

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES
CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**ESQUEMA DE TRABAJO PARA LA MICROZONIFICACIÓN
SÍSMICA EN LA CIUDAD DE HOLGUÍN**

Autor: Rafael Daniel Oro Tejeda

Holguín 2022



**FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES
CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**ESQUEMA DE TRABAJO PARA LA MICROZONIFICACIÓN
SÍSMICA EN LA CIUDAD DE HOLGUÍN**

Autor: Rafael Daniel Oro Tejeda

Tutora: MSc. Elizabeth Rivas Freeman. Profesor Auxiliar

Holguín 2022



PENSAMIENTO

“Los terremotos son inspectores de la honestidad arquitectónica”

Juan Villoro.

ESQUEMA DE TRABAJO PARA LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA EN LA CIUDAD DE
HOLGUÍN



DEDICATORIA

Esta investigación va dedicada a mi familia que, con su sacrificio, amor y apoyo ha sabido darme la fortaleza necesaria para superar cualquier obstáculo.

ESQUEMA DE TRABAJO PARA LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA EN LA CIUDAD DE
HOLGUÍN



AGRADECIMIENTOS

A mi familia y amistades, por el optimismo, el ánimo, la perseverancia y apoyo constante. A mi tutora Elizabeth, por hacer un espacio en su limitado tiempo y brindarme su asesoría, por compartir sus conocimientos y experiencia en el desarrollo de este trabajo. Al colectivo de profesores de la carrera de Ingeniería Civil, por contribuir con sus conocimientos en mi formación profesional. A los que de una u otra forma hicieron posible la realización de este trabajo. A todos, GRACIAS.



RESUMEN

Los estudios de riesgo por sismo son una necesidad incondicional, ya que, constituyen un serio inconveniente para el desarrollo humano. En el estudio de peligro, que es parte del riesgo, se obtiene la estimación de los efectos a esperar en la zona mediante datos de perfil ingeniero-geológico a nivel regional, y no contemplan otros factores locales que pueden aumentar el mismo y que deben tenerse en cuenta. Para ello es fundamental el estudio de las características del lugar, tanto geofísicas como socio-económicas; el peligro sísmico; desarrollar métodos efectivos para evaluar el efecto de sitio según las particularidades de la zona de estudio. Esto es importante a la hora de realizar el diseño de nuevas edificaciones, ya que pueden ocurrir amplificaciones concretas de la magnitud del fenómeno debidas a las condiciones del lugar. El objetivo de esta investigación es elaborar un esquema de trabajo que permita realizar la microzonificación sísmica que se adecue a las peculiaridades de la ciudad de Holguín. Se utilizan para el desarrollo del trabajo diversos métodos entre los que se desatacan: análisis y síntesis, inducción-deducción, abstracción y concreción, hipotético-deductivo y el histórico-lógico. Se realiza un estudio de los principales aspectos inherentes al riesgo sísmico y de las características geofísicas y socio-económicas de la ciudad. Se exponen los diferentes métodos que existen en Cuba y el mundo para la realización de la microzonificación sísmica y en base a ello se elabora un esquema de trabajo para la microzonificación sísmica en la ciudad de Holguín.

ESQUEMA DE TRABAJO PARA LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA EN LA CIUDAD DE
HOLGUÍN



ABSTRACT

Earthquake risk studies are an unconditional necessity, since they constitute a serious inconvenience for human development. In the hazard study, which is part of the risk, the estimation of the effects to be expected in the area is obtained through engineering-geological profile data at the regional level, and they do not contemplate other local factors that may increase it and must be taken account. For this, the study of the characteristics of the place, both geophysical and socio-economic, is essential; seismic hazard; develop effective methods to evaluate the site effect according to the particularities of the study area. This is important when designing new buildings, since specific amplifications of the magnitude of the phenomenon may occur due to local conditions. The objective of this research is to elaborate a work scheme that allows to carry out the seismic microzoning that is adapted to the peculiarities of the city of Holguín. Various methods are used for the development of the work, among which the following stand out: analysis and synthesis, induction-deduction, abstraction and concretion, hypothetical-deductive and historical-logical. A study of the main aspects inherent to seismic risk and the geophysical and socio-economic characteristics of the city is carried out. The different methods that exist in Cuba and the world for carrying out seismic microzoning are exposed and based on this, a work scheme for seismic microzoning in the city of Holguín is elaborated.

ESQUEMA DE TRABAJO PARA LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA EN LA CIUDAD DE
HOLGUÍN



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO REFERENTE A LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA.	7
1.1 Bases conceptuales sobre sismicidad y riesgo sísmico.	7
1.1.1 Conceptos sobre sismicidad	7
1.1.2 Conceptualización sobre riesgo sísmico.....	10
1.2 Microzonificación sísmica	12
1.3 Métodos para realizar la microzonificación sísmica aplicados a Cuba y al mundo.....	12
1.3.1 Métodos sísmicos activos.....	13
1.3.2 Métodos sísmicos pasivos	20
1.3.3 Métodos híbridos	23
CAPÍTULO 2: ESQUEMA DE TRABAJO PARA LA MICROZONIFICACIÓN DE LA CIUDAD DE HOLGUÍN.....	28
2.1 Caracterización geofísica y socioeconómica de la ciudad de Holguín.....	28
2.2 Concepciones para el desarrollo de un esquema de trabajo para la microzonificación sísmica	30
2.3 Esquema de trabajo para la microzonificación sísmica.....	36
2.3 Validación de las concepciones respecto al esquema de trabajo que se elabora.....	47
RECOMENDACIONES	50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
ANEXOS	62

ESQUEMA DE TRABAJO PARA LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA EN LA CIUDAD DE
HOLGUÍN



INTRODUCCIÓN

Los estudios de riesgo por sismo son una necesidad incondicional. Las pérdidas humanas unidas al costo económico y ecológico asociado a estos desastres constituyen un serio inconveniente para el desarrollo humano. Estos eventos catastróficos tienen un mayor impacto en los países pobres o en vía de desarrollo; donde los costos en término de medios de subsistencia, de vidas humanas y de recuperación de las infraestructuras son más elevados. Este riesgo sísmico tiene dos componentes principales: la vulnerabilidad sísmica y la peligrosidad sísmica. La vulnerabilidad sísmica hace referencia al impacto de la acción sísmica sobre la población, edificios, servicios, instalaciones. La peligrosidad sísmica se refiere a la probabilidad de que una determinada acción sísmica se produzca sobre un punto del territorio con una cierta extensión, intensidad y duración (García, 2007).

Ya que es impredecible la ocurrencia de un sismo, la única manera de aminorar los efectos de los terremotos es incidir fuertemente en la prevención, tanto en la construcción antisísmica de los edificios e infraestructuras, en la planificación del territorio como en el diseño y, por un lado, en la gestión de la emergencia inmediatamente después de la ocurrencia del terremoto por otro (Macau, 2008).

Se deben considerar en conjunto la peligrosidad sísmica local y la peligrosidad sísmica regional para calcular la peligrosidad sísmica en un punto del territorio. El cálculo de la peligrosidad regional se basa en la contribución de toda la sismicidad regional diferentes valores de movimiento del suelo asociados a distintos niveles de probabilidad si se considera un escenario probabilista, o en la estimación del movimiento del suelo producido por el mayor sismo representativo de la sismicidad de una región si se considera un escenario determinista. La peligrosidad local considera los efectos inducidos por los sismos como los deslizamientos o la licuefacción, los efectos de suelo, o los efectos topográficos. Además, considera los cambios que se producen en el suelo por la acción del hombre. La importancia de la vibración del



movimiento del suelo esperable en un lugar dado debido a la acción sísmica, es obtenida gracias a los estudios de peligrosidad sísmica (Macau, 2008).

En Cuba, en el período entre la década de los años 70 y hasta mediados de los años 90, el conocimiento y percepción del riesgo sísmico estuvo estrechamente relacionado con el conocimiento del peligro sísmico. Los primeros intentos de evaluar el peligro sísmico del territorio cubano, fueron los mapas de intensidades por datos elaborados por Alvarez (1970), Chuy (1980) y Chuy (1983), como resultado, en estos estudios se muestran únicamente las sacudidas máximas observadas para un período de retorno dado, careciendo de las fuentes sísmicas, la atenuación de las intensidades y un análisis preciso de la sismicidad. Posteriormente con el objetivo de determinar la localización y potencialidad de las fuentes generadoras, la distribución temporal y espacial de los terremotos que las mismas producen y sus efectos, se realizaron estimados cuantitativos de la peligrosidad sísmica para regiones más o menos extensas en el país, llevado a cabo con un seguimiento probabilístico, Álvarez y Bune (1985), Rubio (1985), Álvarez (1991), Chuy y Álvarez (1995), Rodríguez (1997) y Despaigne (2002).

En Cuba, los primeros estudios basados en las consecuencias provocadas por un gran sismo, tuvieron un carácter puntual y trataban de pronosticar la probabilidad de ocurrencia de sacudidas de un valor dado a partir de la construcción de un escenario particular. A lo extenso de las décadas, se ha adquirido una gran experiencia que se concentra, principalmente en la realización de la microzonificación sísmica de las áreas urbanas. Esta metodología se considera como adecuada para utilizarse en la reducción del riesgo sísmico en ciudades. Su objetivo es evaluar los niveles de amenaza sísmica, la clasificación de las propiedades del suelo local, la amenaza geológica, el análisis de la respuesta dinámica de los depósitos y los efectos de interacción suelo-estructural. También analiza las vulnerabilidades presentes, especialmente en aquellas de las estructuras de las edificaciones existentes, aquellas



de usos vitales como hospitales, escuelas, dependencias gubernamentales y cuerpo de bomberos (Alonso, 1992).

En Cuba no existe el mismo nivel de potencialidad sísmica en todas sus partes, esto se debe a la presencia de la actividad intraplacas y entreplacas. La sismicidad de entreplacas es propia de la región suroriental, que se destaca por la gran frecuencia con que ocurren terremotos. La sismicidad de intraplacas es características del resto del país donde los eventos sísmicos se generan con menos frecuencia y poseen menor energía en comparación con los de entreplacas. Por estas razones ninguna parte del territorio nacional que excluida de la probable ocurrencia de este tipo de eventos (García, 2007).

En la provincia de Holguín se desarrolla un estudio llamado “Estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgo por sismo” (EPVRS) desde el 2010, estos estudios se realizan solo para ciudades, el municipio Holguín presenta una alta concentración de población, infraestructura social e industrial y presenta un alto impacto en la economía de la provincia y el país; estas razones justifican la realización del EPVRS u otros estudios, con el objetivo de precisar cuantitativa y cualitativamente el riesgo que existe en la ciudad de ser afectada por este tipo de fenómeno natural (CENAI, 2019).

Estos estudios de microzonificación no ha sido necesario aplicarlos a la ciudad de Holguín dado a su bajo nivel de sismicidad; pero en varios lugares de la ciudad se ha sentido temblores por lo que es necesario definir un esquema de trabajo para la microzonificación que se adecue a estas condiciones de baja sismicidad.

Sobre la base de estos criterios, se formula como **problema de investigación**: Qué esquema de trabajo se debe de seguir para realizar la microzonificación sísmica en la ciudad de Holguín, según las características de la misma, para lograr una mejor gestión del riesgo sísmico.

Se establece como **objeto de investigación**: riesgo sísmico



A partir de esta situación se propone como **objetivo general** de esta tesis de investigación: Elaborar un esquema de trabajo que permita realizar la microzonificación sísmica que se adecue a las peculiaridades de la ciudad de Holguín. Se enmarca en el **campo de acción** será la microzonificación sísmica en la ciudad de Holguín.

Para cumplir el objetivo general y solucionar el problema de investigación se propone la siguiente **hipótesis**: si se realiza un análisis de las metodologías de microzonificación y las características sismológicas, geológicas y socioeconómicas de la ciudad de Holguín, se podrá elaborar un esquema de trabajo adecuado para realizar la microzonificación sísmica de la misma, y de esta forma lograr una mejor gestión del riesgo sísmico.

Objetivos específicos:

1. Analizar el marco teórico metodológico referente a la microzonificación sísmica.
2. Elaborar un esquema de trabajo para la microzonificación de la ciudad de Holguín.
3. Valorar la pertinencia del esquema de trabajo propuesto partir de la consulta a especialistas.

La constatación de la hipótesis, el cumplimiento de los objetivos de la investigación y la solución del problema se concretan a partir de los siguientes sistemas de **métodos de investigación**:

Métodos teóricos:

- Método análisis y síntesis: mediante este método se realiza un análisis de vulnerabilidad y peligrosidad sísmica de la ciudad de Holguín, lo que permite determinar un cierto riesgo sísmico. Con este análisis, se realiza una delimitación geográfica donde quede registrada las áreas donde hay más o menos peligro sísmico.
- Método inducción-deducción: mediante el análisis de las diversas técnicas de prospección, se puede establecer un eje común en las distintas investigaciones y a través de este razonamiento llegar a una vía de resolución de la problemática.



- Método de abstracción y concreción: mediante este método se analizan los aspectos primarios y secundarios del fenómeno que se estudia, en este caso, el riesgo sísmico en la ciudad de Holguín, y se revelan los aspectos que son fundamentales para llevar a cabo el objetivo de la investigación.
- Método hipotético-deductivo: permite elaborar la hipótesis de la investigación y mediante el desarrollo del trabajo, donde se deduce el camino a seguir según los resultados que se alcanzan, se llegan a las conclusiones y a la verificación de las predicciones que se realizan.
- Método histórico-lógico: mediante este método se investiga la trayectoria histórica y el estado actual de los estudios de riesgo sísmico, y se destacan solo los aspectos más importantes de las técnicas inherentes a este tipo de análisis.

Aporte de la investigación: se elabora un esquema de trabajo para realizar la microzonificación sísmica, y se ubican los datos que se obtienen en la ciudad de Holguín, en mapas que ayude a la toma de decisiones para la realización de futuras construcciones.

Novedad científica de la investigación: se realiza un esquema de trabajo para la microzonificación sísmica aplicada específicamente en la ciudad de Holguín con las características especiales de la zona de estudio.

