



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**“MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
URUAPAN, MICHOACÁN”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

ANDRÉS SÁNCHEZ DURÁN


DIRECTOR DE TESIS:

M. I. RAFAEL M. ROJAS ROJAS

MORELIA, MICHOACÁN, JULIO DEL 2013



RESUMEN

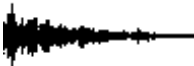


El siguiente trabajo consiste en una propuesta de microzonificación sísmica para la ciudad de Uruapan, municipio del estado de Michoacán de Ocampo. A partir de mediciones de vibración ambiental, mediante la aplicación del método Nakamura (Relación espectral H/V), con el fin de obtener el periodo fundamental del suelo para tener un mejor conocimiento de su comportamiento ante un evento sísmico, ya que esta ciudad se encuentra en una zona de alta sismicidad dentro de la República Mexicana, y es uno de los primeros Municipios en el estado de Michoacán que cuentan con un Reglamento de Construcciones con características propias y definidas de manera específica para el mismo. Sin embargo, este Reglamento carece de parámetros de diseño sísmico de estructuras, los cuales dependen en parte de estudios de peligrosidad y microzonificación sísmica elaborados específicamente para el sitio. Es en este sentido que la presente investigación colabora de manera directa, de cara a obtener parámetros de diseño que a futuro sean racionales y confiables para su incorporación en posteriores modificaciones a la legislación vigente.

El área de estudio abarca 80 km², durante la etapa experimental se obtuvieron 70 registros con vibración ambiental distribuidas a lo largo de la ciudad en 24 estaciones. El impacto de la propuesta es actualizar datos acerca de los periodos de vibrar del suelo de la ciudad y ser una ayuda de diseño, ya que este municipio es uno de los más importantes en el estado, debido a lo anterior es necesario contar con herramientas que nos permitan diseñar estructuras con criterios sísmicos.

Por último cabe señalar los datos obtenidos serán donados al Colegio Michoacano de Ingenieros Civiles A.C, los cuales beneficien de manera directa al Ayuntamiento de Uruapan.

(Palabras clave: microzonificación sísmica, isoperiodos, método Nakamura, Uruapan)





*A mi esposa Brenda y
mi Hija María Fernanda.*

AGRADECIMIENTOS

Gracias a este trabajo me ha sido posible agradecer el apoyo de muchas personas, a las que les debo mi mayor gratitud, admiración, respeto y cariño, ya que representa la culminación de mucho esfuerzo y el logro de una meta muy importante en mi vida.

A mi asesor de tesis: M.CI. Rafael Rojas Rojas por ser un excelente maestro, por sus consejos, anécdotas, enseñanzas y por haber sido mi tutor durante 4 semestres.

Al Dr. Guillermo Martínez Ruiz y la Dra. Bertha Alejandra Olmos por todo su apoyo, colaboración e información facilitada.

Por supuesto, mi agradecimiento a toda mi familia:

En especial a mi esposa Brenda García de la Cruz por su cariño, amor y apoyo incondicional. A mi hija María Fernanda por ser mi motivación. A mis padres Ramón Sánchez Tello y Beatriz Duran Álvarez, por asegurarme de que llegara hasta aquí y por preguntarme tantas veces “cómo vas con la tesis”. A mis hermanas Mónica y Alejandra, que aunque nos peleamos mucho siempre se preocupan por mí. A mis suegros René García Arcadia y Ana Mercedes de la Cruz Jiménez y a mis cuñados Rene, Aline y Mauricio.

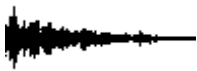
También debo de agradecer y reconocer al Colegio Michoacano de Ingenieros Civiles A.C, y a su presidenta la Ing. Sandra Natalia Parra Macías.

A todos los profesores de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por mi formación académica.

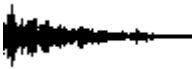
Y por último pero no menos importante a mis amigos y compañeros de clase por darme el placer de haber convivido con ellos durante 5 años y compartir tantas alegrías que nunca olvidare.

INDICE

RESUMEN	I
AGRADECIMIENTOS.....	IV
INDICE DE FIGURAS Y TABLAS.....	7
I.-INTRODUCCION	9
1.1.-PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	10
1.2.-OBJETIVOS.	11
1.3.-JUSTIFICACION.	12
1.4.-AREA DE ESTUDIO.	12
1.4.1.-Macro y Microlocalización	13
II.-ANTECEDENTES	14
2.1.-SIMOLOGÍA Y TECTÓNICA DE PLACAS.....	14
2.2.-ORIGEN DE LOS SISMOS.	16
2.3.-MOVIMIENTOS SÍSMICOS.....	18
2.4.-ONDAS SÍSMICAS.	20
2.4.1.-Fuentes de Ondas Sísmicas Superficiales	25
2.4.2.-Factores importantes de las ondas sísmicas	25
2.5.-SISMOGRAFOS Y SISMOGRAMAS.....	26
2.5.-PREDICCIÓN SÍSMICA.	28
2.6.-CARACTERIZACIÓN DEL SITIO.	29
2.6.1.-Microzonificación sísmica.....	29
III.-TOPOGRAFÍA Y ASPECTOS GEOLÓGICOS DE LA CIUDAD DE URUAPAN.....	30
3.1.-ANTECEDENTES.	30
3.2.-GENERALIDADES.....	31
3.3.-TOPOGRAFIA	32
3.4.-ASPECTOS GEOLÓGICOS	35
IV.-PROPIEDADES DINAMICAS DE LOS SUELOS.....	37
4.1.- EFECTOS DE SITIO.	38
4.1.1.-Efectos topográficos.....	38
4.1.2. Efecto de suelo.....	39
4.1.3.-Efectos de capas superficiales blandas	40
4.1.4.-Efectos topografía subsuperficial.....	41
4.2.- PERIODO NATURAL DE LAS ESTRUCTURAS.	42
4.3.- FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO.	42
V.- VIBRACIÓN AMBIENTAL	44
5.1.-ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS.	44
5.2.-NATURALEZA DE LAS VIBRACIONES AMBIENTALES	45
5.3.-MÉTODOS PARA EL ESTUDIO DE LA AMPLIFICACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL SUELO.	47
VI.-TÉCNICA DE LA RAZÓN H/V.....	48
6.1.-MÉTODO NAKAMURA	48
6.1.1.-Proposiciones del Método Nakamura.	49
6.1.2.-Descripción del Método Nakamura.	50
6.1.3.-Ventajas y desventajas del método.....	53



VII.-EQUIPO ACELEROMÉTRICO	54
7.1.-SENSOR	55
7.2.-UNIDAD DE DIGITALIZACIÓN Y ALMACENAMIENTO K2	56
7.3.-EQUIPO ADICIONAL.....	57
VIII.-CAMPAÑAS DE MEDICIÓN.....	58
8.1.-METODOLOGÍA.	58
8.2.-PARAMETROS DE MEDICIÓN	60
8.2.1.-Espaciamiento en las mediciones.....	60
8.2.2.-Zona de influencia de las estaciones.	62
8.2.3.- Nomenclatura de archivos	65
8.2.4- Condiciones experimentales.....	65
IX.- PROCESAMIENTO DE SEÑALES.....	66
9.1.-METODOLOGIA.	66
9.1.1.-Selección de Acelerogramas	68
9.1.2.-Conversion de Datos.....	68
9.1.3.-División de cada registro de aceleraciones en 5 ventanas.....	69
9.1.4.-Aumento de cada ventana en un 50 %.....	70
9.2.- OBTENCIÓN DE LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER PROMEDIO.	71
9.2.1.-Programa DEGTRA A4	71
9.2.2.-Lectura y selección de archivo de aceleraciones.	71
9.2.4.-Filtrado y cálculo de espectro de Fourier.....	73
9.3.-CALCULO DE LA RELACIÓN H/V.....	74
X.-CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE ISOPERIODOS	75
10.1.-MAPAS DE ISOPERIODOS.	76
10.2.-ANÁLISIS DE PERIODOS FUNDAMENTALES.....	78
XI.-CONCLUSIONES.....	80
GLOSARIO	83
ANEXO 1.....	88



INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1.1.- Macrolocalización	13
Figura 1.2.- Microlocalizacion	13
Figura 2.1.- Pangea	14
Figura 2.2.- Proceso de Corrientes de Convección	16
Figura 2.3.- Ejemplo	16
Figura 2.4.- Partes de un sismo	17
Figura 2.5.- Fronteras entre placas tectónicas	19
Figura 2.6.- Calsificación Ondas Sísmicas	20
Figura 2.7.- Representacion de Ondas P y S	21
Figura 2.8.- Representación de Ondas Love y Rayleigh	22
Figura 2.9.- Sismo de El Centro, California 18 de mayo de 1940	23
Figura 2.10.- Sismo de la Ciudad de México, 19 de Septiembre 1985.....	24
Figura 2.11.-. Fuentes de Ondas Sísmicas	25
Figura 2.12.- Sismógrafo	27
Figura 2.13.- Periodos de Retorno Sismos	28
Figura 3.1.- Curvas de Nivel la ciudad de Uruapan	32
Figura 3.2.- Topografía de la ciudad de Uruapan.....	33
Figura 3.3.- Rios, canales y barrancas de la ciudad de Uruapan.....	34
Figura 3.4.- Diagrama geología de Uruapan	35
Figura 3.5.- Mapa geológico Uruapan	36
Figura 4.1.- Efectos de sitio Ciudad de México.....	41
Figura 6.1.- Esquema del modelo seguido por Nakamura.....	50
Figura 6.2.- Descripción de la relación espectral H/V (Modificado de: Ansal, 2004)	52
Figura 7.1.- (a) Espectro sísmico (b) Instrumentos.....	54
Figura 7.2.- Sensor triaxial, utilizado en la mediciones	55
Figura 7.3.- Unidad de digitalización K2	57
Figura 8.1.- Ubicación de los puntos de medición de vibración ambiental.....	60
Figura 8.2.- Zona de influencia de las estaciones de medición.....	62
Figura 8.3.- Zona de influencia Centro de la Ciudad de Uruapan.....	63
Figura 9.1.- Diagrama Procesamiento de Señales.....	67

Figura 9.2.- Selección de Acelerogramas.....	68
Figura 9.3.- Programa para elaboración de vectores	69
Figura 9.4.- Programa para división en ventanas de los registros.....	70
Figura 9.5.- Ventanas de los registros aumentadas al 50%	70
Figura 9.6.- Lectura de archivos programa DEGTRA.....	71
Figura 9.7.- Lectura de acelerogramas usado Programa Degtra.....	72
Figura 9.8.- Filtrado y cálculo de trasformada de Fourier en el Programa Degtra.....	73
Figura 9.6.- Lectura de archivos programa DEGTRA.....	71
Figura 10.1.- Mapa de Isoperiodos de la Ciudad de Uruapan.....	76
Figura 10.2.- Mapa de Isoperiodos zonificado de la Ciudad de Uruapan.....	77
Figura 10.3.- Histgrma con el porcentaje de distribución de periodos.....	79

NDICE DE TABLAS

Tabla 7.1.- Descripción del sensor empleado en las mediciones.....	55
Tabla 7.2.- Descripción de la unidad de digitalización.....	56
Tabla 8.1.- Puntos de medición de vibración ambiental.....	61
Tabla 8.2.- Área de influencia de los puntos de medición	64
Tabla 10.1- Resultados de periodos	78



I.-INTRODUCCION

A lo largo de la historia, el hombre se ha visto en la necesidad de construir estructuras con la finalidad de cubrir sus necesidades, desde la prehistoria se han hecho una inmensidad de diferentes estructuras, desde las más sencillas y elementales, hasta los más grandes rascacielos que conocemos hoy en día. Las estructuras, al desarrollar la función para la que fueron creadas estarán sujetas a ciertas cargas y deben ser capaces de soportarlas, por lo que es de vital importancia que estén bien diseñadas, y para lograrlo es necesario considerar todo los factores que intervienen. Dentro de la clasificación de las cargas se tiene las cargas accidentales, aquellas que no se deben al funcionamiento normal de la estructura, pero que toman valores muy significativos en cortos de tiempo en la vida útil de la construcción.

De las acciones accidentales, la más importante para algunas estructuras es el *sismo*, el cual es un fenómeno natural bastante complejo de determinar, ya que no puede ser estudiado como una acción permanente y constante, sino como una acción que cambia su intensidad con respecto al tiempo, otro inconveniente es que es imposible acotar, dentro de límites prácticos, su máxima intensidad que puede ocurrir en un sitio así como el periodo de tiempo en el cual ocurrirá. Desde el seguimiento de los fenómenos sísmicos se ha podido mostrar que las condiciones geotécnicas y geológicas locales del terreno juegan un rol fundamental en las características del movimiento sísmico resultante en superficie.

La amplificación sísmica y el patrón de daño observado durante sismos de gran magnitud presentan una importante variabilidad de un lugar a otro, aun en distancia relativamente cortas, siendo posible explicarlas en la mayor parte de ellas por las variaciones locales del tipo de suelo. Un ejemplo corresponde al observado en ciudad de México el 19 de septiembre de 1985 a las 7:19 a.m., con escala de 8.1 grados en la escala de Richter, que tuvo epicentro en la brecha de Michoacán, donde en algunos sectores constituidos por suelos finos saturados blandos se han medido amplificaciones del movimiento sísmico superiores a 20 veces.

Un inconvenientes es que las técnicas usadas para la caracterización de sitio de un área son, a veces, técnicamente complicadas, costosas y generalmente de difícil aplicación en ambientes urbanos, debido a lo anterior es necesario utilizar técnicas modernas de análisis de vibraciones naturales que, al aplicarse pueden permitir la definición de características sísmicas del sitio, ya que proveen información sobre las condiciones locales de posible amplificación de ondas sísmicas y características del subsuelo.

En este contexto la utilización del **método de Nakamura** (Nakamura, 1989) que utilizando mediciones de vibraciones ambientales permite estimar el periodo fundamental de vibración del sitio en particular analizado.

Sin embargo a pesar de que actualmente tanto en México como en el mundo la tecnología está en constante desarrollo, y cada vez se cuenta con herramientas más precisas y confiables que permiten diseñar de mejor manera cualquier tipo de estructura civil, lamentablemente muchos estados de la República Mexicana carecen de parámetros de diseño sísmico, y peor aún ya que varios estados se encuentran ubicados en zona de alta sismicidad, como lo es el caso del estado de Michoacán de Ocampo.

1.1.-Planteamiento del problema.

La microzonificación sísmica de una ciudad consiste en definir zonas que presentan un comportamiento geomecánico similar, con la finalidad de poder establecer parámetros y recomendaciones específicas para el diseño y construcción de edificaciones.

Las ondas sísmicas al propagarse a través de un medio blando experimentan variaciones en espacio, amplitud, contenido de frecuencias y duración. A este fenómeno se le conoce como *efecto de sitio*. Debido a la estrecha relación que existe entre la naturaleza de la vibración ambiental y el comportamiento dinámico de la capa superficial del suelo, esas pequeñas vibraciones son empleadas en el campo de la ingeniería sísmica, con la finalidad de caracterizar los suelos y las estructuras.

La técnica medición de vibración ambiental y su análisis ha sido frecuentemente utilizada en estudios de microzonificación no solamente en México sino alrededor de todo el mundo. Esta técnica tiene la ventaja de llevar a cabo de manera rápida y sencilla la descripción de los efectos de sitio, cuya importancia radica en la definición y el entendimiento de las propiedades dinámicas del suelo ante la acción de un sismo en un sitio dado. Dentro de las diferentes técnicas que emplean la vibración ambiental para la microzonificación sísmica, la desarrollada por Nakamura (1989) ha tenido gran aceptación debido a su bajo costo y fácil implementación tanto en el trabajo de campo como en el procesamiento de datos.

El siguiente trabajo consiste en la elaboración de la microzonificación sísmica de la ciudad de Uruapan, Michoacán usando el método de Nakamura que tiene como finalidad contribuir al enriquecimiento de la ingeniería sísmica del estado de Michoacán, y sobre todo al municipio de Uruapan, esto con el fin de generar parámetros específicos de diseño.

1.2.-Objetivos.

General:

Realizar una propuesta de microzonificación sísmica para la ciudad de Uruapan, municipio del estado de Michoacán de Ocampo. A partir de mediciones de vibración ambiental, mediante la aplicación del método Nakamura (Relación espectral H/V).

Particulares:

- ❖ Investigar las características geológicas y geotécnicas que pudieran incidir de forma directa en la respuesta sísmica de la ciudad.
- ❖ Caracterizar dinámicamente los suelos de la ciudad, utilizando técnicas indirectas consistentes en la medición y procesamiento de vibraciones ambientales.
- ❖ Obtención de los valores de periodo fundamental de vibración del suelo aplicando el Método Nakamura.
- ❖ Construir un mapa de isoperiodos, que incluye la mancha urbana actual.

1.3-Justificación.

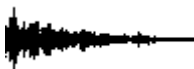
La investigación de las características locales que presenta el suelo es de especial interés y debe ser la primera parte de cualquier evaluación sísmica. El empleo de métodos pasivos basados en vibración ambiental, representa una excelente opción por su sencillez tanto en la parte experimental, como en el procesamiento de la información.

La evaluación de la respuesta sísmica de los suelos hoy en día, es esencial para la futura planificación urbana del municipio. A través del mapa de valores de periodos, producto del estudio de la vibración ambiental, así como también por medio de la integración de estudios, geológicos, topográficos y geotécnicos, entre otros, es posible delimitar zonas que presenten comportamientos similares, permitiendo establecer las bases para los requerimientos de diseño orientados a la prevención de desastres producto de movimientos sísmicos.

1.4-Area de Estudio.

La zona de estudio es la ciudad de *Uruapan*, la cual pertenece al estado de Michoacán de Ocampo, el área de este estudio abarca solamente la mancha urbana que se tiene en la ciudad, ya que el propósito de este trabajo es aportar información que ayude al diseño estructural de cualquier tipo de obra civil.

Uruapan está inmersa en el eje Neovolcánico mexicano. Sus principales accidentes orográficos: el cerro de la Cruz, de la Charanda y de Jicalán. Su principal sistema hidrográfico es el río Cupatitzio, el cual nace dentro de la ciudad y del cual se obtiene la mayor parte del agua potable que se utiliza en la ciudad. Y el río Santa Bárbara que nace en la presa de Caltzonzin y cruza el oriente de la ciudad. Ambos pertenecen a la cuenca del Río Tepalcatepec y este a su vez a la región hidrográfica del Río Balsas.



1.4.1.-Macro y Microlocalización

La zona de estudio fue delimitada rectangularmente, ocupando un área aproximadamente de 80 km². En las figuras 1.1 y 1.2 se ubica la ciudad de Uruapan dentro de un contexto nacional y estatal respectivamente.

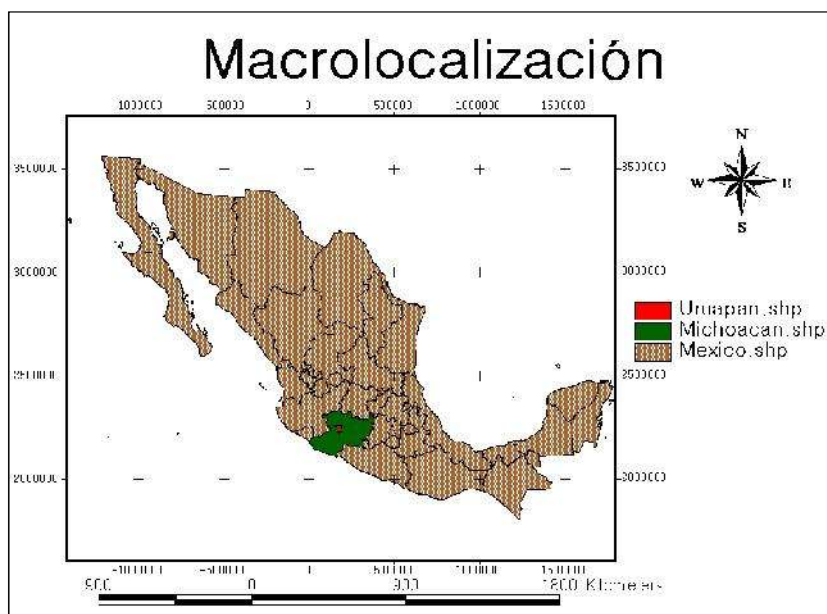


Figura 1.1.-Macrolocalización



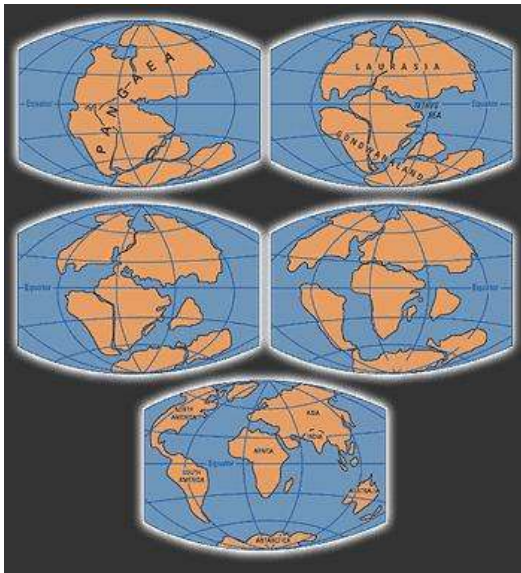
Figura 1.2.-Microlocalización

II.- ANTECEDENTES

2.1.- Simología y Tectónica de Placas.

La **Sismología** se encarga del estudio de los aspectos relacionados con la ocurrencia de temblores de tierra, terremotos o sismos. Su importancia radica en que los fenómenos que se estudian son muy complejos y resulta imposible predecir con total exactitud su ocurrencia, puesto que es una ciencia relativamente joven y gran parte de sus métodos e instrumentos de observación fueron desarrollados a lo largo del siglo XX.

A pesar de esto, la sismología ha logrado avances notables. Quizá una de sus más valiosas contribuciones al entendimiento de nuestro planeta lo constituya la llamada Tectónica de Placas. La investigación sismológica básica se concentra en la mejor comprensión del origen y propagación de los sismos y de la estructura interna de la Tierra. En 1912 el científico alemán Alfred Wegener, un meteorólogo de profesión dio a conocer la *teoría de la deriva continental*, en la cual argumenta que los continentes se desplazan como gigantescos bloques de corteza sobre un manto líquido. Basó su teoría en observaciones del magnetismo y en las estrechas afinidades de fósiles, rocas y estructuras geológicas en lados opuestos del Océano Atlántico, asimismo en la similitud de las costas



oriental de Sudamérica y occidental de África que encajan casi perfectamente a manera de rompecabezas. Wegener interpretó que estos hechos demostraban que en tiempos remotos, ambos continentes formaban una sola unidad.

En la imagen 1.3 se muestra la representación de la teoría interpretada por Wegener, que propone que hace unos doscientos millones de años todo los continentes estuvieron unidos, y formaron un sola masa continental que el llamo **Pangea**.

