



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN COMPUTACIÓN



## **Zonificación sísmica de la zona metropolitana, usando técnicas de análisis no lineal.**

---

Tesis que presenta el  
**Ing. Gustavo Alberto Torres Beltrán**

Para obtener el grado de  
**Maestro en Ciencias de la Computación**

---

Director de Tesis:

**Dr. Jesús Guillermo Figueroa Nazuno**

# Agradecimientos

*A mis padres, por su apoyo incondicional en todo momento, sus consejos y la educación que me han brindado.*

*A mi asesor, Dr. Jesús Figueroa, por su constante atención y apoyo.*

*A la Dra. Silvia García y al Dr. Marco Moreno, por su ayuda.*

*A mis compañeros de laboratorio y de generación que han compartido sus experiencias, conocimiento, y apoyo.*

# Índice

Resumen .....	IV
Abstract .....	V
Agradecimientos .....	VI
Índice.....	VII
Índice de Figuras .....	IX
Índice de Tablas .....	XI
Glosario .....	XIII
Capítulo I. Introducción .....	1
1.1. Planteamiento del Problema .....	2
1.2. Solución Propuesta .....	4
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. Objetivo General.....	5
1.3.2. Objetivo Particulares.....	5
1.4. Contribuciones .....	6
1.5. Organización de la tesis.....	6
Capítulo II. Estado del arte.....	7
2.1. Zonificación en el Área Metropolitana .....	8
2.1.1. Zonificación sísmica actual del Área Metropolitana .....	10
2.2. Zonificación .....	11
2.2.1. Zonificación por licuación.....	12
2.2.2. Zonificación por análisis de microtemblores.....	13
2.2.3. Zonificación como problema de procesamiento de señales.....	13
2.2.4. Zonificación por análisis de riesgo sísmico.....	14
2.2.5. Espectro de respuesta y espectro de diseño .....	15
Capítulo III. Método Propuesto.....	17
3.1. Metodología Propuesta.....	17
3.2. Experimentación.....	19
3.3. Selección y adecuación de la base de datos de sismos fuertes .....	20
3.3.1. Base de Datos Mexicana de Sismos Fuertes.....	20
3.3.2. Selección y adecuación de la base de datos de sismos fuertes .....	23
3.3.3. Recomendaciones para el mejoramiento de la Base de Datos Mexicana de Sismos Fuertes .....	27

Capítulo IV. Descripción de técnicas .....	28
4.1. Espectro de respuesta .....	28
4.2. Transformada de Fourier .....	38
4.3. Mapa recurrente.....	40
4.4. Transformada de Hilbert-Huang .....	45
4.4.1. Descomposición empírica de modos .....	46
4.4.2. Análisis Espectral de Hilbert .....	47
4.5 Eigenvector .....	49
Capítulo V. Clasificadores .....	51
5.1. Red neuronal artificial Fuzzy ART .....	51
5.1.1. Teoría de Resonancia Adaptativa.....	51
5.1.2. Algoritmo Fuzzy ART .....	53
5.2. K-means .....	56
Capítulo VI. Análisis experimental.....	57
6.1. Zonificación gruesa.....	60
6.1.1. Clasificación de firmas de registros sísmicos.....	61
6.1.2. Procesamiento de clasificaciones de firmas .....	62
6.1.3. Agrupamiento de estaciones sísmicas.....	65
6.1.4. Selección de zonificación gruesa.....	68
6.2. Zonificación fina .....	73
6.2.1. Clasificación de firmas de registros sísmicos.....	74
6.2.2. Procesamiento de clasificaciones de firmas .....	75
6.2.3. Agrupamiento de estaciones sísmicas.....	75
6.2.4. Selección de zonificación fina.....	79
6.3. Comparación de entre zonificación actual y la propuesta .....	84
6.4. Discusión de resultados.....	89
Conclusiones .....	92
Trabajos futuros .....	94
Publicaciones en congresos y revistas.....	95
Referencias.....	96
Apéndice A.....	101
Apéndice A.1. Cómputo en GPU .....	101
Apéndice A.2. Creación de la base de datos .....	104
Apéndice A.3. Requerimientos .....	106

Apéndice A.4. Programas para la hacer la firma.....	106
Apéndice A.5. Programas análisis experimental.....	107
Apéndice A.5.1. Zonificación gruesa .....	107
Apéndice A.5.2. Zonificación fina.....	107
Apéndice B.....	109
Apéndice B.1. Orientaciones.....	109
Apéndice B.2. Distancias .....	110
<i>Distancia Euclidiana</i> .....	110
<i>Distancia de Minkowski</i> .....	110
<i>Distancia City-block</i> .....	111
<i>Alineación de series de tiempo Fast Dynamic Time Warping</i> .....	111
Apéndice B.3. Estaciones.....	112

## Índice de Figuras

Figura 1. Fotografía sismo del 19 de septiembre de 1985.....	1
Figura 2. Área Metropolitana en la época prehispánica y división política actual.....	3
Figura 3. Ondas P, S y P+S. ....	7
Figura 4. Ondas de Love y de Rayleigh. ....	8
Figura 5. Zonificación geotécnica del Valle de México [11,22]: a) Marsal y Mazari, b) Auvinet.....	9
Figura 6. Mapa de zonificación sísmica.....	11
Figura 7. Fenómeno de licuación observado en el sismo de Nigata Japón en 1964. ....	12
Figura 8. a) equipo de captura de microtemblores b) ejemplo de microtemblor.....	13
Figura 9. Aceleración espectral para cuatro sismos grandes, medidos en superficie. ....	15
Figura 10. Aceleración espectral promedio para cuatro sismos fuertes, medidos en superficie. ....	16
Figura 11. Aceleración espectral promedio y espectro de diseño.....	16
Figura 12. Metodología propuesta. ....	18
Figura 13. Estaciones sismológicas dentro del Área Metropolitana. ....	21
Figura 14. Ejemplo de registro de la base de datos de sismos fuertes.....	23
Figura 15. Diagrama entidad-relación de la base de datos de sismos. ....	24
Figura 16. Diagrama de selección y adecuación de la base de datos de sismos fuertes.....	25
Figura 17. Delimitación del Área Metropolitana. Área 1(19.024691° latitud, -99.441895° longitud), Área 2(19.024691° latitud, -98.817529° longitud) Área 3(19.641696° latitud, -98.817529° longitud) Área 4(19.641696° latitud, -99.441895° longitud). ....	26
Figura 18. Espectro de respuesta.....	28
Figura 19. Sistema simple de un grado de libertad. ....	29
Figura 20. Diagrama de cálculo de espectro de respuesta.....	32
Figura 21. Acelerograma eje W-E del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24. ....	33
Figura 22. Comparación de espectros de respuesta de deformación: a) obtenido, b) obtenido con Degtra. Eje W-E del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24. 34	

Figura 23. Comparación de espectro de respuesta de velocidad : a) obtenido, b) obtenido con Degtra. Eje W-E del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24.	34
Figura 24. Comparación de espectro de respuesta de aceleración absoluta : a) obtenido, b) obtenido con Degtra. Eje W-E del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24.	35
Figura 25. Acelerograma eje N-S del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24.	35
Figura 26. Comparación de espectros de respuesta de deformación: a) obtenido, b) obtenido con Degtra. Eje N-S del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24.	36
Figura 27. Comparación de espectros de respuesta de velocidad: a) obtenido, b) obtenido con Degtra. Eje N-S del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24.	36
Figura 28. Comparación de espectros de respuesta de aceleración absoluta: a) obtenido, b) obtenido con Degtra. Eje N-S del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24.	37
Figura 29. Amplificación del suelo en la Ciudad de México.	37
Figura 30. Espectro de Fourier de acelerograma del eje W-E del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24.	39
Figura 31. Espectro de Fourier de acelerograma del eje N-S del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24.	39
Figura 32. Construcción de Espacio de Fase por retardo con $de=3$ y $\tau=2$ .	40
Figura 33. Diagrama de cálculo de medidas de mapa recurrente.	43
Figura 34. Mapas recurrentes sin umbralizar de los espectros de respuesta, canal 1 , registro 4475, 1999-12-29, 5:20:45, estación nº16 zócalo: a)RP desplazamiento b)RP velocidad c)RP aceleración.	44
Figura 35. Mapas recurrentes umbralizados de los espectros de respuesta, canal 1 , registro 4475, 1999-12-29, 5:20:45, estación nº16 zócalo: a)RP desplazamiento b)RP velocidad c)RP aceleración.	45
Figura 36. Gráficas correspondientes a los 5 primeros IMF's del acelerograma del sismo de 14-06-2004 con 5.8 ° de magnitud.	48
Figura 37. Espectro de HHT del acelerograma del sismo de 14-06-2004 con 5.8 ° de magnitud.	49
Figura 38. Tres patrones binarios para la prueba de plasticidad/estabilidad de una RNA Fuzzy ART.	55
Figura 39. Ejemplo de agrupación de vectores con k-means.	56
Figura 40. Zonificación sísmica gruesa del Área Metropolitana actual.	58
Figura 41. Zonificación sísmica fina del Área Metropolitana actual.	59
Figura 42. Procedimiento de obtención de una zonificación gruesa.	60
Figura 43. Diagrama de generación de resultados.	61
Figura 44. Zonificación gruesa para eje W-E, experimento 1, rho=0.95.	71
Figura 45. Zonificación gruesa para eje N-S, experimento 2, rho= 0.95.	72
Figura 46. Procedimiento para obtención de una zonificación fina.	73
Figura 47. Zonificación fina para eje W-E.	82
Figura 48. Zonificación fina para eje N-S.	83
Figura 49. Mapas de zonificación gruesa, propuesta eje W-E, actual y propuesta eje N-S, respectivamente.	85
Figura 50. Mapas de zonificación fina, propuesta eje W-E, actual y propuesta eje N-S, respectivamente.	86
Figura 51. Orientaciones: a) SCT1 ; b) SCT2.	89
Figura 52. Espectro de respuesta de velocidad Eje N-S, de las estaciones SCT1 Y SCT2.	90
Figura 53. Espectro de respuesta de velocidad Eje W-E, de las estaciones SCT1 Y SCT2.	90
Figura 54. Organización de hilos.	102
Figura 55. Jerarquía de niveles de memoria.	103

Figura 56. GPU NVIDIA GTS 450.....	104
Figura 57. Programas para creación de las firmas.....	106
Figura 58. Programas para zonificación gruesa.....	107
Figura 59. Programas para zonificación fina.....	108
Figura 60. Brújula de orientación Quadrant Bearing.....	109
Figura 61. Orientación N45E.....	109

## Índice de Tablas

Tabla 1. Estadística de ocurrencia de sismos.....	4
Tabla 2. Partes de la firma de registros sísmicos.....	19
Tabla 3. Fechas de sismos importantes.....	20
Tabla 4. Resultados de mediciones sobre el mapa recurrente.....	45
Tabla 5. Distribución de estaciones de registro sísmico por zonas, zonificación actual.....	57
Tabla 6. Clasificación de firmas de registros sísmicos con RNA Fuzzy ART: Experimento: 2 ; eje: W-E.....	62
Tabla 7. Procesamiento de clasificaciones de firmas de registros sísmicos: rho= 0.8 ; eje= W-E; Experimento 2.....	63
Tabla 8. Ejemplo 1.....	64
Tabla 9. Ejemplo 2.....	64
Tabla 10. Procesamiento de clasificación de firmas de registros sísmicos: rho= 0.825 ; eje= W-E; Experimento 2.....	64
Tabla 11. Tabla de selección de agrupaciones, eje W-E.....	65
Tabla 12. Tabla de selección de agrupaciones, eje N-S.....	65
Tabla 13. Agrupación de estaciones sísmicas, para 3 zonas, eje W-E.....	66
Tabla 14. Agrupación de estaciones sísmicas, para 3 zonas, eje N-S.....	67
Tabla 15. Distancias promedio de cada agrupación, eje W-E.....	68
Tabla 16. Distancias promedio de cada agrupación, eje N-S.....	68
Tabla 17. Distancias promedio por zona, experimento 1, rho=0.95 , eje W-E.....	69
Tabla 18. Distancias promedio por zona, experimento 2, rho=0.95 , eje N-S.....	69
Tabla 19. Agrupación firmas de registros sísmicos de la Zona 1 con RNA Fuzzy ART: experimento 1, eje W-E.....	74
Tabla 20. Procesamiento de clasificaciones de firmas de registros sísmicos, Zona 1, rho= 0.975 ; eje= W-E; Experimento 1.....	75
Tabla 21. Tabla de selección de agrupaciones, eje W-E.....	76
Tabla 22. Tabla de selección de agrupaciones, eje N-S.....	76
Tabla 23. Agrupación de estaciones sísmicas, eje W-E.....	77
Tabla 24. Agrupación de estaciones sísmicas, eje N-S.....	78
Tabla 25. Distancias promedio de cada clasificación, eje W-E.....	79
Tabla 26. Distancias promedio de cada clasificación, eje N-S.....	79
Tabla 27. Distancias promedio por subzonas para la Zona 1, rho=0.975 , eje W-E.....	80
Tabla 28. Distancias promedio por subzonas para la Zona 2 y 3, rho=0.975 , eje W-E.....	80
Tabla 29. Distancias promedio por subzona para la Zona 1, rho=0.95 , eje N-S.....	80
Tabla 30. Distancias promedio por subzona para la Zona 2 y 3, rho=0.975, rho=0.95 , eje N-S respectivamente.....	81
Tabla 31. Comparativa de distancias promedio por zonificaciones, para el eje W-E.....	87
Tabla 32. Comparativa de distancias promedio por zonificaciones, para el eje N-S.....	88

Tabla 33. Especificaciones de GPU NVIDIA GTS 450 .....	104
Tabla 34. Dirección de medida de cada cuadrante. ....	109
Tabla 35. Orientación de estaciones sísmicas. ....	110
Tabla 36. Orientación de estaciones correcta. ....	110
Tabla 37. Altitud y coordenadas geográficas de las estaciones sísmicas.....	113

# Capítulo I. Introducción

La zonificación sísmica surge de las necesidades económicas de las ciudades, porque las viviendas y las obras públicas e industriales se deben edificar de modo que los sismos no alteren su funcionamiento normal.

Teniendo en cuenta que zonificación es la identificación y caracterización de suelos cuyas respuesta dinámica frente a terremotos son semejantes [21]. Los mapas resultantes de zonificación, se presentan en una base cartográfica útil para fines de edificación y planificación urbana.

El Área Metropolitana es el centro político económico de México, fue fundada en un lago a más de 2000 msnm, bordeada por sierras volcánicas, la base profunda tiene fallas que contribuyen en la respuesta sísmica, y está situado en el cinturón volcánico transmexicano, por lo que su origen es claramente volcánico; donde el lodo lacustre bajo la ciudad está asociado a un alto riesgo sísmico, estas características ocasionan variaciones importantes en la repuesta dinámica, provocando que el suelo sea difícil de analizar con técnicas geotécnicas clásicas, al no medir características no lineales del fenómeno [22].



Figura 1. Fotografía sismo del 19 de septiembre de 1985.

Este problema se hace evidente en los efectos destructivos del sismo de 1985, que tuvo grandes consecuencias económicas y sociales principalmente en el Área Metropolitana.

Dada por la peligrosa respuesta del suelo se han observado algunos casos en los que los sismos tienen efectos específicos (daña solo algunos tipos de estructuras), como es el caso del sismo de 1985 y 15 de junio de 1999 [39].

Esto originó un cambio en los reglamentos de construcción. Se ha observado que el análisis de este fenómeno es muy complejo y lamentablemente sólo se aprecia que está incompleto cuando ocurren desgracias.

Actualmente no se tienen firmas de sismos que servirían para hacer una eficiente caracterización, y para la zonificación sólo toman algunos parámetros importantes, estos análisis los realizan uno por uno, no aprovechan las técnicas computacionales actuales.

Investigaciones recientes enfatizan la importancia de las técnicas computacionales dentro de la geotecnia, como mecanismo de mejoramiento de análisis [6,11,16,22]. Por lo que conviene realizar una zonificación sísmica a partir de una caracterización sísmica eficiente y obtener características de las señales adecuadas, valiéndonos de herramientas computacionales y de técnicas de análisis de señales no lineales y clásicas. Estas técnicas son mapa recurrente, transformada Hilbert-Huang, eigenvector, transformada de Fourier y espectro de respuesta las cuales tienen la cualidad de poder ofrecernos cada técnica información diferente, para poder caracterizar mejor al fenómeno.

## **1.1. Planteamiento del Problema**

La zona metropolitana está asentada en un lugar donde antes era un lago y el lodo lacustre bajo la ciudad está asociado a un alto riesgo sísmico (Figura 2), provocando que el comportamiento del suelo frente a sismos sea capaz de modificar la respuesta dinámica del suelo y que el suelo sea difícil de analizar con técnicas geotécnicas clásicas, cuyas técnicas son estrictamente lineales y no permiten observar algunas otras características no lineales propias de la naturaleza no lineal del fenómeno. También se ha planteado que del sismo de 1985 los efectos más destructivos fueron causados por gran cantidad de energía a frecuencias específicas, ocasionando que afectara más a algunos edificios, también está el ejemplo del sismo de las campanas el 15 de junio de 1999, el cual solamente afectó edificios construidos entre los siglos XVI y XIX, esto sugiere que existen más características del fenómeno que no se toman en cuenta actualmente [39].

Existen muchas razones y datos para suponer que el análisis lineal clásico falla en hacer justicia a todas las observaciones, y por lo tanto la zonificación actual del Área Metropolitana no es completa [6,11,16,22].

Teniendo en cuenta la importancia de una zonificación más eficiente, y debido a que no se han utilizado herramientas computacionales para el análisis de sismos, y que actualmente no se tienen “firmas” que sirvan para hacer una caracterización eficiente de los sismos, se utilizan pocos registros sísmicos para zonificación que dan como resultado zonificaciones incompletas. Se tiene que hacer firmas más completas apoyadas en técnicas de análisis no



AÑO	TOTAL DE SISMOS	MAGNITUD DE SISMOS						
		< 3	3	4	5	6	7	8
1990	792	13	246	509	23	1	0	0
1991	732	6	184	510	30	2	0	0
1992	613	5	183	398	27	0	0	0
1993	917	48	275	548	40	5	1	0
1994	622	20	192	383	24	3	0	0
1995	676	16	188	438	26	6	2	0
1996	790	9	203	543	32	3	0	0
1997	1019	57	388	533	34	5	2	0
1998	1023	13	453	531	21	5	0	0
1999	1097	13	540	527	11	4	2	0
2000	1052	37	463	531	18	2	1	0
2001	1344	17	704	585	32	6	0	0
2002	1688	4	879	761	40	4	0	0
2003	1324	5	729	568	18	3	1	0
2004	945	1	429	491	24	0	0	0
2005	847	1	459	373	12	2	0	0
2006	1077	0	589	464	23	1	0	0
2007	1234	0	533	670	27	4	0	0
2008	1772	4	1037	709	18	4	0	0

Tabla 1. Estadística de ocurrencia de sismos.

Además dentro del Área Metropolitana existen grandes variaciones de respuesta en áreas pequeñas e incertidumbre sobre la veracidad de zonificación sísmica actual, ocasionando que en la construcción de grandes obras públicas no se utilice la zonificación del reglamento de construcciones, si no que se tenga que hacer pruebas de dureza en el sitio de la construcción, en algunos casos hasta cada 100 metros. Pero algunas personas no pueden pagar pruebas de dureza, por lo que tiene que utilizar el reglamento de construcciones.

## 1.2. Solución Propuesta

La base de nuestra solución es un enfoque de ciencias de la computación que se basa en la caracterización de registros sísmicos con técnicas no lineales y técnicas clásicas del área de geotecnia, a esta caracterización le llamaremos firma. Estas técnicas tienen la cualidad de ofrecer más características importantes del registro, que las que nos puede ofrecer un análisis tradicional. La creación de firmas consiste en que a partir de registros sísmicos se tienen que crear espectros de respuesta, los espectros de respuesta son muy usados por los ingenieros geotécnicos cuando diseñan y representan la respuesta del suelo a una excitación, también se obtendrán algunas medidas utilizando algunas técnicas de análisis no lineal con mapa recurrente, también transformada de Hilbert-Huang y la transformada de Fourier con los cuales se incluirá información importante en el dominio de la frecuencia, después se van a agrupar las firmas de los registros sísmicos y a agrupar las estaciones sísmicas, con una red neuronal artificial Fuzzy ART y K-means respectivamente, para poder observar cuales estaciones se comportan de manera similar, una vez obtenidas estas clasificaciones, se hicieron mapas de zonificación.

Esta metodología intenta capturar la dinámica del suelo a través del tiempo, por lo que se utilizaron eventos en varias fechas, de 1985 a 2008.

En los últimos años con la llegada de CPU's multinúcleo y GPU's con muchos núcleos, y por la necesidad de resolver grandes problemas en el menor tiempo posible, surgieron varias plataformas de programación paralela en GPU, que nos ayudan a programar desde un nivel un poco más alto que el que se hacían en la programación paralela clásica. Por la naturaleza del problema abordado en esta tesis y el gran número de registros sísmico que se tienen que analizar nos vamos a apoyar en la arquitectura de cómputo paralelo de NVIDIA, para minimizar el tiempo de cómputo.

### **1.3. Objetivos**

A continuación se describen los objetivos generales y particulares del proyecto de investigación de esta tesis.

#### **1.3.1. Objetivo General**

Caracterizar registros sísmicos, utilizando herramientas computacionales, técnicas de análisis de señales y técnicas clásicas de geotecnia, para elaborar una zonificación sísmica basada en la zonificación actual.

#### **1.3.2. Objetivo Particulares**

- Crear un método de selección y adecuación de la Base de Datos Mexicana de Sismos Fuertes.
- Calcular espectros de respuesta.
- Calcular la transformada de Fourier.
- Construir mapas recurrentes y medidas del mapa recurrente.
- Calcular la transformada de Hilbert-Huang.
- Crear las “firmas” para cada registro sísmico.
- Clasificar registros sísmicos con una red neuronal artificial Fuzzy ART.
- Agrupar firmas de estaciones sísmicas con k-means.
- Realizar los cálculos utilizando cómputo de alto rendimiento en GPU en las partes que sea necesario.
- Obtener una zonificación sísmica basada en la zonificación actual.

## **1.4. Contribuciones**

- Método de selección de registros sísmicos procedentes de la Base de Datos Mexicana de Sismos Fuertes.
- Creación de firmas de registros sísmicos, donde se acoplan técnicas clásicas como transformada de Fourier y espectro de respuesta, con técnicas que realmente estudian un fenómeno no lineal como mapa recurrente y transformada de Hilbert-Huang.
- Con esta metodología se pueden analizar una gran cantidad de registros sísmicos.
- Obtención de una zonificación sísmica más completa, comparable con la zonificación actual.

## **1.5. Organización de la tesis**

En el capítulo II se comentan los enfoques para hacer zonificaciones sísmicas, y también se comenta la historia la zonificación sísmica actual, así como sus características.

El capítulo III habla de la metodología propuesta, y de la selección y adecuación de la base de datos de sismos fuertes. Aquí se explica la forma en que se van a hacer los experimentos y la forma en que se van a seleccionar los registros sísmicos.

El capítulo IV explica el funcionamiento de cada una de las técnicas que conforman la firma de los registros sísmicos, así como su implementación.

Así mismo en el capítulo V se explica el funcionamiento de los clasificadores de firmas de registros sísmicos y de estaciones sísmicas, y también su implementación.

Posteriormente en el capítulo VI se presentan los experimentos realizados paso a paso, para la zonificación sísmica gruesa y final.

En el apéndice A se explica el orden y requerimientos de los programas realizados en este trabajo, estos programas se adjuntaron en un CD.

Por último el apéndice B contiene la forma en que se corrigió la orientación de las estaciones sísmicas, y también explica las distancias utilizadas para comparar las clasificaciones.

## Resumen

*En este trabajo se presenta una zonificación sísmica detallada basada en la zonificación actual, utilizando herramientas computacionales y de análisis de señales. Se creó un método de selección de registros sísmicos de la Base de Datos Mexicana de Sismos Fuertes, para aumentar la fiabilidad de los resultados. Con técnicas como espectro de respuesta, mapa recurrente, transformada de Fourier y transformada de Hilbert-Huang, se crearon firmas que caracterizan a cada registro sísmico, proporcionando características no utilizadas actualmente. Se clasificaron las firmas de los registros sísmicos con una RNA Fuzzy ART obteniendo firmas de las estaciones sísmicas, después se agruparon las firmas de estaciones sísmicas con k-means, con lo que se obtuvieron mapas georeferenciados de zonificación sísmica para una zonificación gruesa de 3 zonas y una fina para encontrar subzonas. Al comparar la zonificación actual y la propuesta, se obtuvieron menores distancias en la propuesta y se observó una redistribución de zonas. También se demostró que el espectro de respuesta es insuficiente para zonificación sísmica.*

## Abstract

*In this work we present a detailed seismic zonation based on current zonation, using computational and signal analysis tools. We created a method for selecting seismic records from Mexican Database of Strong Earthquake, to increase the reliability of results. With techniques such as response spectrum, recurrence plots, Fourier transform and Hilbert-Huang transform, we created signatures that characterize each seismic record, providing features not currently in use. We classified the seismic signatures using the ANN Fuzzy ART obtaining signatures from seismic stations, then the gathered signatures of seismic stations was clustered with k-means, Whit this were obtained georeferenced maps of seismic zonation for a coarse and fine zonation When was compared the current and proposed zonation, the proposed zones had lower average distances than current zonation and there was a rezoning. It was also shown that the response spectrum is insufficient for seismic zonation*

## Capítulo II. Estado del arte

El presente capítulo comprende el estado del arte desarrollado como base de la propuesta de tesis. Se describen varios conceptos importantes que serán de utilidad para el estudio del resto de los capítulos.

Las ondas sísmicas se dividen en volumétricas y superficiales, la propagación de las ondas volumétricas en la tierra es semejante a la difusión de rayos luminosos en medios ópticos, atraviesan todo el volumen de nuestro planeta. Las ondas volumétricas pueden ser de dos tipos, las ondas longitudinales, son ondas elásticas de descompresión cuya propagación implica cambios de volumen en el medio y pueden atravesar sólidos y fluidos, las ondas transversales que son ondas de desplazamiento y se propagan únicamente en sólidos, la velocidad de las ondas longitudinales es mayor que las transversales, por lo tanto se registran con anterioridad y se llaman ondas P (utilizada en alarmas sísmicas) mientras que las ondas de corte se llaman ondas S.

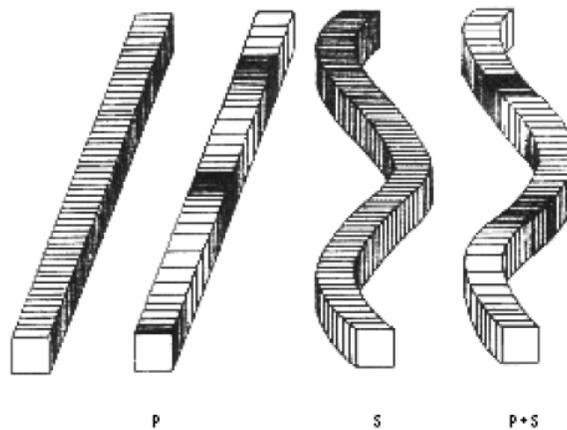


Figura 1. Ondas P, S y P+S.

Las ondas que se propagan a lo largo de la superficie terrestre pueden ser de dos tipos ondas de Rayleigh y ondas Love, en las ondas de Rayleigh el desplazamiento de las partículas del suelo se halla en el plano vertical. En las ondas Love provocan desplazamiento en el plano horizontal, perpendicular a la dirección de las ondas de difusión

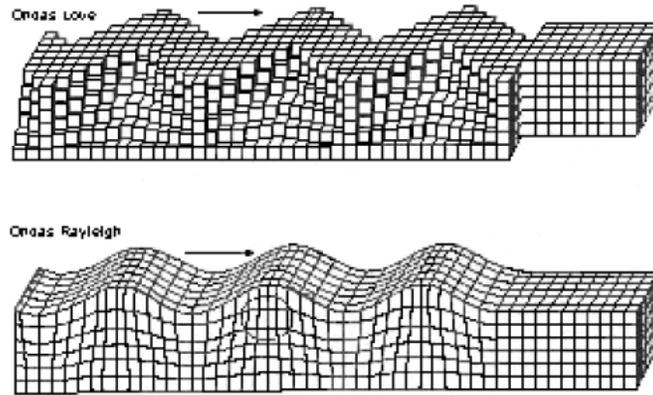


Figura 2. Ondas de Love y de Rayleigh.

Con esto nos podemos dar una idea de lo difícil que es el análisis de este fenómeno, por el simple hecho de que el suelo está compuesto por muchos materiales, con diferentes características de compresión, cantidad de agua absorbida, etc., que cambian completamente a muy poca distancia.

## 2.1. Zonificación en el Área Metropolitana

La ciudad de México es el centro político y económico de México, fue fundada en un lago a más de 2000 metros sobre el nivel del mar, donde el lodo lacustre bajo la ciudad está asociado a un alto riesgo sísmico. Está ubicada en una configuración geológica y estructural única, en una meseta volcánica bordeada por sierras volcánicas. La base profunda tiene fallas que contribuyen en la respuesta sísmica, está situado en el cinturón volcánico transmexicano que atraviesa del Pacífico al Atlántico y su origen es claramente volcánico.