Actualidad del tema de la investigación: la investigación sigue la línea del Departamento de Construcciones que, a su vez, forma parte de la línea de investigación de la Universidad de Holguín “Innovación para el desarrollo sostenible”. Tributa al proyecto de investigación “Gestión del riesgo sísmico en edificaciones y puentes de la Provincia de Holguín” (código: PS211SC001), el cual pertenece al Programa Nacional “Desarrollo de Investigaciones Sismológicas Aplicadas en la República de Cuba (DISA)”. La investigación que se lleva a cabo es fundamental para el progreso, desde el punto de vista científico, de la gestión del riesgo sísmico en la ciudad de Holguín. Además, vincula a la Universidad como centro de altos estudios en



el desarrollo de los problemas actuales del país. Por lo tanto, este trabajo está acorde al Modelo de Desarrollo Económico y Social del Partido y la Revolución.

Estructura de la tesis:

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1. Se abordan los conceptos fundamentales y la situación del estado del arte de los métodos de microzonificación sísmica, donde se muestran los conceptos, las principales investigaciones al respecto en Cuba y el mundo, además de una caracterización socio-económica y espacial de la ciudad de Holguín.

CAPÍTULO 2. Se elabora un esquema de trabajo para realizar la microzonificación sísmica en la ciudad de Holguín y se valida su pertinencia por criterio de expertos.

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS



CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO REFERENTE A LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA.

En el presente capítulo se expone una amplia fundamentación sobre las bases conceptuales del riesgo sísmico, además de un estudio de los distintos métodos de microzonificación sísmica usada en Cuba y el mundo. Para concluir el capítulo se analiza las características geofísicas y socioeconómicas de la ciudad de Holguín.

1.1 Bases conceptuales sobre sismicidad y riesgo sísmico.

1.1.1 Conceptos sobre sismicidad

La sismicidad es la capacidad que tiene una zona determinada de experimentar sismos. El hecho es relevante en lo que se respecta a la actividad humana, circunstancia que redundará en algunas precauciones si la misma fuese demasiado elevada. Esta se relaciona estrechamente con el choque de placas tectónicas y es por ello que las zonas montañosas o adyacentes suelen experimentar esta condición de modo supino (Gonzalo, 2014).

Un sismo es un temblor o una sacudida de la tierra por causas internas. El término es sinónimo de terremoto o seísmo. Los sismos se producen debido al movimiento de las placas interiores de la tierra, llamadas capas tectónicas (Significados.com). Las principales causas de los sismos es la deformación de las rocas contiguas a una falla activa, que liberan su energía potencial acumulada y producen grandes temblores. Los procesos volcánicos, los movimientos de laderas y el hundimiento de cavidades cársticas también pueden generar sismos. No obstante, los expertos en la materia también tienen claro que un sismo se puede producir como consecuencia de una serie de importantes cambios en lo que es el régimen fluvial de una zona o bien de los que se producen en lo referente a las presiones atmosféricas.

Efecto de sitio

El efecto de sitio, lo describen muchos autores como la respuesta que tiene un lugar ante un evento sísmico, influenciado por las condiciones geológicas y topográficas locales y en gran medida de la primera decena de metros del subsuelo. Este fenómeno



fue reconocido desde principios de la sismología y documentado por los japoneses en el siglo XVIII. Los efectos de sitio, son el resultado del movimiento del terreno debido a la incidencia de ondas sísmicas en un punto dado, el cual depende naturalmente de los parámetros asociados a la fuente sísmica que las originó y de la atenuación de la energía sísmica conforme se propaga desde la fuente de sitio (Chaves, 2014). Si el área de estudio está constituida por materiales sueltos o blandos, el movimiento sísmico se verá afectado en amplificación. De esta manera entendemos que los efectos de sitio son la consecuencia de las modificaciones que sufren las ondas sísmicas por la presencia de depósitos blandos, es decir los materiales que componen el suelo y que no está consolidado.

Según Pérez, (2015) las ondas sísmicas se definen como perturbaciones elásticas que se desplazan a través de los estratos transportando energía con características de propagación dependientes del terreno que atraviesan. La energía liberada de forma natural o artificial en un punto próximo a la superficie del terreno se propaga como ondas internas de volumen (P, S), como ondas superficiales (L, Rg).

- **Ondas de volumen:**

Ondas P: Este tipo de onda es conocida como onda primaria, ya que son las que se registran en primer lugar. Estas ondas son de tipo longitudinal, y someten a las partículas del terreno a deformaciones de compresión-dilatación en el sentido de la dirección de propagación de las ondas, estas se transmiten a través de cualquier tipo de medio material.

Ondas S: Estas ondas son conocidas como ondas secundarias, transversales o de cizalla. Se registran a continuación de las ondas P debido a una menor velocidad de propagación. Las ondas S sometidas al terreno a una deformación a cizalladura, donde las partículas del medio sufrirán desplazamientos perpendiculares a la dirección de propagación de las ondas. Este tipo de ondas no modifica el volumen ni se propagan a través de fluidos o gases.



Las **ondas superficiales** viajan a una velocidad menor que las ondas volumétricas presentando en general una amplitud mayor, por lo que suelen causar mayores daños a las estructuras. Las ondas superficiales se comportan como ondas dispersivas, variando la forma de su onda, debido a la variación de las frecuencias contenidas al viajar por medio de diferentes velocidades.

Ondas Love, (L): se le otorga este nombre debido al matemático neozelandés A. E. Hough Love, quién en el año 1911 desarrolló un modelo de propagación para este tipo de ondas. Estas ondas producen un movimiento horizontal de corte o de cizalla al propagarse por el medio. Su velocidad de propagación es del orden de un 90% de la velocidad de las ondas S.

Ondas Rayleigh, Rg: es nombrada así en honor al físico británico John Rayleigh, el cual predijo en 1885 la presencia de ondas superficiales descifrando matemáticamente el movimiento de ondas planas en un espacio semi-infinito elástico (Rayleigh, 1885). Estas ondas producen en el medio un movimiento elíptico en sentido contrario a la propagación.

Origen de las ondas sísmicas

- **Origen externo:** destaca el ruido ambiental (Kanai, 1957), el cual es una vibración del terreno de pequeña amplitud, del orden de varios micrómetros, producidos por fenómenos naturales, como: olas marinas, frentes atmosféricos, cambios de presión, tormentas; y superficiales como: maquinarias pesadas, tráfico de vehículos, paso de peatones, vibraciones de las estructuras civiles e industriales.
- **Origen interno:** estas fuentes sísmicas se originan explícitamente en el interior de la tierra. Las más importantes son las fallas activas debido a que representa la causa principal de la mayoría de los sismos. A este grupo también pertenecen las explotaciones profundas, y la actividad sísmica inducida debido a variaciones importantes en el flujo hidrológico y a labores mineras subterráneas.
- **Otro tipo de origen:** erupciones volcánicas, los deslizamientos de taludes, grandes avalanchas de nieve.



1.1.2 Conceptualización sobre riesgo sísmico

Sandoval y Vera (2013), definen como el daño potencial que, sobre la población y sus bienes, las infraestructuras, el ambiente y la economía pública y privada, pueda causarse por la ocurrencia de un evento sísmico. Los factores que contemplan el estudio del riesgo sísmico es la peligrosidad y vulnerabilidad sísmica.

Es imposible predecir la ocurrencia de un sismo, por lo que la única manera para mitigar los efectos de los terremotos es incidir fuertemente en la prevención, tanto en la planificación del territorio como en el diseño y en la construcción antisísmica de los edificios e infraestructuras, por un lado, y en la gestión de la emergencia inmediatamente después de la ocurrencia del terremoto por otro. Por tanto, los estudios de riesgo sísmico tienen un carácter preventivo y contribuyen al conocimiento de que permite tanto la elaboración de Normas de construcción y de planificación del territorio como a mitigar el riesgo con el establecimiento de planes de emergencia que permitan una gestión eficiente de la emergencia sísmica en caso de producirse un sismo (Macau, 2008).

Vulnerabilidad sísmica.

Para Sandoval y Vera (2013), la vulnerabilidad sísmica de una estructura es la capacidad de sus elementos estructurales para resistir un terremoto. El que una estructura sea más o menos vulnerable ante un terremoto de determinadas características, es una propiedad intrínseca de cada estructura, es decir, es independiente de la peligrosidad sísmica del sitio de emplazamiento, por lo tanto, una estructura puede ser vulnerable pero no estar en riesgo, a menos que se encuentre en un sitio con una cierta peligrosidad sísmica.

Los aspectos que usualmente inciden en la vulnerabilidad sísmica son:

- El grado de exposición a un tipo de peligro, aspecto en que la localización de bienes y personas es un factor relevante.
- El nivel de información disponible respecto a los peligros y amenazas.
- Las características del diseño de las viviendas y otras construcciones.



- El nivel de organización de las comunidades expuestas a peligros.
- La voluntad política de quienes toman las decisiones para incorporar medidas de prevención y mitigación.
- La capacidad de las instituciones de emergencia para actuar frente a estas situaciones

Peligrosidad sísmica.

“La peligrosidad sísmica es la probabilidad de que se produzca un sismo potencialmente destructivo en un determinado lugar y tiempo, como pueden ser el movimiento mismo del terreno, así como la licuefacción, los deslizamientos de la tierra, inundaciones, ruptura de fallas”. (Sandoval, V y Vera, M. 2013).

Para calcular la peligrosidad sísmica en un punto del territorio se deben considerar conjuntamente la peligrosidad sísmica regional y la peligrosidad sísmica local. El cálculo de la peligrosidad regional se basa en la estimación del movimiento del suelo producido por el mayor sismo representativo de la sismicidad de una región si se considera un escenario determinista, o en la contribución de toda la sismicidad regional a diferentes valores del movimiento del suelo asociados a distintos niveles de probabilidad si se considera un escenario probabilista. En ambos casos los valores del movimiento del suelo obtenidos se refieren a un suelo de tipo medio.

La peligrosidad local considera los efectos de suelo, los efectos topográficos, o los efectos inducidos por los sismos como son los deslizamientos o la licuefacción. Para calcular la contribución de los efectos de suelo en la peligrosidad sísmica a escala local en las regiones con sismicidad media y baja se recurre a métodos experimentales y a métodos de simulación numérica. Los estudios de peligrosidad sísmica, informan pues de la importancia de la vibración del movimiento del suelo esperable en un lugar dado debido a la acción sísmica. Combinado este conocimiento con la evaluación de la vulnerabilidad sísmica, se puede evaluar el riesgo sísmico (Macau, A. 2008).



1.2 Microzonificación sísmica

La microzonificación sísmica es una información detallada, y consiste en la delimitación, dentro de un territorio, de microzonas geográficas donde se pronostican diferentes respuestas ante la ocurrencia de un sismo fuerte, producto de contrastes laterales y en profundidad de las características geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas locales y su transcripción en regulaciones o documentos normativos que rijan la planificación del desarrollo constructivo de un territorio.

En el planeamiento urbano, los mapas de microzonificación sísmica posibilitan reducir los costos por conceptos de protecciones antisísmicas. La información contenida en los mismos, con ligeras modificaciones, puede ser incorporada directamente al cálculo de los coeficientes sísmicos y la fuerza sísmica. Además, estos mapas generan recomendaciones que pueden ser introducidas en los planes para la reducción del riesgo sísmico, que permitan tomar decisiones sobre la factibilidad de emplazamiento de una estructura u objeto de obra en particular, sobre el reforzamiento de determinadas estructuras con interés económico social, sobre la prohibición de emplazamiento de estructuras críticas en zonas inestables.

La escala y categoría de los mapas de microzonificación sísmica van a depender de una serie de factores entre los que se destacan la importancia económico social del territorio, el objetivo al que están dirigidos, el volumen, la calidad y la representatividad de la información de base y otros (González, 1995).

1.3 Métodos para realizar la microzonificación sísmica aplicados a Cuba y al mundo

Existen varios métodos para analizar la respuesta sísmica con fines de microzonificación. En los denominados métodos directos se analiza la señal sísmica registrada en un acelerograma procedente de un terremoto ocurrido en la zona, o de una gran vibración generada artificialmente. Cuando no se dispone de este tipo de información se puede partir de un acelerograma característico del terremoto de diseño y se simula la respuesta sísmica de cada tipo de suelo presente en la zona. Los



resultados de los estudios de microzonificación se presentan en mapas en los que muestran líneas de iso-valores o unidades cartográficas, cuya respuesta sísmica es semejante a un período de retorno determinado. Los métodos geofísicos empleados en la prospección sísmica tienen como objetivo el análisis de la variación de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, producidas de forma natural o artificial.

1.3.1 Métodos sísmicos activos

Los métodos sísmicos activos, según Pérez (2015) se caracterizan por el uso de una fuente sísmica artificial. Los procedimientos seguidos en la actualidad para el registro de las ondas sísmicas utilizando los métodos activos no está muy lejos de la idea de Mallet hace casi 176 años. Estos procedimientos consisten, generalmente, en desplegar sobre la superficie del suelo un dispositivo formado por geófonos y medir las llegadas de las ondas sísmicas, las cuales han sido previamente generadas por una fuente sísmica artificial.

- **Método SASW:**

El método de análisis espectral de ondas superficiales (SASW) es un método sísmico, no destructivo que se emplea para estimar in-situ la velocidad de onda de corte del subsuelo y por relaciones empíricas inferir sobre los módulos elásticos. Este método sísmico fue propuesto por Heisey (1982) y desarrollado en el campo de la ingeniería sísmica por Nazarian y Stokoe (1986), como un mejoramiento del método de onda estacionaria de Rayleigh. Dicho método también ha sido estudiado tanto en sus aspectos teóricos como experimentales, por investigadores como Sánchez Salinero (1987), Rix (1991), Foinquinos (1995) y Brown (2002), entre otros.

El método SASW parte de dos suposiciones básicas: la primera, es que únicamente las ondas superficiales planas son medidas en campo, donde el efecto de las ondas de cuerpo no es relevante si se mantiene cierta relación entre la distancia fuente receptor. La segunda, es que solo la energía del modo fundamental de la onda superficial se toma en cuenta (Rix, 1991).