2.1.- Pangea



La palabra que procede del prefijo griego "pan" que significa "todo" y de la palabra en griego "gea" "suelo" o "tierra" .De este modo, quedaría una palabra cuyo significado es "toda la tierra". En esa época Norteamérica estaba unida a Europa y Asia, y América del Sur formaba un bloque continental con África, Antártida y Australia. De algún modo este supercontinente universal comenzó a fracturarse y dividirse al inicio de la era geológica del Mesozoico.

La teoría de Wegener suscitó grandes controversias en medios científicos, y se adujeron argumentos que trataban de demostrar la imposibilidad de que los continentes pudieran moverse y derivar libremente sobre el manto. Debido a lo anterior por varias décadas la teoría de la deriva continental fue desechada y solo fue comentada en los libros de geología y sismología como una hipótesis curiosa e interesante. Sin embargo, los científicos no pudieron refutar la mayoría de las analogías trasatlánticas propuestas por Wegener, cuya teoría se anticipó en varias décadas a lo que hoy es fundamental para nuestra concepción del planeta Tierra y para el conocimiento de los procesos que se desarrollan dentro del mismo.

Los esfuerzos que producen los movimientos de las placas son producidos por transferencia convectiva de calor, término que significa que el calor es llevado de un lugar a otro por el movimiento mismo del medio. El manto terrestre está compuesto por minerales, pero en su seno pueden presentarse corrientes de convección como en un líquido, que esto solo tiene sentido en periodos de tiempo muy largos. Debido a que el manto de la tierra tiene temperaturas que oscilan entre 1000 °C y 3500°C, con espesor aproximado de 3000 km presenta corrientes de calor que al llegar a la corteza terrestre se enfrían ya que esta tiene temperaturas que van desde los -20°C y 50°C, sin embargo como el espesor de esta capa es muy pequeño en comparación a la otra sufre movimientos y fracturas.

Un ejemplo de este proceso, más cercano a nuestra experiencia, ocurre cuando se hierve agua o cualquier otro líquido. El fluido más cercano a la fuente de calor se expande, se vuelve menos denso y tiende por lo tanto a subir a la superficie donde se enfría y es desplazado hacia el fondo por las nuevas parcelas ascendentes. De esta manera se establece un proceso continuo de ascenso y descenso del líquido en celdas permanentes formadas por las corrientes del fluido ver figura 1.4 y 1.5.

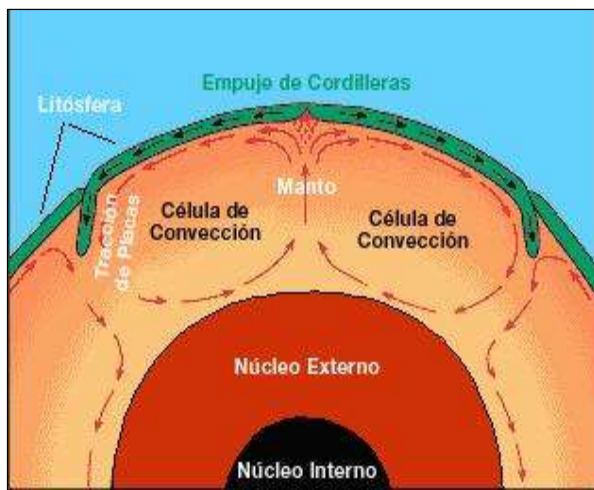


Figura 2.2.-Proceso de Corrientes de Convección



Figura 2.3.-Ejemplo corrientes de Convección

2.2.-Origen de los sismos.

Los sismos, terremotos o temblores de la tierra, los cuales son vibraciones de la corteza terrestre, generadas por distintos fenómenos, de los cuales sus orígenes pueden ser causados de forma natural como el movimiento de placas tectónicas, actividades volcánicas, caída de techos de cavernas subterráneas, y los generados por el hombre como la explosión de una bomba nuclear. Sin embargo, los sismo más severos y los más importantes desde el punto de vista de la ingeniería, son los de origen tectónico, que se deben a desplazamientos bruscos de las grandes placas en las que está subdividida la corteza.

Esto debido a las grandes presiones que se generan en la corteza por los flujos de magma llamadas corrientes de convección o magmáticas, que desde el interior de la tierra llegan a vencer la fricción que mantiene en contacto los bordes de las placas y generan caídas de esfuerzos y liberación de enormes cantidades de energía almacenada en la roca, esta energía se libera principalmente en forma de ondas vibratorias que se propagan en todas direcciones y en grandes distancias a través de la roca de la corteza.

El sismo se genera en la franja donde se presenta el corrimiento de cierta área de contacto en tres placas, en esta área se identifica un punto, generalmente subterráneo llamado *foco o hipocentro*, donde se considera inicio el movimiento; a su proyección vertical de este punto hasta la superficie terrestre se le llama *epicentro*.

Aunque prácticamente toda la corteza terrestre presenta actividad sísmica por fallas geológicas, se ha observado que existen zonas donde los movimientos a lo largo de estas fallas son particularmente severos y frecuentes, a esta zona donde se libera la mayor parte de la energía sísmica se le conoce con el nombre de *Cinturón de Fuego*, este nombre se le debe a que sobre esta zonas se localizan grandes cordilleras, para el caso de México lo constituye una zona de subducción entre la placa de Cocos y la Placa Norteamericana en la costa del Pacífico.

En la figura 2.4 se aprecian las principales características de un movimiento sísmico, así como el movimiento que se genera entre dos placas tectónicas.

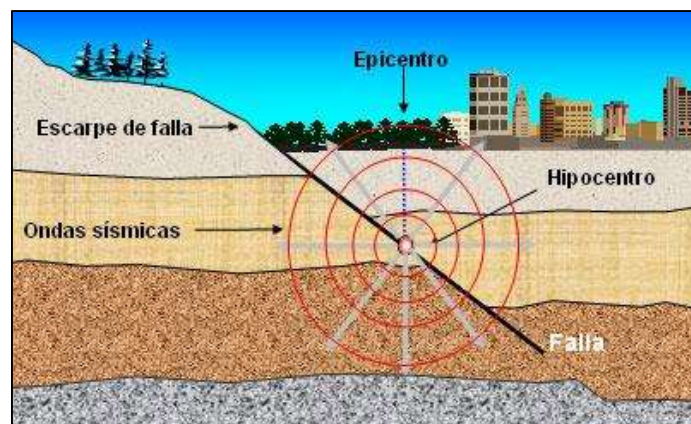


Figura 2.4.-Partes de un sismo.

2.3.-Movimientos Sísmicos.

La corteza terrestre es la capa más delgada con espesores que varían de 45 a 60 kilómetros, la cual se encuentra fragmentada y su temperatura difiere mucho del manto y núcleo, se encuentra dividida en 17 placas principales que se desplazan unas respecto de otras, impulsadas por las corrientes de convección generadas en el manto.

De acuerdo con conceptos geofísicos modernos la mayor parte de la actividad sísmica en el mundo está asociada, directa o indirectamente, con el movimiento relativo de las placas litosféricas y con su interacción a lo largo de zonas de contacto. Las placas tectónicas al estar en constante movimiento, tienen movimientos relativos entre sí de los cuales se pueden clasificar como *transcurrente*, *convergente* y *divergente*.

La zona de movimiento transcurrente, o también conocida como de transformación, se presente cuando las placas se mueven entre sí lateralmente, en este caso no se crea ni se destruye material cortical. Un ejemplo muy claro es la falla de San Andrés ubicada al norte del país en el estado de Baja California y por Estados Unidos en el estado de California.

El movimiento convergente o de subducción se presenta cuando en la zona de contacto una placa se introduce por debajo de otra, usualmente estas son las áreas con mayor actividad sísmica. Cuando las placas convergen en los continentes dan origen a cadenas montañosas. Cuando convergen en los océanos se forman fosas marinas que pueden llegar a los 12.000 m de profundidad, como ejemplo claro tenemos la placa de Cocos penetrando debajo de la placa Norteamericana en la costa del Pacifico Mexicano.

La zona de movimiento divergente se presenta cuando una placa se aleja de la otra. En este caso se genera una abertura entre placas, del cual emerge material magmático que al entrar en contacto con la temperatura de la atmosfera o con el agua en los océanos se solidifica, dando lugar a corteza joven. El promedio de separación entre placas es en promedio de 2,5 cm por año.

Un ejemplo de lo anterior es Islandia, región que es atravesada por la cordillera Centro-Atlántica lo que origina una muy frecuente actividad volcánica.

En la figura 1.7 se muestran las fronteras entre placas tectónicas así como los diversos movimientos que generan en ellas las corrientes magmáticas. Así mismo en la figura 1.7 se ven los efectos que ocasionan en la corteza terrestre los diferentes movimientos de las placas tectónicas, de los cuales se dan ejemplos citados en los párrafos anteriores.

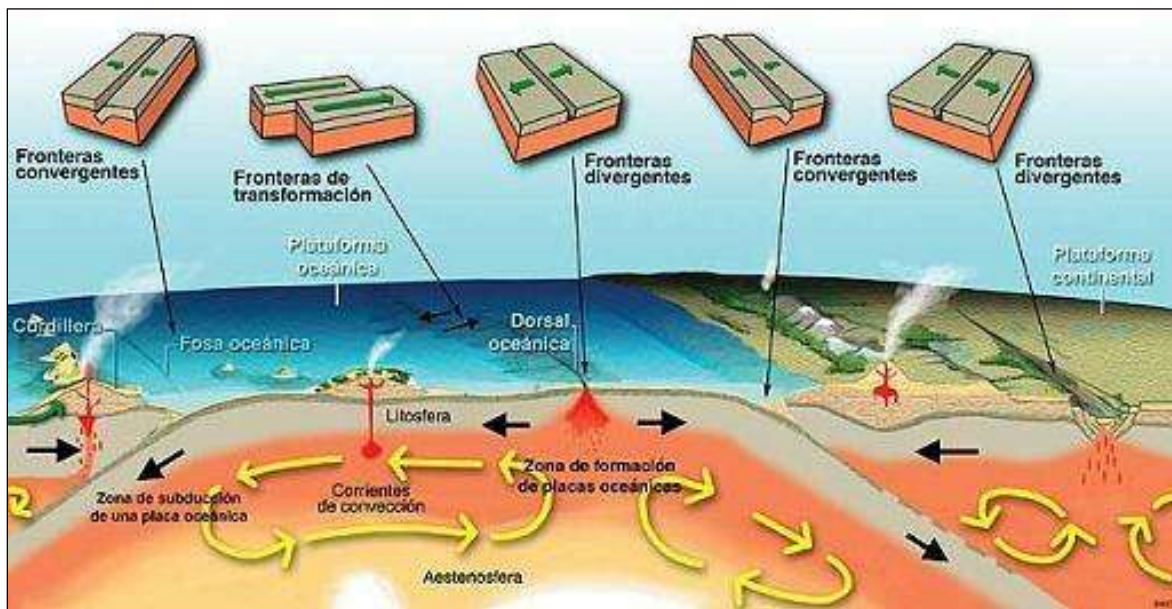


Figura 2.5.-Fronteras entre placas tectónicas

2.4.-Ondas Sísmicas.

Las ondas sísmicas son vibraciones que viajan a través de la Tierra, originadas súbitamente por el fracturamiento del material rocoso en el interior de la corteza debido a diversas fuentes. Cuando la roca se fractura debido a la deformación de la corteza, se libera energía acumulada en forma de calor; una parte menor es irradiada en forma de ondas sísmicas que se propagan a través del medio sólido de la Tierra. Existen dos tipos principales de ondas sísmicas, las cuales se propagan a través del medio sólido de la Tierra denominadas ondas internas o de cuerpo y las ondas de superficie que se propagan por la superficie terrestre. Las cuales se dividen de igual manera en 2. En la figura 1.8 se presentan en forma gráfica la clasificación de las ondas sísmicas.

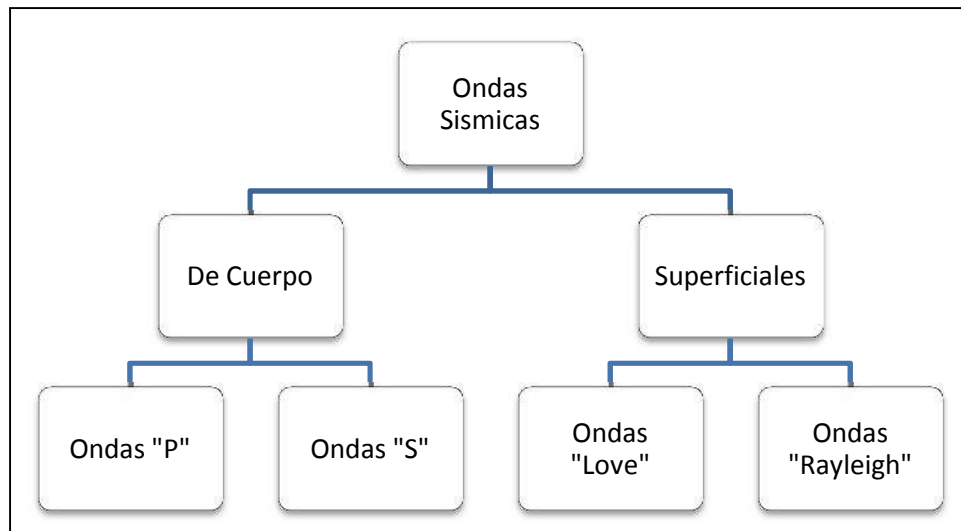


Figura 2.6.-Clasificación Ondas Sísmicas

A continuación se describen cada una de ellas:

- **Ondas "P".**- También conocidas como primarias o compresionales, se pueden propagar a través de medios sólidos o de fluidos, son las primeras en registrarse, se mueven longitudinalmente comprimiendo y dilatando a través la roca a través de la cual viajan, de manera similar al movimiento que realizan las ondas de sonido cuando se propagan a través del aire. La onda P es la que viaja con mayor velocidad.

- **Ondas “S”**.- También conocidas como ondas secundarias u **ondas de corte**, son ondas transversales que desplazan el suelo perpendicularmente a la dirección de propagación, alternadamente hacia un lado y hacia el otro. Las ondas S pueden viajar únicamente a través de sólidos ya que los líquidos no pueden soportar esfuerzos de corte. En la figura 1.9 se muestran gráficamente las ondas P y las ondas S.

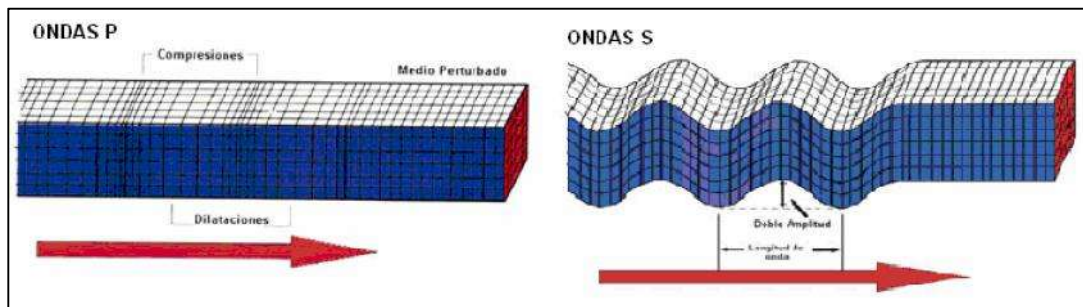


Figura 2.7-Representación de las Ondas P y S

Como se aprecia en la figura 1.9 las ondas S son las más destructivas, ya que generan esfuerzos cortantes en las construcciones.

- **Ondas “Love” u ondas “L”**.- Su movimiento es similar al de las ondas S, haciendo vibrar la partícula en un plano horizontalmente en sentido perpendicular a la propagación. Sin movimiento vertical.
- **Ondas “Rayleigh” u ondas “R”**.- Su movimiento es similar al de las ondas del agua, haciendo vibrar una partícula sobre un plano que apunta en dirección de la trayectoria de las ondas, es su movimiento similar al de las olas del mar, con movimiento elíptico y vertical simultáneamente.

En la Figura 1.10 se muestran las dos ondas superficiales, las ondas Love y las ondas Rayleigh.

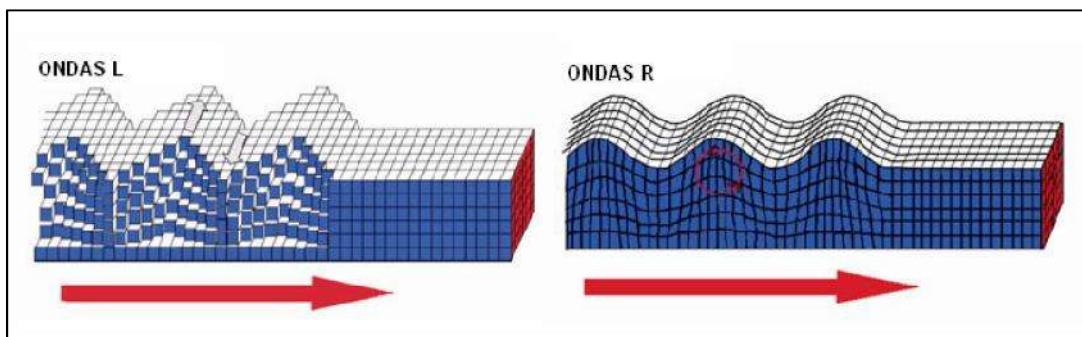


Figura 2.8.- Representación de Ondas Love y Rayleigh

Las ondas sísmicas se reflejan o se refractan cuando en su recorrido aparece una discontinuidad. Por ello se produce cambios en su velocidad. La reflexión de las ondas P y S genera otras ondas P y S. Sin embargo, las ondas S no penetran el núcleo externo terrestre que se supone es material fundido o está en estado líquido.

Una vez conocidos los tipos de ondas sísmicas y sus características básicas, podemos mencionar las características más importantes de los sismos, Newmark y Rosenblueth (1971), dividen los terremotos en cuatro grupos de acuerdo a sus características:

1) Sismos de prácticamente una sola sacudida.

Los movimientos de este tipo ocurren a distancias cortas del epicentro, solamente en terreno firme y en sismos originados en poca profundidad. Cuando no se satisfacen estas condiciones, las reflexiones múltiples de onda cambian la naturaleza del fenómeno. Han ocurrido sismos destructivos de una sola sacudida en Puerto Hueneme (1957), Agadir (1960), Libia (1963), Skopje (1963) y San Salvador (1965). A todos ellos han correspondido magnitudes moderadas (de 5.4 a 6.2), focos someros (con profundidades menores 30 km), y movimientos que indican un movimiento casi unidireccional, más fuerte en un sentido que en el opuesto. Los periodos de vibración son de orden de 0.2 segundos o más breves.



2) Movimientos moderadamente largos, extremadamente irregulares.

El registro de la componente NS del clásico sismo de El Centro, California, en 1940 (Figura 1.11), ejemplifica este tipo de movimiento. Corresponde a distancias focales moderadas y ocurren solamente en terreno firme. Sus periodos de vibración comprenden un amplio rango, entre 0.05 segundos y 2.5 a 6 segundos. Se puede decir que este tipo de movimientos constituyen prácticamente un ruido blanco. Suelen tener sensiblemente intensidades en todas direcciones.

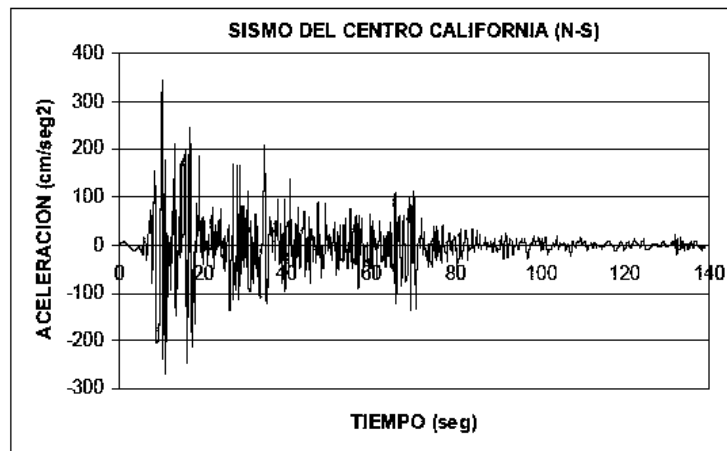


Figura 2.9.- Sismo de El Centro, California 18 de mayo de 1940

3) Movimientos del terreno con larga duración que presentan periodos dominantes de vibración.

Un ejemplo de estos sismos es el ocurrido en la ciudad de México el 19 de septiembre de 1989 de 1985. Tales movimientos resultan del filtrado de sismos de los dos tipos anteriores, a través de estratos de suelo blando en el rango de comportamiento lineal o casi lineal del suelo, y son causados por las reflexiones sucesivas de en el interfaces de estas formaciones. Durante el terremoto se presentó un periodo dominante de dos segundos en la zona central de la ciudad, conocida también como la Zona del Lago. En la Figura 1.12 se observa el registro de la componente E-W del sismo ocurrido en la Ciudad de México en 1985.

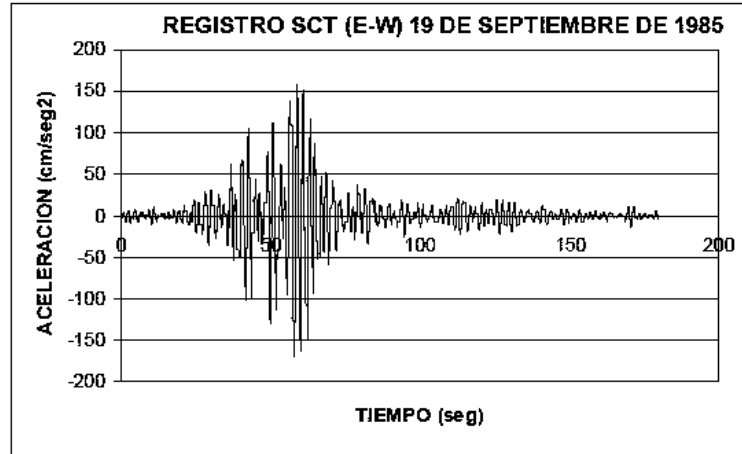
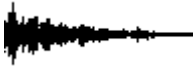


Figura 2.10.- Sismo de la Ciudad de México, 19 de Septiembre 1985.

4) Movimientos del terreno que producen deformaciones permanentes de gran escala.

En el sitio de interés pueden presentarse deslizamientos o licuación de suelos. Se encuentran ejemplos en Valdivia y Puerto Montt durante los sismos chilenos de 1960, en Anchorage durante el sismo de Alaska de 1964, y en Niigata durante el sismo japonés del mismo año.

Para poder entender mejor los cuatro incisos anteriores, se requiere profundizar en las características de la sacudida del terreno, las cuales están dadas por la amplitud de las ondas, por la composición o contenido de frecuencias, y por la duración del movimiento.

2.4.1.-Fuentes de Ondas Sísmicas Superficiales

Las ondas sísmicas superficiales provienen de diferentes fuentes, en la figura 1.13 se presenta la clasificación de las fuentes según su origen respecto de la Tierra.