Antes de 1985 era aceptado que la mayoría de daño frente a un sismo fuerte podría pasar en la zona de lago de acuerdo con la zonificación propuesta por Marsal y Mazari en 1969, pero muchos expertos creían que el suelo suave debería atenuar la amplitud de las ondas sísmicas, en ese entonces el reglamento de construcciones fue considerado uno de los más seguros del mundo. Este predecía que las arcillas en la zona de lago podrían causar largas amplificaciones, y en 1985 se excedieron las predicciones más pesimistas. Entonces la comunidad científica básicamente aceptó que la importancia de la arcilla lacustre como causa del desastre. Esta capa de barro orgánico tiene un contenido de agua de cerca del 90%, una gravedad específica de 1.2 y velocidades de corte de cerca de 50m/s [22,26].

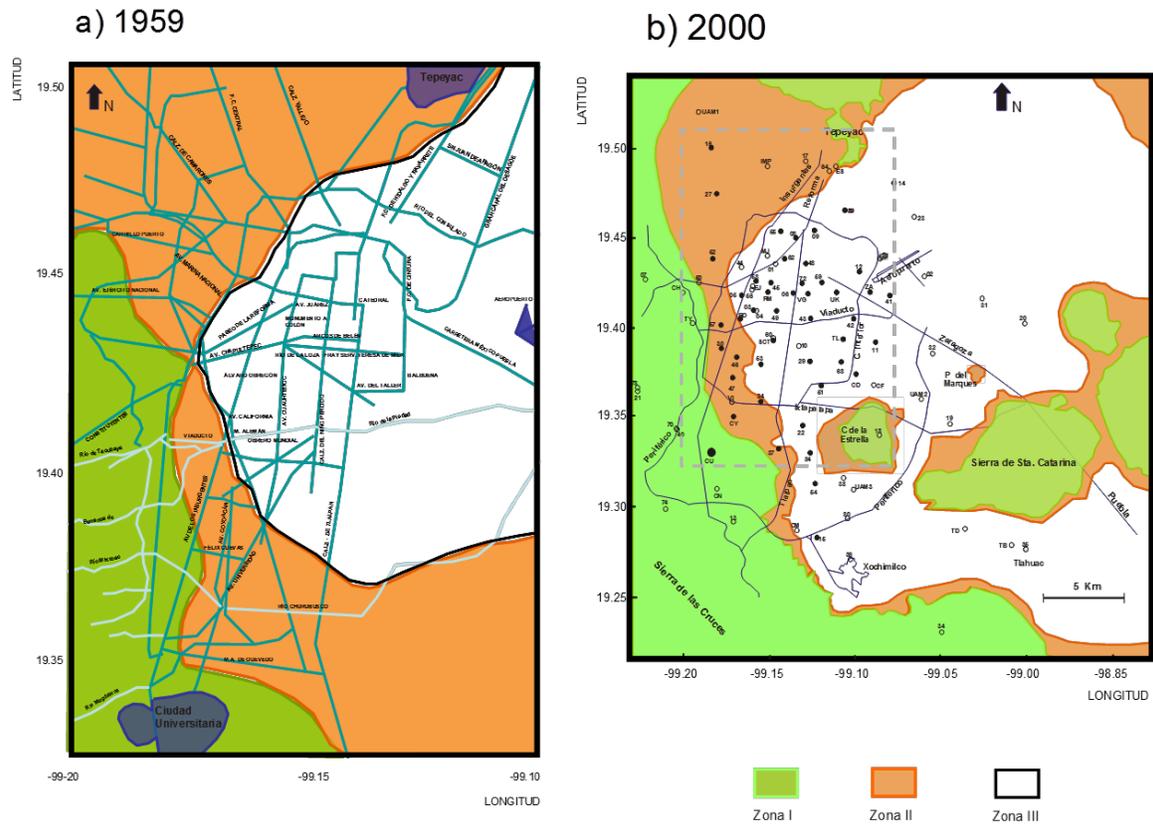


Figura 3. Zonificación geotécnica del Valle de México [11,22]: a) Marsal y Mazari, b) Auvinet.

El sismo del 19 de septiembre de 1985 fue el peor desastre sísmico en México, ocasionando una gran preocupación por este fenómeno natural, después de este evento se han publicado numerosas contribuciones en este campo, dando lugar a que se hicieran estudios interdisciplinarios, y pocos autores se han direccionado a una *pregunta fundamental, que surge de la posibilidad de que el análisis lineal falla en hacer justicia a todas las observaciones de este fenómeno* [26].

Se ha planteado que del sismo de 1985 los efectos más destructivos fueron causados por la gran cantidad de energía a frecuencias específicas, ocasionando que afectara más a sólo algunos edificios, este efecto también se observó en el sismo de las campanas el 15 de junio de 1999, el cual afectó a un estimado de quinientas iglesias, conventos y palacios construidos entre los siglos XVI y XIX, evidenciándose la complejidad del fenómeno y la falta de herramientas para su análisis [39].

Esta preocupación también se refleja en las perforaciones que hizo Pemex, y las modificaciones que se han hecho históricamente en la zonificación y el reglamento de construcciones del Valle de México como se puede observar en la Figura 5, hasta llegar a la zonificación actual publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal [49].

### 2.1.1. Zonificación sísmica actual del Área Metropolitana

La zonificación sísmica actual del Área Metropolitana publicada el 6 de octubre del 2004, está en la sección de normas técnicas complementarias para diseño por sismo, donde se indica que la zonificación consta de tres zonas principales y 4 subzonas de la zona III (Figura 6) [49].

#### Zona I. *Lomas:*

Formada por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta Zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas y de cavernas y túneles excavados en suelo para explotar minas de arena.

#### Zona II. *Transición:*

Tiene depósitos profundos a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo-arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre, el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros.

#### Zona III. *Lago:*

Integrada por grandes depósitos de arcilla altamente comprensible, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son de consistencia firme a muy dura y de espesores variables de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

En las normas técnicas complementarias para diseño por sismo, se detallan formas de reducir el efecto sísmico sobre una estructura (edificio), partiendo del tipo de edificio que se quiera construir y la localización geográfica de este, se observa en que zona está el edificio y con la pertenencia a una zona se obtienen los parámetros con los que calculan la estructura, como separación entre edificios colindantes, peso de cada nivel, muros de carga, etc. Esto significa que a partir de la zonificación sísmica se generan los reglamentos de construcciones.

Los reglamentos de construcciones son importantes porque además de prevenir pérdidas de vidas y pérdidas materiales, también ayudan a disminuir costos de construcciones, ya que si se construye un edificio muy fuerte con todas las medidas de resistencia sísmica, costaría demasiado este tipo de edificios y sería todavía mayor la pérdida monetaria si este estuviese en una zona donde no existe alto riesgo sísmico.

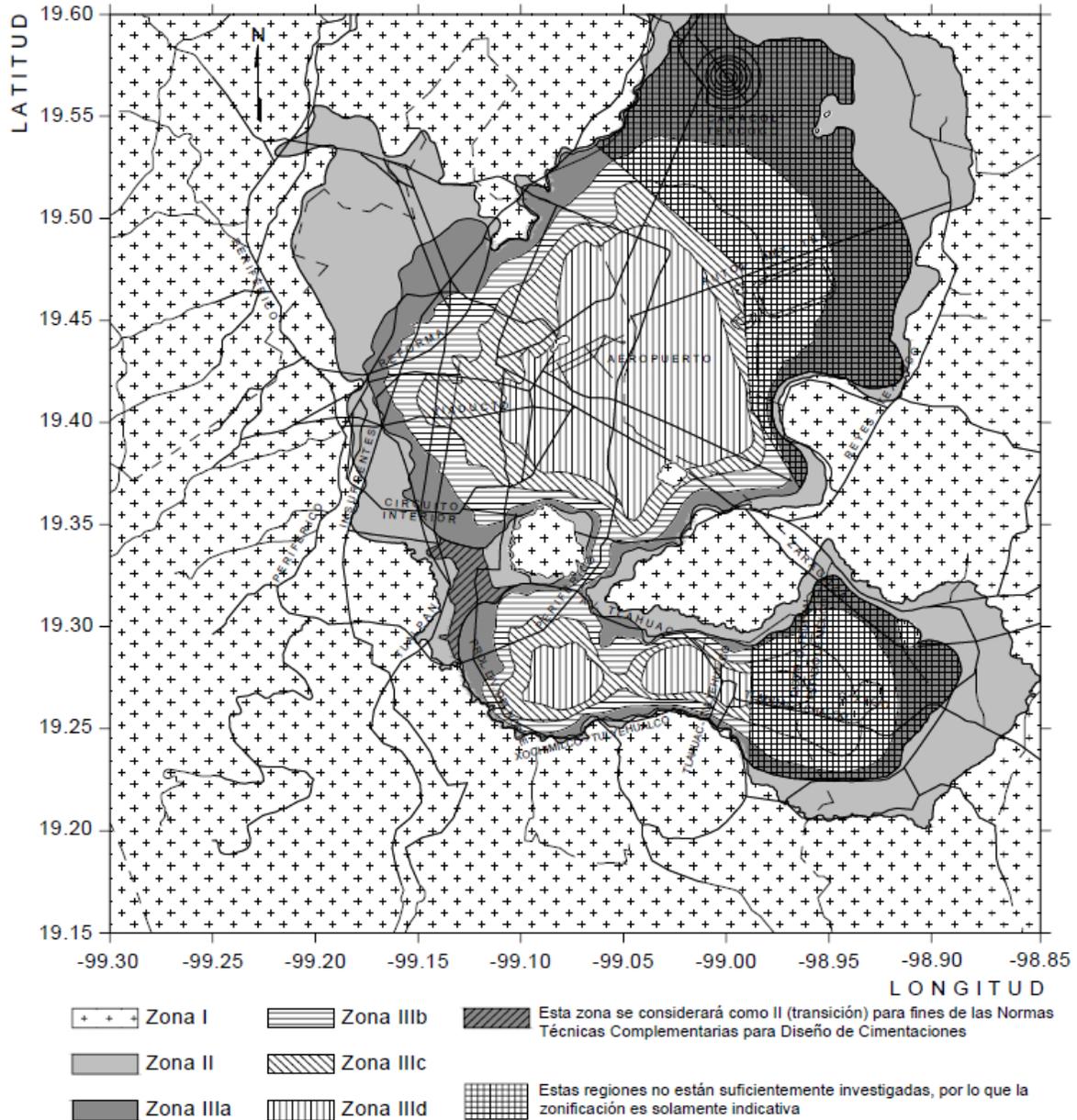


Figura 4. Mapa de zonificación sísmica.

## 2.2. Zonificación

La zonificación es la identificación y caracterización de suelos cuyas respuesta dinámica frente a terremotos son semejantes, de forma que se estiman magnitudes máximas de cada una de las zonas, topología, riesgo sísmico y la esperanza de sismos futuros entre otras. Donde la calidad y confiabilidad depende de la cantidad de datos, nivel de investigación, interpretación de los datos y limitaciones financieras.

Las zonificaciones están clasificadas en 3 clases:

Grado 1:

Es realizado usando información y conocimientos disponibles en la literatura y experiencias durante sismos pasados.

Grado 2:

En este se colectan más datos de superficie en adición a la información de la literatura, y utiliza estudios de microzonificación basados en intensidad y período fundamental.

Grado 3:

Analiza dinámica no lineal en adición a los otros grados de zonificación.

Después de revisar la literatura actual sobre zonificación sísmica, se llegó a la conclusión de que los enfoques para intentar dar solución al problema de zonificación está dividido básicamente en cuatro: zonificación por licuefacción, zonificación por análisis de microsismos, zonificación por análisis de riesgo sísmico y zonificación como problema de procesamiento de señales. Estos enfoques en trabajos se mezclan, tratando de dar la mejor solución al problema de zonificación.

### **2.2.1. Zonificación por licuación**

Este tipo de zonificación se basa en la identificación de zonas propensas a licuación, donde, licuación es el proceso de pérdida de resistencia de ciertos tipos de suelos, que están saturados en agua y cuando son sometidos a la sacudida de un terremoto, fluyen como un líquido a causa de un aumento de la presión. La licuación puede considerarse una consecuencia de los terremotos en lugares con terrenos poco consolidados o suelos arcillosos. Cuando se produce la licuación, los edificios y casas se encuentran flotando en un lodo inestable saturado en agua.



Figura 5. Fenómeno de licuación observado en el sismo de Niigata Japón en 1964.

Este tipo de zonificación requiere mucho trabajo de campo, para estudiar la composición del suelo y la saturación de agua que tiene, también se necesitan mapas detallados geológicos y geomorfológicos, mapas de sitios con licuaciones pasadas, también se utiliza mucho el análisis de la onda de corte para tener en cuenta los máximos desplazamientos horizontales. Donde se llega a mapas de probabilidad de licuación dado un sismo máximo histórico [21,77,78].

### 2.2.2. Zonificación por análisis de microtemblores

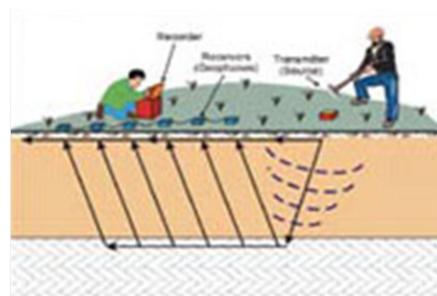
Este tipo de zonificación es por medio de análisis de señales captadas de microtemblores, también se utiliza en algunos trabajos el análisis de micro sismos aunque en menor medida. La diferencia entre microsismo y microtemblor sigue a continuación.

Los microsismos se definen como las oscilaciones naturales y regulares del subsuelo, que no son producidas por terremotos ni por fuentes artificiales como el tráfico o la maquinaria industrial, sino que son inducidas por fuentes naturales como olas oceánicas y tormentas, por tanto las características de la amplitud y del período son afectadas por la condición del clima. Están compuestos principalmente por ondas Rayleigh y son de período relativamente largo (2-3 ó más segundos). Aparecen en los registros de todos los sismógrafos, demostrando que la corteza terrestre está en un continuo estado de agitación [80].

Los microtemblores son vibraciones generadas por eventos artificiales producto de la actividad humana tales como tráfico, maquinaria industrial y explosiones de dinamita, cuya principal ventaja respecto a los microsismos es su estabilidad. Están compuestos principalmente por ondas Rayleigh y S y contrario a los microsismos, son de período corto. El rango de períodos para medición de microtemblores es menor a 1 ó 2 segundos. Sin embargo, existe una excepción en Ciudad de México, en donde microtemblores de período mayor a 5 segundos han sido originados por acción humana debido a la existencia de sedimentos muy blandos, y los microtemblores toman características de resonancia del suelo [23,26,79,81].



a)



b)

Figura 6. a) equipo de captura de microtemblores b) ejemplo de microtemblor.

### 2.2.3. Zonificación como problema de procesamiento de señales

Cuando del problema de zonificación sísmica es abordado como un problema de análisis de señales, se utilizan técnicas de esta área como transformada de Fourier, frecuencia fun-

damental y técnicas clásicas del área de geotecnia como espectro de respuesta (ER) y máxima aceleración pico (PGA), donde como resultado presentan mapas de PGA, frecuencia fundamental [23,24,29].

#### **2.2.4. Zonificación por análisis de riesgo sísmico**

En este tipo de zonificación se utilizan datos obtenidos de sismos o microsismos, para determinar a la probabilidad de ocurrencia, dentro de un plazo dado, de un sismo que cause, en un lugar determinado, cierto efecto definido como pérdidas o daños determinados. En el riesgo influyen el peligro potencial sísmico, los posibles efectos locales de amplificación, directividad, la vulnerabilidad de las construcciones (e instituciones) y las pérdidas posibles (en vidas y bienes), el riesgo sísmico depende fuertemente de la cantidad y tipo de asentamientos humanos localizados en el lugar [35,36].

También en muchos trabajos de riesgo sísmico se utilizan software como el Seisrisk II, Seisrisk III y EERA. Donde Seisrisk es una herramienta probabilística para análisis de asentamiento de riesgo sísmico y EERA es para análisis de respuesta de sitio de terremotos [31,24].

Los trabajos de análisis de riesgo clásicos utilizan datos geológicos y espectro de respuesta y espectro de diseño, en donde se toma en cuenta únicamente el sismo más grande registrado, por lo que se dedicó la sección 2.2.5. Para explicar Espectro de Diseño [32,33].

Adicionalmente a los enfoques de zonificación antes mencionados, existen otros trabajos interesantes que demuestran la preocupación por el fenómeno sísmico.

El procedimiento SERGISAI para análisis de asentamientos de riesgo sísmico, es un proyecto europeo interdisciplinario para la creación de una herramienta computacional, este software está pensado para usuario final y no para investigación, no contiene ninguna metodología nueva y requiere algunos parámetros que dependen de la percepción de evaluadores de daños en edificios por ejemplo [37].

La Unión Europea ha promovido la homogenización de las reglas para diseño sísmico, a través del Eurocode 8 el cual esta propuesto para ser un estándar oficial, en este trabajo se puede observar que los códigos europeos han cambiado mucho, y que ciertos países recién incorporados a la Unión Europea han tenido que cambiar su zonificación [34].

También hay trabajos donde se presenta un exhaustivo trabajo de campo en donde se sacan fotos en cada lugar donde fue el daño y se genera un índice de daño conforme lo observado, este tipo de trabajos es a nivel local (colonias).

En ningún trabajo existe alguna comparación con alguna zonificación previa o algún trabajo similar, no utilizan análisis no lineal. Cabe mencionar que pocos usan herramientas de ciencias de la computación y nos lleva a formular la pregunta *¿cuál es una buena zonificación?*.

Espectro de respuesta es la técnica de análisis de señales sísmicas más utilizada en estos trabajos, por ser la base de la creación de códigos de construcciones y de zonificación, por lo que la siguiente sección a explicar el porqué de su importancia.

### 2.2.5. Espectro de respuesta y espectro de diseño

El análisis de espectro de respuesta es el método más escogido para análisis dinámico de estructuras, y es necesario para definir el espectro de diseño. Las curvas de espectros de diseño recogen el conjunto de los máximos valores de aceleración que pueden afectar diferentes edificaciones de acuerdo a sus características vibratorias, éstas dependen de su rigidez y número de pisos, entre otras variables [24].

Un espectro de diseño, es la herramienta para hacer respuesta de sitio y por lo tanto zonificación, también permite calcular las construcciones, teniendo en cuenta la actividad sísmica de la región, las condiciones locales de la respuesta del suelo, y las características de la estructura (período de vibración).

Cuando un ingeniero estructural debe diseñar una edificación, se localiza en una de las zonas establecida en la microzonificación de acuerdo con el área de la ciudad donde está ubicado el edificio, calcula el período de vibración de la estructura basado en las características de la misma, y con el espectro definido para esa zona, define la fuerza sísmica que le debe aplicar para el diseño.

En la Figura 9 se muestran cuatro sismos fuertes los cuales van a ser utilizados para hacer un espectro de diseño, los sismos utilizados tiene que ser grandes para tener cierta holgura en el diseño.

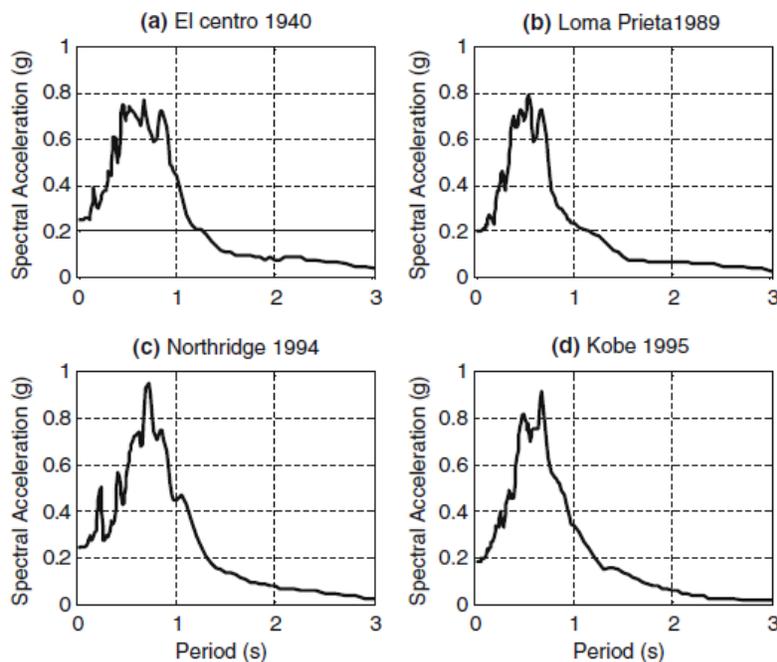


Figura 7. Aceleración espectral para cuatro sismos grandes, medidos en superficie.

El procedimiento es encimar los espectros de respuesta y después se traza una envolvente sobre estos espectros de respuesta, el nivel de robustez del espectro de respuesta depende de la altura de la envolvente, algunos autores trazan la envolvente tomando como referencia el promedio de las aceleraciones espectrales como en este ejemplo (Figura 10 y Figura 11).

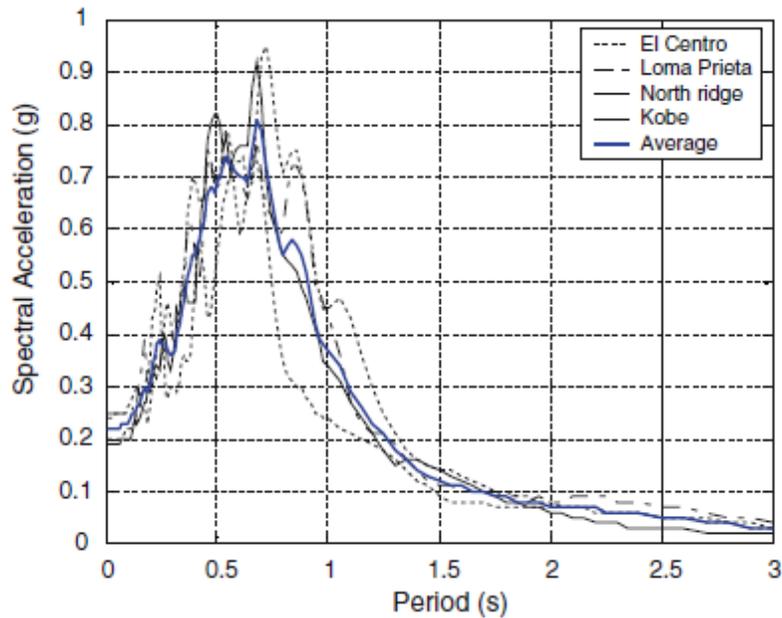


Figura 8. Aceleración espectral promedio para cuatro sismos fuertes, medidos en superficie.

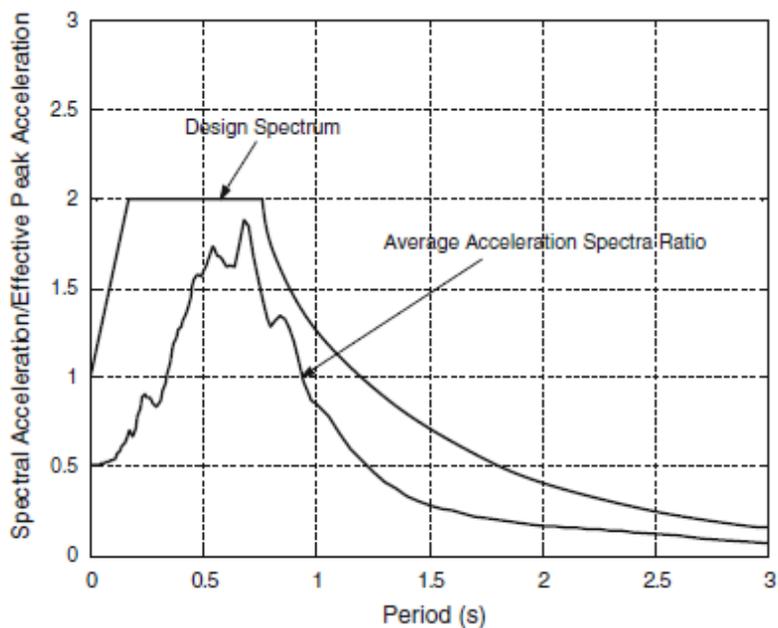


Figura 9. Aceleración espectral promedio y espectro de diseño.

En base a estos espectros de diseño y datos geológicos, se construyen los reglamentos de construcciones y las zonificaciones sísmicas.

# Capítulo III. Método Propuesto

En el presente capítulo se describen los datos con los que contamos, también se explica la metodología para obtener la zonificación y la forma en la que se seleccionaron registros sísmicos de la Base Mexicana de Sismos Fuertes.

## 3.1. Metodología Propuesta

Esta metodología cae en la descripción de una zonificación de grado 3 y usamos un enfoque de análisis de señales utilizando herramientas computacionales.

Con esta metodología se crearon firmas para caracterizar cada uno de los registros sísmicos, estas firmas están enriquecidas con medidas de las técnicas de análisis de señales (mapa recurrente, espectro de respuesta, transformada de Fourier, eigenvector de la matriz de la transformada de Hilbert-Huang), para después agrupar las firmas y las estaciones sísmicas, al conocer las coordenadas geográficas de cada una de las estaciones posibilita observar que áreas del suelo se comporta de forma similar para poder hacer la zonificación sísmica. También se tienen en cuenta los errores en la Base de Datos Mexicana de Sismos Fuertes, para garantizar la confiabilidad de los resultados.

La metodología propuesta consta de siete etapas principales:

1. *Selección y adecuación de datos.* Algunos registros sísmicos están incompletos o erróneos, por lo que se van a seleccionar únicamente los que estén bien, de esta etapa se hablara en la sección 3.3.
2. *Creación de las firmas de los registros sísmicos.* Esta parte implica aplicar diferentes técnicas de análisis de series de tiempo como espectro de respuesta, transformada de Fourier, mapa recurrente y transformada de Hilbert-Huang. Estas Técnicas nos ayudaran a caracterizar mejor los registros sísmicos. El cálculo de cada una de las técnicas de análisis se explica a detalle en el Capítulo IV.
3. *Agrupamiento de registros sísmicos.* En esta etapa se utilizó una red neuronal artificial Fuzzy ART para clasificar las firmas de los registros sísmicos, el funcionamiento se explica en la subsección 5.1.
4. *Procesamiento de registros sísmicos agrupados.* Esta etapa es necesaria, porque cada registro sísmico corresponde a un evento captado en una estación sísmica, y para hacer los mapas de zonificación se necesita las coordenadas geográficas de cada estación, por lo que se contabilizan los registros sísmicos de cada estación y la pertenencia de los registros sísmicos a cada clase.
5. *Agrupamiento de estaciones sísmicas con k-means.* Se agrupan estaciones sísmicas

para obtener la zonificación.

6. *Elección de zonificación.* Al ser necesario tener algún parámetro de medición entre zonificaciones, se utilizaron medidas de distancia promedio por zonificación y por clase, esto es, se calcularon las distancias entre cada una de las firmas de cada zona para cada una de las zonificaciones propuestas, eligiendo la que tenga menor distancia promedio.
7. *Elaboración de un mapa de Zonificación Georeferenciado.* En donde se muestra la zonificación sísmica propuesta y las características de cada zona.
8. *Comparación entre la zonificación sugerida y la actual.* Esta etapa es muy importante ya que ayuda a clarificar la veracidad de este trabajo.

El mapa de la metodología se puede observar en la Figura 12. En la esta parte del análisis experimental al estar basados en la zonificación actual, se van a hacer 2 zonificaciones, una gruesa y una fina a partir de la zonificación gruesa previamente propuesta.