Dicho método se realiza utilizando dos receptores alineados con una fuente activa (figura 1.1). Generalmente la distancia con la fuente y el primer receptor, es igual a la distancia entre ambos receptores (Sánchez, 1987). Al ejecutar el ensayo para una sola posición de los receptores y fuente, se puede calcular la curva de dispersión para un rango acotado de frecuencias, por ello, se debe de modificar la posición de los receptores y/o la fuente a lo largo del ensayo, para obtener la curva de dispersión para distintos rangos de frecuencia (Tapia, 2009).

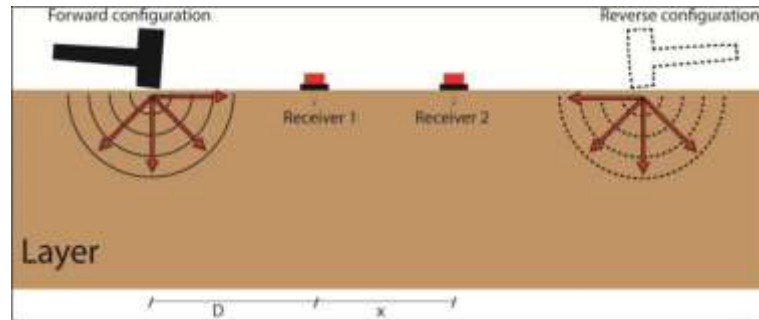


Figura 1.1: Esquema de campo del método SASW en el cual se muestra una configuración directa y otra inversa. Fuente: Pérez-Cueva, J (2015).

Una de las principales dificultades que tiene el método SASW, es el obtener información del subsuelo a grandes profundidades, por lo regular de orden de los 30 m y profundidades superiores, resultando mucho más difícil disponer de una fuente adecuada que posea la suficiente energía para no atenuarse significativamente cuando hay grandes separaciones entre sensores. Por ejemplo, una caída de peso relacionada con una separación entre sensores de 30 m tendría, al menos, una separación de 60 m al segundo sensor, por lo que, de no tener suficiente energía, posiblemente se perdería significativamente la señal con el ruido de fondo.

Este método puede ser aplicado en lugares donde se tiene presencia de un alto nivel de ruido ambiental, donde para otros métodos sísmicos, como el de refracción y el de reflexión, esto constituye un inconveniente que no permite la obtención de registros muy claros de ondas. Además, con este método se puede determinar el perfil de rigidez y el perfil de la relación de amortiguamiento de los suelos. Dicho método es muy



importante para el análisis de la microzonificación sísmica en diferentes ciudades, presentando muy buenos resultados. Se destacan los estudios realizados en el área urbana de la ciudad de Las Vegas en Estados Unidos de América por Scott (2006), el estudio llevado a cabo en la ciudad de Chania en Grecia por Pelekis y Athanasopoulos (2013) y realizado por Grasso y Maugeri (2014) en la ciudad de Ragusa en Italia.

- **Método Down-hole:**

Tapia en 2009, describe el método Down-hole (Woods, 1978), conocido también como sísmica de refracción en pozo: “consiste en introducir uno o varios geófonos triaxiales en un sondeo. Estos geófonos registran las ondas sísmicas (P y S) que son generadas con una fuente de energía activa próxima al sondeo (figura 1.2). El dicho receptor (geófono o hidrófono) es adherido a la pared de un sondaje, para la medición de los tiempos de viaje de las ondas sísmicas propagándose hacia abajo, a partir de la fuente ubicada en la superficie del terreno. El receptor es instalado sucesivamente a las profundidades deseadas, mientras se genera la onda para cada profundidad en la superficie. La fuente utilizada para la generación de ondas suele ser una placa de madera firmemente adherida a la superficie y golpeada manualmente por un martillo. Si la placa es golpeada horizontalmente, genera una onda de corte en la dirección horizontal. La onda longitudinal (onda P) es generada golpeando la placa verticalmente o dejando caer un peso sobre esta”.

Este método es muy utilizado en la investigación geotécnica, principalmente en estudios de mejora del suelo y de cimentación. Entre las aplicaciones más importantes se encuentran: la detección de capas ciegas y la medición de la razón de amortiguamiento del suelo. Algunas de las limitaciones que este método presenta son: el grado de alteración del suelo cuando se realiza el sondeo, posibles efectos de fluidos en el sondeo, excesivo o insuficiente impulso, efectos de ruido sísmico y efectos de nivel freático. Su implementación en la microzonificación sísmica es muy limitada debido al costo e impacto que implica utilizar esta técnica en zonas urbanas.



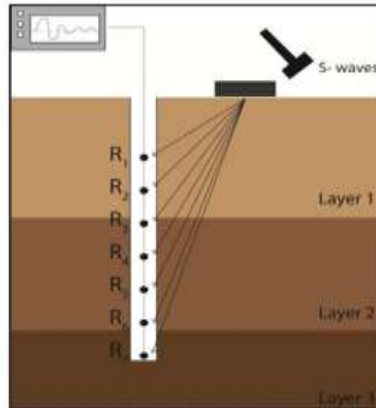


Figura 1.2: Esquema de Ensayo Down-hole (Modificada de Semblat y Pecker (2009)).
Fuente: (Pérez-Cueva, 2015).

- **Método Cross-hole:**

Según Reynolds en 1997 plantea, “El método Cross-hole (Stokoe y Woods 1972), al igual que el método Down-hole, se basa en determinar la velocidad de propagación de las ondas de compresión (P) y de cizalla (S) a diferentes niveles de profundidad, y de estimar los módulos elásticos del terreno, los cuales son de mucha importancia para determinar el grado de rigidez, compresión y deformación del terreno”.

En este método, una onda de corte o una onda compresional es generada en un sondeo-fuente, y su propagación en la dirección horizontal es detectada mediante receptores colocados en dos o tres sondeos adyacentes en un arreglo lineal. La disposición del ensayo es mostrada en la (figura 1.3).

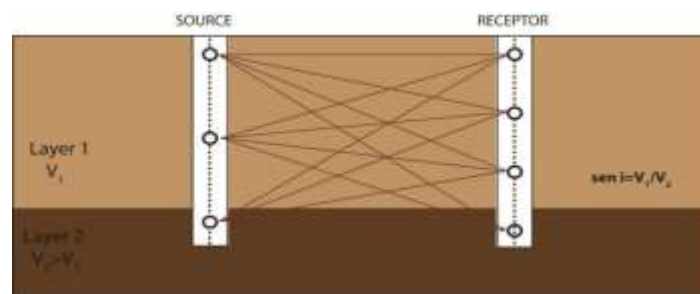


Figura 1.3: Configuración en campo y representación de los rayos sísmicos para una serie de disparos donde se muestra el sondeo emisor y receptor. Fuente: (Pérez-Cueva, J; 2015).



La energía de impulso en el sondaje-fuente es aplicada por medio de la caída de un martillo especial. Cuando el sondaje es realizado simultáneamente en el ensayo SPT, la energía del martillo puede ser utilizada para generar una onda compresional en el fondo del mismo. Para la generación de ondas de corte en el sondaje-fuente, se usa un anclaje y un martillo especialmente diseñados, el cual es instalado a la profundidad deseada mediante un cable de tensión, y acuñado a la pared expandiendo los anclajes. Un movimiento cortante hacia abajo es generado dejando caer el martillo sobre la parte superior del anclaje adherido. Un dispositivo especial también puede ser adherido a este anclaje de tal manera que el golpe pueda ser realizado hacia arriba desde el fondo. Así, la fuerza de impulso orientada verticalmente es aplicada a la pared del sondaje tanto hacia abajo como hacia arriba (López, Mejía, Vega, 2008).

Entre las ventajas que este método ofrece se encuentran: obtención de perfiles de velocidades a profundidades en el rango de 30 a 60 m (utilizando fuentes emisoras mecánicas) y a profundidades mayores de 60 m (utilizando fuentes emisoras de tipo explosiva), así como la detección de capas ciegas. Algunos limitantes para este método son: las velocidades de ondas sísmicas son sensibles a la distancia emisor-receptor (especialmente en sondeos de 15 a 20m de profundidad), las velocidades de las ondas pueden enmascarse si se atraviesan capas de alta velocidad, corrección de trayectorias de la curvatura del rayo sísmico en materiales que varían continuamente de velocidad y, por último, el alto costo en el desarrollo del método.

- **Método sísmico de refracción**

El método sísmico de refracción hasta los años anteriores al 1960 fue muy popular, en sus inicios realizó grandes aportes a la prospección sísmica, especialmente adaptados para trabajos de Ingeniería Civil, en la exploración de cuencas sedimentarias donde se desató por el descubrimiento de grandes campos de petróleo. Se utiliza para la medición de espesores de recubrimiento, profundidad del nivel freático y en la realización de estudios hidrogeológicos. Este método permite la localización (profundidad del sustrato), posición del acuífero bajo ciertas condiciones, así como la



caracterización del suelo. En la práctica se mide el tiempo de tránsito empleado por las ondas directas y refractadas en ir desde un punto conocido (posición de la fuente sísmica) hasta las posiciones en donde se encuentran una serie de geófonos situados a lo largo de la línea de adquisición (figura 1.4) (Pérez, 2015).

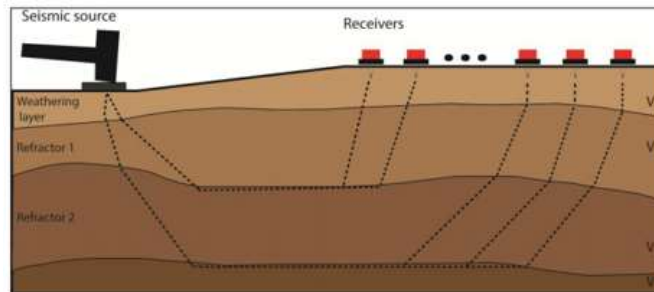


Figura 1.4: Esquema de campo y trayectoria sísmica de los frentes de onda del método sísmico de refracción. Fuente: (Pérez-Cueva, J; 2015).

Al viajar a través del terreno, las ondas se refractan en los contactos de separación entre las diferentes capas del subsuelo en donde tienen lugar cambios importantes en las propiedades físicas de los materiales. Para que exista la refracción sísmica debe darse un contraste del valor de la impedancia acústica entre los materiales que separa el contacto. El método sísmico de refracción exige llevar a cabo disparos directo e inverso en cada uno de los extremos del perfil sísmico, esto se hace, con el fin de identificar apropiadamente la presencia de contactos inclinados entre las capas del subsuelo. Los geófonos detectan la llegada de las ondas y envían las señales a un sismógrafo, el cual genera un sismograma donde se representan las trazas sísmicas de cada uno de los geófonos, este gráfico se conoce como dromocronas (Pérez, 2015). El método de refracción presenta dificultades al resolver capas de baja velocidad que se encuentren rodeadas por capas de alta velocidad, debido a que en estas circunstancias no se produce una refracción crítica total. Estas capas, denominadas ocultas, provocan una interpretación errónea de los datos finales. Estos problemas hacen q su utilización en estudios de microzonificación sísmica sea muy limitada (Pérez, 2015).



- **Método sísmico de reflexión:**

El método sísmico de reflexión surge a partir de los trabajos llevado a cabo por Reginald Fessenden, quien en el año 1913 empleó ondas acústicas para la localización de iceberg y para la detección del fondo marino. En la actualidad es uno de los métodos más empleados en la investigación de formaciones rocosas, prospección petrolífera e hidrogeología, ya que permite la obtención de información de capas muy profundas para la cuantificación de depósitos de roca y petróleo. Además la determinación de límites (hasta 100 m de profundidad), saturación y porosidad de un acuífero, así como la localización de saltos en fallas geológicas; también se usa para la investigación de capas superficiales del suelo (López, Mejía, Vega, 2008).

El objetivo de este método es medir el tiempo que toma una onda sísmica en viajar desde la fuente, atravesar el subsuelo, ser reflejada en un reflector y volver a la superficie donde será detectada por los geófonos (figura 1.5) (Pérez, 2015). Si el ángulo de incidencia, es menor que un ángulo crítico, la onda es refractada y se propaga al segundo medio, donde se asume que la onda viaja más rápido en este segundo medio. Si la onda incidente llega a la frontera en un ángulo mayor que el ángulo crítico, la onda es reflejada en el primer medio en el mismo ángulo respecto a la vertical. Esto permitirá obtener información acerca de la composición del terreno en profundidad en base a las reflexiones del frente de onda sísmica sobre los distintos interfaces del subsuelo. Mediante el procesamiento de los datos sísmicos se obtiene una sección sísmica formada por un agrupamiento de todas las trazas sísmicas en la que se pueda observar las discontinuidades que definen la estructura del subsuelo.



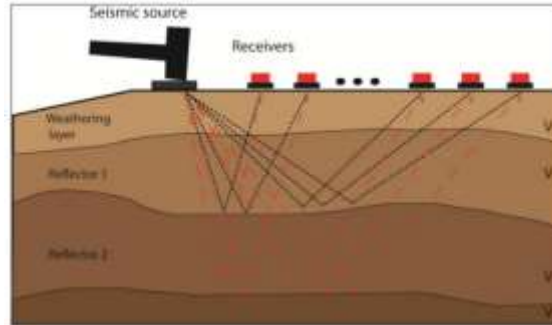


Figura 1.5: Esquema de campo y trayectoria sísmica de los frentes de ondas del método de reflexión. Fuente: (Pérez-Cueva, J; 2015).

El método de reflexión tradicional no es muy popular para la adquisición de los datos en zonas urbanas, más bien se utiliza en combinación con otras técnicas sísmicas (SPAC, método sísmico de la refracción, MASW, etc.). Esto es debido a que el tratamiento de los datos es más laborioso y delicado que en otros métodos sísmicos. Se destaca el estudio de microzonificación realizado en la ciudad de Ottawa en Canadá por Lamontagne et al (2011), en el cual se determinó la variación de los estratos del terreno.