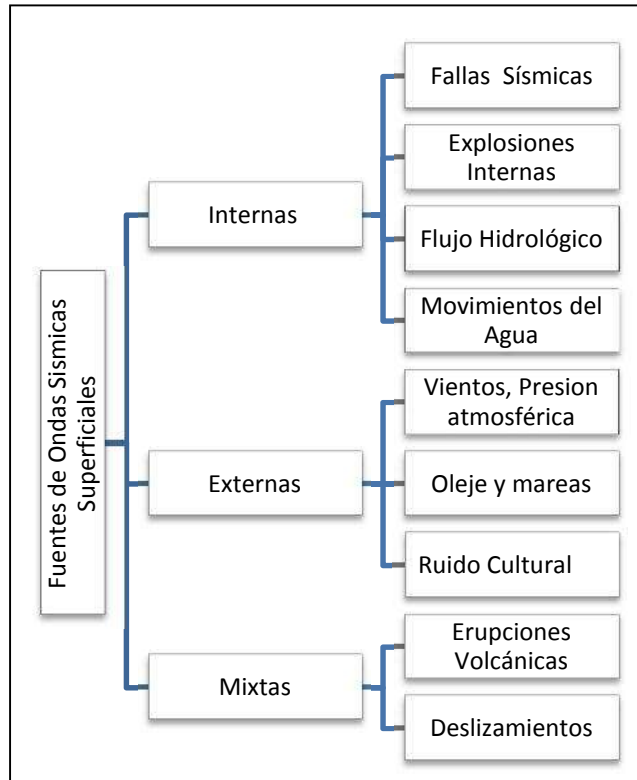
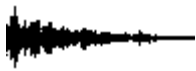


Figura 2.11.-Fuentes de Ondas Sísmicas

2.4.2.-Factores importantes de las ondas sísmicas

El contenido de frecuencias es una función del mecanismo en la fuente y de la propagación de ondas. El periodo dominante de las ondas está asociado a la magnitud del evento y a la distancia epicentral. Así, las ondas de cuerpo P y S causan cerca del epicentro vibraciones de mayor amplitud y de alta frecuencia, del orden de 5 a 20 Hertz (periodos dominantes muy cortos de 0.05 a 0.2 segundos), por lo tanto, muchas de ellas caen dentro del ámbito audible y puede ser percibida como un ruido sordo que acompaña al sismo. Cerca del epicentro la componente vertical es significativa y los terremotos son percibidos por las personas como una vibración violenta y trepidante.



Las altas frecuencias de las ondas sísmicas son filtradas cuando se propagan por el medio sólido de la Tierra y a medida que éstas se alejan de la fuente, a grandes distancias del foco predominan los periodos de onda largos.

2.5.-Sismografos y sismogramas.

El instrumento esencial para estudiar los sismos es el sismógrafo. Este es un aparato que registra el movimiento del suelo causado por el paso de una onda sísmica. Los sismógrafos fueron ideados a fines del siglo pasado y perfeccionados a principios del presente. En la actualidad, estos instrumentos han alcanzado un alto grado de desarrollo electrónico, pero el principio básico empleado no ha cambiado como veremos a continuación.

Para registrar el movimiento del suelo es necesario referirlo a un punto fijo en el espacio; si quisiéramos referirlo a un punto anclado al mismo suelo nos sería imposible obtener un registro puesto que el punto también se movería junto con el suelo al que está anclado. Para salvar esta dificultad, podemos recurrir al principio de inercia de los cuerpos, como sabemos este principio nos dice que todos los cuerpos tienen una resistencia al movimiento o a variar su velocidad. Así, el movimiento del suelo puede ser medido con respecto a la posición de una masa suspendida por un elemento que le permita permanecer en reposo por algunos instantes con respecto al suelo.

El mecanismo consiste usualmente en una masa suspendida de un resorte atado a un soporte acoplado al suelo (figura 1.14), cuando el soporte se sacude al paso de las ondas sísmicas, la inercia de la masa hace que ésta permanezca un instante en el mismo sitio de reposo. Posteriormente cuando la masa sale del reposo, tiende a oscilar. Sin embargo, ya que esta oscilación posterior del péndulo no refleja el verdadero movimiento del suelo, es necesario amortiguarla. En la figura 1.14 se haya representado un aparato en el que el amortiguamiento se logra por medio de una lámina sumergida en un líquido (comúnmente aceite).



Este era el método utilizado en los aparatos antiguos, actualmente se logra por medio de bobinas o imanes que ejercen las fuerzas amortiguadoras de la oscilación libre de la masa.

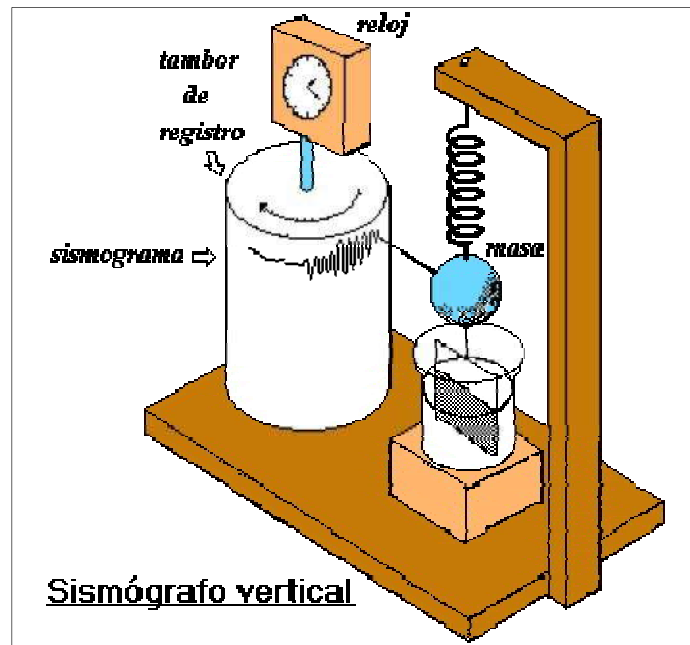


Figura 2.12.-Sismógrafo

Si se sujeta un lápiz a la masa suspendida, para que pueda inscribir en un papel pegado sobre un cilindro que gira a velocidad constante, se podrá registrar una componente del movimiento del suelo. El instrumento hasta aquí descrito, detecta la componente vertical del movimiento del suelo y se conoce como sismógrafo vertical. El papel donde traza el movimiento se conoce *sismograma*.

2.5.-Predicción sísmica.

Desde la antigüedad el ser humano se ha interesado por los fenómenos naturales, de hecho fue tanto el interés que en las primeras civilizaciones se les considera como dioses, sin embargo su predicción no se ha logrado en alguno de estos fenómenos naturales, en el caso de un sismo es imposible realizarla con exactitud, ya que hasta la fecha no se puede predecir temblores o sismos, pero se puede tener una idea de dónde va a ocurrir un gran temblor identificando las brechas sísmicas o *gaps*.

Una brecha sísmica es una zona de falla o de un segmento de borde entre placas tectónicas, de conocida sismicidad histórica e instrumental, en la cual se registra un periodo de calma o de quietud sísmica en la cual se ha acumulado progresivamente grandes de energía elástica de deformación, y por consecuencia que presenta una mayor probabilidad de ruptura y ocurrencia de un evento sísmico.

Actualmente en México se ha puesto mucho énfasis en la Brecha localizada entre el estado de Michoacán y Guerrero, conocida como “**Brecha de Guerrero**”, la cual se mantiene en constante estudio por temor a que la energía acumulada se igual o mayor a la acumulada en la “**Brecha de Michoacán**”, la cual dio origen al sismos más grande que se haya registrado en México, el cual fue el sismo de 1985.



Figura 2.13.- Periodos de Retorno Sismos

Como se aprecia en la figura 1.15 los sismos con mayor incidencia son los ocurridos en la zona de subducción, los cuales se originan en la Costa del Pacífico de México.

2.6.-Caracterización del sitio.

2.6.1.-Microzonificación sísmica.

La microzonificación sísmica es un procedimiento para la estimación del riesgo sísmico a partir del movimiento del suelo y algunos fenómenos relacionados, tomando en cuenta los efectos de las condiciones locales de sitio. El subsuelo y las condiciones topográficas pueden ampliar o reducir el pico de la aceleración del suelo en un sitio con respecto a lo que podrían esperarse para un para un substrato consolidado en ese mismo punto. Estos efectos locales de sitio son la base de los que sería un mapa de microzonificación sísmica.

Cuando se encuentran disponibles, los parámetros de microzonificación sísmica pueden utilizarse conjuntamente con datos científicos, integrándolos en un sistema adecuado de procesamiento e interpretación para realizar mapas de planificación urbana, preparados a partir de la interacción entre los sistemas de: tierra sólida, ambiental, social, económico y político, con el fin de proveer datos de entrada confiables a los ingenieros estructurales para el diseño de edificaciones sismoresistentes.

III.-TOPOGRAFÍA Y ASPECTOS GEOLÓGICOS DE LA CIUDAD DE URUAPAN

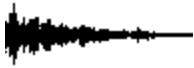
3.1-Antecedentes.

La República Mexicana está situada en una de las regiones sísmicamente más activas del mundo, zona conocida como el “Cinturón de Fuego”, esto debido a las cordilleras formadas en esta zona, sin embargo el estudio de la actividad sísmica en México es relativamente reciente, su observación tiene antecedentes remotos, esto en el sentido de comparación del tiempo estudiando sismos y tiempo de ocurrencia de sismo.

El Estado de Michoacán forma parte de una de las zonas con más alta sismicidad de nuestro país, donde se han generado sismos históricos de más de 8.0 grados de magnitud (Jara y Sánchez, 2001) por lo que se realizó una recopilación histórica desde 1882 y 1943. Su ubicación geográfica es la principal causa de estos acontecimientos, y se tienen tres fuentes potenciales de generación de sismos:

Generados por la tectónica de placas:

- 1) **Subducción:** Michoacán se encuentra en el límite de dos placas tectónicas (Pacífica y Norteamericana), además de estar ligado al movimiento de otra micro placa (Cocos), generando sismos con profundidades de 10 y 40 km. Conjuntamente a lo anterior, en la zona de interacción de esta placas está ubicado en el límite de dos provincias geológicas, al sur del estado la Sierra Madre del Sur, y al norte el Cinturón Volcánico Transmexicano. Este último, causante de la formación de varios volcanes dentro y fuera del estado; el más reciente de ellos el Parícutín (1943).
- 2) **Intraplaca:** son producto de la subducción pero con epicentro dentro de la placa oceánica bajo el continente. Son sismos poco frecuentes y a mayores profundidades (alrededor de 60 Km.) donde la placa comienza a fundirse, pero que pueden causar grandes daños.



- 3) **Fallas Locales:** Puesto que los sismos producto de las fallas locales son focos superficiales, esto provoca que la energía liberada, producto de un evento de este tipo incida casi directamente (por ejemplo Falla de Acambay 1912, $M = 7.0$)

Por éstas causas, Michoacán a través de la historia, ha sido testigo de infinidad de movimientos telúricos, como el del 19 de Junio de 1858 ($M_g = 7.0$), o el del 19 de Septiembre de 1985 ($M_g = 8.1$), que desgraciadamente, derivaron en pérdidas humanas y materiales (Martínez y Javier, 1991).

Y eventualmente los artificiales (por ejemplo construcción de presas).

3.2.-Generalidades

La ciudad de Uruapan pertenece al estado de Michoacán de Ocampo, localizado entre los paralelos $19^{\circ}11'$ y $19^{\circ}38'$ de latitud norte; los meridianos $101^{\circ}56'$ y $102^{\circ}24'$ de longitud oeste; altitud entre 700 y 3 300 m. Colinda al norte con los municipios de Los Reyes, Charapan, Paracho y Nahuatzen; al este con los municipios de Nahuatzen, Tingambato, Ziracuaretiro, Taretan, Nuevo Urecho y Gabriel Zamora; al sur con los municipios de Gabriel Zamora, Parácuaro, Tancítaro y Nuevo Parangaricutiro; al oeste con los municipios de Nuevo Parangaricutiro, Tancítaro, Peribán y Los Reyes. Ocupa el 1.73% de la superficie del estado. Cuenta con 188 localidades y una población total de 279 229 habitantes.

Uruapan está inmersa en el eje Neovolcánico mexicano, tiene una extensión territorial total de 954.17 km². Sus principales accidentes orográficos: el cerro de la Cruz, de la Charanda y de Jicalán. Su principal sistema hidrográfico es el río Cupatitzio, el cual nace dentro de la ciudad y del cual se obtiene la mayor parte del agua potable que se utiliza en la ciudad. Y el río Santa Bárbara que nace en la presa de Caltzonzin y cruza el oriente de la ciudad. Ambos pertenecen a la cuenca del Río Tepalcatepec y este a su vez a la región hidrográfica del Río Balsas.

3.3.-Topografía

La ciudad presenta un desnivel de norte a sur de aproximadamente 200 metros en una longitud de 6.5 km, lo cual, produce una zona de escurrimientos que tiende a alojarse al suroeste de la ciudad, formándose una gran charola delimitada por la curva de nivel 1600, en la cual, las zonas este y oeste presentan suelos con alto contenido de agua y nivel freáticos superficiales. Lo anterior se puede observar en la figura 1.16.

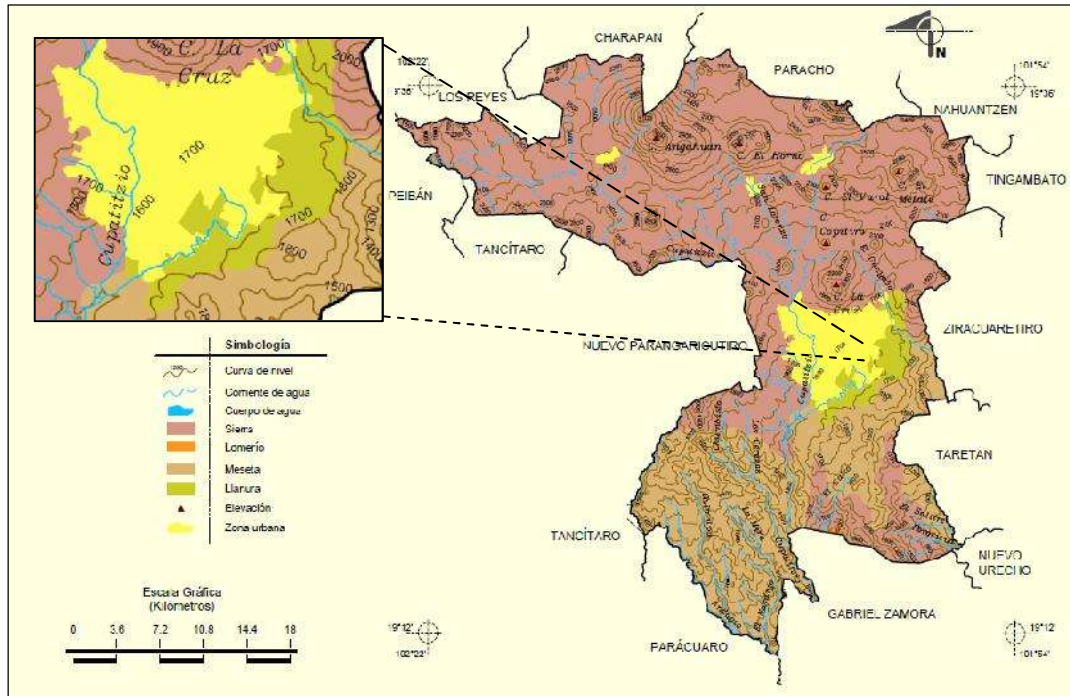


Figura 3.1.-Curvas de nivel de la ciudad de Uruapan

Por otro lado, debido a que se tienen escurrimientos directos del cerro de la cruz de norte a sur de la ciudad, las barrancas que alojan dichos flujos atraviesan toda la ciudad hasta conectarse con el Río San Antonio y Cupatitzio se unen al sur de la ciudad hasta desembocar en la caída de la Tzaráracua.

Actualmente la ciudad de Uruapan cuenta con 264,439 habitantes lo que la coloca en el lugar 58° en el país en cuanto a población se refiere. La densidad de población es de 336 habitantes por km². Por lo anterior cabe señalar que se encuentra en un gran crecimiento poblacional. En la figura 1.17 se observa el plano topográfico de la ciudad.

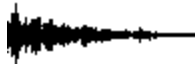


Figura 3.2.-Topografía de la ciudad de Uruapan



Figura 3.3.-Rios, canales y barrancas de la ciudad de Uruapan

3.4.-Aspectos Geológicos

La Ciudad de Uruapan se halla en una zona predominantemente ígnea, cuyo origen se considera relacionado con la aparición del Eje Neovolcánico Transversal. Datos de geología superficial muestran que tanto rocas (basaltos) como materiales sueltos (piroclásticos) tienen su origen en la erupción de volcanes. Los aportes más recientes de materiales volcánicos que se depositaron en el parque provienen de las erupciones del volcán Parícutín (febrero de 1943 a enero 1952).

El área de río Cupatitzio presenta afloramientos de roca basáltica en una formación típica de barranca, con estructuras fracturadas bien definidas, lo que permite el transporte y subsiguiente afloramiento de agua subterránea en forma de manantiales. En las zonas planas, por arriba de la barranca por donde corre el río Cupatitzio, se encuentran suelos profundos con pocos afloramientos de rocas. En la figura 1.19 se representa por medio de un diagrama la composición geológica de la Ciudad de Uruapan.

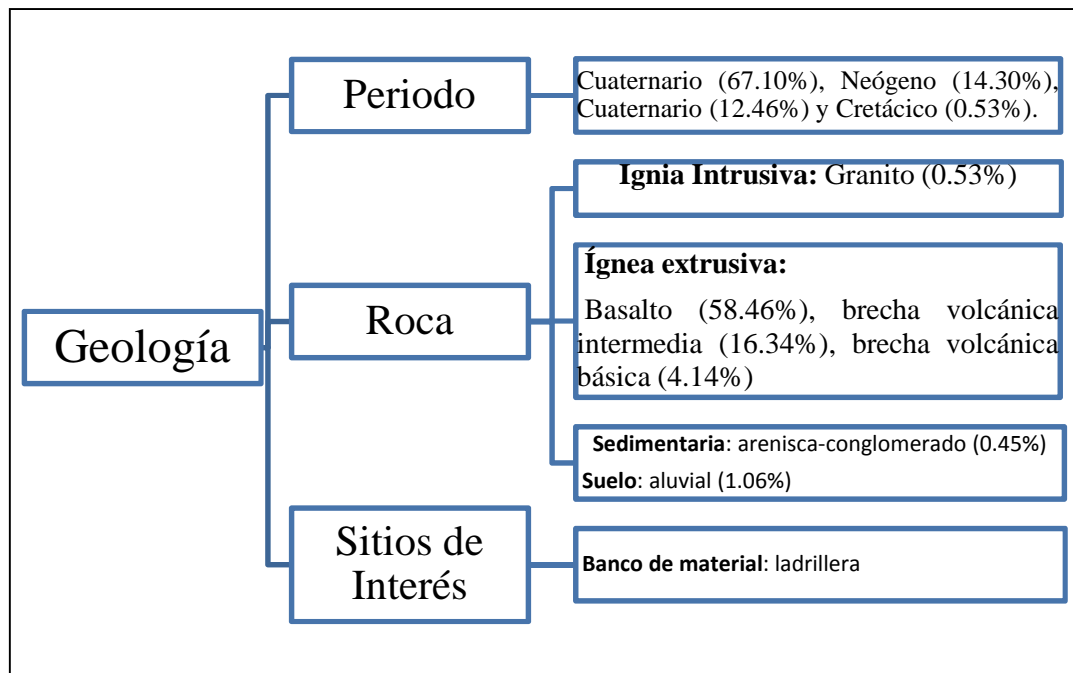


Figura 3.4.-Diagrama geología de Uruapan

Podemos mencionar (I. Rodríguez, B. Miranda y G. Martínez, 1999) que en lo referente a estratigrafía, propiedades índice y mecánicas, Uruapan cuenta con depósitos homogéneos de suelos finos donde predominan los limos plásticos; por otro lado, con contenidos de humedad muy variables y pesos específicos naturales que oscilan entre 0.7 y 1.8 ton /m³. Existen también zonas con materiales arcillo-arenosos y prácticamente no se cuenta con gravas.

Una característica geológica importante, se encuentra en la rivera poniente del Rio Cupatitzio, la cual está conformada por una zona de roca empacada en arcillas o limos, no así en la rivera oriente del mismo, que presenta suelos depositados con las propiedades mencionadas en el párrafo anterior. Lo que indica que el Rio Cupatitzio forma una frontera geológica que se extiende a través de toda la ciudad de norte a sur, el cual es alimentado por los manantiales Rodilla del Diablo, Revelero y Hierbabuena. En la figura 1.20 se muestra la clasificación geológica en cuanto a clase de roca de la ciudad de Uruapan.

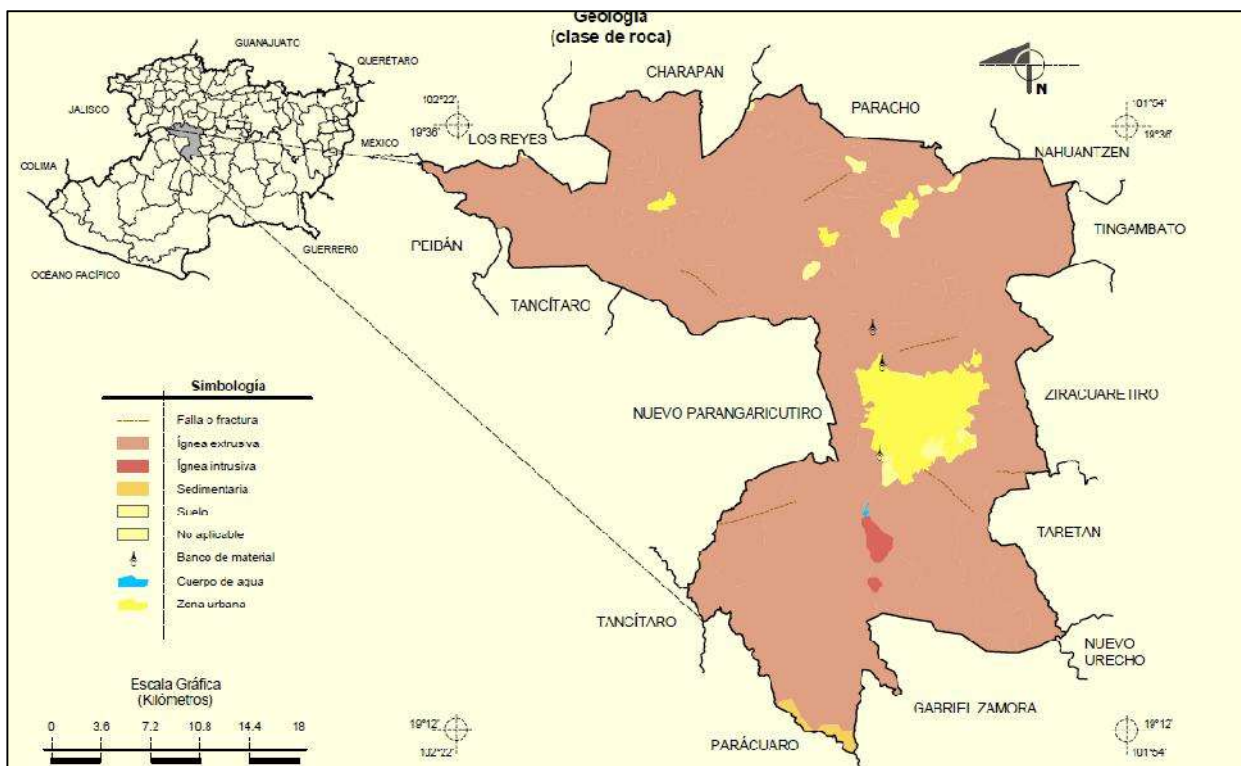


Figura 3.5.-Mapa geológico Uruapan

IV.-PROPIEDADES DINAMICAS DE LOS SUELOS

La modificación de la señal sísmica debida a la influencia de las condiciones geológicas y topográficas durante o después de un terremoto, se conoce como *efecto local*. Esta modificación consiste en la amplificación de la señal así como una mayor duración de la misma y la modificación de su contenido frecuencial.

