600	0.0	PREI	0
10	1691	00	00	00	00	0.00	8.400	-71.600	0.0	PREI	0
11	1703	00	00	00	00	0.00	10.500	-66.920	0.0	PREI	0
12	1709	00	00	00	00	0.00	10.500	-63.600	0.0	PREI	0
13	1724	11	01	00	00	0.00	6.190	-72.480	0.0	PREI	7.7
14	1737	00	00	00	00	0.00	10.050	-69.300	0.0	PREI	0
15	1740	00	00	00	00	0.00	8.700	-70.400	0.0	PREI	0
16	1766	10	21	09	15	0.00	11.000	-62.500	0.0	PREI	7.5
17	1775	12	26	10	15	0.00	9.600	-70.400	0.0	PREI	6.1
18	1782	10	15	00	00	0.00	9.050	-69.750	0.0	PREI	0.0
19	1786	00	00	00	00	0.00	8.500	-71.200	0.0	PREI	6.1
20	1794	10	09	00	00	0.00	10.100	-64.020	0.0	PREI	0
21	1796	02	15	00	00	0.00	7.400	-72.650	0.0	PREI	6.6
22	1797	12	14	23	00	0.00	10.600	-64.100	0.0	PREI	6.3
23	1799	11	04	18	42	0.00	10.470	-64.170	0.0	PREI	0
24	1801	00	00	00	00	0.00	9.200	-70.300	0.0	PREI	0
25	1802	05	20	20	30	0.00	10.480	-68.030	0.0	PREI	0
26	1802	08	14	20	00	0.00	10.270	-64.110	0.0	PREI	0
27	1805	01	28	01	30	0.00	10.600	-64.100	0.0	PREI	0
28	1812	03	26	20	37	0.00	10.600	-66.900	6.0	PREI	7.1
29	1812	03	26	00	00	0.00	10.200	-68.950	0.0	PREI	7.4
30	1812	03	26	21	37	0.00	8.650	-71.050	6.0	PREI	6.1
31	1820	03	10	01	30	0.00	10.500	-63.800	0.0	PREI	0
32	1823	08	00	00	00	0.00	10.500	-63.800	0.0	PREI	0
33	1825	09	21	00	00	0.00	10.800	-61.700	0.0	PREI	0
34	1827	06	24	22	30	0.00	8.150	-71.960	0.0	PREI	0
35	1831	12	03	23	40	0.00	12.400	-61.450	0.0	PREI	0
36	1834	08	12	16	00	0.00	8.800	-70.900	0.0	PREI	6.2
37	1837	09	10	18	30	0.00	10.300	-66.600	0.0	PREI	0
38	1839	04	13	02	41	0.00	10.470	-64.170	0.0	PREI	0
39	1845	02	19	12	00	0.00	7.800	-72.200	0.0	PREI	0
40	1849	02	26	10	00	0.00	8.050	-72.250	0.0	PREI	6.3
41	1849	05	03	09	30	0.00	10.700	-71.600	0.0	PREI	5.5
42	1853	07	15	18	30	0.00	10.500	-64.580	14.0	PREI	7.3
43	1865	12	15	21	20	0.00	10.500	-66.900	0.0	PREI	0
44	1867	04	20	00	30	0.00	8.370	-71.840	0.0	PREI	0
45	1869	02	17	16	30	0.00	7.920	-72.240	0.0	PREI	6.2
46	1869	03	06	11	00	0.00	7.700	-73.300	0.0	PREI	6.0
47	1870	06	09	00	03	0.00	12.040	-61.450	0.0	PREI	0
48	1870	06	26	15	30	0.00	9.500	-69.700	0.0	PREI	6.1
49	1874	02	06	14	05	0.00	10.640	-66.920	0.0	PREI	0
50	1874	08	17	03	00	0.00	10.500	-63.100	16.0	PREI	6.0
51	1875	05	18	16	00	0.00	7.950	-72.600	20.0	PREI	7.4

Figura C.1: Formato de catálogo sísmológico