



**MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO DE MOA
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE GEOLOGIA Y MINERIA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

MICROZONACIÓN SÍSMICA DEL SECTOR URBANO DE MOA

Tesis en opción al título académico de Máster en Geología

Ing. Raquel Vinardell Peña

“Año 60 de la Revolución”

Moa, 2018



**MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO DE MOA
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE GEOLOGIA Y MINERIA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

MICROZONACIÓN SÍSMICA DEL SECTOR URBANO DE MOA

Tesis en opción al título académico de Máster en Geología

Ing. Raquel Vinardell Peña

Tutor: Dr. C. Rafael Miguel Guardado Lacaba

“Año 60 de la Revolución”

Moa, 2018

PENSAMIENTO

"Descubrir con precisión lo que no ha sucedido ni va a suceder es el privilegio inapreciable de todo hombre culto y de talento."

Oscar Wilde

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Declaro que soy autor(a) de este trabajo de tesis y que autorizo al Instituto Superior Minero Metalúrgico, a hacer uso del mismo, con la finalidad que estime conveniente.

Firma: _____

AGRADECIMIENTOS

A Dios

A todos los que permitieron la realización de esta investigación

DEDICATORIA

A mi papá

RESUMEN

Los terremotos son fenómenos geológicos que provocan un costoso impacto económico, social y ambiental. Su efecto devastador puede ser influenciado por las condiciones ingeniero geológicas particulares de los suelos sobre los que se asientan los emplazamientos poblacionales. Para el caso particular del sector urbano de Moa no existen estudios de microzonación sísmica de los suelos. Es por esto que se plantea como objetivo de la presente investigación realizar una microzonación sísmica del sector urbano de Moa en función del comportamiento sismo resistente de los suelos. Para el cumplimiento de este objetivo se aplica un procedimiento que parte del análisis detallado de las condiciones ingeniero geológicas como base para la identificación de los escenarios de peligro sísmico. Los parámetros empleados en la microzonación sísmica están basados sobre un sistema de bases de datos y de información geográfica, que permite la actualización constante del grado de estudio sísmico de la zona de estudio. Los resultados alcanzados permiten dividir el sector urbano de Moa en tres zonas de amplificación. Cada una de ellas es caracterizada desde el punto de vista ingeniero-geológico y de sus propiedades dinámicas. En particular, la zona 1 presenta los parámetros dinámicos más favorables para la amplificación de las ondas sísmicas. La microzonación sísmica obtenida constituye una herramienta de consulta en el futuro ordenamiento urbano de Moa.

ABSTRACT

Earthquakes are geological phenomena that cause a costly economic, social and environmental impact. Its devastating effect can be influenced by the particular geological engineer conditions of the soils on which the population sites are based. For the particular case of the urban sector of Moa there are no studies of seismic microzonation of soils. This is why the objective of the present investigation is to carry out a seismic micro-zoning of the Moa urban sector based on the earthquake-resistant earthquake behavior. For the fulfillment of this objective a procedure is applied that starts from the detailed analysis of the geological engineer conditions as a basis for the identification of the seismic hazard scenarios. The parameters used in the seismic microzonation are based on a system of databases and geographic information, which allows the constant update of the seismic study degree of the study area. The results achieved allow the urban sector of Moa to be divided into three amplification zones. Each of them is characterized from the engineer-geological point of view and its dynamic properties. In particular, zone 1 presents the most favorable dynamic parameters for the amplification of seismic waves. The obtained seismic microzonation constitutes a tool of consultation in the future urban ordering of Moa.

ÍNDICE

Introducción.....	1
CAPITULO I. Fundamentación teórica y conceptual para el estudio del efecto de sitio en las investigaciones ingeniero geotécnicas de la ciudad de Moa.	6
1.1. Introducción	6
1.2. Propagación de las ondas sísmicas.	6
1.3. Efecto de la Topografía Superficial.....	10
1.4. Metodologías para el estudio del efecto de sitio.	12
1.5. Estado actual de la temática en Cuba	14
1.6 Estado actual de la temática para el municipio de Moa	17
CAPÍTULO II. CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES INGENIERO GEOLÓGICAS DEL TERRITORIO DE MOA.	19
2.1. Introducción	19
2.2. Características geológicas del área de estudio.	19
2.3. Características hidrogeológicas.....	21
2.4. Geomorfología del Territorio	22
2.5. Caracterización morfotectónica.	24
2.6. Marco sismo tectónico	26
CAPÍTULO III. ELEMENTOS METODOLÓGICOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE LOS SUELOS	34
3.1. Introducción	34
3.2. Búsqueda de información	34
3.3. Clasificación de los suelos.....	37
3.4. Determinación de la rigidez sísmica	37
3.5. Potencial de licuefacción	38
3.6. Zonación en función del periodo dominante aplicando ecuaciones empíricas	39
CAPITULO IV. MICROZONACIÓN SÍSMICA DEL SECTOR URBANO DE MOA	41

4.1. Introducción	41
4.2 . Validación de los datos ingeniero geológicos como base para la microzonación sísmica.....	42
4.3. Clasificación ingeniero geológica y geotécnica de los suelos como base para la micro zonación sísmica del sector urbano de Moa.	45
4.4. Análisis de la rigidez sísmica.	49
4.5. Aumento de la magnitud sísmica por el tipo de suelo y profundidad de yacencia de las aguas subterráneas.....	50
4.6. Evaluación del potencial de licuefacción.....	52
4.7. Zonificación en función del periodo dominante considerando el espesor de los suelos y la velocidad de ondas transversales.....	53
4.8. Microzonación sísmica del sector urbano de Moa. Integración de los resultados.	55
CONCLUSIONES	59
RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFIA	62
ANEXOS	71

Introducción

Los terremotos son fenómenos geológicos, que provocan un costoso impacto económico, social y ambiental. Las condiciones ingeniero geológicas determinan el efecto generador del riesgo de desastres sísmicos. Factores como la densidad poblacional y el tipo de infraestructura son determinantes en las situaciones de vulnerabilidad sísmica. La constitución geológica de las zonas urbanas en la actualidad juega un papel importante para el estudio del comportamiento suelo-estructura ante el efecto del sismo. La naturaleza y la distribución de los daños que se pueden producir en las infraestructuras con la ocurrencia de un terremoto, está muy influenciada por la respuesta del terreno frente a cargas cíclicas, como consecuencia de lo cual se produce una modificación de la señal sísmica (Aki, 1988, Seed et al., 1997).

La modificación de esta señal sísmica debida a la influencia de las condiciones ingeniero geológicas, se conoce como efecto de sitio y consiste en la amplificación de dicha señal en varios órdenes de magnitud. Las variaciones de efectos de sitio de los territorios urbanos representan una necesidad de estudio con el fin de conocer el movimiento del terreno ante sismos de gran envergadura y prever las medidas para evitar cualquier tipo de desastre por sismo.

Un estudio completo del efecto de sitio requiere considerar todos los aspectos además de las características de la señal sísmica (composición, dirección de la radiación incidente etc.). Sin embargo, dada la complejidad del fenómeno, en muchas ocasiones los estudios se realizan asumiendo simplificaciones y considerando solamente alguno de los aspectos anteriormente mencionados. En el presente trabajo se estudia únicamente el efecto sitio en lo que se refiere a la amplificación de la señal sísmica, debido a las características geológicas y la composición litológica de las formaciones superficiales

La presencia de terrenos, considerados geotécnicamente como blandos, próximos a la superficie del terreno produce un aumento considerable de los daños generados por terremotos en las infraestructuras situadas sobre ellos, al condicionar la amplificación de las ondas sísmicas en un rango de periodos de vibración (períodos altos) de los materiales, que coincide con el periodo de vibración de las estructuras. La respuesta y la magnitud de esa amplificación de la señal están controladas principalmente por las propiedades geotécnicas de los materiales geológicos, especialmente por sus

características dinámicas, así como el espesor de las capas y la profundidad a la que se encuentra el sustrato rocoso, (Aki,1988, Borchardt, 1994, Seed et al., 1997).

En el 2010 la ciudad de Puerto Príncipe fue sacudida por un sismo de gran intensidad (7 en la escala de Richter) que provocó el mayor desastre sísmico del continente y de lo que va de siglo. Este terremoto ha sido un ejemplo de estudio para la relación suelo-estructura. Basta decir que las mayores afectaciones a las obras de mayor envergadura, como el palacio presidencial, la catedral, el banco y el hotel Montana, colapsaron en su totalidad como se muestra en la Figura 1, porque se asentaron sobre suelos débiles y licuables. Quedó evidenciada la falta de previsión, la pobre gestión de riesgo y la falta de un adecuado programa de reducción de vulnerabilidad y riesgo ante la ocurrencia de estos fenómenos geológicos.

Actualmente uno de los factores que genera alto riesgo en las urbanizaciones es el descontrol y la falta de un ordenamiento territorial que responda a la sismicidad del medio. En Haití se comprobó que las obras con mayor nivel de colapso fueron aquellas construidas sobre un suelo arenoso arcilloso flexible, con un nivel freático somero que provocó la amplificación de las ondas sísmicas y la destrucción de edificaciones sin criterios sismo-resistente.



Figura 1. Palacio de Gobierno de Puerto Príncipe Haití, B) Banco de Puerto Príncipe. Fotos de Osiris de León enero 2010

Desde el punto de vista de la actividad sísmica la región nororiental de Cuba es un área con actividad sísmica clasificada de importante a moderada, con la existencia de varias fallas activas. La ciudad de Moa, con una población aproximadamente de cien mil habitantes y un alto desarrollo minero metalúrgico, es una de las más importantes del país. A partir de la década del 90, se ha registrado una sismicidad significativa sin antecedentes en los registros histórico e instrumental hasta esa fecha. A esta problemática se le suma el rápido crecimiento de la población situadas

mayoritariamente sobre depósitos lateríticos y friables arenosos arcillosos en los que se pueden dar fenómenos de efecto de sitio, no solo de amplificación de la señal, sino también de licuefacción. De esto se desprende como **problema de la investigación** la necesidad de realizar una microzonación sísmica en el sector urbano de Moa a partir del análisis del comportamiento sismo resistente de los suelos del área de estudio.

Objeto de estudio: Microzonación sísmica del sector urbano de Moa.

Campo de acción: Particularidades ingeniero geológicas de los suelos del sector urbano de Moa.

Objetivo general: Realizar una microzonación sísmica del sector urbano de Moa en función del comportamiento sismo resistente de los suelos del área de estudio.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar las condiciones ingeniero-geológicas de los suelos del sector urbano de Moa, que inciden en su comportamiento sismo resistente
2. Aplicar un procedimiento que permita evaluar la respuesta dinámica de los suelos como base de la microzonación sísmica del sector urbano de Moa
3. Evaluar el comportamiento sismo resistente de los suelos del sector urbano de Moa como fundamento de la microzonación sísmica.

Hipótesis:

Al caracterizar las condiciones ingeniero-geológicas, aplicar un procedimiento y evaluar el comportamiento sismo resistente de los suelos, se podrá alcanzar una microzonación sísmica que favorezca la reducción de los riesgos de desastres sísmicos y los planes de ordenamiento para el sector urbano en la ciudad de Moa.

Alcance de la investigación

Entre los resultados y aportes más importantes están:

- Se realiza una revisión histórica de los distintos terremotos que han tenido lugar en la provincia de Holguín y en el nordeste holguinero, en particular en el sector urbano de Moa, como vía de evaluación potencial de los diversos procesos y fenómenos inducidos por sismos
- El procedimiento de estudio de la dinámica de los suelos del sector urbano de Moa ante sismos de gran intensidad

- Se establece por primera vez el estudio del efecto de sitio en el sector urbano de Moa
- Se establece por primera vez un mapa de microzonación sísmica para el sector urbano de Moa, representando un modelo geodinámico más adecuado para el ordenamiento territorial y la proyección de obras en áreas sísmicamente activas como la de Moa.

Metodología de la investigación

Los métodos de investigación científicos empleados fueron los empíricos y teóricos los que se basan en la observación, las mediciones in situ y los análisis de laboratorio; los métodos teóricos son el histórico – lógico, el análisis– síntesis y el hipotético – deductivo.

El histórico - lógico permitió el análisis de los peligros y riesgos geológicos inducidos por sismos de gran intensidad y los cambios que se experimentan por la acción de los diferentes factores naturales y antropogénicos.

El análisis-síntesis permitió el análisis de la investigación documental, observar la dinámica del escenario en el tiempo con un modelo ingeniero geológico y la aplicación de una estrategia para la reducción de los riesgos geológicos inducidos por sismos de gran intensidad

El hipotético-deductivo fue empleado para la formulación de la hipótesis y el diseño del modelo ingeniero geológico de evaluación de los riesgos inducidos por terremotos de gran intensidad, el cual se valida a través de planes de prevención y mitigación de riesgos.

En la literatura especializada se tratan dos grupos de metodologías para determinar la incidencia de las condiciones ingeniero geológicas en la zonación sísmica. Las metodologías cualitativas, cuyo procedimiento propone determinar el incremento de la intensidad sísmica mediante el criterio de experto, en función de la geología y los efectos observados en áreas ya estudiadas (Popov ,1959; Borchardt y Gibbs ,1976; Astroza y Monge; 1991; Everden et. all.,1981).

En un segundo grupo se ubican las metodologías cuantitativas fundamentadas en relaciones matemáticas empíricas que expresan el incremento de intensidad sísmica en función de diferentes parámetros geotécnicos característicos de las capas superficiales,

como, por ejemplo, la velocidad de propagación de las ondas de cizalla (V_s) y la densidad natural de los suelos o rocas (Borcherdt et al., 1991; Medvedev, 1973; González y Pérez, 2005).

El trabajo investigativo se estructura de la siguiente forma: introducción, cuatro capítulos, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas, anexos, figuras y tablas.

El primer capítulo trata sobre la fundamentación teórica y conceptual para el estudio del efecto de sitio en las investigaciones ingeniero geotécnicas de la ciudad de Moa. En el segundo capítulo se realiza una caracterización ingeniero geológica del área de estudio con el fin de dar a conocer el desarrollo histórico de la sismicidad en la región de Moa, los tipos de suelos y rocas y su comportamiento ante cualquier fenómeno sísmico, la situación geológica y sismo tectónica, la incidencia del relieve en la sismicidad, las condiciones hidrogeológicas, y del hombre en la construcción de diferentes tipos de obras. En el tercer capítulo se presenta la propuesta metodológica. El cuarto capítulo profundiza en el análisis y evaluación de los suelos ante el efecto de sismos de gran intensidad, revisamos el estado de la práctica en estudios de efectos de sitio geológico y sismológico y dando a conocer la microzonificación sísmica del sector urbano de Moa.

CAPITULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y CONCEPTUAL PARA EL ESTUDIO DEL EFECTO DE SITIO EN LAS INVESTIGACIONES INGENIERO GEOTÉCNICAS DE LA CIUDAD DE MOA

1.1. Introducción

Al ocurrir el sismo las ondas sísmicas se propagan por el medio generando el movimiento de la roca o el suelo, el cual puede ser amplificado o atenuado según las condiciones geólogo-tectónicas, hidrogeológicas, geotécnicas y topográficas del terreno.

El objetivo de este capítulo es presentar un marco teórico del estudio del efecto de sitio, donde se describen los aspectos fundamentales del mismo; desde el punto de vista de la naturaleza del fenómeno y de la metodología empleada.

1.2. Propagación de las ondas sísmicas.

La presencia de sitios, considerados geotécnicamente como blandos, cercanos a la superficie del terreno produce un aumento considerable de los daños generados por terremotos en las infraestructuras situadas sobre ellos, al condicionar la amplificación de las ondas sísmicas en un rango de periodos de vibración (periodos altos) de los materiales, que coincide con el periodo de vibración de las estructuras como se muestra en la figura 2.

La respuesta y la magnitud de esa amplificación de la señal están controladas principalmente por las propiedades geotécnicas de los materiales geológicos, especialmente por sus características dinámicas, así como el espesor de las capas y la profundidad a la que se encuentra el sustrato rocoso. Estos fenómenos también suelen provocar grandes movimientos de masas de tierras.

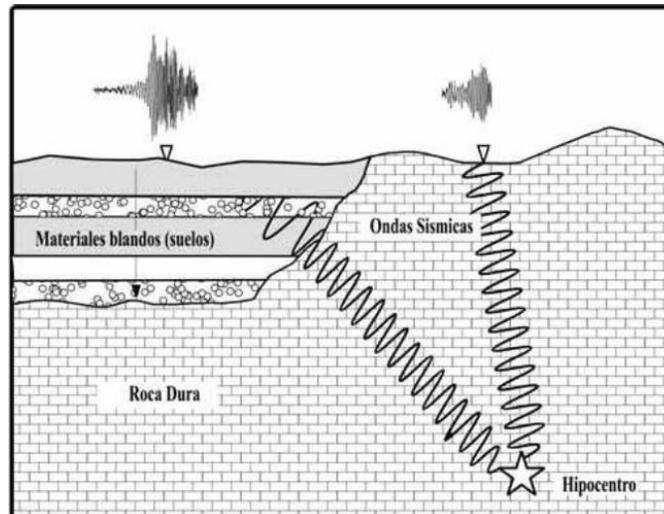


Figura 2. Esquema del paso de las ondas sísmicas para distintos suelos. Álvarez, 2001.

La propagación de las ondas a través de la capa más superficial del terreno, produce durante su ocurrencia distintos fenómenos físicos que dan lugar a una composición final del movimiento formado por: ondas directas y reflejadas (P y S), un grupo de ondas que son el producto de la dispersión y difracción de las anteriores donde se incluye la coda, y, las ondas superficiales.

Los aspectos del terreno que contribuyen a estas modificaciones al movimiento ondulatorio se pueden clasificar en tres grupos (Álvarez, 2001):

- Propiedades geológicas y dinámicas del material en el emplazamiento.
- Topografía superficial.
- Composición y dirección de la radiación incidente en la base rocosa.

El estudio completo del efecto de sitio supone considerar todos los aspectos descritos, pero dada la complejidad del problema, en muchas ocasiones los estudios se realizan considerando solamente alguno de los apartados anteriores, o una combinación de ellos. En esta investigación se emplea fundamentalmente la variabilidad de los parámetros geotécnicos.

Los efectos de las condiciones locales expuestas se manifiestan en el movimiento sísmico registrado de formas distintas:

- Se producen amplificaciones del movimiento ondulatorio.
- El contenido frecuencial se ve afectado.
- Varían los parámetros característicos del movimiento del suelo, como pueden ser: las amplitudes máximas, la duración, etc.

- En ciertas condiciones puede haber un comportamiento no lineal del suelo.
- Puede haber una gran variabilidad del movimiento en lugares muy próximos entre sí (Álvarez, 2001).
- Efecto de la Geología Superficial.

Los estudios donde se considera la composición y propiedades dinámicas de la geología local en el efecto de sitio, apuntan hacia el fenómeno de la resonancia, como principal causa de la variabilidad del movimiento del suelo.

Los métodos numéricos han resaltado la importancia que tiene la topografía en valles o cuencas sedimentarias, por la posible generación de ondas superficiales locales que son atrapadas en las capas más superficiales del suelo. En algunos estudios asociados a grandes estructuras de este tipo, se han observado ciertos efectos inducidos por la difracción de estas ondas localmente generadas, como: una duración más larga del movimiento, fases generadas en el borde de la cuenca con amplitudes mayores que las de la onda S directa, etc.

El análisis del movimiento del suelo en función de la clasificación del mismo, utiliza parámetros como: los valores pico de aceleración, velocidad o desplazamiento (tanto en el dominio del tiempo, como en el de la frecuencia) y la frecuencia predominante del movimiento del suelo.

Las propiedades dinámicas y, dentro de éstas, la rigidez y el amortiguamiento del suelo son claves para el estudio de la respuesta de sitio.

El módulo de corte (G) representa una buena medida de la rigidez del suelo, el cual se calcula por medio de la velocidad de las ondas sísmicas. Por su parte, la razón de amortiguamiento (ξ), representa la capacidad que tiene el suelo para disipar la energía. Otras propiedades, pero de menor influencia, son la densidad (ρ) y el índice de Poisson (ν).

Existen factores claves que influyen en las propiedades dinámicas del suelo, tales como la tensión efectiva de confinamiento, el nivel de tensiones en el suelo, el índice de poros y la plasticidad.

Un ejemplo de lo que pueden causar los efectos de sitio sucedió en el sismo de 1985, ocasionando graves daños en gran parte de la Ciudad de México, siendo las áreas más afectadas las zonas centro, sur y occidente, lugares donde el tipo de suelo influyó en gran medida a que el comportamiento sísmico fuera muy diferente al de sitios

localizados a menor distancia del epicentro, donde no existieron daños de consideración, este fenómeno pudo ser apreciado gracias a la instrumentación sísmica instalada, ya que sin estos recursos no hubiera sido posible observar detalles que resultaron tan importantes en ese momento, y que sin duda volverán a ocurrir cuando se presente un sismo con características similares.

En la figura 3 se muestran distintos acelerogramas registrados en estaciones localizadas entre el lugar del epicentro y la Ciudad de México, las estaciones más cercanas al lugar, en donde se produjo el terremoto, están localizadas en roca, es notoria la atenuación que se tiene mientras más alejada se encuentra la estación. En el registro que se tuvo en Ciudad Universitaria, localizada en una zona de terreno firme, dicha atenuación fue importante si se compara con el registro más cercano al epicentro, debido a la gran distancia (aproximadamente 400 kilómetros), en otras estaciones que se encuentran cercanas a Ciudad Universitaria y cuya lejanía resulta despreciable si se compara con la distancia hasta el epicentro.