El análisis de las anomalías de la intensidad sísmica obtenidas a partir de escalas macrosísmicas permitió establecer la evidencia que los terrenos blandos amplifican los efectos de los terremotos. Se han desarrollado un gran número de escalas macrosísmicas que recogen y clasifican en grados los efectos que provoca el terremoto sobre las edificaciones, las personas y el medio natural.

Las anomalías de la intensidad sísmica realizadas han permitido realizar correlaciones entre la intensidad y las condiciones geológicas y topográficas específicas de la zona con el objetivo de realizar *mapas de zonificación* que permiten delimitar distintas zonas en función de su capacidad para amplificar el daño sísmico. Sin embargo, la limitación de los estudios de zonación sísmica radica principalmente en que la intensidad es un parámetro obtenido a partir de un efecto con el que se obtiene el valor con el que definir la propia acción y por lo tanto, no expresan adecuadamente otro tipo de fenómenos, como la interacción suelo-estructura, que se producen cuando las frecuencias de vibración del suelo y de la estructura son próximas. Este fenómeno introduce daños muy superiores a los esperados.

Las roturas de taludes, caídas de rocas, o fenómenos de licuefacción del suelo durante o después de la sacudida sísmica son otros efectos inducidos que deben considerarse porque también provocan mayores daños potenciales en las estructuras.

Por lo tanto, la identificación de las frecuencias predominantes del suelo y la cuantificación de la amplificación de la señal sísmica constituyen uno de los principales intereses en ingeniería sísmica.

4.1.- Efectos de Sitio.

Los efectos locales están causados por la interacción del campo de propagación de las ondas sísmicas con las irregularidades del terreno. Las irregularidades del terreno se pueden clasificar en superficiales y sub-superficiales. Las primeras son aquellas relacionadas con la topografía del terreno e incluyen los efectos provocados por taludes, valles, montañas, etc. Las irregularidades sub-superficiales están relacionadas con los distintos tipos de discontinuidades en el terreno y que incluirían fallas, cuencas sedimentarias, etc.

Estos fenómenos están restringidos a unas geometrías geológicas típicas que se caracterizan por sus dimensiones y parámetros mecánicos o dinámicos (velocidades de las ondas P o S, densidad, amortiguamiento, etc.), distinguiéndose dos tipos: aquéllos que están provocados por la topografía superficial y aquéllos provocados por depósitos de suelos blandos en superficie.

4.1.1.-Efectos topográficos.

Existen evidencias in situ, instrumentales y teóricas de los efectos locales provocados por la topografía. Durante terremotos destructivos, se ha comprobado que los edificios localizados en la parte superior de montañas o laderas sufren daños estructurales mayores que aquéllos situados en las zonas más bajas.

Aunque las evidencias instrumentales sobre estos efectos existen, el número de estudios sobre efectos topográficos es mucho menor que los estudios sobre los efectos locales sobre suelos blandos. Este fenómeno de amplificación depende de la relación dimensión de la estructura y del movimiento del suelo.

4.1.2. Efecto de suelo

La amplificación del movimiento del suelo es la responsable del daño extenso en áreas constituidas por depósitos de gran potencia de sedimentos blandos y poco compactados. La amplificación es típicamente mayor para terremotos de magnitud pequeña en áreas a una cierta distancia epicentral donde sería esperable que las ondas sísmicas redujesen la amplitud debido a los efectos de atenuación en la propagación de la señal sísmica por el interior de la tierra.

Dos mecanismos contribuyen a los efectos de amplificación de la señal en el suelo: la amplificación geométrica y la amplificación dinámica. La amplificación geométrica corresponde a los efectos de amplificación debidos al contraste de impedancias entre dos medios en contacto.

El contraste de impedancias es mayor en materiales más jóvenes y menos consolidados y esto provoca mayor nivel de amplificación de la señal sísmica. Asimismo, provoca el atrapamiento de las ondas sísmicas dentro de un nivel con baja impedancia y esto provoca la amplificación de las frecuencias características. La velocidad de las ondas sísmicas S en el suelo decrece, particularmente cuando el depósito sedimentario está situado sobre un sustrato rocoso duro y cristalino, aumentando así el contraste de impedancias. Como se ha comentado, los depósitos del suelo se comportan como filtros para la energía de alta frecuencia (o corto período) pero la amplificación de las bajas frecuencias puede causar daño potencial a estructuras que tienen frecuencias naturales bajas, como por ejemplo edificios altos y puentes.

La amplificación dinámica también se conoce como efecto de *resonancia* y fue estudiada por primera vez en los años 30. El efecto de resonancia considera la diferencia entre la frecuencia de las ondas sísmicas y la frecuencia natural del depósito sedimentario.

Así pues, los fenómenos que contribuyen a la amplificación de la señal sísmica están relacionados directamente con la velocidad de las ondas sísmicas (secundarias, S) en el depósito.

Por lo tanto, en el diseño de estructuras resistentes ante una carga sísmica situadas en regiones caracterizadas por velocidades de las ondas sísmicas bajas en depósitos sedimentarios estos efectos deben considerarse especialmente. La identificación de los suelos susceptibles de amplificar la señal sísmica se alcanzará mediante la suma de la información geológica, las medidas in situ de las propiedades dinámicas de los suelos y los sistemas de información geográfica que permiten un análisis conjunto de los datos obtenidos y la localización espacial de los suelos susceptibles de la amplificación.

4.1.3.-Efectos de capas superficiales blandas

La presencia de estratos de suelo blando altera de forma significativa las características de las ondas sísmicas. La intensidad del sismo aumenta en estos sitios debido a que las ondas de periodo corto, al llegar a dichos estratos, se amplifican y aumenta su periodo, provocando mayores daños en las estructuras que se presentan en zonas de terreno firme. Esto es de particular relevancia si tomamos en cuenta que los grandes asentamientos urbanos se encuentran, generalmente, ubicados a lo largo de valles atravesados por grandes ríos, lo que implica que están constituidos sobre depósitos superficiales relativamente jóvenes o poco consolidados.

Algunas de estas ciudades se encuentran sobre este tipo de depósitos naturales, también se encuentran ubicadas en zonas de alta sismicidad, como por ejemplo Los Ángeles, Ciudades de México, Japón, Caracas, etc. A este factor se agrega el hecho de que estas ciudades han sufrido y continuarán sufriendo, a lo largo de la historia, algún tipo de amplificación local del movimiento del suelo asociado a las características geológicas del subsuelo y la presencia de estos sedimentos blandos cercanos a la superficie.

Por otro lado, las características especiales que poseen estas ciudades, mencionadas previamente, le han otorgado a los sismólogos la oportunidad de estudiar estos efectos causados por depósitos superficiales pueden llevar a incrementos locales de intensidades de hasta 2 o 3 grados en las escalas sísmicas.

El ejemplo más claro de lo anterior se presente en el valle de México. Por estar lejos de la costa del Pacífico, donde se generan los sismos de mayor magnitud en nuestro país, esta área se ubica en una región de peligro sísmico moderado (zona B). Sin embargo, las condiciones geológicas de la zona provocan una amplificación generalizada en las ondas sísmicas en toda la región. La importancia de este fenómeno se muestra en la figura 1.21 donde se presentan los acelerogramas registrados en distintas zonas del valle de México durante un sismo originado en la costa del pacífico.

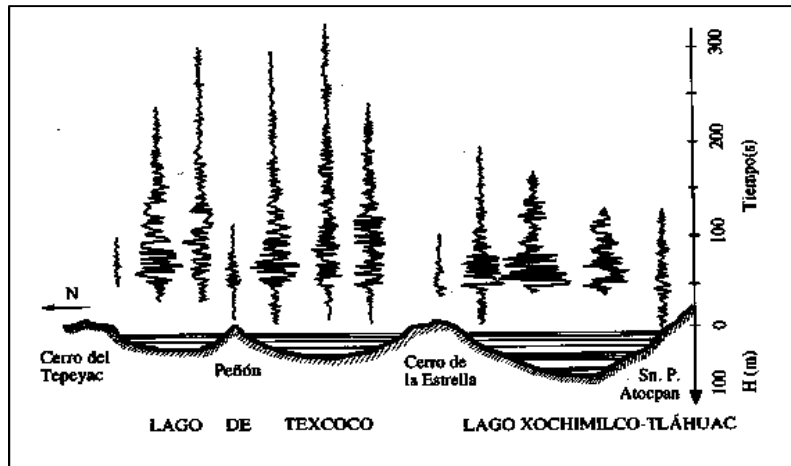


Figura 4.1.- Efectos de sitio Ciudad de México

4.1.4.-Efectos topografía subsuperficial

La topografía subsuperficial de las cuencas sedimentarias es la responsable de la generación de ondas superficiales de forma local. El atrapamiento de estas ondas en los niveles blandos de suelo provoca amplificaciones de la señal sísmica. En los últimos años ha habido varias observaciones de este tipo de ondas en cuencas de grandes y pequeñas dimensiones.

En el caso de grandes valles, la característica común de estas observaciones es que las ondas superficiales locales tienen períodos fundamentales superiores a 1 segundo, es decir son ondas de largo período y presentan tiempos de trayectoria entre los márgenes y el centro de la cuenca de varias decenas de segundos. Por ello, en estos casos, se puede detectar la existencia de estas ondas con pocas estaciones de registro.

4.2.- Periodo natural de las estructuras.

Para determinar el comportamiento dinámico de los edificios se utiliza la vibración como fuente de excitación (movimiento del terreno, viento, actividades en el edificio, etc.), para el análisis de datos se debe calcular el espectro de respuesta de la velocidad de desplazamiento en las componentes longitudinales y transversales. El cálculo del espectro de amplitud para cada componente permite determinar el periodo natural del movimiento para cada dirección y el coeficiente de amortiguamiento.

4.3.- Factor de amortiguamiento.

El amortiguamiento tiene especial importancia en el cálculo sismoresistentes, ya que influye directamente sobre la modificación de la respuesta dinámica de la estructura y en el efecto producido por el terremoto. En general, las estructuras con un factor de amortiguamiento alto, es decir, las que tienen mayor capacidad de absorción de la energía, se comportan favorablemente durante movimientos sísmicos.

El factor de amortiguamiento no es un parámetro intrínseco de la estructura, por lo que su obtención constituye un problema extremadamente complicado, tanto teórica como empíricamente, debido a que intervienen numerosos factores (tipo de estructura, característica del terreno, e interacción suelo-estructura). Los numerosos factores que determinan y modifican a lo largo del tiempo el factor de amortiguamiento de una estructura (deformaciones del terreno, disipación de calor, etc.), hacen que dicho valor sólo sea una información de carácter general.

El amortiguamiento tiene un efecto tanto más importante sobre la reducción de la respuesta dinámica de un edificio ante un terremoto mientras más bajos sean sus períodos de vibración. El producto del factor de amortiguamiento y el período natural de los edificios es casi constante para diferentes tipos de vibraciones (modos y amplitud) de las estructuras, siendo, por tanto, el factor amortiguamiento-período relevante en la respuesta dinámica del edificio.



El conocimiento de las características del suelo y su comportamiento ante un terremoto es la primera medida a tomar en la prevención-reducción de la vulnerabilidad sísmica de una ciudad expuesta a riesgo sísmico. Una estructura cimentada sobre un terreno deformable difiere, por efecto de la interacción suelo-estructura, de otra cimentada sobre un terreno rígido. El movimiento de la cimentación será diferente, así como los períodos naturales y los modos de vibración. En el análisis del comportamiento dinámico de los edificios, el período natural de vibración y el coeficiente de amortiguamiento son parámetros esenciales, debido a que la respuesta de los edificios a una sacudida sísmica está dominada principalmente por estos parámetros. Por ello, para predecir el comportamiento dinámico y los daños potenciales en los edificios, durante un terremoto, es necesario medir dichos parámetros.

El período natural de vibración del edificio caracteriza la rigidez dinámica de su estructura, que define el modo de comportarse dicho edificio ante el movimiento producido por un sismo. El amortiguamiento influye directamente sobre la modificación de la respuesta dinámica de la estructura y en el efecto producido por el terremoto. La elaboración de un banco de datos de períodos y amortiguamientos de diferentes topologías es útil para evaluar las características generales de vibración en áreas urbanas y para evaluar cuantitativamente los daños producidos después de un terremoto, ya que la variación en el período natural del edificio, antes y después del sismo, está relacionado con la degradación de la rigidez de los elementos estructurales del edificio.

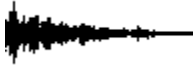


V.- VIBRACIÓN AMBIENTAL

5.1.-Origen y características.

La propagación y las características de las fuentes de la vibración ambiental han sido estudiadas desde el siglo XIX, desde entonces se observó la complejidad de la propagación multimodal y multidireccional. Sin embargo, hasta mediados del siglo XX se comenzaron a utilizar registros de vibración ambiental con el objetivo de estudiar los efectos locales; aunque la idea original de esos trabajos era errónea en cuanto al origen e interpretación, ya que se consideraba que su fuente era ruido blanco (El ruido blanco es una señal aleatoria, proceso estocástico, que se caracteriza porque sus valores de señal en dos instantes de tiempo diferentes no guardan correlación estadística, por lo que su densidad espectral de potencia es una constante, su gráfica es plana y la señal contiene todas las frecuencias y todas ellas tienen la misma potencia) y que contenían básicamente ondas de cuerpo (Flores-Estrella et al, 2004).

La vibración ambiental sólo ocurren en el intervalo de frecuencias de 0.01 a 30 Hz., sin embargo, en la exploración geofísica superficial sólo interesa la banda de 0.1 a 10 Hz., ya que en esta banda parte de la energía se transmite como ondas Rayleigh, cuyos modos y velocidades de propagación se pueden estimar y medir con arreglos instrumentales para obtener información sobre las características de los parámetros elásticos de la corteza terrestre hasta profundidades de 20 kilómetros.



5.2.-Naturaleza de las vibraciones ambientales

Los efectos de los sismos sobre las construcciones existentes en un sitio son el resultado directo de las características geológicas locales. Los daños causados por los sismos, temblores o terremotos dependen de la intensidad, duración y periodo de los sismos. Estos parámetros están fuertemente influenciados por las propiedades del suelo de la zona, los cuales a su vez dependen de las características topográficas y geotécnicas existentes. Las mediciones de vibraciones ambientales o ruido ambiental tiene el potencial de contribuir a la mitigación de amenaza sísmica, particularmente en zonas urbanas, las cuales se pueden clasificar en zonas a lo que se conoce como *microzonificación sísmica*.

Tanto los sedimentos como las rocas están sometidos a vibraciones permanentes, las cuales pueden ser clasificadas principalmente en dos categorías.

- 1) *Naturales*: producto de olas de mar, viento y variaciones en la presión del aire principalmente.
- 2) *Artificiales*: producto de maquinarias, industrias, tráfico vehicular.

Estas vibraciones son conocidas en la lengua inglesa con el nombre de “*microtremors*”, sin embargo en castellano no hay uniformidad en el nombre aplicado, usándose indiferentemente y con el mismo significado microtemblores, microtemores, microvibraciones, vibración ambiental o ruido ambiental (Espinoza, 1999). En este trabajo se emplea la palabra *vibración ambiental*.



Como se mencionó anteriormente, las fuentes de vibraciones pueden ser tanto de origen natural como artificial. Estas a su vez, corresponden a diferentes rangos de frecuencias:

- ❖ **Bajas frecuencias** (menores a 1Hz), cuya fuente es principalmente de tipo natural, siendo las ondas oceánicas las más representativas, emitiendo su energía máxima alrededor de 0.2 Hz. Frecuencias inferiores a 0.1 Hz están asociadas a fuerzas atmosféricas, sin embargo, este rango es de poco interés para la ingeniería sísmica.
- ❖ **Altas frecuencias** (mayores a 1 Hz) cuyo origen es primordialmente producto de la actividad humana, por ejemplo: fábricas, tráfico vehicular, maquinarias, peatones, etc. La fuente es de tipo superficial, además es importante resaltar que muestran gran variedad el día y la noche, y entre la semana y los fines de semana.

Las fuentes que generan bajas frecuencias usualmente son distantes. La energía en este caso viaja a través de las ondas superficiales, las cuales localmente pueden interactuar con las estructuras presentes en el lugar. Sus grandes longitudes de onda penetran a grandes profundidades, trayendo como resultado la presencia de campos de ondas más complejos representados y debidos a la heterogeneidad que hay en el subsuelo.

5.3.-Métodos para el estudio de la amplificación del movimiento del suelo.

Los métodos utilizados para caracterizar la respuesta del suelo frente a una sacudida se pueden clasificar en 2 principalmente, en métodos experimentales y métodos numéricos. Los métodos experimentales tienen como principal objetivo determinar la función de transferencia, o en su defecto la frecuencia fundamental, de los depósitos superficiales a partir de registros sísmicos o vibración ambiental. Algunos de estos métodos son: el Método Nakamura o del cociente espectral H/V de registros de vibración ambiental, el método clásico de las razones espectrales suelo-roca, y finalmente el método de la amplificación del movimiento del suelo en términos de la intensidad macrosísmica.

Las técnicas geofísicas y geotécnicas se aplican a la exploración del suelo para conocer sus características y estructura. En función de la propiedad física que estemos midiendo y de los instrumentos disponibles se utilizara una técnica u otra, para el presente trabajo se utilizó la técnica de Nakamura o del cociente espectral H/V.

La modelización numérica es especialmente útil para la evaluación de los efectos del suelo, principalmente donde no se dispone de equipos necesarios para utilizar métodos experimentales, ya sea por la falta de recursos, instrumentación o por falta de registro de movimientos sísmicos fuertes.

VI.-TÉCNICA DE LA RAZÓN H/V

6.1.-Método Nakamura

El interés por la utilización del ruido natural como fuente de energía en los registros sísmicos ha crecido vertiginosamente en los últimos años, aunque su aplicación se ha desarrollado desde aproximadamente 50 años. En 1989 Nakamura propone un método, el cual consiste en estimar el período fundamental y el factor de amplificación de un depósito de suelos a partir de mediciones de vibraciones verticales y horizontales en superficie, utilizando las vibraciones asociadas a ruido ambiental o micro-temblores.

Es posible señalar que los depósitos de suelo están generalmente expuestos a vibraciones inducidas por fuerzas naturales, como mareas y viento, y a fuerzas antropogénicas provenientes de fábricas, automóviles, trenes, etc. Estas fuentes generadoras de vibraciones pueden considerarse que en suma producen una sollicitación dinámica aleatoria, lo cual permite que un depósito de suelos tienda a vibrar preponderantemente de acuerdo a su periodo fundamental.

Nakamura plantea que el efecto de la fuente podría ser minimizada al normalizar el espectro de amplitud horizontal en términos del espectro de amplitud vertical. Asumiendo que las ondas S dominan la vibración o ruido ambiental. Nakamura señala que la relación espectral H/V en un sitio iguala la función de transferencia de la onda S entre la superficie y la base de la capa sedimentaria. Esto significa que el pico frecuencia de la relación H/V corresponde al periodo natural del sitio. En un artículo reciente, Nakamura (2000) mantiene su opinión original la relación H/V en el rango de frecuencia pico no se ve afectada por el modo fundamental de las ondas Rayleigh. Explica este pico como un resultado directo de la múltiple refracción de las ondas S.



6.1.1.-Proposiciones del Método Nakamura.

El método Nakamura (1989) se basó en las siguientes proposiciones:

- ❖ La vibración ambiental está compuesta por diferentes tipos de ondas, en especial ondas Rayleigh, que se propagan en una capa delgada de sedimentos que están sobre un medio rocoso firme. El efecto de esta onda es igual tanto para los componentes verticales como para las horizontales en superficie.
- ❖ La amplificación del efecto de sitio es debido a la presencia de una capa que se ubica por encima de un espacio infinito, donde la excitación está dada por un plano armónico de ondas S.
- ❖ Supone que las fuentes profundas son despreciadas y por lo tanto, el movimiento es debido a fuentes locales, las cuales no afectan el movimiento del ruido cultural o vibración ambiental en la base de la capa de sedimentos.

La metodología se enfoca en la eliminación de las ondas Rayleigh para describir la función de transferencia en función de las ondas corporales, específicamente las ondas S. En forma simplificada, el modelo inicial cuenta con la presencia de un suelo blando sobre un suelo duro, entre los cuales hay una diferencia significativa entre las principales características mecánicas de los materiales como son la densidad y la velocidad de corte V_s . Se tendrán cuatro componentes en el dominio de Fourier involucradas en el movimiento sísmico:

- ❖ El espectro de **amplitud** de la componente horizontal y vertical de la base sedimentaria (V_B y H_B).
- ❖ El espectro de **amplitud** de la componente horizontal y vertical de la superficie (V_S y H_S).

En la siguiente imagen se observan las cuatro componentes en el dominio de Fourier involucradas en el movimiento sísmico:

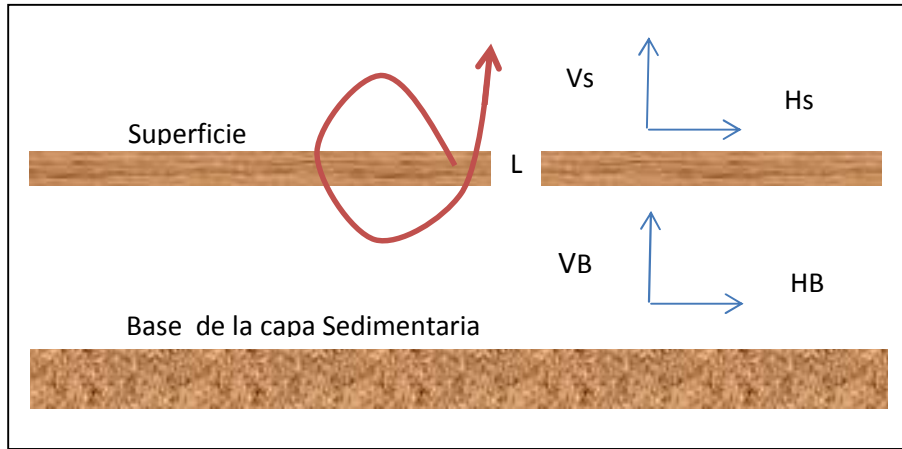


Figura 6.1 Esquema del modelo seguido por Nakamura

6.1.2.-Descripción del Método Nakamura.