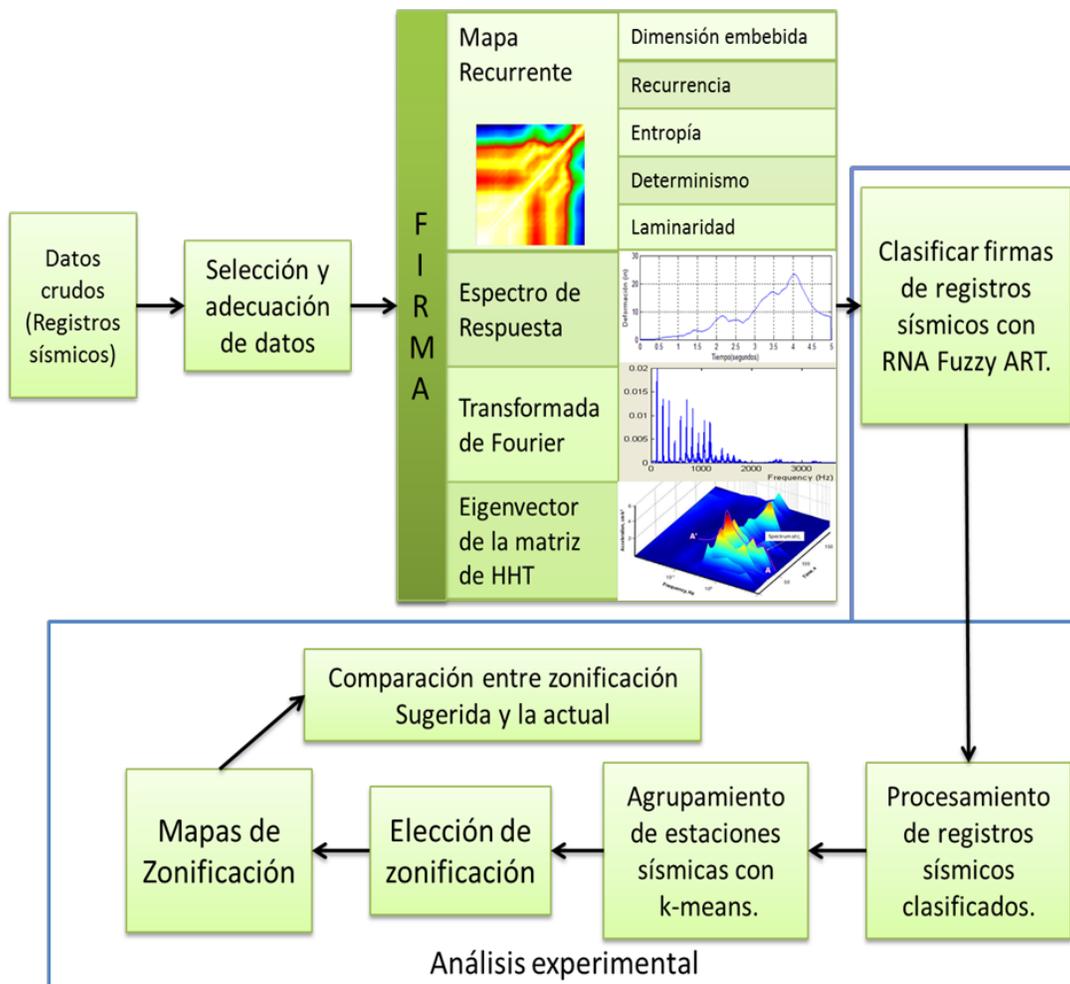


Figura 1. Metodología propuesta.

La forma en que mejor se puede medir el fenómeno sísmico es con acelerógrafos de 3 ejes, en donde se tiene el eje W-E, N-S y vertical, por lo que sería conceptualmente incorrecto mezclar información de los 3 ejes dentro de la firma, por lo que se decidió hacer los análisis por separado, uno para el eje W-E y otro para el N-S, se descarta la utilización del eje vertical ya que en ningún trabajo se utiliza este eje, al no proporcionar información de suficiente relevancia, por tener poca amplitud y por lo tanto causa menor daño sobre estructuras, incluso las tuberías colgantes de edificios están calculadas para soportar movimiento en el eje W-E y N-S despreciando el movimiento en el eje vertical.

En la Tabla 2 se muestran las partes que forma la firma de registros sísmicos.

<b>Técnica de análisis de señales</b>	<b>Número de muestras</b>
<b>FFT</b>	20
<b>ER de desplazamiento</b>	50
<b>ER de velocidad</b>	50
<b>ER de aceleración</b>	50
<b>medidas RP de ER desplazamiento</b>	5
<b>medidas RP de ER velocidad</b>	5
<b>medidas RP de ER aceleración</b>	5
<b>eigenvalor de la matriz de HHT</b>	20

**Tabla 1. Partes de la firma de registros sísmicos.**

### **3.2. Experimentación**

En cuanto a la experimentación, se seleccionaron registros sísmicos, teniendo en cuenta la lista de fechas importantes (Tabla 3), ya que éstos son los sismos de mayor intensidad y con mayor daño, además de que algunos cuentan con características particulares observadas en el efecto sísmico sobre algunas estructuras.

Las fechas fueron obtenidas de United States Geological Survey (USGS), Sistema Sismológico Nacional y de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica [67]. La razón de utilizar varias fechas es incluir toda la dinámica del suelo dentro de la metodología, aun los cambios ocurridos con el tiempo como construcciones de edificios, sobre explotación de mantos acuíferos, etc.

<b>Fecha</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Epicentro</b>
<b>19/09/1985</b>	8.1	Michoacán
<b>25/04/1989</b>	6.9	Costas de Guerrero
<b>03/09/1993</b>	6.5	Chiapas
<b>24/10/1993</b>	6.5	Guerrero
<b>14/03/1994</b>	6.5	Chiapas
<b>14/09/1995</b>	7.3	Guerrero
<b>09/10/1995</b>	8	Colima
<b>25/02/1996</b>	7.1	Oaxaca
<b>11/01/1997</b>	6.5	Michoacán
<b>03/02/1998</b>	6.4	Costas de Oaxaca
<b>15/06/1999</b>	7	Puebla
<b>21/06/1999</b>	6.3	entre Guerrero y Michoacán
<b>30/09/1999</b>	7.4	Costa Oaxaca
<b>09/08/2000</b>	7	Costa de Guerrero y Michoacán
<b>22/01/2003</b>	7.4	Colima
<b>12/02/2008</b>	6.5	Oaxaca

**Tabla 2. Fechas de sismos importantes.**

La forma en la que se ingresan las firmas a la RNA Fuzzy ART es muy importante (Capítulo IV), por lo que se pensó en dos experimentos:

1. Firmas ordenadas por fechas, de la más antigua a la más reciente.
2. Firmas ordenadas por número de registros sísmicos que contiene cada fecha.

Utilizar estas fechas nos restringe a utilizar sólo 98 estaciones sísmicas y 660 registros sísmicos.

### **3.3. Selección y adecuación de la base de datos de sismos fuertes**

#### **3.3.1. Base de Datos Mexicana de Sismos Fuertes**

Se cuenta con 4461 registros sísmicos dentro del Área Metropolitana obtenidos de la Base de Datos Mexicana de Sismos Fuertes, en la que para su creación intervinieron importantes instituciones como [41]:

- Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.
- Comisión Federal de Electricidad.
- Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Fundación ICA.

- Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Centro de Instrumentación y Registro Sísmico.

Contiene registros sísmicos de diferentes eventos sísmicos, de diferente intensidad y origen, registrados en 175 estaciones (Figura 13), del Área Metropolitana. Los registros sísmicos datan desde el 19 de septiembre de 1985 hasta 30 de junio de 2010, esta cantidad de estaciones y registros sísmicos incluye las estaciones y registros sísmicos erróneos.

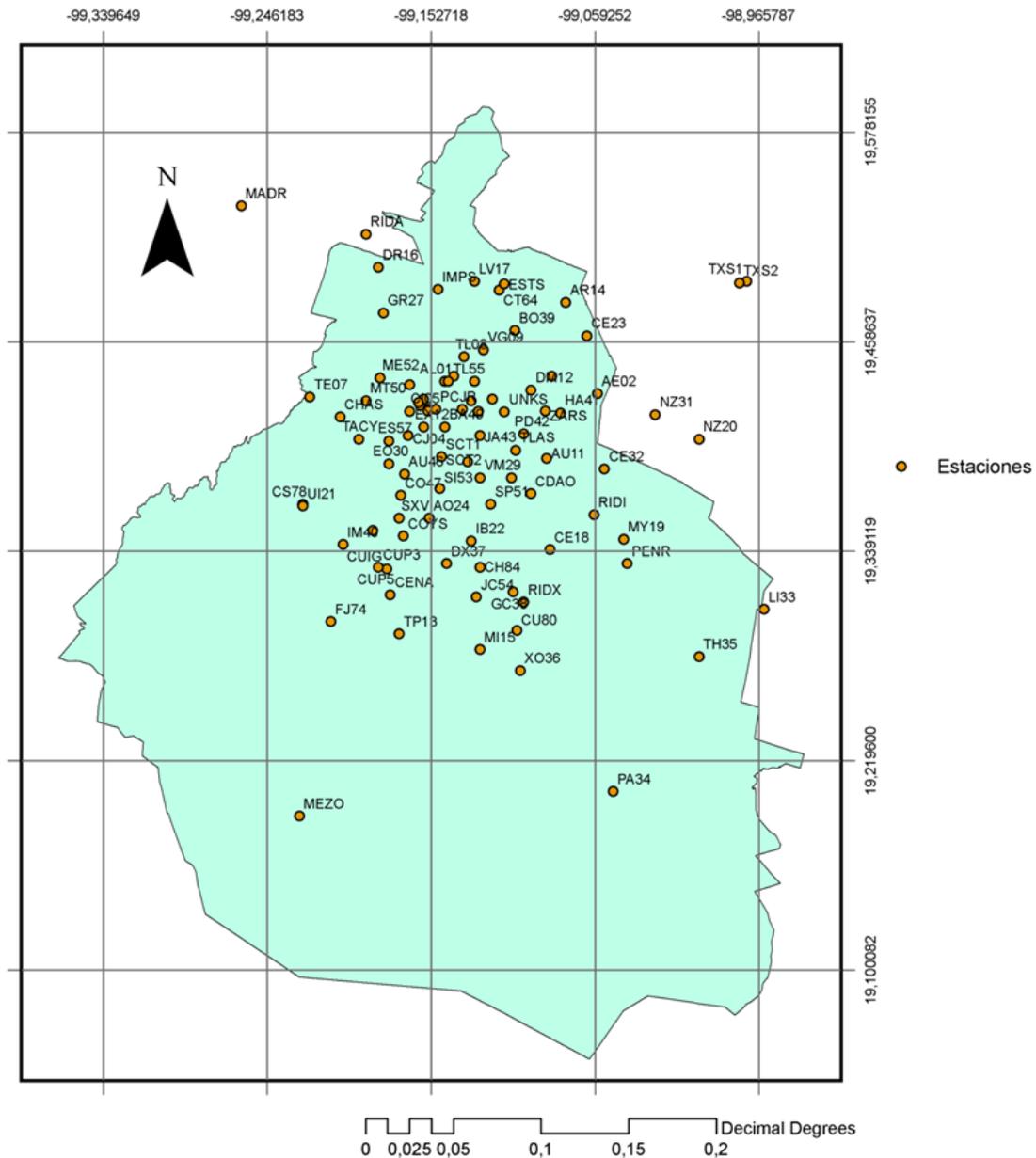


Figura 2. Estaciones sísmológicas dentro del Área Metropolitana.

Cada registro sísmico de la Base de Datos Mexicana de Sismos está en formato de texto ASCII (Figura 14) [41]. Donde cada registro sísmico contiene los siguientes campos:

1. Título: Datos de identificación de la institución responsable, su nombre, dirección, teléfonos, etc.
2. Nombre del archivo: Nombre del archivo, versión del formato, fecha y hora de su creación y referencia al catálogo general de acelerogramas (número del registro y página).
3. Estación e instrumento: Incluye una breve descripción de la estación, su nombre, código asignado, dirección y localización (coordenadas), altitud, tipo de suelo e institución a cargo de su operación. Con respecto al instrumento se especifican los siguientes datos: modelo, número de serie, número de canales, orientación, tasa de muestreo, rango de escala completa, frecuencia natural, amortiguamiento, intervalo de muestreo, umbral de disparo para cada canal, memoria del pre-evento y tiempo de pos-evento.
4. Datos sobre el sismo: Este bloque incluye la fecha y tiempo de origen (GMT) del evento, magnitud, localización del epicentro, profundidad focal y la fuente que proporcionó esta información.
5. Datos sobre el acelerograma: Se especifican el tiempo (GMT) de la primer muestra y su exactitud, duración del registro, número total de muestras, valor máximo de aceleración (en gal) para cada canal junto con la muestra en que ocurrió, el factor de decimación utilizado y por último la especificación del formato tipo FORTRAN utilizado para los valores numéricos.
6. Comentarios: Esta parte del encabezado puede utilizarse para comentarios sobre los datos del acelerograma como por ejemplo la calidad del registro, método de procesamiento, filtrado o alguna información adicional pertinente al registro o al sismo.
7. Datos de la aceleración: Ésta es la parte principal del archivo. Contiene los valores numéricos de aceleración de hasta 12 canales. Cada línea corresponde a una muestra. Las series de datos están organizadas por columnas, cada una con un campo fijo de 10 caracteres y con un formato como el especificado en el encabezado (por ejemplo 3F10.2, que especifica tres números reales de 10 caracteres, 7 para la parte entera y 2 decimales).

```

DATOS DE LA ESTACION:
NOMBRE DE LA ESTACION      : MICONSA ACAPULCO GRO.
TERCER NIVEL ESQ.         :
CLAVE DE LA ESTACION      : AC02
LOCALIZACION DE LA ESTACION : Academia de Policia
Tercer nivel              :
                           : esquina Sur
                           : UNIDADES DE LOS DATOS      : Gal (cm/s/s)
                           : FACTOR DE DECIMACION      : 1
                           : FORMATO DATOS (FORTRAN,10 campos/dato) : 3F10.2
                           :
COORDENADAS DE LA ESTACION : 16.960 LAT.
                           : 99.950 LONG.
ALTIUD (msnm)             : 0
TIPO DE SUELO             : ESTRUCTURA
                           :
INSTITUCION RESPONSABLE   : CIRES
                           : COMENTARIOS:
                           :
=====
DATOS DEL ACELEROGRAFO:
INTERVALO DE MUESTREO, C1-C6, (s) : /0.01/0.01/
INTERVALO DE MUESTREO, C7-C12, (s) :
=====
DATOS DE ACCELERACION:
CANAL-1  CANAL-2  CANAL-3  CANAL-4  CANAL-5  CANAL-6  CANAL-7  CANAL-8
N54W;+L  +V;V     S36W;-T
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
DATOS DEL SISMO:
FECHA DEL SISMO (GMT)      : 15/ABR/94
HORA EPICENTRO (GMT)      : 04:48:18.5
MAGNITUD(ES)              : /Mb=4.00/Mc
COORDENADAS DEL EPICENTRO : 16.740 LAT. ..
                           : 99.630 LONG. W
PROFUNDIDAD FOCAL (km)    : < 5
FUENTE DE LOS DATOS EPICENTRALES : SSN
UNAM
=====
DATOS DE ESTE REGISTRO:
HORA DE LA PRIMERA MUESTRA (GMT) : 04:48:25.31
EXACTITUD DEL TIEMPO (s)        : 0.01
DURACION DEL REGISTRO (s), C1-C6 : /21.81/21.81/21.81
DURACION DEL REGISTRO (s), C7-C12 :
NUM. TOTAL DE MUESTRAS, C1-C6   : /2181/2181/2181
NUM. TOTAL DE MUESTRAS, C7-C12 :
ACEL. MAX. (Gal), C1-C6        : /19.06/16.23/27.44

```

Figura 3. Ejemplo de registro de la base de datos de sismos fuertes.

### 3.3.2. Selección y adecuación de la base de datos de sismos fuertes

La base de datos está hecha en Mysql, ya que es fácil realizar una conexión con C++ y Matlab, está diseñada de tal forma que se puedan agregar fácilmente tablas con el contenido de las mediciones de cada una de las técnicas. También permite hacer consultas por registro, permitiendo que se pueda formar con facilidad la firma del registro con la información contenida en la BD, así como borrar registros sísmicos por estación o por registro sísmico (Figura 15).

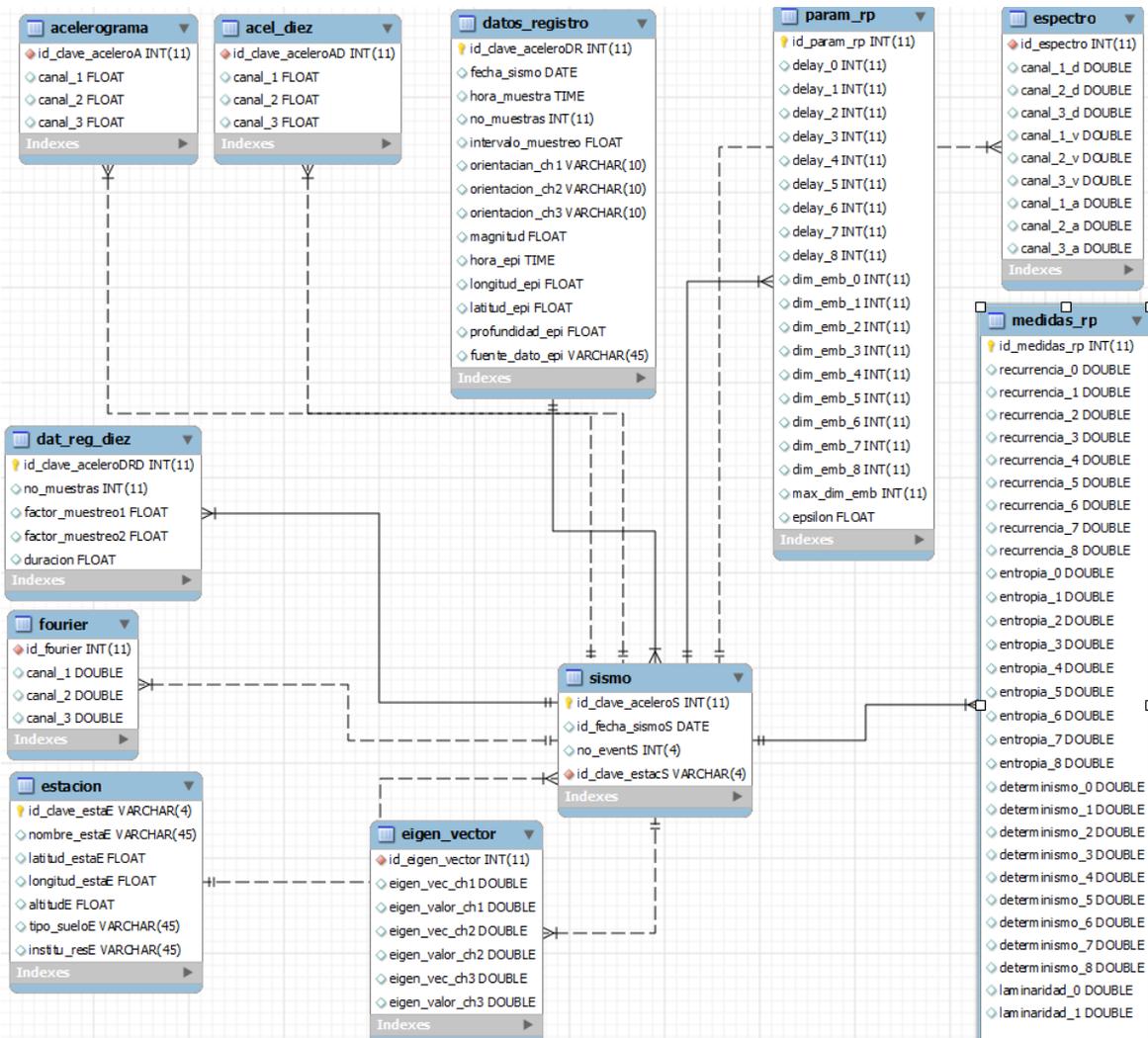


Figura 4. Diagrama entidad-relación de la base de datos de sismos.

Antes de la etapa 2 *Creación de las firmas de los registros sísmicos*, se debe garantizar que los registros sísmicos estén bien ordenados y sean confiables, ya que de esta forma se podrá garantizar que los datos de entrada en la metodología sean fiables.

Esta etapa es necesaria al ser de nuestro conocimiento que la BMSF tiene algunos problemas.

Los problemas encontrados y corregidos dentro de la base de datos son:

- ◆ Campos del registro sísmico incompletos.
- ◆ Acelerogramas incompletos.
- ◆ Acelerogramas con valores falsos (demasiado grandes, etc.).
- ◆ Orientaciones de los canales del acelerógrafo no estandarizados (Apéndice B.1.).
- ◆ Formatos de fecha variados.
- ◆ Campos de registro sísmico vacíos.
- ◆ Anotaciones en área de comentarios y de calidad de acelerograma que indican que no tiene buena calidad el registro.

- ◆ Tipos de suelo ambiguos (zona transición, roca, edificio, arcilla, duro, etc.).

El proceso de depuración de la base de datos fue hecho en varias partes, ya que originalmente la base de datos tiene 12000 registros sísmicos de varias partes de la república, y al desconocer algunos errores, se tuvo que ir depurando en varias etapas, para ir simplificando el problema y llegar a una base de datos confiable:

Orden de creación de la base de datos de sismos fuertes correcta:

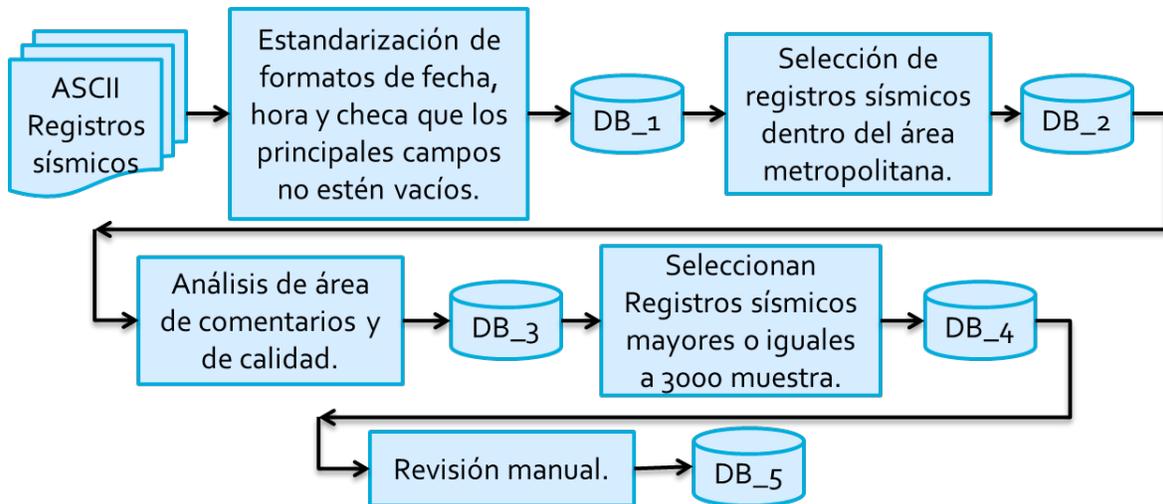


Figura 5. Diagrama de selección y adecuación de la base de datos de sismos fuertes.

1.- Se crea la base de datos DB\_1, la cual se llena con las información leída de los registros sísmicos en texto, también se estandarizaron los formatos de fecha, hora y comprueba que los principales campos no estén vacíos.

Los campos guardados en esta base de datos son: fecha del sismo, número de evento, clave de estación, nombre de la estación, ubicación de la estación ( latitud, longitud y altitud), tipo de suelo sobre la que está ubicada la estación, institución responsable de la estación sísmica, hora en la que se recibió la primera muestra, número de muestras, intervalo de muestreo, orientación del canal 1, orientación del canal 2, orientación del canal 3, magnitud, hora del sismo en el epicentro, ubicación del epicentro (longitud, latitud y profundidad), fuente de datos epicentrales, acelerograma del canal 1, acelerograma del canal 2, acelerograma del canal 3.

2.- se seleccionan los registros sísmicos de DB\_1 que estén dentro del Área Metropolitana y se copian a la base de datos DB\_2 (Figura 17).

3.- De los registros sísmicos de DB\_2 se analiza el campo número de muestras para que sea consistente con el tamaño de acelerograma, también analiza el área de comentarios y la de calidad de acelerogramas, los registros sísmicos correctos se pasan a la DB\_3.

4.-Se seleccionan los registros sísmicos de DB\_3 que tienen número de muestras mayores o igual a 3000 y se copian a DB\_4.

5.-Se revisan de forma manual cada uno de los acelerogramas de la DB\_4 para identificar algunas señales erróneas como acelerograma en forma de senoidal, magnitudes de aceleraciones descabelladas, etc, también solo utilizan registros sísmicos de estaciones sísmicas que este en superficie. Y se copian todos los registros sísmicos correctos a la DB\_5.

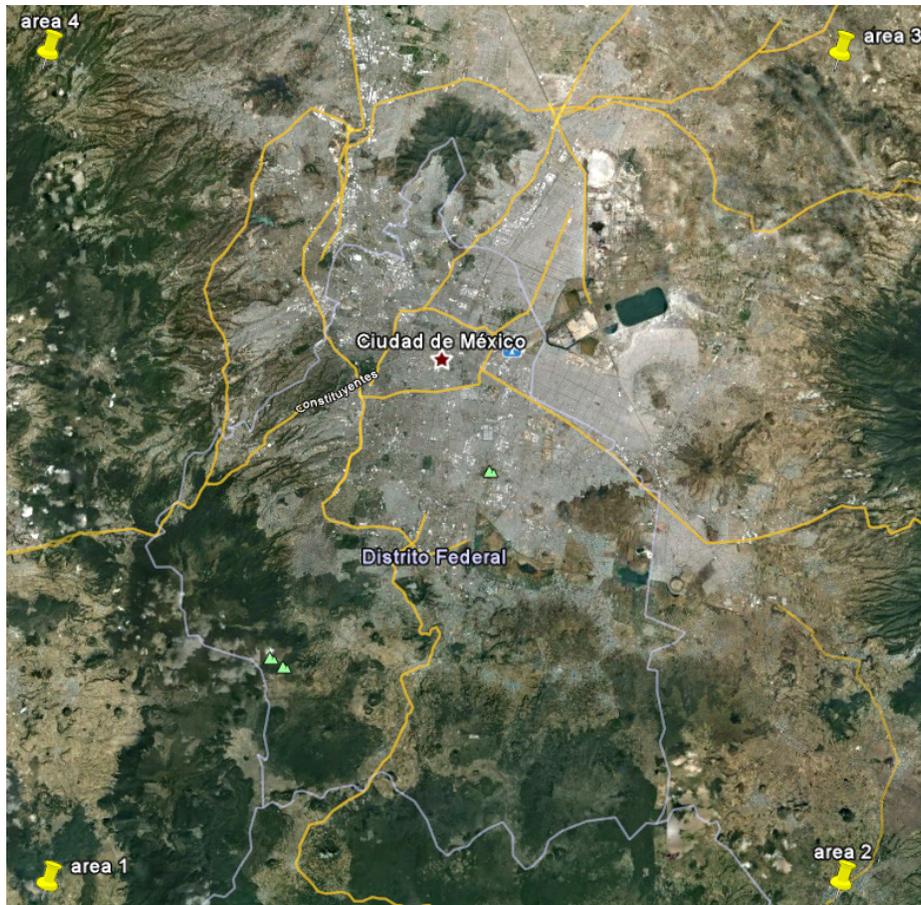


Figura 6. Delimitación del Área Metropolitana. Área 1(19.024691° latitud, -99.441895° longitud), Área 2(19.024691° latitud, -98.817529° longitud) Área 3(19.641696° latitud, -98.817529° longitud) Área 4(19.641696° latitud, -99.441895° longitud).

Para obtener más detalle del procedimiento consultar el “ Apéndice A.2. Creación de la base de datos”.

Una vez terminado este procedimiento se aumenta la confiabilidad de los datos, y se puede comenzar con la etapa 2 *Creación de las firmas de los registros sísmicos*.

### **3.3.3. Recomendaciones para el mejoramiento de la Base de Datos Mexicana de Sismos Fuertes**

Al conocer a fondo la Base de Datos Mexicana de Sismos Fuertes se identificaron algunos errores que pueden ser prevenidos, por lo que se propone una lista de mejoras para la BDMSF:

- Estandarizar las orientaciones de las estaciones sísmicas.
- Estandarizar los formatos de fecha y hora.
- Agregar el campo “última fecha de mantenimiento” dentro de los datos de “estación e instrumento”.
- Estandarizar tipos de suelo.
- Agregar campo “nivel”, puede ser superficie, pozo, 1er piso, etc.

Las mejoras propuestas son pensadas para reducir el tiempo de selección de registros sísmicos y aumentar la fiabilidad de los datos, para utilizar la BDMSF con fines de investigación.

# Capítulo IV. Descripción de técnicas

A continuación se explica el funcionamiento de las técnicas que conforman las firmas de los registros sísmicos, y también se argumenta porque se escogieron estas técnicas. Los algoritmos y pseudocódigos se presentan en cada técnica, pero por espacio los códigos fuente de los programas están en el disco adjunto a la tesis, la explicación del uso de los programas está en el Apéndice A.4.

## 4.1. Espectro de respuesta

Los espectros de respuesta fueron inicialmente propuestos por Biot [68] en el año 1932 y luego desarrollados por Houser [69] y Newmark [70].

El espectro de respuesta es un modelo que caracteriza el movimiento del suelo y sus efectos en estructuras, por medio una gráfica de los máximos desplazamientos, velocidades y aceleraciones absolutas de respuesta relativas en un oscilador de un grado de libertad, sometido a un movimiento ocasionado por un sismo, el cual está especificado en términos de aceleración del suelo [1,2,16].

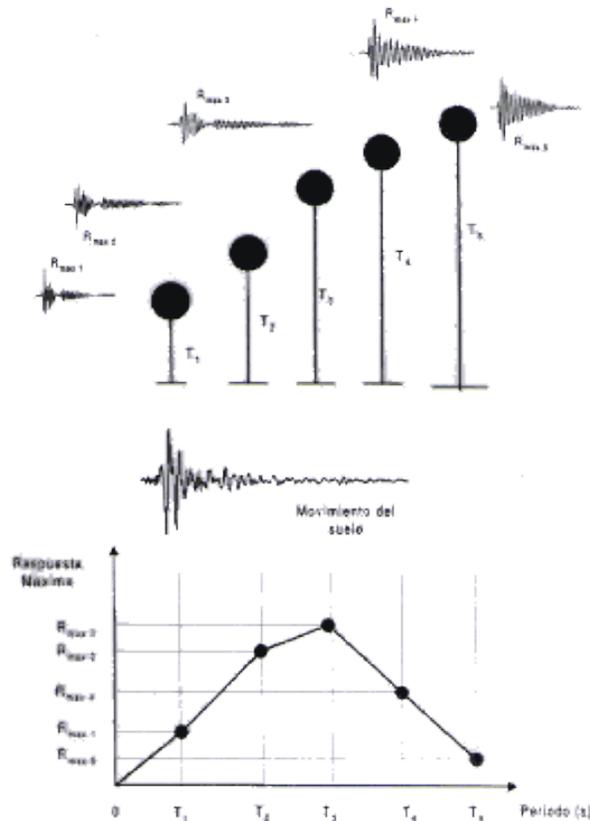


Figura 1. Espectro de respuesta.