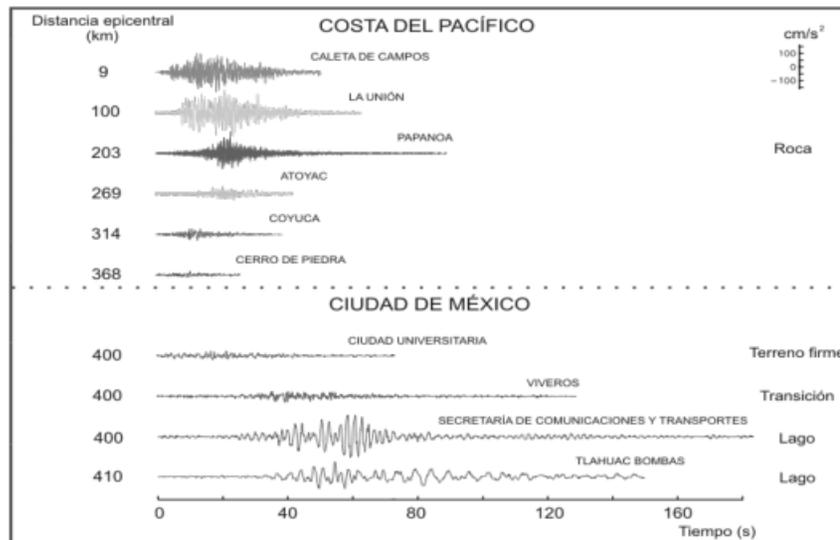


Figura 3. Acelerogramas registrados durante el sismo del 19 de septiembre de 1985. Álvarez, 2001

La respuesta del suelo es completamente diferente, en el caso de la estación Viveros, ubicada en una zona con terreno de transición, se observa que existe amplificación del movimiento, pero al momento de compararlos con la estación localizada en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes hay una amplificación en la respuesta muy importante, llegando a un nivel de aceleraciones similares e incluso mayores al lugar donde se produjo el sismo, este fenómeno solo pudo ser causado por las

condiciones locales, y en forma general, en los lugares donde se tuvieron daños importantes fue debido al tipo de suelo.

El último registro, obtenido de la estación Tlahuac Bombas no muestra niveles de aceleración tan grandes como los registrados en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, sin embargo, al compararlo con los datos de las estaciones Ciudad Universitaria y Viveros es notoria una amplificación y un comportamiento totalmente diferente a los otros registros (Álvarez, 2001).

En la Ciudad de Puebla, al igual que en la Ciudad de México se presentan efectos de sitio, estos son totalmente diferentes debido a las variaciones en las características del suelo, si se conociera exactamente la estratigrafía en cierto lugar y las características del acelerograma en la roca que subyace a un estrato de suelo se podría determinar la respuesta en la superficie, pero debido a que no es sencillo conocer con precisión las propiedades de un lugar, se recurre a modelos para tratar de cuantificar la amplificación de un lugar con respecto a otro.

Un efecto de sitio, como aparece representado en la figura 4, ocurrirá en cualquier lugar sometido a una excitación sísmica y variará con las propiedades del suelo, dicho fenómeno intensificará o atenuará la respuesta.

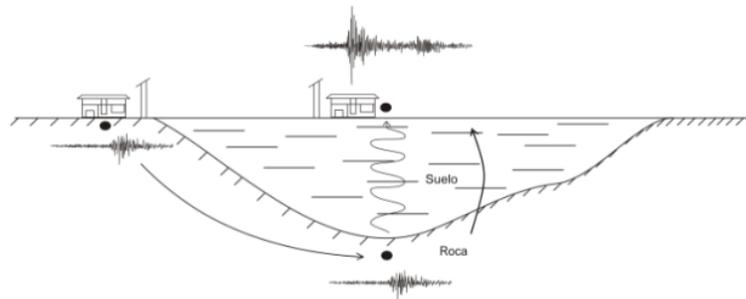


Figura 4. Simulación de un efecto de sitio, Álvarez, 2001.

1.3. Efecto de la Topografía Superficial

El estudio del efecto de las irregularidades topográficas en la amplificación de las ondas sísmicas se ha realizado a través de distintos modelos que reflejan los accidentes del terreno. Estos modelos se clasifican en (Álvarez, 2001):

- Topografías convexas: cualquier elevación sobre la superficie libre como dorsales y montañas.
- Topografías cóncavas: como valles y cañones.

Las distintas geometrías que se han aplicado para estos estudios están caracterizadas por algunos parámetros. En el caso de las topografías convexas, el contorno de la superficie libre sobre un medio homogéneo, ha sido descrito frecuentemente mediante el modelo de Sills (1978) representado en la figura 5:

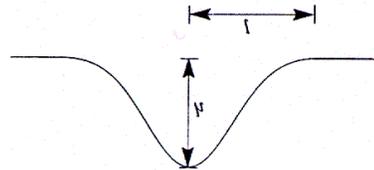


Figura 5. Modelo 2D de elevación sobre la superficie libre, Sills (1978). Los parámetros característicos son la semianchura l , y la altura h . X es la coordenada en la dirección de l

$$f(x) = h(1 - c^2) \exp(-c^2) \quad \text{donde} \quad c = x / l$$

En la figura 6 se ilustra la geometría de algunos estudios realizados en topografías cóncavas, como es el caso de los cañones semielípticos sobre un medio homogéneo.

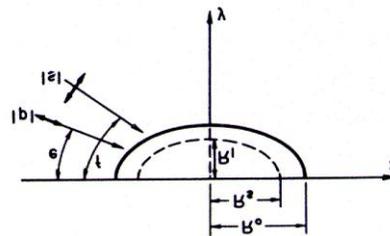


Figura 6. Modelo 2D de cañón semielíptico. La geometría del problema viene definida en función de los radios R_0 , R_1

La revisión que realizan Geli et al. (1988) y Bard (1995) sobre el estudio del efecto de la topografía, destaca algunos de los rasgos característicos que han sido analizados por distintos autores como son:

- Se produce una amplificación del movimiento en las cimas de las montañas (en general, de las topografías convexas), y una atenuación en el fondo de los valles, (en general de las topografías cóncavas). Estas amplificaciones se ven afectadas por el tipo de onda, siendo mayor el efecto para las ondas S que para las ondas P. En general, cuando la componente horizontal del movimiento es perpendicular al eje de las dorsales, la amplificación es mayor que en el caso de ser paralelo al mismo. Las amplificaciones son sensibles a la pendiente de la topografía en una relación directa.

- Se observa que la máxima amplificación es sensible a la razón entre la semianchura y altura de la elevación; cuanto mayor es la pendiente mayor es la amplificación.
- El fenómeno depende del contenido frecuencial de la onda, produciéndose las mayores amplificaciones para las longitudes de onda del movimiento comparables con las dimensiones horizontales de la topografía.
- En general, existe un acuerdo entre la frecuencia correspondiente a la máxima amplificación predicha teórica y experimentalmente.
- Existe discrepancia entre la cuantificación de la amplitud teórica y observada. Con frecuencia las amplificaciones observadas son superiores a las predicciones teóricas.

1.4. Metodologías para el estudio del efecto de sitio.

Los métodos utilizados para la evaluación del estudio del efecto de sitio, pueden ser divididos en dos grupos (Álvarez, 2001):

- Métodos experimentales y empíricos, conocidos en la literatura como la aproximación instrumental al efecto de sitio. Tienen en común, la utilización de datos reales registrados en el emplazamiento.
- Métodos teóricos. Se fundamentan en la resolución analítica de las ecuaciones que describen el problema, o en la simulación numérica. Constituyen la denominada “aproximación teórica” al estudio del efecto local.

El método de Nakamura (1989), es uno de los más utilizados en la evaluación del efecto de sitio (Aproximación instrumental). El método se basa en la relación entre los espectros de Fourier de las componentes horizontal y vertical del registro de microsismos en superficie. La principal ventaja radica en la conformación de un sistema sencillo para estimar la función de transferencia de las capas de suelo de un emplazamiento, a partir de una sola medida del movimiento en superficie. Esta ventaja, unido a las favorables posibilidades de manipulación del equipamiento para las mediciones de microsismos, lo han convertido en uno de los métodos más empleados (Gosar, 2007; Lombardo y Rigano, 2007; Berilgen, 2007; Macau, 2008; Zaharia et al., 2008; Gutiérrez y Franco, 2010; entre otros).

A nivel mundial existen numerosos trabajos que proponen metodologías para estimar la amplificación del movimiento del suelo en términos de variación de intensidad macrosísmica.

Según Macau (2008), estas metodologías se pueden diferenciar en dos grupos: las cuantitativas y las cualitativas.

Las primeras proponen relaciones matemáticas empíricas, que expresan el incremento de intensidad en función de diferentes parámetros geotécnicos y dinámicos, característicos de las capas superficiales, como, por ejemplo, la densidad natural del suelo y la velocidad de ondas de transversales (V_s), mientras las metodologías cualitativas proponen una variación de la intensidad macrosísmica mediante criterios de expertos, en función de la geología superficial del emplazamiento, según los efectos observados en cada litología para terremotos anteriores.

La elección de la metodología a emplear está en función de la complejidad geológica del sitio, del nivel de información geotécnica o de las posibilidades de acceder a técnicas instrumentales geofísicas. Los métodos cuantitativos tienen como principal ventaja el empleo de parámetros físico-mecánicos propios del sitio en estudio para definir la rigidez sísmica del corte geológico.

Generalmente, los parámetros geotécnicos que intervienen en la resolución de los métodos citados, son asumidos de trabajos ingeniero-geológicos precedentes que perseguían otros objetivos. Este elemento conlleva a una distribución espacial muy irregular de la información geotécnica; obligando a la aceptación de un nivel de incertidumbre.

La incertidumbre es un problema importante, asociado con la selección de los valores de parámetros geotécnicos involucrados en la evaluación de la respuesta sísmica local. Desde el punto de vista geotécnico, la misma tiene su principal fundamento en la variabilidad inherente del suelo, la cual es un reflejo directo de la heterogeneidad y la anisotropía propias de los materiales geológicos (Ordaz, 2013).

Otro elemento conducente a incertidumbres, es el uso de ecuaciones empíricas para la estimación de la velocidad de ondas transversales, empleando el número de golpes del ensayo de penetración estándar. Estas ecuaciones son validadas mediante análisis de regresión para las condiciones de un emplazamiento en particular (Iyisan, 1996; Hasancebi y Ulusay, 2007; Hanumantharao y Ramana, 2008; Dikmen, 2009; Akin et al.,

2011; entre otros); sin embargo, habitualmente se extrapolan a otros sitios. Este problema aún no es superado y depende principalmente de las posibilidades financieras para acometer trabajos de perforación y geofísicos.

Por último, las metodologías cualitativas definen el incremento de la intensidad sísmica, mediante criterio de expertos. Estos métodos se fundamentan en la relación de la geología superficial y los daños ocasionados por eventos sísmicos anteriores. En la tabla 1 se muestra el incremento de la intensidad sísmica en función de la litología, propuesta por diversos autores, a partir de los efectos del sismo de San Francisco del año 1906 (Medvedev, 1962; Borcherdty Gibas, 1976; Astroza y Monge, 1991). También se han establecido relaciones entre la unidad geológica y el incremento de la intensidad (Everden et al., 1981 y Topozada et al., 1988).

Tabla 1. Incremento de la intensidad sísmica en función de la litología

Litología	Medvedev (1962)	Borcherdty Gibas (1976)	Astroza y Monge (1991)
Granito	0	0	0
Calizas, areniscas y pizarras	0,2 – 1,3	0,5 – 1,1	-
Margas y yesos	0,6 – 1,4	-	-
Conglomerados	1,0 – 1,6	-	0,5 – 1,0
Suelo arenoso	1,2 – 1,8	1,6 ± 0,6	1,0 – 2,0
Suelo arcilloso	1,2 – 2,1	2,7 ± 0,6	2,0 – 2,5
Relleno artificial	2,3 – 3,9	-	-

1.5. Estado actual de la temática en Cuba

Nacionalmente son muy utilizadas variantes similares (Popov, 1959; Medvedev, 1962; Schenkova y Prochaikova, 1981). Estas variantes determinaron el aumento de la magnitud sísmica para distintas litologías (calizas, granitos, marga, yeso, arenisca, conglomerado, arcilla, arena, etc.) con diferentes profundidades de las aguas subterráneas.

En los anexos uno y dos se describe cada corte geológico típico y la variación de la magnitud sísmica esperada según la propuesta del método de los cortes típicos de Popov 1959 y de las analogías ingeniero geológicas de Medvedev 1973, una de las más empleadas en Cuba. Estas fueron confeccionadas a partir de observaciones de los efectos de terremotos, realizadas por los autores en zonas donde se conocía detalladamente el corte de suelos, la profundidad de los niveles freáticos, el buzamiento de los estratos y la potencia de los mismos. Con estas descripciones se pueden estimar

las variaciones del grado sísmico regional, con respecto al suelo promedio o a la roca dura, para cortes descritos en nuevas áreas en función de sus similitudes.

La principal limitación de las metodologías cualitativas, radica en la escala de trabajo. La zonificación sísmica en función de la amplificación del movimiento de suelo, se condiciona a la escala de los mapas geológicos disponibles. Habitualmente los mapas geológicos no reflejan en detalle las litologías cuaternarias, generalmente estas son agrupadas en una misma formación geológica, cuando para fines de zonación sísmica tienen un comportamiento muy diferente. La segunda desventaja se relaciona con el carácter básico o preliminar de las variaciones de intensidad macrosísmicas estimadas; evidentemente la amplificación del suelo depende de otras características (geotécnicas principalmente), que no pueden ser abordados por los métodos cualitativos anteriormente citados (Ordaz, 2013).

Como ha sido resumido en la tabla 2, en Cuba se ha seguido la tendencia internacional, aplicándose generalmente conjuntos de métodos. Los trabajos aplicados a la evaluación de la respuesta sísmica local, se han concentrado fundamentalmente en las provincias orientales: Santiago de Cuba, Granma, Guantánamo y Holguín (Mirzoev et al., 1983; Chuy, 1988; González y Kogan, 1987; González et al., 1989; González, 1991; Zapata, 1995; entre otros). Además, se han realizado algunos trabajos en la provincia La Habana, por su carácter de capital, elevada densidad poblacional y concentración de industrias y servicios vitales (González, 1998 y González et al., 2000). Paralelamente, se realizaron investigaciones de detalle en los emplazamientos de obras para el desarrollo electronuclear del país (Ershov et al., 1983 y Rautian et al., 1983) y en el municipio del Mariel (González et al., 2005).

No obstante, a la asimilación de las técnicas y métodos internacionalmente reconocidos, los investigadores cubanos han realizado aportes importantes en esta área del conocimiento (Ordaz, 2013). Se han creado metodologías para la obtención y procesamiento de datos geofísicos (García et al., 1982 y Zapata, 1995) y la evaluación de amenazas geológicas a escala urbana (Zapata, 1995).

Tabla 2. Algunos trabajos de evaluación de la respuesta dinámica realizados en Cuba (Tomado de Ordaz, 2013).

Sitio estudiado	Autor (es)	Método(s) empleado(s)
Santiago de Cuba	González (1991)	Microsismos
	Zapata (1995)	Analogías ingeniero geológicas y microsismos
	Rosabal et al. (2004)	Microsismos, tectónica y geodesia
	Zapata et al. (2004a)	
	Álvarez et al. (2005)	Sismogramas sintéticos para la modelación de suelos
San Luis	Fernández et al. (1991a)	Analogías ingeniero geológicas
	Fernández et al. (1993)	
Palma Soriano	Fernández et al. (1991b)	Analogías ingeniero geológicas
Guantánamo	Zapata (2003)	Microsismos
Camagüey (Nuevitás)	Zapata et al. (2004b)	Ingeniero geológicas, Microsismos y geofísica (geolectricidad)
Artemisa (Mariel)	González et al. (2007)	Analogías ingeniero geológicas, Método de rigidez sísmica y microsismos
Moa	Zapata et al. (1995)	Analogías ingeniero geológicas, método de rigidez sísmica y microsismos
	Caballero (1995)	
Bayamo	Rivera (2000)	Analogías ingeniero geológicas y microsismos
Manzanillo	Rivera et al. (1998)	Analogías ingeniero geológicas y microsismos
Chivirico	Seisdedos et al. (2001)	Microsismos
	Zapata et al. (2001)	
Baracoa	Fernández et al. (2000)	Analogías ingeniero geológicas

Posteriormente, se ha desarrollado la modelación de suelos en una o varias dimensiones del espacio, para determinar su posible amplificación ante la ocurrencia de un terremoto (Rivera et al., 2011 y 2013; entre otros).

El uso de sismogramas sintéticos de ondas superficiales, para la extracción de indicadores importantes en el pronóstico del comportamiento de los suelos ante el paso de las ondas sísmicas, ha tenido avances como son: la aceleración máxima y los espectros de respuestas (Álvarez et al., 2011 y 2013). En las últimas décadas, se ha trabajado en el estudio de la incidencia de las condiciones ingeniero geológicas en la respuesta sísmica local (Zapata, 1995; Fernández, 2000; Fernández et al., 2000; González y Pérez, 2003; Vázquez, 2005; Ordaz, 2010; Ordaz et al., 2012b; entre otros). Se han realizado importantes esfuerzos con el objetivo de dotar a los gobiernos y decisores a todos los niveles (nacional y local), de herramientas básicas y científicamente argumentadas para la toma de decisiones. En este sentido, se pueden encontrar importantes contribuciones en Sagué et al. (2006), Zapata et al. (2006), Zapata (2007 y 2013), entre otros.

Ordaz 2013, como aportes novedosos de su tesis Doctoral, tal y como se muestra en la figura 7, incorpora en el estudio de la respuesta dinámica de los suelos, elementos de la estimación y modelación de parámetros geotécnicos con incidencia en el efecto de sitio, para lo cual propone vías para la estimación de las propiedades dinámicas del suelo;

así como, el pronóstico de la variación de intensidad macrosísmica (ΔI) y de los fenómenos inducidos.

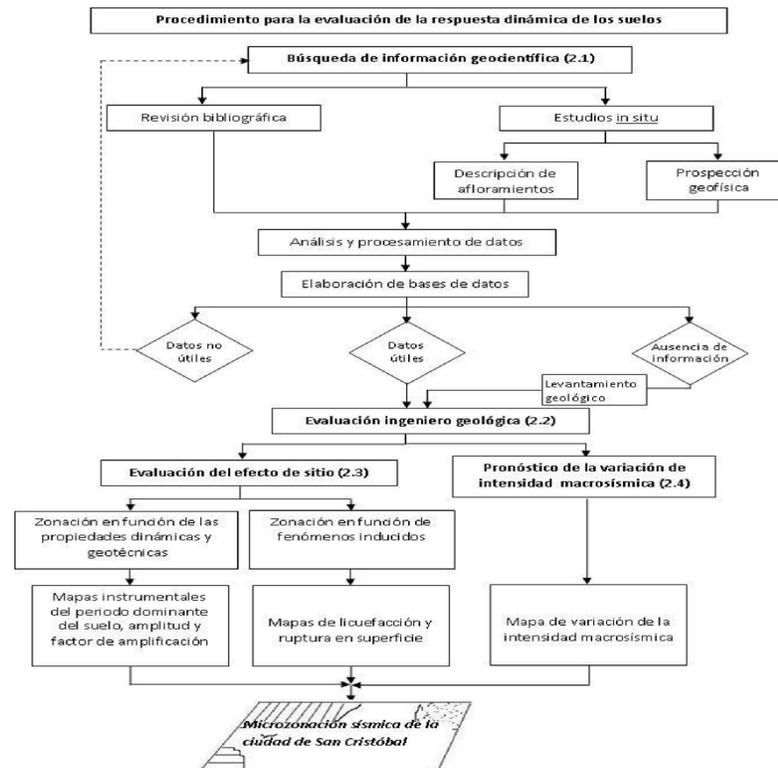


Figura 7. Diagrama de flujo para establecer la zonación sísmica en función de las condiciones ingeniero-geológicas propuesto por Ordaz 2013

Los métodos de estimación geo-estadística empleados por Ordaz 2013, ofrecen la varianza kriging de las propiedades geotécnicas involucradas en el método de la zonificación sísmica seleccionado por el autor y declara que el procedimiento desarrollado es aplicable a otros sitios de interés nacional, teniendo en cuenta la existencia actual y posibilidad de adquisición y procesamiento de los datos, para desarrollar cada método que lo compone.

1.6 Estado actual de la temática para el municipio de Moa

La bibliografía en la temática de Moa no es amplia solo se han realizado sobre la temática una tesis de maestría de Amalia Beatriz Riverón Zaldívar, 1996, donde se realiza el estudio de la respuesta dinámica de los suelos del sector Playa la Vaca y un trabajo de grado de Luís Felipe Caballero Cornier, Julio/1995.

Otras investigaciones sismológicas han sido realizadas por. Zapata, J. A.; Rosabal, S. Y. y Cutié, M.; Reporte de investigación a GAMMA S.A. Junio/2013, Zapata, J. A y

Rosabal, S. Y. (2010): Zapata, J. A y Rosabal, S. Y. (2010). Zapata, J. A.; Rubio, M. F.; Vega, N. M. y Ramos, K. (2009): Zapata, J. A.; Rubio, M. F.; Arango, E. D.; Cutié, M.: Chuy, T. J. y Batista, R. (2009): Zapata, J. A.; Rubio, M. F. y Montenegro, C. (2007): Zapata, J. A. (2007): Zapata, J. A.; Chuy, T. J.; Montenegro, C. y Marisy, J. (2006): Zapata, J. A.; Chuy, J. T.; Cutié, M.; Montenegro, C. y Marisy, J. (2006): Zapata, J. A. et al (1999): Zapata, J. A. et al (1994): Todas estas investigaciones están relacionada con la industria del níquel en la región.

CAPÍTULO II. CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES INGENIERO GEOLÓGICAS DEL TERRITORIO DE MOA.

2.1. Introducción

En el presente capítulo se exponen las características ingeniero geológicas del municipio de Moa, provincia de Holguín, teniendo en cuenta que, para realizar los estudios de respuesta dinámica de los suelos, es necesaria su evaluación, y analizar su incidencia en el efecto de sitio.

La respuesta y magnitud de la amplificación de la señal está controlada principalmente por las propiedades geotécnicas de los materiales geológicos, especialmente por sus características dinámicas, así como el espesor de las capas y la profundidad a la que se encuentra el sustrato rocoso. Es por ello, que en este capítulo se hace el análisis de las principales características geológicas y geomorfológicas regionales.

2.2. Características geológicas del área de estudio.

El área de estudio corresponde a la zona urbana del municipio Moa, ubicado en el extremo oriental de la provincia Holguín (ver figura 8).