Tomando en consideración que la componente vertical de la vibración ambiental no es amplificada por las capas superficiales, de acuerdo a Nakamura, es posible estimar el efecto de las ondas Rayleigh, A_S , en función de la frecuencia, mediante:

$$A_S(w) = \frac{V_S(w)}{V_B(w)}$$

Donde V_S y V_B son el espectro de amplitud de la componente vertical del movimiento en superficie y en la base de la capa sedimentaria, respectivamente. Normalmente, el efecto de la onda Rayleigh es cercano a cero cuando la relación es aproximadamente igual a la unidad. A medida que el valor de la relación aumenta, el efecto de las ondas Rayleigh es mayor. La propuesta de Nakamura busca eliminar este efecto.

Nakamura define un estimado del efecto de sitio, S_E , dado por:

$$S_E(w) = \frac{H_S(w)}{H_B(w)}$$

Donde H_S es el espectro de amplitud de la componente horizontal en superficie y H_B es el espectro de amplitud de la componente horizontal en la base de la capa sedimentaria. Como H_S sí es afectada por las ondas superficiales y además, las ondas del ruido cultural o vibración ambiental se propagan principalmente como ondas Rayleigh. H_S Probablemente se encuentra influido por las mismas. El efecto de las ondas Rayleigh debe ser incluido en la componente vertical de la vibración ambiental en superficie más no en la componente vertical de la base de la capa sedimentaria.

El método de Nakamura busca remover los efectos de las ondas superficiales. Así el espectro de sitio modificado S_M será:

$$S_M(\omega) = \frac{S_E(\omega)}{A_S(\omega)} = \frac{\frac{H_S(\omega)}{V_S(\omega)}}{\frac{H_B(\omega)}{V_B(\omega)}}$$

Según mediciones realizadas por Nakamura en basamento, examinando datos de vibración ambiental en pozos, la relación H_B/V_B es aproximadamente una para un amplio rango de frecuencias en sitios donde existe un sub estrato firme. Esto implica que en la base de la capa sedimentaria, la propagación de las ondas va a ser la misma en todas direcciones.

Para compensar el efecto de las ondas Rayleigh, se tiene un estimado del efecto de sitio corregido, dado por:

$$S_M(\omega) = \frac{H_S(\omega)}{V_S(\omega)}$$

Según la relación de la formula anterior, la función de transferencia en las capas superficiales es posible estimarla empleando solamente el movimiento en superficie.

Nakamura concluye que la relación o cociente espectral entre la componente horizontal y vertical del movimiento en un mismo sitio puede ser usada como un estimativo de los efectos de sitio en lugar de estudio. En la figura 1.23 se presenta un esquema que describe la técnica de relación espectral entre la componente horizontal y vertical del movimiento registrado en la superficie de una capa sedimentaria (relación espectral H/V).

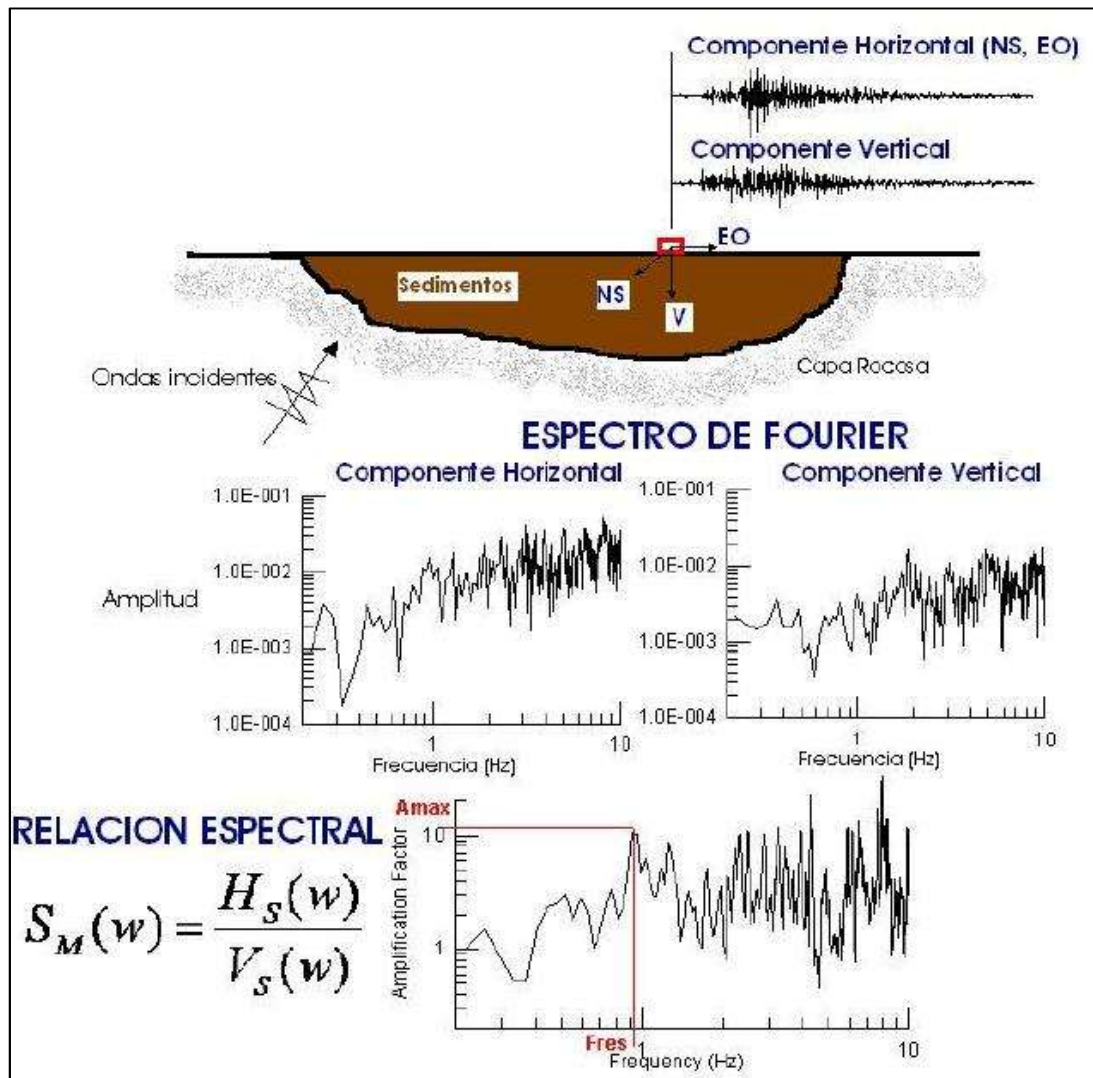
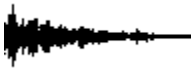


Figura 6.2.- Descripción de la relación espectral H/V



6.1.3.-Ventajas y desventajas del método

Ventajas:

- ❖ La principal ventaja del método Nakamura es que es un sistema muy sencillo para estimar la función de transferencia de las capas del suelo de un emplazamiento de las mediadas de ruido de las componentes horizontales y verticales señaladas.
- ❖ Es un método bastante rápido, ya en un solo día se pueden sondear áreas bastante grandes, esto dependiendo del personal, así como de la experiencia de quien opera el equipo.
- ❖ Es relativamente barato, ya que la inversión inicial es considerable, sin embargo a la larga es mucho más económica que hacer excavaciones o perforaciones, recordando que si se hacen estas últimas se debe hacer las reparaciones necesarias, sobre todo si es en una zona urbana. Esta ventaja es importante si por ejemplo se desea colocar alguna medición en alguna zona arqueológica o un patrimonio cultural.

Desventajas:

- ❖ El problema es que, mientras se acepta que el cálculo de la frecuencia fundamental es correcto, hay divergencias en la posibilidad de determinar o no la amplificación por la capa del suelo (Lermo y Chaves, Chaves –García), (1994).
- ❖ Otro inconveniente que presenta este método es que en algunos casos la frecuencia predominante de la relación de Nakamura no coincide con la frecuencia de máxima amplificación de la función de transferencia, ya que con el método de Nakamura se calcula la frecuencia del primer pico de la función de transferencia.

VII.-EQUIPO ACELEROMÉTRICO

El equipo acelerométrico es la principal herramienta de trabajo, por consiguiente se debe de tener conocimiento de todas las características del mismo así como su correcta operación, ya que un mal uso de este podría arrojarnos datos erróneos, lo que haría inservible nuestro trabajo o de ser necesario tomar nuevas mediciones.

En la figura 1.24 imagen se muestra de una forma muy esquemática el espectro sísmico en función del periodo y frecuencia, señalando tanto las fuentes como los instrumentos de medición recomendados para cada intervalo. La vibración se sitúa aproximadamente en el rango comprendido entre 0,1 Hz y 10 Hz (Roca, 1996), por lo tanto se debe contar con un equipo capaz para este tipo de vibraciones.

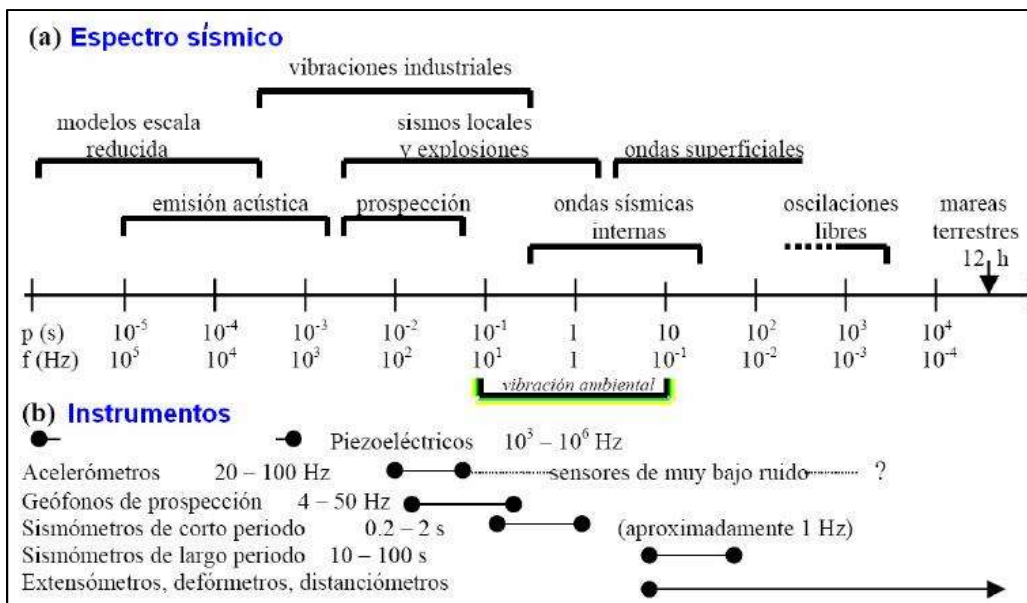
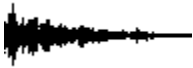


Figura 7.1.- (a) Espectro sísmico (b) Instrumentos

Cabe señalar que todos los equipos utilizados pertenecen al Departamento de Estructuras pertenecientes a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.



7.1.-Sensor

Se recomienda el uso de sensores con un período natural de vibración que permita registrar ondas en un rango de frecuencias comprendido entre 0,1 Hz y 10 Hz, aproximadamente. Se empleó un sensor banda ancha para efectuar las mediciones en la totalidad de estaciones. En la tabla 1.1 se muestran las propiedades del sensor, así como en la figura 1.25 se muestra una fotografía del mismo. Para este trabajo se utilizó un EpiSensor, que es un acelerómetro triaxial de aplicaciones optimizadas para la grabación de movimientos sísmicos.

Tabla 7.1.-Descripción del sensor empleado en las mediciones.

Sensor	
Marca	Kinometrics
Modelo	FBA ES-T
Ancho de Banda	De 0 a 200 Hz
Fuente	Batería externa 12 V

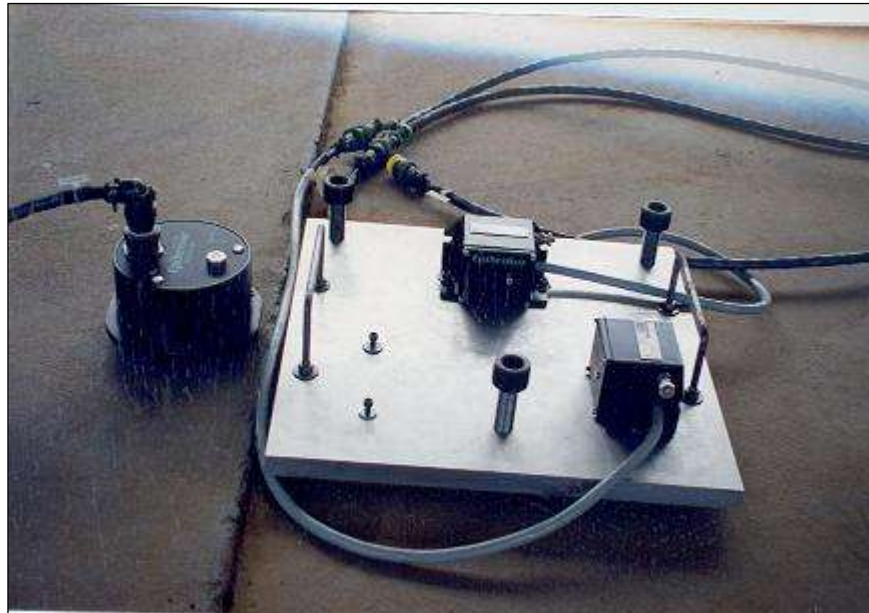


Figura 7.2.- Sensor triaxial, utilizado en las mediciones

7.2.-Unidad de Digitalización y Almacenamiento K2

La unidad K2 es un grabador digital de funciones completas, diseñado con el objetivo que el usuario tenga en mente. Los avances técnicos y de ingeniería han motivado a nuevas técnicas de monitoreo de estructuras, la unidad K2 es una herramienta sumamente versátil y práctica. El alto rango dinámico y resolución superiores ofrecen importantes ventajas para aplicaciones donde la señal de la fidelidad y la integridad de los datos son de vital importancia.

Aplicaciones principales

- ❖ Monitorio de vibraciones en estructuras.
- ❖ Redes sísmicas locales, regionales y nacionales.

Principales beneficios

- ❖ Rango dinámico superior a 114 dB
- ❖ Diseño modular que permite la expansión multicanal a 6 ó 12 canales
- ❖ Multi-tarea del sistema operativo que permite la adquisición simultánea de datos
- ❖ Capacidad de alertas remotas para el sistema de evento o fallo de auto-diagnóstico
- ❖ Adquisición de datos a distancia con el Real tiempo de salida de datos digitales
- ❖ Interfaz de usuario común, formato de archivo, y herramientas de apoyo con otros registradores de misma marca Kinometrics.

Tabla 7.2.-Descripción de la unidad de digitalización

Unidad de Digitalización y almacenamiento.	
Marca	Kinometrics
Modelo	K2
Tamaño	10.1”(256 mm) x5.0”(381mm) x7”(178mm)
Peso	10.9 Kg (24 lbs) Incluyendo batería
Memoria	20MB SanDisk, opcional 170, 340 o 520 MB disco duro
Rango	10.5 V a 15 V
Canales del sensor	3 estándar (+1); 6 y 12 opcionales

La ficha técnica de la unidad de digitalización y almacenamiento K2, se está en una de los anexos, cabe señalar que una de las recomendaciones para este equipo tenerlo en la sombra ya que si la temperatura se eleva nos puede arrojar errores en las mediciones, en la imagen 1.26 se aprecia la unidad K2.

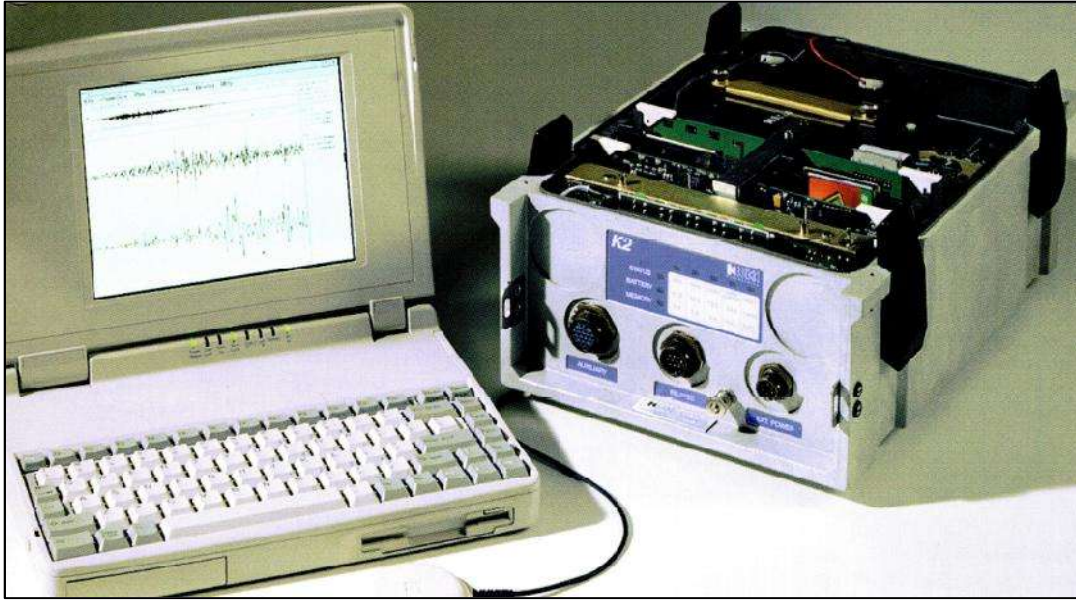


Figura 7.3.- Unidad de digitalización K2

7.3.-Equipo adicional.

- GPS (Determinar la ubicación de la estación)
- Brújula (utilizada para orientar al sensor)
- Computadora
- Vehículo

VIII.-CAMPAÑAS DE MEDICIÓN

8.1.-Metodología.

Posteriormente a la revisión bibliográfica de los conceptos básicos, se dio una revisión al equipo utilizado así como su uso y características.

Desde el inicio de las mediciones se pretendió tomar lugares en los que hubiera una gran concentración de población, servicios e industria, así como también sitios turísticos y representativos de la ciudad. Por otro lado las mediciones se procuraron hacer de tal manera que abarcaran toda la ciudad, para posteriormente revisar y determinar si fuese necesario tomar en algunas otras zonas. Desde el punto de vista geológico se tomaron mediciones en ambos lados del río Cupatitzio, el cual es la una división de estratos del suelo en la ciudad, esto con el fin de ver las variaciones en el periodo de respuesta del suelo y determinar posibles efectos de sitio.

Para realizar las mediciones el procedimiento en cada una de ellas fue el siguiente:

1. Se verifica el correcto funcionamiento de todo el equipo y la batería del mismo, todo esto previamente a la salida a campo.
2. Una vez situados en el área de estudio, es necesario contar con un mapa en el cual se divida el área en zonas para facilitar la ubicación de las mediciones, así como también se localizan lugares de interés.
3. Antes de instalar el equipo se procura que se realice en un lugar donde no se presente demasiado flujo vehicular pesado o algún tipo de vibraciones, esto debido a que introducen ruido a las mediciones.
4. Se orienta el sensor en dirección norte para luego proceder a su nivelación, el sensor no debe permanecer mucho tiempo en el sol, ya que puede llegar a descalibrarse.



5. Se tomaron los datos de posición con un GPS.
6. Se orientó el sensor con dirección al norte.
7. Se calibra el sensor, se enciende la unidad K2, la cual se conecta a la computadora, una vez encendida la computadora con el software del programa se configuran las opciones de grabación, para nuestro caso se tomaron en promedio 3 mediciones por cada estación y cada una de ellas de 90 segundos.
8. Una vez comenzado el proceso de grabación, se evita transitar alrededor del equipo esto con el fin de garantizar el menor ruido local posible en los datos.
9. Se registra en una bitácora o libreta de campo la información referente a: ubicación geográfica, nombre del archivo, condiciones, tipo de suelo, tránsito, fuentes de ruido o alguna información que sea relevante.

8.2.-Parametros de medición.

8.2.1.-Espaciamiento en las mediciones

Para este estudio el espaciamiento de las mediciones se hizo aproximadamente de 500 metros, para seleccionar las zonas de estudio nos basamos en la experiencia y conocimiento del Dr. Guillermo Martínez Ruiz, ya que el radicó una parte importante de su vida en esta ciudad, así como también realizó estudios de peligro sísmico para la misma. Su colaboración fue sumamente importante en el sentido de ahorro de tiempo, el espaciado y colocado de la estación para las mediciones de la vibración ambiental.

La campaña de medición se llevó a cabo el día 19 de octubre del 2011, la cual inicio a las 8:30 de la mañana, terminando a las 5:00 pm en la Ciudad de Uruapan, perteneciente al municipio de Michoacán, cabe señalar que se hicieron 24 tomas distintas procurando abarcar la ciudad en su totalidad, en la figura 1.26 se observa la ubicación y el orden de las mediciones.

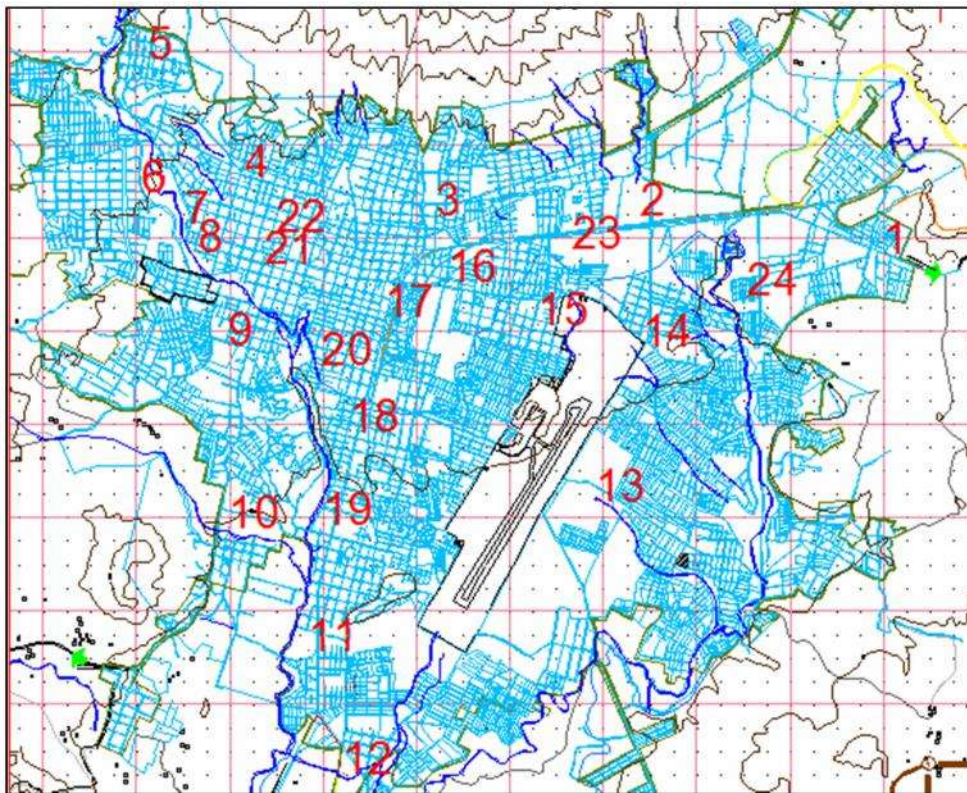


Figura 8.1.- Ubicación puntos de medición de vibración ambiental.