1.3.2 Métodos sísmicos pasivos

Estos métodos se basan en el registro de vibraciones ambientales de origen artificial o natural. Consideran que las vibraciones ambientales están formadas por una superposición de ondas superficiales que se propagan en todas las direcciones siguiendo una distribución uniforme y aleatoria. Los métodos pasivos analizan de forma indirecta las características sísmicas del terreno sin afectarlo o sin necesidad de operaciones invasivas que lo modifiquen. El análisis de los registros permite obtener la curva de dispersión característica de las ondas superficiales, la cual depende de las propiedades de las capas superficiales del terreno que atraviesan.

Método de Nakamura:

Este método fue propuesto inicialmente por Nogoshi e Igarashi (1971) y posteriormente desarrollado por Nakamura (1989). El método se basa en la interpretación del ruido ambiental como ondas Rayleigh, las cuales se propagan por



una capa situada sobre un semi-espacio elástico, y se aplica para evaluar el comportamiento dinámico del suelo a partir del cociente de las componentes espectrales horizontal y vertical de las vibraciones ambientales (razón espectral H/V) estos ruidos o vibraciones ambientales son conocidos como micro-trepidaciones o micro-tremores; que van inducidos por el viento, el oleaje y actividades antropogénicas.

Fuentes de micro-tremores:

- A bajas frecuencias (por debajo de 0.3 hasta 0.5 Hz) son causadas por las olas oceánicas que ocurren a grandes distancias; y es posible encontrar buena correlación de los micro-tremores.
- A frecuencias intermedias (entre 0.3 – 0.5 Hz y 1 Hz) los micro-tremores son generados por el oleaje que rompe en las costas, por lo que su estabilidad es significativamente menor.
- Para altas frecuencias (mayores de 1 Hz) las fuentes de los micro-tremores están ligadas a la actividad humana, por lo que reflejan los ciclos de esta actividad, y se manifiestan por cambios en la amplitud estas.

Este método ha sido ampliamente discutido y probado como un método rápido y económico en la realización de la toma de datos, así como efectivo en la determinación del periodo predominante del suelo (Konno y Ohmachi 1998, Bard 1999, Enomoto et al. 2002). Se ha utilizado para caracterizar el efecto de sitio (Alfaro et al. 1998; Euroseismod, 1998), para modificar planos geotécnicos de ciudades como Lieja, Bélgica (Euroseismod, 1998) y estimar el perfil de velocidades de ondas de corte mediante un modelado directo utilizado, por ejemplo, el método de matrices de rigidez (Kausel y Roesset, 1981; Huerta et al., 2005).

Método f-k:

El método f-k convencional tiene su origen en las investigaciones realizadas por (Lacoss et al. 1969, Kvaerna y Ringdahl 1986). Este método permite evaluar de modo directo e intuitivo las direcciones y velocidades de propagación predominante en



campo de ondas. En su modo pasivo este método es utilizado ampliamente en los estudios de prospección geofísica para el análisis de la componente vertical del movimiento debido a que es una técnica muy flexible en cuanto a su aplicación en campo (Pérez, 2015). La desventaja de la aplicación de este método es que, requiere de un arreglo de sismómetro con varias estaciones distribuidas uniformemente a manera azimutal, con una gran variedad de distancias entre estas estaciones, para asegurar estimados de alta resolución del espectro de potencia f-k (Pérez, 2015).

Método SPAC:

El método de autocorrelación espacial (SPAC) fue desarrollado por Aki (1957), el cual fue un método pasivo, in-situ y no invasivo. El ruido ambiental lo considera como un proceso estacionario en tiempo y espacio, cuya teoría fue rigurosamente estudiada por Aki (1957) y discutida en aspectos prácticos por Aki (1965) entre otros autores como Okada (2006), Chávez (2006). En este método se considera que una onda estacionaria se forma por la interferencia de dos ondas de la misma naturaleza en igual amplitud, longitud y frecuencia que avanzan en sentido opuesto a través de un medio, y que se encuentran confinadas en un espacio (que puede ser un estrato del subsuelo). Hay puntos de las ondas que no vibran (nodos), viajan a una velocidad uniforme, mientras que otros (antinodos) lo hacen con una amplitud de vibración máxima, igual al doble de las ondas que interfieren, y con una energía máxima.

Otro método alternativo al método tradicional de SPAC es el desarrollado por Cho et al. (2006) denominado CCA (Centerless Circular Array). La principal característica de este método es que permite prescindir de la estación central, pero presenta la desventaja de no ser válido en general para un campo determinista. Chávez et al. (2006) propone la idea de remplazar el promedio azimutal por mediciones en largos intervalos de tiempo, siempre que el campo de ondas sea estacionario en el tiempo y que no exista una dirección de propagación predominante. A partir de este supuesto, no es necesario la utilización de arreglos bidimensionales como propuso originalmente Aki (1957), y se abre la posibilidad a la utilización de arreglos lineales. Utilizando



registros de 30 minutos y con receptores alineados y espaciados a 5, 10, 20 y 40 metros Chávez et al. (2006) pudo determinar con éxito el perfil de velocidades de corte de un sitio, el cual coincide con los resultados obtenidos en otras metodologías.

Existen otras configuraciones instrumentales, pudiendo aplicarse arrays circulares (p.e. sensores dispuestos en los vértices de polígonos regulares), semicirculares e irregulares. Otras variantes del método SPAC son capaces de extraer curvas de dispersión de ondas Love en medidas en 3 componentes, tales como el 3c-SPAC (Okada, 2003; Marikawa, 2006) o el SCA (García, 2010). El método SPAC y sus variantes han sido ampliamente utilizados en determinar la estructura superficial del terreno en términos de velocidad V_s en estudios de microzonificación sísmica (Kagawa et al., 1999; García, 2007; Navarro et al., 2008).

1.3.3 Métodos híbridos

Son métodos de registros de ondas superficiales que pueden ser puestos en marcha en modo pasivo y activo al mismo tiempo.

Método MASW:

El Método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) es un método sísmico en el que se tratan las ondas superficiales con frecuencia entre 2 y 30 Hz. Estas ondas se registran mediante un sistema de grabación multicanal (sismógrafo) y un conjunto de geófonos (12 o más) desplazados a una separación conveniente. Con la aplicación de este método se puede determinar la distribución de la velocidad de cizalla a partir de la captación de las ondas superficiales asociadas a cada tipo de material, obteniéndose un modelo de velocidad V_s (Park et al., 2001). Existen dos principales ventajas que presenta este método, las cuales son: la capacidad de reconocimiento del modelo y la redundancia en las mediciones.

- La primera de ellas permite un alto control de la calidad durante las fases de adquisición y procesamiento de datos. Por ejemplo, las ondas superficiales y de cuerpo pueden ser identificadas por separadas, debido a su único tiempo de llegada y los modelos de amplitud obtenidos, son el resultado de las diferencias



de velocidades de las ondas. Esto significa que parámetros críticos como el registro y compensación de tiempo, pueden ser optimizados de manera favorable a través del análisis del ruido en campo.

- La segunda ventaja del método es que permite aplicar varios tipos de técnicas para eliminar los ruidos y de esta forma, incrementar la proporción de ruido a la señal.

El método MASW puede encontrar varios tipos de aplicaciones con la ingeniería civil, tales como: detectar cavidades en el terreno (Xu y Butt, 2006; Tavalló et al., 2009), encontrar zonas débiles en donde se pretende construir alguna edificación, caracterización sísmica del terreno, estudios sobre el coeficiente de Poisson, cartografía del lecho rocoso, o en la elaboración de modelos 1D/2D de velocidades de cizalla (Ivanov et al., 2001, Socco et al., 2010, Martínez et al, 2012). El empleo combinado de los métodos pasivos y activos revela un enfoque muy eficaz para comprender la naturaleza general de la frecuencia y de la velocidad de fase, además de permitir una mayor profundidad y una mejor resolución en los perfiles de velocidad V_s del terreno.

Método ReMi:

El método ReMi, es un método sísmico desarrollado por Louie et al. (2001), utilizado para medir in-situ, la velocidad de ondas de corte del suelo. El método es de fuente pasiva, ya que procesa micro-tremores que se pueden encontrar presentes en las mediciones. Puede estimar la velocidad de ondas de corte del suelo, desde 40 hasta 100 metros, aproximadamente, dependiendo de las propiedades del suelo y de los registros de micro-tremores.

Este método está basado en dos ideas principales:

- 1) El método puede aprovechar los equipos de reflexión y refracción sísmica, que puede registrar ondas cuyo contenido en frecuencias sea de por lo menos 2 Hz (Louie et al. 2001).
- 2) El procesado permite separar el arribo de las ondas Rayleigh de otros arribos para estimar la velocidad de ondas Rayleigh.



En la práctica, el método ReMi adquiere el ruido ambiental a través de una línea de geófonos separados entre sí a una distancia conocida y regular. Esta línea se extiende centrada sobre el lugar del que se quiere obtener el perfil de distribución de velocidad V_s del terreno. Dichos geófonos se encargan de registrar el ruido acústico natural generado por el tráfico, el movimiento de personas, el viento o cualquier otro fenómeno, por lo que en principio no es necesario aplicar otras fuentes activas de energía (Pérez, 2012).

Finalmente, el método ReMi es no invasivo y no destructivo (no requiere aplicar una fuente en el suelo ni perforar el mismo) y no implica mayor impacto ambiental. Este método es muy utilizado en ambientes urbanos (Eker et al., 2012; Büyüksaraç et al., 2013) en donde la presencia de las vibraciones y el ruido ambiental son elevados. Además, es un método adecuado para la evaluación de la estructura del terreno en base a su comportamiento (amplificación de las ondas superficiales) frente a sacudidas sísmicas. Sin embargo, este método presenta una desventaja, es que el método no siempre puede resolver (con buena resolución) las velocidades del suelo a distancias menores de los 30 metros (Pullammanappallil et al., 2003 y Heath et al., 2006), que son las profundidades de interés para la ingeniería civil, y difícilmente resuelve estratos de baja velocidad entremedios de dos capas de mayor velocidad.

Método del gradiente topográfico:

El uso de técnicas de prospección sísmica con base en el análisis de las fuentes sísmicas activas (Método Down-hole y Cross-hole, SASW, sísmica de reflexión y refracción), fuentes de micro-tremores (f-k, H/V, SPAC) y los métodos híbridos (MASW y ReMi) se han utilizado para determinar el valor de la velocidad V_s y V_p del terreno y para conocer cuál es la rigidez del suelo. Sin embargo, la obtención de mapas de valor V_{s30} mediante estos métodos geofísicos puede resultar en una gran inversión en cuanto a tiempo y dinero si se aplican en grandes superficies (Pérez, 2015).

Allen y Wald (2007) señalan que no siempre es posible tener acceso a los mapas de microzonificación sísmica a escala regional debido a que estos mapas solo están



disponibles para zonas que se consideren de alta sismicidad (p.e California, Chile, etc.). Ellos indican que la obtención de estos mapas exige de un personal altamente cualificado y del empleo de equipos sofisticados para la adquisición de datos geotécnicos, geológicos y geofísicos en número suficiente que garanticen el detalle que exige un mapa de microzonificación sísmica.

El método de Allen y Wald (2009) fue propuesto como un método alternativo y de bajo coste para la estimación del valor V_{s30} del terreno, y por lo tanto para elaborar de manera rápida mapas de microzonificación sísmica. Este método tiene su principio en el hecho de que los materiales más competentes (alta velocidad de ondas sísmicas) son más propensos a mantener pendientes fuertes, mientras que los sedimentos en baja rigidez y por lo tanto de baja sismicidad se depositan en el fondo de la cuenca. La principal ventaja de este método es que se puede realizar el estudio de microzonificación sísmica de manera rápida ya que las características geomorfológicas de la superficie están disponibles para todas las zonas del mundo a través de modelos digitales del terreno de gran calidad para la comunidad científica y técnica (Pérez, 2015).

En conclusión, se considera que los métodos más adecuados para el área de estudio son: el método de Nakamura y el método MASW ya que:

- Método de Nakamura: Posee un bajo coste, y es especialmente recomendable en áreas de sismicidad baja y moderada debido a la carencia de registros de terremotos fuertes en comparación con zonas de alta sismicidad.
- Método MASW: es un método robusto y de fácil utilización, con el podemos identificar zonas puntuales o adquirir mapas de V_{s30} con un excelente estado de detalle; y lo más importante es que supone un bajo coste en comparación con otros métodos de prospección de ondas superficiales.

Conclusiones del capítulo



- Tras el análisis teórico referente a los métodos que se emplean para la realización de una microzonificación, se determina que los más idóneos para el caso que se presenta son el Método de Nakamura y el Método MASW.
- La ciudad de Holguín tiene un importante desarrollo económico y social, sin embargo, presenta una alta vulnerabilidad sísmica y un riesgo sísmico moderado.



CAPÍTULO 2: ESQUEMA DE TRABAJO PARA LA MICROZONIFICACIÓN DE LA CIUDAD DE HOLGUÍN.

La microzonificación sísmica, constituye un proceso de análisis muy importante en los estudios de peligrosidad sísmica y en la mitigación del riesgo sísmico en áreas urbanas. Estas metodologías consisten en estudios multidisciplinarios, delimitados por la extensión del centro urbano existente y su posible expansión. Son determinantes en la evaluación del riesgo sísmico y es mucha utilidad en la planificación regional y urbanística, se utilizan para ponderar los niveles de las fuerzas sísmicas en la concepción de estructuras antisísmicas.

2.1 Caracterización geofísica y socioeconómica de la ciudad de Holguín

Límite y extensión territorial.

La ciudad de Holguín se encuentra localizada en la zona oriental de Cuba, en la provincia de mismo nombre. Limita al norte con los municipios de Gibara y Rafael Freyre, al este con Báguanos y Rafael Freyre, al sur con Cacocum y Báguanos, y al oeste con el municipio de Calixto García. Posee una extensión territorial de 689.8 Km² (ONEI, 2016).

Relieve:

El municipio de Holguín en su gran mayoría es ondulado, a una altitud de 150 m sobre el nivel del mar, con algunos cerros como la Mole serpentinita “el Fraile” con 331.5 m y la Mole serpentinita “Loma de la Cruz” con 276.9 m esta última perteneciente al grupo orográfico Maniabón (Comisión Nacional de Nombres Geográficos 2000).