Este modelo se comporta como un péndulo invertido, el cual aplicándole una excitación en este caso un acelerograma, se puede observar la respuesta máxima de ese péndulo, esto se observa en varios períodos de tiempo (Figura 18).

Este es un procedimiento estándar utilizado por los ingenieros geotécnicos y estructurales para diseño sísmico de estructuras, ya que mediante esta técnica se puede calcular y modelar el máximo de fuerzas dinámicas que actúan sobre la estructura, por ejemplo: conociendo el desplazamiento total de una masa podría ser utilizado para calcular la suficiente separación entre construcciones, evitando las fricciones durante un sismo, y también se utiliza en la creación de códigos de construcciones [1,2,3].

De la ecuación de movimiento ( 1 ) que gobierna el desplazamiento relativo o deformación  $u(t)$  de una estructura lineal sujeta a una aceleración del suelo.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

La aceleración del suelo  $\ddot{u}_g(t)$  aparece en el lado derecho de la ecuación diferencial que gobierna la respuesta de estructuras a una excitación de terremoto, en consecuencia para una aceleración del suelo dada, el problema se resuelve definitivamente con un sistema simple de un grado de libertad (Figura 19), con una masa conocida, rigidez y amortiguamiento.

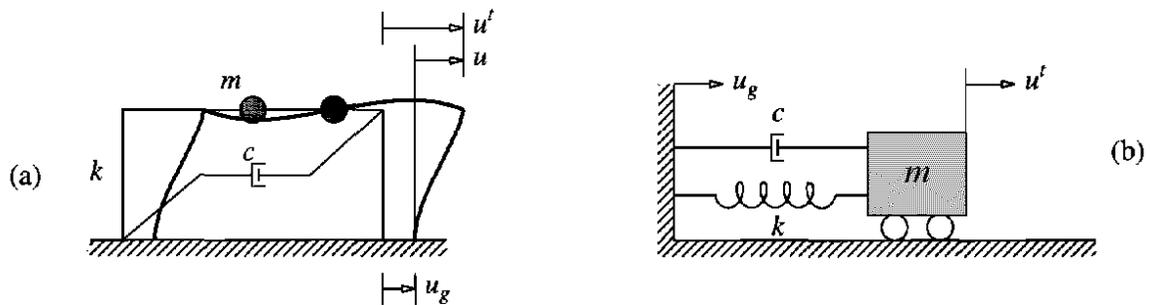


Figura 2. Sistema simple de un grado de libertad.

Al dividir la ecuación ( 1 ) entre  $m$  (masa) se obtiene la ecuación del modelo ( 2 ), donde para un  $\ddot{u}_g(t)$ , la respuesta de deformación  $u(t)$  del sistema depende sólo de la frecuencia natural  $\omega_n$  o período natural  $T_n$  del sistema y el factor de amortiguamiento  $\zeta$ .

Para calcular el espectro de respuesta se utilizó un método numérico basado en interpolación de excitación [1,2,3].

Dadas las ecuaciones de espectro de deformación ( 3 ), velocidad ( 4 ), aceleración absoluta ( 5 ) dan solución a la ecuación de movimiento de un grado de libertad ( 2 ).

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = -\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

$$u_{i+1} = Au_i + B\dot{u}_i + Cp_i + Dp_{i+1} \quad (3)$$

$$\dot{u}_{i+1} = A'u_i + B'\dot{u}_i + C'p_i + D'p_{i+1} \quad (4)$$

$$\ddot{u}_{i_{absoluta}} = \ddot{u}_i + \ddot{u}_g(t) = -(2\zeta\omega_n\dot{u}_i + \omega_n^2u_i) \quad (5)$$

Donde:  $\omega_n$  es la frecuencia natural.

$\zeta$  es el factor de Amortiguamiento.

$\ddot{u}_g$  es la aceleración del acelerograma.

Los coeficientes A,B,C,D, A',B',C',D' (6-13) sólo necesitan ser calculados una vez para cada miembro del historial de respuesta.

$$A = e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left( \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_D\Delta t + \cos \omega_D\Delta t \right) \quad (6)$$

$$B = e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left( \frac{1}{\omega_D} \sin \omega_D\Delta t \right) \quad (7)$$

$$C = \frac{1}{k} \left\{ \frac{2\zeta}{\omega_n\Delta t} + e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left[ \left( \frac{1-2\zeta^2}{\omega_D\Delta t} - \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right) \sin \omega_D\Delta t - \left( 1 + \frac{2\zeta}{\omega_n\Delta t} \right) \cos \omega_D\Delta t \right] \right\} \quad (8)$$

$$D = \frac{1}{k} \left[ 1 - \frac{2\zeta}{\omega_n\Delta t} + e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left( \frac{2\zeta^2-1}{\omega_D\Delta t} \sin \omega_D\Delta t + \frac{2\zeta}{\omega_n\Delta t} \cos \omega_D\Delta t \right) \right] \quad (9)$$

$$A' = e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left( \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_D\Delta t \right) \quad (10)$$

$$B' = e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left( \cos \omega_D \Delta t - \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_D \Delta t \right) \quad (11)$$

$$C' = \frac{1}{k} \left\{ -\frac{1}{\Delta t} + e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left[ \left( \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} + \frac{\zeta}{\Delta t\sqrt{1-\zeta^2}} \right) \sin \omega_D \Delta t + \frac{1}{\Delta t} \cos \omega_D \Delta t \right] \right\} \quad (12)$$

$$D' = \frac{1}{k\Delta t} \left[ 1 - e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left( \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_D \Delta t + \cos \omega_D \Delta t \right) \right] \quad (13)$$

Donde:  $k$  es la rigidez lateral.  
 $\omega_n$  es la frecuencia natural.  
 $\omega_D$  es la frecuencia natural amortiguada.  
 $\zeta$  es el factor de amortiguamiento.  
 $\Delta t$  es el intervalo de muestreo.

Para calcular los coeficientes también es necesario calcular la rigidez lateral, y la frecuencia natural y natural amortiguada.

$$\omega_n = \left( \frac{2\pi}{T_n} \right) \quad (14)$$

$$\omega_D = \omega_n * \sqrt{1-\zeta^2} \quad (15)$$

$$k = \omega_n^2 * m \quad (16)$$

Donde:  $T_n$  es el período natural.

El procedimiento se hace para un período de tiempo, y se guarda el espectro, después se incrementa el período y se guarda el espectro, para diferentes períodos de tiempo de manera que se genera un historial de respuesta.

Después se obtiene el valor máximo de cada uno de los miembros del historial de respuesta, obteniendo el espectro de respuesta para deformación ( 17 ), velocidad ( 18 ), y aceleración absoluta ( 19 ).

$$u_0(T_n, \zeta) \equiv \max_t |u(t, T_n, \zeta)| \quad (17)$$

$$\dot{u}_0(T_n, \zeta) \equiv \max_t |u(t, T_n, \zeta)| \quad (18)$$

$$\ddot{u}_0(T_n, \zeta) \equiv \max_t |\ddot{u}(t, T_n, \zeta)| \quad (19)$$

Donde:  $T_n$  es el período natural.

Este proceso se ilustra con mayor claridad en el siguiente diagrama:

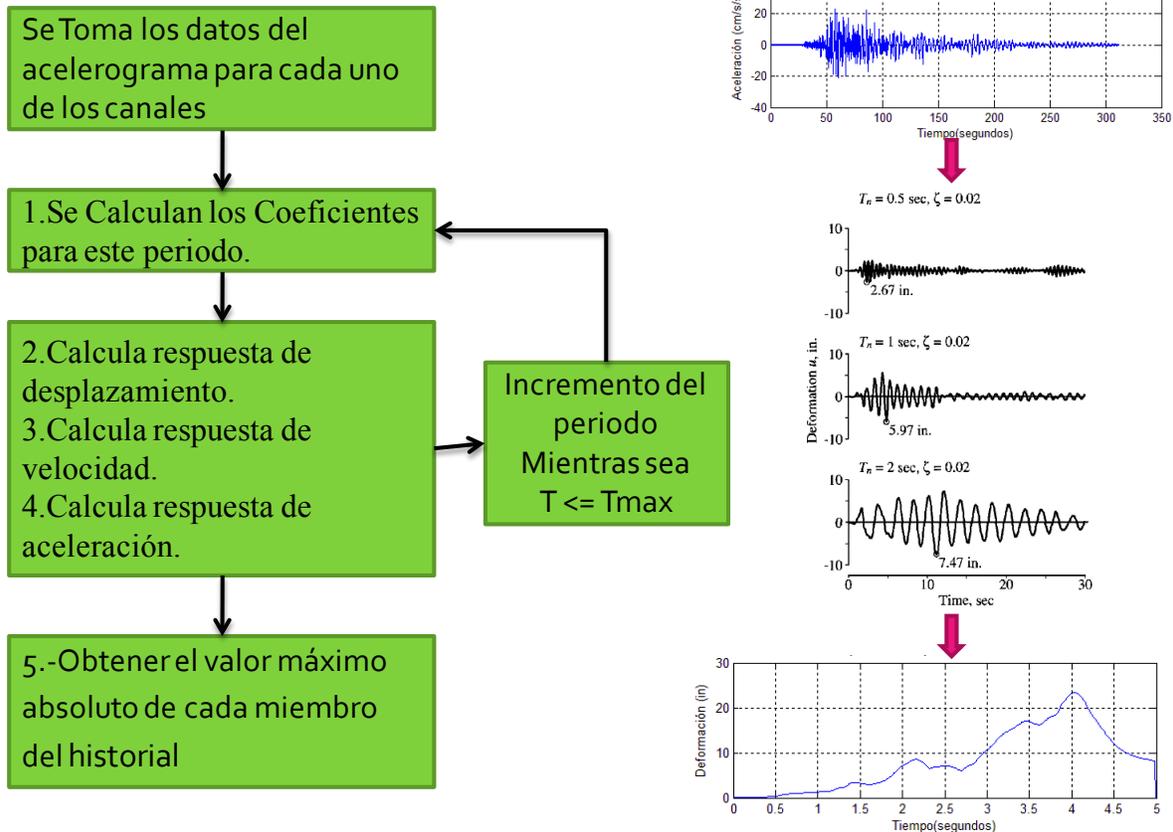


Figura 3. Diagrama de cálculo de espectro de respuesta.

Se hizo un programa que calcula el espectro de respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración absoluta, utilizando cómputo de alto rendimiento en GPU sobre la arquitectura de CUDA [20]. Se desarrolló este código ya que el software existente creado por la UNAM (Degtra) [9], es comercial y no se puede obtener el código para modificarlo y poderlo hacer en forma masiva.

El funcionamiento del programa se muestra en el siguiente pseudocódigo:

```

////////////////////////////////////
For i=0; i<3
  Acelerograma=lee_acelero_db(i);
  Reserva_memoria_host&device();
  Copia_acelero_host->device();

```

```

Ejecuta_kernel_500hilos();
Copia_historial_de_espectros_Device->Host();
Selecciona_los_valores_maximos_absolutos_para_espectrs_del_historial();
Envía_especs_db();
End-for

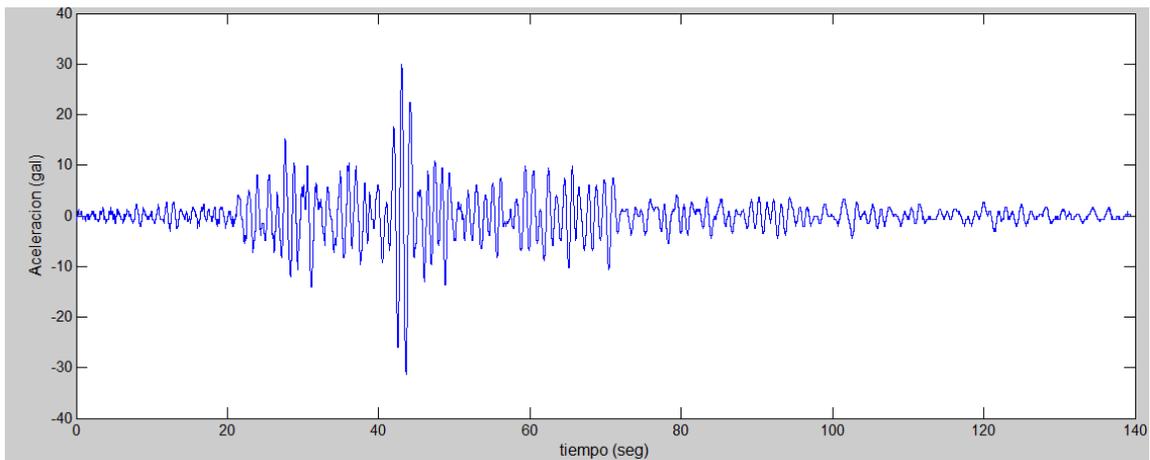
////////kernel de cuda
Id=obtiene_identificador_hilo();
// indices
Calcula indice del hilo();
Calcula(wn,wd,k) para este hilo
calculan_los_coeficientes();

For( y=0;y<numMue;y++)

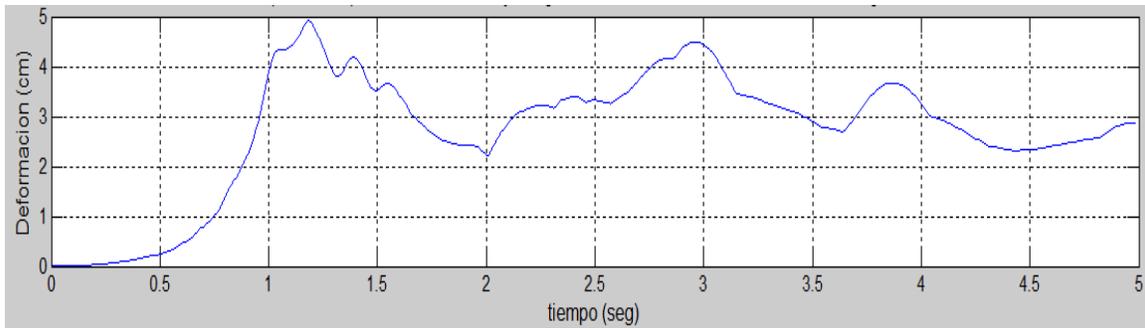
    obtiene_vectores_acelerograma a(i) y a(i+1) ();
    obtiene_vectores x(i) y ^x(i);
//desp
    calcula un punto del espectro de desplazamiento();
//vel
    calcula un punto del espectro de velocidad();
//acel
    calcula un punto del espectro de aceleracion();
End-for
////////////////////////////////////

```

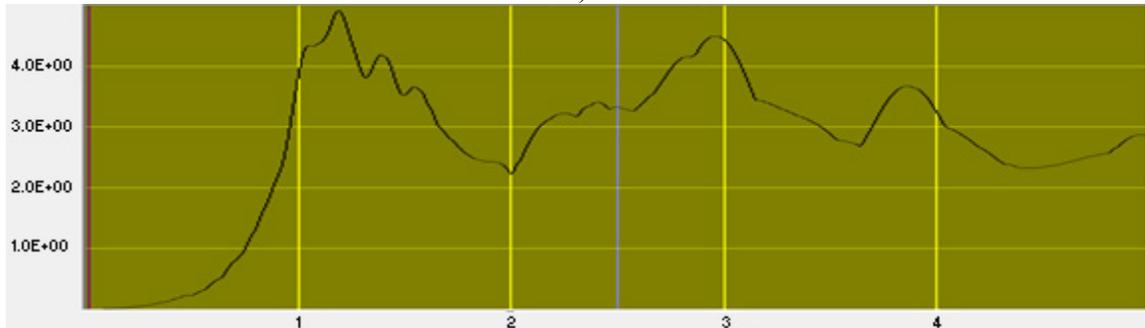
En las figura 22 a 28 se muestran las gráficas resultantes del cálculo de los espectros de respuesta del acelerograma de la Figura 21, comparadas con las del software Degtra, en las que se puede observar que dan el mismo resultado, a diferencia que el nuestro tiene mayor precisión numérica ya que el Degtra sólo muestra 4 decimales a partir del exponente.



**Figura 4. Acelerograma eje W-E del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24.**



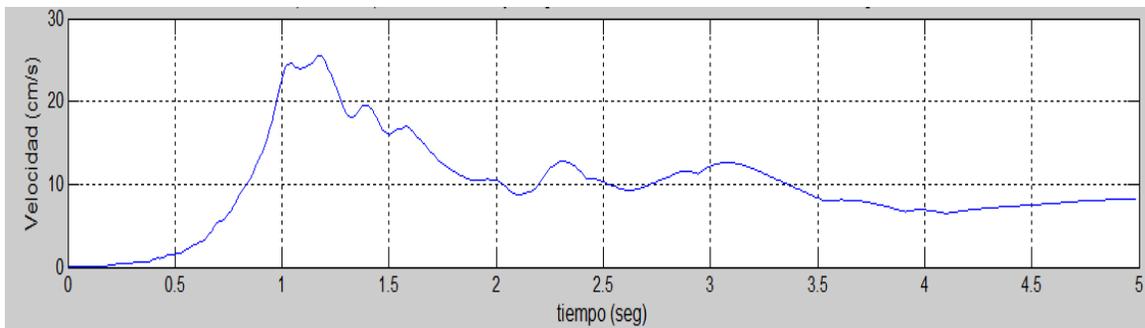
a)



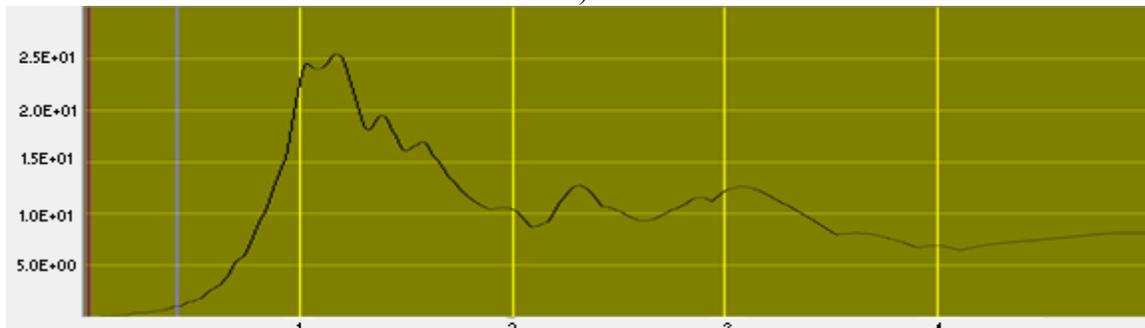
b)

Figura 5. Comparación de espectros de respuesta de deformación: a) obtenido, b) obtenido con Degtra. Eje W-E del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24.

En la Figura 22 se observa que en el período de 2.1 s alcanzo una máxima deformación.



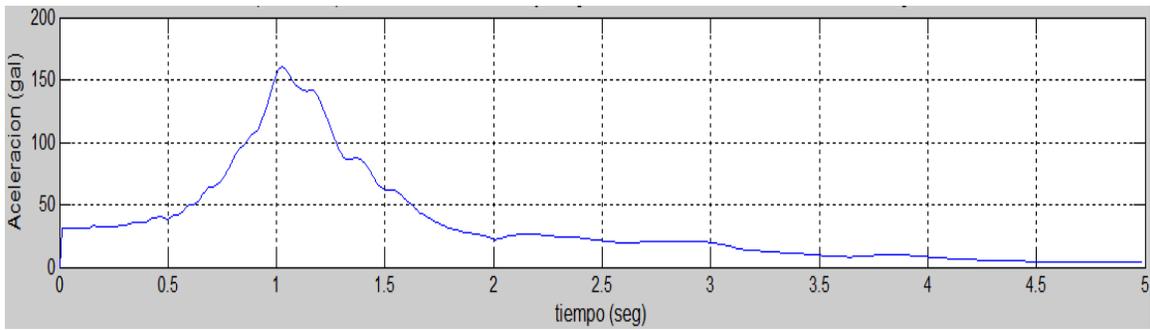
a)



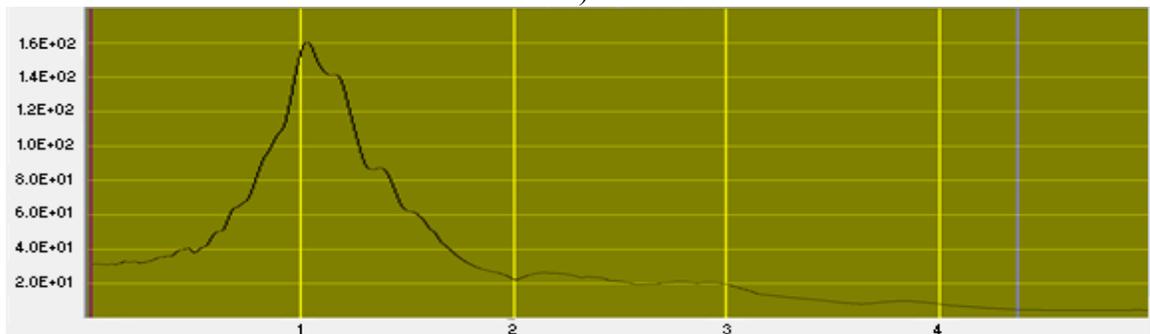
b)

Figura 6. Comparación de espectro de respuesta de velocidad : a) obtenido, b) obtenido con Degtra. Eje W-E del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24.

En la Figura 23 se observa que en el período de 2.1 s alcanzó una máxima deformación.



a)



b)

Figura 7. Comparación de espectro de respuesta de aceleración absoluta : a) obtenido, b) obtenido con Degtra. Eje W-E del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24.

En la Figura 24 se observa que en el período de 2.1 s alcanzó una máxima deformación.

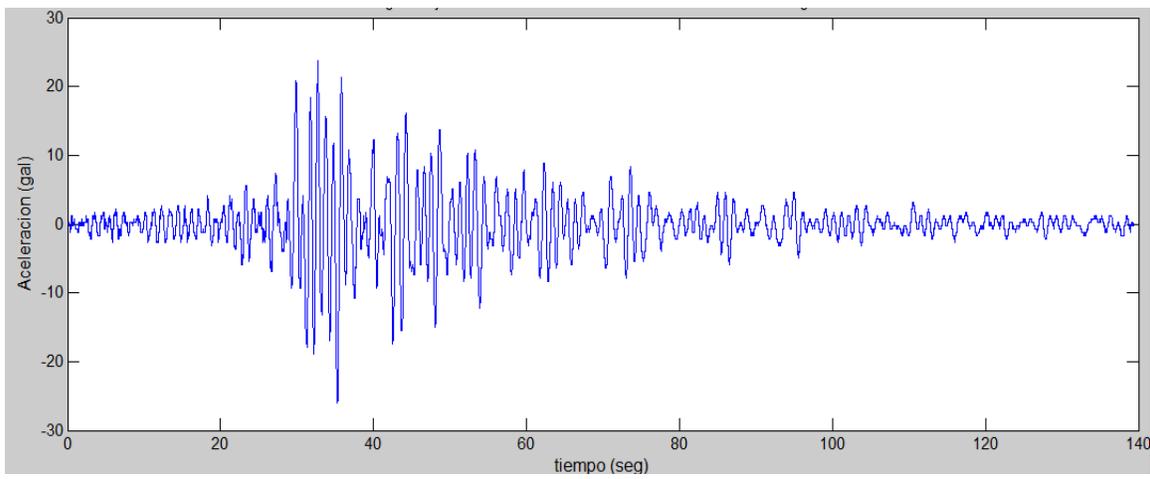
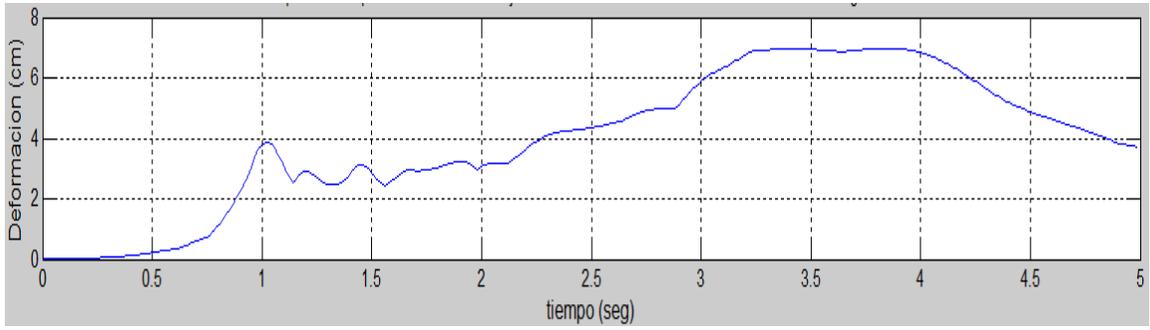
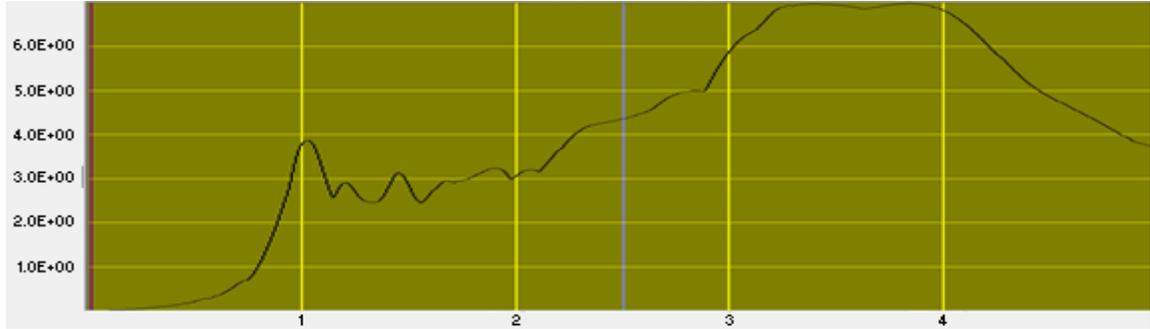


Figura 8. Acelerograma eje N-S del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24.

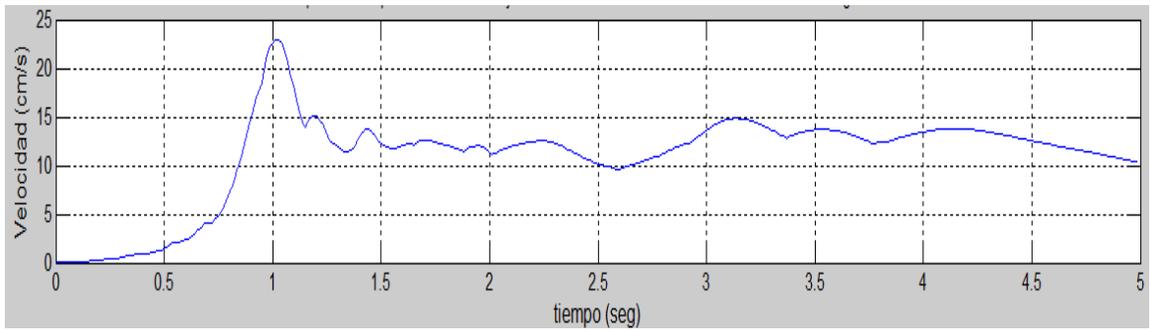


a)

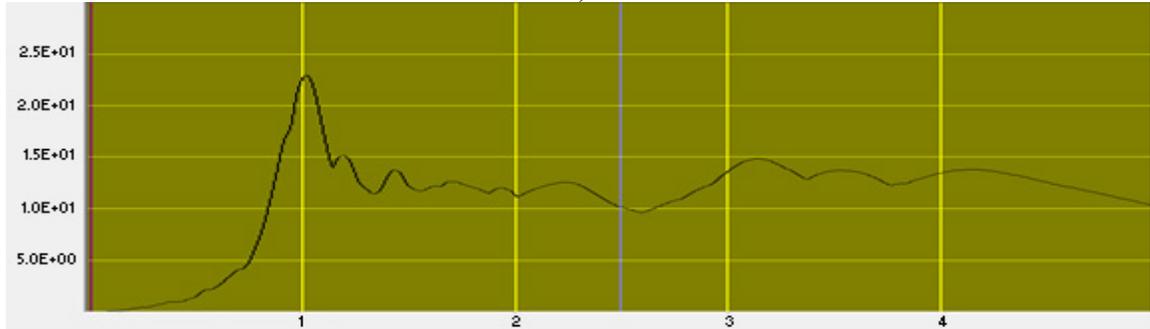


b)

Figura 9. Comparación de espectros de respuesta de deformación: a) obtenido, b) obtenido con Degtra. Eje N-S del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24.