En la siguiente tabla se presenta la ubicación y coordenadas geográficas de los datos obtenidos en la campaña de medición.

Tabla 8.1.-Puntos de medición de vibración ambiental.

No. Medición	Coordenadas Geográficas		No. de Muestreos	Ubicación
	Latitud	Longitud		
1	19.4213204	-102.000407	4	Instalación de PEMEX
2	19.425416	-102.025105	3	Frente a HOME DEPOT
3	19.4257003	-102.046031	3	Calzada Benito Juárez
4	19.4297129	-102.065338	3	Calzada Benito Juárez
5	19.4413966	-102.075064	3	Colonia Mirador
6	19.4285703	-102.075868	3	Colonia La Quinta
7	19.4254589	-102.071577	3	A un costado Parque Nacional
8	19.4226748	-102.070306	3	Calle Ramón Ortiz
9	19.4136411	-102.067339	3	Calle 20 de Noviembre
10	19.3958849	-102.067661	3	Avenida de las Delicias
11	19.3837827	-102.05977	3	Frente a "Plaza Uruapan"
12	19.3718737	-102.056465	3	Avenida Paseo de la Revolución
13	19.3978053	-102.030255	3	Empaquetadora RV
14	19.4126594	-102.025282	3	Libramiento
15	19.4149929	-102.035775	3	Bodega Aurrera
16	19.4193918	-102.044958	3	A un costado Chocolatera "Moctezuma"
17	19.416039	-102.05138	3	Paseo "Gral. Lázaro Cárdenas"
18	19.4049776	-102.05514	3	Paseo "Gral. Lázaro Cárdenas"
19	19.3960941	-102.058101	3	A un costado de Fac. De Agrobiología
20	19.4114201	-102.05786	3	Av. Manuel Pérez Coronado
21	19.421382	-102.063514	3	Frente a la Iglesia de San Francisco
22	19.4244826	-102.062243	3	Calle Juan Ayala
23	19.4223851	-102.032164	2	Carretera Uruapan-Pátzcuaro
24	19.417455	-102.014387	1	Colonia Morelos

8.2.2.-Zona de influencia de las estaciones.

Cada estación donde se llevó a cabo alguna medición de vibración ambiental, se realizó procurando que como se mencionó anteriormente estuvieran a una distancia aproximada de 500 metros, sin embargo en la zona centro de la ciudad esta distancia se redujo a la mitad esto con el fin de obtener un dato más preciso de una de las zonas más importantes de la ciudad, esto debido a su valor cultural.

En la figura 1.28 se observa las zonas de influencia de cada estación de medición, la estación 13 abarca una área bastante grande en comparación a las anteriores esto debido a que no se tomaron mediciones dentro de la zona del Aeropuerto de la Ciudad de Uruapan. Para obtener la zona de influencia de cada estación se usaron los programas ArcView y AutoCAD.

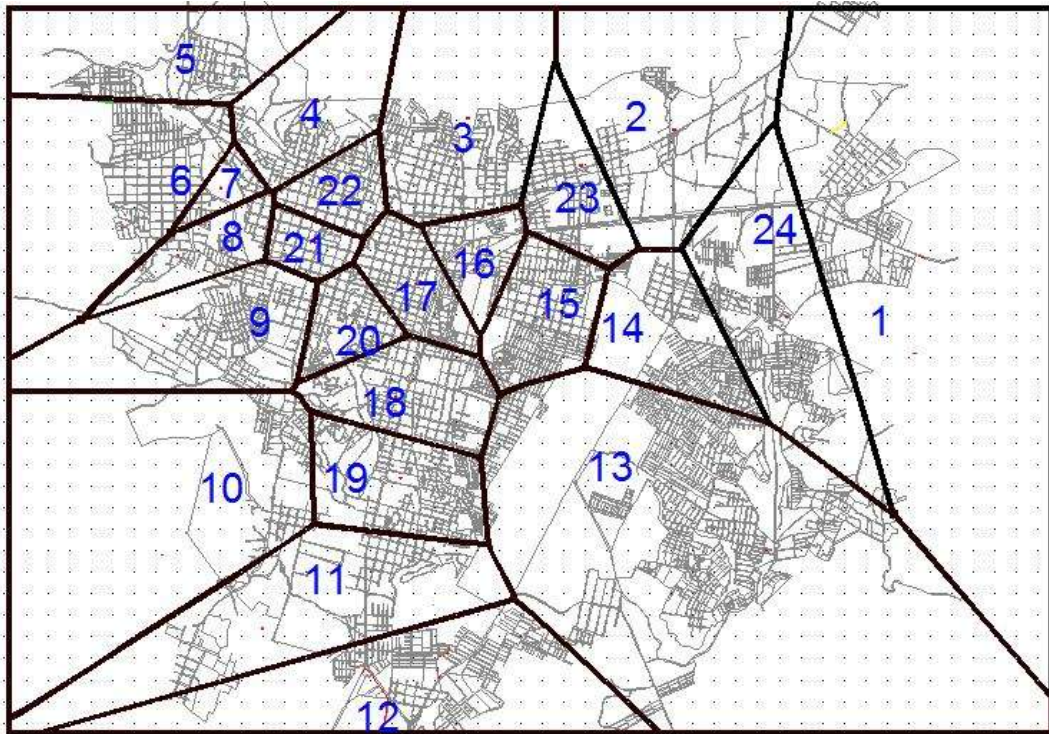


Figura 8.2.- Zona de influencia de las estaciones de medición.

Como menciono anteriormente este trabajo pretende ser una ayuda de diseño para la ciudad, y por consiguiente uno de los puntos más importantes de la misma es el centro histórico, ya que éste cuenta con iglesias, monumentos y construcciones que son patrimonio de la humanidad, en la imagen 1.29 se observa de color naranja la zona centro.

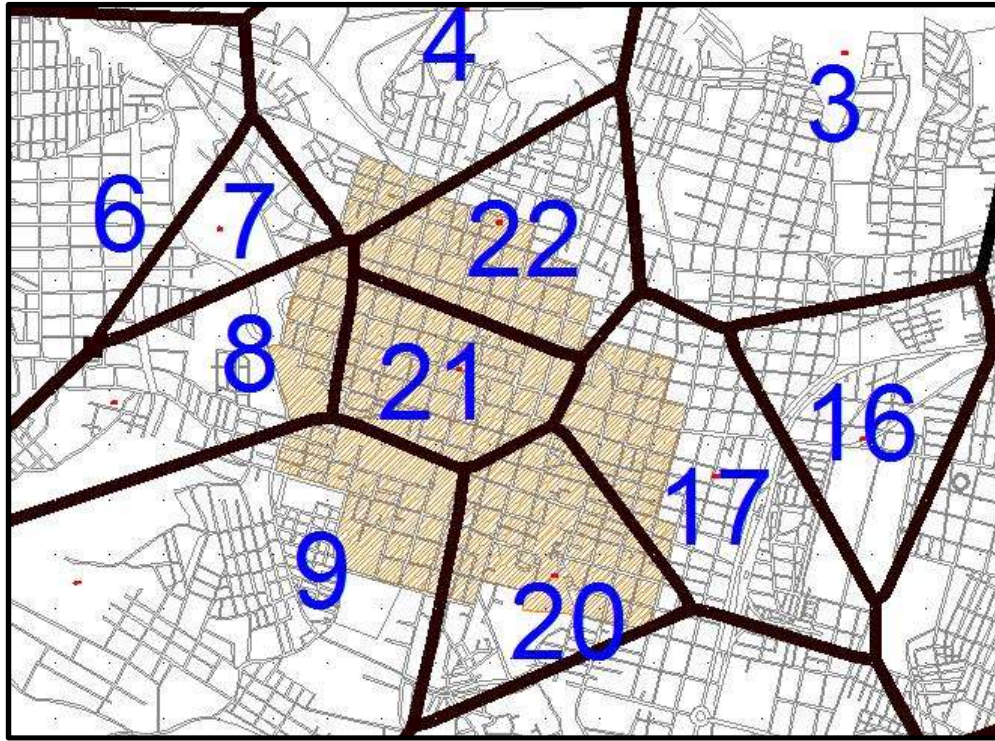


Figura 8.3.- Zona de influencia Centro de la Ciudad de Uruapan

Tabla 8.2.-Área de influencia de los puntos de medición.

Estación No.	Área km2	Coordenadas UTM		Ubicación
		X	Y	
1	17.639	815029.511	2150217.22	Instalación de PEMEX
2	5.387	812425.948	2150625.86	Frente a HOME DEPOT
3	4.306	810226.17	2150619.47	Calzada Benito Juárez
4	2.53	808189.621	2151029.23	Calzada Benito Juárez
5	3.473	807145.557	2152306.01	Colonia Mirador
6	5.18	807085.15	2150883.83	Colonia La Quinta
7	0.435	807542.009	2150546.86	A un costado Parque Nacional
8	1.207	807680.79	2150240.74	Calle Ramón Ortiz
9	3.716	808009.672	2149245.4	Calle 20 de Noviembre
10	9.472	808009.317	2147278	Avenida de las Delicias
11	5.498	808861.614	2145951.59	Frente a "Plaza Uruapan"
12	5.634	809231.484	2144638.37	Avenida Paseo de la Revolución
13	18.297	811937.486	2147558.05	Empaquetadora RV
14	2.337	812431.782	2149212.47	Libramiento
15	1.829	811324.511	2149451.94	Bodega Aurrera
16	0.96	810350.919	2149922.61	A un costado Chocolatera "Moctezuma"
17	1.276	809682.429	2149539.65	Paseo "Gral. Iázaró Cárdenas"
18	2.074	809308.157	2148307.63	Paseo "Gral. Iázaró Cárdenas"
19	2.307	809013.72	2147318.3	A un costado de Fac. De Agrobiología
20	0.942	809010.106	2149016.38	Av. Manuel Pérez Coronado
21	0.635	808397.037	2150109.69	Frente a la Iglesia de San Francisco
22	0.925	808524.789	2150455.43	Calle Juan Ayala
23	1.626	811689.838	2150277.31	Carretera Uruapan-Pátzcuaro
24	4.466	813567.689	2149763.5	Colonia Morelos

8.2.3.- *Nomenclatura de archivos*

Los registros de cada punto adquirido fueron nombrados anteponiendo la letra ‘D’ al archivo, seguido de una letra, la cual cambiaba cada estación en orden alfabético, se inició con la letra I, sin embargo se llegó al registro DZ, por consiguiente el siguiente registro fue EA, y por último se colocaba el número de registro efectuado (p.ej. DI001, DK003, EA002).

8.2.4- *Condiciones experimentales*

Es importante comprender de antemano que los parámetros de adquisición influyen en la calidad y fiabilidad de los datos. Las mediciones de ruido ambiental en una ciudad deben ser conducidas bajo el siguiente contexto:

- ❖ El ruido es muy alto.
- ❖ En una ciudad la mayor parte del suelo está cubierto por aceras y pavimento, razón por la cual la ubicación del sensor se realiza mayoritariamente sobre estas superficies.
- ❖ La adquisición se desarrolla en un ambiente dominado por edificaciones de dimensiones variables.
- ❖ El registro no siempre se efectuó a la misma hora del día ni bajo las mismas condiciones climáticas.
- ❖ La presencia de estructuras subterráneas, por ejemplo tuberías, es en algunos casos desconocida.

IX.- PROCESAMIENTO DE SEÑALES

9.1.-Metodología.

La etapa de procesamiento se inicia primeramente con la descarga de los datos de la estación K2 a la computadora. Para descargarla es necesario utilizar el programa SMA (Strong Motion Analyst), el cual nos permite ver los acelerogramas de los registros, una vez vistos los acelerogramas de cada estación los comparamos y escogemos el que presente una mayor y constante vibración ambiental, en caso de que todas los registros sean demasiado malos se opta por desechar la estación, sin embargo si la estación tiene demasiada área de influencia será necesario volver a realizar la medición.

El programa SMA nos arroja un archivo con extensión **.V2**, del cual posteriormente se extraen 3 archivos de aceleraciones por medio de un programa casero ejecutable llamado **arreg_2.exe**, teniendo los tres registros de aceleraciones, se incrementan estos en un 50%, tomando 25 % del registro anterior y el otro 25% del siguiente, teniendo estos registros se leen con el programa DEGTRA del que se obtiene la Transformada Rápida de Fourier de cada registro. Se promedian los valores de las Transformadas de Fourier para cada componente (Horizontal N-S, Horizontal E-O y Vertical), y por último se calcula el cociente de Nakamura, donde el numerador es la suma de los promedios de las 2 componentes horizontales y el denominador es el promedio de la componente vertical, esto se hace para cada estación.

Por último se grafica la amplitud del espectro de Fourier en el eje de las ordenadas y la frecuencia en el eje de las abscisas (la frecuencia es el resultado del cociente de Nakamura). Obteniendo el periodo del pico mayor de la unidad que se presente en la gráfica. Estos periodos se resumen y una tabla y con estos valores se elabora las curvas de isoperiodos por medio del programa ArcView 3.2.

En la figura 9.1 se muestra el procedimiento de una manera más sencilla por medio de un diagrama, así como también posteriormente se detalla cada paso del mismo.

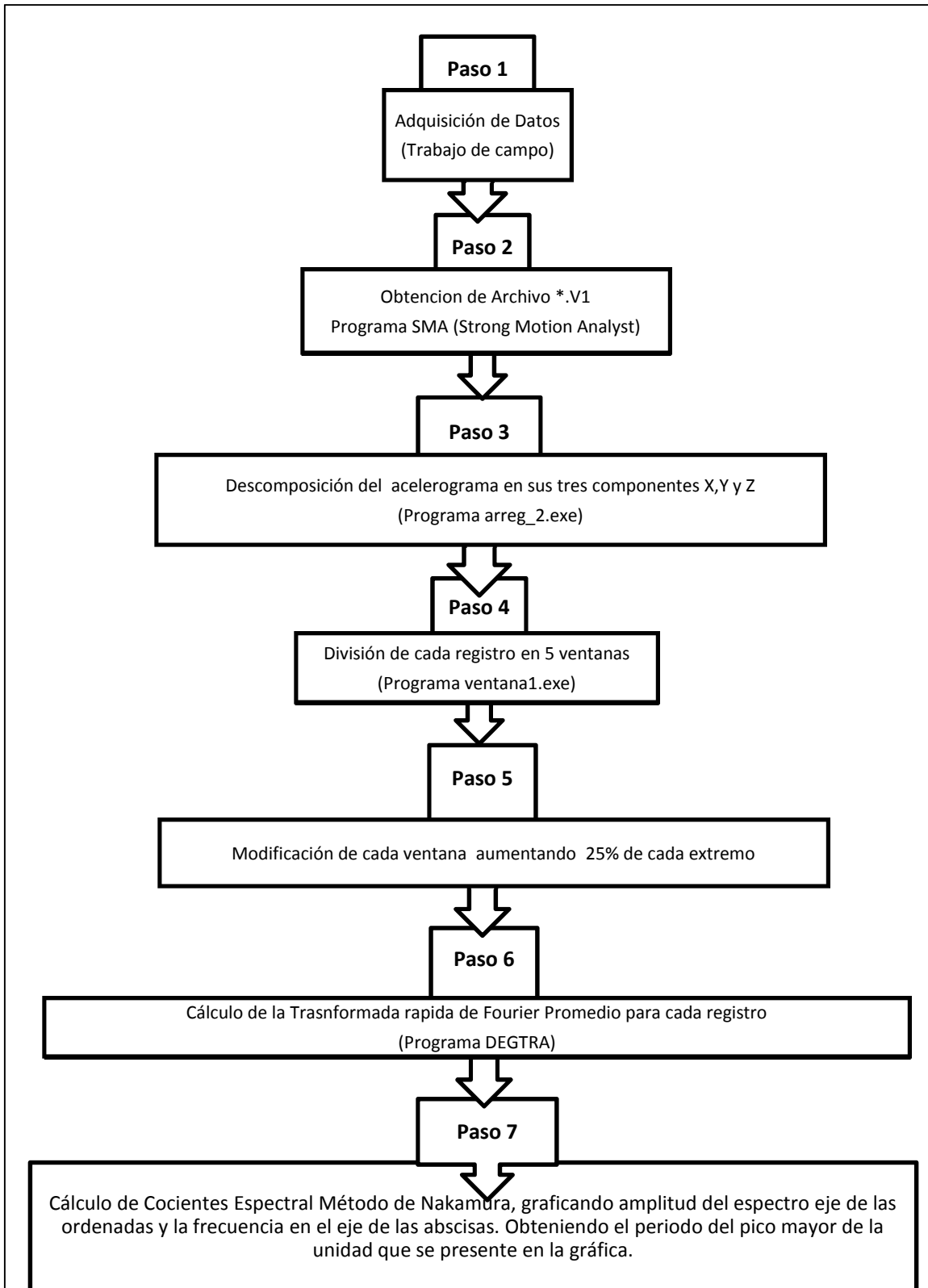


Figura 9.1.-Diagrama Procesamiento de Señales



9.1.1.-Selección de Acelerogramas

Después de adquirir los datos de campo se procesan por medio del programa SMA (Strong Motion Analyst), de este se obtienen los acelerogramas de cada estación, de los cuales se selecciona el que presente una mayor y constante vibración ambiental, las estaciones que presente picos muy pronunciados se desechan. En la figura 9.2 se observa tres registros de la estación DK, tomada sobre la calzada Benito Juárez, en este caso se eligió la segunda muestra, ya que presenta una mayor vibración en el tercer canal. Se hicieron 24 estaciones en distintos puntos de la ciudad procurando abarcarla en su totalidad.

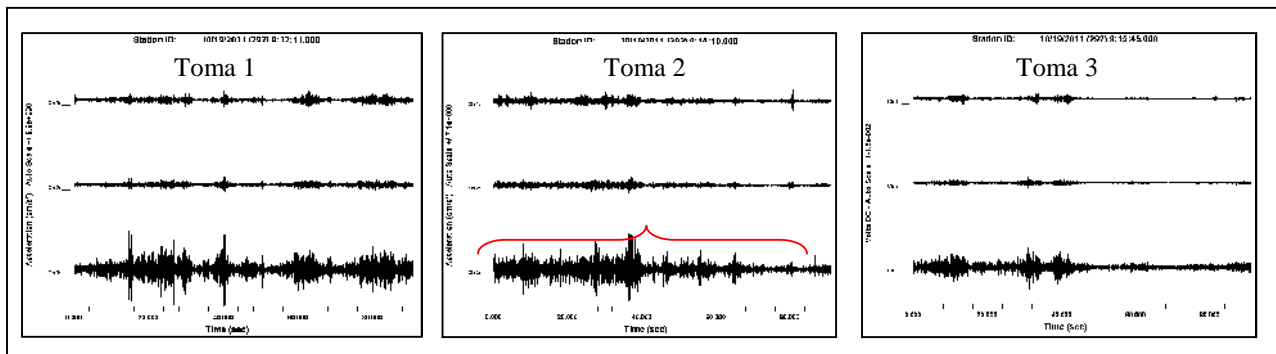


Figura 9.2.-Selección de Acelerogramas.

9.1.2.-Conversion de Datos

Después de elegir el acelerograma, y guardarlo en un archivo con extensión **.V2** lo siguiente es la conversión de este archivo en vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración, lo cual se hace por medio de una aplicación ejecutable no comercial llamado **arreg_2.exe**, para esto debemos de tener esta aplicación dentro de una misma carpeta junto al archivo **.V2** para que funcione.

La aplicación es muy sencilla solamente se da un clic sobre ella y sale un menú que nos pide introducir el nombre del archivo de origen, para lo cual se le da el nombre del archivo **.V2**, al hacer esto nos genera 9 archivos de texto, aceleraciones, velocidades y desplazamientos en las direcciones X, Y y Z.



En la figura 9.31 se observa la ventana principal del programa `arreg_2.exe`.

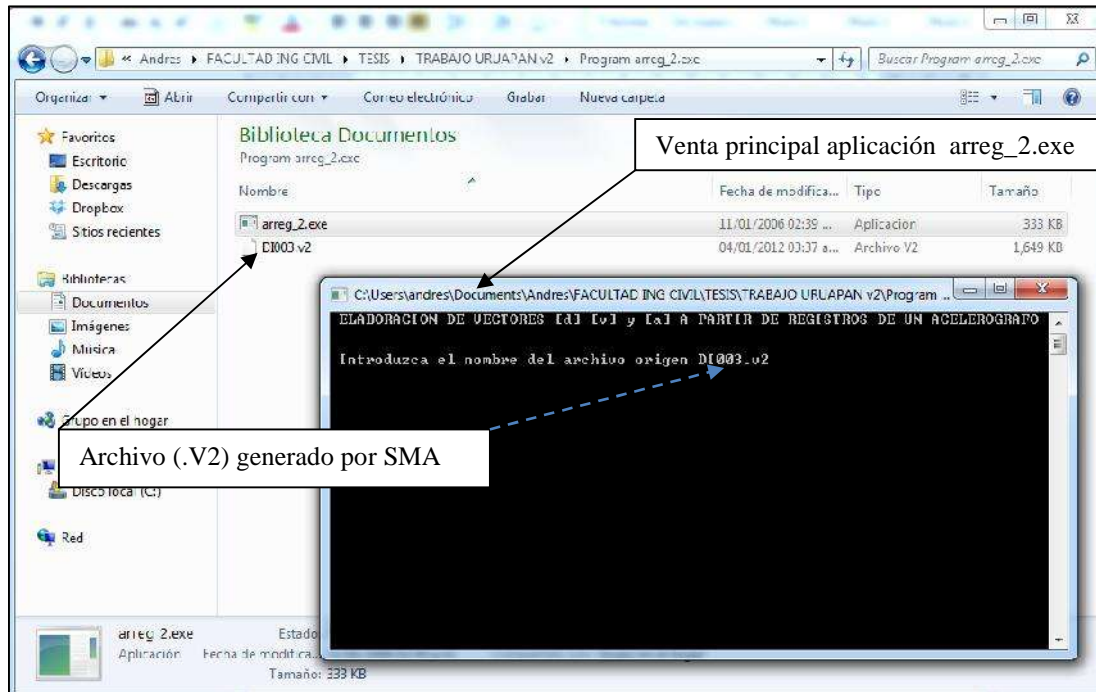


Figura 9.3.- Programa para la elaboración de vectores.

9.1.3.-División de cada registro de aceleraciones en 5 ventanas.