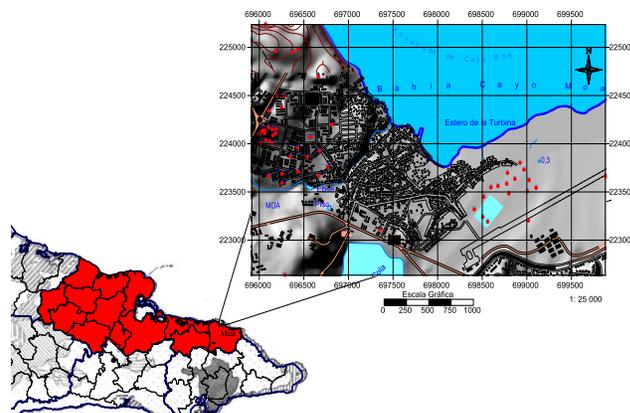


Figura 8. Esquema de ubicación geográfica

Se enmarca dentro de la región oriental de Cuba, la cual desde el punto de vista geológico se caracteriza por la presencia de las secuencias del cinturón plegado cubano y las rocas del “neoaútóctono” (Iturralde-Vinent, 1996; Proenza, 1998).

En los macizos rocosos de Mayarí y Sagua-Moa-Baracoa afloran fundamentalmente unidades oceánicas correspondientes a las ofiolitas septentrionales, y a los arcos de islas volcánicos del Cretácico y del Paleógeno (Cobiella, 2000; Iturralde-Vinent, 1996; Proenza, 1998). Las ofiolitas septentrionales en la región de estudio están enmarcadas dentro de la llamada faja ofiolítica Mayarí-Baracoa. Sus principales afloramientos están representados por los Macizo Mayarí-Cristal y Moa-Baracoa.

Dentro de las rocas correspondientes a las unidades oceánicas, las ofiolitas septentrionales ocupan la mayor parte del área de investigación y van a estar representadas por el complejo ultramáfico, el complejo máfico y la secuencia efusiva-sedimentaria (Rodríguez, 1998; Proenza, 1998). El complejo ultramáfico está representado por rocas ultrabásicas serpentizadas que afloran en toda la porción central y meridional y están constituidas predominantemente por harzburgitas y subordinadamente dunitas, herzolitas y piroxenitas, que se caracterizan por presentar un color verde oscuro o gris verdoso y por un alto grado de agrietamiento (Quintas, 1989; Rodríguez, 1998; Proenza, 1997). Estas rocas presentan un grado de serpentización variable, haciéndose más intensa hacia los bordes de los macizos (Rodríguez, 1998).

Las rocas básicas están representadas por gabro olivínico, gabro-noritas, anortositas y gabros normales de diferentes granulometrías. Los cuerpos de gabro tienen una estructura de grandes bloques que se disponen preferentemente en las zonas periféricas del complejo ultramáfico. En la región el más común es el gabro normal de color oscuro algo verdoso con textura masiva o fluidal y afloran siempre asociados a las serpentinitas, apareciendo en forma de bloques en las zonas de Quesigua-Cayo Guam-Mercedita, y Farallones, Caimanes (Rodríguez, 1998).

Los depósitos cuaternarios constituyen una cobertura prácticamente continua de génesis continental sobre todas las secuencias de rocas más antiguas, presentando pocos cambios diagenéticos y espesor. Los depósitos ubicados en las desembocaduras, cauces y márgenes fluviales están constituidos por bloques, cantos rodados, gravas, arenas, aleurolitas y arcillas derivadas de la erosión fluvial.

Desde el punto de vista tectónico la región se va a caracterizar por la abundancia de estructuras disyuntivas agrupadas en sistemas correspondientes a los diferentes estadios de la evolución geotectónica regional y que mantienen diferentes grados de actividad y reflejo en los rasgos morfológicos y que, de una u otra forma, han determinado la variabilidad de la serpentización de las rocas del complejo ofiolítico y su disposición superficial actual.

2.3. Características hidrogeológicas

Debido al régimen de precipitaciones, particularidades hidrogeológicas regionales, características de las rocas acuíferas y parámetros hidrogeológicos existentes en el territorio, se considera como una zona de elevada complejidad hidrogeológica. Se ha establecido la existencia de cinco complejos acuíferos fundamentales, a partir de la caracterización del tipo de rocas presentes y de su capacidad para el almacenamiento de aguas subterráneas (Sidimohamed, O., 2002) los mismos son descritos a continuación:

Complejo acuífero de las ofiolitas: Se extiende en dirección noroeste-sudeste, al oeste del río Moa. Litológicamente se encuentra constituido por serpentinitas alteradas, peridotitas serpentinizadas y piroxenitas. La capacidad acuífera ha sido poco estudiada; su profundidad de yacencia es de 1.3 - 12 metros. El coeficiente de filtración (K) oscila entre 1 - 14.7 m/día, el gasto de aforo (Q) entre 1.2 - 4 L/s.

Complejo acuífero de los sedimentos costeros: Se extiende por casi todo el norte del municipio, formando una franja estrecha que presenta dimensiones de 1 - 2 Km. de ancho. El relieve es costero con cotas de 0 - 2m sobre el nivel del mar; su edad se corresponde con el Cuaternario. Su composición litológica integrada por depósitos arcillosos contiene fragmentos angulosos de composición múltiple. Las rocas acuíferas se asocian a calizas organógenas, en menor escala sedimentos no consolidados, así como, depósitos arcillo-arenosos con fragmentos angulosos de composición variada. Predominan aguas cársticas y de grietas, y en algunos casos intersticiales. Por lo general tienen interrelación hidráulica con el agua de mar. A una profundidad comprendida entre los 1 - 5 m yace el nivel freático. El coeficiente de filtración (K) de estas rocas alcanza valores hasta los 268.4 m/días, el gasto (Q) es aproximadamente de 14 L/seg.

Complejo acuífero de los sedimentos aluviales: Se extiende en dirección norte-sur formando una franja ancha en su parte inferior, y estrecha en la superior, ocupando prácticamente la totalidad de las terrazas de los ríos más importantes, así como, los valles de sus afluentes. Constituido por gravas, arenas, cantos rodados y arenas arcillosas, con 15 m de potencia aproximadamente, estos sedimentos son de edad cuaternaria y se caracterizan por su alta capacidad para el almacenamiento de agua. El coeficiente de filtración (K) varía de 13 - 290 m/días, mientras que su gasto de aforo (Q)

oscila entre 2 - 57 L/seg. Estas aguas yacen a una profundidad comprendida entre los 1 - 5 m.

Complejo acuífero de las lateritas: Se extiende por casi toda la zona ocupando gran parte del área. Su composición litológica se corresponde con potentes cortezas de intemperismo, representando a un acuitardo, debido al predominio de aguas capilares y de potencias considerables de lateritas que alcanzan los 30 m, con un marcado desarrollo de procesos de capilaridad, donde los ascensos capilares de las aguas pueden alcanzar alrededor de 20 m. Las precipitaciones atmosféricas son la fuente principal de alimentación de estas aguas.

En la figura 9 se muestran los mapas de hidroisohipsas y profundidad de yacencia las aguas del sector urbano de Moa. En ello se corrobora el alto nivel freático que presentan estos acuíferos en los sedimentos cuaternarios, así como la dirección del flujo subterráneo.

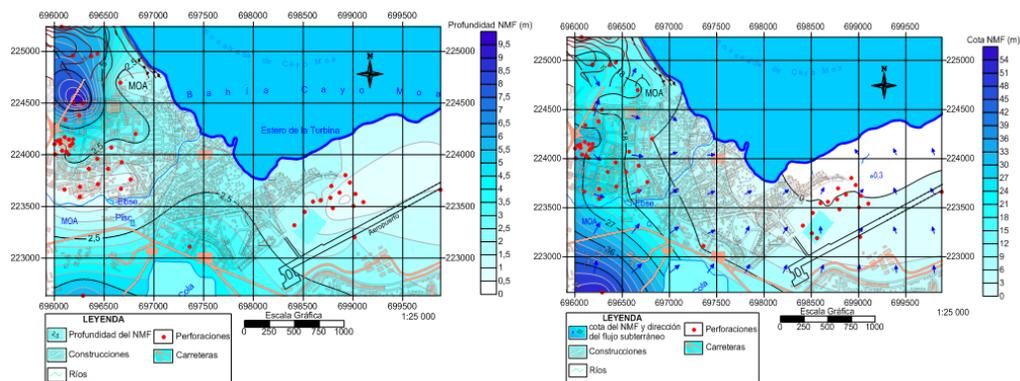


Figura 9. Mapa de profundidad de yacencia del nivel freático y de hidroisohipsas. Raquel Vinardell Peña 2018

2.4. Geomorfología del Territorio

Genéticamente el relieve de Moa y sus áreas adyacentes está clasificado dentro del tipo de horst y bloques que corresponden a los cuerpos de rocas ultrabásicas elevadas en la etapa neotectónica a lo largo de dislocaciones antiguas y rupturas nuevas, poco o ligeramente diseccionados.

Rodriguez, 1998, como resultado del estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes, clasificó el relieve del territorio en dos zonas geomorfológicas: zona de llanuras y zona de montañas con subtipos específicos que se describen a continuación

Zona de Llanuras. Se desarrolla en toda la parte norte del área comprendida desde la barrera arrecifal hasta los 100-110 m de altura hacia el sur, originada por la acción conjunta de diferentes procesos morfogénicos entre los que predominan los fluviales y marinos. Entre los tipos de llanuras se encuentran las fluviales, marinas y parálicas.

Las llanuras acumulativas marinas se ubican entre la barrera coralina y el litoral y se caracterizan por una pobre actividad erosiva. Los sedimentos que se acumulan provienen de las cortezas lateríticas, y la barrera arrecifal.

Las llanuras fluviales se clasifican en acumulativas y erosivo-acumulativas en dependencia del proceso que predomine en su morfogénesis, ocupando estas últimas una posición hipsométrica superior. Los sedimentos que se acumulan en estas zonas se caracterizan por su carácter temporal y su composición limonítica. Asociada genética y espacialmente con las llanuras fluviales y marinas y en la zona de intersección entre ambas aparecen llanuras acumulativas palustres parálicas donde predominan procesos acumulativos típicos de zonas pantanosas de color oscuro y olor fétido, anegadas en agua, siendo el mangle la vegetación predominante. Toda esta zona de relieve de llanura de edad Cuaternario no ha estado exenta de la acción de los procesos tectónicos.

La zona de montañas es la zona geomorfológica más extendida, ocupa toda la parte sur y central además del Cerro de Miraflores y las zonas nordeste y noroeste del poblado de Cananova. Los valores morfométricos, así como la configuración de las elevaciones son extremadamente variables en dependencia de las características litológicas y agrietamiento de las rocas sobre las cuales se desarrolla, así como del nivel hipsométrico que ocupan. Teniendo en cuenta esos parámetros el relieve de montaña fue clasificado en cuatro subtipos: 1. Premontañas aplanadas ligeramente diseccionadas. 2. Submontañas y premontañas ligeramente diseccionadas. 3. Montañas bajas aplanadas ligeramente diseccionadas. 4. Montañas bajas diseccionadas. Conjuntamente con estas zonas, aparecen en la región un conjunto de formas menores, que constituyen elementos importantes en la caracterización geomorfológica regional, son criterios de evaluación tectónicas y algunas representan un peligro para el medio ambiente. Dentro de esas formas se encuentran el relieve cársico y barrancos.

2.5. Caracterización morfotectónica.

El área de estudio presenta desarrolladas dos zonas geomorfológicas, claramente delimitadas:

Los sistemas de fallas descritos, en conjunto con los movimientos diferenciales de las estructuras geológicas, sus estilos tectónicos y la morfología desarrollada por la acción de los procesos exógenos durante el desarrollo geológico de la región, han determinado la formación de bloques morfotectónicos representados en la figura 10, los cuales se diferencian entre sí por características típicas, las cuales enumeramos a continuación. La caracterización de los mismos fue tomada de la tesis doctoral de Rodríguez A. (1998).

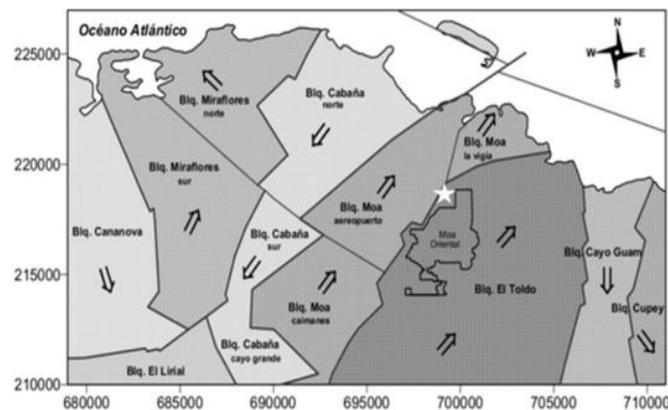


Figura 10. Esquema tectónico de Moa (Rodríguez A. 1998)

Bloque Miraflores. Ubicado en la parte noroccidental del área teniendo como núcleo el Cerro de Miraflores y las laderas occidentales norte y nororientales del mismo. Se caracteriza por sufrir movimientos pulsantes, con tendencia al desplazamiento nortnoreste con un mayor levantamiento de su parte oriental y que a su vez se encuentra dividido en dos sub-bloques que mantienen esa tendencia general de los movimientos horizontales y verticales pero que, además, se mueven entre sí con un movimiento rotacional izquierdo - anti horario - del sub-bloque norte respecto al sur.

Bloque Cabaña. Situado al este del bloque Miraflores, con orientación noreste desde la localidad de Zambumbia hasta Cayo Moa Grande, y en su porción meridional, en la zona Cayo Grande-Caimanes Abajo, mantiene una dirección noroeste.

Geológicamente el basamento sobre el cual se sustenta la morfología de este bloque está conformado por las tobas de la formación Santo Domingo, las rocas del complejo ofiolítico y sedimentos parálicos y fluviales en la zona aledaña al litoral.

El relieve es de llanuras erosivas y erosivo-acumulativas las que hacia el sur transicionan a submontañas ligeramente diseccionadas con divisorias de configuración arborescente. El drenaje es de densidad moderada a alta con predominio de redes dendríticas exceptuando los cauces primarios del río Cabaña cerca de la zona de intersección con el río Moa, donde aparecen redes enrejadas.

Los valores morfométricos que para este bloque se comportan con gran variabilidad evidencian una intensidad mínima de levantamiento relativo respecto a los bloques laterales con una disección vertical máxima de 100 m/km² en la parte centro-septentrional, disminuyendo hasta 90 m/km² hacia el norte y 40 m/km² hacia el sur. Para el bloque los valores máximos del nivel de base de erosión para el segundo y tercer orden se alcanzan hacia el sur con 200m y 150m respectivamente, formándose cierres de isobasas de carácter muy local al suroeste y noreste de Caimanes Arriba y hacia el norte, en la zona de Playa la Vaca.

Este bloque se encuentra cortado por la falla Cananova presentando valores morfométricos diferenciados entre el sub-bloque norte y sur, desplazándose el sub-bloque norte según el plano de fractura en dirección noroccidental.

El sentido fundamental de los desplazamientos horizontales de este bloque es suroccidental y en cuanto a los movimientos verticales existen diversos criterios contradictorios ya que si bien es cierto que en la superficie actual abundan los rasgos del relieve y valores morfométricos que lo señalan como un bloque de mínimo ascenso o de descenso relativo en la actualidad, la constitución geológica de su superficie, dada mayoritariamente por las rocas cretácicas de la formación Santo Domingo y el complejo ofiolítico hacen suponer que esta tendencia no ha sido permanente desde el Mioceno Medio cuando se inicia el levantamiento general del territorio oriental y muy por el contrario, se comporta como una ventana tectónica, donde las formaciones terciarias y cuaternarias han tenido muy poco desarrollo o fueron erosionadas, lo que sólo se justifica por una tendencia predominante al levantamiento.

Bloque Moa. Ubicado en la parte centro occidental de la región, entre los bloques Cabaña y El Toldo con los cuales contacta a través de las fallas Cabaña y Moa, extendiéndose de norte a sur en forma de franja cóncava hacia el este. Está subdividido en cuatro sub-bloques: Calentura, Caimanes, Aeropuerto y La Vigía. La componente fundamental de los desplazamientos horizontales está orientada al nordeste.

2.6. Marco sismo tectónico

La región nororiental de Holguín está caracterizada como una zona donde debe considerarse el peligro sísmico como una premisa de riesgo debido a la actividad sísmica que se ha registrado en sus alrededores. Por tal motivo ha sido objeto de varias investigaciones a partir del 2006 con vista a esclarecer la génesis de la sismicidad y el riesgo asociado a la misma.

La sismicidad en la región de Moa comenzó a manifestarse de manera significativa a partir del 28 de diciembre de 1998 con un sismo de magnitud 5.4 en la escala de Richter, con una intensidad de VI grados MSK en Moa y áreas aledañas que produjo agrietamientos de paredes en viviendas de mampostería y edificios multifamiliares, siendo sentido por toda la población como una sacudida fuerte del terreno. Desde el 28 de diciembre de 1998 hasta diciembre de 1999 se registraron 24 eventos perceptibles y un total de más de 1200 réplicas.

Entre la serie de diciembre del 1998 y Julio del 1999 se registraron 1777 sismos, de ellos 37 perceptibles por la población de Moa. Lo anterior, demuestra la presencia de un proceso tectónico significativo relacionado con la dinámica de la corteza y el basamento en los primeros 30 Km de profundidad, teniendo en cuenta la energía liberada, la profundidad y la amplitud de la zona de ruptura, determinadas por las características del terremoto principal y las réplicas, siendo esta la serie de terremotos más energética ocurrida en Cuba después de la serie de terremotos de Cabo Cruz de 1992 (Arango et. al, 2017).

Como antecedente a este sismo, en el período de registro sísmico instrumental se tiene el registro del terremoto ocurrido el 20 de marzo de 1992 con una magnitud de 4.3 en la escala de Richter y una intensidad de VI en la escala MSK a 15 Km de la costa al este de la ciudad de Moa, en los 20° 48' de Latitud Norte y los 74° 48' de longitud oeste, frente a la localidad de Cupey, a una profundidad de 5 km. El mismo produjo agrietamientos de paredes en escuelas y edificios de viviendas de esta ciudad; siendo perceptible en toda la provincia Guantánamo y algunos municipios de las provincias de Holguín, Santiago de Cuba y Granma. Este es el primer terremoto de estas características que se registra en las cercanías de Moa.

En la figura 11 se puede apreciar el contexto sismotectónico en que se encuentra el área de estudio.

La falla Oriente (de primer orden) aparece en el borde sur de Oriente, con carácter rumbo-deslizante (transformante) y constituye el límite entre las placas de Norteamérica y del Caribe, por lo que representa el mayor peligro para la región oriental de Cuba, incluyendo el área de estudio. 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. Dos de estos eventos alcanzaron intensidad 9.0 MSK-EMS en la ciudad de Santiago de Cuba y considerables afectaciones en toda la región oriental (Chuy, 1999). Los estudios realizados (Chuy et al., 1997) indican que en ella pueden generarse sismos de hasta magnitud 8.0.

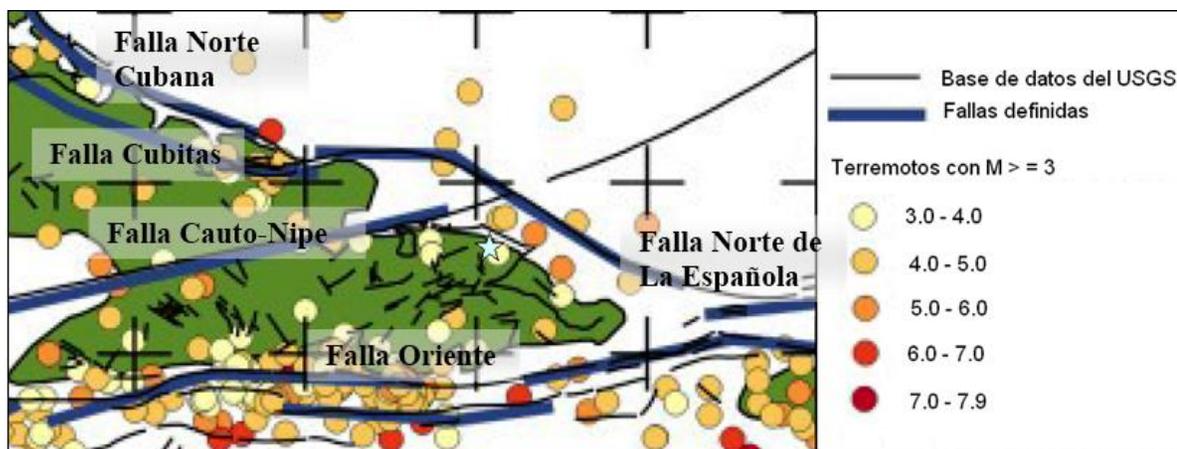


Figura 11. Contexto sismotectónico en el que se ubica la región de Moa, representada por una estrella azul. Se presentan los epicentros de eventos sísmicos 2012-2015. Arango, et al, 2017

La información tectónica y sismológica de la región de estudio analizada por especialistas del CENAIIS (Arango, et al, 2017) valida la existencia al norte del extremo oriental de Cuba de una zona de origen de terremotos de 1er orden que es la prolongación hacia el noroeste de la falla Norte de la Española.

La falla Norte de la Española es una falla inversa activa en la cual la placa de Norteamérica penetra por debajo de las microplacas que conforman a la isla de La Española con una velocidad promedio anual aproximada de 20 mm/año (Mann, 1995). A partir del análisis de la información tectónica y sismológica de la región de Moa, al noreste de la región de estudio, Arango et al. (2017), llegaron a la conclusión de que al norte de la región oriental de Cuba, específicamente al este de la Bahía de Nipe, a pocos kilómetros de la costa, se evidencia la existencia de la continuidad de la falla Norte de la Española (ver Figura 12) y no la denominada por estudios anteriores como falla Sabana o Norte Cubana.