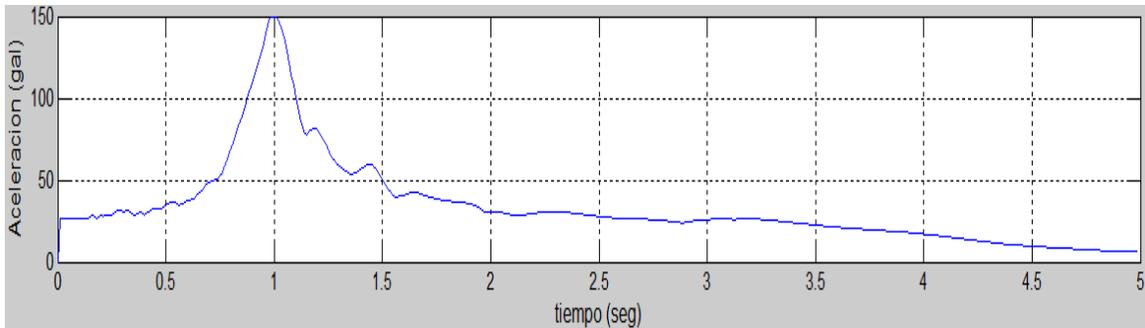


a)

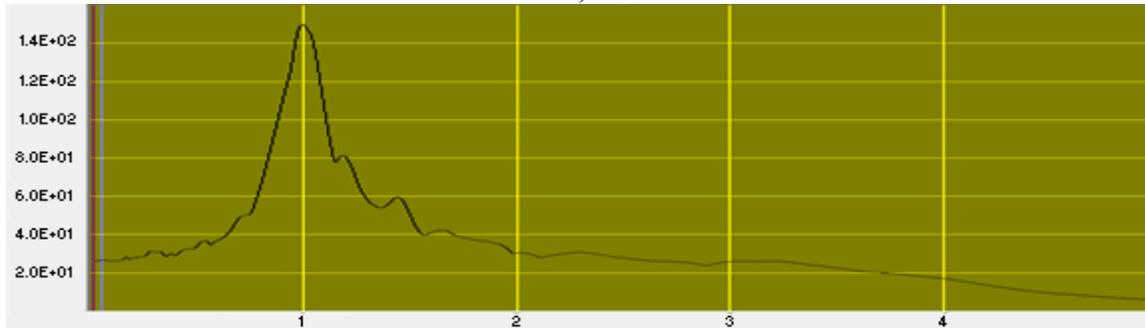


b)

Figura 10. Comparación de espectros de respuesta de velocidad: a) obtenido, b) obtenido con Degtra. Eje N-S del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24.



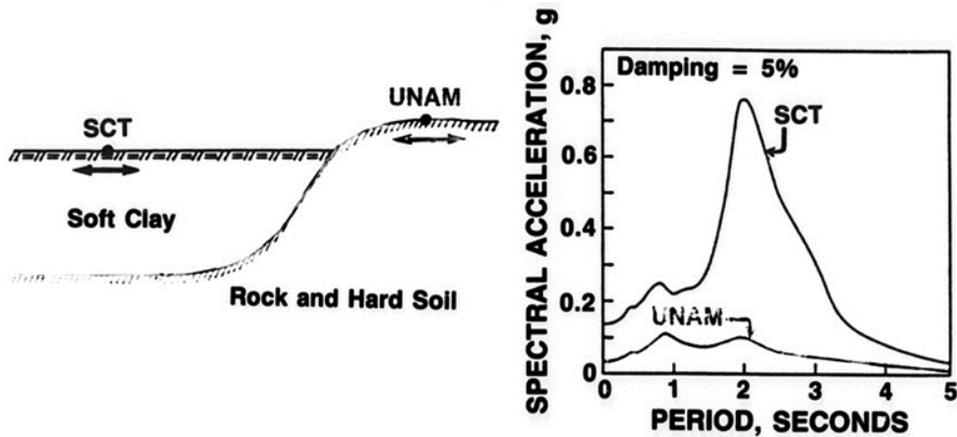
a)



b)

Figura 11. Comparación de espectros de respuesta de aceleración absoluta: a) obtenido, b) obtenido con Degtra. Eje N-S del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24.

Entre mayor sea al período en el que se dio la máxima amplitud se podría decir que se habla de un terreno más blando, también se puede observar amplificaciones en el suelo (Figura 29).



Recorded Motions, Romo and Seed (1986)

Figura 12. Amplificación del suelo en la Ciudad de México.

Los espectros de respuesta son calculados con un coeficiente de amortiguamiento de 5% y un máximo periodo de 5s, de los cuales se tomaron 50 muestras de cada espectro de respuesta, que se incluirán dentro de la firma. Para calcularlos el programa "cudaQt\_espec\_fft\_sn-rp" (Apéndice A.4.) se conecta a la base de datos para leer los acelerogramas, calcula los espectros de respuesta para cada eje de análisis y después los almacena en la base de datos de sismos fuertes.

## 4.2. Transformada de Fourier

El terremoto del 19 de septiembre de 1985 en la ciudad de México mostró tres características muy importantes de concentración de daño en la cama de lago, una peculiar distribución de alto y bajo daño en áreas alternadas de unas pocas calles, y una selectividad de edificios entre 5 y 15 pisos, confirma la relevancia del suelo suave y sugiere un fenómeno de resonancia, por lo que es muy importante con fines de caracterización, el conocimiento de los componentes de frecuencia de cada registro sísmico [39]

La técnica que permite el uso de una computadora digital para calcular la respuesta de frecuencia a partir de una respuesta impulsiva y viceversa, es la transformada discreta de Fourier (Discrete Fourier Transform DFT) y su más eficiente realización la transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform FFT).

A través de la técnica de la transformada de Fourier es posible la representación de cualquier señal periódica en términos de su espectro o componentes de frecuencia. Esto da al investigador tremenda flexibilidad, porque la información que está oculta en la señal, es presentada como obvia en el espectro de la misma al ser calculados los coeficientes de Fourier [38,39,40].

La FFT obtiene exactamente los mismos resultados que la DFT pero mucho más rápido ( $N^2$  para DFT y  $N \log_2 N$  para FFT). La restricción del algoritmo de la FFT es, que la secuencia de datos a transformar tiene que ser de longitud igual a una potencia de 2 ( $2^n$ ). Si su aplicación así no lo requiere, se rellena con ceros el resto de los valores del arreglo de datos, hasta completar el próximo valor potencia de 2.

Se utilizó una librería de CUDA llamada CUFF, el cual está basado en un algoritmo divide y vencerás, para un cálculo rápido de la FFT en un GPU de NVIDIA [44].

Principales características:

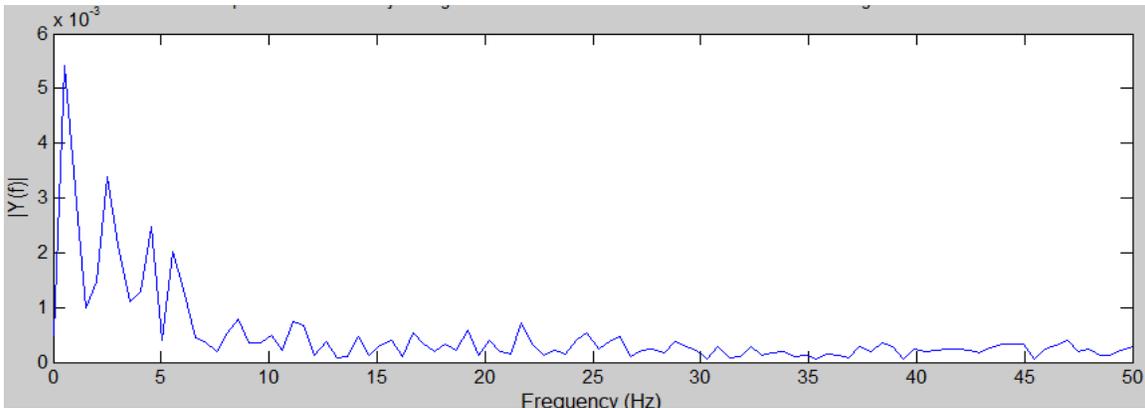
- Soporta transformadas en 1D, 2D, 3D de datos complejos y reales.
- El tamaño máximo en una transformada en 1D es 8 millones de elementos
- Posibilidad de ejecución en forma masiva para múltiples transformaciones en paralelo.

Fragmento de código para calcular la transformada rápida de Fourier.

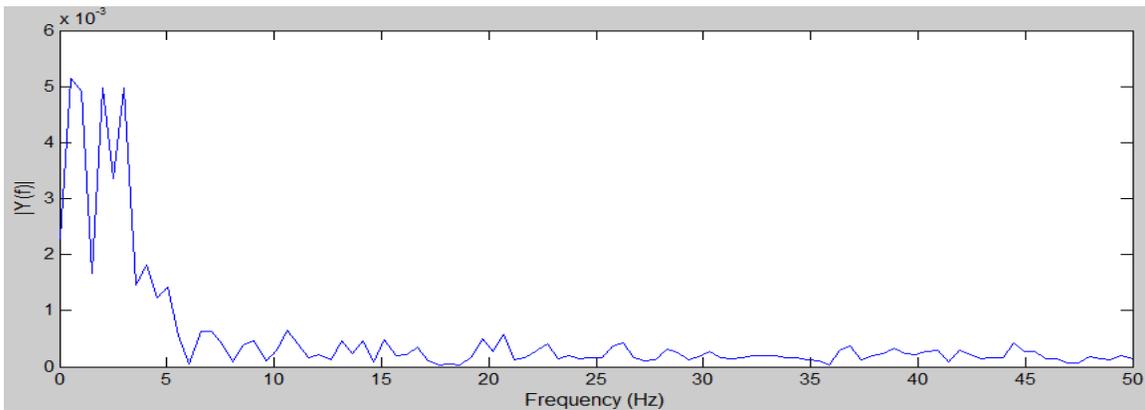
```
////////////////////////////////////  
//Reserva de memoria en el Host para el resultado  
    o_datos_h=(cufftComplex *)malloc(sizeof(cufftComplex)*num_mue);  
//Reserva de memoria en el Device para el resultado y Entrada de datos  
    cudaMalloc((void**)&o_datos, sizeof(cufftComplex)*num_mue);  
    cudaMalloc((void**)&i_datos, sizeof(cufftReal)*num_mue);  
//copia datos de entrada del Host al Device  
    cudaMemcpy(i_datos,          ch1A,          sizeof(cufftReal)          *num_mue,  
cudaMemcpyHostToDevice);  
// Crea un plan FFT 1D  
    cufftPlan1d(&plan, num_mue, CUFFT_R2C, 1);  
// Usa el plan de CUFF para realizar la transformada  
    cufftExecR2C(plan, (cufftReal*)i_datos, (cufftComplex*)o_datos);
```

```
//copia resultado del Device al Host
    cudaMemcpy(o_datos_h, o_datos, sizeof(cufftComplex)
              *num_mue,cudaMemcpyDeviceToHost);
////////////////////////////////////
```

En la Figura 30 y Figura 31 se pueden observar unos espectros de Fourier que muestran los componentes espectrales de ese acelerograma teniendo su mayor parte de componentes espectrales de un rango de 10 Hz.



**Figura 13. Espectro de Fourier de acelerograma del eje W-E del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24.**



**Figura 14. Espectro de Fourier de acelerograma del eje N-S del sismo de 14/09/1995 con 6.4 ° de magnitud, registrado en la estación AO24.**

Los espectros de Fourier son calculados en short-time a 100, de los cuales se tomaron 20 muestras de cada Espectro de Fourier, que se incluirán dentro de la firma. Para calcularlos el programa “cudaQt\_espec\_fft\_sn-rp” (Apéndice A.4.) se conecta a la base de datos para leer los acelerogramas, calcula los espectros de Fourier para cada eje de análisis y después los almacena en la base de datos.

### 4.3. Mapa recurrente

Mapa recurrente (RP) es una técnica que fue creada para visualizar estados de recurrencia y comportamiento no estacionario, por lo que es típico su uso para análisis de series de tiempo no lineales. Revela las veces que una trayectoria del espacio de fase de un sistema dinámico visita la misma zona en espacio de fase. Su principal característica es que nos puede ofrecer más información acerca del fenómeno, se pueden obtener las siguientes medidas: porcentaje de recurrencia, porcentaje de determinismo, entropía, por mencionar algunas. También se ha demostrado que es muy apto para el estudio de este fenómeno en algunos trabajos relacionados con análisis de series de tiempo en clasificación de sismos y sincronización de series de tiempo, y análisis de sistemas no lineales [5,4,6,11,15,16].

Como se mencionó anteriormente el mapa recurrente fue creado para visualizar estados de recurrencia y comportamiento no estacionario, y tiene como cualidad la capacidad de conservar la dependencia temporal y espacial de la serie original, esto quiere decir que del mapa recurrente podemos reconstruir la serie de tiempo original.

Está basada en una matriz de distancias entre vectores de la serie reconstruida en el espacio de fase por retardo (20), el cual representa la dinámica de una serie de datos en un espacio n-dimensional, esta representación depende de dos parámetros: dimensión embebida ( $d_e$ ) y retardo ( $\tau$ ) [4,5,6,11,15,16].

$$S_n = (S_{n-(m-1)\tau}, S_{n-(m-2)\tau}, \dots, S_{n-\tau}, S_n) \quad (20)$$

Para la reconstrucción de espacio de fase por retardo se parte de la serie de tiempo y se agrupan los valores formando vectores, cuyas coordenadas son los valores de las series de tiempo (Figura 32). Donde el número de vectores máximos es  $M=N-d_e$ ; donde  $N$ = número de muestras de la serie de tiempo y  $d_e$ = dimensión embebida.

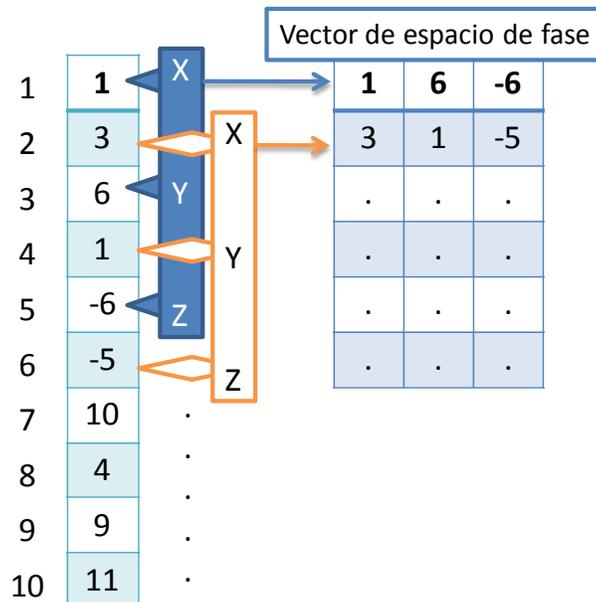


Figura 15. Construcción de espacio de fase por retardo con  $d_e=3$  y  $\tau=2$ .

La reconstrucción en espacio de fase depende de dos parámetros, dimensión embebida y retardo, los cuales son obtenidos las técnicas de falsos vecinos cercanos e información mutua respectivamente. Estas técnicas se explican a continuación.

### *Mutual information*

Esta técnica viene de teoría de la información y es un producto teórico que conecta dos conjuntos de mediciones entre ellas y establece un criterio para su dependencia mutua, basada en la noción de información compartida entre ellas y usando esto puede darse una definición precisa para la comprensión teórica acerca de cómo una medición  $s(t)$  a un tiempo  $t$  está conectada con  $s(t+I)$  a un tiempo  $t+I$ . A diferencia de la autocorrelación el mutual information toma en cuenta también correlaciones no lineales [4,45,46].

$$I(\tau) = \sum_{S_n, S_{n+\tau}} P(S_n, S_{n+\tau}) \ln \left[ \frac{P(S_n, S_{n+\tau})}{P(S_n)P(S_{n+\tau})} \right] \quad (21)$$

Para determinar cuál es el valor óptimo de retardo lo que se hace es probar con varios retardos hasta un retardo máximo, después se escoge el retardo en el que se obtuvo el primer mínimo, esto es, la primera vez que  $I(\tau) < I(\tau+1)$ .

### *False nearest neighbours*

Es un método para determinar la mínima dimensión embebida. Supóngase que la dimensión embebida mínima de una serie de tiempo dada es  $d_{e0}$ . Esto significa que en un  $d_{e0}$ -dimensional espacio de retardo el atractor reconstruido es uno a uno una imagen del atractor en espacio de fase original, donde las propiedades topológicas son preservadas. Por lo tanto los vecinos de un punto dado son mapeados en a vecinos en del espacio de fase y vecindarios de los puntos son mapeados de nuevo en vecindarios. Pero supongamos que lo embebemos en un espacio  $d_e$ -dimensional con  $d_e < d_{e0}$ , gracias a esta proyección la estructura topológica no es preservada. Los puntos son proyectados en vecindarios de otros puntos a los cuales no pertenecerían en más altas dimensiones, estos puntos son llamados falsos vecinos [4,47].

$$Xfnn(r) = \frac{\sum_{n=1}^{N-m-1} \Theta \left( \frac{|S_n^{(m+1)} - S_{k(n)}^{(m+1)}|}{|S_n^{(m)} - S_{k(n)}^{(m)}|} - r \right) \Theta \left( \frac{\sigma}{r} - |S_n^{(m)} - S_{k(n)}^{(m)}| \right)}{\sum_{n=1}^{N-m-1} \Theta \left( \frac{\sigma}{r} - |S_n^{(m)} - S_{k(n)}^{(m)}| \right)} \quad (22)$$

Donde:  $r$  umbral.

$m$  es la dimensión

$\sigma$  es la desviación estándar

A través de la estructura en el mapa recurrente se pueden obtener diferentes medidas como son: el porcentaje de recurrencia, porcentaje de determinismo, la entropía, porcentaje de laminaridad, entre otros. Los cuales se explican a continuación.

#### *Porcentaje de determinismo (%DET)*

Esta métrica mide el porcentaje de elementos  $[i][j]$ -ésimos recurrentes que llegan a formar estructuras. Se puede interpretar como una medida de determinismo en la estructura de los datos y está dada por:

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N IP(l)}{\sum_{i,j}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon}} \quad (23)$$

Donde:  $P(l)$  es la frecuencia de distribución de las longitudes  $l$  de las estructuras diagonales en el MR y  $N$  es el número de líneas diagonales [4].

#### *Porcentaje de recurrencia (%REC)*

Es una propiedad de los sistemas dinámicos y es típica en los sistemas no lineales y caóticos, y puede ser usado para caracterizar sistemas en espacio de fase, e implica los estados que caen dentro vecindario que son recurrentes expresa una densidad de puntos recurrentes y es definida como una medida global [4], está dada por:

$$\%REC = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon} \quad (24)$$

Donde:  $N$  es el número total de datos.  
 $i, j$  son los índices de los elementos del MR.  
 $m$  es la dimensión embebida.  
 $\varepsilon$  es el radio (umbral).

#### *Entropía (ENT)*

Esta medida se refiere a la entropía de Shannon de la distribución de frecuencias en la longitud de las líneas diagonales [4], esto significa que si presenta un valor pequeño tiene baja complejidad y está dada por:

$$ENT = - \sum_{l=l_{\min}}^N P(l) \ln P(l) \quad (25)$$

$$P(l) = \frac{P(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N P(l)} \quad (26)$$

Donde:  $P(l) = \{l_i; i = 1, \dots, N\}$  es la frecuencia de distribución de las longitudes  $l$  de las líneas diagonales del RP y  $N$  es el número de líneas diagonales.

### Porcentaje Laminar (%LAM)

Esta medida se define como el porcentaje de elementos  $[i][j]$ -ésimos recurrentes que forman las líneas verticales [4], y representa la ocurrencia de estados laminares sin describir el largo de estas fases laminares, valores pequeños indican aislamiento de puntos recurrentes y diagonales grandes indican un proceso determinista, y está dada por:

$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N vP(v)}{\sum_{v=1}^N P(v)} \quad (27)$$

Donde:  $P(v)$  representa la frecuencia de distribución de las longitudes de línea verticales.

Estas medidas que se obtienen del mapa recurrente, son muy importantes para el análisis de la evolución temporal de las estructuras frente a diferentes sismos.

La forma en que se debe proceder para obtener las medidas del mapa recurrente está en la Figura 33.

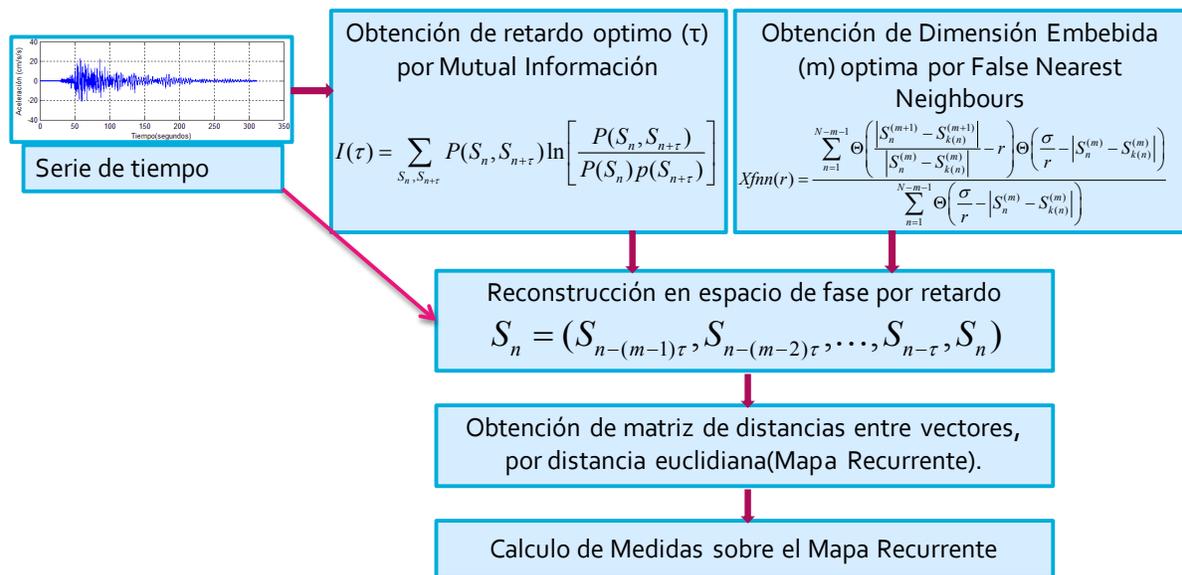


Figura 16. Diagrama de cálculo de medidas de mapa recurrente.

El programa realizado para obtener las medidas del RP, corresponde al siguiente pseudocódigo:

```

////////////////////////////////////
//principal
for k=0;k<num_registros
  delay=mutual_information(serie(k));
  demb=false_nearest_Neighbours(serie(k));
  Sn=recons_espacio_fase(serie(k),delay,dem);
  rp=calculo_mapa_recurrente(Sn);

  Det=determinismo(rp);
  Rec=recurrencia(rp);
  Lam=laminaridad(rp);
  Ent=entropia(rp);

  carga_db_sismos(det,rec,lam,trend,ent);
End-for

//recons_espacio_fase(serie(k),delay,demb)
for i=0;i<n_mues-de
  for j=0;j<de
    Sn[i][j]=serie[i+delay*j];
  end-for
End-for

//calculo_mapa_recurrente(Sn)
for i=0;i<n_mues-de
for j=0;j<n_mues-de
  for k=0;k<demb
    distancia+=pow(2,Sn[i][k]-Sn[j][k]);
  end-for
  rp[i][j]=sqrt(distancia);
end-for
End-for
////////////////////////////////////

```

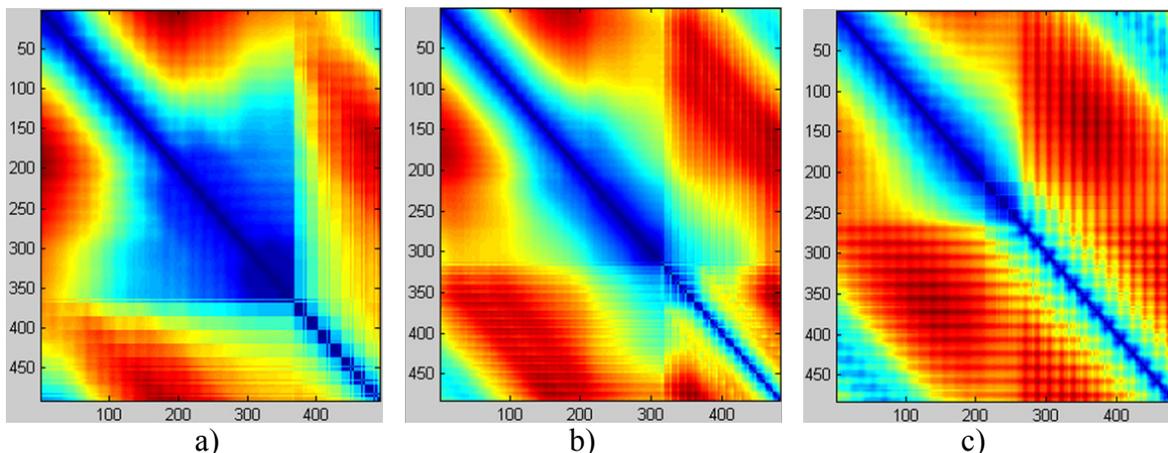


Figura 17. Mapas recurrentes sin umbralizar de los espectros de respuesta, canal 1 , registro 4475, 1999-12-29, 5:20:45, estación n°16 zócalo: a)RP desplazamiento b)RP velocidad c)RP aceleración.

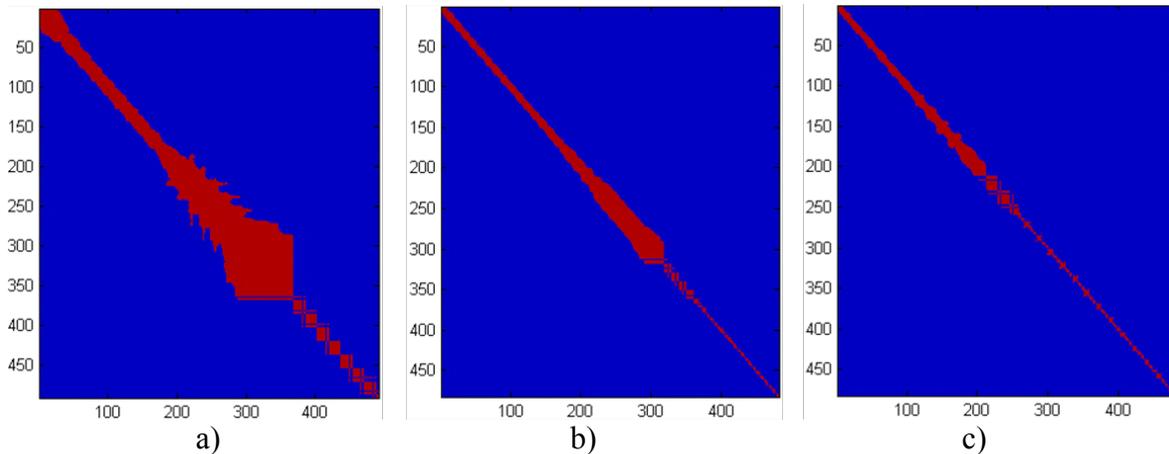


Figura 18. Mapas recurrentes umbralizados de los espectros de respuesta, canal 1 , registro 4475, 1999-12-29, 5:20:45, estación n°16 zócalo: a)RP desplazamiento b)RP velocidad c)RP aceleración.

Epsilon=1.0	Dim_emb=9 Retardo=17	Dim_emb=18 Retardo=11	Dim_emb=18 Retardo=17
	Espectro de desplazamiento	Espectro de velocidad	Espectro de aceleración absoluta
<b>% DET (0-100%)</b>	0.9992	0.9988	.9799
<b>%REC (0-100%)</b>	0.1497	0.0672	0.0757
<b>%ENT (bits/bin)</b>	3.7942	3.0161	2.9452
<b>%LAM (0-100%)</b>	0.9995	0.9997	0.9994

Tabla 1. Resultados de mediciones sobre el mapa recurrente.

Para calcular los mapas recurrentes se requieren dos parámetros (dimensión embebida y retardo) los cuales son calculados con el programa “rec\_plot\_(param\_rp)” y almacenados en la base de datos, para calcularlos parámetros y mapas recurrentes se utilizan los espectros de respuesta de la base de datos previamente calculados, el mapa recurrente y las medidas del RP son calculados con el programa “medidas\_rp”, solo las medidas del RP son almacenadas en la base de datos para incluirlas en la firma (Apéndice A.4.).

#### 4.4. Transformada de Hilbert-Huang

La transformada de Hilbert-Huang (HHT) permite la extracción realista de las características de las ondas obtenidas de registros acelerográficos, a través de la representación de la distribución frecuencia-tiempo de la energía del movimiento. Esto sin duda, genera avances en el conocimiento de los procesos físicos que generan los datos expuestos (aceleraciones monitoreadas) además de mejorar la comprensión del impacto del

movimiento sobre los diferentes sistemas ingenieriles. Los datos sísmicos, inherentemente no estacionarios, son resultado de la propagación de varios tipos de ondas con diferentes amplitudes, frecuencias y velocidades a través de sistemas de suelo altamente no lineales, por lo que son candidatos ideales para ser representados a través del proceso de análisis de la HHT, el cual consta de dos pasos, la descomposición empírica en modos (EMD) y el análisis espectral de Hilbert (HSA) [7,10,12].