Clima:

De acuerdo a Pérez e Hidalgo (2016), el municipio se encuentra ubicado en la zona climática interior, donde predomina el clima seco y de sabana tropical. En esta área las precipitaciones son causadas fundamentalmente por el calentamiento diario, los registros de temperatura media son los más altos del área provincial. La temperatura media varía de 22.8°C en febrero, a 27°C en julio, presenta características de continentalidad en su régimen térmico. El régimen de lluvia es superior a la zona



costera, en el período lluvioso precipita como promedio el 77% del valor anual, en ocasiones superan los 100 mm. La dirección del viento es de NE a ENE con velocidades medias de 10.9 a 16.4 Km/h, en la noche y madrugada ocurren grandes períodos de calma.

Hidrología:

Los principales ríos son el Jigüe (3.9 Km), el Marañón (2.6 Km) y Mayabe que vierten sus aguas hacia la cuenca del río Holguín, al igual que Matamoros y Yareyal que lo hacen hacia la cuenca de la presa Güirabo. Los embalses que abastecen de agua a la población son: Gibara, Güirabo y Cacoyugüin (Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente, 2008).

Densidad poblacional:

Posee una densidad poblacional de 5483 Hab/Km², ocupando el tercer lugar en cantidad de habitantes a nivel municipal superado solo por los municipios de Santiago de Cuba y Camagüey a nivel de país, por lo que se clasifica en la categoría de Ciudad de primer orden en el Sistema Urbano Nacional. La zona urbana representa el 9.4% del área total del municipio y en ella reside una población de 350 987 habitantes, que representa el 83% de la población municipal, con una densidad de 4515 Hab/Km². Está dividida en 14 consejos populares, 11 urbanos y 3 mixtos (urbano-suburbano) (CIMAB 2017).

Actividades económicas:

La principal actividad económica recae en los servicios y la industria: construcción de maquinaria no eléctrica; del vidrio y la cerámica, alimentaria, de bebidas y tabaco. Cuenta con fábricas de combinadas cañeras, implementos agrícolas, muebles sanitarios, azulejos, cerámica roja, tubo de polietileno, cervezas, refrescos, tabacos torcidos; y la combinada láctea y la cárnica. En la zona se produce granos, viandas, vegetales y se explota la ganadería vacuna, porcina y avícola.

Sismicidad:



Debido a su potencialidad y cercanía las zonas sismogénicas que mayor incidencia sobre el municipio estudiado son: Cauto-Nipe, Oriente, Norte Cubana y falla Norte de la Española (Chuy 1997). El mayor peligro para la región oriental de Cuba, incluyendo el área de estudio lo representa la falla Oriente. En ella se señalan 22 reportes de terremotos fuertes (Intensidad ≥ 7.0 MSK-EMS) de un total de 28 que se han producido en toda la historia sísmica de nuestro país. Los terremotos de mayor trascendencia para el área son los de 1766 y 1852 con intensidad de 9.0 MSK-EMS y en 1932 con una intensidad de 8.0 MSK-EMS, que deben haber presentado en el municipio de Holguín intensidades de 6.0 y 7.0 MSK-EMS (Chuy, 1999). El sismo ocurrido el 28 de febrero de 1914 en las cercanías de Gibara con magnitud estimada de 6.2 en la escala de Richter e intensidad de 7.0 MSK-EMS en la ciudad de Gibara, debió haber provocado intensidades de 6.0 MSK-EMS en la ciudad de Holguín, el mismo pudo estar asociado a la falla denominada Norte Cubana; una estructura de segundo orden. En la zona norte de la Española reportan históricamente varios terremotos de consideración, incluyendo uno de magnitud 8.2 en 1842, cuya área de perceptibilidad cubrió toda nuestra región oriental señalándose incluso en el municipio de interés un estimado de 6.0 MSK-EMS (Alvarez y Chuy 1985), Chuy (1999)).

2.2 Concepciones para el desarrollo de un esquema de trabajo para la microzonificación sísmica

La microzonificación sísmica se divide en cuatro etapas para su estudio:

1. La obtención de la información Geológica, Geofísica, Geotécnica, Geomorfológica (Litología), para determinar la distribución de las diferentes unidades geológicas.
2. Registro y análisis de movimientos débiles y/o de vibración ambiental; y el análisis de los registros de movimientos fuertes.
 - Adquisición de registros del ruido ambiental en el área de estudio.
 - Análisis de estos ruidos ambientales obtenidos, con la técnica de Nakamura.
 - Análisis de la existencia de la información de sismos fuertes con la técnica SSR.



- Mediante los estudios geofísicos de prospección sísmica desarrollar modelos unidimensionales con los perfiles de velocidad de onda de corte V_s representativos para cada sitio.
3. Definir las zonas sismogénicas que más afecten a la sismicidad del centro del área urbana de estudio: la definición de estas zonas en los estudios de peligrosidad sísmica se realiza generalmente a partir de la correlación que encuentra el analista entre la distribución espacial de los epicentros sísmicos y la situación de las grandes unidades geotectónicas en que pueda dividirse un territorio. Este procedimiento adolece de una fuerte subjetividad, siendo lo normal que cada analista defina las zonas sismogénicas en base a sus propios criterios.
 4. Obtención de los mapas de microzonificación sísmica (mapas de períodos fundamentales del suelo, mapas de frecuencia y mapas de V_{s30}), correspondientes a la zona de estudio.

A continuación, se describen cada una de las etapas del proceso de microzonificación de forma general para más adelante definir el que realmente es el adecuado para la zona de estudio.

Recopilación de la información necesaria:

Geología:

Se debe de conocer la columna geológica de la zona de estudio, para saber las capas que constituyen el subsuelo sobre los cuales está asentada y el tipo de materiales que conforman cada capa. Con la geología local se puede hacer un análisis rápido de la zona de estudio antes de seleccionar los puntos de medición. Además de detallar un poco más la microzonificación con esta geología local en el momento de realizar los mapas con los resultados de los trabajos de campo. Como parte del reconocimiento de campo, es aconsejable señalar, al menos de manera preliminar, aquellas zonas proclives a sufrir deslizamientos de laderas, flujos de lodo y escombros.

Geofísica:



Los estudios geofísicos son útiles para correlacionar la información superficial con información en profundidad, y detallar mejor las zonas que pudieran sufrir mayor amplificación sísmica. Pueden utilizarse estos estudios de manera previa en la región obtenida durante la campaña de registro de micro-tremores. De este estudio se obtienen los datos de velocidad de onda (V_p) y de corte (V_s); módulo de rigidez, y módulos elásticos; espesor y distribución de las capas que componen el suelo

Geomorfología:

Los estudios geomorfológicos nos ayudan a entender el origen de los depósitos sedimentarios y como su disposición actual, estos materiales modificaran la respuesta sísmica en todos los tipos de terreno presentes en el área de estudio. Con este tipo de información, se puede analizar el conjunto de factores que modifican la señal sísmica cuando ésta se propaga dentro de la estructura geológica somera.

Adquisición de registros en campo para la Microzonificación:

Con fines de microzonificación, el registro de micro-tremores consiste en la instrumentación de las áreas urbanas a estudiar, con una distribución de estaciones de medición acorde a las características geológicas cuaternarias, donde, la mayor densidad de estaciones se ubica en las zonas de transición y depósito. Para obtener la amplificación relativa y el período natural de vibración del suelo, se utilizan los registros de vibración ambiental, los registros de movimientos sísmicos fuertes (si estos existen), y los registros de movimientos sísmicos débiles o moderados.

Registro de Micro-tremores:

Generalmente en el desarrollo de la campaña de registro de micro-tremores, se aconseja:

1. Proponer la distribución de las estaciones de acuerdo al estudio geológico-geomorfológico y del área de estudio.
2. Cubrir la mayor área posible de la zona analizada, incluso implicando el uso de registros en lugares fuera de la ciudad, pero con un potencial de expansión urbana.

Ubicación de los puntos de registros sísmicos:



En las zonas que corresponden a zonas de depósitos sedimentarios con características de terreno geotécnicamente blandos, se recomienda colocar una mayor densidad de puntos, infiriendo en esta zona en particular se presentará una amplificación de ondas sísmicas y así, evaluar el efecto de sitio. En los lugares que corresponden a mesetas y zonas de lomas se asigna una menor densidad de puntos distribuidos uniformemente a lo largo de la superficie, infiriendo que estas estructuras tendrán un efecto de sitio menor, en función de sus características litológicas.

En principio se debe aplicar un diseño de cuadrículas que separe los puntos de medición de aproximadamente 500 m, sin embargo, en sitios de variaciones laterales importantes, la separación no debe ser mayor a 250 m. La ubicación de las estaciones, debe ser en áreas donde se presente el menor nivel de ruido ambiental que pueda interferir en la señal sísmica como:

- Actividad empresarial (fábricas) y minera.
- Alcantarillado: no representaría la respuesta óptima de la ubicación de la estación, ya que habría ruido por el efecto del mismo alcantarillado.
- Árboles: el movimiento de las raíces puede afectar a que los registros sean de mala calidad.
- Carreteras y aceras: el constante movimiento del tráfico y peatones, generarían ruidos.
- Lagos, ríos y mares: alejarse lo más posible de estas zonas debidos a que hay mucho movimiento de olas.
- Días lluviosos y días con mucho viento: la lluvia podría causar algún corto circuito en el equipo por el cableado, así mismo, el viento fuerte puede ser registrado en las señales siendo un ruido no deseado.
- Estaciones de alta tensión: señales de alto voltaje generan señales no deseadas a las que deseamos medir.
- Estructuras: alejarse de construcciones donde hay maquinarias operando.



Se recomienda hacer el registro en horario de madrugada donde el flujo de vehículos y peatones es menor.

Instrumentación:

Las mediciones es uno de los factores que hay que tener en cuenta para que un estudio de microzonificación tenga buena calidad. (El tiempo óptimo es de 24 hora) en ventanas de 80 segundos por lo menos para obtener una mejor definición de los cocientes espectrales a bajas frecuencias. La característica de los equipos debe ser consultadas de acuerdo al proveedor una guía útil, puede ser el rango de frecuencias que el equipo sísmico utilizado pueda registrar.

Métodos de Análisis de Registros Sísmicos:

Existen tres técnicas básicamente que son utilizadas para el análisis de los registros sísmicos:

- Directamente de la densidad espectral de potencia.
- El cálculo de la razón espectral con un sitio de referencia.
- El cálculo de la razón espectral entre las componentes horizontales y la vertical de un mismo registro. A los cocientes espectrales también se les conoce como una aproximación de las funciones de transferencia.

Sismos fuertes:

La información más característica sobre efecto de sitio para ser aplicada en microzonificación sísmica es el uso directo de registros de movimientos sísmicos fuertes, debido a que incluyen efectos no lineales y amplios contenidos de frecuencias. El equipo ideal para registrar sismos fuertes es el acelerómetro.

Método de Análisis de Registros Sísmicos moderados o débiles:

El registro de movimientos débiles o moderados consiste en colocar una red temporal distribuida de manera que se debe cubrir con una malla con dimensiones similares a la de la ciudad de interés. Las técnicas para calcular la función de transferencia son la razón espectral estándar y la razón espectral del cociente (H/V).

Resultados de la Microzonificación



La elaboración de mapas se contempla como una parte importante de una microzonificación, donde mediante curvas que unen valores iguales, se exprese la distribución de períodos dominantes del terreno. Comúnmente, los mapas de isoperíodos guardan una cierta correlación con aquellos de geología superficial, mostrando períodos cortos (por ejemplo 0.1 o 0.2 segundos) en terrenos firmes, mientras que en rellenos aluviales llegan a observarse períodos de 3, 4 o 5 segundos. Para identificar la distribución del período dominante de vibración del suelo, es necesario generar curvas de isoperíodos. Los pasos para la elaboración de curvas de isoperíodos es la siguiente:

1. Localización de los sitios de medición en un Sistema de Información Geográfica.
2. Interpolación de los períodos dominantes obtenidos en cada punto de medición mediante de geo-estadística Kriging cuya teoría establece que una variable sigue un mismo patrón dentro de un área determinada. El resultado de esta interpolación permite desplegar la influencia de los datos obtenidos sobre un cierto entorno a una determinada distancia.
3. Digitalización de las zonas sísmicas que presentan el mismo comportamiento dinámico del suelo.
4. Elaboración de una base de datos que contenga las coordenadas (UTM) y el valor del período de la periferia de cada zona sísmica. Los trabajos en coordenadas UTM tienen mejor resolución o detalle para una interpolación, sin embargo, se podrá trabajar en el sistema de coordenadas deseado.
5. Generación de curvas de isoperíodos mediante la aplicación del método estadístico de interpolación Kriging, de acuerdo al valor del período correspondiente a cada punto geográfico.

Los resultados de los mapas obtenidos deberán ser entregados en shapefile con los siguientes formatos: *.prj, *.shp, *.shx, *.dbf, *.sbn. Estos mapas también deberán ser entregados en formato *.pdf y en formato de imagen *.jpg, además de los grids generados de las isocurvas, así como la base de datos de toda la información.



Finalmente se realizan las conclusiones determinando los resultados con las zonas geológicas de la zona de estudio y sus recomendaciones ante eventos sísmicos.