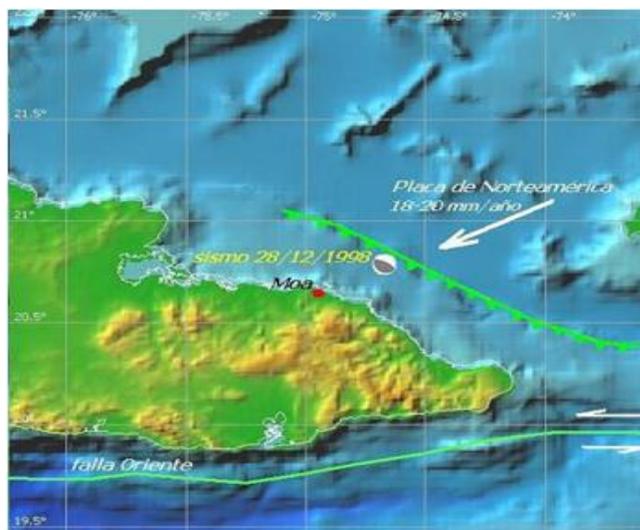


Figura 12. Posible trazado de la falla Norte de la Española por la porción noreste del extremo oriental de Cuba (Arango et al, 2017)

Su ubicación en esta posición permite dar una explicación consecuente con las características geodinámicas regionales a la ocurrencia de terremotos al norte de la región de estudio, como por ejemplo la serie de terremotos del 28 de diciembre de 1998.

La magnitud máxima de los sismos que pueden generarse en esta falla está en el orden de los 7,5 a 8.0 de magnitud Richter teniendo en cuenta la velocidad de choque de la placa de Norteamérica y el proceso tectónico predominante. En el norte de La Española esta misma zona de fallas ha generado sismos de magnitudes máximas de 7.5 a 8.1 Richter (Mann 2002).

En la figura 13 se muestra un mapa con los epicentros de los terremotos registrados por más de 3 estaciones en la región de Moa desde 1965 hasta la actualidad, clasificados por rangos de magnitudes.

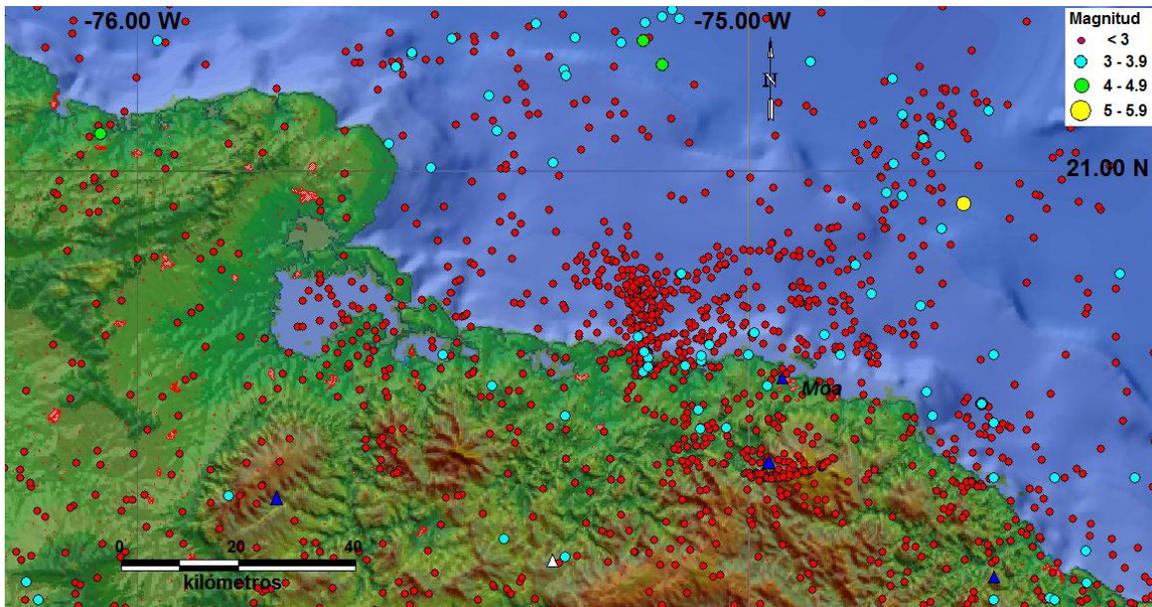


Figura 13. Sismicidad registrada por más de 3 estaciones desde 1965 hasta la actualidad en la región de Moa. Se representan con triángulos azules las estaciones sismológicas situadas en esta región. (Arango et al, 2017)

En la Figura 14 se muestran gráficos que reflejan el comportamiento de la sismicidad registrada en la región de Moa desde 1965 hasta 2016, en cuanto a la energía liberada, magnitud mayor a 3 y número de terremotos. Se señala con una flecha el terremoto mencionado anteriormente del 28 de diciembre de 1998.

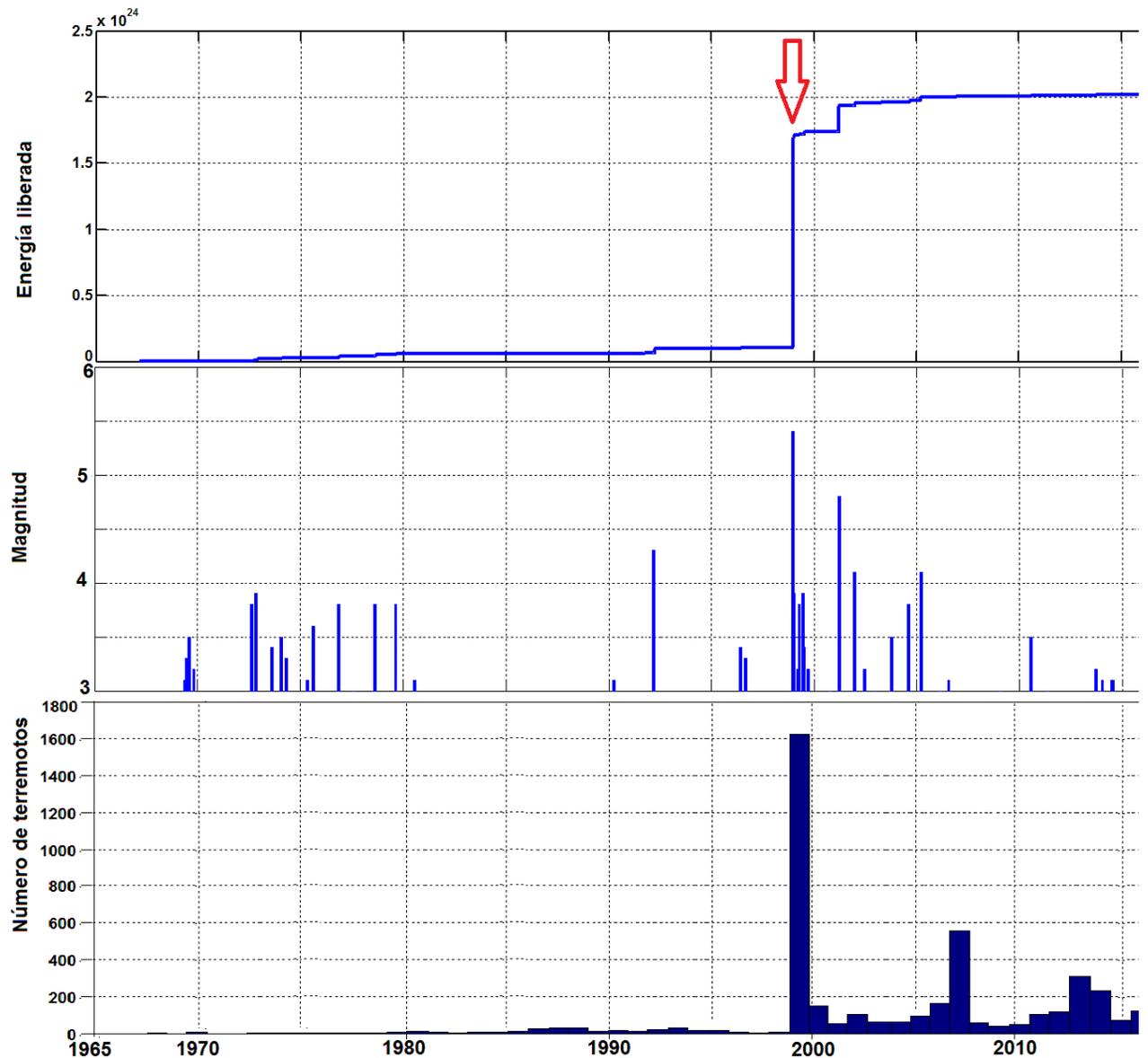


Figura 14. Comportamiento de la sismicidad en la región de Moa en el período de registro instrumental (1965 a 2016). (Arango et al, 2017)

Teniendo en cuenta que a partir de 1998 comenzó a operar en nuestro país una red de estaciones digital con sismómetros de banda ancha, Arango et al, 2017, realiza un análisis de la sismicidad a partir de 1998 donde se puede observar con mejor detalle el comportamiento de la misma. En este caso aparecen representados los terremotos de magnitud mayor a 2.5. Como se observa en la Figura 15, la sismicidad se ha continuado registrando en esta región, aunque con sismos de menor magnitud. En los años 2007 y 2013 se registraron pequeñas series de terremotos en esta zona, aunque de magnitudes bajas.

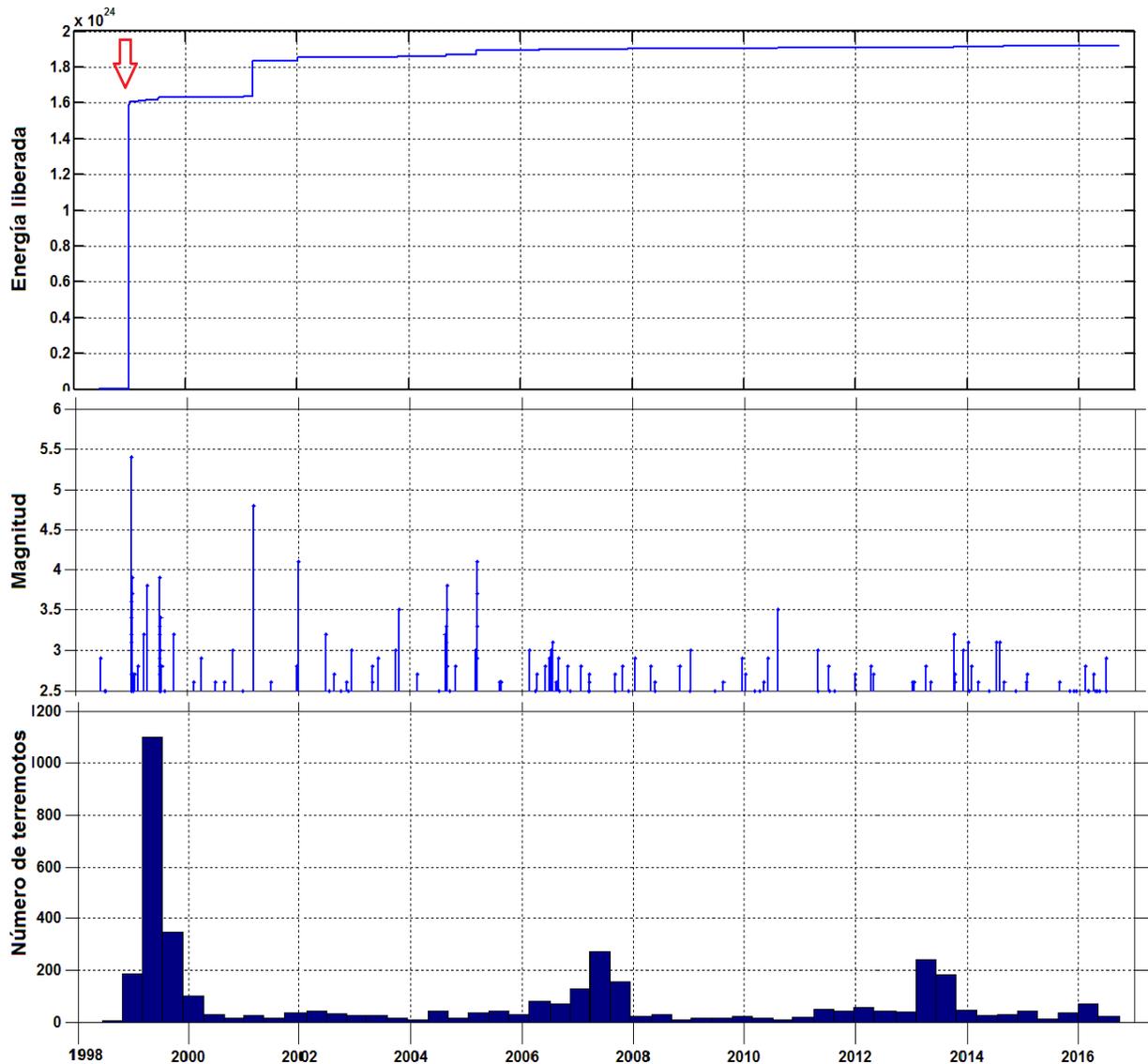


Figura 15. Comportamiento de la sismicidad en la región de Moa desde 1998 hasta la actualidad en cuanto a la energía liberada, terremotos de magnitud mayor a 2.5 y número de terremotos. Se observa un incremento del número de terremotos de manera cíclica cada 6 a 8 años desde 1998. (Arango et al, 2017)

La Figura 16 muestra el resultado del análisis de la imagen de satélite ASTER y el Modelo Digital del Terreno (MDT) realizado por Arango et al, 2017, a través del cual se obtuvo varias direcciones de lineamientos que pueden representar fracturas y/o segmentos de fallas que dan una explicación mucho más coherente con la sismicidad que se registra en este territorio. Se destacan direcciones de alineamientos característicos para cada zona, que corresponden con los elementos estructurales y tectónicos principales. A esta imagen se le ha superpuesto un mapa con los epicentros

de los terremotos registrados por más de 3 estaciones en la región de Moa desde 1965 hasta 2016, se observa una buena correspondencia entre ambos. Este mapa de fracturas y fallas explica las características tectónicas relacionadas con la liberación de energía en la actualidad.

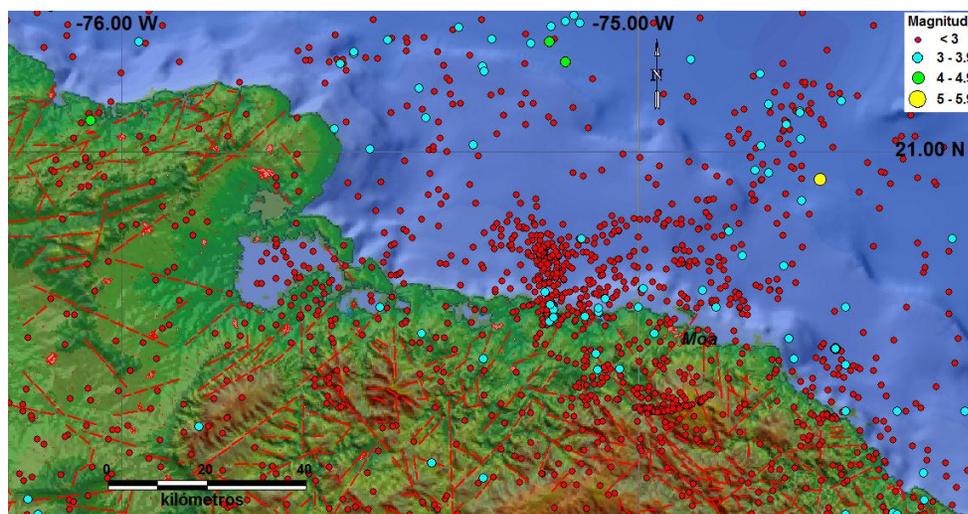


Figura 16. Lineamientos trazados a partir de la imagen ASTER con el modelo digital del terreno en el territorio emergido y los epicentros de los terremotos de magnitud mayor a 3. Arango et. al. 2017

Teniendo en cuenta las características geodinámicas de la región de estudio se puede considerar que desde el punto de vista sismotectónico el mecanismo de infracorrimento a través de la falla Norte de La Española provocó, inicialmente, la ocurrencia de la serie de terremotos de diciembre de 1998 al 1999 al NE de Moa y posteriormente esta deformación se trasladó al territorio emergido provocando la ocurrencia de la serie de terremotos iniciada en julio de 1999 al oeste de Moa.

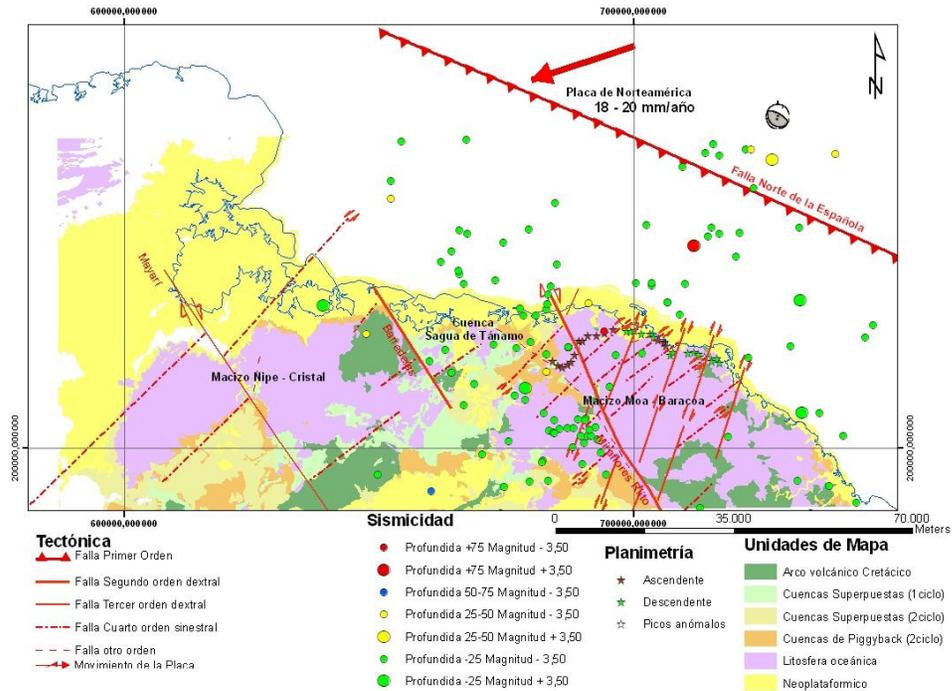


Figura 17. Modelo sismotectónico. Arango et. al. 2017.

Este modelo sismotectónico (ver Figura 17) confirma que en la falla Norte de la Española pueden ocurrir los sismos de mayor magnitud en la región de estudio y dadas sus características, de ser una falla cuyo plano de buzamiento se inclina hacia el territorio que ocupa el extremo nororiental de Cuba, los sismos pueden estar situados tanto en la parte marina como terrestre y los hipocentros estar situados a diferentes profundidades. Los mayores esfuerzos que se ejercen en toda la región están vinculados a esta falla, los mismos se reflejan en la acumulación y liberación de tensiones de manera lenta, con movimientos verticales y horizontales, registrados en las mediciones geodésicas. La acumulación y liberación de tensiones de manera rápida se expresan por medio de la ocurrencia de pequeños o moderados sismos.

La parte oeste de Moa, situada desde las inmediaciones de Yaguaneque y Cananova, hasta el suroeste, en la Sierra del Maquey es el área donde se manifiesta con mayor intensidad la dinámica de la corteza en el territorio estudiado (Arango et. al. 2017)

La zona de debilidad tectónica principal coincide con el trazado en superficie de la falla denominada Miraflores –Riito, que es la principal zona de fallas en el territorio emergido en el sector de Moa. Asociada a la misma existe un patrón de fallas activas llamadas de plumaje que cortan toda la región de Moa con diferentes sentidos de desplazamientos y diferente orden jerárquico.

CAPÍTULO III. ELEMENTOS METODOLÓGICOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE LOS SUELOS

03.1. Introducción

En el capítulo introductorio, se discutieron los conceptos de efecto de sitio; además de los principales métodos para su evaluación. En el presente capítulo, se exponen los métodos empleados en el caso particular de la ciudad de Moa; con el fin de definir las propiedades dinámicas del subsuelo y realizar el pronóstico de efectos inducidos.

El procedimiento está conformado por un conjunto de métodos, cuyos datos son de viable obtención para las condiciones cubanas. La zonación sísmica puede responder genéricamente a dos fines: (1) a la representación cartográfica de la respuesta dinámica del corte estratigráfico por la incidencia de la propagación de las ondas sísmicas sobre sus estratos; y (2) a la zonación acorde a la geología local de la variación de la intensidad macro sísmica.

En la propagación de las ondas a través de las capas más superficiales del corte estratigráfico, inciden al menos tres aspectos: (1) propiedades geotécnicas y dinámicas del suelo, (2) la topografía, y (3) la composición y dirección de la radiación incidente en la base rocosa.

De ellos, en esta tesis se aborda el primer aspecto. La evaluación ingeniero-geológica debe permitir arribar a conclusiones vinculadas a las propiedades geotécnicas y dinámicas del suelo.

Como premisa el procedimiento parte del uso exhaustivo de la información geotécnica, fundamentalmente aquella contenida en los archivos especializados, como una importante vía de predicción de la respuesta sísmica (ver Figura 18).

3.2. Búsqueda de información

La estimación de los efectos de amplificación debido a las condiciones ingeniero geológicas (litológicas), utiliza generalmente varios métodos tanto empíricos, como de modelización numérica (en casos en los que se conoce con gran detalle los comportamientos dinámicos, el espesor de los suelos y la profundidad de la roca dura, además del espectro inicial).

Antes de la aplicación de los efectos de la amplificación a los estudios empíricos y de modelización numérica de los efectos del suelo en las señales sísmicas, es necesario la

realización de una clasificación o agrupación de los materiales geológicos superficiales en categorías de respuesta sísmica similar.

La caracterización ingeniero-geológica propuesta se realizó tomando como base la información de trabajos geotécnicos procedentes de las empresas de proyectos hidráulicos, proyectos de obras militares y especialmente en la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA), con sus Unidades de Investigación para la Construcción (UIC) emplazadas en cada provincia del país, información geotécnica almacenada, en algo más de 50 años.