#### 4.4.1. Descomposición empírica de modos

Cualquier registro en el dominio del tiempo, por complejo que sea, puede ser descompuesto a través de la EMD en un reducido número de funciones de modos intrínsecos (IMF) que admiten la transformación Hilbert. Una IMF representa un modo de oscilación simple, similar a una componente armónica de Fourier, pero mucho más general. La EMD explora la variación temporal en la escala de tiempo característica a cada conjunto de datos por lo que se adapta fácilmente a los procesos no lineales y a los datos no estacionarios.

El proceso de EMD descompone la señal original en un conjunto de IMF's, y cada IMF extraído de la señal por una serie de residuos, que tienen 2 propiedades fundamentales:

- 1) El número de extremos y el número de cruces por cero difieren a los más en 1.
- 2) El valor medio de las envolventes definido por el máximo y mínimo local es cero.

A diferencia de las funciones de Fourier estas funciones oscilatorias pueden variar en amplitud y frecuencia sobre el tiempo. En este proceso de descomposición el primer IMF contienen altas frecuencias asociadas con la señal original y cada IMF subsecuente contiene componentes de bajas frecuencias.

El proceso de residuos es repetido hasta que los criterios anteriores son satisfechos y la diferencia entre residuos sucesivos es pequeña. El proceso de extracción termina cuando el residuo no contiene información de frecuencia significativa.

Algoritmo para calcular los IMF's [7]:

////////////////////////////////////

1. Inicializar  $r(t) = x(t), i = 1$

2. Extraer la  $i$ -ésima IMF:

(a) Inicializar  $h_0(t) = r_i(t) j = 1$

(b) Extraer el mínimo y el máximo local de  $h_{j-1}(t)$

(c) Interpolarse el mínimo y el máximo local por un Spline Cúbico para formar la envolvente superior e inferior de  $h_{j-1}(t)$ .

(d) Calcular el promedio  $m_{j-1}(t)$  de la envolvente superior e inferior de  $h_{j-1}(t)$

(e) eliminar la tendencia  $m_{j-1}(t)$  dejar  $h_j(t) = h_{j-1}(t) - m_{j-1}(t)$

(f) Si se satisface el criterio de parada: Se establece si  $imf_i(t) = h_j(t)$

Si no:

Vuelve al punto (b) con  $j = j + 1$

3.  $r_i(t) = r_{i-1}(t) - imf_i(t)$

4. Si  $r_i(t)$  tiene dos extremos, entonces vuelve a 2 con

$i = i + 1$  Sino la descomposición ha terminado y  $r_i(t)$  es el residuo

Donde:

$x(t)$  = Señal original en una dimensión.

$imf_i(t)$  = Función de Modos Intrínsecos (IMF) en la componente  $i$ .

$r_n(t)$  = El residuo del proceso de suavizado.

////////////////////////////////////

Y la señal original es igual a la suma de sus partes. Si tenemos N IMFs y un residuo final.

$$y(t) = \sum_{i=1}^N imf_i(t) + r_n(t) \tag{28}$$

#### 4.4.2. Análisis Espectral de Hilbert

El análisis espectral de Hilbert (HSA) es una técnica para determinar la evolución de amplitud y frecuencia de series de tiempo no estacionarias [48].

La idea principal de HSA es construir una señal compleja para la señal real analizada, define las frecuencias temporales (dependientes del tiempo) de los datos a través de la transformación de Hilbert de cada componente IMF.

Algoritmo para calcular espectro de Hilbert:

////////////////////////////////////

1. Hacer la transformada de Fourier a cada uno de los imf.
2. Calcular la transformada de Hilbert , usando como coeficientes la parte real y la imaginaria del paso 5 para (M=N/2).

$$y_j = \frac{1}{N} \sum_{k1=0}^M \left( \text{Re} \left( X_{k1} \sin(2\pi k1 \frac{j}{N}) \right) + \left( X_{k1} \cos(2\pi k1 \frac{j}{N}) \right) \right) + \left( \frac{1}{N} \right) \sum_{k2=M+1}^{N-1} \left( \text{Re} \left( X_{k2} \sin(2\pi k2 \frac{j}{N}) \right) + \left( X_{k2} \cos(2\pi k2 \frac{j}{N}) \right) \right)$$

3. Formar el número complejo  $z_j = x_j + iy_j$

4. Calcular la fase  $\phi \tan^{-1}(y_j / x_j)$

5. Determinar la frecuencia  $f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_j}{dt}$

6. Determinar la amplitud

$$a_j = \sqrt{x_j^2 + y_j^2}$$

////////////////////////////////////

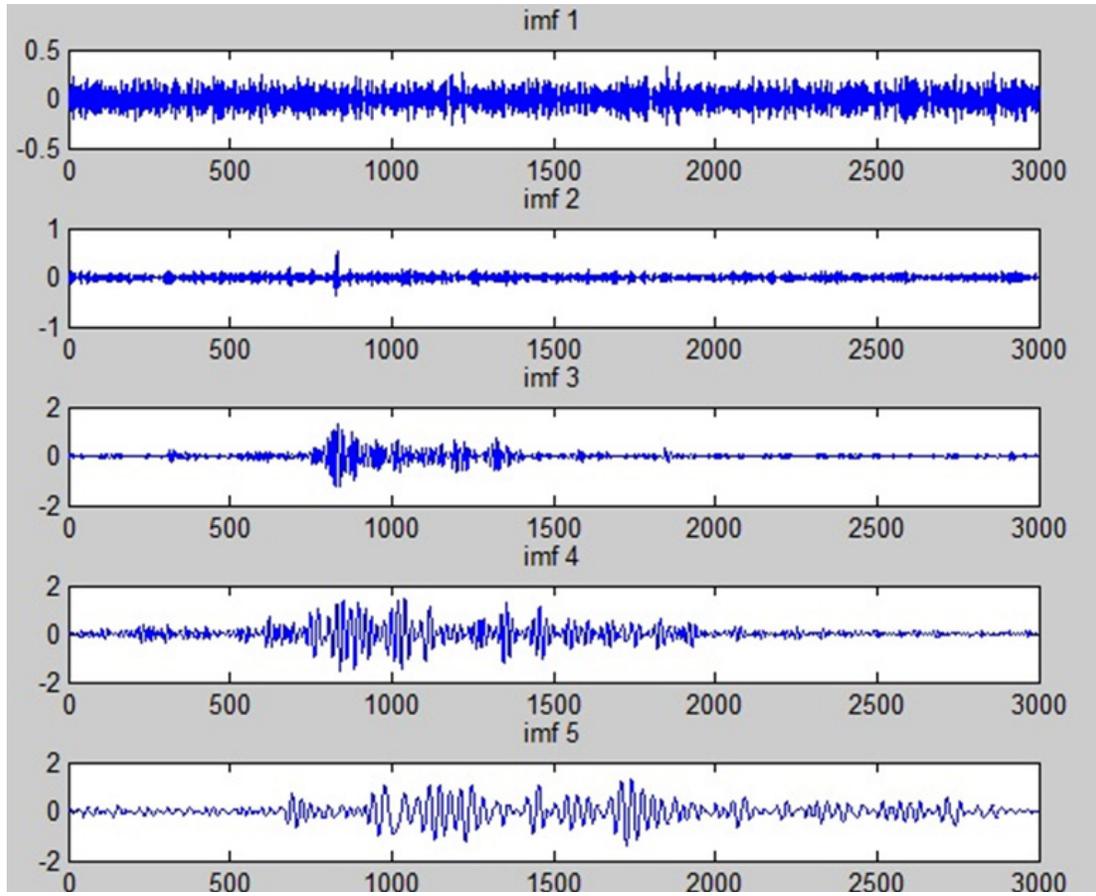


Figura 19. Gráficas correspondientes a los 5 primeros IMF's del acelerograma del sismo de 14-06-2004 con 5.8 ° de magnitud.

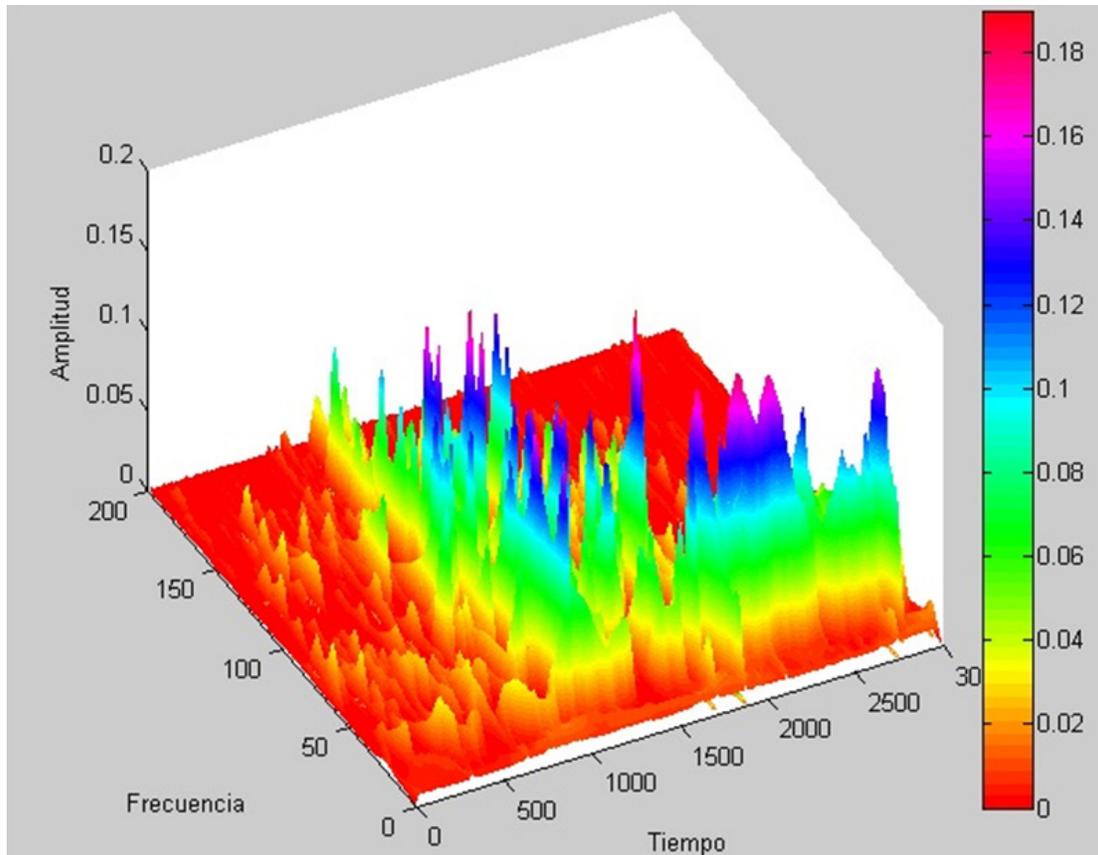


Figura 20. Espectro de HHT del acelerograma del sismo de 14-06-2004 con 5.8 ° de magnitud.

Para calcular la transformada de Hilbert-Huang, el programa “mat\_emd” (Apéndice A.4.) se conecta a la base de datos para leer los acelerogramas, calcula las HHT para cada eje de análisis y después calcular el eigenvector que represente la matriz de HHT, después almacena los eigenvectores en la base de datos.

#### 4.5 Eigenvector

Dado que el tamaño del acelerograma que se utiliza para la HHT es de 3000 muestras, al calcular la transformada de Hilbert-Huang se obtiene una matriz de 3000x3000 dando un total de 9000000 muestras. Una técnica común para superar este problema es calcular primero los eigenvectores de la matriz obtenida con HHT [73].

Eigenvectores son un conjunto de vectores asociados a un sistema de ecuaciones lineales, también son conocidos como vectores característicos, vectores propios, o vectores latentes [15,16,18,72,73,74].

Un eigenvalor y un eigenvector de una matriz cuadrada  $A$ , satisface la siguiente ecuación.

$$Av = \lambda v \quad (29)$$

Donde  $\lambda$  es el eigenvalor de A si existe un vector solución  $v$  diferente de cero del sistema lineal,  $v$  es el eigenvector correspondiente al eigenvalor  $\lambda$ . Al conjunto de eigenvalores de A se le llama espectro de A. El mayor de los valores absolutos de los eigenvalores se le llama radio espectral de A. El conjunto de todos los eigenvectores que corresponden a un eigenvalor de A junto con 0, forma un espacio vectorial llamado eigen espacio de A correspondiente a un eigenvalor. Algunas matrices no se pueden descomponer en sus eigenvectores, por que no son diagonalizables. El problema generalizado de eigenvalores es determinar soluciones no triviales de la ecuación ( 29 ).

Se utilizó la función *eig()* de Matlab. El pseudocódigo es el siguiente:

```

////////////////////////////////////
for k=0;k<num_registros

    Z_nxn_1=Calculo de matriz de HHT(ch1);
    Z_nxn_2=Calculo de matriz de HHT(ch2);
    Z_nxn_3=Calculo de matriz de HHT(ch3);

    [V_1,D_1]=eig(Z_nxn_1); % obtención de eigenvectores y
                           % eigenvalores para los 3 canales
    [V_2,D_2]=eig(Z_nxn_2); %
    [V_3,D_3]=eig(Z_nxn_3); %
    Índice_1=Obtiene_max-eigval(D_1);
    Índice_2=Obtiene_max-eigval(D_2);
    Índice_3=Obtiene_max-eigval(D_3);

    Envio_a_db(D_1[Índice_1],V_1[Índice_1],
              D_2[Índice_2],V_2[Índice_2],
              D_3[Índice_3]V_3[Índice_3]);

End-for
////////////////////////////////////

```

Una vez calculados los eigenvectores y eigenvalores estos son almacenados en la base de datos.

## Capítulo V. Clasificadores

Por la necesidad de clasificar un gran número de registros sísmicos y por la incertidumbre de pertenencia de registros sísmicos a una zona, se optó por utilizar una red neuronal auto adaptativa que sea capaz de aprender nuevas cosas sin olvidar las aprendidas previamente, la elección fue la red neuronal artificial Fuzzy ART al cumplir con nuestros requerimientos y por qué ya se había utilizado para clasificar información sísmica, obteniendo resultados satisfactorios [64].

Para la agrupación de estaciones sísmicas se decidió utilizar una herramienta de clustering muy utilizada llamada k-means, es simple y eficiente, y permite que se puedan fijar el número de grupos deseados, además ha demostrado funcionar bien con pocos datos, como en el caso de las estaciones sísmicas.

### 5.1. Red neuronal artificial Fuzzy ART

#### 5.1.1. Teoría de Resonancia Adaptativa

Las redes neuronales están inspiradas en la forma en que se cree que se procesa información, en una red neuronal biológica. Las redes neuronales artificiales usuales han fallado para dar solución al dilema de plasticidad/estabilidad, una RNA sigue siendo abierta a nuevo aprendizaje sin limpiar los patrones previamente aprendidos, con mucha frecuencia al aprender nuevos patrones borra o modifica lo aprendido, si hay sólo un conjunto fijo de entrenamiento la RNA puede ser ciclada a través de éstos fácilmente y puede eventualmente aprender todo, pero si está sujeta a varios cambios de entorno puede que nunca sea el mismo vector de entrenamiento 2 veces, en este caso el backpropagation, por ejemplo, nunca aprendería nada, este modificaría sus pesos en vano y no llegaría a un estado satisfactorio; Con la premisa anterior la teoría de resonancia adaptativa trata de imitar una característica humana que es su capacidad de aprender cosas nuevas sin olvidar las aprendidas previamente, esta habilidad está descrita en redes neuronales artificiales como el dilema de estabilidad/plasticidad [53,54,55].

La teoría de resonancia adaptativa fue propuesta por Grossberg y Carpenter [50,51,52], es para categorización de patrones utilizando el paradigma de aprendizaje competitivo, e introduce un control de ganancia y un reset para asegurar que las categorías aprendidas son retenidas mientras nuevas categorías son aprendidas, esto es un sistema de memoria adaptativo a entradas significantes y que permanezca estable a entradas irrelevantes, esto es cuando la red neuronal artificial (RNA) ha aprendido anteriormente a reconocer un patrón y este patrón se le vuelve presentar en iteraciones posteriores, un proceso adaptativo reforzará la memorización del patrón almacenando, y si el patrón de entrada no es reconocido la RNA entra en un estado de resonancia donde el nuevo patrón se almacena, de esta forma permite el reconocimiento y clasificación de patrones.

La teoría de resonancia adaptativa ha dado lugar a diferentes tipos de RNA auto-adaptativas como:

ART 1: es el tipo más sencillo de red ART, de operación no supervisada, sólo acepta entradas binarias. Trabaja con un operador duro, el cual hace posible las salidas binarias, emplea un umbral (vigilancia) para decidir si el patrón se asigna o no a su clase más similar, actualiza los representantes de clase con cada patrón, el número de clases con frecuencia es elevado, comportamiento bastante dependiente del orden de presentación de los patrones. Aplicaciones: reconocimiento de letras y figuras con patrones de colores en blanco y negro [56].

ART 2: aumenta las capacidades de la red al soportar también valores de entrada continuos, es operación no supervisada, tiene múltiples capas para filtrar el patrón de entrada y es poco usada por la complejidad de sus capas [57].

ART 2-A: es una forma simplificada de ART-2 con un tiempo de ejecución drásticamente acelerado, y con resultados cualitativos que rara vez son inferiores a los obtenidos por una red ART-2 completa [58].

ART 3: se basa en ART-2 mediante la simulación de rudimentarios neurotransmisores y regulación de actividad sináptica mediante la incorporación de simulaciones de concentraciones de iones de sodio ( $\text{Na}^+$ ) y calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) en las ecuaciones del sistema, lo que origina más realismo en la simulación de las condiciones fisiológicas en las que se disparan las neuronas biológicas [59].

Fuzzy ART: aplica la lógica difusa en el reconocimiento de patrones de ART, aumentando así la generalización. Una opcional y muy útil característica del Fuzzy ART es el complemento de código, una forma de incorporar la ausencia de elementos en las clasificaciones de patrones que sirve para prevenir la proliferación de categorías innecesarias. Es adecuado para problemas con un número indeterminado de clases y tiene aprendizaje auto-adaptativo, crea clases nuevas, actualiza clases aprendidas, etc. [60].

ARTMAP: también conocido como ART Predictivo, combina de unidades de ART-1 o ART-2 ligeramente modificadas formando una estructura de aprendizaje supervisado, donde la primera unidad tiene los datos de entrada y la segunda unidad toma la salida de datos correctos, se utiliza para posibilitar el mínimo ajuste del parámetro de vigilancia en la primera unidad con el fin de obtener una clasificación correcta [61].

Fuzzy ARTMAP: es como ARTMAP pero utilizando unidades ART difuso, dando como consecuencia un aumento de la eficacia [62].

### 5.1.2. Algoritmo Fuzzy ART

Fuzzy ART es un modelo de RNA capaz de aprender y reconocer categorías, rápida y establemente en respuesta a secuencias arbitrarias analógicas o binarias, es una RNA no supervisada basadas en la umbralizacion de una distancia patrón-clase, aplica la lógica difusa en el reconocimiento de patrones de ART, aumentando así la generalización y habilitando la utilización de patrones analógicos en vez de binarios como en el ART 1 de donde deriva la RNA Fuzzy ART, y es adecuado para problemas con un número indeterminado de clases y tiene aprendizaje auto-adaptativo, crea clases nuevas, actualiza clases aprendidas [60].

Al algoritmo de funcionamiento de la RNA Fuzzy ART es [63,64]:

```

////////////////////////////////////
1.Establecer parámetros:  $N \in \mathbb{N}^*$ ,  $M \in \mathbb{N}^*$ ,  $\alpha > 0$ ,  $\beta \in [0,1]$ , y  $\rho \in [0,1]$ 
2.Crear matriz de pesos:  $w_{1,1} = \dots = w_{N,2M} = 1$ 
3.Mientras existan vectores de entrada, hacer
    3.1. Establecer el vector/secuencia/serie de tiempo de
    entrada  $Q_i = \langle q_1, q_2, \dots, q_M \rangle$ 
    3.2. Calcular el patrón de entrada  $I = (q_1, q_2, \dots, q_M, q_1^c, q_2^c, \dots, q_M^c)$ ,
    donde  $q_j^c = 1 - q_j$ 
    3.3. Mientras no sea encontrada la categoría del patrón de
    entrada, hacer
        3.3.1. De 1 a  $N$ , hacer
            
$$T_j(I) = \frac{|I \wedge w_{j,*}|}{\alpha + |w_{j,*}|}, \text{ donde } (I \wedge w_{j,*})_i = \min(q_i, w_{j,i}) \text{ y } |x| = \sum_1^{2M} x_i$$

            Fin de hacer
        3.3.2. Determinar la posible categoría
            
$$T_j = \max\{T_j : j = 1, \dots, N\}$$

        3.3.3. Si  $\frac{|I \wedge w_J|}{|I|} \geq \rho$ , entonces  $J$  es la categoría del patrón de
            entrada y actualizar matriz de pesos
            
$$w_{J,*}^{new} = \beta \times (I \wedge w_{J,*}^{old}) + (1 - \beta) \times w_{J,*}^{old}$$

        3.3.4. De lo contrario, deshabilitar la categoría  $J$ , e ir
            al paso 3.3
        Fin de hacer
    Fin de hacer
////////////////////////////////////

```

*Paso 1.* El algoritmo Fuzzy ART requiere de 5 parámetros.  $N$  es el número de categorías o clases, este parámetro tiene que ser un valor entero positivo, usualmente mayor a 1;  $M$  es el número de elementos o longitud en las secuencias/series de tiempo/arreglos/vectores de

entrada,  $\alpha$  (alfa) es un valor real mayor que 0,  $\beta$  (beta) es un valor real entre 0 y 1, y  $\rho$  (rho) también es un valor real entre 0 y 1, éste también es conocido como el parámetro de vigilancia. El parámetro  $\rho$  es un umbral de similitud, si este valor es igual a 0, sólo se creará una categoría, en el otro extremo, si este valor es igual a 1, se crea una categoría por cada secuencia/serie de tiempo/arreglo/vector distinto.

*Paso 2.* La matriz de pesos es la “memoria” del sistema de aprendizaje, esta matriz se denomina memoria a largo plazo o matriz de pesos adaptativos; la inicialización de la matriz a 1 permite categorizar los patrones de entrada de forma más expedita; las dimensiones de la matriz es de  $N, 2M$ ;  $N$  es el número de columnas y  $2M$  el número de filas, el número de filas debe estar de acuerdo al esquema de codificación de los secuencias/series de tiempo/arreglos/vectores de entrada. La codificación es utilizada en este algoritmo para evitar en cierto grado la proliferación de categorías.

*Paso 3.* Los pasos contenidos en este paso se repetirán hasta que *todas* las secuencias/series de tiempo/arreglos/vectores de entrada sean categorizadas o clasificadas.

*Pasos 3.1 y 3.2.* Estos pasos establecen la diferencia entre las secuencias/series de tiempo/arreglos/vectores  $Q$  y su codificación en el *patrón* de entrada  $I$ , como se mencionó anteriormente el costo de duplicar la longitud de los arreglos de entrada se compensa con la posibilidad de reducir la proliferación de categorías.

*Paso 3.3.* Es ciclo terminará cuando el patrón de entrada sea categorizado o clasificado.

*Paso 3.3.1.* El propósito de este paso es calcular por cada columna de la matriz, es decir, por cada patrón “prototipo”, un patrón  $T$ , donde cada elemento de este patrón es un cociente del patrón de entrada, la matriz de peso y el valor de  $\alpha$ .

*Paso 3.3.2.* Una vez que se ha calculado los patrones  $T$  ( $N$  patrones), se determina el patrón máximo, es decir, el patrón  $T$  cuya sumatoria de elementos sea mayor que el resto de los patrones  $T$ . En esta etapa se dice que existe metafóricamente una capa de contención.

*Paso 3.3.3.* El índice del patrón  $T$ , indica la columna donde se encuentra el patrón prototipo que posiblemente sea similar al patrón de entrada  $I$ , es aquí donde el parámetro de vigilancia  $\rho$  cobra su importancia. Si el patrón de entrada  $I$  es semejante al patrón almacenado en la columna  $J$ , entonces se redefine el patrón almacenado en la matriz de pesos.

*Paso 3.3.4.* Si el vector de entrada  $I$ , no es semejante al patrón almacenado en la columna  $J$ , se requiere descartar dicha columna y regresar al paso 3.3. El lector puede detectar

que el parámetro de vigilancia  $\rho$  es decisivo no solo como criterio de similitud, también puede determinar en gran parte el número de clases o categorías creadas. De forma similar, también puede restringir la posibilidad de encontrar alguna categoría a los patrones de entrada.

A continuación se describe la prueba de plasticidad/estabilidad que ayuda a comprender el funcionamiento de esta RNA.

El primer caso se trata de patrones de entrada binarios, se puede observar en la Figura 38 tres patrones binarios, el patrón 2 es un superset del patrón 3 subset, ya que coinciden en el elemento 5, el patrón 1 es un patrón de control.

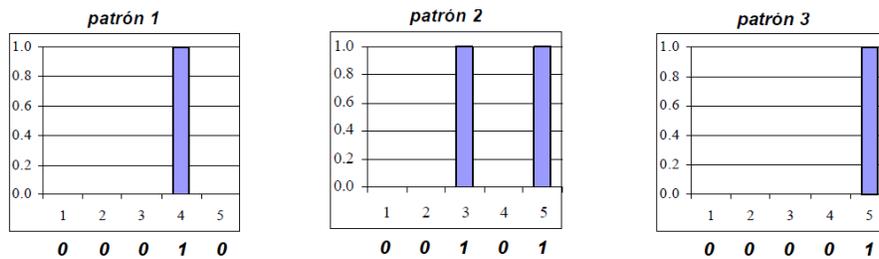


Figura 1. Tres patrones binarios para la prueba de plasticidad/estabilidad de una RNA Fuzzy ART.

El ejercicio consta de presentar tres diferentes tipos de patrones de forma secuencial, el primer patrón de control será disímil a todo lo existente en la matriz de memoria de la RNA Fuzzy ART, y por lo tanto será categorizada dentro de la clase 0.

El propósito es mostrar como el patrón 3 y 2 con categorizados dentro de la misma clase, y una vez que se presenta la plasticidad se probó la estabilidad presentando nuevamente el patrón 2 y 3. Esto sucede de igual forma con datos flotantes [63]

El programa “fuzzy\_art” primero se conecta a la base de datos y carga los resultados de las técnicas de análisis de señales, crea las firmas que se van a clasificar, las clasifica y los resultados de la son entregados en una tabla, en la tabla se indica la pertenencia de cada registro a una clase para un valor de rho dado, donde el valor de rho va desde 0.1 hasta 0.975 a intervalos de 0.025 (Apéndice A.5.).

Las firmas están formadas por 20 muestras de FFT, 50 muestras ER de desplazamiento, 50 muestras ER de velocidad, 50 muestras ER de aceleración absoluta, 5 medidas del mapa recurrente (del ER de desplazamiento), 5 medidas del mapa recurrente (del ER de velocidad), 5 medidas del mapa recurrente (del ER de aceleración absoluta), y 20 muestras del eigenvector de la matriz de HHT, esta es la conformación de firmas para cada uno de los ejes de análisis.

## 5.2. K-means

En el k-means, están dados un conjunto de  $n$  datos en un espacio  $d$ -dimensional ( $R^d$ ) y un entero  $k$  y el problema es determinar un conjunto de  $k$  puntos en  $R^d$ , llamados centros, con el fin de reducir al mínimo la distancia de cada punto de los datos a su centro más cercano, es clásicamente no supervisado pero existen algunas variantes supervisadas [75,76].

Para agrupar con k-means se utilizó la función  $[IDX,C] = kmeans(X,k)$ , y funciona mediante una partición iterativa minimiza la suma, en todos los clases, internamente dentro del clase suma las distancias de un punto al centroide de grupo. Se pueden utilizar varias distancias como: euclidiana, cityblock, coseno, hamming; también se puede escoger el método, para escoger los centroides iniciales.

La función k-means usa un algoritmo iterativo de 2 fases para minimizar la suma de distancias centroide-punto.

La primera etapa utiliza actualizaciones por lotes, donde cada iteración consiste en la reasignación de puntos a su centroide más cerca de la clase, a la vez, seguida por un nuevo cálculo de los centroides. Esta fase ocasionalmente no converge a una solución que es un mínimo local, es decir, una partición de los datos donde moviendo un punto cualquiera a diferente clase incrementa la suma total de distancias. Esto es más probable para los conjuntos de datos pequeños. La fase de proceso por lotes es rápida, pero potencialmente sólo se aproxima a una solución de punto de partida para la segunda fase.

La segunda fase utiliza las actualizaciones en línea, donde los puntos son individualmente reasignados, en caso de que con ello se reduzca la suma de las distancias, y los centroides de clase se vuelvan a recalcular después de cada reasignación. La segunda fase convergerá a un mínimo local, aunque puede haber otros mínimos locales con una menor suma de las distancias. El problema de encontrar el mínimo global sólo puede ser resuelto, en general, por una exhaustiva elección de los puntos de partida, pero con varias repeticiones, con un punto de partida aleatorio por lo general resulta en una solución que es un mínimo global.