Se dividen los tres registros de aceleraciones obtenidos anteriormente por el programa `arreg_2.exe`, por medio de una aplicación ejecutable no comercial llamado `ventanas1.exe`, esta aplicación ejecutable nos permite dividir el registro en ventanas del mismo tamaño, esto con el fin de analizar cada una de las ventanas y desechar las que presenten ruido, el cual se manifiesta en las gráficas en forma de picos. Cada una de las ventanas debe tener 18 segundos ya que el registro completo dura 90 segundos. El archivo del programa debe estar en la misma carpeta que los archivos de las aceleraciones, este programa nos pide introducir el número de puntos por ventana, para nuestro caso se usaron 3600, además nos pide introducir el número de ventanas el cual fue 5 y para finalizar nos pide el nombre del archivo sin extensión, todo esto se aprecia en la figura 9.4.

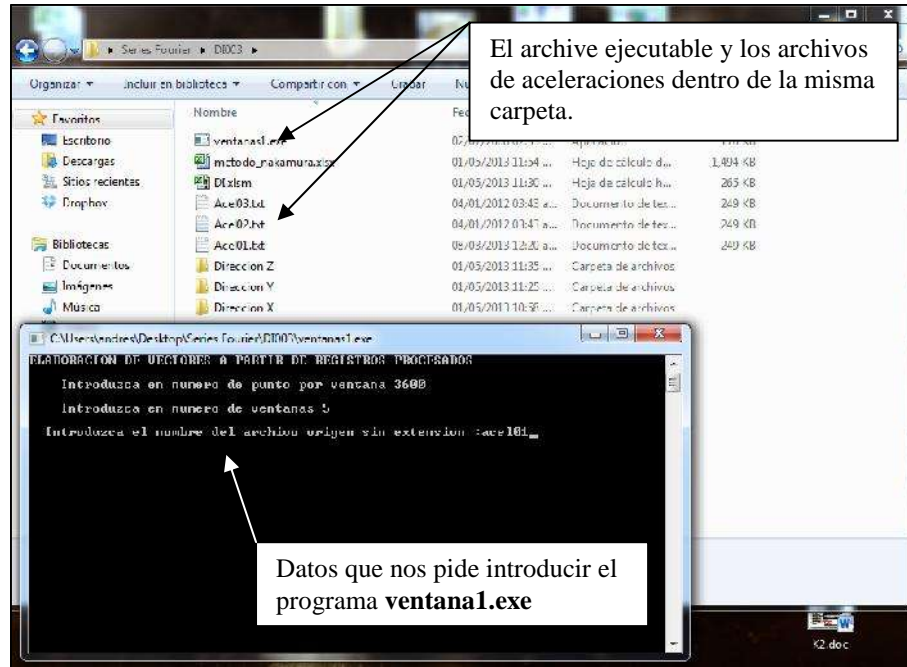
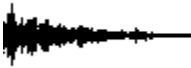


Figura 9.4.- Programa para la división en ventanas de los registros.

9.1.4.-Aumento de cada ventana en un 50 %.

Después de obtener las 5 ventanas de cada componente, cada una de estas ventanas se deben incrementar un 50%, agregando 25% del registro anterior y 25% del registro siguiente, esto con el fin de que si se presenta un pico en algunos de los registro se elimine y los restantes tenga datos del mismo. Para las ventanas 1 y 5 se deben de incluir ceros, esto con el fin de que todas las ventanas tengan el mismo número de datos. En la figura 9.5 se muestra como están compuestas las ventanas, así como la escala que está debajo nos indica el tiempo que debe tener cada ventana.

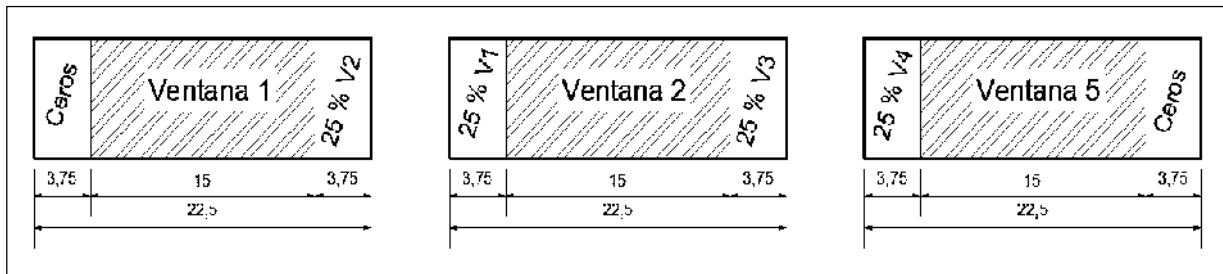


Figura 9.5.- Ventanas de los registros aumentadas 50 %.

9.2.- Obtención de la Transformada Rápida de Fourier Promedio.

9.2.1.-Programa DEGTRA A4

DEGTRA A4 es la versión de una serie de programas que lleva más de una década de desarrollo, por parte de investigadores y estudiantes del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, (UNAM). El programa nos permite hacer filtros básicos y avanzados, evaluar la coherencia, correlación cruzada, integrar, derivar, calcular espectros de amplitudes de Fourier.

9.2.2.-Lectura y selección de archivo de aceleraciones.

Después de generar los tres archivos de aceleraciones en el programa arreg_2.exe, dividirlos en ventanas e incrementarlos, el siguiente procedimiento es leer estos archivos con el programa **Degtra**, para lo cual lo primero que se hace es ejecutar el programa posteriormente se debe abrir una ventana para esto damos clic en archivo y luego en la opción nueva ventana El siguiente paso es leer el acelerograma lo cual se hace haciendo clic en la pestaña de leer acelerograma u oprimiendo Control +A, se busca la ubicación del archivo, después de esto el programa Degtra nos muestra en una ventana el acelerograma.

Al abrir una ventana nos pide introducir un valor DT (Intervalo de tiempo), para el cual daremos el valor de 0.005, que es el intervalo entre cada valor, y seleccionamos la opción ASCII, como se aprecia en la figura 9.6.

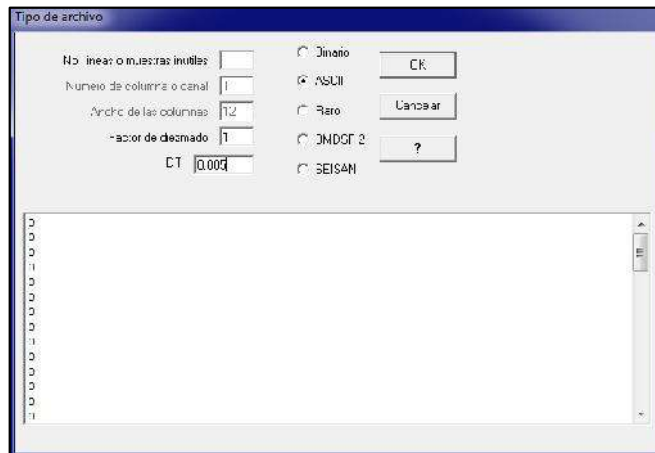
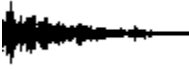


Figura 9.6.- Lectura de archivos programa DEGTRA



Se leen de preferencia los 5 ventanas de cada componente, esto con el fin de no mezclar datos y cometer algún error, en la imagen 9.7 se observan 5 ventanas abiertas con 5 registros, se alcanzan a apreciar 2 registros con picos muy pronunciados, este tipo de picos nos alteran los resultados por lo que se eliminan estos registros. En la parte superior de cada registro aparece N_p , la cual nos indica el número de datos de cada registro, para nuestro trabajo este dato debe ser 5400.

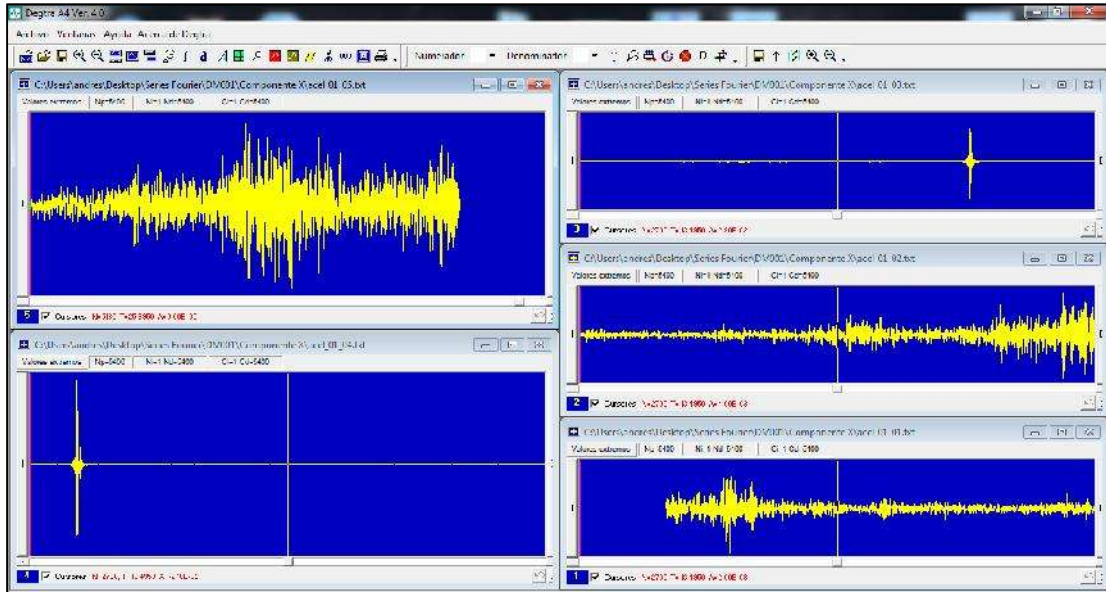
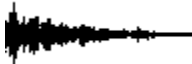


Figura 9.7.-Lectura de acelerogramas usando Programa Degtra



9.2.4.-Filtrado y cálculo de espectro de Fourier.

Filtrar

El filtrado se hace en el dominio de la frecuencia. Sea $y(t)$ la señal filtrada. Su transformada de Fourier, $Y(w)$ estará dada por: $Y(w) = X(w) H(w)$

Donde $X(w)$ es la transformada de Fourier de la señal original después de haber aplicado tapering (% de Taper) y $H(w)$ es el filtro. Para esta opción se dejaron los valores que el manual maneja por default.

Calcular espectro de Fourier (FFT)

Se calcula el espectro de Fourier (en realidad, la transformada rápida de Fourier o FFT) de la parte del registro limitada por los cursores. En la ventana correspondiente se indica con cuántos puntos va a ejecutarse la transformada rápida de Fourier y cuál es el DT que se usará (DT). Para este trabajo se dejaron los valores que proporciona el programa.

Para obtener el periodo fundamental del suelo es necesario pasar a Excel los valores del espectro de Fourier para lo cual damos en la opción guardar la cual aparece en la parte superior del espectro de Fourier y lo guardamos como archivo tipo Degtra para poder leerlo. Estas opciones descritas se observan en la figura 9.8 así como las opciones para el filtrado y el cálculo de espectro de la transformada de Fourier



Figura 9.8.-Filtrado y cálculo de la transformada de Fourier en el Programa Degtra

9.3.-Cálculo de la relación H/V

La técnica propuesta por Nakamura (1989), consiste en estimar la relación entre los espectros de Fourier de amplitud de la horizontal (H) a la vertical (V) de las vibraciones de componentes de ruido ambiental registrados en una sola estación.

El cálculo de la relación H / V sigue distintos pasos:

- 1) *Registro de una señal de 3 componentes de vibración ambiental.*
- 2) *División de cada registro en 6 ventanas*
- 3) *A cada ventana se agrega un 25 % del registro anterior y 25 % del registro siguiente.*
- 4) *Obtención de la transformada rápida de Fourier de cada registro.*
- 5) *Obtención de la Transformada Rápida de Fourier Promedio de cada registro.*

Los pasos anteriores se realizaron se explicaron anteriormente.

- 6) *Sumar las transformadas promedio de las dos componentes horizontales.*
- 7) *Dividir la suma de las dos componentes horizontales entre dos veces la transformada promedio vertical.*
- 8) *Graficar la amplitud del espectro en el eje de las ordenadas y la frecuencia en el eje de las abscisas. Obteniendo el periodo del pico mayor de la unidad que se presente en la gráfica.*

X.-CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE ISOPERIODOS

Finalizadas las etapas medición y procesamiento de datos, se dispone de los valores de período fundamental de vibración del suelo para cada una de las estaciones de medición. Empleando los períodos obtenidos a partir del análisis espectral de los registros de vibración ambiental se desarrollaron dos mapas de períodos fundamentales del suelo en la zona de estudio a través del programa ArcView versión 3.2 y AutoCAD 2010.

Para la elaboración de los mapas se realizó el siguiente procedimiento.

1. *Obtención de coordenadas UTM de cada estación.*
2. *Tabla de datos con numero de estación, coordenadas X y Y en UTM, nombre de la estación y periodo, con extensión .txt para exportar a ArcView 3.2.*
3. *Conversión de tabla de datos a formato shape (.shp).*
4. *Creación de contornos de cada estación, por medio de la interpolación de los valores de periodos de la misma, por medio de la herramienta **Create Contours** del programa ArcView 3.2.*
5. *Conversión de plano de la ciudad con extensión .dwg a extensión. **Dxf***
6. *Elaboración de mapa de isoperiodos usando plano de la ciudad y curvas de isoperiodos.*
7. *Delimitación por colores de las zonas con valores altos de periodos por medio de la herramienta **Surface** del programa ArcView 3.2.*

En las figuras 10.1 y 10.2 se observan los mapas de isoperiodos, en la imagen 10.1 se observan las curvas de isoperiodos así como su valor en segundos, en la imagen 10.2 se aprecia el mismo mapa con la diferencia que las zonas con valores más altos de periodos aparecen de un color más oscuro. En ambos mapas las líneas de color azul representan la hidrografía de la ciudad de Uruapan.



10.1.-Mapas de Isoperiodos.

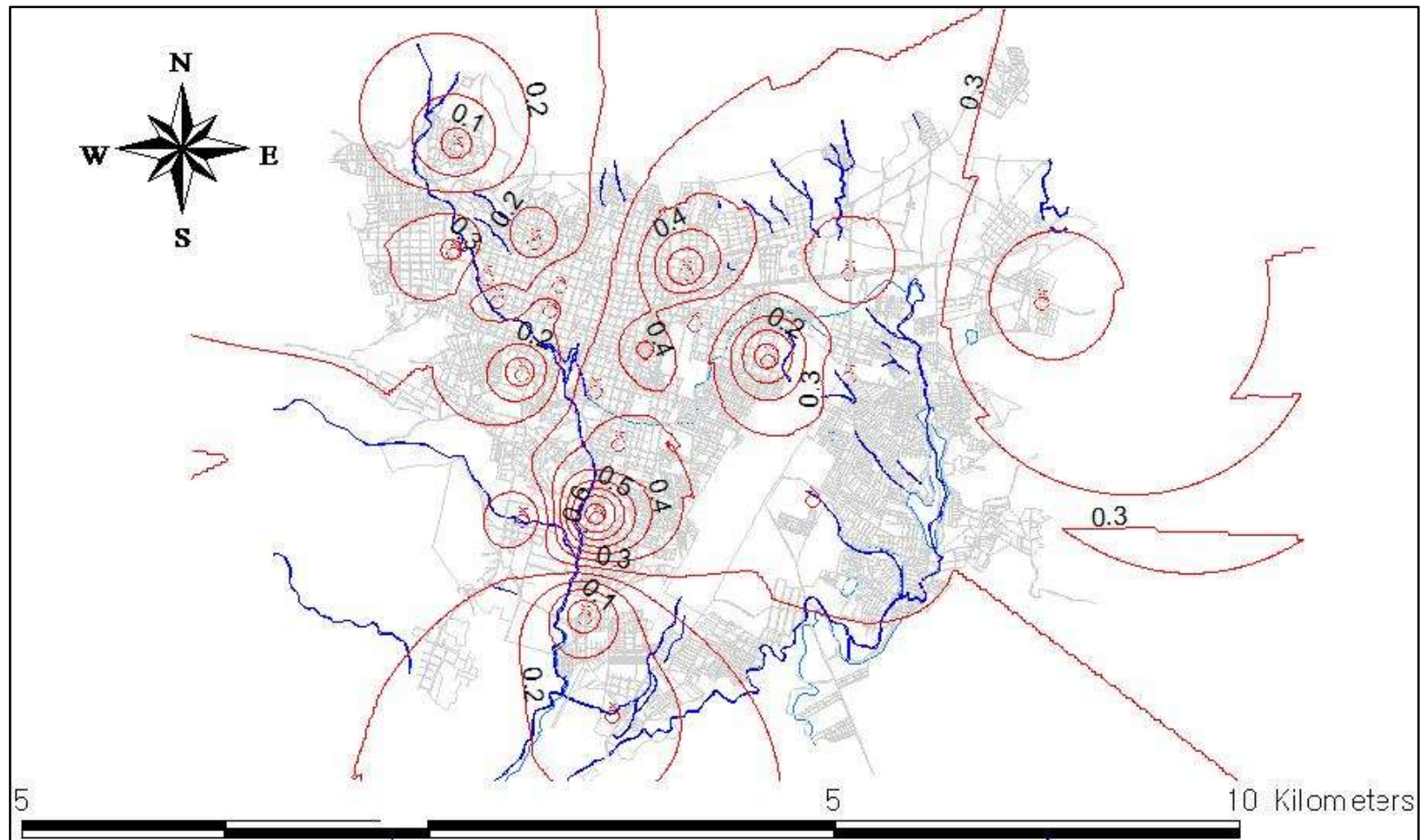


Figura 10.1.-Mapa de Isoperiodos de la Ciudad de Uruapan.

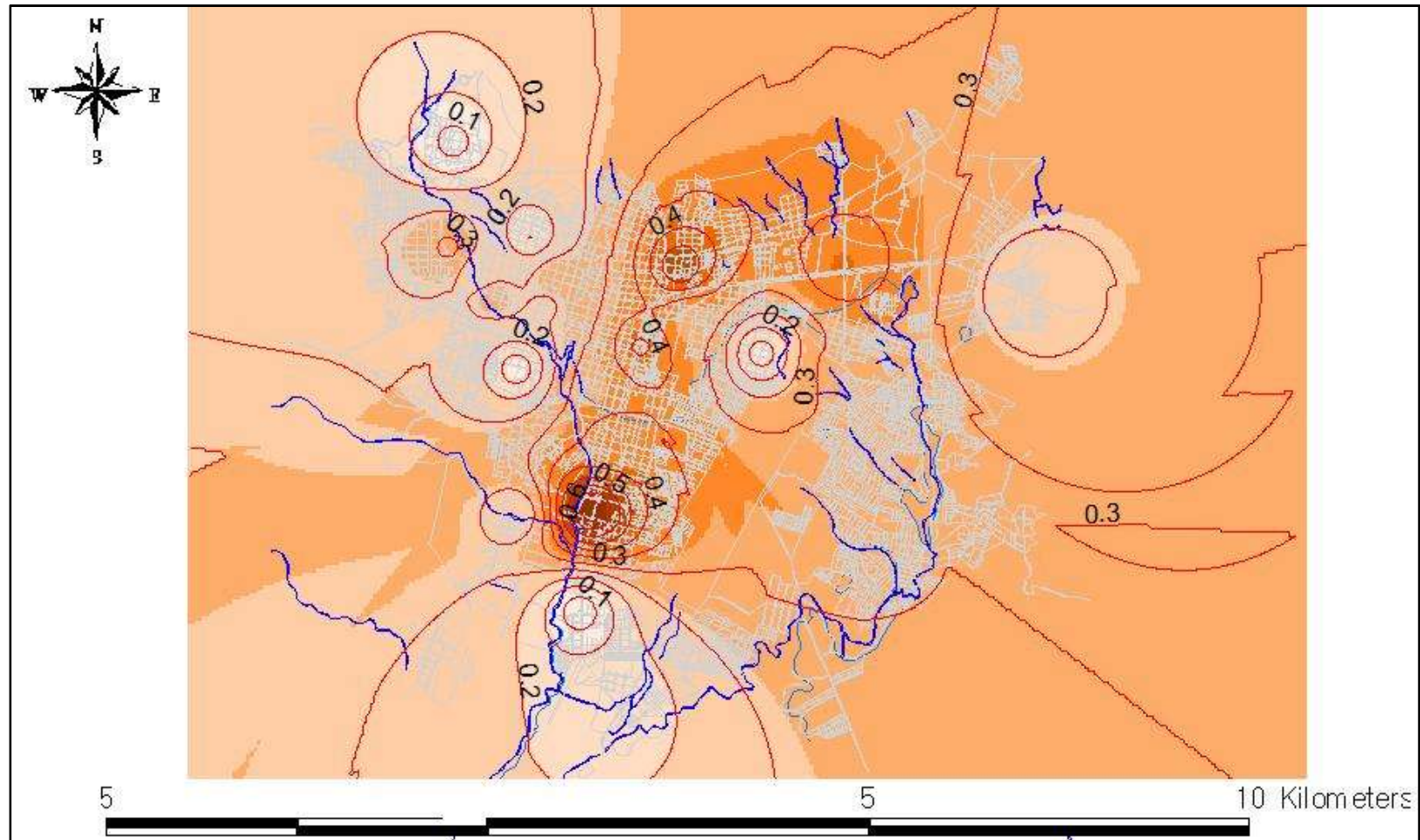


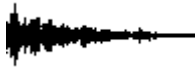
Figura 10.2.-Mapa de Isoperiodos zonificado de la Ciudad de Uruapan.

10.2.-Análisis de periodos fundamentales.

En la tabla 10.1 se observan los resultados obtenidos con el método Nakamura así como también la descripción de cada estación.

No. Medición	Coordenadas UTM		Clave Estación	Frecuencia Hz	Periodo Segundos (s)
	X	Y			
1	815029.511	2150217.22	DI003	4.67	0.21
2	812425.948	2150625.86	DJ002	2.59	0.39
3	810226.17	2150619.47	DK002	2.02	0.50
4	808189.621	2151029.23	DL001	6.7	0.15
5	807145.557	2152306.01	DM001	11.62	0.09
6	807085.15	2150883.83	DN002	3.22	0.31
7	807542.009	2150546.86	DO002	4.83	0.21
8	807680.79	2150240.74	DP001	3.59	0.28
9	808009.672	2149245.4	DQ001	8.34	0.12
10	808009.317	2147278	DR003	4.61	0.22
11	808861.614	2145951.59	DS002	13.08	0.08
12	809231.484	2144638.37	DT001	6.49	0.15
13	811937.486	2147558.05	DU003	3.12	0.32
14	812431.782	2149212.47	DV003	3.15	0.32
15	811324.511	2149451.94	DW001	7.78	0.13
16	810350.919	2149922.61	DX003	3.29	0.30
17	809682.429	2149539.65	DY002	2.45	0.41
18	809308.157	2148307.63	DZ001	2.71	0.37
19	809013.72	2147318.3	EA002	1.6	0.63
20	809010.106	2149016.38	EB002	3.22	0.31
21	808397.037	2150109.69	EC002	4.12	0.24
22	808524.789	2150455.43	ED002	3.49	0.29
23	811689.838	2150277.31	EE003	2.31	0.43
24	813567.689	2149763.5	EF001	9.2	0.11

Tabla 10.1.-Resultados de periodos.