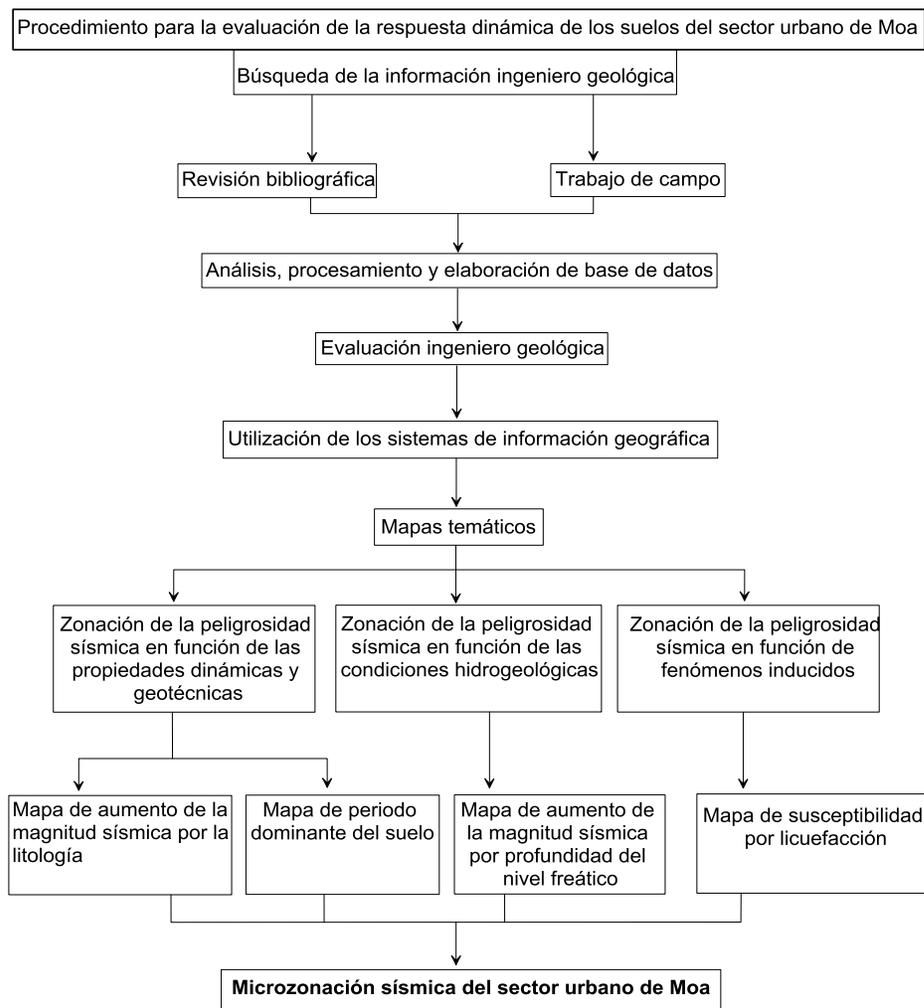


Figura 18. Diagrama de flujo para establecer la zonación sísmica en función de las condiciones ingeniero geológicas. Raquel Vinardell Peña, 2018.

Dada la complejidad de la obtención de los parámetros “in situ”, tanto mediante ensayos de campo como de ensayos de laboratorio, debido especialmente a las variaciones bruscas de los materiales geológicos tanto en la vertical como en la horizontal, así como

de las dificultades de interpretación mediante las correlaciones empíricas, los estudios, en muchas ocasiones, se realizan asumiendo parámetros de respuesta sísmica genéricos (como es la Velocidad de corte, V_s), en función de la situación, la edad, la composición y el origen de las formaciones geológicas.

En el estudio se presenta la clasificación geotécnica-amplificación de los materiales geológicos de la ciudad de Moa. Una vez obtenida la clasificación en las categorías consideradas, se ha estimado el grado de amplificación mediante el valor de la velocidad de las ondas transversales (V_s) del terreno. La asignación de los valores de V_s para cada categoría, se ha realizado en función de las características geológico-geotécnicas de los distintos tipos de horizontes del perfil laterítico. El valor de la V_s ha sido calculado mediante la fórmula empírica de Imai (1981) en función del valor de N_{spt} y la naturaleza de los materiales.

La representación espacial de estas clases de materiales con respuesta sísmica similar se ha plasmado en un mapa a escala 1:25.000 donde quedan delimitadas las áreas con menor y mayor grado de amplificación. Como base para la realización de este plano se ha empleado el Mapa Geológico Digital de Cuba escala 1:50.000.

En base a dicho mapa e implicaciones prácticas de la clasificación geotécnica-amplificación propuestos en este trabajo, la ciudad de Moa puede ser dividida en varias zonas con diferentes grados de amplificación.

- ZONAS CON AMPLIFICACIÓN NULA O BAJA: Corresponde a áreas ocupadas por rocas duras a muy duras.
- ZONAS CON AMPLIFICACIÓN MODERADA: Terrenos que presentan un comportamiento mecánico mixto entre roca blanda y suelo duro a muy duro. Materiales blandos y de su grado de alteración.
- ZONAS CON AMPLIFICACIÓN ALTA: Está constituida por los depósitos de arenas flojas.
- ZONA CON AMPLIFICACIÓN MUY ALTA: Corresponde al área ocupada por suelos muy blandos tipo fango, arcillas y limos sueltos. Posible desarrollo de fenómenos de licuefacción debido a la posición de la superficie del nivel freático.

3.3. Clasificación de los suelos

Con el objeto de dividir los suelos en grupos con propiedades geotécnicas similares, surgen las denominadas clasificaciones de suelos. La clasificación de los suelos consiste en incluir un suelo en un grupo que presenta similares características.

La mayoría de las clasificaciones de suelos utilizan ensayos muy sencillos, para obtener las características del suelo necesarias para poderlo asignar a un determinado grupo. Las propiedades ingenieriles básicas que suelen emplear las distintas clasificaciones son la granulométrica, los Límites de Atterberg, el contenido de materia orgánica, etc.

Los dos sistemas principales de clasificación de suelos actualmente en uso son el sistema AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y el USCS (Unified Soil Classification System). El primero se usa principalmente para la evaluación cualitativa de la conveniencia de un suelo como material para la construcción de explanadas de carreteras. El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) fue propuesto inicialmente por Casagrande en 1942 y después revisado por el Bureau of Reclamation de Estados Unidos y por el Cuerpo de Ingenieros. Este sistema es el más extendido para la amplia variedad de problemas geotécnicos y es el sistema utilizado en esta investigación para clasificar los suelos del perfil laterítico en el área urbana de Moa.

3.4. Determinación de la rigidez sísmica

La rigidez sísmica es la propiedad de las rocas o suelos de oponer resistencia al surgimiento de deformaciones y a la propagación de las mismas.

Se caracteriza por el producto de la velocidad de propagación de las ondas elásticas sísmicas multiplicada por su densidad, es decir (Lomtdze, V. D. 1977):

$$V_{\gamma} = V_s \rho$$

donde V_{γ} es la rigidez sísmica;

V_s , la velocidad de propagación de la onda

ρ , la densidad del suelo

Los estudios realizados (Lomtdze, V. D. 1977) demuestran que cuanto mayor es la densidad y correspondientemente la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, tanto más elevada es la resistencia de los suelos a la propagación de las deformaciones.

Las suelos friables y saturados, presentan una baja rigidez sísmica y en ellos, los eventos sísmicos se manifiestan con mayor magnitud. La resistencia a las deformaciones en los suelos friables es decenas de veces menor que en los rocosos.

3.5. Potencial de licuefacción

Esta primera fase consiste en una evaluación preliminar de las condiciones ingeniero geológicas, a partir de los datos que ofrecen los ensayos de campo, laboratorio o informes ingenieros geológicos realizados.

Los estudios que se han realizado durante sismos de mediana y alta magnitud han proporcionado importante información para la evaluación del potencial de licuación de suelos; las investigaciones posteriores a la ocurrencia de estos sismos, han revelado donde la licuación se ha dado. Los cortes en depósitos aluviales revelan la ocurrencia de licuación cuando se encuentran ductos por donde ascendió la arena licuada a la superficie; el análisis de la granulometría de la arena del ducto en relación con la del medio revela características típicas de arena licuable como: uniformidad y ausencia de finos.

Los procesos geológicos que dieron origen al suelo tienen una gran influencia en la susceptibilidad de un suelo a la licuación. Los suelos producto de la sedimentación en ríos y lagos (depósitos fluviales y aluviales), de la deposición de detritos o material erosionado (depósitos coluviales) o depósitos formados por la acción del viento son los más susceptibles. El fenómeno de licuación ocurre solamente en suelos saturados, por tal motivo, la profundidad del nivel freático influye en la susceptibilidad del suelo a colapsar. Conforme disminuye la profundidad de las aguas subterráneas, la susceptibilidad a licuación es menor. En aquellos sitios en donde el nivel freático oscila, la ocurrencia de licuación también fluctúa.

La evaluación del medio geotécnico incluye las valoraciones del perfil del suelo en cuanto a parámetros geotécnicos y hidrológicos como lo son: las propiedades físico – mecánicas del mismo: cohesión (C), ángulo de fricción interna (ϕ), contenido de humedad ($w\%$) y profundidad de yacencia de las aguas subterráneas, así como también la clasificación del suelo atendiendo a las normas SUCS o AASHTO. Se define el tipo de suelo: arena suelta, suelo cohesivo, índice de compresibilidad.

Seguidamente, con los datos obtenidos de la valoración anterior, se realiza la evaluación del potencial de licuefacción partir de los parámetros que a continuación se exponen:

- Criterios geológicos: los suelos de depósitos fluviales y eólicos, cuando se encuentran saturados tienen una alta probabilidad de ser susceptibles. Al igual que en depósitos de abanicos aluviales. Por lo general los depósitos de suelo jóvenes son más susceptibles a la licuefacción que los depósitos más antiguos.

- Los suelos no cohesivos o granulares generalmente potencian el fenómeno de la licuefacción. Ocurre también en suelos sueltos, saturados, granulares, uniformemente graduados y con bajo contenido de finos. Los suelos no cohesivos con resistencia a la penetración estándar corregido por profundidad $(N_1)_{60} > 30$, se consideran de densidad suficiente y no presenta riesgo de licuarse.

Para suelos con presencia de finos se puede asumir los criterios que se muestran a continuación:

A. La fracción de arcilla (finos menores de 0,005mm) $\leq 15\%$

B. Límite líquido, $LL \leq 35\%$

C. Contenido de humedad natural, $w \geq 0,9 LL$

D. Índice de liquidez, $LI \leq 0,75$

Si el perfil del suelo que se analiza cumple con algunos de los criterios expuestos se considera que es vulnerable por licuefacción.

3.6. Zonación en función del periodo dominante aplicando ecuaciones empíricas

El periodo dominante (T) se correlaciona con el grado de oscilación de los suelos durante un episodio sísmico, pudiéndose inferir, que a mayores valores de T en un material (suelo o roca), mayor será la amplificación provocada por las ondas S.

En esta investigación, se utilizó la relación $T = (4H/V_s)$, propuesta por Bard (1985), donde H es el espesor de los sedimentos y V_s , la velocidad de ondas transversales. El volumen considerable de datos permitió efectuar los cálculos de periodos dominantes en cada punto de sondeo (perforación) e interpolar estos valores para obtener el mapa de valores de T.

Para determinar la velocidad de ondas transversales (V_s) se utilizaron ecuaciones empíricas, las cuales emplean el número de golpes obtenido en el ensayo de penetración estándar (NG- SPT).

El valor de la V_s ha sido calculado mediante la fórmula empírica de Imai (1981) en función del valor de NG-SPT y la naturaleza de los materiales (Tabla 1).

Tabla 1. Valores de V_s , Imai 1981

Tipo de terreno/ Clase	Fórmula empleada (Imai, 1981)	Valores medios de NG-SPT (Skempton, 1984; Meyerhof, 1956)	Valores de V_s
Fangos, Arcillas y Limos blandos	$V_s=102N^{0,292}$	<10	<130
Arenas, dunas y Arenas con Arcilla	$V_s=80,6N^{0,331}$	15-25	150-200
Arenas y Gravas	$V_s=114N^{0,294}$	25-30	180-250

CAPITULO IV. MICROZONACIÓN SÍSMICA DEL SECTOR URBANO DE MOA

4.1. Introducción

Los antecedentes sísmicos de la ciudad de Moa, unido a la construcción de las diversas obras y la exposición de la población ante estos eventos, requieren de la evaluación ingeniero-geológica y geotécnica y de su respuesta dinámica. El proceso acelerado de urbanización que ha vivido la ciudad de Moa, la necesidad de vivienda económica que obliga a algunos de sus habitantes a edificar en zonas de probable riesgo sísmico (ver Figura 19) y, en ciertos casos, el manejo inadecuado del problema sísmico en los proyectos y construcción, propician a que, ante un sismo, las probables pérdidas y número de víctimas sean considerables.



Figura 19. Sector urbano de territorio minero metalúrgico de Moa. Imagen satelital. Raquel Vinardell Peña 2018

La zonación sísmica a escala local (microzonación), constituye una herramienta básica en la mitigación de los daños potenciales de los terremotos. Se refiere generalmente al resultado de los estudios de peligrosidad, aunque, en un sentido más amplio puede también incluir aproximaciones territoriales a la evaluación de efectos locales y vulnerabilidad sísmica desde un punto de vista estadístico. La cartografía resultante puede utilizarse en la planificación del desarrollo urbano y para guiar el diseño sismo resistente de los edificios nuevos e instalaciones existentes.

4.2. Validación de los datos ingeniero geológicos como base para la microzonación sísmica.

Los estudios ingeniero geológicos de efecto sitio son esenciales para definir y entender el papel que juega el perfil geológico y geotécnico, las propiedades estáticas y dinámicas del suelo en la respuesta sísmica de un sitio. El estado del conocimiento en materia de amplificación y atenuación de los movimientos sísmicos en términos de la aceleración pico ha sido resumido en la Figura 20. De acuerdo con ésta, la atenuación en los suelos blandos comienza a partir de 0.1g y empieza a ser importante alrededor de 0.3 g.

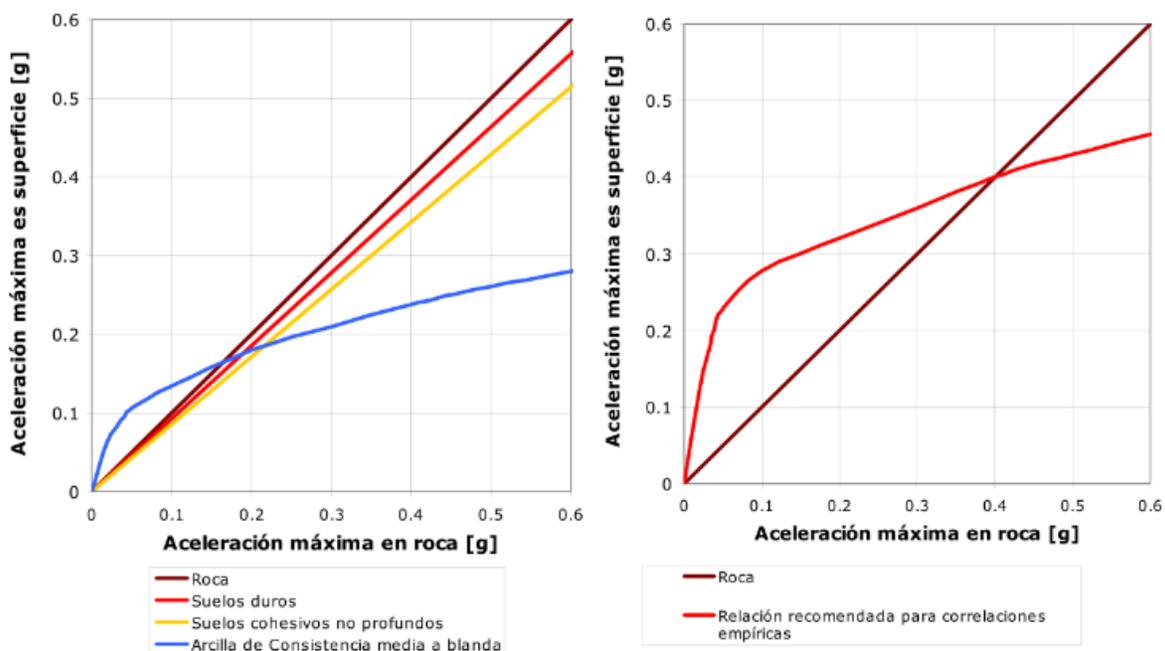


Figura 20. Amplificación y atenuación de los movimientos sísmicos en términos de la aceleración pico (Fuente: Seed&Idriss, 1983). Corrección de la amplificación y atenuación (Fuente: Idriss, 1990)

Idriss (1990) proporciona una visión corregida de la amplificación o atenuación y el resultado de sus investigaciones basadas en modelos unidimensionales de propagación ondulatoria se presenta en el gráfico de la izquierda de la figura 20.

En esta nueva versión, se aprecia que una mayor amplificación se atribuye ahora a los suelos blandos y que el rango en que la amplificación ocurre, subió de 0.1g a 0.4g.

El estudio ingeniero geológico de los suelos para la valoración de los efectos de sitio y de las características de los registros sísmicos de la zona urbana de Moa, es muy importante ya que es el primer caso en el que se cuenta con una determinada cantidad

de registros que permitieron conocer en forma aceptable las características del subsuelo para el área de estudio.

De esta manera se confecciono una base de datos, basados en los informes y reportes técnicos de la ENIA, con los parámetros ingeniero-geológicos por horizontes en cada intervalo de perforación. Para los estudios del efecto de sitio se tomó en consideración que los intervalos en profundidad de los valores del SPT en cada registro alcanzara 30 cm como promedio, en los intervalos inferiores o superiores a esta longitud no se registran valores. Este análisis de las determinaciones de SPT permitió validar los resultados, en cuanto al intervalo de medición, establecido en la norma para este parámetro.

El sector urbano de Moa se ha dividido en tres zonas de acuerdo con su formación geológica y geotécnica. La zona corteza de intemperismo, la zona de sedimentos aluviales y la zona de sedimentos palustres, esta última zona presenta las aceleraciones más bajas, dada la magnitud del sismo, las ondas sísmicas serán las más amplificadas de ciudad. En el sector urbano de Moa pueden presentarse sitios en que las aceleraciones pico en suelo blando (zona depósitos aluvial palustres) serán del orden de 3 y 5 veces las aceleraciones registradas en roca peridotitas serpentinizada que es el basamento (zona roca dura a semidura).

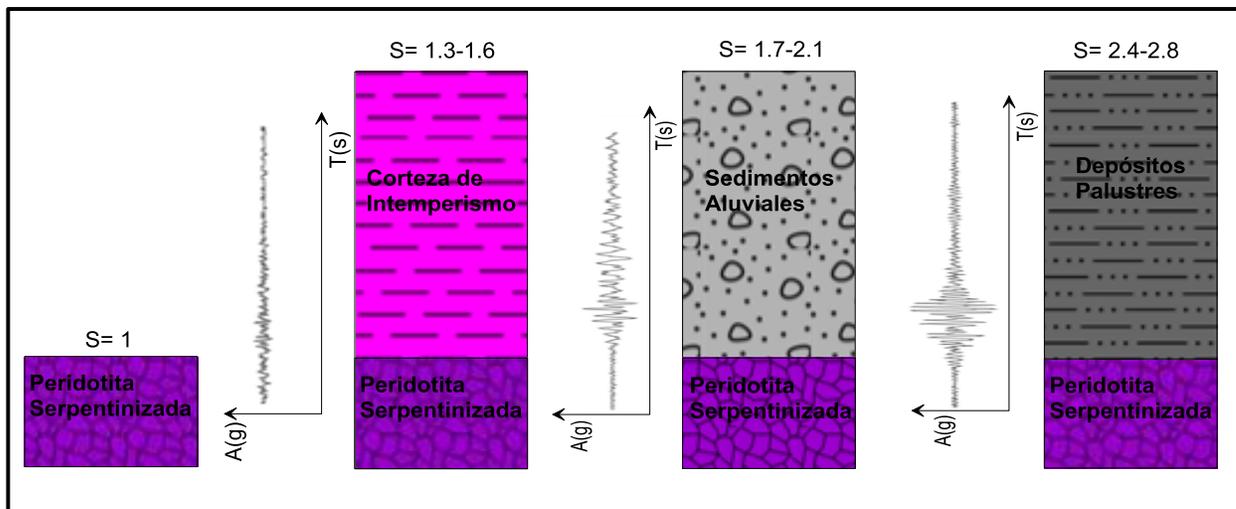


Figura 21. Cortes típicos de los suelos y rocas del sector urbano de Moa reflejando su amplificación. Raquel Vinardell Peña 2018

La metodología seguida para caracterizar la respuesta de sitio en Ciudad de Moa incluye el muestreo de suelos en las distintas obras ubicadas en el sector urbano.

En la Figura 21 aparecen representados los cortes típicos de los suelos del sector urbano de Moa reflejándose la amplificación y atenuación de las zonas ante el efecto de las ondas sísmicas en los diferentes medios.

La información geotécnica incluye las descripciones de columnas litológicas, ensayos de penetración dinámica estándar (SPT) y resultados de propiedades físicas de los suelos, obtenidos en el laboratorio.