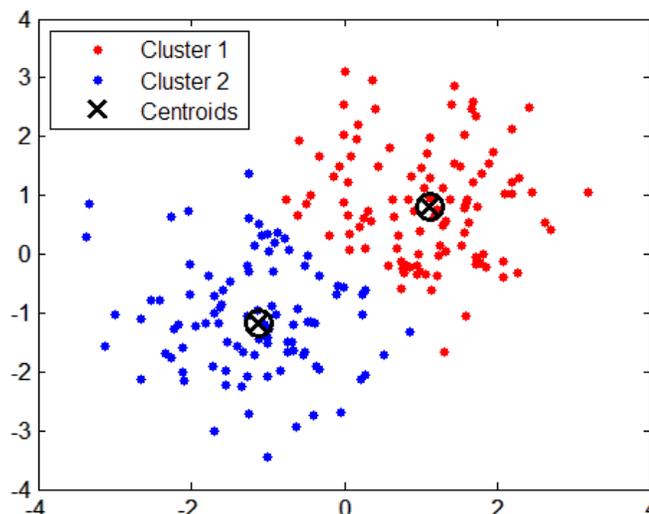


Figura 2. Ejemplo de agrupación de vectores con k-means.

# Conclusiones

En este trabajo presenta una metodología con un enfoque diferente a los de la literatura, en este se aprovechan herramientas computacionales y de análisis de señales, reduciendo el problema de zonificación a un problema de clasificación semiautomática. Además de ser el único trabajo de zonificación que se compara con otro trabajo.

En el proceso de crear un método de selección y adecuación de la Base Mexica de Sismos Fuertes, se identificaron diversos errores en la base de datos, los cuales también sirvieron para hacer una lista de recomendaciones para la Base de Datos Mexicana de Sismos Fuertes.

Al conocer a fondo la Base de Datos Mexicana de Sismos Fuertes, pareció preocupante la gran cantidad de tiempo y trabajo empleado para obtener datos confiables, ya que presentaba una gran cantidad información errónea, solo basta mencionar que originalmente se tenían 4461 registros sísmicos dentro del Área Metropolitana y esta cantidad se redujo a 2238 registros sísmicos.

Se obtuvieron las firmas de los 2238 registros sísmicos seleccionados, donde cada firma está compuesta por espectros de respuesta, transformada de Fourier, medidas del mapa recurrente y el eigenvector de la matriz de la transformada de Hilbert-Huang. Estas firmas demostraron ser eficientes para la caracterización de registros sísmicos. El cálculo de espectros de respuesta y de transformadas de Fourier se implementaron en CUDA disminuyendo el tiempo de cómputo.

Se demostró la importancia de utilizar técnicas de análisis de señales más complejas, que permiten observar otras características del fenómeno, las cuales se vieron reflejadas en la clasificación de las firmas de registros sísmicos que dieron lugar a la zonificación propuesta.

La utilización de la RNA Fuzzy ART para clasificar firmas de registros sísmicos y k-means para la agrupación de estaciones sísmicas, dieron como resultado una zonificación, con zonas consistentes en forma y tamaño, tomando como referencia la zonificación actual.

También se demostró que espectro de respuesta una técnica de análisis sísmico muy utilizado en la literatura para zonificación, es insuficiente para lleva a cabo zonificación, al comprobarse en el caso de las estaciones SCT1 y SCT2, que no podía discernir que tenían diferente orientación. .Esto nos lleva a entender la gran importancia que tiene emplear otras técnicas de análisis de señales y que las estaciones sísmicas tienen que tener la misma orientación para que puedan ser mejor clasificadas.

Se evidenció la falta de más estaciones en la periferia del Área Metropolitana, ya que estos ayudarían a definir mejor los límites entre zonas y subzonas. La importancia de tener más estaciones en la periferia no es solo para definir mejor los límites de las zonas, es también porque la ciudad de México está creciendo hacia la periferia, en donde no solo se ubican hogares si también importantes zonas industriales.

## Referencias

- [1] A. K. Chopra, "Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering", Prentice Hall, 1995.
- [2] M. D. Trifunac, "Biot Response Spectrum", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 26, 2006.
- [3] M. D. Trifunac, "Early History of the Response Spectrum Method", University of Southern California, vol. 28, 676 – 685, 2008.
- [4] H. Kantz, T. Schreiber: "Nonlinear Time Series Analysis". University Press Cambridge, 2005.
- [5] F. Takens, "Detecting Strange Attractors in Turbulence". Lecture Notes in Mathematics, vol. 898, pp. 366-381, 1981.
- [6] N. Marwan. "Encounters with Neighbours: Current developments of Concepts based on Recurrence Plots and their Applications", Tesis doctoral, Instituto de Física de la Universidad de Potsdam. 2003.
- [7] H. Solís-Estrella, M. Ortega, F. Correa, K. Ramírez-Amaro, A. Angeles-Yreta, J. Figueroa-Nazuno y S. García. "Descomposición Empírica en Modos: una interpretación sísmica", XV congreso nacional de ingeniería sísmica, CCS84, Septiembre 2005.
- [8] M. A. Biot, "Theory of Elastic Systems under Transients Loading whit an Aplication to Earthquake Proof Buildings", Proceedings of the National Academy of Sciences, vol, 19, 1993.
- [9] M. Ordaz, C. Montoya, Degtra A4 ver 5. 1, Instituto de Ingeniería UNAM-CENAPRED, 2002.
- [10] R. S. Ma Zhang, , E. Safak, S. Hartzell, "Hilbert-Huang Transform Analysis of Dynamic and Earthquake Motion Recordings", Journal of Engineering Mechanics-ASCE, vol. 129, pp. 861-875, 2003.
- [11] S. García Benítez, "Cómputo Aproximado en la Solución de Problemas Geofísicos", Doctorado, Instituto de ingeniería civil, UNAM, 2009.
- [12] D. Donnelly, "The Fast Fourier and Hilbert-Huang Transforms: A Comparison", International Journal of Computers, Vol. I, pp. 45-52, 2006.
- [13] W. Young Forrest, "Multidimensional Scaling", Encyclopedia of Statistical Sciences, University of North Carolina, 1985.
- [14] W. R. Dillon, M. Goldstein, "Multivariate Analysis: Methods and Applications", John-Wiley, 1984.
- [15] J. M. Medina Apodaca, J. Figueroa Nazuno, S. García Benitez, "Time Series modeling using Recurrence Plots and Face Recognition Techniques", Congreso Nacional de Física, 2002.
- [16] K. Ramírez Amaro, S. García, J. Figueroa Nazuno, F. Correa, A. Ángeles Yreta, M. Ortega, H. Solís Estrella, "Dinámica no lineal para el Modelado de la Respuesta de Sitio", XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 2005.
- [17] G. B. Arfken, H. J. Weber, "Mathematical Methods for Physicists", 6ta. ed, Elsevier, 2005.
- [18] M. Turk, A. Pentland, "Face Recognition using Eigenfaces", Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern, 1991.
- [19] R. Tsuchiyama, T. Nakamura, "The Opencl Programing book", Fixstars, 2010.

- [20] D. B. Kirk, W. Hwu , “Programing Massively Parallel Processors”, Elsevier, 2010.
- [21] Ikuo towhata, "Geotechnical Earthquake Engineering", springer, first edition, 2008.
- [22] R. J Marsal, M. D. Mazari, “The Subsoil of Mexico City”. Contribution to the First Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Ciudad de México, 1959.
- [23] G. Mohamed, “Using Microtremors for Microseismic Zonation in Cairo’s crowded, urban areas”, Journal of Seismology, vol. 13, 2009.
- [24] Y. Mohamedzein, J. Abdalla, A. Abdelwahab, "Site Response and Earthquake Design Spectra for Central Khartoum, Sudan", Bulletin of Earthquake Engineering, Springer, vol 4, 2006.
- [25] W. Mohanty, M. Walling, “Seismic Hazard in mega city Kolkata, India”, Natural Hazards, Springer, vol. 47, 2008.
- [26] H. Flores-Estrella, S. Yussim, C. Lomnitz , “Seismic Response of the Mexico City Basin: A review of twenty years of research”, Natural Hazards, Springer, Volume 40, Number 2, 357-372, 2007.
- [27] V. Zobin, J. Ventura-Ramírez, C. Gutiérrez-Andrade, L. Cruz, S. Santibáñez-Ibáñez, “The Mw 7. 4 Colima, Mexico, Earthquake of 21 January 2003: The Observed Damage Matrix in Colima City and its Comparison with the Damage Probability Matrix”, Natural Hazards, Springer, vol. 38, 2006.
- [28] D. Cáceres, O. Kulhánek, “Seismic Hazard of Honduras”, Natural Hazards, Springer, vol. 22, 2000.
- [29] A. Teramo, M. Maugeri, A. Bottari, D. Termini, “On a Quick Seismic Microzonation of Wide Areas”, Pure and Applied Geophysics, Springer, vol. 162, 2005.
- [30] J. Bommer, C. Mcqueen, C. Salazar, S. Scott, G. Woo, “A Case Study of the Spatial Distribution of Seismic Hazard (El Salvador)”, Natural Hazards, springer, vol. 18, 1998.
- [31] S. Balassanian, A. Martirosyan, s. Nazaretian, A. Arakelian, A. Avanesian, V. Igumnov, E. Ruttener, “Seismic Hazard Assessment in Armenia”, Natural Hazards, springer, vol. 18, 1998.
- [32] M. L. Sharma, H. R. Wason, R. Dimri, “Seismic Zonation of the Delhi Region for Bedrock Ground Motion”, Pure and Applied Geophysics, springer, vol. 160, 2003.
- [33] J. Gaspar-Escribano, M. Navarro, A. García-Jerez, F. Vidal, “From regional- to local-scale seismic hazard assessment: examples from Southern Spain”, Bulletin of Earthquake Engineering, springer, vol. 8, 2010.
- [34] J. García-Mayordomo, E. Faccioli, R. Paolucci, “Comparative Study of the Seismic Hazard Assessments in European National Seismic Codes”, Bulletin of Earthquake Engineering, springer, vol. 2, 2004.
- [35] V. Sokolov, A. Ovcharenko, L. Chin-Hsiung, W. Kuo-Liang, “Seismic Hazard Assessment for the Taiwan Region on the Basis of Recent Strong-Motion Data and Prognostic Zonation of Future Earthquakes”, Natural Hazards, springer, vol. 33, 2004.
- [36] M. Harajli, S. Sadek, R. Asbahan, “Evaluation of the seismic hazard of Lebanon”, vol6, Journal of Seismology, springer, 2002.
- [37] G. Zonno, M. García-Fernández, M. J. Jiménez, S. Menoni, F. Meroni, V. Petrini, “The SERGISAI procedure for seismic risk assessment”, Journal of Seismology, springer, vol. 7, 2007.

- [38] C. Sterling Williams, "Designing Digital Filters". Englewood Cliffs, New Jersey. Prentice Hall, 1986.
- [39] J. Flores, O. Novaro, T. H. Seligman, "Possible Resonance effect in the distribution of earthquake damage in México city", *Nature*, vol. 326, 1987.
- [40] S. W. Smith, "Digital signal processing, A practical guide for engineers and scientists", Elsevier, 2003.
- [41] C. Javier, L. Alcantara, L. Munguia, R. Quaas, S. Medina, "La base Mexicana de datos de sismos fuertes", *Revista Ingeniería Civil*, Colegio de Ingenieros Civiles de México, A.C., Núm. 339, pp. 13-22, 1997.
- [42] NVIDIA corporation, "NVIDIA CUDA programming guide", version 3.2, 2010.
- [43] J. Sanders, E.Kandrot, "Cuda by example, An introduction to General-Purpose GPU programming", edit. Addison-Wesley, 2010.
- [44] NVIDIA corporation, "CUDA CUFF library", version 1, 2010.
- [45] B. Pompe, "Measuring Statistical Dependencies in a Time Series", *Journal of Stadistical Phys*, no. 73, 1993.
- [46] A. M. Freaser, H. L. Swinney, "Independent Coordinates for Strange Attractors from Mutual Information", *Physical review A*, vol.33, 1986.
- [47] R. Hegger, H. Kantz, T. Schreiber, "Practical implementation of nonlinear time series methods: The TISEAN package", *Chaos*, 1998.
- [48] I. I. Orlovskiy, A. M. Kakurin, "Hilbert Spectrum Analysis of Mirnov Signals", vol. 29, 32nd EPS Conference on Plasma Physic, 2005.
- [49] Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, "Normas técnicas Complementarias para Diseño por Sismo", *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, 6 de octubre de 2004.
- [50] S. Grossberg, "A Prediction Theory for some Nonlinear functional-differential Equations, I: Learning of lists", *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 21, 643-694, 1968.
- [51] S. Grossberg, "A Prediction Theory for some Nonlinear functional-differential Equations, II: Learning of patterns", *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 22, 490-522, 1968.
- [52] G. A. Carpenter, S. Grossberg, "A Massively Parallel Architecture for a self-organizing Neural Pattern Recognition Machine", *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 37, 54-115, 1987.
- [53] S. N. Sivanandam, S. Sumathi, S. N. Deepa, "Introduction to Neural Networks using Matlab 6.0", Mcgraw hill, computer engineering series, 2006.
- [54] V. B. Rao, "C++ Neural Networks and fuzzy logic", M&T books, 1995.
- [55] J. A. Freeman, D. M. Skapura, "Neural Networks Algorithms, Applications, and Programing Techniques", addison-wesley, 1991.
- [56] G. A. Carpenter, S. Grossberg, "Competitive learning: From interactive activation to adaptive resonance", *Cognitive Science*, 11, 23-63, 1987.
- [57] G. A. Carpenter, S. Grossberg, "ART 2: Self-organization of Stable Category Recognition codes for Analog input Patterns", *Applied Optics*, 26, 4919-4930, 1987.
- [58] G. A. Carpenter, S. Grossberg, "ART 2-A: An Adaptive Resonance Algorithm for Rapid Category Learning and Recognition", *Neural Networks*, 4, 493-504, 1991.
- [59] G. A. Carpenter, S. Grossberg, "ART 3: Hierarchical Search using Chemical Transmitters in Self-organizing Pattern Recognition Architectures", *Neural Networks*, 3, 129-152, 1990.

- [60] G. A. Carpenter, S. Grossberg, "Fuzzy ART: Fast Stable Learning and Categorization of Analog Patterns by an Adaptive Resonance System", *Neural Networks*, 4, 759-771, 1991.
- [61] G. A. Carpenter, S. Grossberg, "ARTMAP: Supervised Real-time Learning and Classification of Nonstationary data by a Self-organizing Neural Network", *Neural Networks*, 4, 565-588, 1991.
- [62] G. A. Carpenter, S. Grossberg, N. Markuzon, J. H. Reynolds, D. B. Rosen, "Fuzzy ARTMAP: A neural network architecture for incremental supervised learning of analog multidimensional maps", *IEEE Transactions on Neural Networks*, 3, 698-713, 1992.
- [63] M. A. Angeles-Yreta, "Cómputo de la Similitud entre Figuras Geométricas", Tesis de Maestría, Centro de Investigación en Computación, 26-34, 2006.
- [64] M. A. Angeles-Yreta, H. Solis-Estrella, V. Landasauri-Moreno, J. Figueroa-Nazuno, "Análisis de Similitud en Señales Sísmicas con Red Neuronal Artificial Fuzzy ART", Congreso nacional de Física 2004, ISSN 0187-4713, pp.114, 2004.
- [65] NVIDIA Corporation, "The CUDA Compiler Driver NVCC", ver. 2.0, 2006.
- [66] NVIDIA Corporation, "NVIDIA CUDA: Reference Manual", ver. 3.2, 2010.
- [67] V. García-Acosta, "Los Sismos en la Historia del México", ediciones científicas universitarias, 2001.
- [68] M. A. Biot, "Theory of Elastic Systems under Transient Loading with an Application to Earthquake proof Buildings", proceedings, National Academy of sciences, 19, pp. 262-268, 1933.
- [69] G. W. Houser, "Calculating the Response of an Oscillator to Arbitrary Ground Motion", *Bulletin of the seismological Society of America*, 31, pp.143-149, 1941.
- [70] N. M. Newmark, W. J. Hal, "Earthquake Spectra and Design", earthquake engineering research institute, Berkeley, pp. 29-37, 1982.
- [71] Shishoni, N. Intrator, "Classifying Seismic Signals by Integrating Ensembles of Neural Networks", *Proceedings of INCONIP'96. Progress in Neural Information Processing*, Vol. 1, pp 84-90, 1996.
- [72] D. G. Zill, "Ecuaciones Diferenciales con Aplicaciones", grupo editorial iberoamericana, 1997.
- [73] S. David Watkins, "Fundamentals of Matrix Computations", Ed. John Wiley & Sons, 289-502, 2002.
- [74] G. Arfken, "Eigenvectors, Eigenvalues.", *Mathematical Methods for Physicists*, 3rd ed. Orlando, FL: Academic Press, pp. 229-237, 1985.
- [75] T. Kanungo, D. M. Mount, N. S. Netanyahu, C. D. Piatko, R. Silverman, A. Y. Wu, "An Efficient k-Means Clustering Algorithm: Analysis and Implementation", *IEEE Transaction on Patterns Analysis and Machine Intelligence*, vol. 24, no. 7, pp 881-892, 2002.
- [76] J. B. MacQueen, "Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations", *Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Berkeley, University of California Press, pp281-297, 1967.
- [77] S. Giovinazzi, M. Cubrinovski, "Liquefaction Hazards for Seismic Risk Analysis", *New Zealand Society of Earthquake Engineering Conference*, 2007.
- [78] Seed, H. B., Idriss, I. M., "A simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", *Earthquake Engineering Research Centre*, report no. EERC 70-9, 1970.
- [79] A. J. Alfaro, L. Moreno, "De los Microsismos a los Microtemblores.

- Investigaciones en el Instituto Geofísico”. VIII Congreso Colombiano De Geotecnia, Sociedad Colombiana de Geotecnia, p.2.55 - 2.66, 2000.
- [80] J. E. Ramírez, “An Experimental Investigation of the Nature and Origin of Microseisms at St. Louis”, Missouri, PhD. Dissertation, 1939.
- [81] K. Seo, “A joint research on Microtremor Measurements in Kushiro City Related to the 1993 Kushiro-Oki (Hokkaido, Japan) Earthquake”, Report of the Research Group on Microtremor Joint Measurements Related to the 1993 Kushiro-Oki (Hokkaido, Japan) Earthquake. Proc. 5th International Conference Seismic Zonation, Vol. III, Pag 2271-2278, 1995.
- [82] E. Deza, M. M. Deza, “Encyclopedia of Distances”, Springer, 2009.
- [83] E. V. Ortega-Gonzales, “Una técnica para el Análisis de Similitud entre Imágenes”, Tesis de Maestría, Centro de Investigación en Computación, 2007.

# Apéndice A

## Apéndice A.1. Cómputo en GPU

En los últimos años la computación evoluciona desde el "procesamiento central" en la CPU hasta el "coprocesamiento" en la CPU y la GPU, anunciándose con la llegada de CPU's multinúcleo y GPU's con muchos núcleos, por necesidad de resolver grandes problemas en el menor tiempo posible. Actualmente existen varias plataformas de programación paralela en GPU, que nos ayudan a programar desde un nivel un poco más alto que el que se hacían en la programación paralela clásica. Esta arquitectura permite ejecutar miles de hilos y alcanzar un incremento de desempeño mayor al de cualquiera de los CPU actuales más potente. Algunas de estas plataformas son, CUDA de NVIDIA, OpenCL es modelo estándar de programación desarrollado conjuntamente por Apple, Intel, AMD/ATI y NVIDIA, y DirectCompute de Microsoft que es un API que corre sobre CUDA [20].

CUDA (Compute Unified Device Architecture) es la arquitectura de computación paralela de NVIDIA que permite un aumento importante en el rendimiento de los cálculos al aprovechar la potencia de la GPU (unidad de procesamiento de gráficos).

En CUDA hay parte del código que se ejecuta en una entidad que llaman host (sistema principal) y otra que se ejecuta en otra entidad llamada device (GPU) a través de funciones llamadas kernel. El host se refiere al entorno anfitrión en nuestro caso el CPU y la memoria de sistema, y el device es en nuestro caso el GPU con sus propios cores y memoria.

Los hilos en GPU y CPU son muy diferentes, porque, los hilos en GPU son más ligeros, hay poca sobrecarga al crearlas y el intercambio entre hilos es instantáneo. El GPU necesita de miles de hilos para lograr mayor desempeño [43].

La ejecución de un kernel en múltiples hilos es organizada en grid de bloques de hilos, los hilos dentro de un bloque son ejecutadas en el mismo multiprocesador y pueden cooperar entre ellas. Los hilos y los bloques tienen identificadores para 1D, 2D y 3D, para que cada hilo pueda decidir sobre qué datos trabajar (Figura 1).

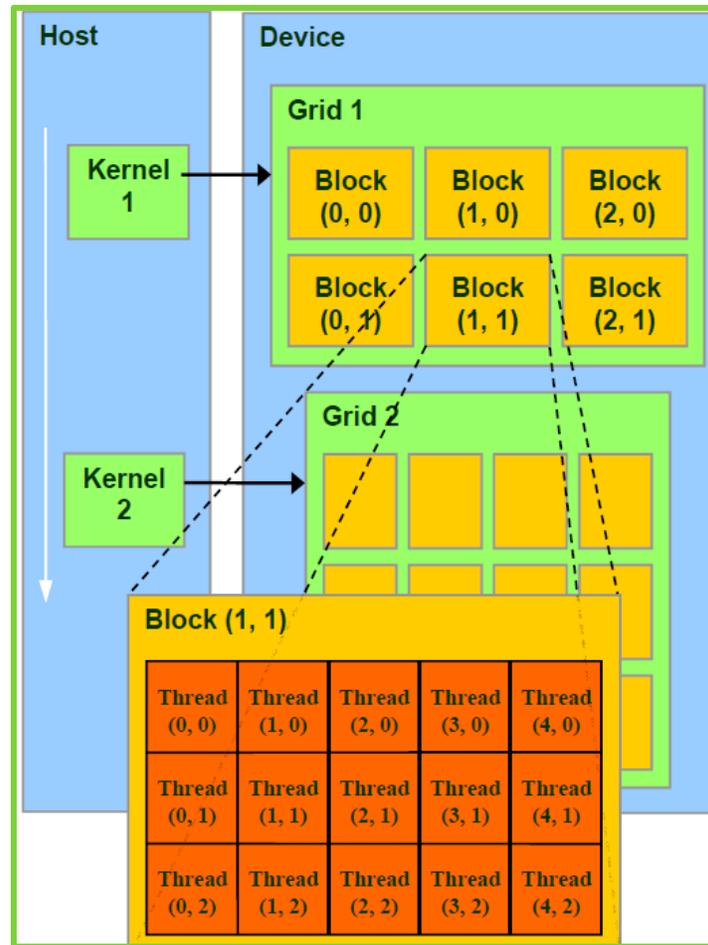


Figura 1. Organización de hilos.

El modelo de memoria de CUDA es que el host puede leer y escribir en la memoria global, de constantes y de textura, y la jerarquía de memoria funciona de forma en la que solo se puede mover datos de la memoria del host-> memoria global, constante o texturas del device -> memoria local o memoria compartida del device y viceversa (Figura 2) [19,20,42].

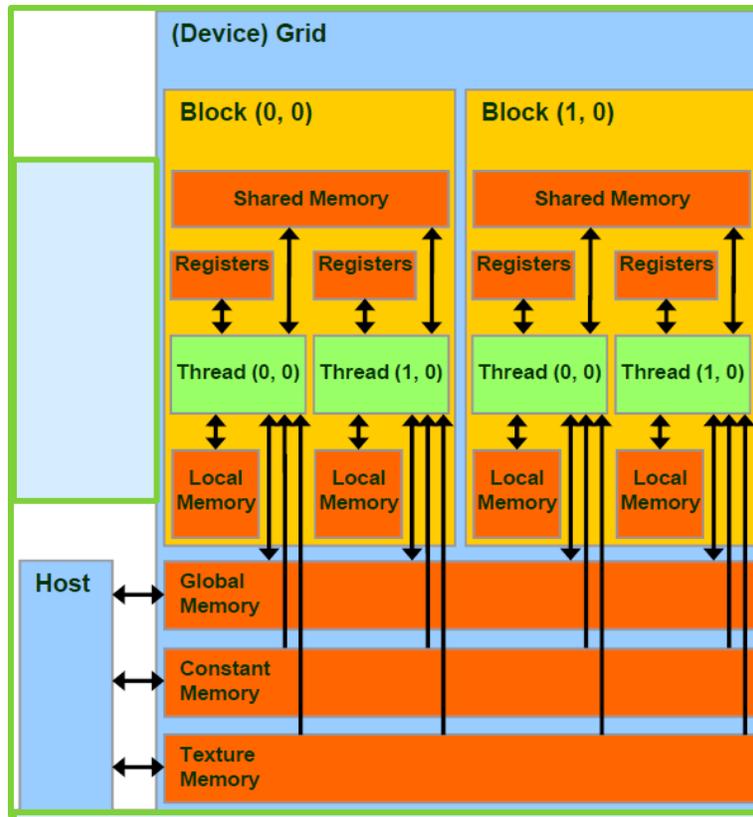


Figura 2. Jerarquía de niveles de memoria.

El procedimiento básico para programar en GPU es ejemplificado con la suma de 2 vectores [65,66]:

1. Reservar memoria en el device para vector1\_h y vector2\_h.
2. Copiar los vectores vector1\_h y vector2\_h del Host a los vectores vector1\_d y vector2\_d del device.

Ejecuta kernel.

```
// Este es el kernel que se ejecuta en paralelo en múltiples tareas // a la vez
__global__ void d_procesarVectores(int* vector1_d, int* a vector2_d, int* vectorR_d)
{
    // Cada tarea tiene un ID numérico basadn en su posición en el bloque.
    int idx = blockIdx.x * blockDim.x + threadIdx.x;

    // Cada tarea trabaja sobre una porcion de los datos
    arrayDestino[idx] = vector1_d [idx] vector2_d [idx];
}

```

3. Copia los vectores de resultados del device a los vectores del host.

Se utilizó un GPU NVIDIA GTS 450 (Figura 3), con las características de la Tabla 1.



Figura 3. GPU NVIDIA GTS 450

<b>Memory Amount</b>	<b>1024MB</b>
<b>Memory Interface</b>	128bit
<b>DRAM Type</b>	GDDR5
<b>Graphics Clock (MHz)</b>	930MHz
<b>Memory Clock (MHz)</b>	2000MHz
<b>Processor Clock (MHz)</b>	1860MHz
<b>CUDA Cores</b>	192
<b>Memory Bandwidth (GB/sec)</b>	64
<b>Texture Fill Rate (billion/sec)</b>	25.1

Tabla 1. Especificaciones de GPU NVIDIA GTS 450

## Apéndice A.2. Creación de la base de datos

Orden de creación de la base de datos de sismos fuertes correcta:

1.- Se crea la base de datos DB\_1, la cual se llena con las información leída de los registros sísmicos en texto, también se estandarizaron los formatos de fecha, hora y checar que los principales campos no estén vacíos.

Los campos guardados en esta base de datos son: fecha del sismo, número de evento, clave de estación, nombre de la estación, ubicación de la estación (latitud, longitud y altitud), tipo de suelo sobre la que está ubicada la estación, institución responsable de la estación sísmica, hora en la que se recibió la primera muestra, número de muestras, intervalo de muestreo, orientación del canal 1, orientación del canal 2, orientación del canal 3, magnitud, hora del sismo en el epicentro, ubicación del epicentro (longitud, latitud y profundidad), fue de datos epicentrales, acelerograma del canal 1, acelerograma del canal 2, acelerograma del canal 3.

2.- se seleccionan los registros sísmicos de DB\_1 que estén dentro del Área Metropolitana y se copian a la base de datos DB\_2.

3.- De los registros sísmicos de DB\_2 se analiza el campo número de muestras para que sea consistente con el tamaño de acelerograma, también analiza el área de comentarios y la de calidad de acelerogramas, los registros sísmicos correctos se

pasan a la DB\_3.

4.-Se seleccionan los registros sísmicos de DB\_3 que tienen número de muestras mayores o igual a 3000 y se copian a DB\_4.

5.-Se revisan de forma manual cada uno de los acelerogramas de la DB\_4 para identificar algunas señales erróneas como acelerograma en forma de senoidal, magnitudes de aceleración descabelladas, etc. Y se copian todos los registros sísmicos correctos a la DB\_5.

Dónde:

DB\_1: se crea con el script “mydb\_metro\_1.1.sql” y la base de datos se llama *db\_bmsf\_1*.

DB\_2: se crea con el script “mydb\_metro\_1.2.sql” y la base de datos se llama *db\_bmsf\_2*.

DB\_3: se crea con el script “mydb\_metro\_1.3.sql” y la base de datos se llama *db\_bmsf\_3*.

DB\_4: se crea con el script “mydb\_metro\_1.4.1.sql” y la base de datos se llama *db\_bmsf\_4*.

DB\_5: se crea con el script “mydb\_metro\_1.6.sql” y la base de datos se llama *db\_bmsf\_5*.