El mayor porcentaje envuelve el rango de períodos correspondiente a los intervalos entre 0.01-0.20 s y 0.31-0.40 s con 25 % cada uno de ellos. El menor porcentaje está indicado en los períodos comprendidos entre 0.51-0.60 s y 0.61-0.70 s, que representan el 4% cada uno de ellos. En la imagen 10.2 se observa un histograma con estos porcentajes

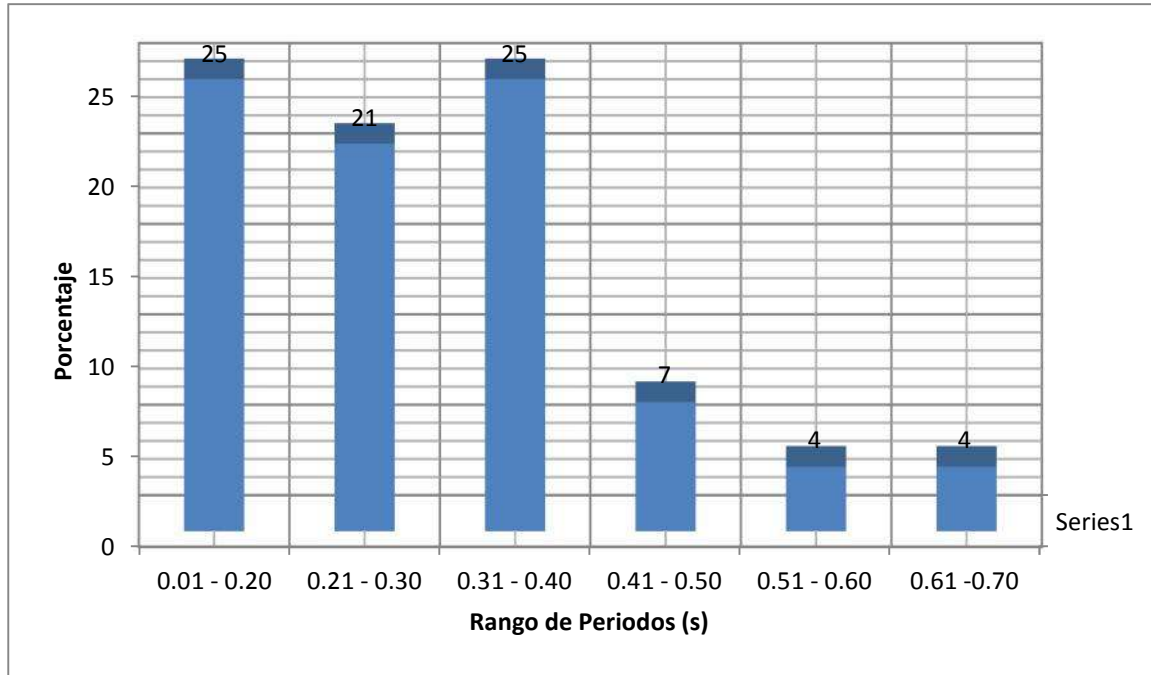


Tabla 10.3 Histograma con el porcentaje de distribución de períodos.

XI.-CONCLUSIONES.

Terminadas las etapas de adquisición, procesamiento, elaboración de mapas y análisis de resultados de vibración ambiental de la Ciudad de Uruapan, Michoacán se presentan las siguientes conclusiones:

- La técnica Nakamura (relación espectral H/V) representa una excelente opción en estudios de microzonificación sísmica, debido a sus bajos costos y fácil uso, tanto en la adquisición de los datos como en el procesamiento de los mismos, haciendo la relación H/V un método atractivo, que se ha difundido rápidamente por su practicidad.
- Fueron adquiridas 24 estaciones de vibración ambiental distribuidas a lo largo de la ciudad, permitiendo densificar el área de estudio.
- Los mayores períodos se concentran a lo largo de los márgenes del río Cupatitzio, dentro de los cuales, los mayores se encuentran en las colonias Tenencia de Jicalán, Emiliano Zapata, fraccionamiento Los Pinos, fraccionamiento la Loma y el fraccionamiento lomas del Valle.
- El rango de períodos en este caso, varía entre 0.1 s y 0.63 s.
- Los menores valores de período se localizan en los extremos laterales del área de estudio, resaltando las colonias fraccionamiento el Mirador, colonia David Franco Rodríguez en el lado oeste de la ciudad, y por el lado este los menores valores se concentran en las colonias que se ubican a la salida a Taretan, como las colonias Ampliación San Rafael Pemex, colonia Jardines de San Rafael y colonia Nuevo Paricutín.

En base a los resultados obtenidos en el presente estudio y a las conclusiones mencionadas, se recomienda:

- Integración de futuros estudios llevados a cabo en la ciudad y región ,de carácter geotécnico, geológico y sísmico , con el objeto de describir de una manera más detallada la característica y el comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad de Uruapan.

- La investigación de características locales que presenta el suelo debe ser la primera parte de cualquier evaluación de amenaza sísmica. Por lo tanto se recomienda hacer posteriores mediciones para garantizar la credibilidad de los resultados, para a su vez integrar estos resultados o parte de ellos como ayuda de diseño sísmico en el reglamento de construcción de la ciudad.

BIBLIOGRAFÍA

- ❖ Alfaro, A., Navarro, M., Sánchez, J (1999). *Microzonificación Sísmica de Barcelona utilizando el Método de Nakamura. Ventajas y Limitaciones*. Primer Congreso Nacional Ing. Sísmica. Murcia, España.
- ❖ Cuadra Monreal Elena (2007), *Aplicación de técnicas de vibraciones ambientales: análisis de microtemores y vibraciones naturales, para la caracterización de sitio*, Tesis de Licenciatura, Universidad Simón Bolívar. Sartenejas.
- ❖ Martínez Ruiz Guillermo (2000), “*Peligro Sísmico y espectros de diseño para la ciudad de Uruapan, Michoacán*”, Tesis para obtener el grado de Maestría en Ingeniería, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- ❖ Nakamura, Y. (1989). *A Method for Dynamics Characteristic Estimation of Surface Using Microtremors on the Ground Surface*. Quarterly Report of Railway Tech Res.
- ❖ Nakamura, Y. (2000). *Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Applications*. Proc. of the 12th World Congress on Earthquake Engineering, Auckland, Nueva Zelanda.
- ❖ Vázquez Rosas Ricardo, Aguirre González Jorge. *Propuesta de microzonificación sísmica de la ciudad de Zamora Michoacán*, Artículo III-02 VX CNIS México 2005.

GLOSARIO

Acciones sísmicas: Las acciones sísmicas son movimientos oscilatorios complejos de la corteza terrestre que pueden analizarse desde distintos puntos de vista según el objetivo del estudio, desde la naturaleza del mecanismo de generación o foco, las características del medio de transmisión de las ondas desde el foco hasta el punto de observación, de la distribución espacial y temporal de las componentes de desplazamientos, hasta aspectos estadísticos e históricos.

Acelerograma: registro de aceleración del suelo en un sitio dado en función del tiempo. La aceleración se registra generalmente en dos componentes horizontales perpendiculares entre sí, y una componente vertical.

Brecha sísmica: es una zona de falla o de un segmento de borde entre placas tectónicas, de conocida sismicidad histórica e instrumental, en la cual se registra un periodo de calma o de quietud sísmica en la cual se ha acumulado progresivamente grandes de energía elástica de deformación, y por consecuencia que presenta una mayor probabilidad de ruptura y ocurrencia de un evento sísmico.

Corteza terrestre: parte exterior del globo terrestre, rígida y constituida por rocas de constitución basáltica y granítica, incluyendo sedimentos asociados.

Distancia epicentral: distancia del punto de observación al epicentro.

Duración de un sismo: longitud en el sismograma, medida en segundos, en la cual se registran pulsos de amplitud significativa; por ejemplo en un acelerograma la longitud del registro en la cual las amplitudes son mayores a 0.05g. Tiempo durante el cual la sacudida del terreno causada por un sismo es percibida por las personas, el cual es siempre menor al registrado instrumentalmente.



Energía sísmica: parte de la energía elástica de deformación liberada durante el proceso de ruptura de la roca en una falla, que es irradiada en forma de ondas elásticas u ondas sísmicas; la mayor parte de la energía elástica acumulada es disipada en forma de calor.

Epicentro: punto sobre la superficie situado sobre el foco o hipocentro del sismo. La proyección vertical del foco sobre la superficie terrestre.

Escala de intensidad: escala empleada para designar la severidad de la sacudida del terreno producida por un sismo, asignándole, en forma subjetiva, grados de intensidad según como sea sentido el evento en el sitio y de acuerdo con los daños causados a las edificaciones. Una escala muy generalizada es la Mercalli Modificada.

Espectro de amplitudes de Fourier: gráfica que relaciona la magnitud de la amplitud compleja de una cierta intensidad actuante sobre un sistema estructural, contra la frecuencia circular natural del mismo.

Espectro de pseudoaceleraciones: gráfica que relaciona la pseudoaceleración máxima en un sitio, calculada como la envolvente de todos posibles eventos sísmicos que pueden presentarse durante un cierto intervalo de tiempo, contra el periodo de vibración de un sistema de un solo grado de libertad situado en dicho lugar. En dinámica estructural es producto de la frecuencia circular natural a cuadrado y el espectro de desplazamiento de un sistema de un grado de libertad.

Falla o falla geológica: zona de fractura en el material de la corteza terrestre a lo largo del cual dos bloques adyacentes han sufrido una dislocación o desplazamiento relativo paralelo a la falla; el plano de la falla puede ser vertical u oblicuo, y la dislocación total puede ser en centímetros o en metros.

Foco sísmico o hipocentro: punto de la falla donde se origina la ruptura y en él se genera el primer pulso de las ondas longitudinales P registrado en estaciones sismológicas. Se define mediante las coordenadas de latitud, longitud y profundidad focal.



Función de transferencia: función matemática resultante del cociente entre los Espectros de amplitudes de Fourier obtenidos en suelo blando (o de transición) y en terreno firme (o semi espacio) respectivamente.

Intensidad: es la violencia con que se siente un sismo en diversos puntos de la zona afectada. La medición se realiza observando los efectos o daños producidos por el temblor en las construcciones, objetos, terreno y el impacto que provoca en las personas. Su valor depende de la distancia del epicentro, tipo de construcción, calidad del suelo o roca de la localidad y del lugar que ocupan las personas (por ejemplo, en un piso en altura u a nivel del suelo, etc.) En la actualidad, para medir la intensidad, se emplea (desde el 9 de Julio de 1961) la Escala de Intensidades Modificada de Mercalli. Esta es una escala descriptiva de 12 grados. Los daños comienzan a partir del grado VI (seis).

Isosistas: líneas en un mapa que unen sitios que ha experimentado igual intensidad, o en su defecto, líneas que separan sitios de diferente grado de intensidad.

Magma: mezcla líquida, sólida y gaseosa de silicatos generada por fusión de rocas que se encuentran en el interior de la Tierra entre los 20 a 300 km de profundidad.

Magnitud: medida cuantitativa del tamaño de un sismo en su fuente, relacionada con la energía sísmica liberada durante el proceso de ruptura en la falla. Es un parámetro independiente del sitio de observación y se determina midiendo la amplitud máxima de las ondas en un sismograma. Las medidas más usuales son la magnitud Richter M o magnitud local ML, magnitud de ondas cuerpo mB, magnitud de ondas de superficie MS, y magnitud de momento MW.

Manto: capa del globo terrestre comprendida entre el núcleo y la corteza; está compuesto por rocas densas, no cristalinas, y tiene un espesor de aproximadamente 2900 kilómetros.

Núcleo: parte central de la Tierra que se inicia a 2900 km de profundidad; se supone constituido por hierro y níquel, en estado líquido en la parte exterior y sólida en la parte central.

Ondas de superficie o superficiales: ondas sísmicas que se propagan por la superficie de la Tierra; hay dos tipos de onda de superficie: **Ondas Love y Ondas Rayleigh o R**, la velocidad de propagación es mayor que la de las **ondas de superficie**.

Ondas de Cuerpo: ondas sísmicas que se propagan a través del interior de la Tierra; existen dos tipos de ondas de cuerpo; **Ondas P o longitudinales y ondas S**, su velocidad de propagación es mayor que la de las **ondas de superficie**.

Ondas de Love: son ondas superficiales que producen un movimiento horizontal de corte en superficie. Se denominan así en honor al matemático A.E.H. Love quien desarrolló un modelo matemático de estas ondas en 1911. La velocidad de las ondas Love es un 90% de la velocidad de las ondas S y es ligeramente superior a la velocidad de las ondas Rayleigh. Estas ondas solo se propagan por las superficies.

Las ondas P: (primarias o primae del verbo griego) son ondas longitudinales o compresionales, lo cual significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación. Estas ondas generalmente viajan a una velocidad 1.73 veces de las ondas S y pueden viajar a través de cualquier tipo de material líquido o sólido. Velocidades típicas son 1450m/s en el agua y cerca de 5000m/s en el granito.

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

Pangea: supercontinente universal, según la teoría de Placas, hace doscientos millones de años todos los continentes estuvieron unidos y formaron una sola masa continental.

Peligro sísmico: cuantificación de las acciones sísmicas o de los fenómenos físicos asociados con un sismo que pueden producir efectos adversos al hombre y sus actividades.

Parámetro que cuantifica la ocurrencia de futuros eventos sísmicos y sus actividades. Es expresado en términos de probabilidad de excedencia de determinado valor, por ejemplo la aceleración, en número de años dado.

Periodo de Vibración: intervalo de tiempo entre dos crestas sucesivas en una onda sinusoidal; intervalo entre amplitudes máximas de ondas sísmicas. El intervalo se mide en segundos y es el inverso de la **frecuencia de onda**.

Periodo de retorno: en un sitio dado, el tiempo promedio entre la ocurrencia de eventos o de movimiento del terreno de características dadas, por ejemplo aceleración máxima $A > 0.20g$; equivalente al intervalo de probabilidad de excedencia anual.

Placa tectónica: segmento relativamente grande y rígido de la litosfera, que incluye la corteza y la parte superior del manto, que se desplaza sobre la astenosfera, moviéndose en relación a las placas adyacentes. La superficie terrestre está dividida en unas 17 placas mayores.

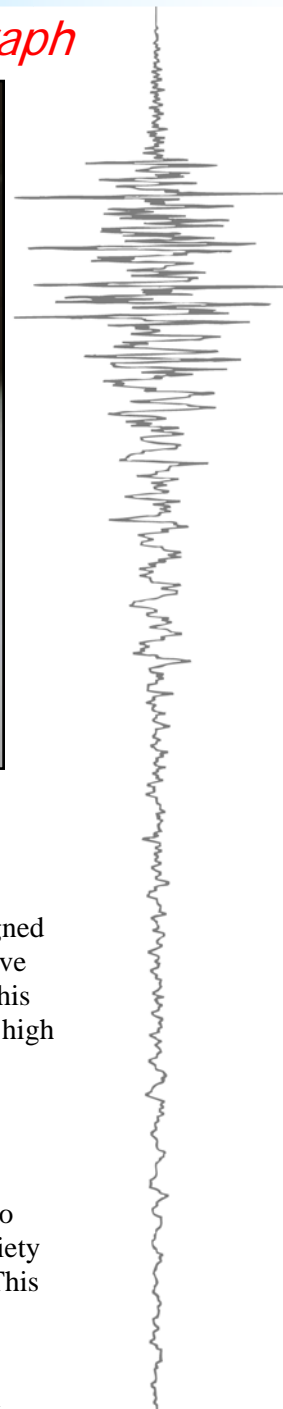
Riesgo sísmico: probabilidad de que en determinado sitio y durante un tiempo de exposición dado, las consecuencias económicas y sociales producidas por un evento sísmico excedan valores prefijados, por ejemplo víctimas, cuantía de daños, pérdidas económicas, etc.

Rigidez: propiedad física de un material; está dada por la razón de la carga aplicada y el desplazamiento producido por la misma.



ANEXO 1

Strong Motion Accelerograph



Strong Motion Accelerograph

KEY BENEFITS

- Dynamic range greater than 114 dB
- Modular design that allows multi-channel expansion to 6 or 12 channels
- Multi-tasking operating system that allows simultaneous data acquisition and interrogation
- Timing accuracy to ± 0.5 ms due to synchronized sampling with optional GPS timing system
- Zero Channel Skew through the utilization of individual A/D converters for each channel
- Remote alerting capability for system event or auto-diagnostic failure
- Remote data acquisition with real time digital data output
- Interconnectivity with other Altus Family recorders for common triggering and shared GPS (option)
- Common user interface, file format, and support tools with other Altus family recorders

INTRODUCTION

The **K2** is a full-featured strong motion accelerograph designed with the end user in mind. Technical advances and innovative engineering have increased performance and flexibility of this recorder to offer a dynamic range greater than 114 dB. The high dynamic range and superior resolution offer significant advantages for applications where signal fidelity and data integrity are vital.

In order to provide the greatest flexibility in data storage, retrieval and communications, Kinematics has included two fully compliant PCMCIA card slots that support a wide variety of nonproprietary memory cards, hard disks and modems. This allows users to easily configure the **K2** for their specific applications.

Developed for Microsoft Windows™, our QuickTalk® and QuickLook® software provide a user-friendly environment, making system setup, communications and rapid data analysis quick and easy.

MAJOR APPLICATIONS

- Structural monitoring arrays
- Dense arrays, two and three dimensional
- Aftershock study arrays
- Local, regional and national seismic networks and arrays

Input Channels

Sensor channels: Up to 12 channels
Input level: Standard $\pm 2.5V$

Data Acquisition

Type: Over-sampled Delta Sigma system with 24-bit DSP
Anti-alias filter: Brickwall FIR filter. Cut-off at 80 % of output Nyquist; 120 dB down at output Nyquist
Dynamic range: ~114 dB (200 sps 0-50Hz BW RMS noise/RMS clip)
Frequency response: DC to 80 Hz @ 200 sps
Sampling rates: 20, 40, 50, 100, 200, 250 sps
Chan.-chan. skew: None – simultaneous sampling of all channels
Acquisition modes: Continuous, trigger
Output data format: 24 bit signed (3 bytes)
Parameter calculations: Calculations of key parameters in real-time
Real time digital output: RS-232 output of digital stream (contact factory for available formats)

Trigger

Type: IIR bandpass filter (three types available)
Trigger selection: Independently selected for each channel
Threshold trigger: Selectable from 0.01% to 100% of full scale
Trigger voting: Internal, external trigger votes with arithmetic combination
Additional trigger: STA/LTA

Storage

Type: Fully compliant PCMCIA storage system (two slots)
Compatibility: PCMCIA standard 2.1; sockets accept Type I, II, III card formats Type I or II modem
Storage primary slot: 32 MB Memory Card (minimum) Optional larger cards available.
Storage 2nd slot: Same as primary slot
Parallel 2nd slot: Accepts Type I or II modem with connectors
Recording capacity: Approximately 42 kB per channel per minute on Memory Card, of 24-bit data @ 200sps.
Recording format: Data is stored in DOS file system allowing cards to be read directly by PC.

Firmware

Type: Multi-tasking operating system supports simultaneous acquisition and interrogation; boot loader allows remote firmware upgrades
System control: Configure sample rate, filter type, trigger type and voting, maintains communications and event storage
User interface: Packetized protocol and simple terminal loop control and data retrieval via RS-232 interface
Intelligent alerting: System can be configured to initiate communications when an event is detected or if an auto-diagnostic failure occurs
Auto-diagnostics: System can be configured to continuously check system voltages, temperature, RAM and code integrity, timing system integrity
Rapid setup: Unit can be configured from parameter file stored in PCMCIA memory card

Timing

Type: Free running disciplined oscillator (standard); GPS
GPS option: Integrates completely with system, providing timing, internal oscillator correction and position information
Shared GPS: Allows a group of interconnected Altus recorders to share one GPS module (option)
Timing accuracy: 5 microseconds of UTC with GPS
Power: Power cycling is software controlled
Power consumption: 110 mA at 12V (active)

I/O and Display

Display: Matrix of 8 LEDs. Display indicates acquisition mode, event, recording, battery voltage, memory capacity used
Power input: Mil-style connector for 24 Vdc charge input, external battery, standby power

RS-232 input: Full RS-232C interface with modem control
Aux. input: Mil-style connector for 4th channel input, IRIG out, IRIG in, clock sync., 1 pps out, trigger in, trigger out, alarm out, real time digital output (tx & rx), ext 12V out. Interface for interconnection of multiple units
EMI/RFI protection: All I/O lines are protected from both EMI/RFI emission and susceptibility problems by ferrite filters and transient suppressors

Power Supply

Type: High efficiency switched power supply and charger system
Input: Nominal 24 Vdc from charger
Operating range: 10.5V to 15V
Ext. charger voltage: 100-250 Vac 50/60 Hz
Charging voltages: Temperature compensated for lead acid gel cell, 2 outputs with separate protection circuitry allows unit to recharge flat battery and work with reversed or damaged battery in multi battery system
Fuses: Four 2 amp fuses for charger and batteries
Batteries: Internal battery 12V 12 Ah (standard); external battery (opt)
Current drain: 390 mA @ 12V (standard configuration)
Power autonomy: >36 hours with internal battery

Housing

Type: Lexan structural foam housing internally coated with EMI/RFI shielding material, 5/16" aluminum base support for mounting
Mounting: Single hole for 1/4" stud
Size: 10.1" (256 mm) W x 15.0" (381 mm) L x 7" (178 mm) H
Weight: 10.9 kg (24 lbs) including battery

Communications

RS-232 interface: Parameter setup, real-time telemetry and event retrieval.
PCMCIA modem: Remote access, initiated by user or by the K2. Optional
Ethernet interface: Connect the K2 directly to your IP based Wide Area Network (WAN). Optional
FTP via Modem: FTP transmission of events via dial-up ISP. Optional

Support Software

QuickTalk^{®*}: Windows-based control and data retrieval program for easy setup and data retrieval by direct connection or modem.
QuickLook^{®*}: Windows-based data retrieval program for rapid review of waveforms and event information. Also operates with DOS communication software
Antelope: Comprehensive commercial network operational and mgmt system for medium and large networks
Earthworm: Comprehensive public domain network operational and management system for medium and large networks
NMS: Commercial PC-based network management system for small to medium sized networks via modem or real-time data
SMARTS: Commercial open architecture user-extensible real-time data collection and processing software that runs on a variety of computers
PSD: Commercial Pseudo Spectral Density software for earthquake data analysis
SMA: Commercial Strong Motion Analyst software for earthquake data analysis and processing
K2COSMOS^{*}: Conversion software from Altus EVT file format to COSMOS v1.20 format
Format
Converters^{*}: Provides option to convert and store data in ASCII and other formats. Contact Kinometrics for other options.

*No charge

Environment

Operating temp.: -20° to 70°C
Humidity: 0-100% RH