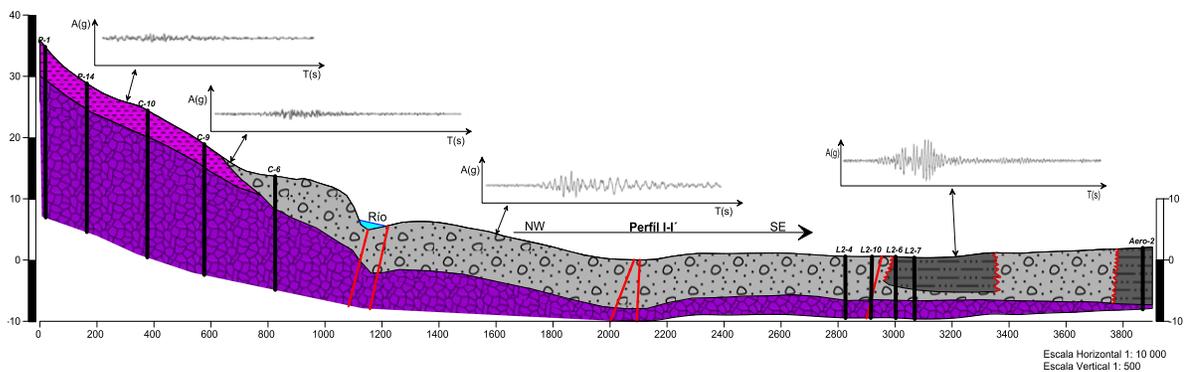
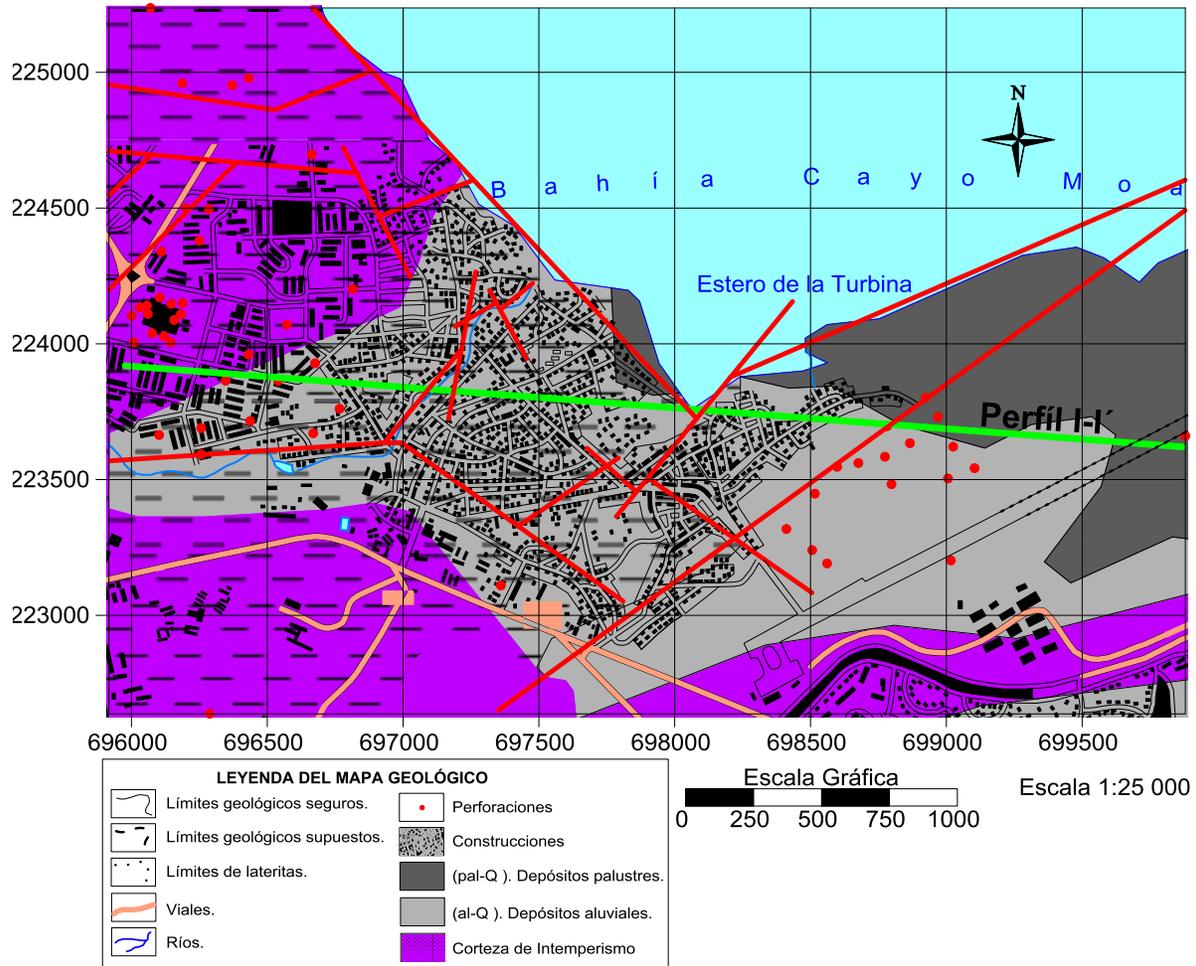


Figura 22. Mapa ingeniero geológico de los suelos como base para la valoración del efecto de sitio del sector urbano de Moa, modificado del mapa geológico del IGP, 1985.

Los efectos de sitio más notorios del sismo que podemos encontrar en la ciudad de Moa son:

- Licuefacción de suelos en la zona central donde aparecen los depósitos aluviales del cuaternario y en la llanura del aeropuerto donde están los depósitos palustres del cuaternario.
- Amplificaciones de los movimientos sísmicos en los suelos blandos.

Tabla 4. Valores de los Ensayos de Penetración Estándar (SPT) de este estudio. Densidad y ángulo de rozamiento interno de suelos granulares según Vallejo (González de Vallejo, 2002)

	Promedio Numero de Golpes	Densidad	Φ (°)
Sedimentos aluviales	18	Medianamente denso	30-36
Depósitos palustres	8	Baja densidad	28-30
Arena gravosa mezclada con arcilla limosa	25	Medianamente denso	30-36
Arena limosa	19	Medianamente denso	30-36
Grava limosa	34	Denso	36-41
Arena limo-gravosa con arcilla	76	Muy denso	>41

4.3. Clasificación ingeniero geológica y geotécnica de los suelos como base para la micro zonación sísmica del sector urbano de Moa.

El análisis de las columnas litológicas y descripciones obtenidas en los informes y reportes ingeniero-geológicos permite establecer la caracterización de los tipos de suelos presentes en el sector urbano de Moa, según se representa en el mapa ingeniero geológico (ver Figura 22).

En la Tabla, se muestran comparaciones de los rangos de velocidades de las ondas transversales (V_s) determinados en este trabajo mediante las ecuaciones empíricas de Imai, 1981, con los tomados de Lomtadze, 1977 para cada tipo de suelo presentes en el área de estudio.

Tabla 5. Velocidad de propagación de las ondas transversales determinados en este estudio mediante las ecuaciones empíricas de Imai, 1981 y las tomadas de V.D. Lomtadze 1977.

Tipo de suelo (SUCS)	Vs (m/s) V. D. Lomtadze, 1977	Vs (m/s) En este estudio Imai, 1981
Sedimentos palustres	150	-
Sedimentos aluviales	150-180	-
Arena gravosa con arcilla limosa	250-180	284
Arena limosa	350-250	264
Grava limosa	350-450	297

Arena gravosa mezclada con arcilla limosa

Este horizonte está constituido por una arena gravosa mezclada con arcilla limosa de densidad media, con una humedad promedio de 24 %. Es característica la presencia de concreciones de hierro. Clasifica, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), como arenas mal graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos (SP) y arenas limosas, mezclas de arena y limo mal graduadas (SM).

El valor promedio del número de golpes del ensayo de penetración estándar (NG-SPT) es de 25, correspondiendo a un suelo medianamente denso (Tabla). La velocidad de ondas transversales calculada es de 284 m/s (Tabla).

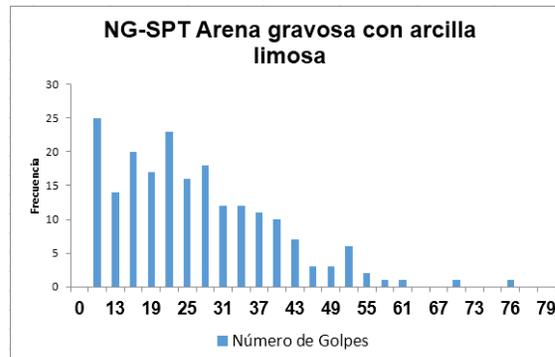


Gráfico 1. Frecuencia del NG-SPT para la arena gravosa mezclada con arcilla limosa

El gráfico de distribución de frecuencia del NG-SPT indica un predominio de los valores entre 12 y 26. La variabilidad representada en el gráfico de frecuencia (Gráfico 1) demuestra la irregularidad en el comportamiento de los valores dentro de un mismo horizonte, sugiriendo una mezcla de arenas con gravas y limos, mal graduadas.

El análisis estadístico (

Tabla 2), de los datos de NG-SPT, muestra una varianza media (178) en relación a los horizontes de arena limosa y de grava limosa. El coeficiente de variación con un valor de 0.53 es igual al del horizonte de grava limosa.

Tabla 2. Estadígrafos principales

Estadígrafo	Arena gravosa con arcilla limosa
Media	25
Coefficiente de variación	0,53
Mediana	23
Moda	20
Desviación estándar	13,34
Varianza de la muestra	178
Mínimo	3
Máximo	76
Cuenta	203

Arena limosa

Este horizonte está caracterizado por una arena limosa con menor presencia de concreciones de hierro, muy consistente. Los valores de humedad son elevados, con un promedio entre 35 % y 40 %. Se clasifica, según el SUCS como limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos (MH). El bajo valor promedio del número de golpes del ensayo de penetración estándar (NG-SPT) de 19 los clasifica como suelos poco consolidados y medianamente densos (Tabla 4). La velocidad de ondas transversales calculada es de 264 m/s (Tabla 5).

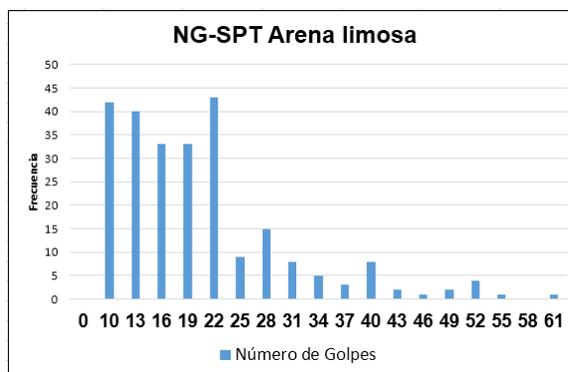


Gráfico 2. Frecuencia del NG-SPT para la arena gravosa mezclada con arcilla limosa

El análisis estadístico, de los datos de NG-SPT, muestra una varianza baja (102) en relación al horizonte de arena gravosa con arcilla limosa y al de grava limosa. El coeficiente de variación con un valor de 0.53 es igual al del horizonte de arena gravosa con arcilla limosa.

Estadígrafo	Arena limosa
Media	19
Coefficiente de variación	0,53
Mediana	17
Moda	20
Desviación estándar	10,1
Varianza de la muestra	102,8
Mínimo	2
Máximo	60
Cuenta	250

Grava limosa

La presencia de mezclas de fragmentos de rocas y materiales limo arcilloso constituyen los principales elementos que caracterizan este horizonte. Según el SUCS clasifica como gravas limosas, mezclas mal graduadas de grava, arena y arcilla (GM). Son suelos densos (Tabla) con un valor promedio de número de golpes del ensayo de penetración estándar de 36. La velocidad de ondas transversales calculada es de 297 m/s.

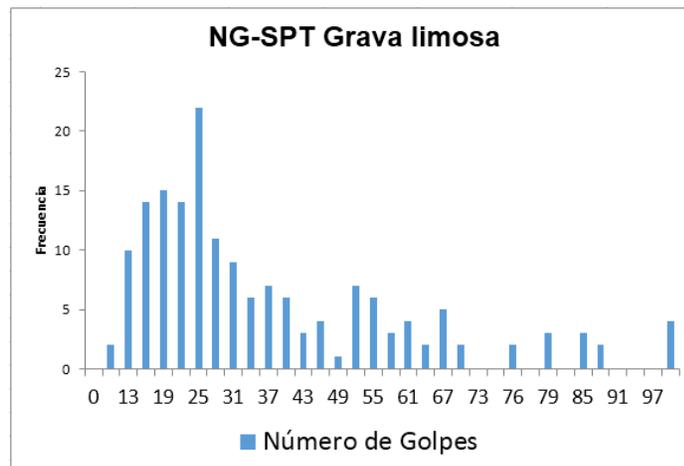


Gráfico 3. Frecuencia del NG-SPT para la arena gravosa mezclada con grava limosa. El análisis estadístico, de los datos de NG-SPT, muestra una varianza alta (379) en relación a los horizontes de arena gravosa con arcilla limosa y al horizonte de arena limosa; el coeficiente de variación presenta el valor más alto dentro del perfil.

Estadígrafo	Grava limosa
Media	34
Coefficiente de variación	0,57
Mediana	28
Moda	24
Desviación estándar	19,5
Varianza de la muestra	379,2
Mínimo	9
Máximo	87
Cuenta	163

Sedimentos aluviales

Estos depósitos se relacionan con los materiales aluviales de las terrazas de los ríos Aserrío y Cabaña, constituidos por sedimentos arenosos, areno-arcillosos y conglomerados, estos últimos conforman fragmentos de rocas ultramáficas serpentizadas (peridotitas y harzburgitas) que clasifican, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), como arena arcillosa con grava (SC), con potencia media de 2 m y limo plástico (MH). El nivel freático se encuentra como promedio a 1,4 m de profundidad. Las arcillas están representadas por montmorillonita y en la parte superior del perfil aparecen materiales orgánicos.

Son sedimentos poco consolidados, como indica el bajo valor promedio del número de golpes del ensayo de penetración estándar (NG-SPT) de 18 (Tabla). El valor obtenido de velocidad de ondas transversales 150-180 m/s de acuerdo a Lomtadze, 1983 (Tabla).

Sedimentos palustres

Estos depósitos se presentan como una capa compuesta por materia orgánica en descomposición las cuales pertenecieron a antiguos pantanos parálidos, los que fueron rellenados por los sedimentos. Tienen forma de arena fina, muy saturados y abundante contenido de materia orgánica.

Desde el punto de vista geotécnico esta capa presenta condiciones muy desfavorables por su consistencia muy blanda o floja con un promedio del valor de número de golpes de 8 (Tabla). La velocidad de ondas estimada es de 150 m/s de acuerdo a Lomtadze, 1983 (Tabla).

4.4. Análisis de la rigidez sísmica.

La densidad, velocidad de propagación de las ondas elásticas y rigidez sísmica, constituyen características principales al evaluar la respuesta dinámica de los suelos.

En el caso de los suelos del perfil de Moa se calculó la rigidez sísmica para cada horizonte ingeniero geológico determinado utilizando la fórmula descrita en el capítulo dos.

El contraste de rigidez sísmica (C) aumenta desde la roca hasta la superficie como se observa en la Tabla 7; a mayor contraste de rigidez sísmica la amplificación de la onda es mayor.

Tabla 7. Rigidez sísmica para el perfil de los suelos de Moa.

<p>Vs: 284 m/s ρ: 1600 Kg/m³ <u>$V_{Y1} = 454400 \text{ Ns/m}^3$</u> Horizonte (1). arenas con grava (SP) y arenas limosas (SM)</p>	
<p>Vs: 264 m/s ρ: 2050 Kg/m³ <u>$V_{Y2} = 541200 \text{ Ns/m}^3$</u> Horizonte (2). limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos (MH)</p>	<p>$C = V_{Y2} / V_{Y1} = 1.2$</p>
<p>Vs: 297 m/s ρ: 2350 Kg/m³ <u>$V_{Y3} = 697950 \text{ Ns/m}^3$</u> Horizonte (3). Gravas limosas, mezclas mal graduadas de grava, arena y arcilla.</p>	<p>$C = V_{Y3} / V_{Y2} = 1.3$</p>
<p>Vs: 2800 m/s ρ: 3800 Kg/m³ <u>$V_{Y3} = 10640000 \text{ Ns/m}^3$</u> Roca ultrabásica serpentizada</p>	<p>$C = V_{Y1} / V_{Y3} = 15.2$</p>

Si la rigidez sísmica en el perfil disminuye se hace menor la resistencia del suelo al movimiento de la onda sísmica. De acuerdo a la ley de preservación de energía la amplitud de la onda aumenta (se amplifica).

4.5. Aumento de la magnitud sísmica por el tipo de suelo y profundidad de yacencia de las aguas subterráneas.

Partiendo de las características ingeniero-geológicas de la región urbana de Moa, se definieron cuatro columnas generalizadas (situaciones ingeniero-geológicas típicas) para el área de su emplazamiento (Figura 21). Se tuvo en cuenta la composición litológica, la potencia de los suelos y la profundidad de yacencia de las aguas subterráneas (ver Figura 23).

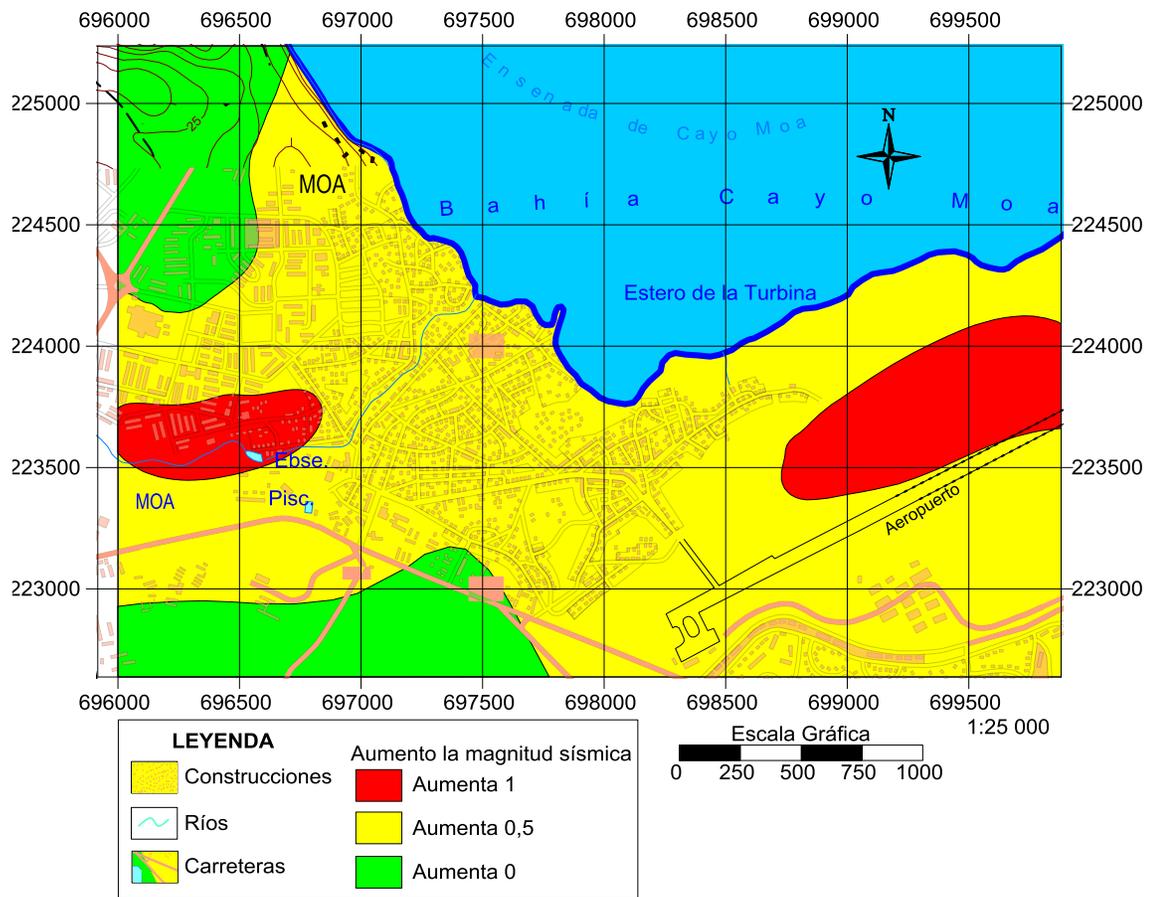


Figura 23. Mapa de aumento de la magnitud sísmica por profundidad de yacencia de las aguas subterráneas para la región urbana de Moa. Raquel Vinardell Peña 2018.

La profundidad de yacencia de las aguas subterráneas influye en la magnitud del sismo. De acuerdo a Lomtadze, V. D. 1977, cuando el nivel de profundidad de las aguas subterráneas se encuentra a una profundidad de 10 metros o más, prácticamente no influye en la magnitud del terremoto.

Al aumentar el nivel de las aguas subterráneas aumenta la magnitud del sismo, cuando este se ubica entre 0 y 1 m la magnitud aumenta en uno (Figura 23).

A cada columna generalizada se le asigna una variación de magnitud sísmica, en función de los criterios de Medvedev, 1973 (Anexo 2), adaptados a las condiciones ingeniero-geológicas locales. De esta forma se obtiene el mapa de variación de la intensidad sísmica mediante el método de analogías ingeniero-geológicas, donde destacan sectores con posibles incrementos de hasta 2,8 grados.

Estas áreas de máximo incremento, se vinculan a espesores variables de sedimentos no consolidados (sedimentos palustres), o a los sedimentos aluviales de baja densidad de las terrazas de los ríos Moa y Cabañas (ver Figura 24).

En este caso de estudio, se eligió la variante cualitativa (Método de analogías ingeniero geológicas, Anexo 2), atendiendo a la categoría de esquema de la información ingeniero-geológica de partida.

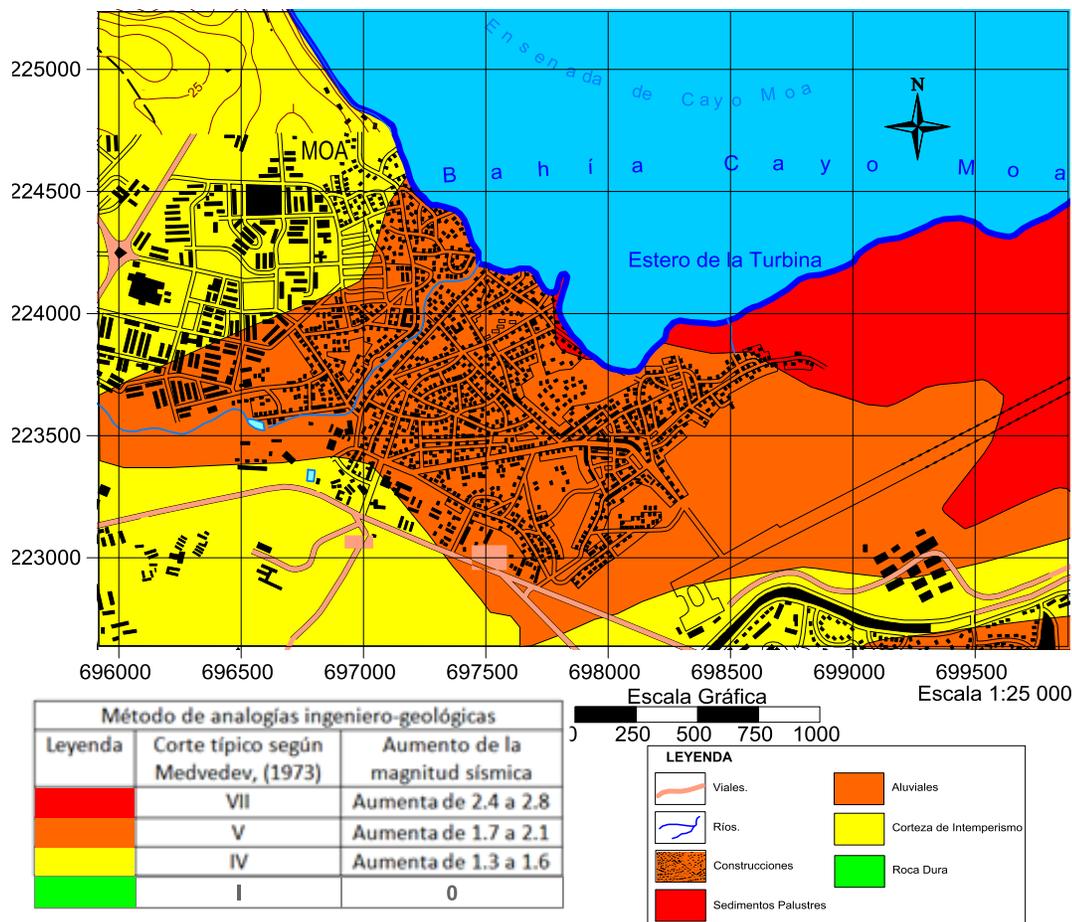


Figura 24. Mapa de variación de la intensidad sísmica, obtenido mediante el método de analogías ingeniero-geológicas por perfiles típicos (Medvedev, 1973). Raquel Vinardell Peña 2018

4.6. Evaluación del potencial de licuefacción

El estudio y aplicación en el área de estudio de los criterios de vulnerabilidad por licuefacción explicados en el epígrafe 3.5 del capítulo III, permitió definir para el sector urbano de Moa cuatro zonas de susceptibilidad a la licuefacción como se representa en el mapa de la figura 25.