Orden de ejecución de programas y scripts, tal y como se mencionó anteriormente:

1. prueba\_mysql\_1.2: lee los registros sísmicos de la BMSF que están en formato ASCII y lo carga a la DB\_1 de mysql, estandarizando el formato de fecha y de hora, y checa que los principales campos no estén vacíos o con errores.
2. script\_selec\_metro.sql: Selecciona de DB\_1 y copia a DB\_2 solo los registros sísmicos dentro del Área Metropolitana
  - Punto\_1: 19.641696° latitud, -99.441895° longitud.
  - Punto\_2: 19.641696° latitud, -98.817529° longitud.
  - Punto\_3: 19.024691° latitud, -98.817529° longitud.
  - Punto\_4: 19.024691° latitud, -99.441895° longitud.
3. crea\_list\_reg\_acel\_Db: crea una lista de los registros leídos de la db, que no les falta el campo fecha y el campo comentarios es favorable.
4. prueba\_mysql\_1.3: carga la lista de registros correctos y verifica que el número de muestras del registro sísmico sea igual al capturado, la información validada es enviada a la DB\_3.
5. script\_db\_copia\_1.sql: Selecciona solo los registros que tengan un número de muestra mayor o igual a 3000 muestras y lo envía a la DB\_4.
6. revision aceleros 1.0: Se revisan de forma manual y después se crean listas de que registros sísmicos omitir.
7. - copia\_db\_bmsf\_1.1: carga la lista de registros sísmicos a omitir y copia los registros correctos a la DB\_5.

### Apéndice A.3. Requerimientos

Los requerimientos de hardware y software para poder ejecutar este programa son los siguientes:

- Tarjeta Gráfica de NVIDIA compatible con CUDA.
- Driver el GPU de NVIDIA.
- Cuda toolkit.
- Sistema Operativo Ubuntu 10.04.
- SDK de Qt.
- Mysql y driver de conexión a mysql para QT compilado.
- Matlab, crp toolbox de Marwan.

Los programas están compilados y probados en Linux Ubuntu 10.04 a 64 bits para AMD.

### Apéndice A.4. Programas para la hacer la firma

El orden en que se utilizan los programas para crear la firma se especifica en la **Figura 4**, en el primer cuadro de cada están los para metros necesarios para que funcione el programa y en el segundo cuadro la tarea que realiza el programa.

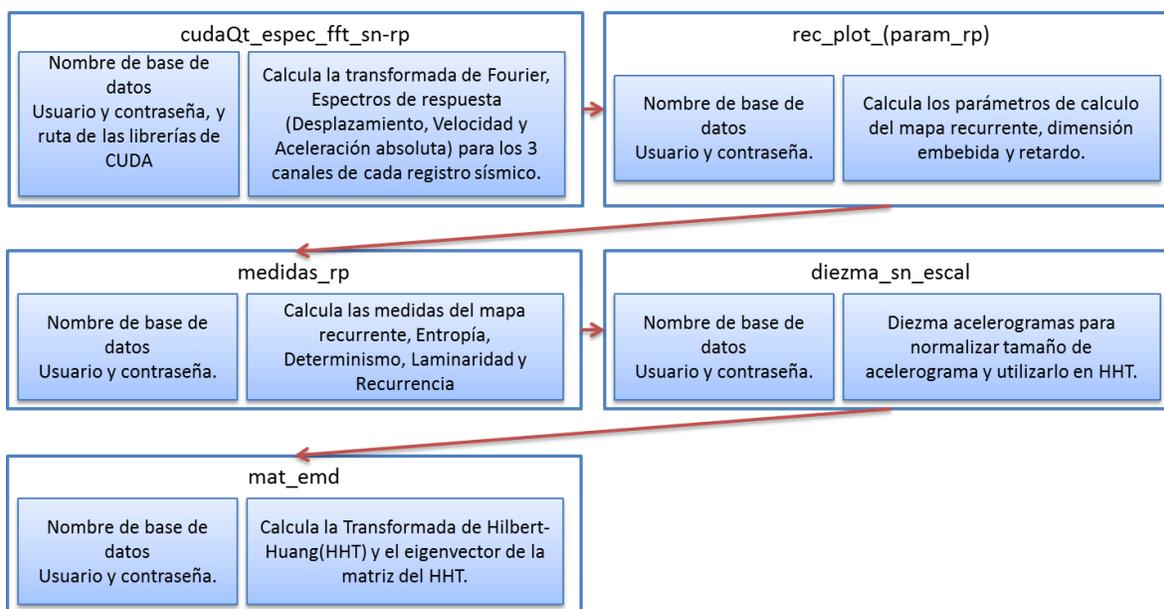


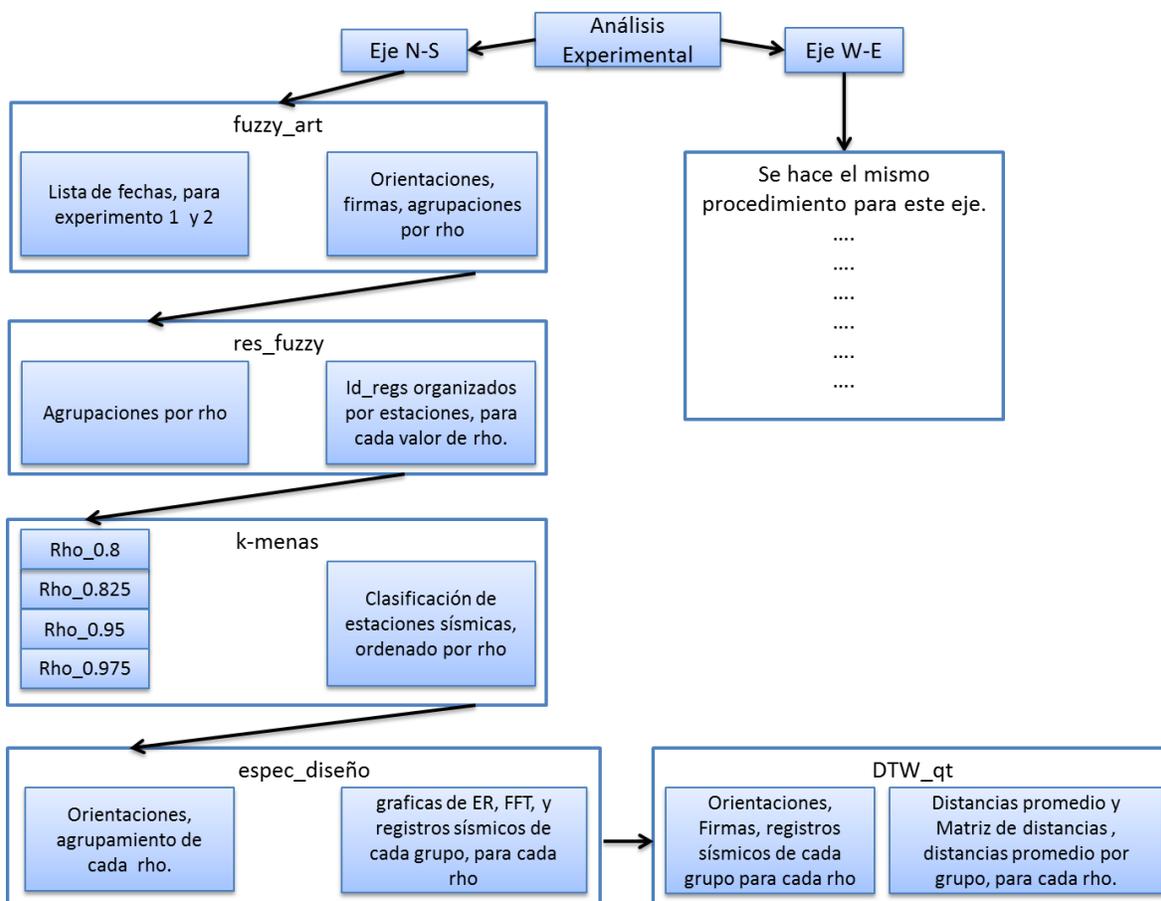
Figura 4. Programas para creación de las firmas.

Estos programas están dentro de la carpeta “progs\_tecnicas”.

## Apéndice A.5. Programas análisis experimental

### Apéndice A.5.1. Zonificación gruesa

El orden en que se utilizan los programas para crear la firma se especifica en la **Figura 5**, en el primer cuadro de cada cajón están los parámetros necesarios para que funcione el programa y en el segundo cuadro la tarea que realiza el programa.



**Figura 5. Programas para zonificación gruesa.**

Estos programas están dentro de la carpeta “progs\_firma”.

### Apéndice A.5.2. Zonificación fina

El orden en que se utilizan los programas para crear la firma se especifica en la **Figura 6**, en el primer cuadro de cada cajón están los parámetros necesarios para que funcione el programa y en el segundo cuadro la tarea que realiza el programa.

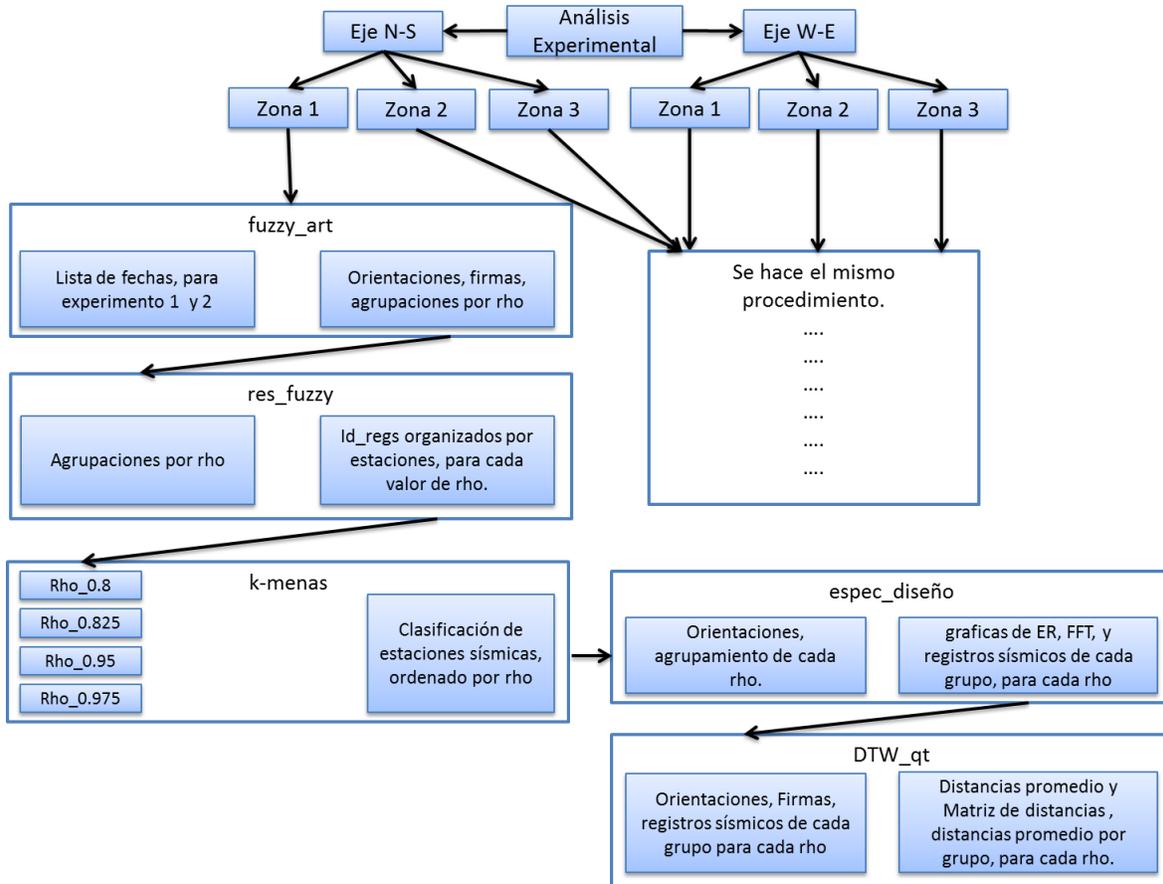


Figura 6. Programas para zonificación fina.

Estos programas están dentro de la carpeta “progs\_firma\_Subzonas”.

# Apéndice B

## Apéndice B.1. Orientaciones

Las orientaciones de los registros sísmicos dentro de la base de datos están basadas en las orientaciones de una brújula dividida en cuadrantes de 90 grados como en la Figura 7 y está dividido en dos ejes Norte-Sur (N-S) y Oeste-Este (W-E).

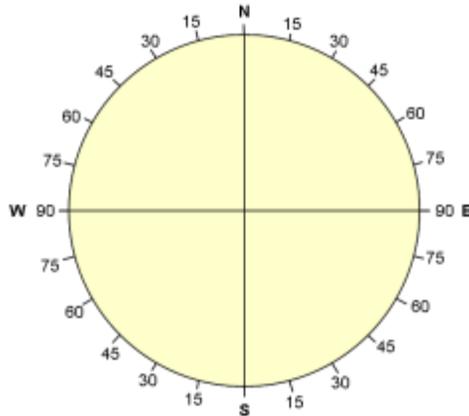


Figura 7. Brújula de orientación Quadrant Bearing.

En la Tabla 2 están las direcciones de medición de cada cuadrante.

Cuadrante	Dirección de medición	Inicia/Finaliza
NE	Horario	Norte a Este
SE	Anti-horario	Sur a Este
SW	Horario	Sur a Este
NW	Anti-horario	Norte a Este

Tabla 2. Dirección de medida de cada cuadrante.

Entonces si tenemos una orientación N45E sería como la de la Figura 8.

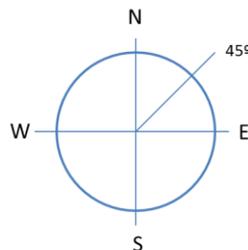


Figura 8. Orientación N45E.

En la base de datos de sismos fuertes se cuenta con tres canales que se encargan de tomar lectura de las aceleraciones sobre tres orientaciones, y presenta algunas orientaciones como las mostradas en la Tabla 3 donde se observa que no están normalizados los canales conforme a algún eje N-S o W-E, por lo que es necesario ordenar las orientaciones de cada uno de los canales.

Estación	Canal_1	Canal_2	Canal_2
AE02	N00E	+V	N90W
AI01	N00E	+V	N90E
CDAO	V	N90E	N00E
CHAS	N00E	N90E	V
IMP3	N26W	N64E	V
MEZO	V	N14E	S76E
...	...	...	...

Tabla 3. Orientación de estaciones sísmicas.

Por lo tanto el canal con el menor ángulo de orientación corresponderá al eje N-S y el que tenga el mayor ángulo al eje W-E y el que contenga v al eje vertical, como en la **Tabla 4**.

Estación	N-S	W-E	V
AE02	N00E	N90W	V
AI01	N00E	N90E	V
CDAO	N00E	N90E	V
CHAS	N00E	N90E	V
IMP3	N26W	N64E	V
MEZO	N14E	S76E	V
...	...	...	...

Tabla 4. Orientación de estaciones correcta.

Este arreglo de orientaciones se debe hacer para cada registro sísmico, para ser consistente en la Agrupación de Firmas de registros sísmicos.

## Apéndice B.2. Distancias

### *Distancia Euclidiana*

Es probablemente el tipo de distancia más utilizado, y es la distancia geométrica en un espacio multidimensional.

Si  $a=(x_1, x_2, \dots, x_n)$  y  $b=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ , entonces la fórmula generalizada para  $\mathcal{R}^n$  es:

$$d(a,b) = \sqrt{\sum_{i=0}^n (a_i - b_i)^2} \quad (1)$$

### *Distancia de Minkowski*

Esta distancia es una generalización de la distancia euclidiana, donde p es un parámetro es el orden, para este trabajo utilizamos p=3;

$$d(a,b) = \left( \sum_{i=1}^n |a_i - b_i|^p \right)^{1/p} \quad (2)$$

***Distancia City-block***

También es llamada distancia Manhattan, es la distancia que tendría que viajar para llegar a un punto siguiendo un camino.

Si  $a=(x_1, x_2, \dots, x_n)$  y  $b=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ , entonces la formula generalizada para  $\mathfrak{R}^n$  es:

$$d(a,b) = \sum_{i=1}^n |a_i - b_i| \quad (3)$$

***Similitud Coseno.***

Es una medida de similitud entre dos vectores midiendo el ángulo coseno entre ellos, se utiliza usualmente en minería de datos.

Si  $a=(x_1, x_2, \dots, x_n)$  y  $b=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ , entonces la formula generalizada para  $\mathfrak{R}^n$  es:

$$S(a,b) = \frac{\sum_{i=1}^n a_i x b_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (b_i)^2}} = \cos(\varphi) \quad (4)$$

***Alineación de series de tiempo Fast Dynamic Time Warping***

Existen varias técnicas para la comparación de secuencias como series de tiempo. Algunas de ellas permiten hacer alineamiento de secuencias y medir el esfuerzo necesario, expresado como la distancia mínima. Para estos efectos, se seleccionó a la técnica conocida como Dynamic Time Warping (DTW) para minimizar la distancia en términos de una métrica o distancia base [83].

También existe una variante de DTW llamada Fast Dynamic Time Warping (FDTW) cuya complejidad espacial y temporal está caracterizada por un polinomio de grado 2. La solución de la comparación de dos secuencias con FDTW es la distancia mínima total y la ruta de ajuste (warpath). La ruta de ajuste nos indica cuales son las relaciones entre los elementos de ambas secuencias dadas por la alineación encontrada. A continuación se describe el algoritmo de la solución a la alineación de secuencias con FDTW [83]:

////////////////////////////////////  
Sean  $Q=\langle q_1, q_2, \dots, q_n \rangle$  y  $C=\langle c_1, c_2, \dots, c_m \rangle$  las secuencias de entrada,  $R_{n \times m} = (r_{ji})$  la matriz de distancias d la distancia mínima entre las secuencias.

- Inicializar  $r_{i,j} \leftarrow 0$  para  $i=1, \dots, n$  y  $j=2, \dots, m$
  - Asignar  $r_{1,1} \leftarrow d_{base}(q_1, c_1)$ 
    - Repetir para  $i=2, \dots, n$ 
      - Calcular  $r_{i,j} \leftarrow d_{base}(q_i, c_1) + r_{(i-1),1}$
    - Repetir para  $j=2, \dots, m$ 
      - Calcular  $r_{1,j} \leftarrow d_{base}(q_1, c_j) + r_{1+(j+1)}$
    - Repetir para  $i=2, \dots, n$ 
      - Repetir para  $j=2, \dots, m$ 
        - Calcular  $u \leftarrow d_{base}(q_i, c_i) + r_{(i-1),(j-1)}$
        - Calcular  $v \leftarrow d_{base}(q_i, c_i) + r_{i,(j-1)}$
        - Calcular  $w \leftarrow d_{base}(q_i, c_i) + r_{(i-1),j}$
        - Asignar  $r_{i,j} \leftarrow \min\{u, v, w\}$
  - Asignar  $d \leftarrow r_{n,m}$
- ////////////////////////////////////

Por la escala de magnitudes de las series de tiempo se producían algunos falsos positivos cuando se realizaban comparaciones, para minimizar el este efecto se utiliza una distancia base normalizada similar a la fórmula para medición de error cuadrático medio normalizado de esta forma [83].

$$d_{base}(q_i, c_j) = \left| \frac{q_i - c_i}{\bar{q} - q_i} \right| \quad (5)$$

Donde  $\bar{q}$  es el valor medio de la primera secuencia. Entonces en general se puede afirmar que  $DTW(Q,C) \neq DTW(C,Q)$ , es decir DTW no es simétrica bajo la nueva definición de la distancia base.

### Apéndice B.3. Estaciones

En la siguiente tabla se presenta la ubicación geográfica y altitud a la que se encuentran todas las estaciones utilizadas.

<b>Estación</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>	<b>Estación</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>	<b>Estación</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>
<b>AE02</b>	19.429	-99.058	2232	<b>DFRO</b>	19.405	-99.166	2240	<b>PD42</b>	19.406	-99.1	2234
<b>AL01</b>	19.436	-99.145	2232	<b>DFVG</b>	19.419	-99.126	2240	<b>PE10</b>	19.39	-99.132	2232
<b>AO24</b>	19.358	-99.154	2235	<b>DM12</b>	19.431	-99.096	2232	<b>PENR</b>	19.332	-99.041	2240
<b>AP68</b>	19.381	-99.107	2232	<b>DR16</b>	19.501	-99.183	2233	<b>PII6</b>	19.351	-99.186	2260
<b>AR14</b>	19.481	-99.076	2232	<b>DX37</b>	19.332	-99.144	2240	<b>RIDA</b>	19.52	-99.19	2240
<b>AU11</b>	19.392	-99.087	2234	<b>EO30</b>	19.389	-99.177	2236	<b>RIDI</b>	19.36	-99.06	2235
<b>AU46</b>	19.383	-99.168	2233	<b>ES57</b>	19.402	-99.177	2242	<b>RIDX</b>	19.31	-99.1	2235
<b>BA49</b>	19.41	-99.145	2233	<b>ESTS</b>	19.4916	-99.1111	2245	<b>RM48</b>	19.436	-99.128	2232
<b>BO39</b>	19.465	-99.105	2232	<b>EX12</b>	19.424	-99.16	2233	<b>RMAS</b>	19.42	-99.1547	2235
<b>CA59</b>	19.426	-99.118	2233	<b>FJ74</b>	19.299	-99.21	2240	<b>RMBS</b>	19.4202	-99.154	2235
<b>CDAO</b>	19.372	-99.096	2240	<b>GA62</b>	19.439	-99.14	2232	<b>RMCS</b>	19.4191	-99.1546	2235
<b>CE18</b>	19.34	-99.085	2240	<b>GC38</b>	19.316	-99.106	2233	<b>SCT1</b>	19.393	-99.147	2240
<b>CE23</b>	19.462	-99.064	2233	<b>GR27</b>	19.475	-99.18	2238	<b>SCT2</b>	19.393	-99.147	2240
<b>CE32</b>	19.386	-99.054	2233	<b>HA41</b>	19.418	-99.079	2233	<b>SI53</b>	19.375	-99.148	2235
<b>CENA</b>	19.3143	-99.1762	2270	<b>HJ72</b>	19.425	-99.13	2232	<b>SP51</b>	19.366	-99.119	2234
<b>CH84</b>	19.33	-99.125	2234	<b>IB22</b>	19.345	-99.13	2234	<b>TACY</b>	19.403	-99.194	2240
<b>CHAS</b>	19.4157	-99.2048	2245	<b>IM40</b>	19.343	-99.203	2240	<b>TE07</b>	19.427	-99.222	2290
<b>CI05</b>	19.419	-99.165	2233	<b>IMPS</b>	19.4885	-99.1489	2230	<b>TH35</b>	19.279	-99	2238
<b>CJ03</b>	19.41	-99.157	2233	<b>JA43</b>	19.405	-99.125	2234	<b>TL08</b>	19.45	-99.134	2232
<b>CJ04</b>	19.41	-99.157	2233	<b>JC54</b>	19.313	-99.127	2237	<b>TL55</b>	19.436	-99.143	2232
<b>CO47</b>	19.371	-99.17	2247	<b>LI33</b>	19.306	-98.963	2238	<b>TLAS</b>	19.3967	-99.1047	2235
<b>CO56</b>	19.422	-99.159	2233	<b>LI58</b>	19.426	-99.157	2233	<b>TP13</b>	19.292	-99.171	2265
<b>COYS</b>	19.3477	-99.1687	2250	<b>LV17</b>	19.493	-99.128	2233	<b>TXS1</b>	19.493	-98.973	2240
<b>CP28</b>	19.439	-99.084	2240	<b>MADR</b>	19.536	-99.261	2240	<b>TXS2</b>	19.492	-98.977	2240
<b>CS78</b>	19.366	-99.226	2430	<b>ME52</b>	19.438	-99.182	2238	<b>UC44</b>	19.434	-99.165	2234
<b>CT64</b>	19.488	-99.114	2240	<b>MEZO</b>	19.188	-99.228	3450	<b>UI21</b>	19.365	-99.226	2540
<b>CU80</b>	19.294	-99.104	2232	<b>MI15</b>	19.283	-99.125	2237	<b>UNKS</b>	19.4186	-99.1111	2235
<b>CUIG</b>	19.329	-99.178	2257	<b>MT50</b>	19.425	-99.19	2234	<b>VG09</b>	19.454	-99.123	2233
<b>CUP1</b>	19.33	-99.183	2240	<b>MY19</b>	19.346	-99.043	2237	<b>VM29</b>	19.381	-99.125	2234
<b>CUP2</b>	19.33	-99.183	2240	<b>NZ20</b>	19.403	-99	2232	<b>XO36</b>	19.271	-99.102	2232
<b>CUP3</b>	19.33	-99.183	2240	<b>NZ31</b>	19.417	-99.025	2234	<b>XP06</b>	19.42	-99.135	2232
<b>CUP4</b>	19.33	-99.183	2240	<b>PA34</b>	19.202	-99.049	2240	<b>ZARS</b>	19.4192	-99.0876	2235
<b>CUP5</b>	19.33	-99.183	2240	<b>PCJR</b>	19.42	-99.15	2240				

Tabla 5. Altitud y coordenadas geográficas de las estaciones sísmicas.



# Glosario

**Serie de Tiempo:** es el conjunto de datos numéricos que se obtienen en períodos regulares a través del tiempo para un fenómeno.

**Datum:** es un conjunto de puntos de referencia en la superficie terrestre en base a los cuales las medidas de la posición son tomadas y un modelo asociado de la forma de la tierra (elipsoide de referencia) para definir el sistema de coordenadas geográfico. Datums horizontales son utilizados para describir un punto sobre la superficie terrestre. Datums verticales miden elevaciones o profundidades.

**Georeferenciación:** refiere al posicionamiento con el que se define la localización de un objeto espacial (representado mediante punto, vector, área, volumen) en un sistema de coordenadas y datum determinado.

**Firma:** es la concentración de las características o medidas ortogonales de un registro sísmico, con la finalidad de caracterizar registros sísmicos.

**RNA:** red neuronal artificial.

**Registro sísmico:** conjunto de información concerniente a un sismo registrado en una estación sísmica, contiene fecha, hora, día, datos de la estación, acelerogramas, etc.

**Distancia:** para el presente trabajo se puede entender como una magnitud complementaria a la similitud que consecuentemente nos indica la diferencia.

**DTW:** del inglés Dynamic Time Warping. Es una técnica para cuantificar y obtener la alineación que representa la distancia mínima entre dos secuencias de datos bajo restricciones de monotonía.

**Similitud:** también conocida como semejanza. Más allá de las discusiones y modelos teóricos, se puede definir como la intensidad de la relación entre dos entidades cuya medición se basa en las características que comparten y en las que difieren.

**Litología:** es la parte de la geología que trata de las rocas, especialmente de su tamaño de grano, del tamaño de las partículas y de sus características físicas y químicas. Incluye también su composición, su textura, tipo de transporte así como su composición mineralógica, distribución espacial y material cementante.

**Geofísica:** es la ciencia que se encarga del estudio de la Tierra desde el punto de vista de la física. Su objeto de estudio abarca todos los fenómenos relacionados con la estructura, condiciones físicas e historia evolutiva de la Tierra. Al ser una disciplina experimental, usa para su estudio métodos cuantitativos físicos como la física de reflexión y refracción de ondas mecánicas, y una serie de métodos basados en la medida de la gravedad, de campos electromagnéticos, magnéticos o eléctricos y de fenómenos

radiactivos. En algunos casos dichos métodos aprovechan campos o fenómenos naturales (gravedad, magnetismo terrestre, mareas, terremotos, tsunamis, etc.) y en otros son inducidos por el hombre (campos eléctricos y fenómenos sísmicos).

**Ingeniería geotécnica:** es la rama de la ingeniería civil e ingeniería geológica que se encarga del estudio de las propiedades mecánicas, hidráulicas e ingenieriles de los materiales provenientes de la Tierra. Los ingenieros geotécnicos investigan el suelo y las rocas por debajo de la superficie para determinar sus propiedades y diseñar las cimentaciones para estructuras tales como edificios, puentes, centrales hidroeléctricas, estabilizar taludes, construir túneles y carreteras, etcétera.

## Trabajos futuros

A continuación se describen algunas líneas de trabajo a futuro propuestas a partir de la metodología, resultados y conclusiones expuestos en la presente tesis. Algunas de ellas ya han sido exploradas con resultados interesantes.

- Incluir en la metodología, la utilización de un clasificador supervisado, para refinar la clasificación de estaciones.
- Analizar detenidamente por zona la información obtenida de las técnicas de análisis de señales utilizadas.
- Hacer análisis en tiempo, en el que se pueda observar los cambios de respuesta del suelo.
- Aplicarlo a otras ciudades con alto riesgo sísmico.

# Publicaciones en congresos y revistas

## Sistema de Instrumentación Sísmica.

G. A. Torres-Beltrán, C. Bustillo-Hernández & J. Figueroa-Nazuno

**Resumen**—En este trabajo se implementa un sistema de software y hardware en donde se integra un sismógrafo electrónico completo, la adquisición y análisis de señales sísmicas que tiene por objetivo instalarse en edificios o cualquier otra estructura para estudiar tanto la respuesta sísmica mediante las técnicas de espectro de respuesta, transformada de Hilbert-Huang y mapa recurrente que permiten hacer un análisis no lineal de la evolución temporal y acumulativa del comportamiento del edificio o estructura. Así mismo, permite la implementación de alarma sísmica, por ejemplo para el caso de la ciudad de México que se encuentra alejada del epicentro, donde el subsuelo es de extraordinaria complejidad y sensibilidad, es muy importante este tipo de sistemas.