2.3 Esquema de trabajo para la microzonificación sísmica

Para realizar un esquema de trabajo para la zonificación sísmica que se adapte a las condiciones de la ciudad de Holguín, se debe partir del esquema de trabajo general expuesto en el epígrafe anterior. Las características de sismicidad de la zona son de moderada a baja, por lo que los estudios de registros de sismos no son recomendables en este caso. Lo ideal es realizar el estudio de microzonificación teniendo en cuenta los registros de micro-tremores y la respuesta que presenta el suelo ante los mismos, en base a estos criterios se realiza un esquema de trabajo adaptado específicamente para la ciudad de Holguín. A continuación, se muestran los pasos a desarrollar (Figura 2.1):



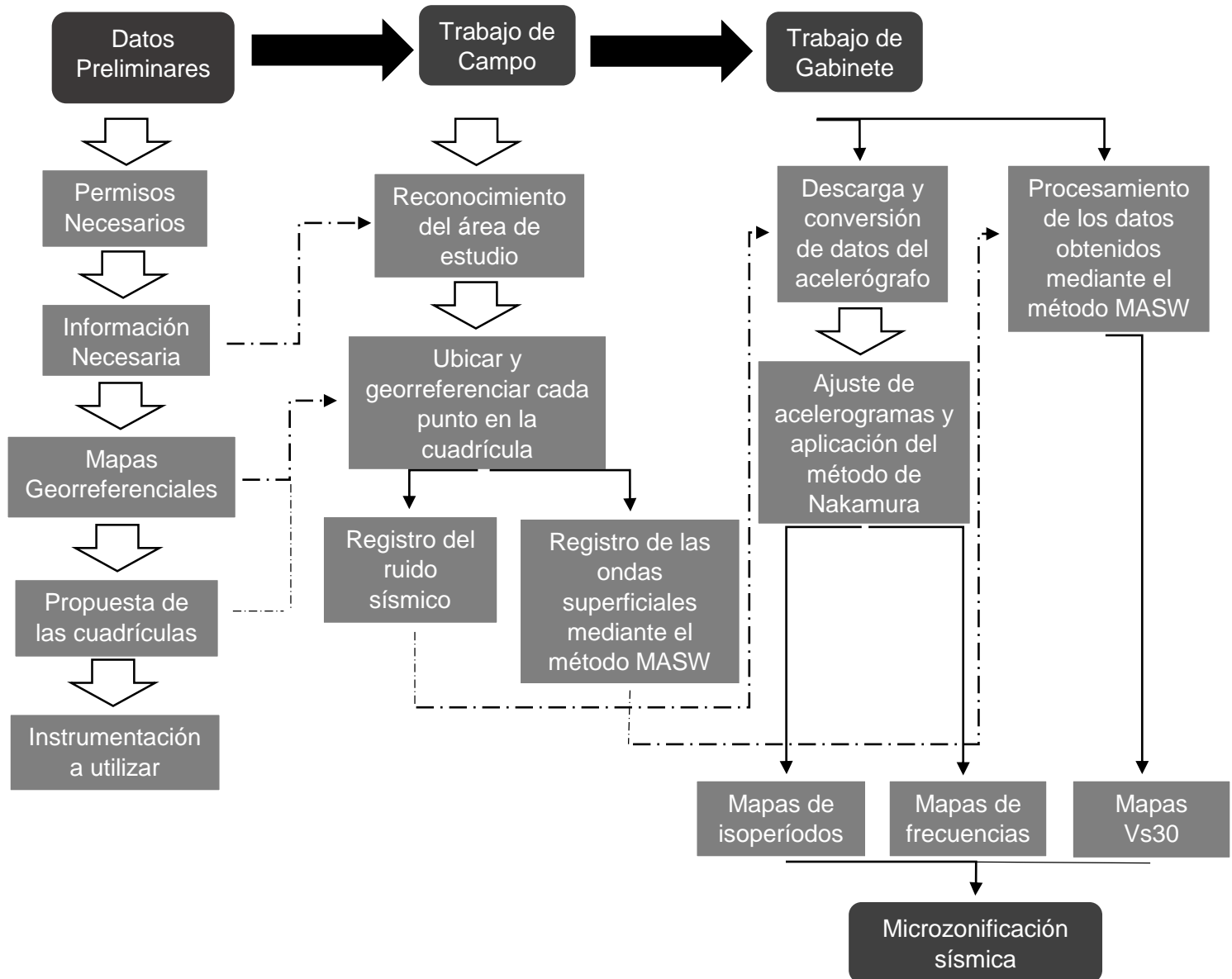


Figura 2.1: Esquema de trabajo a realizar para una microzonificación sísmica en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

1. Datos preliminares:

- Solicitar los permisos correspondientes.
- Obtención de la información necesaria de la ciudad de Holguín.

Tabla 2.1 Información litológica de la Ciudad de Holguín.



INFORMACIÓN LITOLÓGICA DE LA CIUDAD DE HOLGUÍN					
ZONA	ESPESOR			ROCAS	DESCRIPCIÓN
	<2m	2-5m	>5m		
1					Relleno: compuesto generalmente por eluvio de peridotita serpentizada de composición areno limosa con fragmentos de roca de diferentes tamaños, de color grisáceo. En ocasiones aparece como un suelo calcáreo con fragmentos de roca, cemento y arena.
2					Material aluvial: constituido por arcilla, arena y limo con contenido de gravas y cantos rodados; su color varía entre carmelita claro, amarillento y gris verdoso. Generalmente aparece compacto y en los casos en que el contenido arcilloso es bajo, se presenta suelto.
3				Tufita	Eluvio de Tufita: de composición arcillo arenosa, en ocasiones areno arcillosa, con fragmentos de roca, de color gris oscuro, en bolsones de CaCO ₃ .
					Tufita: en estado semi rocoso, de color gris oscuro, muy fracturada, de muy baja resistencia.
4				Toba	Eluvio de Toba: compuesto por arena arcillosa con algunas gravas y fragmentos rocosos. En ocasiones con intercalaciones de suelo calcáreo de composición arenosa. Su color varía de gris verdoso hasta blanco grisáceo o crema
					Toba: de color gris verdoso, de muy baja resistencia. En ocasiones con intercalaciones de



					arenisca tobácea y limolita. Toba pumítica de color blanco verdoso, de dureza baja a muy ligera.
5				Arenisca	<p>Eluvio de Arenisca: de composición gravo limosa con cierto contenido de arena de granos finos; de color carmelita, en ocasiones verdoso</p> <p>Arenisca: de color carmelita cremoso, en ocasiones tobácea, de granos finos a gruesos, interestratificada, a veces con intercalaciones de lutita. Su resistencia es muy baja</p>
6				Caliza	<p>Eluvio de Caliza: compuesto por arena arcillosa con fragmentos de la roca, de color crema claro o carmelita.</p> <p>Caliza: meteorizada, fragmentada y fisurada, con cavernas de hasta 1.00 m. De color crema claro o gris. En ocasiones se documentaron calizas brechosas. La resistencia a la compresión es de baja a media.</p>
7				Conglomerado	<p>Eluvio de Conglomerado: abundantes gravas de peridotita serpentizada, caliza, arenisca, toba; hasta de 10 cm de diámetro, en matriz arcillo arenosa o limosa.</p> <p>Conglomerado: meteorizado y fracturado, de color carmelita amarillento a gris azulado. Los clastos son de peridotita, serpentinita, caliza, toba; la matriz es arcillo arenosa, generalmente calcárea. En partes con intercalaciones de toba pumítica y bolsones de marga. La resistencia de compresión es de muy baja a baja.</p>



8		Diorita	Eluvio de Diorita: de composición areno arcillosa, de color gris oscuro, con fragmentos rocosos muy agrietados.
			Diorita: de color gris claro hasta gris verdoso y/o gris azulado, con manchas y puntos blancos. Aparece desde meteorizada y fracturada hasta fresca. La resistencia a la compresión media.
9		Gabro	Eluvio de Gabro: de composición areno limo arcilloso, con fragmentos rocosos de diversos tamaños. Su color es gris carmelitoso.
			Gabro: de color gris azulado, desde muy alterado y fracturado con manchas de FeO hasta fresco. Presenta pequeñas grietas rellenas por calcita. En ocasiones aparece formando pequeños cuerpos dentro de la peridotita serpentinizada y la serpentinita. Es de muy baja a baja resistencia a la compresión.
10		Serpentinita	Eluvio de Serpentinita: arena limosa en ocasiones arcillosa, con gran contenido de gravas y fragmentos, generalmente en estado compacto. Su valor varía desde carmelita a gris azulado o verdoso.
			Serpentinita: de color gris azulado, de dureza variable, generalmente fisurada y agrietada, en muchas ocasiones con bolsones de carbonato de calcio. Su resistencia a la compresión es de baja a media.

Fuente: Informe litológico de la ENIA (Empresa Nacional de Investigaciones aplicadas).



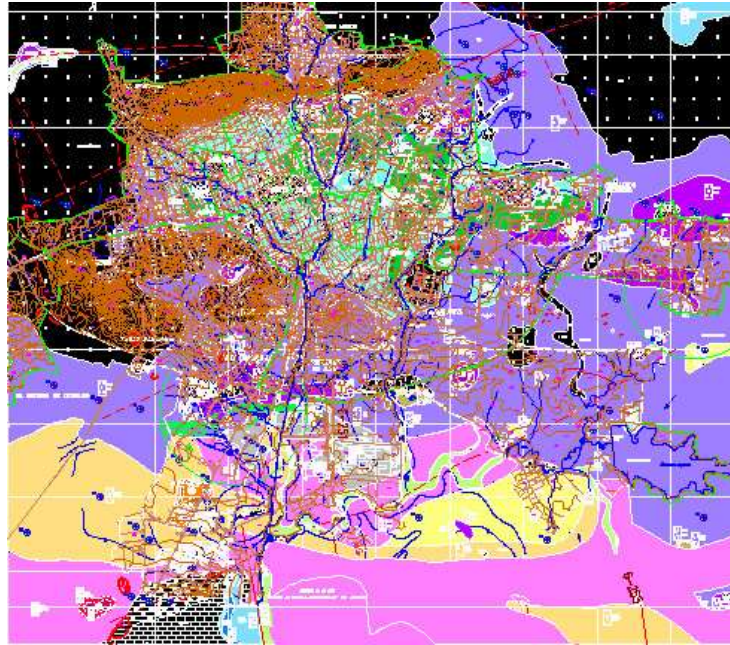


Figura 2.2: Mapa litológico de la ciudad de Holguín. Fuente: Informe litológico de la ENIA (Empresa Nacional de Investigaciones aplicadas).

- Mapas Georreferenciales (Figura 2.3):



Figura 2.3: Mapa Geográfico de la Ciudad de Holguín. Fuente: earth.google.com

- Propuestas de Cuadrículas (Figura 2.4):



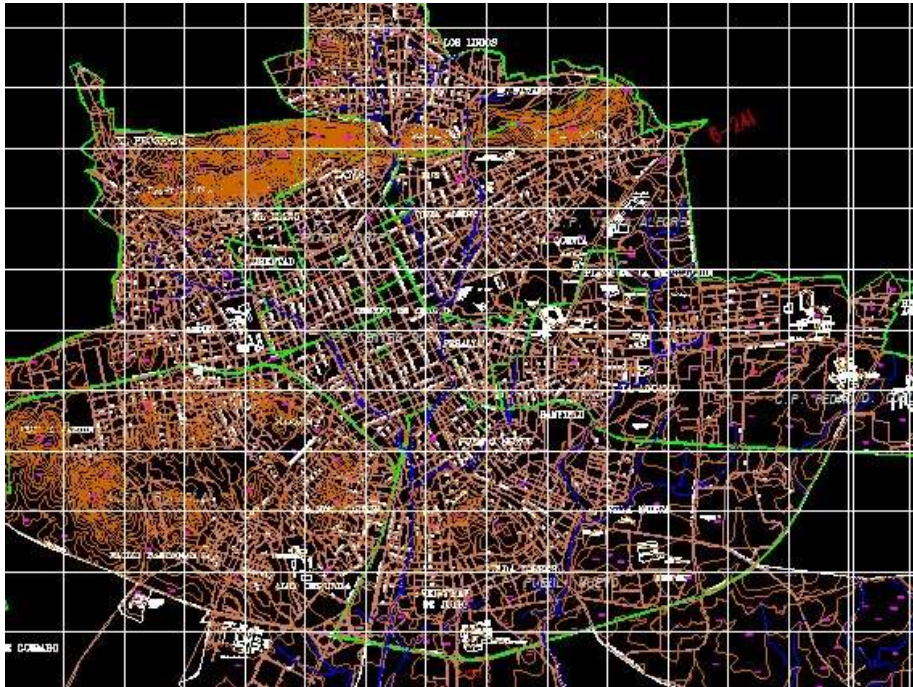


Figura 2.4. Propuesta de cuadrículas. Fuente: Elaboración propia

Se establece un diseño de cuadrícula de aproximadamente 500 metros, ya que no existe áreas con variaciones laterales importantes.

- Equipos:

Se utiliza un sismógrafo triaxial CM-3 de origen japonés de medición de microsismos de fabricación japonesa que consta de tres sensores de alta sensibilidad, uno vertical y dos horizontales con período fundamental de 1 segundo, un panel de amplificación con ganancia variable, y un sistema de adquisición y procesamiento de datos y un software para la transformación de la información de formato analógico digital. Esto hace posible la realización del procesamiento preliminar en el dominio de la frecuencia durante las observaciones de campo, y el procesamiento definitivo en la fase de gabinete (cálculo de los espectros de Fourier y de Potencia para diferentes ventanas temporales), para la estimación de los parámetros de la respuesta dinámica del terreno (amplitudes y períodos predominantes de las oscilaciones).

2. Trabajo de Campo:



- Reconocimiento del área de estudio.
- Ubicar y geo-referenciar cada punto en la cuadrícula.
- Registro del ruido.

Hay que tener en cuenta de manera previa varios aspectos con respecto al equipo antes de realizar las mediciones, los cuales son:

- Orientación correcta
- Nivelación
- Estabilización de los sensores
- Poco o nulo tránsito tanto vehicular como peatonal
- Activación correcta de todos los sensores
- **Aplicación del método MASW:**

Se usa un martillo de 10 kg para generar las ondas sísmicas y para la adquisición de las ondas superficiales se usa de geófonos de altas frecuencias combinados con geófonos de bajas frecuencias (los cuales permiten alcanzar la profundidad necesaria de los 30 metros). Se recomienda realizar varios perfiles de medición en diferentes calles de la ciudad.

3. Trabajo de Gabinete:

- **Descarga de los datos del acelerógrafo para analizar el método de Nakamura:**

El análisis de los datos se debe llevar a cabo por medio de diferentes softwares, a continuación, se explica paso a paso la metodología propuesta para el análisis e interpretación de los datos:

Descarga:

1. Se importan al computador los archivos recolectados con el acelerógrafo.
2. Para lograr la comunicación del acelerógrafo con el computador se debe apoyar en los softwares QuickTalk y QuicLook (software libre de descarga perteneciente a la compañía Kinematics, USA) para visualizar el acelerograma.
3. Los datos se exportan en un único archivo de extensión "EVT", el cual contiene toda la información del registro.