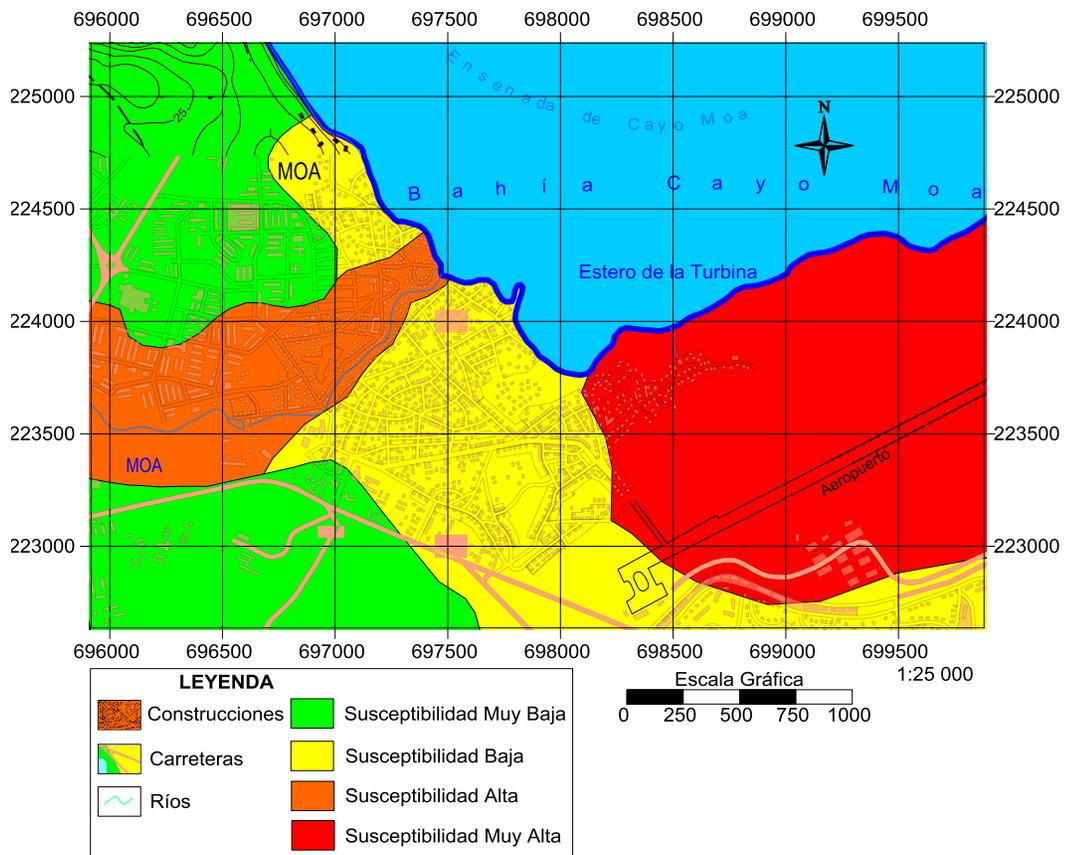


Figura 25. Mapa de susceptibilidad por licuefacción. Raquel Vinardell Peña 2018.

Las zonas representadas con muy alta y alta susceptibilidad a la licuación, corresponden a los sedimentos palustres y a los sedimentos aluviales, ambos depósitos del cuaternario que se encuentran muy saturados resaltándose zonas donde el nivel de profundidad de yacencia de las aguas subterráneas oscila entre 0-1 m.

Las zonas susceptibles a licuar se relacionan con los niveles más bajos del NG-SPT con valores promedios que oscilan entre 8 y 18 (Tabla) representativos de suelos con baja densidad relativa los cuales son más susceptibles que aquellos con una densidad alta.

4.7. Zonificación en función del periodo dominante considerando el espesor de los suelos y la velocidad de ondas transversales

Una vez determinada la potencia de los depósitos no consolidados y las velocidades de ondas transversales (Tabla), se puede estimar el periodo dominante en cada punto mediante la ecuación de Bard (1985), descrita en el epígrafe 3.6 del capítulo III.

En este caso, se determinaron cinco clases de periodos dominantes (Tabla 3) que responden a cada una de las situaciones geológico-geotécnicas presentes en el área de estudio.

Las clases (0,18-0,22 y 0,22-0,26) son las más proclives a la amplificación de las ondas sísmicas. Según su cartografía, se relacionan con los sedimentos aluviales y los sedimentos palustres, cuyos parámetros geotécnicos son los más desfavorables (ver Figura 26).

Tabla 3. Calculo del periodo dominante por tipo de horizonte

Tipo de suelo (SUCS)	Periodo dominante V. D. Lomtadze, 1983	Periodo dominante en este estudio
Sedimentos palustres	0,22 – 0,26	-
Sedimentos aluviales	0,18 – 0,22	-
Arena gravosa con arcilla limosa	0,02 – 0,05	0,03
Arena limosa	0,03 – 0,18	0,05
Gravas limosa	0,03 – 0,09	0,06

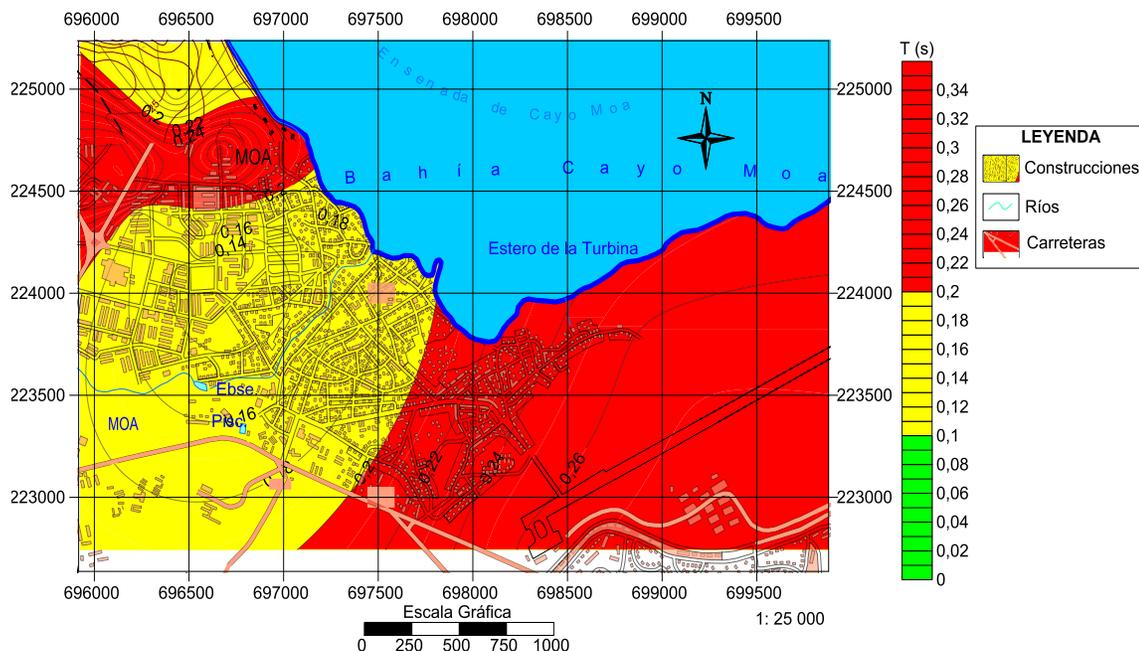


Figura 26. Mapa de periodo dominante de los suelos del sector urbano de Moa. Raquel Vinardell Peña, 2018

El cálculo de la velocidad de las ondas transversales se realizó, en esta investigación, utilizando los valores del número de golpes del ensayo de penetración estándar mediante las ecuaciones empíricas de Imai, 1981.

Los parámetros dinámicos más favorables para la amplificación de las ondas sísmicas corresponden a los depósitos palustres del cuaternario con niveles freáticos someros (0-1 m) y valores de periodo dominante de 0,22 – 0,26.

4.8. Microzonación sísmica del sector urbano de Moa. Integración de los resultados.

El mapa de la microzonación sísmica del sector urbano de Moa (ver Figura 27), se obtuvo a partir de la combinación de los mapas de aumento de la magnitud sísmica por tipo de suelo, por profundidad de yacencia de las aguas subterráneas, de susceptibilidad por licuefacción y de periodo dominante del suelo, todo el procesamiento se realizó utilizando los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G).

El mapa posee un alto valor práctico desde el punto de vista del ordenamiento territorial y el diseño sismo resistente, porque delimita las zonas en las que puede existir mayor probabilidad de amplificación de la magnitud sísmica.

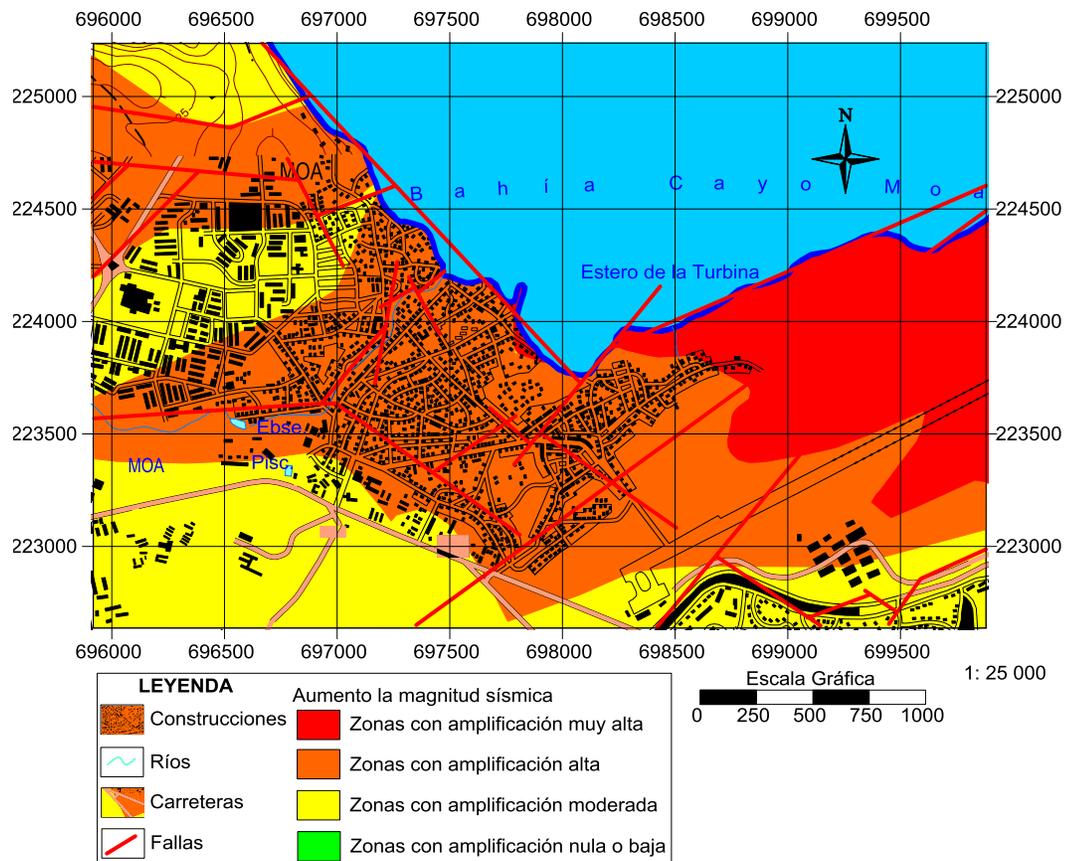


Figura 27. Mapa de microzonación sísmica del sector urbano de Moa. Raquel Vinardell Peña, 2018

En la Tabla 4, se presenta la Clasificación Geotécnica-Amplificación de los materiales geológicos del sector urbano de Moa donde se ha diferenciado siete categorías de terrenos en función de su respuesta sísmica. Como se observa en dicha tabla, se asocian a los materiales recientes las zonas de mayor amplificación.

Una vez obtenida la clasificación en las siete categorías consideradas, se ha estimado el grado de amplificación mediante el valor de la velocidad de las ondas transversales (V_s) del terreno. La asignación de los valores de V_s para cada categoría, se ha realizado en función de las características geológico-geotécnicas de las distintas formaciones geológicas. En las clases IIa, IIb, y III el valor de la V_s ha sido calculado mediante la fórmula empírica de Imai (1981) en función del valor de N_{spt} y la naturaleza de los materiales (Tabla).

Tabla 4. Clasificación Geotécnica-Amplificación de los materiales geológicos del sector urbano de Moa. Raquel Vinardell Peña, 2018.

Clases (Categorías del terreno)	Descripción geotécnica	Descripción geológica	Vs (m/s)	Amplificación relativa/numérica
I	Rocas duras y poco fragmentadas	Roca ultrabásica Serpentinizada (RMA)	>1500	Nula/0.8
Ila	Roca semi-dura agrietada de poca a media y alteración media	SM – Serpentina lixiviada Arena limo-gravosa con arcilla, con fracción gruesa constituida por fragmentos de serpentinitas. La fracción fina presenta alta plasticidad. Color- verdoso.	1500-800	Muy baja/1.0
Ilb	Roca semidura muy agrietada y muy alterada	SM – Serpentina lixiviada Arena limo-gravosa con arcilla, con fracción gruesa constituida por fragmentos de serpentinitas. La fracción fina presenta alta plasticidad. Color- verdoso.	750-450	Baja/1.0
III	Suelo friable arcilloso de alta plasticidad	MH- Limo arcilloso de alta Plasticidad. Color- varía desde carmelita amarillento hasta verde amarillento, en partes abigarrado.	350-250	Media-Alta/2.0
IV	Suelos friables arenosos	SM – Arena gravo-limosa con fracción gruesa constituida por perdigones de óxido de hierro. Plasticidad baja. Color – Rojo ladrillo oscuro.	250-180	Alta/2.0
V	Suelos muy blandos H<3 metros. Suelos saturados y zonas con nivel freático < 1 metro	Depósitos costeros, cauce de ríos y marismas: Fangos, Limos y Arcillas	180-150	Alta/2.4-2.8
Va	Suelos cohesivos blandos. Arcillas IP>40 Suelos no cohesivos: limos y arenas poco compactas	Sedimentos cuaternarios friables arcilloso arenoso con propiedades especiales, palustres.	<150	Muy alta/2.4-2.8

ZONA 1 CON AMPLIFICACIÓN MUY ALTA: Corresponde al área ocupada por suelos muy blandos tipo fango, arcillas y limos sueltos. Estos sedimentos palustres del cuaternario, se localizan fundamentalmente en la llanura del aeropuerto y parte del litoral costero. La zona resulta especialmente problemática desde un punto de vista de respuesta sísmica, no sólo debido a los efectos de amplificación sísmica (que pueden resultar muy altos), sino también, por el posible desarrollo de fenómenos de licuefacción debido a la profundidad del nivel freático, que por lo general es muy alto (0-1 m). Los valores de periodo dominante más elevados están asociados a estos sedimentos alcanzando valores de 0,29 s.

ZONA 2 CON AMPLIFICACIÓN ALTA: En esta zona (clases IV y V, de la Tabla 4), aparecen suelos friables arenosos y suelos muy blandos saturados con zonas donde el nivel de profundidad de yacencia de las aguas subterráneas se ubica entre 0-1 m. Son terrenos que presentan un comportamiento mecánico mixto entre arena grava limosa y arcillas. Se encuentran fundamentalmente en la parte central del área de estudio. En estas zonas se espera una amplificación alta asociada a los sedimentos aluviales de los cauces de ríos Aserrío y Cabaña y a los depósitos costeros.

ZONA 3 CON AMPLIFICACIÓN MODERADA: La zona (clase III de la Tabla 4), que presentan un comportamiento mecánico mixto entre roca blanda y suelo duro, está asociada a las zonas de corteza de intemperismo. En estas zonas se espera una amplificación moderada, aunque las respuestas pueden variar notablemente en algunos puntos determinados, en función de la presencia de materiales blandos y de su grado de alteración. En aquellos terrenos donde aparecen las cortezas de meteorización el efecto de sitio dependerá de la litología manifiesta según el perfil laterítico donde su relevancia estará condicionada a la presencia o no de agua subterráneas. Se destacan hacia el oeste, zonas donde los valores de periodo dominante del suelo son elevados con valores de hasta 0.22 s.

ZONA 4 CON AMPLIFICACIÓN NULA O BAJA: Corresponde a las zonas del perfil laterítico ocupadas por rocas duras a muy duras, representadas por la serpentinita lixiviada y roca ultrabásica serpentinizada (incluye las clases I, IIa y IIb de la Tabla 4), cuyos efectos en la amplificación de las ondas sísmicas son mínimos o nulos. Las mismas no afloran en el área de estudio, aunque si subyacen a los depósitos no consolidados.

CONCLUSIONES

1. Las condiciones ingeniero-geológicas regionales indican la presencia de sedimentos no consolidados para el emplazamiento de la ciudad de Moa, con mayor predominio de sedimentos palustres y aluviales del cuaternario. Los niveles de aguas subterráneas son generalmente someros. Los aspectos mencionados tienen incidencia en el comportamiento dinámico de los suelos.
2. El procedimiento aplicado para la evaluación de la respuesta dinámica de los suelos del sector urbano de Moa, propició integrar las propiedades físico-mecánicas de los suelos, espesores, propiedades dinámicas, así como el pronóstico del aumento de la magnitud sísmica y de los fenómenos inducidos. La visión integrada de estos análisis permitió establecer la microzonación sísmica para el área de estudio.

3. La evaluación de la respuesta dinámica de los suelos para la ciudad de Moa permite establecer cuatro zonas de amplificación: Zona de amplificación muy alta, Zona de amplificación alta, Zona de amplificación moderada y Zona de amplificación baja o nula.

RECOMENDACIONES

1. Incrementar el grado de estudio geotécnico para el área urbana de Moa.
2. Utilizar la cartografía derivada de este trabajo en los planes futuros de ordenamiento urbano de la ciudad de Moa.

BIBLIOGRAFIA

1. Aki, K., (1988). American Society of Civil Engineering. Geotechnical Special Publication, 20, 103-155.
2. Akin, M.K, Kramer, S.L. y Topal, T., (2011). "Empirical correlations of shear wave velocity (V_s) and penetration resistance (SPT-N) for different soils in an earthquake-prone area (Erbaa-Turkey)". Journal: Engineering Geology. 119, 1–17.
3. Álvarez, S., (2001). Cuantificación del efecto local en el registro sísmico mediante la aplicación del método de elementos de contorno. Tesis de doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 1-199.
4. Arango et. al, (2017). Estudio de la sismicidad de la localidad de Moa para la construcción de puente de empresa del Niquel "Pedro Sotto Alba-Moa Niquel s.a."
5. Astroza, M. y Monge, J., (1991). "Regional Seismic Zonation en Central Chile". In 4th Internacional Conference on Seismic Zonation, California, 487-494.
6. Bard, p-y. (1995): "Effects of surface geology on ground motion: recent results and remaining issues". Proc. 10th European conference on earthquake engineering, Vienna, Austria.
7. Berilgen, M., (2007). "Evaluation of local site effects on earthquake damages of Fatih Mosque". Journal: Engineering Geology. 91, 240-253.
8. Borchardt, R.D. y Gibas, J.F., (1976). "Effects of local geological condition in the San Francisco bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake". Bulletin of the Seismological Society of America. 66(2) 497-500.
9. Borchardt, R.D., Wentworth, C.M., Janssen, A., Fumal, T., y Gibbs, J., (1991). "Methodology for predictive GIS mapping of spatial study zones for strong ground shaking in the San Francisco Bay Region". In CA. 4th International Conference on Seismic Zonation, 5-552.
10. Chuy, T.J. y Álvarez, J.L., (1995). "Peligrosidad sísmica de Cuba con fines de la Norma Sismorresistente cubana". Memorias del X Fórum Nacional de Ciencia y Técnica, La Habana, 1-24.
11. Chuy, T.J. y González, B.E., (1980). "Catálogo macrosísmico de la región occidental de Cuba". Revista Investigaciones Sismológicas en Cuba. (1) 18–32.

12. Chuy, T.J., (1988). "Influencia de las condiciones geológicas en la intensidad sísmica de Santiago de Cuba". Revista Movimientos Tectónicos Recientes de Cuba, (2), 46-63.
13. Chuy, T.J., "Terremotos fuertes y peligrosidad sísmica de Cuba". En memorias de la 12 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura (III TIARD) ISPJAE, La Habana, 1-10, 2004.
14. Chuy, T.J., Comunicación personal, Tomás Jacinto Chuy Rodríguez, Centro Nacional Investigaciones Sismológicas. Ciudad de Santiago de Cuba, 20 de septiembre del 2013.
15. Chuy, T.J., Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación sísmica. Tesis de doctorado. Centro Nacional de Investigaciones sismológicas, Santiago de Cuba, 1-178, 1999.
16. Chuy, T.J., Orbera, L., Hernández, J.R., Magaz, A., Sánchez, F., Pérez, C., González, E., Fundora, M., Rubio, M., Alvarez, J.L., Cotilla, M., Arango, D., Iturralde, M., Rodríguez, J., Marquetti, M.C. y Ramírez, R., (1997) "Dictamen Conclusivo. Comisión Ad-hoc para la determinación de las Zonas Sismogénicas de la región Oriental de Cuba y zonas aledañas" Revista Electrónica Ciencia en su PC. 2(2) 1-15.
17. Chuy, T.J., Zapata, J.A., Morejón, G., Márquez, P.I., Sánchez, D., Diez, E.R., Puente, G., Vázquez, J.C., Toledo, A. y Guerra, G., Informe Final. (2006). Proyecto Territorial T-0225. Caracterización del riesgo sísmico de la ciudad de Guantánamo, provincia Guantánamo. Fondos del CENAIIS y del CITMA, 1-98.
18. Cobiella J. Y Rodríguez J. (1978). Algunos rasgos de la geología de Cuba oriental. Ciencias Técnicas, Serie Geodesia y Geofísica No.3.
19. Cobiella, J.L., Gil, S., Hernández, A. y Díaz, N, (2000) "Estratigrafía y tectónica de la Sierra del Rosario, Cordillera de Guaniguanico, Cuba Occidental". Revista Minería y Geología. 17(1) 5-15.
20. Dikmen, U., (2009). "Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils". Journal of Geophysics and Engineering. 6(1) 61-72.

21. Ershov, I.A., Popava, E.V., Rubio M y Chuy, T.J., (1983). Seismic microzoning of the nuclear power plant construction site in the Cienfuegos area. Research of seismicity in seismic zones of less activity. Ed. Nauka, Moscú, 1-105.
22. Everden, J.F., Kohler, W.M. y Cloe, G.D., (1981). "Seismic intensities of earthquake of Conterminous United States: Their prediction and interpretation". U.S.G.S. Professional Paper. (1223) 1-56.
23. Fernández de Lara, R. y Fajardo, S., (2002). "Contribución de la información geofísica a la constitución geológica de la provincia de Pinar del Río en apoyo a modelos regionales de prospección". En memorias del II Congreso Cubano de Geofísica. Ciudad de La Habana, 1-15.
24. Fernández, A.I., Fernández, B.C., Marisy, J. y Zapata, J.A., (1993). Reporte de Investigación: Determinación de los efectos sísmicos y parámetros de los terremotos máximos de cálculo y proyecto para el poblado de San Luis en Santiago de Cuba. Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, 1-52.
25. Fernández, A.I., Fernández, B.C., Zapata, J.A., Marisy, J., (2000). Efectos sísmicos en la ciudad de Baracoa. Editorial Academia, La Habana 67 -71.
26. Fernández, A.I., Zapata, J.A., Fernández, B. y Almaguer, M., (1991a). Reporte de Investigación: Microzonación sísmica de San Luis por el método de las analogías ingeniero-geológicas. Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, 1-20.
27. Fernández, B.C., (2000). Posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuación en la cuenca de Santiago de Cuba catalizado por terremotos fuertes. Tesis de Maestría, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Cuba, 1-70.
28. Fernández, B.C., Fernández, A.I., Zapata, J.A. y Almaguer, M., (1991b). Reporte de Investigación: Esquemas de microzonación sísmica de los poblados de Palma Soriano y San Luis. Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, 1-37.
29. Fernández, B.C., Rivera, Z., Reyes, C., Zapata, J.A., (2000). "Los fenómenos físico-geológicos secundarios en la ciudad de Santiago de Cuba". Revista Minería y Geología. 17(2)1-3.

30. García, S. Chuy, T.J. y Zapata, J.A., (1982). Criterios acerca de las características de amplitud frecuencia de las oscilaciones de los suelos en el territorio de Santiago de Cuba. Tesis de licenciatura en Física, Universidad de Oriente, Cuba, 1-47.
31. Geli, I.; Bard, P.-Y.; Jullien, B. (1988): "The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results". Bulletin of the seismological society of America, 78, pp.42.
32. González de Vallejo, L.I., Ingeniería Geológica. Pearson Educación, 1-744, 2002.
33. González, B.E y Pérez, L., (2003). "Utilización de los datos ingeniero-geológicos, hidrogeológicos y tectónicos en la microzonación sísmica de áreas de objetivos económicos importantes". En memorias del V Taller Internacional de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente. Geomin'2003, La Habana, 1-6.
34. González, B.E y Pérez, L., (2003). "Utilización de los datos ingeniero-geológicos, hidrogeológicos y tectónicos en la microzonación sísmica de áreas de objetivos económicos importantes". En memorias del V Taller Internacional de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente. Geomin'2003, La Habana, 1-6.
35. González, B.E, De la Rosa, A.L., García, J., Serrano, M., Pérez, L.D., Fernández, E., Seo, K., Samano, T. y Rodríguez, V., (2000). "Surface Soil effects evaluation of four municipalities of the city of Havana based on geotechnical data and microtremor measurements". In The workshop to exchange research information of the research project Joint Study on microtremors and seismic microzonation in earthquake countries, Kanagawa, Japan, 1-35.
36. González, B.E. y Kogan, L.A., (1987). "Estimación del grado base para el suelo patrón de la ciudad de Santiago de Cuba. Resultados de las Investigaciones de los Proyectos Geofísicos Internacionales". Revista Investigaciones Sismológicas. (10) 1-18.
37. González, B.E., (1991). Estimación del efecto sísmico en la ciudad de Santiago de Cuba. Tesis de doctorado, Instituto de Geofísica y Astronomía, La Habana, 1-170.
38. González, B.E., (1998). The seismic risk project of the city of Habana: Background and expected results. The effects of surface geology on seismic motion. Irikura, Kudo, Okada and Sasatni (Eds). Balkema, Rotterdam, 1-30.

39. González, B.E., González, C., Serrano, M., Pérez, L., Coronado, C. y Basulto, M., (2007). "Evaluación detallada del peligro sísmico y microzonificación sísmica de las áreas de emplazamiento de instalaciones críticas". Memorias de la II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, La Habana, 1-25.
40. González, B.E., Mirzoev, K., Chuy, T.J., Golubiatnikov, V.L., Lyskov, L.M., Zapata, J.A. y Humberto, A., (1989). "Microzonación sísmica de la ciudad de Santiago de Cuba". Comunicaciones científicas sobre Geofísica y Astronomía, La Habana, 1-14.
41. González, B.E., Pacheco, S., Pedroso, I., García, J., Pérez, L. Lara, Serrano, M., Guerra, M., (2005). "Riesgos geológicos y degradación ambiental: El caso del asentamiento urbano del Mariel, Cuba occidental". Memorias de la I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, La Habana, 1-23.
42. González, B.E., Pacheco, S., Pedroso, I., García, J., Pérez, L. Lara, Serrano, M., Guerra, M., (2005). "Riesgos geológicos y degradación ambiental: El caso del asentamiento urbano del Mariel, Cuba occidental". Memorias de la I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, La Habana, 1-23.
43. González, G. y Carrizo, D., (2003). "Segmentación, cinemática y cronología relativa de la deformación tardía de la Falla Salar del Carmen, Sistema de Fallas de Atacama, (23°40'S), norte de Chile". Revista Geológica de Chile, 30(2) 223-244.
44. González, N., Ramos, G. y Romero, Z., (2001) "Las obras hidrotécnicas y su influencia en el régimen de las aguas subterráneas: Caso de estudio en la provincia de Pinar del Río, Cuba". En Memorias del III Congreso Internacional sobre Ingeniería Hidráulica, La Habana, 2-6.
45. Gosar, A., (2007). "Microtremor HVSR study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw5.6 and 2004 Mw5.2 earthquakes". Journal: Engineering Geology. 91, 178-193.
46. Gutiérrez, A. y Franco, A., (2010). Análisis de efecto de sitio en Ciudad Guzmán, Jalisco, México. Informe técnico, Centro Nacional de Prevención de desastres, 1-19.
47. Hanumantharao, C. y Ramana, G.V., (2008). "Dynamic soil properties for microzonation of Delhi, India". Journal of Earth System Science. (117) 719-730.

48. Hasançebi, N. y Ulusay, R., (2007). "Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. (66) 203-213.
49. Imai, T., (1981). En: *Proceedings 9th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokio, 2*, 257-260.
50. Iturralde-Vinent, M.A. 1996. *Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba*. I.G.C.P. Project 364, Special Contribution No. 1.
51. Iyisan, R., (1996). "Correlations between shear wave velocity and in-situ penetration test results". *Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers*. 7(2) 1187-1199.
52. Lomtadze, V. D. 1977. *Geología aplicada a la ingeniería. Geodinámica aplicada a la ingeniería*. Ed. Pueblo y Educación, 560 p.
53. Macau, A. (2008). *Microzonación sísmica. Contribución a los estudios de peligrosidad sísmica a escala local en zonas rurales y urbanas*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, 328pp.
54. Mann P. et al. (2002): *Oblique collision in the northeastern Caribbean from GPS measurements and geological observations*. *Tectonics*. Vol. 21, No 6.
55. Medvedev, S. V. (1962): *Ingeniería Sísmica (en ruso)*. Nauka, Moscú.
56. Medvedev, S. V. (1973): *Recomendaciones para la Microregionalización Sísmica RSM-73, Serie "Cuestiones de Ingeniería Sísmica" Volumen 15*, Moscú.
57. Medvedev, S. V. (1977): *Complex method of seismic microzonig*. 6th World Conf. on Earthq. Engineering Vol 2. New Delhi pp 504-506.
58. Medvedev, S.V., (1962). *Engineerin seismology*. Israel Program for Scientific Translation. Jerusalem, 1-31.
59. Medvedev, S.V., (1973). *Engineerin seismology*. Israel Program for Scientific Translation. Jerusalem, 1-31.
60. Mirzoev, K.M, Lyskov, L.M, Kogan, L.A, González, B.E.; Chuy, T.J. y Zapata, J.A,
61. Nakamura, Y., (1989). "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface". *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*. (30-1) 25-33.

62. Ordaz, A., (2013). Evaluación de las condiciones ingeniero-geológicas para el pronóstico de la respuesta dinámica de los suelos: caso de estudio: ciudad de San Cristóbal, Cuba occidental. Tesis doctoral.
63. Popov, V.V., (1959) "Criterios Ingeniero-Geológicos de la zonación sísmica detallada". Revista: Sismología Ingenieril. (2)1-40.
64. Proenza, J. 1998. Mineralización de cromitas en la Faja Ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba). El ejemplo del Yacimiento Mercedita. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona. 227 p.
65. Quintas F. (1987). Nuevos datos faciales y estructurales de la provincia Guantánamo. Revista Minería y Geología, No.3.
66. Quintas F. (1989). Análisis estratigráfico y paleogeografía del Cretácico Superior y del Paleógeno de la provincia Guantánamo y áreas cercanas. Tesis doctoral, Departamento de Geología, I.S.M.M.
67. Rautian, T.G., Serrano, M., Fremd, V.M y Chuy, T.J., (1983). Instrumental Seismological observation and seismicity of the Cienfuegos area. Research of seismicity in seismic zones of less activity. Moscú, Ed. Nauka, 36-47.
68. Reporte de Investigación: Mapa de analogías ingeniero geológicas del territorio de la ciudad de Santiago de Cuba. Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, 1-10, (1983).
69. Riverón, A.B., (1996). Caracterización de la respuesta dinámica de los suelos en la ciudad de Moa. (Tesis de Maestría), ISMM, Dpto. de Geología. Moa.
70. Rodríguez A., (1998). Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgos de génesis tectónica". Tesis doctoral. ISMM. Dpto. de Geología. Moa.
71. Sagué, E., Zapata, J.A. y Prieto, I.M., (2006). "Elementos de Ordenamiento Territorial Ambiental para la prevención y mitigación de desastres naturales y antrópicos en la ciudad de Santiago de Cuba". Memorias del III Taller Nacional de Prevención y Mitigación de Desastres. UNAICC, Santiago de Cuba, 1-10.
72. Schenkova, Z. y Prochaikova, D., (1981). Determination of representative intensity values of individual localities. Geophysics, Leipzig, 225-238.
73. Seed et al., (1997). Bulletin Seismological. Society of America, 66, 221-243.

74. Seed, H.B. e Idriss, I.M., (1971). "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential". *Journal Soil Mechanics*, 97 (7) 1-16.
75. Seed, H.B., Cetin, K.O., Moss, R.E., Kammerer, A.M., Wu, J., Pestana, J.M., Riemer, M.F., Sancio, R.B., Bray, J.D., Kayen, R.E. y Faris, A., (2003). "Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework". In 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Keynote Presentation, H.M.S. Queen Mary, Long Beach, California, 1-72.
76. Seisdedos, J.L., Reyes, C.R., Guasch, F., Avich, B., Chuy, T.J., Zapata, J.A., Despaigne, G., Rivera, Z.C., Diez, E. y Puente, G., (2001) Atlas de Peligros Naturales del Municipio Guamá. Editorial Academia, La Habana, 1-84.
77. Sidimohamed, O., (2002). Caracterización hídrica e hidroquímica del río Cayo Guam. ISMMM.
78. Sills, L.B. (1978): "Scattering of horizontally polarized shear waves by surface irregularities". *Geophys. F. R. Astr. Soc.*, 54, pp. 319 – 348.
79. Topozada, R.T., Bennett, J.H., Borchardt, R.D., Saul, R. y Davis J.F., (1988) "Planning scenario for a major earthquake on the Newport –Inglewood fault zone". California, Special Publication. (102) 1-221.
80. Vila, S., Macau, A., Belvaux, M., Tarres, M., Moreno, B., Gasa, A., Vidal, T. y Goula, X., (2012). "Caracterización de efectos sísmicos locales en la ciudad de Lorca". *Física de la Tierra*. 24, 235-254.
81. Zaharia, B., Radulian, M., Popa, M.; Grecu, B.; Bala, A. y Tataru, D., (2008). "Estimation of the local response using the Nakamura Method for the Bucharest area". *Romanian Reports in Physics*. 60(1) 131-144.
82. Zapata, J. A y Rosabal, S. Y. (2010): Estudios sismológicos para proyecto factibilidad de la presa de colas en río Yagrumaje (Empresa Che Guevara), Moa. Informe científico – técnico para Geocuba Oriente Sur. Fondos del CENAIS. Octubre/2010. 15 pp.
83. Zapata, J. A y Rosabal, S. Y. (2010): Respuesta dinámica de suelos del vial para la planta de Ferroníquel de Moa, provincia Holguín. Informe científico – técnico para Geocuba Oriente Sur. Fondos del CENAIS. Diciembre/2010. 18 pp.

84. Zapata, J. A. et al, (1994): Investigaciones sismológicas complejas de las Plantas de Níquel en Moa, 1994. Reporte de Investigación del CENAIS y Geocuba Oriente Norte.
85. Zapata, J. A. et al, (1999): Amenaza Sísmica del área de ubicación del tanque de Sedimentación de la Planta de la Moa Nickel, S. A. "Pedro Sotto Alba". 1999. Reporte de Investigación del CENAIS y CESIGMA S. A.
86. Zapata, J. A., (julio 2007): Consulta técnica sobre análisis de riesgos potenciales en el proyecto Planta de Pulpa para la expansión de la Moa Nickel S. A. Reporte de Investigación CESIGMA. 23 pp.
87. Zapata, J. A.; Chuy, J. T.; Cutié, M.; Montenegro, C. y Marisy, J., Julio (2006): Investigaciones sismológicas para las obras de ampliación de la fábrica Moa Nickel S. A de Moa, Holguín. Fondos del CENAIS y CESIGMA S. A. 84 pp
88. Zapata, J. A.; Chuy, T. J.; Montenegro, C. y Marisy, J., diciembre (2006): Investigaciones sismológicas realizadas en zonas de interés del Puerto de Moa, Holguín. Fondos del CENAIS y Unión del Nickel - MINBAS. 69 pp.
89. Zapata, J. A.; Rubio, M. F. y Montenegro, C., (2007): Investigaciones sismológicas para proyecto de ampliación de las plantas de Ácido y Azufre de la Moa Nickel S. A. Reporte de Investigación de GAMMA. 46 pp.
90. Zapata, J. A.; Rubio, M. F.; Arango, E. D.; Cutié, M.; Chuy, T. J. y Batista, R. (2009): Parámetros sismológicos para proyecto de construcción de la Planta de Producción de Ferroníquel en Moa, Holguín. Reporte de Investigación de GAMMA. 109 pp.
91. Zapata, J. A.; Rubio, M. F.; Vega, N. M. y Ramos, K. (2009): Parámetros sismológicos para estudio de riesgo al proyecto de apertura y explotación del yacimiento Camarioca Norte – Moa Nickel S. A. Reporte de investigación. Inversiones GAMMA S.A./CENAIS. 53 pp.

ANEXOS

Anexo 1. Método de categorías por perfiles geológicos típicos (Popov, 1959).

Corte típico	Descripción	Variación de intensidad	Granito como patrón
1	Formaciones rocosas y semirrocosas, macizos cristalinos formando capas potentes compactas, no intemperizadas y no agrietadas, estructuras magnéticas cristalinas densas, formaciones sedimentarias de capas gruesas, metamórficas.	Disminuye 1 ó 2	0
2	Formaciones constituidas por capas menos compactas de rocas y semirrocas de gran potencia con yacencia normal o ligeramente plegadas, sin dislocaciones disyuntivas, no intemperizadas y no agrietadas.	Disminuye 1	0,7 – 1,1
3	Estratos potentes (no menos de 10 m) de suelo arcilloso seco con yacencia normal o plegada.	No varía	1,2 – 1,6
4	Estratos potentes (no menos de 10 m) de suelos densos granulares y compactos secos.	No varía	1,2 – 1,8
5	Capas de suelos rocosos y semirrocosos de escasa potencia (entre 1 y 2 m) que alternan con capas finas de sedimentos friables.	No varía o aumenta 1 en capas estratificadas	1,0 – 2,0
6	Capas alternas de suelos rocosos y semirrocosos con espesor inferior a 1 m, homogéneos, formando capas no muy potentes (entre 5 y 10 m). También suelos con variaciones faciales bruscas.	No varía o aumenta 1 en capas estratificadas	1,0 – 2,0
7	Suelos friables de potencia considerable inundados con nivel freático mayor que 5 m.	No varía o aumenta 1 en capas húmedas.	2,0 – 2,5
8	Suelos friables de potencia considerable inundados con niveles freáticos menores que 5 m o casi en la misma superficie (entre 1 y 3 m).	Aumenta 1	1,6 – 2,4
9	Suelos friables de menor potencia (entre 5 y 10 m) inundados casi hasta la superficie (entre 1 y 3 m).	Aumenta 1 a 2	1,6 – 2,0
10	Sedimentos eluviales, rocosos, semirrocosos y arcillosos, semirrocosos en estado seco e inundados, convertidos en fragmentos angulosos. Formaciones friables areno arcillosas.	Aumenta 1 a 2	1,6 – 2,9
11	Suelos friables de escasa potencia (menos de 5m) de capas finas (aluviales y deluviales), yacen sobre la superficie de formaciones compactas, se incluyen los contactos deluviales, aluviales y otros tipos.	Aumenta 1 a 2	2,3 – 3,0
12	Suelos arcillosos pantanosos o muy húmedos (lechos de ríos, turberas), inundados de agua hasta la superficie.	Aumenta 1 a 2	2,3 – 3,9
13	Relleno de minerales, otros materiales artificiales en estado seco o inundado, de potente yacencia o estratos finos.	Aumenta 1 a 2	2,3 – 3,9
14	Suelos de yacencia inestable (gravitacional) en forma de desprendimiento o deslizamiento de material de escombros pequeños y grandes triturados (angulosos de	Aumenta 1 a 2	2,3 – 3,9

Corte típico	Descripción	Variación de intensidad	Granito como patrón
	diferente potencia).		
15	Suelos carbonatados rocosos y semirrocosos karstificados, fuertemente deformados, en los que han terminado los fenómenos de alteración y trituración, aquí se incluyen los suelos de las zonas de trituración y destrucción por trabajos mineros o de extracción de rocas.	Aumenta 1 a 2	2,0 - 4,0
16	Contacto de rocas ígneas intrusivas o efusivas con rocas metamórficas o sedimentarias y otros suelos, contacto de la intrusión con los suelos donde se intruye.	Aumenta 1 a 2	1,0 - 4,0
17	Avalanchas o desprendimientos antiguos (detenidos en estado seco) de diferentes materiales y desprendimientos activos de diferentes tipos y espesor del cuerpo de la avalancha, impregnados de agua.	Aumenta 1 a 2	1,0 - 4,0
18	Rocas donde se desarrollan fallas inversas o desplazamiento lateral, que afloran a la superficie o están enmarcadas por sedimentos friables secos o saturados.	Aumenta 2	3,0 - 4,0

Anexo 2. Analogías Ingeniero Geológicas Medvedev, 1973.

Rocas	Aumento de la intensidad sísmica
I. Suelos rocosos	-
Granitos	0
Calizas, esquistos, gneises (sólidos)	0,2-0,4
Areniscas sólidas	0,5-0,8
II. Suelos semirrocosos	
Calizas, esquistos, areniscas de poca densidad	0,7-1,1
Margas, argelitas	0,7-1
III. Rocas detriticas gruesas	
Rocas de cascajo y guijo	0,9-1,3
Rocas de grava	1-1,5
IV. Suelos arenosos	
Arenas de grava y de grano grueso	1,2-1,4
Arenas de grano medio	1,3-1,6
Arenas de grano menudo y polvorientos	1,4-1,8
V. Rocas arcillosas	
Arcillas	1,2-1,6
Tierras arcillosas	1,3-1,7
Tierras arenosas	1,4-1,8
Tierras arcillosas (e=1) y arenosas (e=0,7)	1,7-2,1
VI. Rocas rellenas y suelos	
Rocas rellenas	2,3-2,6
Suelos	2,6-3
VII. Rocas inundadas	
Rocas de grava y guijo	1,6-2
Rocas arenosas	2-2,4
Rocas arcillosas (tierras arenosas, arcillosas)	2,4-2,8
Rocas rellenas y suelos	3,3-3,9