Conversión:

De los archivos descargados con extensión “EVT” se extraen los registros en sus tres componentes (horizontales, verticales y transversal), para poder aplicar mediante el software Degtra A4 (software libre de descarga perteneciente al Instituto de Ingeniería UNAM, México) el método de Nakamura.

Para poder extraer los registros en mención se propone utilizar el programa de conversión “KW2ASC32.exe”

1. Este programa crea cuatro archivos con las siguientes extensiones “001”, “002”, “003” y “SHD”.
2. Las primeras son las componentes de registro horizontal, vertical y transversal respectivamente, y la última contiene información de configuración con la que se realizó la medición en campo.
3. Así mismo en este proceso estos archivos se convierten automáticamente a formato ASCII. Este proceso se realiza para todos los registros a analizar.

• **Ajuste de acelerogramas y aplicación del método de Nakamura:**

Con la ayuda del software “Degtra A4”, se procede a importar cada una de las componentes de cada registro:

1. Abrir tres ventanas simultáneas
2. Leer los tres acelerogramas obtenidos en el paso de conversión de cada registro en su ventana de conversión.

Para cada una de las ventanas, se realizan los siguientes procesos:

1. Se realiza la selección de las partes de la señal que contienen la mayor cantidad de ruido estable o estacionario, y el descarte de las partes que contienen el ruido puntual producido por fuentes singulares, o muy locales.
2. Se corta la señal estable para eliminar el ruido puntual.
3. Se realiza una corrección de línea base, que permita corregir la posible descalibración del sensor del acelerógrafo.



4. Aplicar estos procedimientos a las tres ventanas con la señal seleccionada, se calcula el espectro de Fourier para cada una de las componentes de señal.
5. Se calculan los cocientes (H/V) utilizando los espectros de Fourier.

Los archivos de texto obtenidos de Degtra A4 se copian para visualizarse en Microsoft Excel y se procede a realizar lo siguiente:

1. Se ordenan los datos para crear una tabla que contenga la frecuencia, las dos razones espectrales y el promedio de las razones espectrales, este proceso se repite para cada medición estudiada de cada punto.
2. Para los intereses de este estudio se grafican solamente los datos con frecuencias entre 0 y 20 Hz, para poder apreciar de mejor manera el comportamiento de la gráfica en las frecuencias que se encuentren entre 1 y 10 Hz.
3. Con los datos de la tabla obtenida, se realiza una gráfica de dispersión lineal semilogarítmica.
4. Se ubica el pico más alto de la gráfica de cociente espectral, lo que representa la frecuencia fundamental del suelo.
5. Ya ubicado el valor en Hz, se hace el inverso multiplicativo para obtener el período de vibración del suelo ($T_s = 1/f$).

Este proceso se debe de realizar para cada medición seleccionada y se deben de analizar tres mediciones por cada punto de estudio, obteniendo una tabla final que contiene el punto de estudio, las tres frecuencias obtenidas y el promedio de ellas.

- **Mapas de microzonificación de isoperíodos y frecuencias:**

Con la ayuda del software libre ArcMap (de la compañía ArcGis), se interpolan (Kriging) las frecuencias de los puntos, con su respectivo geo-posicionamiento, en base a la frecuencia promedio de cada punto.

El resultado de esta interpolación, es el mapa del área estudiada con pequeñas zonas con similar valor de frecuencia. Los mapas finales son: el mapa de microzonificación sísmica con valores de frecuencia en Hz, y el mapa de microzonificación sísmica con



valores de períodos fundamentales en segundos (s), y se representan los isoperíodos con sus puntos georreferenciados.

Análisis de los datos mediante el método de MASW:

El procedimiento para analizar el método de MASW consiste en tres pasos:

1. Estimar la curva obtenida para los diferentes perfiles realizados

- Análisis de dispersión: genera una imagen de dispersión (a menudo llamado sobretono) a partir de un registro de campo mediante el uso de un método de transformación de campo de ondas 2-D adecuado.
- Extracción de la curva de dispersión: extraer una curva de dispersión de modo fundamental (M_0) de cada imagen de dispersión generada en el paso anterior.

2. Aplicar la inversión de la curva de dispersión:

Con esto se intenta encontrar un modelo 1-D de velocidad de onda de corte (V_s). La salida final es un perfil de velocidad 1-D (V_s) para cada registro de campo. Si el conjunto de datos de entrada contenía registros de campo obtenidos utilizando un receptor estacionario matriz, entonces solo habrá un perfil 1-D (V_s) obtenido como salida.

Por otro lado, si se obtienen varios registros de campo, es sucesivamente diferente las ubicaciones a lo largo de una línea de levantamiento, se usaron como un conjunto de datos de entrada, luego se generarán múltiples perfiles de velocidad 1-D (V_s) al final. En este caso, el esquema de interpolación se utiliza para generar una sección transversal de velocidad 2-D (V_s) como salida.

3. Determinar el perfil de velocidad de onda de corte V_s :

Se determina el perfil de velocidad de onda de corte V_s , modificando adecuadamente el espesor h , el corte V y las velocidades de onda de compresión V_p (o en alternativa a V_p es posible modificar el parámetro de Poisson U , la densidad de masa ρ de todas las capas consideradas en el modelo de sitio. El modelo de sitio y, por lo tanto, el perfil de la onda de corte se puede determinar mediante un procedimiento de prueba y error, o un procedimiento automático, o una combinación de ambos.



Mapas Vs30:

Una vez que se ha determinado el perfil de velocidad de la onda de corte, se puede calcular el Vs30 equivalente y, por lo tanto, se puede establecer la clase sísmica del sitio.

2.3 Validación de las concepciones respecto al esquema de trabajo que se elabora.

En este epígrafe, se exponen los resultados de la valoración realizada por los especialistas seleccionados, para la valoración de la pertinencia del esquema de trabajo que se elabora en la presente investigación. El documento para la validación del programa, se le envió a un total de 5 especialistas, de ellos respondieron 4 para un 80%. El 50 % de los que respondieron tienen más de 20 años de experiencia y los demás más de 10, todos tienen el grado científico de Máster.

El instrumento evaluador para la recogida de criterios y el procesamiento de los datos, se basa en el método de escalonamiento de Likert (anexo 1). El cual se estructura en una escala tipificada de la siguiente forma: Muy Acertado (MA); Acertado (A); Regular (R) (ni acertado ni desacertado); Desacertado (D); Muy Desacertado (MD). A esta escala se le asignan indicadores empíricos o conceptos abstractos. Este método consiste en un conjunto de ítems presentados en forma de afirmaciones o juicios ante los cuales se pide la reacción de los sujetos a los cuales se les pide colaboración. Las escalas que se usarán son las siguientes:

A continuación, se muestran las respuestas a los ítems emitidas por los especialistas y los resultados cuantitativos de cada uno, así como las sugerencias consideradas en la modificación de la propuesta de esquema de trabajo:

1. Calidad y organización del esquema de trabajo. El 100 % de los especialistas respondió con la categoría muy acertado y no emitieron sugerencias para su modificación.
2. Existe lógica en la secuencia de trabajo. El 100 % de los especialistas respondió con la categoría muy acertado y no emitieron sugerencias para su modificación.



3. Contiene los pasos esenciales para realizar la microzonificación. El 100 % de los especialistas respondió con la categoría muy acertado y no emitieron sugerencias para su modificación.
4. Implica la utilización de métodos actualizados de medición. El 25 % de los especialistas respondió con la categoría acertado y se emite tener en cuenta además otros métodos.
5. Implica la utilización de métodos actualizados de procesamiento de datos. El 25 % de los especialistas respondió con la categoría acertado y se emite tener en cuenta además otros métodos.
6. ¿Considera que es un esquema de trabajo completo? El 100 % de los especialistas respondió con la categoría muy acertado y no emitieron sugerencias para su modificación.

Conclusiones del capítulo

- Se elabora el esquema de trabajo para realizar la microzonificación sísmica, según las peculiaridades socio-económicas, sismológicas y geotécnicas de la ciudad de Holguín.
- A través de criterio de expertos se logra validar la propuesta de esquema de trabajo con evaluaciones de muy acertado y acertado en el 100% de las mismas.



CONCLUSIONES GENERALES

1. Mediante el análisis del marco teórico referente a la microzonificación sísmica se puede determinar los aspectos esenciales de cada método, como son el lugar de aplicación, el costo del equipamiento y la forma de procesamiento de los datos; del cual se evidencia que los métodos más idóneos para incluir en el esquema de trabajo son los métodos de Nakamura y de MASW.
2. Se elabora un esquema de trabajo específico para realizar la microzonificación sísmica en la ciudad de Holguín, donde se tienen en cuenta el tipo de sismicidad de la zona y las tecnologías con las que se dispone en la región.
3. A partir de la consulta a especialistas se logra valorar la pertinencia del esquema de trabajo propuesto.



RECOMENDACIONES

Al Departamento de Construcciones de la Universidad de Holguín:

1. Socializar con el CENAIIS este esquema de trabajo para realizar la microzonificación sísmica en la ciudad, para aplicarlo en futuros estudios sobre riesgo sísmico.
2. Continuar el vínculo con la oficina del CENAIIS de Holguín para realizar más investigaciones de esta índole con el fin de lograr una mejor gestión del riesgo sísmico en la ciudad.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro, A., Goula X., Susagna T., Pujades L.G., Canas J.A. Navarro M y Sánchez J. (1998). "Estimación del Período Predominante del Suelo a partir de Microtemblores. Aplicación a Barcelona. IX Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. Aguadulce Almería, España.
- Allen, T.I., and Wald, D.J. (2007). "Topographic slope as a proxy for global seismic site conditions (Vs30) and amplification around the globe: U.S. Geological Survey". U.S. Geological Survey Open-File Report.
- Allen, T.I., and Wald, D.J. (2009). "On the use of high-resolution topographic data as a proxy for seismic site condition (Vs30)". Bulletin of the Seismological Society of America.
- Alonso, J (1992). Microzonificación sísmica de áreas urbanas ¿Qué es y para qué sirve?
- Alvarez (1970) Atlas Nacional de Cuba.
- Alvarez, L. y Chuy, J. (1985): "Iseismal model for Greater Antilles". Proceedings of the 3rd. International Symposium on the Analysis of Seismicity and on Seismic Risk, Liblice Castle, Czechoslovakia.
- Alvarez y Bune (1985). Sacudibilidad sísmica de Cuba oriental.
- Alvarez (1991). Peligrosidad sísmica de Cuba. Una aproximación a la regionalización sísmica del territorio nacional. Revista Geofísica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH).
- Aki K. (1957). "Space and time spectra of stationary scholastic waves, with special reference to microtremors". Bulletin of the Earthquake Research Institute of Tokio University.
- Aki K. (1965). "A note on the use microseisms in determining the shallow structure of the Earth's crust". Geophysics.



- Bard, P.Y. (1999). "Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?". Irikura, K., Kudo, K. Okada, H. Satasini, T. (Eds). The Effects of Surface Geology on Seismic Motion. Balkema, Rotterdam.
- Bettig, B., Bard, P.Y., Scherbaum, J., Riepl, F., Cotton, C., Cornou, C., and Hatzfeld, D. (2001). "Analysis of dense array noise measurements using the modified spatial auto-correction method (SPAC): application to the Grenoble area".
- Brown (2002). "Comparison of Shear-Wave Slowness Profile at 10 Strong-Motion Sites from Noninvasive SASW Measurements and Measurements Made in Boreholes". Bulletin of Seismological Society of America.
- Büyüksaraç, A., Bektaş, Ö., Yılmaz, H., and Arisoy, M.Ö. (2013). "Preliminary seismic microzonation of Sivas city (Turkey) using microtremor and refraction microtremor (ReMi) measurements".
- Chávez, J., Rodríguez M. y Stephenson W.R. (2006). "Subsoil Structure Using SPAC Measurements along a Line". Bulletin of the Seismological Society of America.
- Chaves-García (2014). "Subsoil structure and site effects: A comparison between results from SPAC and HVSR in sites of complex geology". Soil Dynamics and Earthquake Engineering.
- CENAI, CITMA, (2019). Estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgos de afectaciones por sismo. Grupo multidisciplinario provincial, CENAI, CITMA, Holguín.
- Chuy Rodríguez, T. J (1980). La actividad sísmica de Cuba basada en datos históricos. Investigaciones Sismológicas en Cuba.
- Chuy (1983). Peligrosidad sísmica en Cuba.
- Chuy y Alvarez (1995). Mapa de peligrosidad sísmica de Cuba para la nueva norma sísmica de la República de Cuba. CENAI.
- Chuy, T.J (1999). "Macrosísmica de Cuba y su utilización en los estimados de Peligrosidad y Microzonación Sísmica". Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Geofísicas. Fondos del MES, IGA y Cenais.



- Comisión Nacional de Nombres Geográficos (2000). Diccionario geográfico de Cuba. Ediciones GEO, 386 p.
- Despaigne (2002). Estimados de peligrosidad sísmica a partir de un nuevo enfoque geodinámico de la región Bartlett – Caimán; Nuevas Investigaciones sismológicas en Cuba.
- Douglas, J., Gehl, P., Bonilla, L.F., Scotti, O., Réginer, J., Duval, A.M., and Bertrand, E. (2009). “Making the Most of Available Site Information for Empirical Ground-Motion Prediction”. Bulletin of the Seismological Society of America.
- Eker, A.M., Akgün, H., and Koçkar, M.K. (2012). “Local site characterization and seismic zonation study by utilizing active and passive surface wave methods: A case study for the northern side Ankara, Turkey”. Engineering Geology.
- Enomoto, T., Kuriyama, K., Navarro, M., and Iwatate, T. (2002). “Site-effects evaluation by H/V spectra comparing microtremor with strong motion records observed at ground surface and basement using borehole” 12th European Conference on Earthquake Engineering. London.
- Euroseismod. 1998. Development and experimental validation of advanced modeling techniques in engineering seismology and earthquake engineering. Final report, project ENV4-CT96-0255.
- Foinquinos R, (1995). “Dynamic Nondestructive Testing of Pavements” Civil Engineering Department. The University of Texas at Austin.
- Gailler, A., Charvis, P., y Flueh, F.R., (2007). “Segmentation of the Nazca and South American plates along the Ecuador subduction zone from wide angle seismic profiles”
- García Peláez, J, (2007). Estimados de peligrosidad sísmica con el error asociado para Cuba, y cálculo de pérdidas para la ciudad de Santiago de Cuba usando técnicas SIG.



- García-Jerez, A., Navarro, M., Alcalá, F.J., Luzón, F., Pérez-Ruiz, J.A., Enomoto, T., Vidal, F., and Ocaña, E (2007). "Shallow velocity structure using joint inversion of array and H/V spectral ratio of ambient noise: the case of Mula town (SE of Spain)". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- García-Jerez. A. (2010). "Desarrollo y evaluación de métodos avanzados de exploración sísmica pasiva". Tesis Doctoral. Universidad de Almería.
- Gazetas G. (1991). "Foundation Vibrations: Foundation Engineering Handbook". 2nd Edition Hsai-YangFang, and Editor.
- Gonzalo Ramos (2014), "definición de sismo" Enciclopedia Asigna Edición #19).
- González Raynal, Bertha E. (1995). La microzonificación sísmica y su rol en la prevención de los desastres sísmicos en Cuba.
- González Raynal, Bertha E. (2006). Utilización de los mapas de microzonificación sísmica en el análisis de la vulnerabilidad y la evaluación del riesgo sísmico de áreas urbanas en Cuba.
- Grasso, S., y Maugeri, M. (2014). "Seismic Microzonation studies for the city of Ragusa (Italy)". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- Heath K. Louie J. N. Biasi G., Pancha A. y Pullammanappallil S. (2006). "Blind test of refraction microtremor analysis against synthetics and borehole data". SSA Meeting: 100th Anniversary Earthquake Conference, Commemorating The 1906 San Francisco Earthquake.
- Heisey, J (1982). "Determination of in situ shear wave velocities from spectral analysis waves".
- Huerta López C. I., Stokoe K. H., Pulliam J., Roesset J. M. y Valle Molina C. (2005). "Modelling of seafloor soft marine sediments and spectral characteristics of earthquakes recorded on the Gulf of Mexico". *Journal of Offshore Mechanics and Artic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers. ASME (ISSN 0892-7219).



- Hough Love, A. E. (1911) "Algunos problemas de geodinámica" publicado por primera vez en 1911 por Cambridge University Press y publicado de nuevo en 1967 por Dover, Nueva York, EE.UU.
- Ivanov, J., Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J (2000). "Mapping Poisson's Ratio of unconsolidated materials from a joint analysis of surface-wave and refraction events". Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2000).
- Ivanov, J., Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., and Overtone, R. (2001). "Modal separation before dispersion curve extraction by MASW method" Proceedings of the SAGEEP 2001. Denver, Colorado.
- J. García-Mayordomo y J.L Giner-Robles; (2006). "Definición de zonas sismogénicas en base al gradiente geotérmico, resistencia y profundidad del límite frágil-dúctil en la corteza superior. Aplicación metodológica para el cálculo de la peligrosidad sísmica en el Sureste de España".
- James, N., and Sitharam, T.G. (2014). "Assessment of Seismically Induced Landslide Hazard for the State of Karnataka Using GIS Technique".
- Jibson, R.W., Harp, E.L., and Michael, J.A. (2000). "A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps". Engineering Geology.
- Kanai, K (1957). "The requisite conditions for predominant vibration of ground" Bull Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.
- Kanli, A.I., Tildy, P., Pronay, Z., Pinar, A., and Hermann, L. (2006). "Vs30 mapping and soil classification for seismic site effect evaluation in Dinar region, SW Turkey". Geophysical Journal International.
- Kausel E. y J. M. Roesset (1981). "Stiffness matrices for layered soils" Bulletin of Seismological Society of America.



- Kagawa, T., and Group for Spanish-Japanese joint work on microzonation of Granada basin (1999). "Microtremor array observation in the Granada basin, southern Spain". Joint study on seismic microzonation in Granada basin, Spain, Tokyo Institute of Technology.
- Konno, K., and Ohmachi, T. (1998). "Ground-motion characteristic estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremors". Bulletin of the Seismological Society of America.
- Lacoss, R.T., Kelly, E.J., and Nafi, T.M. (1969) "Estimation of seismic noise structure using arrays". Geophysics.
- Lamontagne, M., Thomas, M., Silliker, J., and Jobin, D. (2011). "Detailed gravity survey to help seismic microzonation: Mapping the thickness of unconsolidated deposits in Ottawa, Canada". Journal of Applied Geophysics.
- López Avalos, J; Mejía Carrillos, J; Vega, N (2008). "Aplicación del método de refracción sísmica para la determinación de velocidades de Ondas P" Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador, San Salvador.
- Louie, J.N. (2001). "Faster, better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays". Bulletin of the Seismologic Society of America.
- Macau Roig, A;(2008). Microzonación sísmica. Contribución a los estudios de peligrosidad sísmica a escala local en zonas rurales y urbanas.
- Mahajan, A.K., Slob, S., Ranjan, R., Sporry, R., Champati ray, P.K., and van Westen, C. (2007). "Seismic microzonation of Dehradun City using geophysical and geotechnical characteristics in the upper 30 m of soil column".
- Martínez Pagán (2007): "Prospección Geofísica-2". Métodos Sísmicos. Universidad Politécnica de Cartagena.



- Martínez-Pagán, P., Navarro, M., Pérez-Cueva, J., Alcalá F.J., García-Jerez, A., Sandoval-Castaño, S., and Alhama, I. (2012). "Comparative study of SPAC and MASW methods to obtain the Vs30 for seismic site effect evaluation in Lorca town, SE Spain". Near Surface Geoscience 2012-8th European Meeting of environmental and Engineering Geophysics, Paris, France.
- Martínez-Pagán, P., Navarro, M., Pérez-Cueva, J., Alcalá F.J., García-Jerez, A., and Sandoval-Castaño, S. (2014). "Shear-wave velocity based seismic microzonation of Lorca city (SE Spain) from MASW analysis". Near Surface Geophysics.
- Miller, R.D., Xia, J., and Park, C.B. (1999). "Using MASW to map bedrock in Olathe, Kansas". Open file report-Kansas survey.
- Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (2008). "Perspectivas de Medio Ambiente Urbano – GEO Holguín"
- Nakamura, Y. (1989). "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface" Quarterly Report of Railway Technical Institute (RTRI).
- Narciso J., Vilanova S., Carvalho J., Pinto C., Lopes I., Nemser E., Oliveira C., and Borges J. (2013). "Site-condition map for Portugal based on Vs30 values and evaluation of the applicability of Vs30 proxies". Proceedings of the European Geosciences Union Assembly, Vienna.
- Navarro, M., García-Jerez, A., Alcalá, F.J., Vidal, F., Enomoto, T., Luzón, F., and Creus, C (2008). "Vs30 structure of Lorca town (SE Spain) from ambient noise array observation" Proceeding 31st General Assembly of the European Seismological Commission (ESC). Hersonissos, Crete, Greece.
- Navarro, M., García-Jerez, A., Alcalá, F.J., Vidal, F., and Enomoto, T. (2014). "Local site effect microzonation of Lorca town (Southern Spain)". Bulletin of Earthquake Engineering.



- Nazarian, S y Stokoe, H (1986). "Near-surface profiling of geotechnical site by Surface-wave method".
- Nguyen, L.M., Lin, T.L., Wu, Y.M., Huang, B.S., Chang, C.H., Huang, W.G., Le, T.S., Nguyen, Q.C., and Dinh, V.T. (2012). "The first peak ground motion attenuation relationships for North of Vietnam". Journal of Asian Earth Sciences.
- Nogoshi, M., and Igarachi, T. (1971). "On the amplitude characteristic of microtremor (part 2)". Jour. Seism. Soc. Japan.
- Oficina Nacional de Estadísticas e Información (ONEI 2016). "Anuario Estadístico Holguín 2015". Edición 2016.
- Okada, H. (2003). "The microtremor survey method (translated by Koya Suto)". Society of Exploration Geophysicist.
- Okada H. (2006). "Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method". Exploration Geophysics.
- Park, C.B. (1995). "Characterization of geotechnical sites by Multichannel Analysis of Surface Waves". Proceedings of the Korean Ground Society, 95th annual meeting: Seoul, Korea.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. (1999). "Multichannel analysis of surface waves". Geophysics.
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., and Ivanov, J. (2001). "Characterization of geotechnical sites by Multichannel Analysis of Surface Wave (MASW) method". Tenth International conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering (SDEE): Philadelphia.
- Park, C.B., and Miller, R.D., (2008). "Roadside Passive Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)". Journal of Environmental and Engineering Geophysics.
- Pelekis, P, C., y Athanasopoulos, G.A. (2013). "Seismic Microzonation of Chania, Crete (Greece) based on SASW measurements and non-linear site response analyses" Soil Dynamics and Earthquake Engineering.



- Pérez-Cueva, J; (2015). Desarrollo e implementación de métodos avanzados de exploración sísmica activa y pasiva, y del método del gradiente topográfico en el análisis de microzonificación sísmica de la península Ibérica.
- Pérez-Rivas e Hidalgo-Mayo (2016). “Regionalización climática de la provincia de Holguín”. Revista Cubana de Meteorología.
- Pérez Santiesteban, I. (2012). “Caracterización geotécnica de los suelos de Madrid mediante la técnica ReMi (Refraction Microtremor)”. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid.
- Pilz, M., Parolai, S., Picozzi, M., and Zchau, J. (2011). “Evaluation of proxies for seismic site conditions in large urban areas: The example of Santiago de Chile”
- Pullammanappallil S., Honjas B., Louie J., Siemens J. A. y Miura H. 2003. Comparative Study of the Refraction Microtremor (ReMi) Method: Using Seismic noise and standard P-wave refraction equipment for deriving 1-D S wave profiles”. 6th International SEG-J Conference. Tokyo, Japan.
- Rayleigh, L (1885). “On waves propagated along the plane Surface of an elastic solid”
- Reynolds, J. (1997). “An introduction to applied and environmental geophysics” Jhon Wiley and Sons, London.
- Rix (1991). “Experimental study of factors affecting the spectral analysis of surface waves method”.
- Robles Mendoza, A., Jimenez Velásquez, J.C., y Ramírez Álvarez, E (2017). “Metodología para realizar estudios de microzonificación sísmica”. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Coordinación Nacional de Protección Civil de México, Secretaría de Gobernación, México.
- Rodríguez (1997). Estimaciones probabilísticas de la peligrosidad sísmica en Cuba.
- Rubio, M (1985). La evaluación de la amenaza sísmica para la República de Cuba. 3rd Simposio Internacional “Análisis de Sismicidad y Riesgo Sísmico”, República Checa, Praga.



- Sánchez Salinero (1987). "Analytical evaluation of variables affecting surface wave testing of pavements".
- Sandoval Gómez, V y Vera Catalán, M (2013). Estudio de la robustez de la estimación de la técnica H/V de Nakamura para estudios de caracterización dinámica de suelos.
- Scott (2006). "Shallow Shear Velocity and Seismic Microzonation of the Urban Las Vegas, Nevada, Basin" Bulletin of the Seismological Society of America.
- Semblat y Pecker (2009). "Waves and Vibrations in Soils: Earthquake, traffic, shocks, construction works" IUSS Press. Pavia, Italy.
- SESAME, (2004). European research project, deliverable. "Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations. Measurements, Processing and Interpretation".
- Significados.com. Disponible en: <https://www.significados.com/sismo/>
- Sitharam, T.G., Kolathayar, S., and James, N. (2014). "Probabilistic assessment of surface level seismic hazard in India using topographic gradient as a proxy for site condition". Geoscience Frontiers, In press.
- Socco, L.V., Foti, S., and Boiero, D. (2010). "Surface-wave analysis for building near-surface velocity models, established approaches and new perspectives". Geophysics.
- Stokoe y Woods (1972). "In situ shear wave velocity by Cross-hole method". Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division.
- Tapia Herrera, R (2009). "Estudio comparativo de los métodos SASW, SPAC y H/V para la estimación in-situ de propiedades del terreno", Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México.
- Tavalló, F., Cascante, G., and Pandey, M. (2009). "Experimental and numerical analysis of MASW tests for detection of buried timber trestles". Soil Dynamics and Earthquake Engineering.



- Teixido (2000). "Caracterización del Subsuelo Mediante Sísmica de Reflexión de Alta Resolución" Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona.
- Woods, R.D. (1978). "Measurements of dynamic soil properties". Proceedings of the Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference, Geotechnical Engineering Division Specialty Conference, Pasadena, EE.UU.
- Woods, R.D. (1994). "Borehole Methods in Shallow Seismic Exploration: Geophysical Characterization of Sites". Volume prepared by ICSMFE. Richards Woods Ed. New Delhi, India.
- Xu, C., and Butt, S.D. (2006). "Evaluation of MASW techniques to image steeply dipping cavities in laterally inhomogeneous terrain". Journal of Applied Geophysics.



ANEXOS

Anexo 1 Encuesta por juicio de expertos para validar el esquema de trabajo para la microzonificación sísmica en la ciudad de Holguín.

No	Indicadores	Escalas				
		MA	A	R	D	TD
1	Calidad y organización del esquema de trabajo					
2	Existe lógica en la secuencia de trabajo					
3	Contiene los pasos esenciales para realizar la microzonificación.					
4	Implica la utilización de métodos actualizados de medición					
5	Implica la utilización de métodos actualizados de procesamiento de datos					
6	¿Considera que es un esquema de trabajo completo?					

Legenda: Muy Acertado (MA); Acertado (A); Regular (R) (ni acertado ni desacertado); Desacertado (D); Muy Desacertado (MD).

Sugerencias:

