

Informe final del proyecto

Influencia de las características del suelo sobre los parámetros del movimiento del terreno durante terremotos en las ciudades de Bayamo, Manzanillo y Pilon

perteneciente al programa territorial

(909) Mejoramiento ambiental y desarrollo sostenible de la provincia Granma

Participantes:

Dr. Leonardo Alvarez
MSc. Zulima Rivera Alvarez
Ing. Eric Escobar
Ing. Eberto Hernández
MSc. O'Leary González
Emelina Fernández
Dr. Fernando Guasch

Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas

Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

Enero de 2009

El uso de la modelación por computadoras de las ondas sísmicas superficiales para la determinación de la acción sísmica es una alternativa válida de la microzonación sísmica y la misma es aplicable a un amplio rango de condiciones sismotectónicas. Como antecedente al inicio del proyecto teníamos su aplicación para la ciudad de Santiago de Cuba. El método es basado en el conocimiento detallado de estructuras tridimensionales y los mecanismos focales esperados, y permite calcular sismogramas muy reales en todos los sitios de interés, y entonces predecir el movimiento del terreno. Para el cálculo de la propagación de ondas en medios complejos se seleccionó el método de diferencias finitas en la variante conocida como “técnica híbrida”. Su idea principal es calcular trenes de onda completos generados por una fuente sísmica ubicada dentro de una estructura regional corteza-manto superior, la estructura de roca, y aplicar ese movimiento como entrada a la estructura local. El problema se resuelve en dos etapas: (a) las señales de las ondas P-SV y SH son generadas en la estructura rocosa anelástica por el enfoque de suma modal (1D, cualquiera de los 2D, o caso complejo); (b) esos trenes de ondas son usados como entrada para un esquema de diferencias finitas que se emplea para obtener las formas de onda a lo largo de la estructura anelástica, de variación lateral, local.

Los datos acerca de la estructura para usar en los cálculos son de dos tipos, uno regional, promediado, que corresponde a la trayectoria fuente-emplazamiento, y otro local, detallado, que corresponde a la estructura de la cuenca sedimentaria donde la ciudad descansa, que está situado sobre, o metido dentro del modelo regional. La selección de los métodos a aplicar en cada caso depende del grado de complejidad que presenten ambos. Los cálculos se realizan a lo largo de perfiles que cubren la ciudad completa y el movimiento del terreno determinado en emplazamientos sobre dichos perfiles es usado para la microzonación de la ciudad.

En el presente proyecto se planteó el uso de esta técnica con vistas a obtener mapas de microzonación de las ciudades de Bayamo Manzanillo y Pilon. Para ello se dividió el mismo en 4 tareas fundamentales. La primera dedicada al estudio de las estructuras regionales, la segunda dedicada al estudio de la estructura superficial bajo las propias ciudades, la tercera orientada a la preparación de un paquete de programas que permitiera el procesamiento de los sismogramas sintéticos con vistas a facilitar el trabajo de microzonación y la última dedicada al cálculo de sismogramas sintéticos y la realización de las microzonaciones.

Tarea 1: Modelos de la estructura geológica profunda regional (Anexo 1). En esta tarea se realizaron dos trabajos fundamentales, uno fue la recopilación de resultados de estudios geofísicos regionales que permiten caracterizar las capas más profundas de la corteza y el manto superior, y otro fue el procesamiento de información de levantamientos gravimétricos y magnéticos con vistas a obtener una caracterización de capas más superficiales de la corteza. Como conclusión de la misma se obtuvo la información necesaria para construir los perfiles regionales promediados unidimensionales necesarios para el cálculo de sismogramas sintéticos, pero también se obtuvo información que puede ser usada si se desea probar a realizar los cálculos con otros modelos regionales lateralmente heterogéneo.

Tarea 2: Modelos de estructura geológica de las cuencas donde están ubicadas las ciudades a estudiar (Anexo 2). Al igual que en la anterior se realizaron un trabajo de procesamiento de información de levantamientos gravimétricos y magnéticos con vistas a obtener una caracterización de las capas más superficiales de la corteza en un entorno de las ciudades estudiada. A esto se unió un trabajo de recopilación de datos de perforaciones geotécnicas y de todo tipo de datos existentes sobre las propiedades físicas de los suelos que están presentes en las ciudades estudiadas. Se realizó un profundo análisis geológico que trajo como resultado la clasificación de estos suelos en un grupo reducido de categorías y se determinaron sus propiedades físicas, necesarias para realizar los cálculos de sismogramas sintéticos.

Tarea3: Preparación de base computacional para el cálculo de sismogramas sintéticos y pruebas de los programas con los datos que se obtengan en el proyecto (Anexo 3). Una parte importante de los trabajos del proyecto fueron dedicados a la preparación de programas que permitieran, en primer lugar, extraer el máximo de información posible de los sismogramas sintéticos, y en segundo lugar, usar eficientemente esa información para realizar las microzonaciones deseadas. Este proyecto fue concebido en estrecha conexión con el proyecto internacional (UNESCO/IGCP – 487, ICTP Network NET-58) “Seismic microzoning in Latin America cities”, desarrollado en el período 2004-2008. Los programas de cálculo de sismogramas sintéticos ya existía en el ICTP, así como parte de los programas de extracción de información de los mismos. En el proyecto se modificaron algunos de éstos últimos y se escribieron otros nuevos. Además de ello se preparó un módulo completo para el procesamiento de los datos extraídos de los sismogramas sintéticos con vistas a la realización de una microzonación.

Tarea 4: Cálculo de sismogramas sintéticos y microzonación sísmica (Anexo 4). Esta tarea es la que engloba un mayor volumen de actividades. En primer lugar está la selección de los terremotos de escenario, que fueron 3, correspondientes a un terremoto de magnitud 7 en las zonas epicentrales de los terremotos de Santiago de Cuba (1932), Pión (1976) y Cabo Cruz (1992). Luego vino a selección del modelo de estructura regional, donde se seleccionaron 2, uno para el caso de Manzanillo y Bayamo y otro para el caso de Pión. Después se pasó a la confección de 22 perfiles que atravesaban las ciudades : 11 en Bayamo, 10 en Manzanillo y 1 en Pión. Una vez concluido el proceso de preparación de datos se pas al cálculo de sismogramas sintéticos y a la extracción de los parámetros y las funciones del movimiento del terreno. Esta información fue procesada mediante interpolación espacial en el caso de parámetros del movimiento del terreno y de clasificación en el caso de las funciones. Estos resultados, obtenidos en bloque (ver anexo 3) fueron sometidos a un análisis a partir del cual se seleccionaron aquellos que eran significativos con vistas a una microzonación. Con ayuda de un SIG se procesó un conjunto de mapas de parámetros del movimiento del terreno y se delimitaron las zonas de comportamiento cuasihomogéneo ante la ocurrencia de terremotos. En el caso de Pión el proceso hubo de ser diferente por la escasez de datos. Las microzonaciones finales están compuestas por esos mapas y tablas y gráficos de los valores promedio de los parámetros y funciones del movimiento del terreno que resultaron significativas.

Conclusiones generales:

- Se mejoró el conocimiento de la estructura regional de la corteza y el manto superior
- Se mejoró el conocimiento de la estructura de las capas más superficiales de los suelos en Bayamo y Manzanillo
- Se preparó un paquete de programas para el procesamiento de datos del movimiento del terreno con fines de microzonación sísmica
- Se obtuvieron 2 mapas (Bayamo y Manzanillo) y un esquema (Pión) de microzonación sísmica que mejoran el conocimiento que se tenía del problema en esas ciudades
- El esquema utilizado en este proyecto es repetible si se mejora el nivel de conocimiento sobre la estructura de los suelos bajo las ciudades estudiadas

Recomendaciones:

Continuar recopilando datos sobre la estructura de los suelos bajo las ciudades estudiadas que permitan mejorar los resultados aquí presentados

Anexo 1

Informe de la tarea 1 **Modelos de la estructura geológica profunda regional**

del proyecto: “Influencia de las características del suelo sobre los parámetros del movimiento del terreno durante terremotos en las ciudades de Bayamo, Manzanillo y Pílon”

perteneciente al programa: (909) Mejoramiento ambiental y desarrollo sostenible de la provincia Granma

Preparado por: Eric Escobar, Leonardo Alvarez, O’Leary González y Zulima Rivera

Introducción

Para poder modelar las ondas sísmicas superficiales en el intervalo de frecuencias de interés para la microzonación sísmica es necesario conocer la estructura de la corteza y el manto superior de la región por la que se propagan. Mientras mayor sea la frecuencia, su velocidad de propagación será más dependiente de la estructura de las capas superficiales, y según esta disminuye, la influencia de las capas más profundas aumenta. Para obtener una modelación confiable para frecuencias de hasta 5-10 Hz, es imprescindible conocer dicha estructura en los primeros 90-100 Km de profundidad, con más detalle en las capas más superficiales.

La forma de obtener esta estructura es sumamente complicada. Los primeros Km de profundidad se estudian con trabajos de geofísica detallada, para llegar hasta la profundidad de Mohorovicic es imprescindible realizar estudios de sondeo sísmico profundo, mientras que a profundidades mayores, por lo general sólo se llega con estudios de tipo sismológico. En este proyecto se realizó un estudio detallado de los primeros Km de profundidad en una región que comprende la provincia Granma y sus alrededores (epígrafe 1), se realizó una recopilación de los resultados de sondeo sísmico profundo obtenidos por otros autores para la región oriental de Cuba y sus acuatorias, así como trabajos sismológicos para la determinación de la estructura más profunda (epígrafe 2).

1) Modelo detallado de la estructura geológica regional en sus capas más superficiales

Se procesaron en su totalidad los datos magnéticos y gravimétricos existentes sobre la estructura geológica regional, además de datos del relieve. Primeramente se confeccionaron los mapas regionales para cada una de las variables potenciales, los límites de coordenadas expresados en, Cuba Sur, Conforme de Lambert, de $X=450000/550000$, $Y=170000/230000$. Estos mapas se confeccionaron con el programa OASIS Montaj. Utilizando la matriz final del campo aereomagnético de la República de Cuba (fuente datos IGP, de los levantamientos aerogeofisicos realizados en las ultimas dos décadas del siglo pasado, escalas 1:50 000 y 1:25 000) se realizó la corrida GRIDDEPTH, dentro del procesamiento del Sistema Oasis-Montaj 5.0, para la estimación automática de la locación y profundidad de las fuentes magnéticas que lo originan. Este programa parte de las relaciones que se establecen entre las componentes ortogonales del gradiente del campo potencial dado, con el grado de homogeneidad N de la ecuación de Euler. El citado grado de homogeneidad, puede interpretarse como un índice estructural, y es una medida de la razón de cambio con la distancia del campo potencial analizado. Para diferentes exploraciones, tareas, la estimación automática de la locación y profundidad de las fuentes magnéticas equivale usualmente a la determinación del máximo espesor de la sección sedimentaria. El programa GRIDDEPTH soluciona simultáneamente la ecuación de Euler para cada posición de la matriz de datos, dentro de una sub-matriz (ventana cuadrada) que se mueve a lo largo de cada fila, obteniendo la solución de la ecuación de Euler para el índice estructural seleccionado.

Se confeccionaron los mapas de reducción al polo magnético, regional y residual, así como de la señal analítica, aunque no todos se presentan y si aparecerán en el paquetes de archivos del informe.

Cada uno de ellos define parte de la estructura geológica y constituyen la base de la interpretación: profundidad, bordes de los cuerpos, propiedades físicas calculadas, etc. Se obtienen por esta vía los mapas de las potencias de las fuentes magnéticas, así como la potencia de los sedimentos que las cubren. Los perfiles o líneas de interpretación, modelos físico-geológicos se confeccionarán en la misma medida que se adquieran los modelos sintéticos sismológicos y su ubicación espacial.

La confección de los mapas regionales y sus residuales respectivas se realizaron a través de filtros con el sistema Oasis Montaj; por ej. para datos magnéticos y gravimétricos se utilizaron el filtro LPAS, pasa baja (0.0001 ciclos/Km.), que define la **componente regional** y el filtro HPAS, pasa alta (0.0015 ciclos/Km.), que define el **mapa residual**. Se utilizó un orden de filtro igual a 8, en una matriz de cálculo de 250x250m. Para el cálculo de la profundidad de las fuentes anómalas se utilizó un coeficiente o índice estructural (SI) de 0.5. En las condiciones geológicas de Cuba, se utiliza mucho el SI de 0.5 y de 1, por la condición de cuerpos en forma de dipolos y contactos, aunque difieren si se trata de campos potenciales magnéticos o gravimétricos. Aquí, al existir grandes espesores de sedimentos no consolidados resultó muy aproximado el SI aplicado. Posteriormente se recalcularon los resultados con el propio sistema, eliminando las soluciones no confiables y que no se justificaban según los datos geológicos de pozos profundos existentes con fines petroleros.

Breve descripción geólogo-geofísica-estructural del área de estudio

La Cuenca Cauto-Nipe representa una cuenca oceánica cuyo ambiente de formación originario estuvo caracterizado por fuerzas extensionales que propiciaron la extrusión de material profundo en una primera fase y la colisión de las unidades colindantes durante el cierre en una segunda fase a partir de la inversión de los esfuerzos extensionales (Chang, 1997, IGP, 2003). El Sinclinorio Central se podría representar como una cuenca con actividad magmática asociada con el orógeno de la Sierra Maestra, originado por la flexura y extensión de la litosfera. La Sierra Maestra es posible considerarla como un vestigio o parte de un arco de islas volcánico paleogénico (AVP) seccionado a lo largo de su eje por la falla transformante Oriente, la que representa el límite septentrional de la Placa Caribe. El basamento de la cuenca no ha sido cortado por ningún pozo; lo ocupan las rocas del Arco Volcánico Cretácico (AVC) con su cobertura Campaniano-Maastrichtiano de composición siliciclástico-carbonatada, que afloran al sur de la Sierra Maestra, y en la región del río Silantro, aunque existen algunos afloramientos aislados al norte de la Sierra Maestra en la región de Palma del Perro, y en el camino de Los Callejones a la Pimienta, al sur de Guisa, donde afloran por debajo de la Fm. Charco Redondo. Estas rocas están constituidas por micritas de color gris oscuro, fétidas, masivas, carsificadas en forma de lapiez. (García et al., 2007).

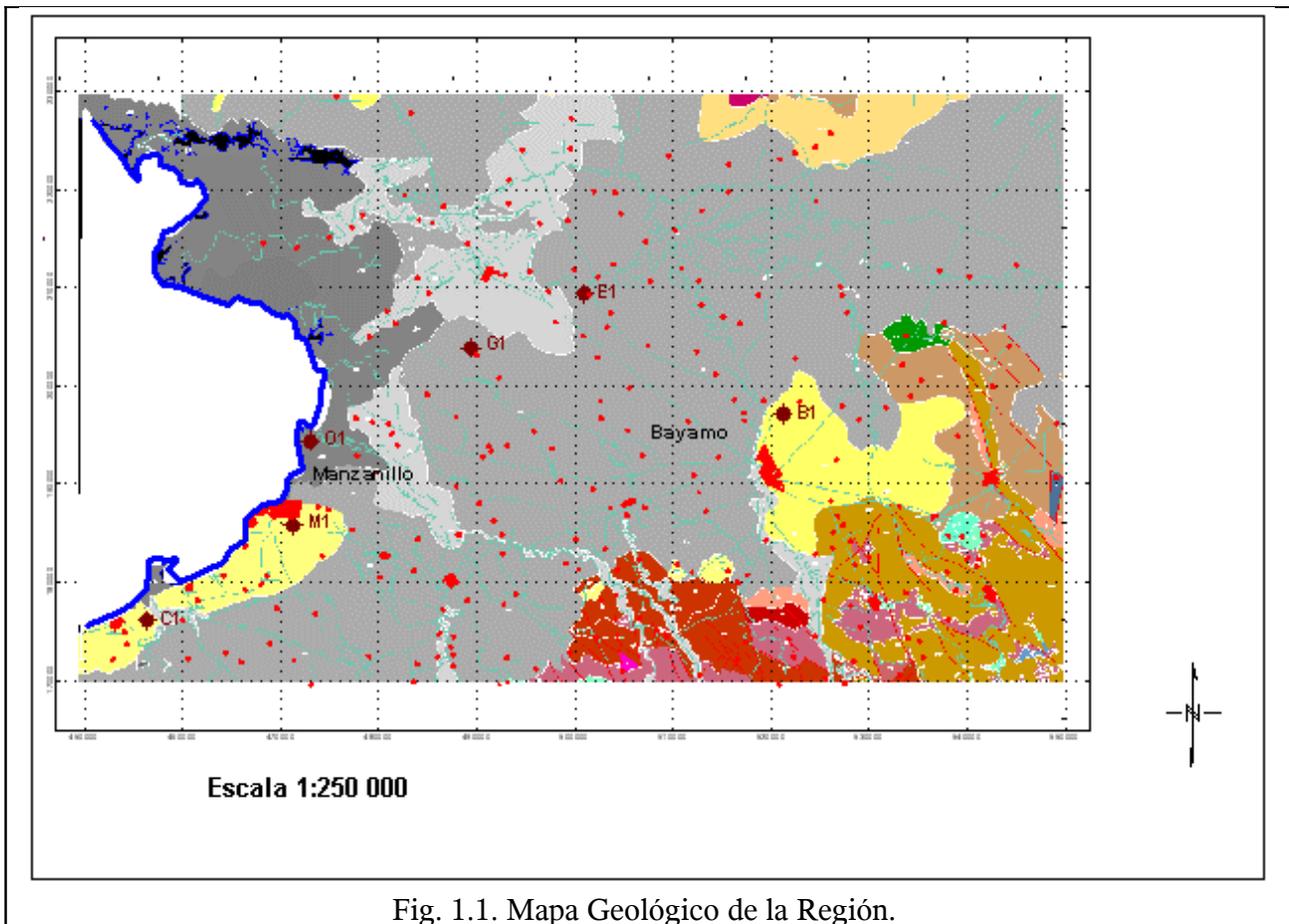


Fig. 1.1. Mapa Geológico de la Región.

Como se ve en el mapa geológico de la región, Fig.1.1, se destaca la distribución de los sedimentos cuaternarios de diferentes formaciones, principalmente la formación (fm) Cauto, constituidas por sedimentos eluviales, arcillosos, arenas, gravas y conglomerados, de muy bajas propiedades magnéticas y de menor densidad, un indicio que las fuentes de anomalías potenciales están a gran profundidad, sobre todo cuando conocemos por la estratigrafía de los pozos Granma, Embarcadero y Bayamo, Fig. 1.2, que no existen rocas que den origen a estas anomalías, en ningún caso se cortaron rocas de complejo AVC, rocas cretácicas (8).

Fig. 1.1 (cont.)

Leyenda del Mapa Geológico.

	PQd <i>pat.</i>	Formación Julia: Depósitos palustres			
	$alQd$ <i>rio.</i>	Formación Río Macío (unidad innominada): Depósitos en valles aluviales de composición y granulometría heterogénea.			
	ecQ_4 <i>cen.</i>	Formación Centeno (unidades estratigráficas sin correspondencia actual definida): Depósitos aluvio-cólviales.			
	Q_1 <i>ca</i>	Formación Cauto. Arcillas, limos, arenas, gravas y conglomerados, con estratificación horizontal y cruzada.			
	N_2-Q_1 <i>by</i>	Formación Bayamo: Areniscas polimícticas, intercalaciones lenticulares de arcillas, arenas arcillosas e inclusiones de yeso.			
	N_2-Q_1 <i>dt</i>	Formación Dátil: Fanglomerados polimícticos masivos, poco rodados y seleccionados.			
	$N_1^B-N_2$ <i>mz</i>	Formación Manzanillo: Calizas, margas, limolitas, calcarenitas y calciruditas e intercalaciones de arcillas.			
	$P_3-N_1^1$ <i>cz</i>	Formación Camasón: Calizas biotriticas, calcarenitas, calciruditas, limolitas con intercalaciones de margas y arcillas			
	$P_2^2-P_2^3$ <i>sl</i>	Formación San Luis: Areniscas polimícticas, limolitas, margas, arcillas, calizas arcillosas, calizas biotriticas, calizas arenosas y conglomerados polimícticos.			
	P_2^2 <i>bs</i>	Formación Barrancas: Tobas, margas, areniscas calcáreo-tobáceas, calizas biotriticas y calciruditas.			
	P_2^2 <i>chr</i>	Formación Charco Redondo: Calizas compactas organo-detríticas, fosilíferas, de color variable.			
	P_2^2 <i>pb</i>	Formación Puerto Boniato: Alternancia de calizas y margas, con intercalaciones de sílice.			
	$P_1-P_2^1$ <i>sc</i>	Grupo El Cobre: Rocas vulcanógenas y vulcanógeno-sedimentarias en distintas correlaciones y combinaciones alternantes, muy variables.			
	K_2 <i>lpc</i>	Formación La Picota: Conglomerados polimícticos con intercalaciones de areniscas y conglobrechas mal seleccionadas que se intercalan con argilitas.			
ROCAS MAGMATICAS					
	$\alpha\zeta$ andesito-dacitas		α andesitas		$\alpha\beta$ andesito-basaltos

Estableciendo una correlación entre los datos magnéticos y sus transformadas [Continuación Analítica Ascendente (CAA)] para 1000 y 5000m, se muestra que las fuentes profundas de dichas anomalías, en ambos mapas son extremadamente semejantes y varían muy poco en amplitud e intensidad; era de esperar que a mayor profundidad de cálculo (CAA) se eliminaran las fuentes superficiales (Fig. 1.3). En el gráfico del espectro radial de energía del Campo Magnético (CM) (Fig. 1.4), se muestra la pendiente de las componente regional y residual; hay señales de fuentes magnéticas hasta 7 Km. de profundidad, aunque la mayoría están por debajo de esa profundidad, no mayor de los 3 Km. Así es de

esperar el emplazamiento del AVC por debajo de esa profundidad.

Desde el punto de vista geomagnético Cuba oriental no difiere mucho del resto del territorio cubano, siendo el comportamiento regional de por sí tan heterogéneo y complejo como la propia geología del área. Aquí las respuestas magnéticas reflejan una gran heterogeneidad, mostrando particularidades muy significativas (Fig. 1.5).

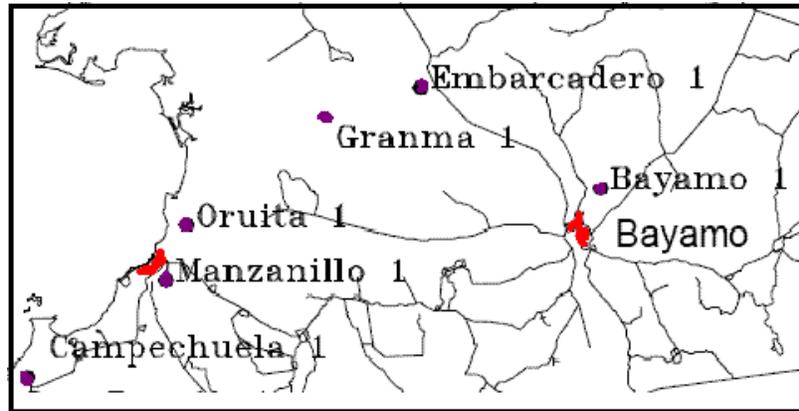


Fig. 1.2. Mapa de Ubicación de Pozos Profundos.

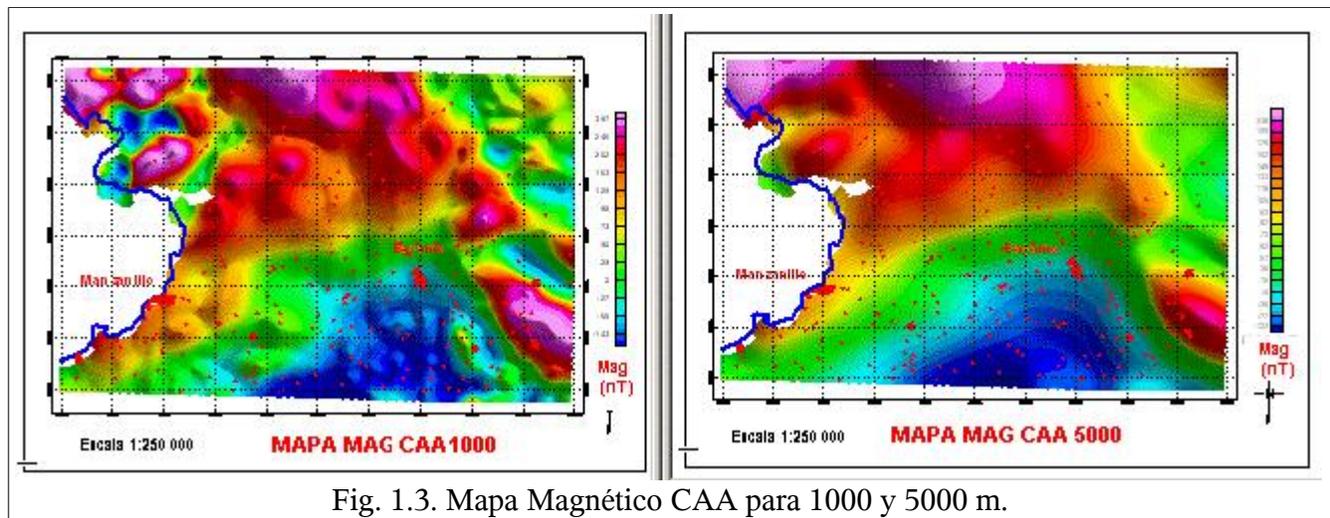


Fig. 1.3. Mapa Magnético CAA para 1000 y 5000 m.

Los resultados de los estudios sísmicos para las velocidades de frontera del basamento en la región oriental llegan hasta 8.5 Km/s. De manera preliminar, registros geofísicos han permitido establecer que especialmente para Oriente, por los elevados valores de las anomalías de Bouguer, los altos valores de las velocidades de frontera y por la pequeña profundidad de yacencia del Moho, existe una mejor aproximación a una corteza profunda predominantemente oceánica que a una continental, sobre todo a partir de la frontera Cauto-Nipe (Otero et al., 1998).

Del análisis regional de los datos gravimétricos podría separarse, según las características isostáticas (Cuevas, 1994), la zona Auras del resto de las zonas que conforman el territorio de Cuba oriental, caracterizándose ésta por valores de anomalías isostáticas residuales mucho más bajos, los que oscilan en un rango entre 0 y 50 mGal en una transición suave hacia el este hasta alcanzar una zona de fuerte gradiente encima del sistema de cuencas Cauto-Nipe.

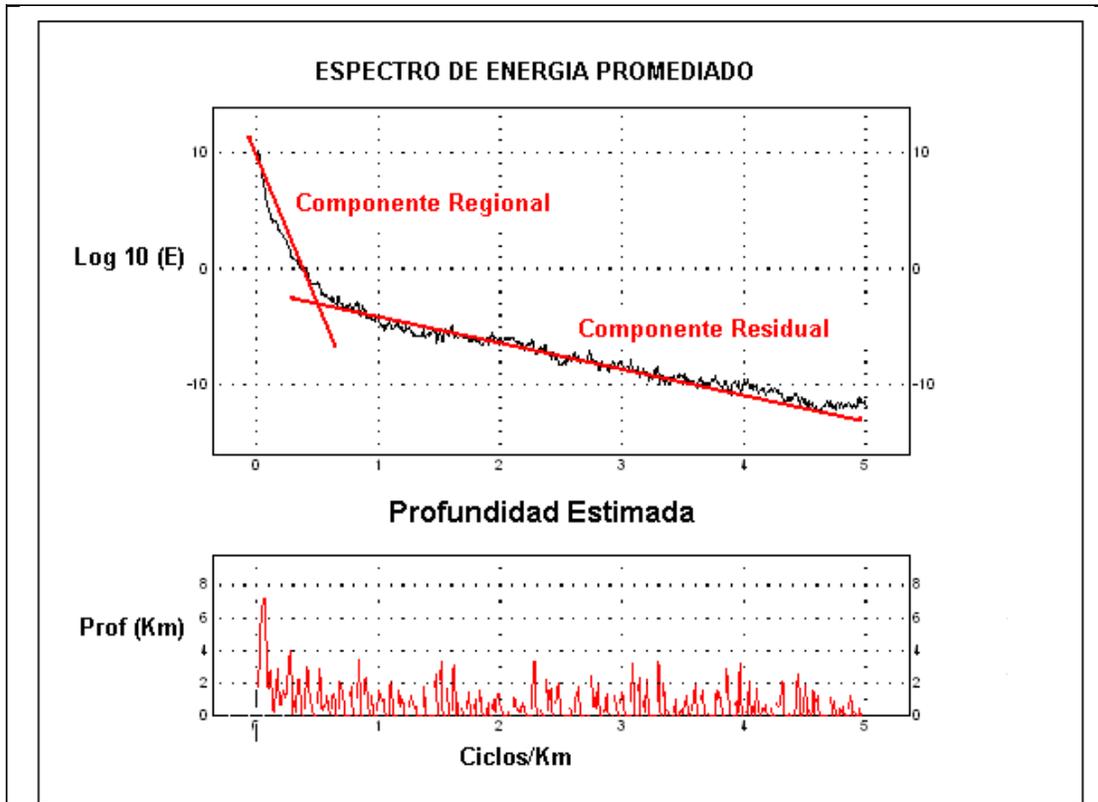


Fig. 1.4. Espectro Radial de Energía. Magnético.

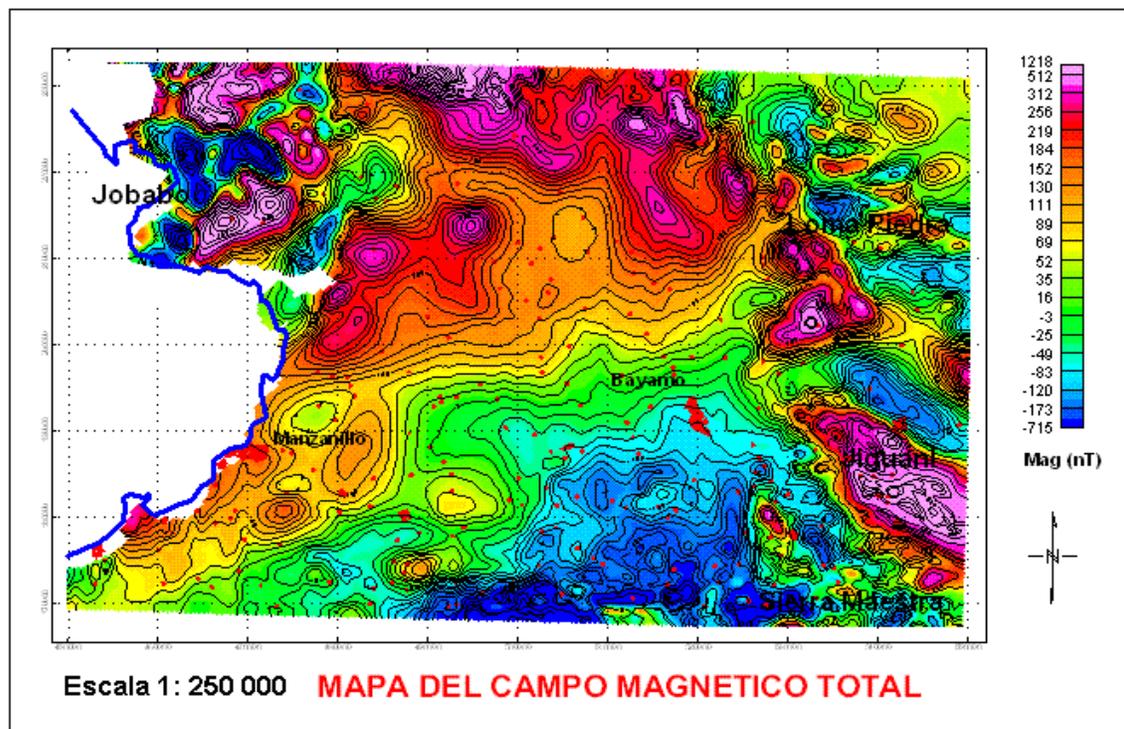


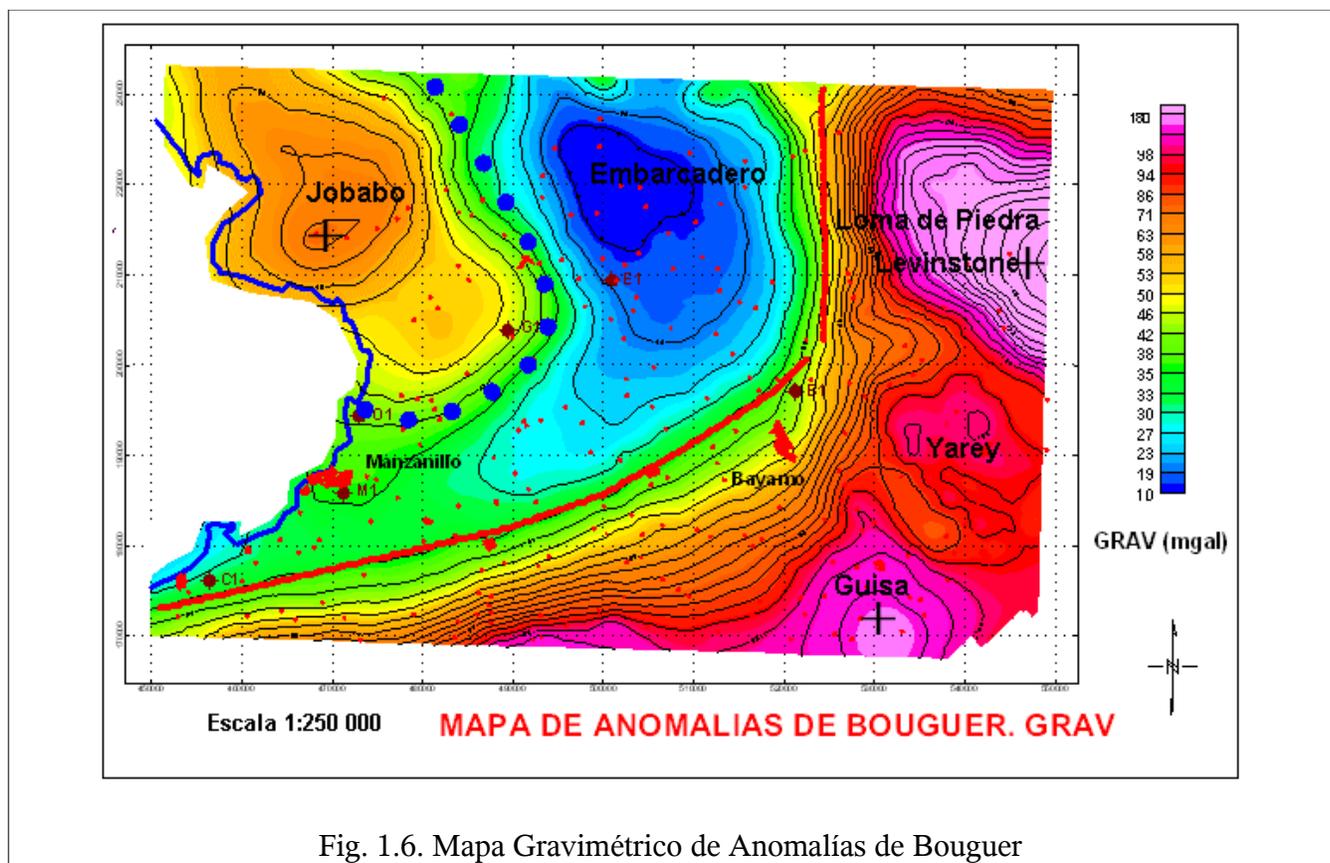
Fig. 1.5. Mapa del Campo Magnético Total. Fuente data IGP

Esta región constituye, de hecho, el extremo este del Cinturón Orogénico Cubano, por lo que es, de hecho, la “frontera” entre la provincia geológica oriental y el resto de Cuba, frontera que como mencionamos con anterioridad tiene su reflejo culminante en el mas fuerte gradiente gravitacional en el territorio insular cubano. Un gradiente desde 50 hasta 80 mGal evidencia la transición de un tipo de corteza profunda a otra como parte del cambio de constitución en el basamento profundo de Cuba Oriental (IGP, 2003).

Regionalización e Interpretación magneto-gravimétrica

Bajo los sedimentos de la cuenca del Cauto aparece una fuerte anomalía gravimétrica, llamada Loma de Piedra (Sánchez et al., 2006) y conocida por otros autores como máximo de Levinstone; aparentemente esa anomalía podría estar asociada a rocas ofiolíticas, preferentemente su parte basal (gabroide). Otra anomalía, casi sobre la coste sur oriental de Las Tunas (Júcaro –Jobabo) (Fig. 1.6), puede tener una naturaleza más ambigua: su morfología y posición induce a creerla más asociada al magmatismo cretácico (Sánchez et al., 2006).

Si nos guiamos por el carácter del campo gravitatorio (CG) (Fig. 1.6), la concepción de la cuenca C-N y su sistema de fallas deja de tener sentido pues debe ser incluida dentro de la cuenca la zona de la anomalía “Loma de Piedra- Levinstone”, una anomalía de +180 mGal de intensidad y una posición estructural muy semejante a la de las anomalías correspondientes a los macizos ofiolíticos de Pinares de Mayarí y Nicaro. Esta anomalía es un enorme escollo en la concepción de la zona C-N, la que, como se desprende del mapa gravimétrico y sus transformadas, no tiene sentido en la profundidad.



En el mapa de interpretación mapa de anomalías de Bouguer es remarcable el brusco torcimiento de las líneas de gradiente del campo gravimétrico hacia el N a la altura de Bayamo, (Fig. 1.6). El eje de

mínimos gravimétricos de alrededor de +30mGal y que podría marcar la zona tectónica principal del sistema de fracturas C-N, sale al Golfo de Guacanayabo con dirección entre NE y ENE a la altura de Calicito y La Demajagua aproximadamente, y se extiende por esa dirección por una zona que atraviesa los poblados de Cayo Redondo, La Herradura, Monte Adentro, San Fernando, Guasimilla y El Culebro. Sin embargo más al sur y casi paralelo a esta dirección aparecen las líneas de máximo gradiente de la gravedad que comienzan a apretarse al sur de Niquero y que escalonadamente en dirección Caimán, marcan el límite entre la estructura Sierra Maestra y el Sinclinal Oriental; este límite puede ser aproximadamente la isolínea de +80mGal que pasando cercano a Zarzal, llega a San Lorenzo, al OSO de El Horno, al sur de Bayamo. A la altura de Bayamo ya las isolíneas cambian bruscamente de dirección y toman un rumbo casi norte franco; un poco al este y a la altura del caserío de La Manchurria comienzan a torcer hacia el NE y al nivel del poblado de Antonio Maceo toman un rumbo fuertemente sublatitudinal, comenzando a dibujar el límite inferior norte de la anomalía “Loma de Piedra- Levinstone”.

La intensidad de la anomalía “Loma de Piedra- Levinstone”, es mucho menor, 180 mGal, al parecer producto de su profundidad de emplazamiento. Esta anomalía significa un fuerte obstáculo para la concepción de la cuenca C-N tal y como la conocemos y hace que viemos los ojos hacia el otro sistema de gradientes tanto gravimétrico como magnético en el sector, dándole un peso mayor al resto de las estructuras de la dirección cubana (Otero y Tenreyro, 1998).

A ambos lados de la zona de gradiente N-S descrita en las inmediaciones de Bayamo se observan, especularmente a lo largo de la dirección NO-SE, los ejes de mínimo que flanquean el máximo de Jiguaní (relacionar a el Yarey) al este de la zona de gradiente y el eje Bermeja-Cauto, así como el Paso-Guasimilla al otro flanco (occidental). Al parecer este eje, a uno y otro lado de la zona de gradientes C-N tiene relación con la dirección principal de emplazamiento de las rocas del AVC, que viene desde Ciego de Avila-Camagüey-Las Tunas y cuyos mejores afloramientos en la región se hallan en los alrededores de la ciudad de Las Tunas, fuera del área de estudio. Uno de los últimos afloramientos, el macizo Las Parras, se encuentra entre Las Tunas y Holguín. La continuidad del eje de mínimos a ambos lados de la zona C-N, habla a favor de su importancia y es un punto a favor de limitar la extensión de la cuenca C-N, dejándolas separadamente como cuenca Cauto y Cuenca Nipe (Otero y Tenreyro, 1998).

Una de las anomalías gravimétricas más importantes de la región lo es la anomalía “Júcaro-Jobabo”, (Fig. 1.7) ubicada en la desembocadura del río Cauto. Esta anomalía, de +70mGal, se extiende en dirección NO-SE y en dependencia del interpretador, puede ser compleja con otro máximo ortogonal a su extensión, bajo las aguas de Guacanayabo entre el cayo Rabihorcado y el banco del Cachorro, no mostrada en el presente trabajo. Tomada desde el punto de vista más regional, esta anomalía posee los centros máximos mencionados, rodeados de mínimos circularmente en cantidad de 3 hacia el suroeste y 2 hacia el noreste. Esta enorme estructura en forma anular cuyo borde NE llega hasta la ciudad de Las Tunas podría tener una relación directa con el vulcanismo cretácico en la parte sur de la provincia de Las Tunas. Esta anomalía podría relacionar las rocas del AVC del flanco occidental de la zona de fracturas Guacanayabo con las del flanco oriental.

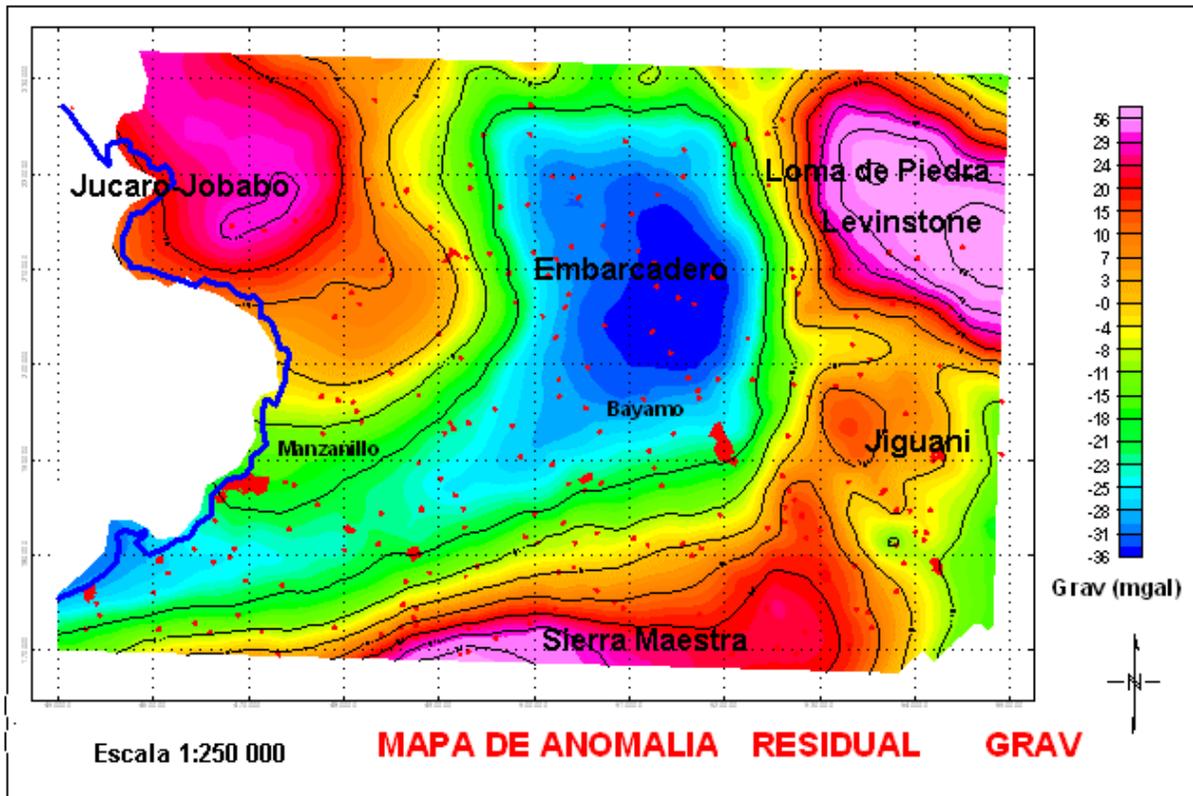


Fig. 1.7. Mapa gravimétrico de anomalía residual.

Las rocas de arco volcánico, tanto de edad cretácicas como de edad paleogénica, presentan valores elevados del CM del orden de los primeros miles sobre sus componentes intrusivas de composición básica – básico/media y entre 500-1000 nT para los medio-medio/ácidos. Las rocas volcánicas efusivas y efusivo-sedimentarias, en dependencia de su posición estructural en el relieve generan un CM desde -500 nT hasta +500 nT, que en ocasiones pueden llevar al millar de nT. Las zonas de cuencas presentan un CM generalmente tranquilo, dado el bajo contenido de minerales magnéticos en sus rocas, que oscilan entre +200nT y -200nT, para un CM absoluto T_{medio} entre 43000 nT y 43500 nT. (Fig. 1.6).

El rasgo más notable en el mapa del CM resulta ser el máximo Jiguani (relacionarlo al máximo gravimétrico “El Yarey”), que en dirección NO-SE se extiende en las inmediaciones del poblado homónimo. La intensidad máxima alcanza las +500nT, pero este máximo magnético no coincide exactamente con el máximo gravimétrico ya descrito, sino que se encuentra desplazado al sur. La presencia de rocas efusivo sedimentarias en la región nos induce a pensar que esta anomalía en forma de V muy abierta se relaciona con las rocas del AVC que con la misma extensión hacia el NO, pueden encontrarse en el flanco NO de la zona de fracturas G-N, hacia la región de Las Tunas y Camagüey. Las rocas de la anomalía presentan un valor del CM sobre ellas de alrededor de +500 nT a +1000 nT; en general aunque aparecen pequeñas zonas de mínimos estas se borran dentro del carácter general del CM y con la CAA a 5000 m, (Fig. 1.3), se eliminan todas las alternancias del CM y se observa una anomalía positiva de grandes dimensiones. La carencia de mediciones magnéticas sobre el golfo de Guacanayabo implica que no se puedan comparar con las zonas de mínimos gravimétricos.

En el mapa de la interpretación del campo magnético, según la convolución de Euler, GRIDDEPTH (Fig. 1.8), se señalan en tonalidades en amarillo-rojo las mayores potencias de sedimentos (mayores de 1 Km.), ocupando preferentemente la parte central de la región de estudio; es muy difícil por este método

lograr profundidades superiores a los 3 Km., pues las fuentes magnéticas establecen esta frontera. No obstante es posible modelar las líneas geólogo-geofísicas a partir de estos datos y los programas de modelaje existentes cuando en la salida 3, se preparen los datos para el cálculo de los sismogramas sintéticos.

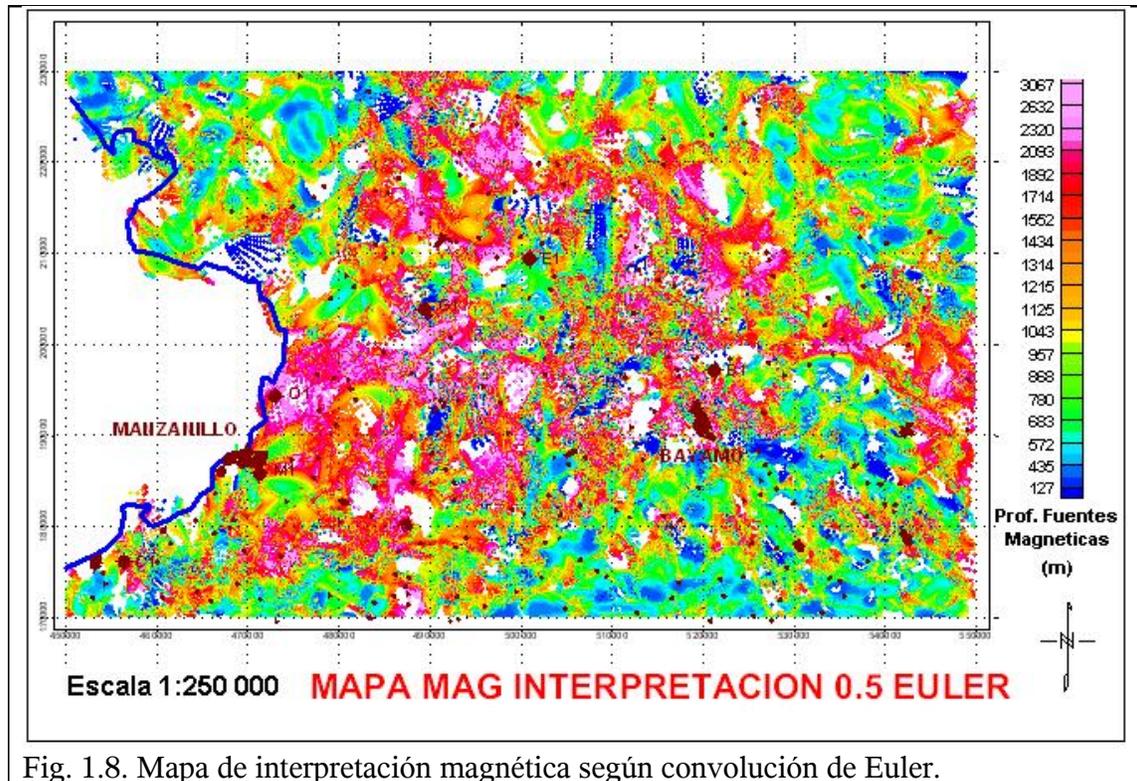


Fig. 1.8. Mapa de interpretación magnética según convolución de Euler.

Conclusiones

Los métodos geofísicos de carácter regional descritos anteriormente, resolvieron la tarea inicial propuesta del modelo de la estructura profunda para las capas más superficiales con vistas a su utilización futura para el cálculo de los sismogramas sintéticos. Ellos permitieron:

- Detectar fuentes de campo potenciales en profundidad
- Aclarar la naturaleza de algunas anomalías presentadas
- Justificar la disminución de la importancia de la zona de cuenca Cauto-Nipe y su separación en dos estructuras diferentes, Cauto y Nipe.
- Extender los límites del arco volcánico Cretácico (AVC) hacia el SE.
- Precisar los límites del arco volcánico Paleogénico (AVP).

2) Resultados de sondeos sísmicos profundos y de investigaciones sismológicas de la estructura profunda

La región oriental de Cuba y sus aguas adyacentes han sido objeto de diversos estudios de sismica profunda. El primero de ellos corresponde a los sondeos sísmicos marinos realizados en la fosa de Bartlett por Ewin et al. (1965). Alvarez et al. (2001) realizaron una reconstrucción de la estructura de la corteza y el manto superior en los primeros 20-30 Km. Para el rango de profundidades entre 30 y 150 Km estos autores usaron los resultados del estudio tomográfico de ondas P de Van der Hilst (1990) y

del estudio gravimétrico de Orihuela y Cuevas (1993), mientras que para profundidades mayores, la complementaron con una estructura estándar de tipo oceánico hasta profundidades del orden de 1000 Km. En la figura 2.1 se presenta un esquema de un perfil hipotético que cubre desde la profundidad máxima de la fosa (6.7 Km) hasta la costa, en las inmediaciones de Santiago de Cuba. En él no se tiene en cuenta la ubicación real de los perfiles de Ewing et al (1965), sino la variación de la estructura con la profundidad del mar. En la tabla 2.1 se presentan los valores de densidad y velocidad correspondientes a las capas presentes en la fig. 2.1.

Para la región insular se dispone de diversos resultados de estudios geofísica. En la fig. 2.2 se presenta un esquema con la ubicación de la mayoría de ellos. Sin embargo, sólo hay 2 de sísmica profunda, con determinaciones de V_p . Estos fueron realizados con dos métodos diferentes. El primero de ellos, y el más conocido, es el de Bovenko et al. (1980). En el mismo se utilizaron las ondas de cambio de los terremotos en la base de la corteza; el método se denomina "Tierra". Realizaron diversos perfiles, siendo 2 de ellos los más importantes para el presente trabajo (señalados como VIII y IXa en la fig. 2.2). Estos materiales fueron reinterpretados por Arriaza (1998), y sus resultados son preferidos con respecto a los originales de Bobenko et al. (1980). En la fig. 2.3 se presentan los resultados de Arriaza para ambos perfiles.

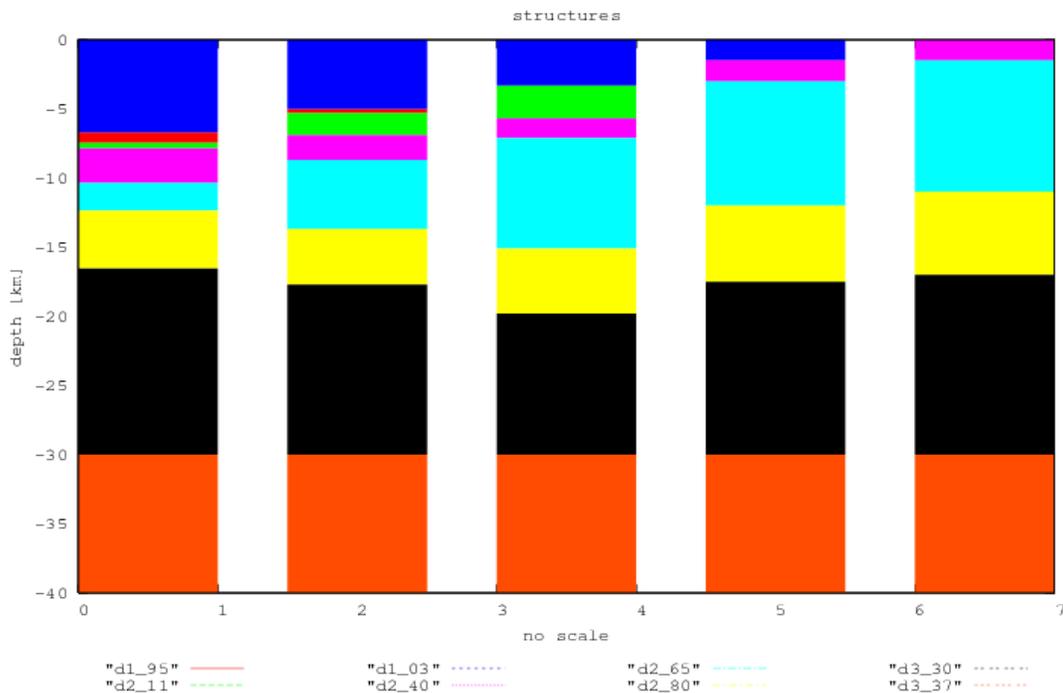


Fig. 2.1. Perfil de variación de la estructura en la fosa de Bartlett de acuerdo a Álvarez et al. (2001).

Tabla 2.1. Valores de densidad, V_p y V_s de las distintas capas presentes en las estructuras de la Fig. 2.1.

ρ	$V_p(\text{Km/s})$	$V_s(\text{Km/s})$
1.03	1.500	-
1.95	2.500	1.389
2.11	3.000	1.667
2.40	4.400	2.444
2.65	5.400	3.000
2.80	6.400	3.555
3.30	8.000	4.444
3.37	8.100	4.500

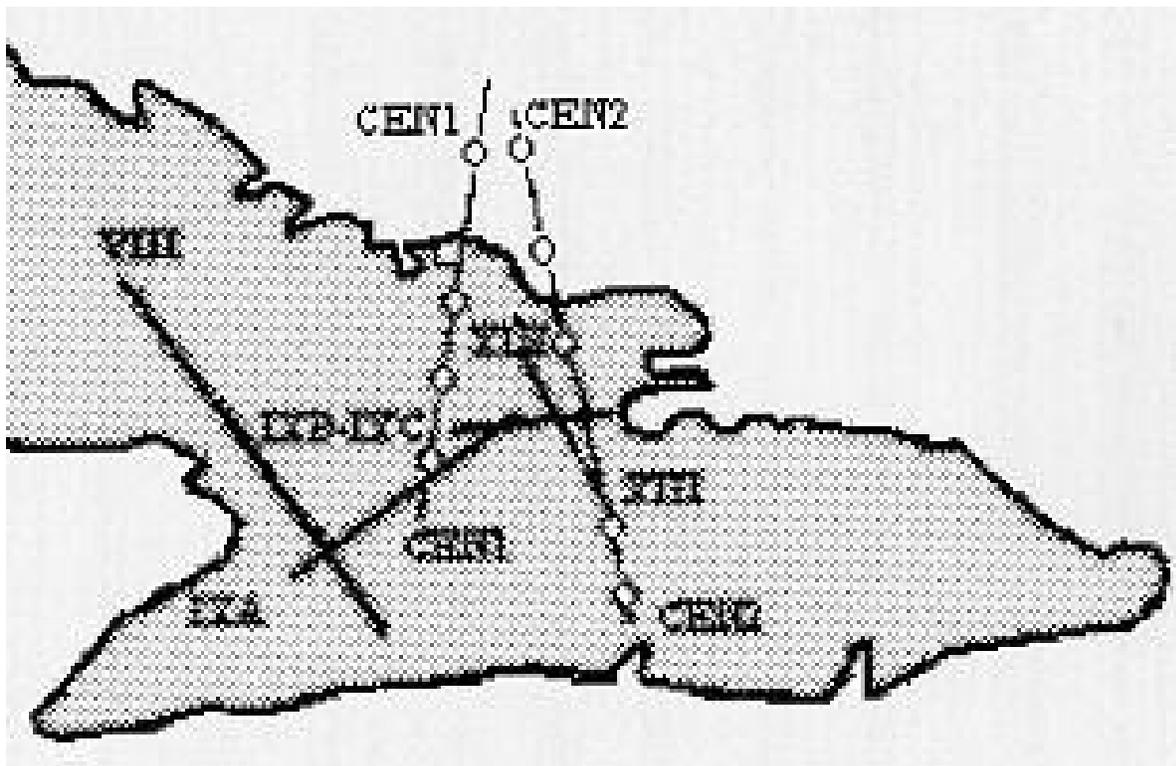


Fig. 2.2. Ubicación de perfiles de sismica profunda en la región oriental de Cuba

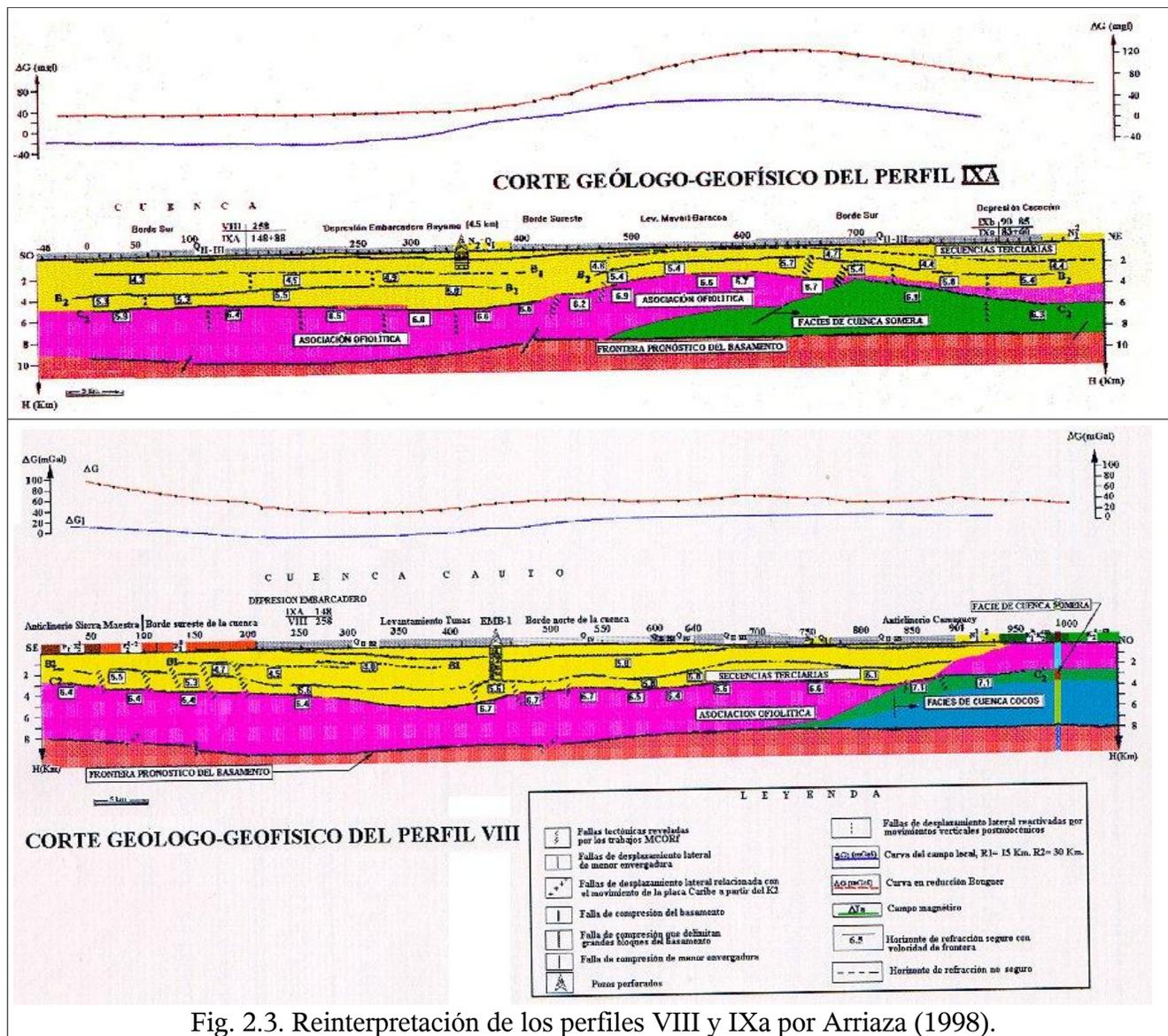


Fig. 2.3. Reinterpretación de los perfiles VIII y IXa por Arriaza (1998).

El otro trabajo es de sísmica profunda y fue realizado durante las investigaciones de la CEN de Holguín (CEN, 1989; SEVMORGEOLOGIA, 1991). Lo más importante para nuestro trabajo es un perfil (CEN-1 en la figura 2.2) desde la región marítima al norte de Puerto Padre hasta las inmediaciones de Bayamo (fig 2.4a). Otero y Tenreiro (1998) realizaron una generalización de estos resultados, combinándolas con datos gravimétricos de otros autores y presentan un perfil estructural que va desde la región marítima al norte de Puerto Padre hasta la fosa de Bartlett (fig. 2.4b).

Con relación a los datos sísmológicos de la estructura profunda de Cuba oriental se dispone de diversos trabajos. En primer lugar se encuentran los datos de tomografía de ondas P. Para la región entre Cuba y Jamaica Moreno et al. (2003) confeccionaron un modelo, y para la zona insular de Cuba oriental (19.8–21.0i N y 74.33-77.01 O) Moreno et al. (2007) confeccionaron otro. En la tabla 2.2 se presentan los valores obtenidos por estos autores.

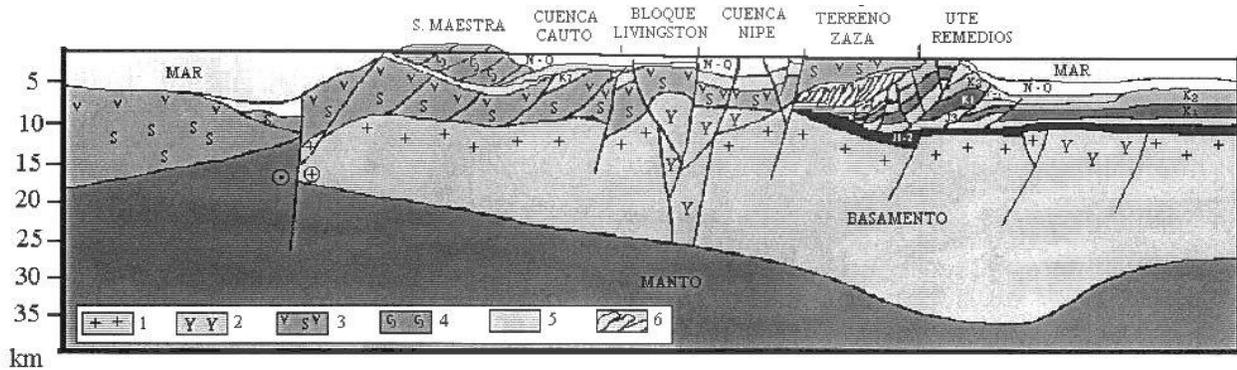
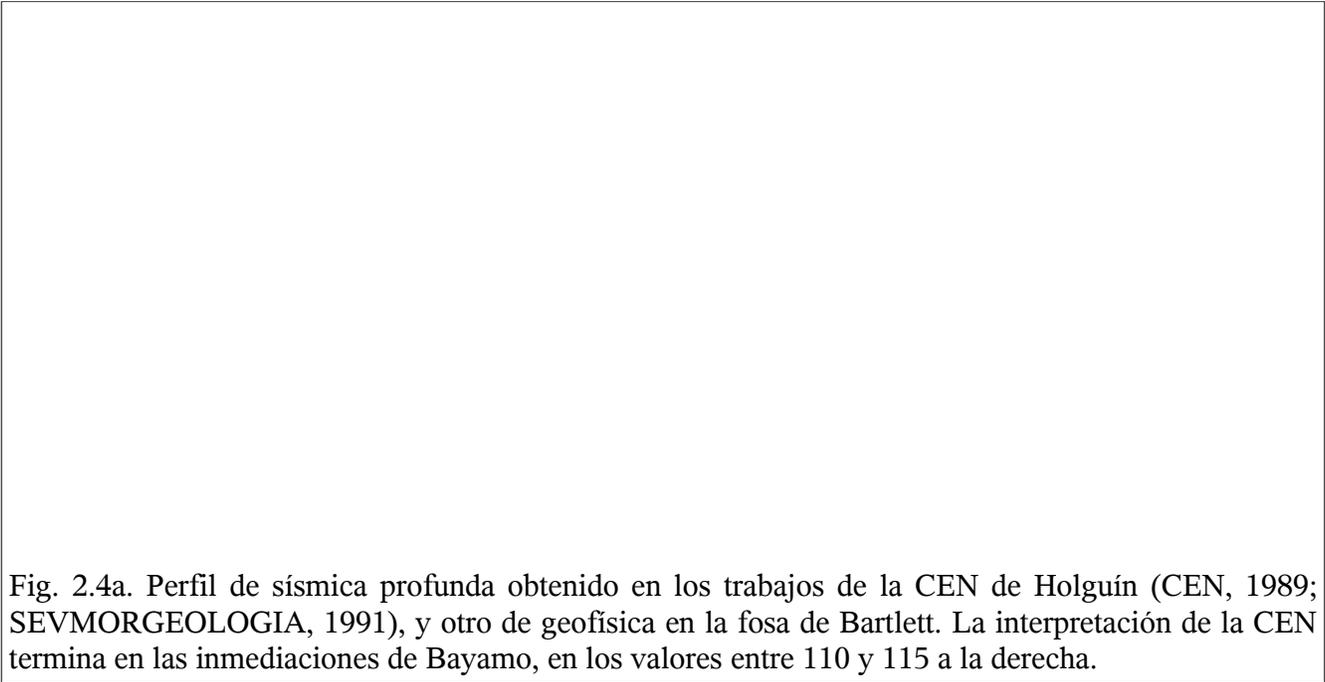


Fig. 2.4b. Reinterpretación del perfil completo (sin velocidades) por Otero y Tenreyro (1998). El norte en este caso está a la derecha.

Tabla 2.2. Valores de espesor y VP determinados por (a) Moreno et al. (2003) para la región entre Cuba y Jamaica y por Moreno y Palau (2007) para Cuba oriental.

(a)		(b)	
H	V _P	H	V _P
0	3.32	0	3.633
1	5.0	1	5.802
2	5.51	7	6.924
3	5.98	20	7.525
5	5.36	26	7.619
6	5.74	34	7.810
9	6.48		
13	7.20		
19	7.95		

El otro tipo de trabajo sismológico realizado es la inversión de curvas de dispersión de la velocidad de grupo de ondas superficiales, el cual se ha realizado en dos variantes. El primero consiste en la inversión de la curva de dispersión de la velocidad de grupo de ondas superficiales de Rayleigh, obtenida para la región como resultado de un estudio de tomográfico (González et al., 2007), la cual brinda información sobre espesores de las capas y velocidades de la onda S para un rango de profundidades entre y 350 Km de espesor para áreas de 2i X2d . El segundo trabajo es una combinación de estas curvas con las funciones receptoras de estaciones sismológicas, la cual brinda más información para la estructura de la corteza en términos de espesor de capa y velocidad de onda P. En la tabla 2.3 se presentan los resultados obtenidos por estos autores para los puntos cercanos a (o incluidos en) la región de estudio. En el caso de González et al (2007) se obtuvo la estructura promediada de un área de 2 X2t con centro en los 20o N y 76 O y los 207 N y 78b O, consistente en espesores de capa y velocidad de ondas S (en la fig. 2.5 se presenta el conjunto de soluciones que se obtienen en estas inversiones). En el caso de Moreno et al. (2007) se obtuvo la estructura bajo la estación LMG (20.067v N y 77.005 O) consistente en espesores de capa y velocidad de ondas P para una profundidad hasta la discontinuidad de Mohorovicic.

Tabla 2.3. Resultados de la inversión de curvas de dispersión de la velocidad de grupo de las ondas de Rayleigh para las celdas centradas en (a) los 20RN y 76NO y (b) los 20ON y 78NO. Se presentan los valores de espesor (h) y velocidad de ondas S (V_s). El valor 0 en V_s corresponde a una capa con agua de mar.

(a)		(b)	
H	V_s	h	V_s
1.8	0	2.8	0
0.4	1.1	0.7	1.2
0.5	2.6	0.55	2.5
15	3.25	6	3.65
27	4.25	12	3.45
40	4.75	40	4.4
80	4.5	15	4.5
90	4.55	190	4.55
95	4.75	82.95	350

Se debe señalar que cada método de inversión arroja resultados incompletos, de acuerdo a nuestros objetivos. Unos sólo dan V_p y otros sólo V_s , amén del espesor de las capas. A la hora de confeccionar los modelos de estructuras debemos determinar 5 parámetros (ρ , V_p , V_s , Q_p , Q_s), por lo que se deben usar los procedimientos:

- combinar valores de V_p y V_s de diferentes estudios cuando coincidan en rango de profundidad
- determinación de la que falte de éstas a partir de una relación V_p/V_s (1.73 – estándar)
- determinación de ρ a partir de estudios gravimétricos
- determinación de ρ usando la fórmula de Birch
- tomar los valores de Q_p y Q_s propuestos por Alvarez et al. (2001)

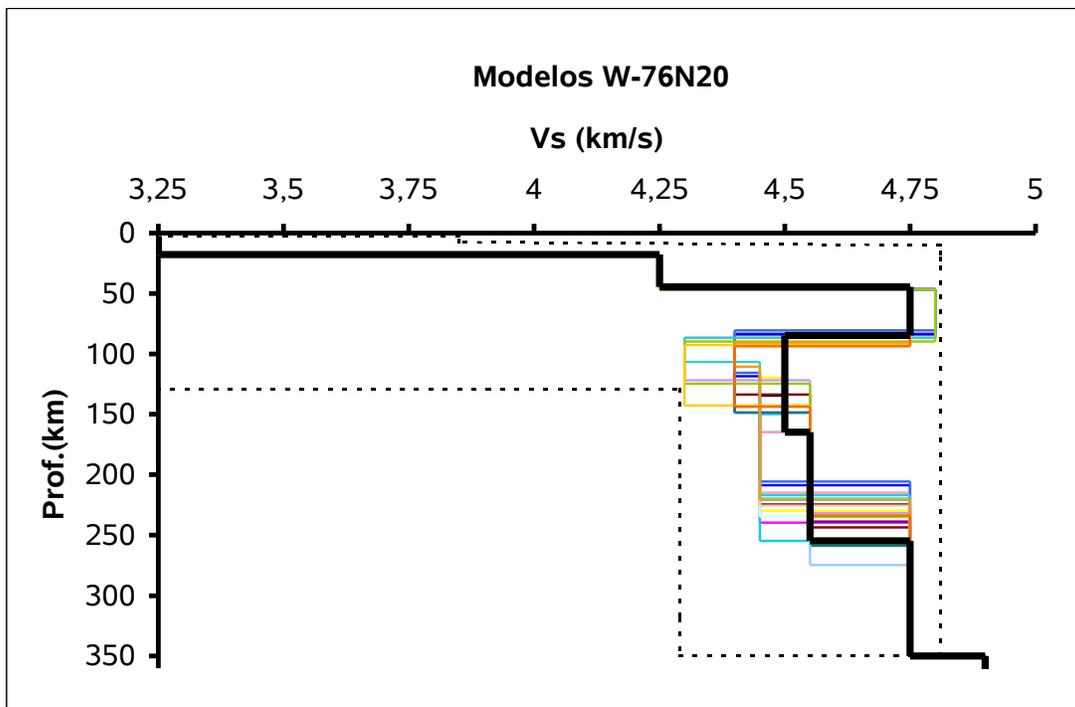
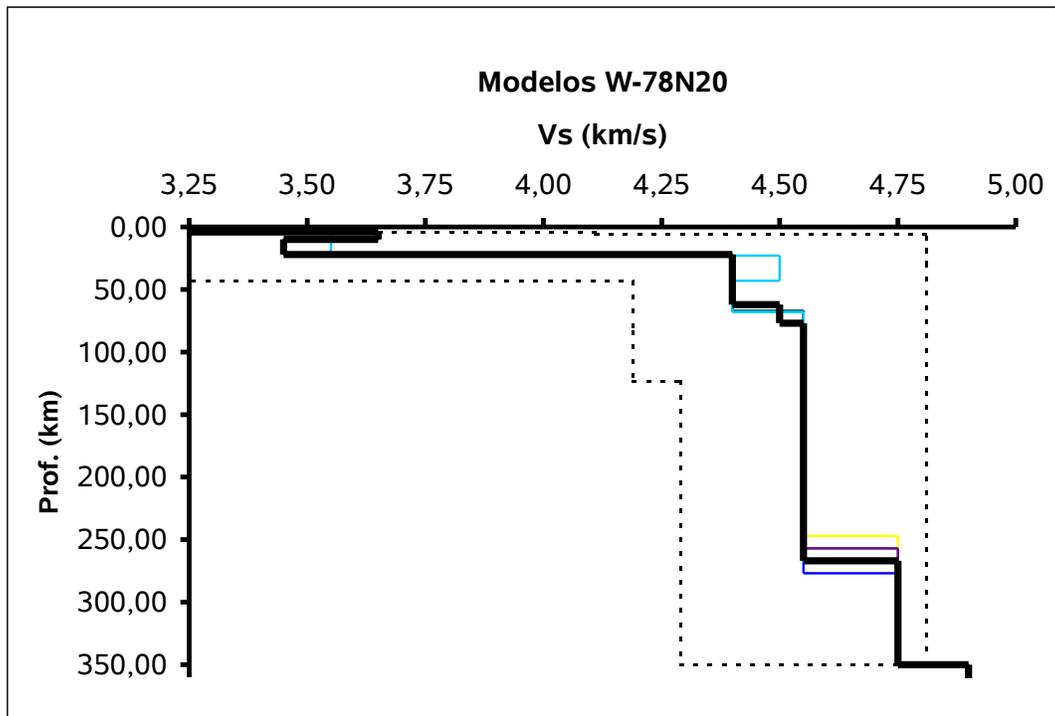


Fig. 2.5. Resultados de la inversión de las curvas de dispersión obtenidas a partir de un estudio topográfico (González et al., 2007). En línea de trazos se muestra el dominio de existencia de soluciones. Las líneas delgadas muestran soluciones con más cercanas a la media (línea de trazos gruesos).

Discusión

El objeto de estudio lo constituyen tres ciudades que se encuentran bastante apartadas una de otra, y con características geólogo-tectónicas diferentes, según se pudo apreciar en el epígrafe 1. Las fuentes fundamentales de terremotos se encuentran en la zona al sur de la región oriental y en las inmediaciones de Bayamo. De aquí que la estructura que atravesarán las ondas en cada caso sea diferente, por lo que fue necesario buscar información por diferentes vías. Las capas más superficiales (hasta unos 3 Km de profundidad) de cualquier modelo que se construya, se deben basar en el estudio geofísico presentado en el epígrafe 1, mientras que las capas más profundas se basarán en los estudios existentes de sísmica profunda y de métodos sismológicos presentados en el epígrafe 2. En la tarea 2 se deben preparar los modelos completos para diferentes perfiles donde se calcularán los sismogramas sintéticos.

El trabajo desarrollado en el epígrafe 1 lo consideramos un aporte al conocimiento de la estructura somera de la región de estudio y de sus características geofísicas, mientras que el epígrafe 2 combina una búsqueda bibliográfica con resultados de trabajos desarrollados por el CENAIIS en estrecha colaboración con este proyecto. Los trabajos de inversión de curvas de dispersión de ondas superficiales aún no han concluido. En caso de obtenerse nuevos resultados antes de la ejecución de la Tarea 2 de este proyecto, serían incorporados.

Conclusiones

- La interpretación de los datos geofísico realizado para la región de estudio constituye un soporte para la construcción de los perfiles y el conocimiento geólogo-geofísico de la misma.
- Se obtuvo la información básica necesaria para preparar los perfiles estructurales que se usarán en el cálculo de los sismogramas sintéticos.

Bibliografía

- Arriaza, G. (1998). Nuevos enfoques en la interpretación y procesamiento de las ondas refractadas para el estudio del basamento de Cuba, Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Geológicas, La Habana, 179 pp.
- Bovenko, V. G., Shcherbakova, B. Ye; Hernández, G. (1980). Nuevos datos geofísicos sobre la estructura profunda en Cuba Oriental (*en ruso*). Geología Sov., 9, pp. 101 - 109.
- CEN (1989): Búsqueda e investigaciones complejas para la selección del punto y del área de la CEN. (Contrato No. 85-011/15900 del 03/07/84) Tomo I. Trabajos Sismológicos. Informe: Sobre las investigaciones geólogo-tectónicas del territorio de Cuba Oriental y en la región de ubicación de los puntos No. 2 y 10 de la CEN de Holguín. (Posición 2, Anexo 2 al Suplemento No. 1 del Contrato) Libro 3. Parte 1/1 Neotectónica y Zonas Sismogeneradoras de Cuba Oriental. Mayo 1989. Ministerio de la Industria Básica de la Republica de Cuba. Empresa CEN Holguín.
- Chang B. J.L. (1997): Datos geofísicos regionales. Contribución al conocimiento tectónico-estructural del territorio oriental. En: Proyecto I+D 512 "Tectónica de Cuba Oriental". Archivo Técnico IGP.
- Cuevas J. L. (1994): Caracterización de anomalías de la gravedad en Cuba centro oriental y su utilización en estudios de tectónica y sismicidad. Tesis en opción al grado de Dr. en Ciencias Geofísicas. IGA. CITMA
- IGP (2003). Respuestas de los campos físicos en el territorio oriental. Compilación monográfica sobre las características geofísicas. Dpto. Geofísica, IGP. Archivos IGP
- Ewing, J., Antoine, J.; Ewing, M. (1960). Geophysical measurements in the Western Caribbean Sea and in the Gulf of Mexico, J. Geophys. Res., vol. 65, No. 12, pp. 4087 - 4126.
- García, D.; Toirat, E.; Otero, R. (2007): Estratigrafía de la Región de la cuenca del Cauto y su

- correlación con el subsuelo. II Convención de Ciencias de la Tierra. SCG, C. Habana.
- Gonzaalez, O.; Alvarez, L.; Guidarelli, M.; Panza, G.F. (2007) Crust and Upper Mantle Structure in the Caribbean Region by Group Velocity Tomography and Regionalization. *Pure Appl. Geoph.*, v. 164, pp. 1985–2007
- Moreno, B.; Grandison, M.; Atakan, K. (2002): Crustal velocity model along the southern Cuban margin: implications for the tectonic regime at an active plate boundary. *Geophys J Int*, v. 150, pp. 1–14.
- Moreno, B.; Palau, R. (2007): Proyecto Territorial 41-07/04: Modelación de escenarios de terremotos fuertes para la mitigación del riesgo sísmico en Cuba. Fondos del CENAIIS.
- Orihuela, N.; Cuevas, J. L. (1993), Modelaje sismogravimétrico de perfiles regionales del Caribe central, *Revista Ingeniería*, Universidad Central de Venezuela, 8, pp. 55 - 73.
- Otero, R.; Prol, J.L.; Tenreyro, R.; Arriaza, G. (1998). Características de la corteza terrestre de Cuba y su plataforma marina. CEINPET, ENG. *Revista. ISMMMoa (OJO)*.
- Otero, R.; Tenreyro, R. (1998): Secciones geológicas - geofísicas regionales de Cuba. *Revista. ISMMMoa. (OJO)*
- Sánchez, R.; Escobar, EM; Oviedo A. (2006): Resultados Geofísicos para la generalización geológica de Cuba Oriental. *Archivos IGP*.
- SEVMORGEOLOGIA (1991): Estudios geólogo-geofísicos marítimos y terrestres por método de ondas refractadas en el área de construcción de la Central Electronuclear “Holguín” (Contrato 589/ de la URSS. Asociación Científico-Industrial “SEVMORGEOLOGIA”.5818352/91000 de 22 de Junio de 1990) Leningrado 1991. Ministerio de Geología
- Van der Hilst, R. D. (1990). Tomography with P, PP and pP delay-time data and the three-dimensional mantle structure below the Caribbean region, Ph.D. Thesis, University of Utrecht, 250 pp.

Anexo 2

Informe de la tarea 2

Modelos de estructura geológica de las cuencas donde están ubicadas las ciudades a estudiar

del proyecto: “Influencia de las características del suelo sobre los parámetros del movimiento del terreno durante terremotos en las ciudades de Bayamo, Manzanillo y Pílon”

perteneciente al programa: (909) Mejoramiento ambiental y desarrollo sostenible de la provincia Granma

Introducción

Para poder modelar las ondas sísmicas superficiales en el intervalo de frecuencias de interés para la microzonación sísmica es imprescindible conocer la estructura de las cuencas sedimentarias donde se encuentran las ciudades a estudiar. La microzonación sísmica se basa en el cartografiado del fenómeno conocido como “efecto de sitio”, consistente en la variación de la amplitud, duración y composición espectral de las ondas de los terremotos, con respecto a lo que se registraría en roca, el cual depende de la estructura de los suelos ubicados bajo ese “sitio” y en sus inmediaciones.

El alcance del término “inmediaciones” determina el tipo de estudio que se haga, y en general se consideran 3 de ellos: (1) método unidimensional – considera la estructura debajo del sitio exclusivamente –, (2) método bidimensional – considera la estructura a lo largo de un perfil desde el inicio de la cuenca hasta el sitio – y (3) método tridimensional – considera la estructura en 3 dimensiones de la cuenca donde está enclavado el sitio.

El primer método es el más limitado y corresponde al que tradicionalmente hemos empleado en Cuba para los estudios de microzonación sísmica, del que tenemos antecedentes de ese tipo para las ciudades de Bayamo (Rivera, 2000; Rivera et al. 2004), Manzanillo (Rivera et al., 1998) y Pílon (Guasch et al., 1993, 2002); su presupuesto teórico es que la variación de la señal sísmica sólo depende de la estructura bajo el sitio.

El segundo método, que es el que aplicaremos en este proyecto y del que tenemos antecedentes para Santiago de Cuba (Álvarez et al., 2005), se basa en la hipótesis de que la señal sísmica se va transformando desde que penetra en la cuenca, por lo que el efecto es acumulativo hasta que llegue al “sitio”.

Finalmente, el último método considera que la formación de la señal sísmica está influenciada por la estructura de toda la cuenca, y aunque es el más preciso, su uso se encuentra limitado por las dificultades de construir un modelo 3D de la estructura de la cuenca y por la elevada demanda de capacidad de computación.

En la tarea 1 se presentó un estudio geofísico complejo que permite inferir la estructura de la corteza en los primeros 3 Km de profundidad a nivel regional. En esta tarea se presenta un estudio de igual tipo, pero a escala más reducida, para las ciudades de Bayamo, Manzanillo y Pílon, que permite inferir esta estructura hasta los 500 metros de profundidad con mayor grado de detalle. A esto se une la recopilación de datos geotécnicos de perforaciones realizadas en las ciudades estudiadas, lo que junto al estudio de las características geológicas de las mismas, permite particularizar mucho más en la estructura para los primeros 20 metros de profundidad.

Características geológicas y tectónicas regionales.

La región oriental de Cuba es una de las zonas del país que han sido más estudiadas por su complejidad geológica y aun en la actualidad continúan desarrollándose estudios aplicando diversas técnicas modernas para perfeccionar los resultados obtenidos. La deficiencia que aún se sigue presentando es que las investigaciones se realizan en sectores separados de acuerdo al interés profesional, provocando que se queden áreas sin información o con poca descripción.

La heterogénea geología de la región Oriental de Cuba consiste en una gran variedad de sedimentos y rocas de edades comprendidas entre el Jurásico Superior y el Cuaternario, los cuales forman parte de diversas formaciones geológicas. La geología de la zona puede ser descrita de forma general dividiendo la región en dos subregiones: la Norte y la Sur. La subregión Norte está compuesta principalmente por serpentinitas, rocas volcánicas y rocas ígneas. En la subregión Sur caben destacar dos morfoestructuras importantes, la cuenca del Cauto constituida por rocas paleógenas del arco de isla y el anticlinal de la Sierra Maestra constituido principalmente por sedimentos de la neoplataforma terrígeno-carbonatada del Neógeno-Cuaternario.

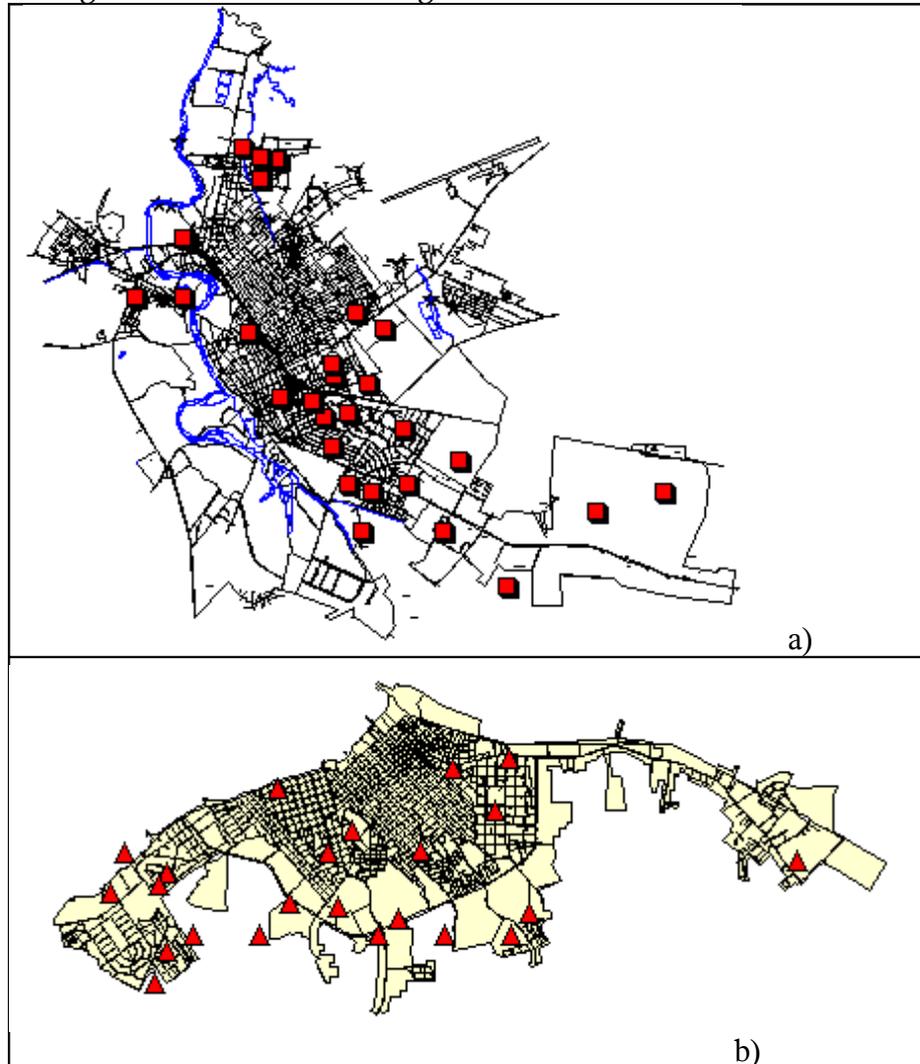


Fig. 1: Ubicación de las calas con información útil para el trabajo (o sea, las que calas que poseen información y propiedades físico-mecánicas y tienen una profundidad igual o mayor que 10 m). a) Ciudad de Bayamo y b) Ciudad de Manzanillo. La ciudad de Pílon no la ponemos porque aun no está digitalizada por manzanas.

Por lo engorroso que sería describir todas las formaciones geológicas presentes en la región oriental, se clasificaron los suelos y rocas (Fig. 2) en diferentes categorías atendiendo a sus propiedades físico-mecánicas (dureza), lo cual es fundamental para hacer los estimados de peligrosidad y microzonación sísmica en el área estudiada.

Se tomaron las descripciones de todas las formaciones geológicas presentes en la región oriental, analizando en cada una de ellas el material predominante y apoyándonos en la tabla de descripción de los tipos de suelos por formación atendiendo a su dureza fundamentalmente (Nagy, 1983), y de esta forma se fueron clasificando los tipos de suelos. Estas clasificaciones las relacionamos con las clases determinadas por Ambraseys et al. (1996), coincidiendo en todos los casos. Dichos autores hicieron su clasificación atendiendo a las condiciones locales del suelo para una base de datos de

registros de terremotos en Europa y áreas adyacentes; la información en la misma se refiere a la profundidad de los depósitos de los suelos y sus propiedades (descripción de las calas), la velocidad de propagación de la onda S (V_s) y la penetración de los ensayos de pruebas. Las clases de "sitio" geológico fueron definidas en 4 siguiendo rangos de V_s : Roca > 750 m/s; Suelo duro 360-750 m/s; Suelo blando 180-360 m/s y Suelo muy blando < 180 m/s. Los suelos blando y muy blando, por sus semejanzas, los agruparemos en el mapa en uno solo.

El extremo más oriental de la isla se corresponde con terrenos de materiales más duros (rocas), en cambio en el extremo oeste en el que se encuentra la zona de la cuenca del Cauto está constituida por suelos blandos. El basamento de las ciudades de Bayamo y Pilon está constituido por suelo blando, mientras que el basamento de la ciudad de Manzanillo se encuentra entre suelo duro y suelo blando.

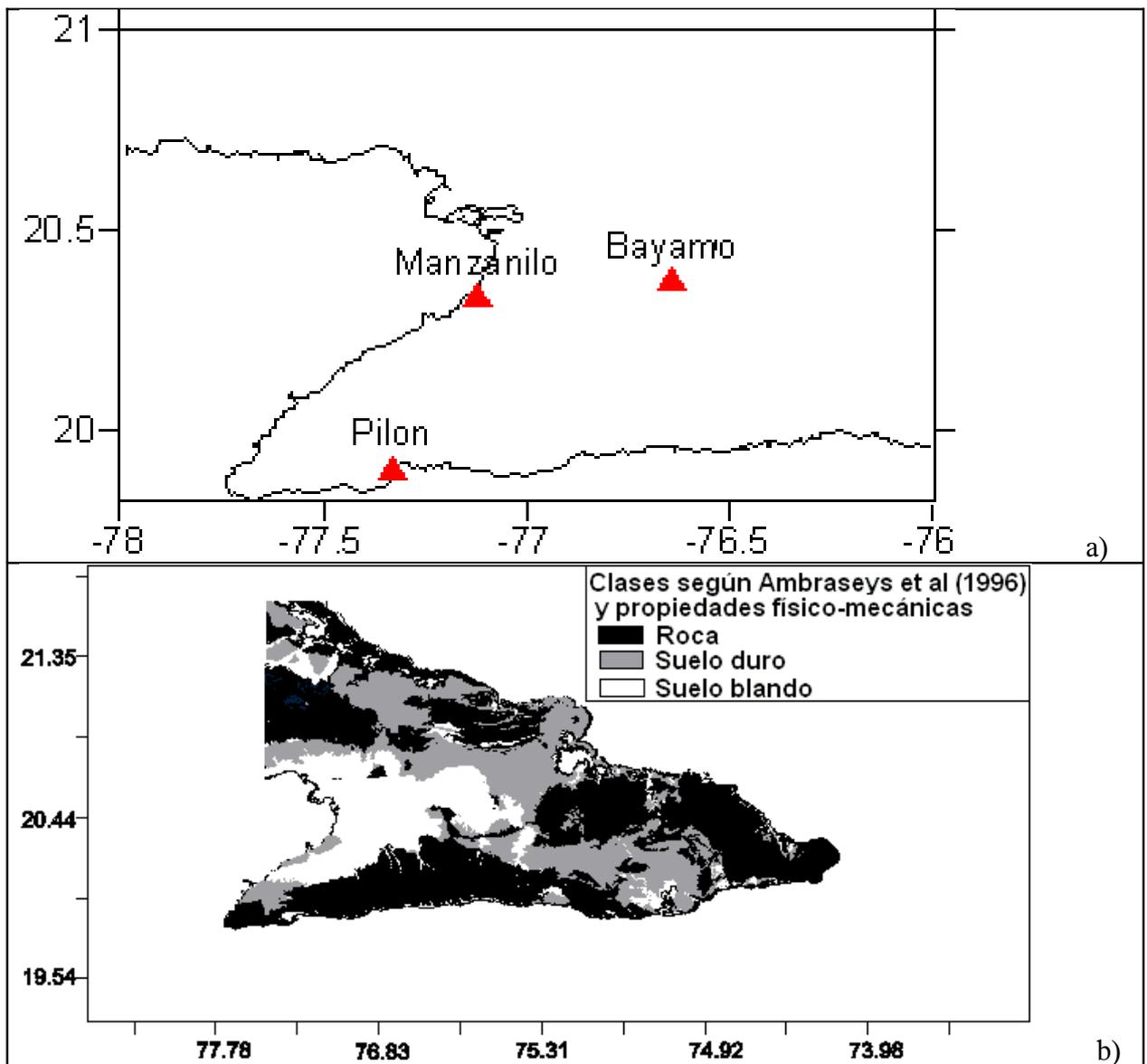


Fig. 2. a) Ubicación geográfica de las ciudades en estudio, b) Clasificación de las formaciones geológicas del Oriente de Cuba según Ambraseys et al. (1996).

La composición cortical del oriente de Cuba es un tema de estudio tratado y discutido por diversos autores en la actualidad. Tenreyro et al. (1994) y Otero et al. (1998) hicieron una clasificación de los tipos de corteza según estudios basados en perfiles sísmicos, datos geológicos y datos gravimétricos; describieron el extremo oriental de la Isla de Cuba constituido por: (1) corteza oceánica (mares de la costa sur) por su espesor < 20 km y la alta densidad relativa, (2) corteza continental transicio-

nal fina (área central) sus espesores oscilan entre 20 y 31 Km y (3) corteza continental transicional gruesa o corteza de ruptura (costa norte), cuyos espesores oscilan entre 30 y 35 Km. Los límites entre estos tipos de corteza están relacionados con fallas transcorticales. Estas fallas fueron reactivadas no solo durante la orogenia sino con posterioridad. Las mismas tienen un carácter fundamentalmente de cizalla diferenciándose fallas con componente compresivo (fallas a lo largo del eje de la isla).

Por otra parte, en un estudio más reciente, Moreno (2003), basándose en un análisis de funciones receptoras, sugiere la existencia de corteza oceánica en la costa del extremo sur y corteza continental en la costa norte. Para su estudio él tuvo en cuenta diferentes estaciones sismológicas, la más cercana al área de estudio es Las Mercedes (LMG – 20.0673 N. y 77.0047 W.). La zona donde se encuentra la provincia Granma está afectada fundamentalmente por la falla Cauto-Nipe (Noreste-Suroeste).

Los tres modelos tienen en común la existencia de ambos tipos de corteza en la región de estudio; en el municipio Manzanillo existe una corteza continental transicional fina, Bayamo se localiza muy próximo a la frontera entre la corteza oceánica y la corteza continental transicional fina y en Pílon existe corteza oceánica.

El oriente de Cuba está situado en un marco geodinámico caracterizado principalmente por un movimiento absoluto en sentido oeste de la placa Norte Americana. En la estación de Santiago de Cuba del *International GPS Service* se determinó un movimiento absoluto de 7.71 mm/año en dirección oeste (comunicación personal de J. Del Pino, 2004). La traslación de la placa Norteamericana está afectada por el contacto de la microplaca Gonave a lo largo de la zona de la falla de Oriente (ZFO); ésta fue cartografiada por Calais y Mercier de Lépinay (1990, 1991). El resto de fallas fueron digitalizadas del trabajo (MINBAS, 1985).

La tectónica del oriente cubano ha sido estudiada por diversos autores aplicando métodos y criterios variados, resultando un conjunto de mapas en los que se refleja una considerable falta de consenso debido a que existen muchas zonas no cartografiadas.

El esquema tectónico según Nagy (1983) propone que la provincia Granma se encuentra en la Cuenca de Guacanayabo-Guantánamo y Pequeñas Zonas Precubanas., mientras que el esquema tectónico según Cobiella y Rodríguez (1978) plantea que Granma pertenece al Sinclorium Central.

De hecho, no hay, en la actualidad, ningún mapa publicado en el que se encuentre la tectónica de intraplaca e interplaca de toda la zona de estudio del presente trabajo. Por esta razón se tuvo que tener en cuenta diversos estudios para conseguir un único mapa tectónico de la zona lo más completo posible (Fig. 3).

A continuación se describirán de forma breve las fallas con actividad sísmica en la zona. A lo largo del margen sur se encuentra un sistema de fallas conocido con el nombre de falla de Oriente (ZFO), el cual está constituido por fallas discontinuas con movimiento transcurrente. De acuerdo con Calais y Lépinay (1991), este sistema de fallas genera a su largo una serie de áreas transtensivas y pequeñas cuencas [cuencas de Cabo Cruz (CCC), Chivirico (CCh) y Baitiquirí (CB)]. Entre las cuencas CCC y CB está situado el Cinturón Deformado de Santiago (CDS), consistente en una estructura con régimen tectónico transpresional (Calais y Lépinay, 1991).

La ZFO es de gran importancia en la sismicidad de Cuba ya que es la zona donde se genera la mayor actividad sísmica de Cuba, de hecho 22 de los 28 mayores eventos catastróficos de la historia de la isla fueron generados en esta área.

La sismicidad del norte de la región oriental cubana está controlada por el sistema de fallas Nortecubana (SFNC), el cual se encuentra aproximadamente paralelo a la costa norte de Cuba y en la frontera del bloque cubano con la plataforma de las Bahamas (no se pudo encontrar ninguna cartografía confiable). El SFNC presenta una estructura en forma de bloques dislocados por las fallas de dirección SW-NE del interior del territorio cubano. La sismicidad de esta región es significativa y está concentrada en la intersección del SFNC con las fallas principales que la cortan, destacando el terremoto de Gibara de 1914, de intensidad VII en la escala MSK.

La sismicidad de intraplaca de la región está asociada principalmente con la falla Cauto Nipe, de

orientación NE-SW. La sismicidad de esta zona es de menor escala que las descritas en los párrafos anteriores. Los terremotos más importantes asociados a esta falla son los ocurridos en la ciudad de Bayamo en 1555 (VIII MSK) y 1624 (VII MSK). Otras estructuras a destacar en el área de intraplaca de Cuba son: la falla profunda de Cubitas (FC), con orientación NW-SE; la falla Nipe-Guacanayabo (FNG) con una baja sismicidad asociada; la falla Santiago-Bayamo (FSB), situada en la frontera norte de Sierra Maestra; la falla de Baconao (FB), con actividad sísmica en la intersección con ZFO y la falla profunda cortical del Purial (FP) (Chuy, 1999).

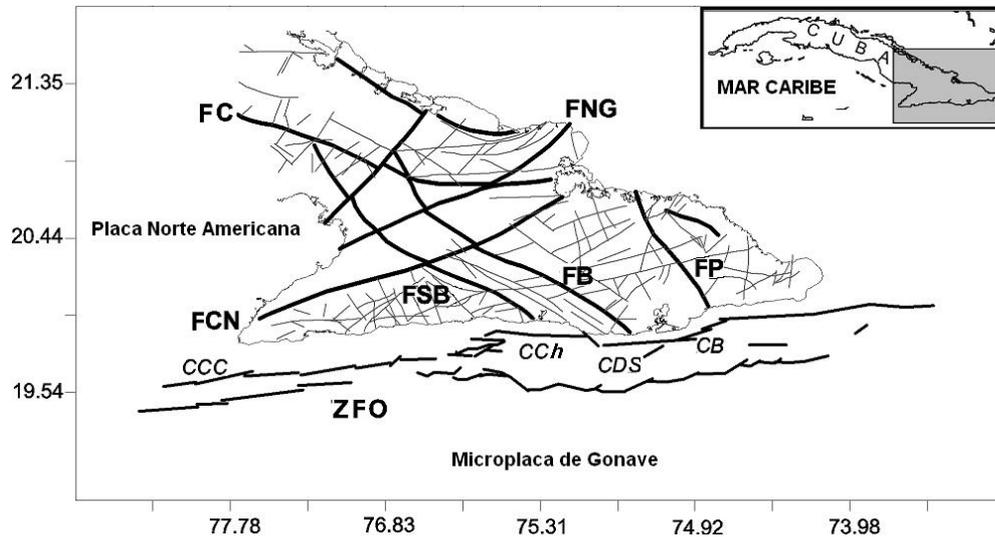


Fig. 3. Mapa tectónico del oriente de Cuba. La zona de fallas Oriente (ZFO) fue cartografiada por Calais y Lépinay (1990, 1991). El resto de fallas fueron extraídas de (MINBAS, 1985). FC, falla Cubitas; FNG, falla Nipe-Guacanayabo; FCN, falla Cauto-Nipe; FSB, falla Santiago-Bayamo; FB, falla Baconao; FP, falla Purial; CCC, Cuenca de Cabo Cruz; CCh, Cuenca de Chivirico; CDS, Cinturón deformado de Santiago; CB, Cuenca de Baitiquirí.

Selección de los terremotos de escenario.

Para la preparación de los perfiles geológicos y el posterior el cálculo de sismogramas sintéticos en Bayamo, Manzanillo y Pílon se seleccionaron 3 posibles epicentros: 1) el del terremoto de 1992; 2) una ubicación algo más al sur que la del terremoto de Pílon y 3) el del terremoto del 1932. Tomando estos terremotos como punto inicial se trazaron varios perfiles hasta las ciudades en estudio, resultando un total de 2 perfiles para Manzanillo y 3 para Bayamo los cuales atraviesan la cuenca y 2 para Pílon que atraviesan fundamentalmente la zona marítima al sur, como se ve en la Fig. 4.

Tomando como base los trabajos geólogos y geofísicos realizados en la zona por diferentes autores se confeccionaron tres perfiles (Fig. 5 a, b y c) para establecer los modelos de corteza profunda y poder determinar los valores de velocidades por capas, lo cual será modelado posteriormente.

Para llegar a un consenso en el trazado de los contactos geológicos y las fallas fue necesario apoyarse en el Mapa Geológico de la Republica de Cuba a escala 1:500 000 (MINBAS, 1985), el mapa de ubicación de pozos profundos (García y otros, 2007), el mapa neotectónico realizado para los estudios sismotectónicos de la CEN (Orbera et al 1988), el perfil realizado por Otero y Tenreyro (1998).

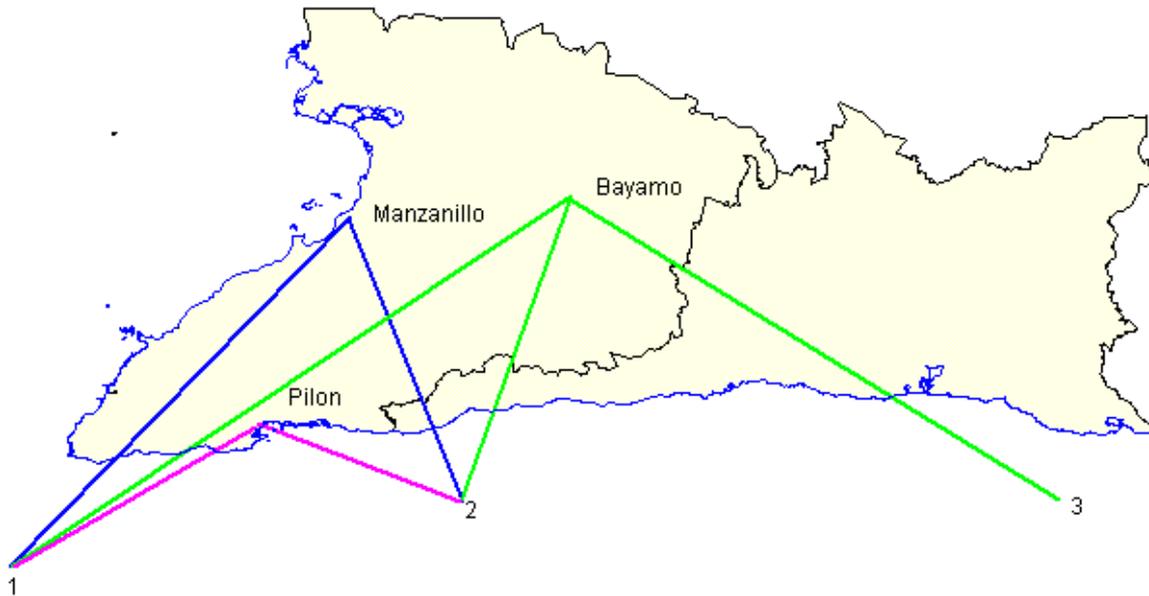


Fig. 4: Ubicación de perfiles.

Para este trabajo fue muy útil el modelo de corteza de Bowin (1976), el cual, aunque no corta exactamente al área de estudio, si corta perpendicularmente las mismas estructuras al oeste de la región oriental de Cuba y se pueden considerar como correlacionables. Este perfil si cuenta con las densidades y profundidades de cada capa. En este perfil se observa muy bien la diferencia entre la zona de Bartlett con una corteza de tipo oceánica muy delgada, observándose al centro un adelgazamiento significativo de la corteza con un mínimo de 6 Kilómetros de espesor, en contraste de las zonas norte y sur (coincidentes con la Sierra Maestra) donde alcanza un espesor de unos 20 kilómetros.

Igualmente se utilizó el modelo de corteza de la región sur oriental de Cuba que corta la fosa de Bartlett, la Sierra Maestra y la Cuenca del Cauto incluido en el estudio “Tectónica de la Sierra Maestra y áreas adyacentes” elaborado por el IGP en 1994 (Pérez, 1994) donde también aparecen las diferentes capas de la corteza atendiendo a sus densidades.

Los perfiles fueron realizados a escala 1:500 000 en la horizontal y en la vertical fue necesario exagerarla un poco a 1:250 000 para que se pudieran ver los contactos de la capa sedimentaria con el complejo volcánico. Las diferentes formaciones se agruparon en varias capas acorde con sus características.

En el perfil la capa sedimentaria alcanza potencias de hasta unos 400 m, mientras que el complejo volcánico del paleógeno aparece hasta las profundidades de 4 Km aproximadamente, por debajo de este se encuentra el complejo volcánico del cretácico el cual fluctúa entre 13 y 15 km, la capa del basamento llega hasta unos 24 ó 25 km aproximadamente.

En el perfil (a) la capa sedimentaria alcanza potencias de hasta unos 634 m, mientras que el complejo volcánico del paleógeno aparece hasta las profundidades de entre 3 y 4 Km aproximadamente, por debajo de este se encuentra el complejo volcánico del cretácico el cual fluctúa entre 14 y 12 km, seguida de la capa del basamento llega hasta unos 22 Km. aproximadamente.

Este perfil (b) modificado de Otero, Tenreiro, (1998) fue modelado con el programa GMSYS, utilizando la anomalía del campo gravitatorio de Bouguer G y apoyándose en los datos de los pozos profundos. En el perfil la capa sedimentaria alcanza potencias de hasta unos 400 m, realmente son depósitos sinorogénicos, mientras que el complejo volcánico del paleógeno aparece al Sur de Bayamo hasta las profundidades de 4 Km. aproximadamente, por debajo de este se encuentra el complejo volcánico del cretácico el cual fluctúa entre 13 y 15 Km., la capa del

basamento llega hasta unos 24 ó 25 Km. aproximadamente. Es de destacar la presencia en el perfil, prolongado mucho más al Norte de Bayamo la presencia de la Anomalía Gravimetrica de Levinstone y al Sur, la intrusión de rocas Granitoides del complejo intrusivo Turquino.

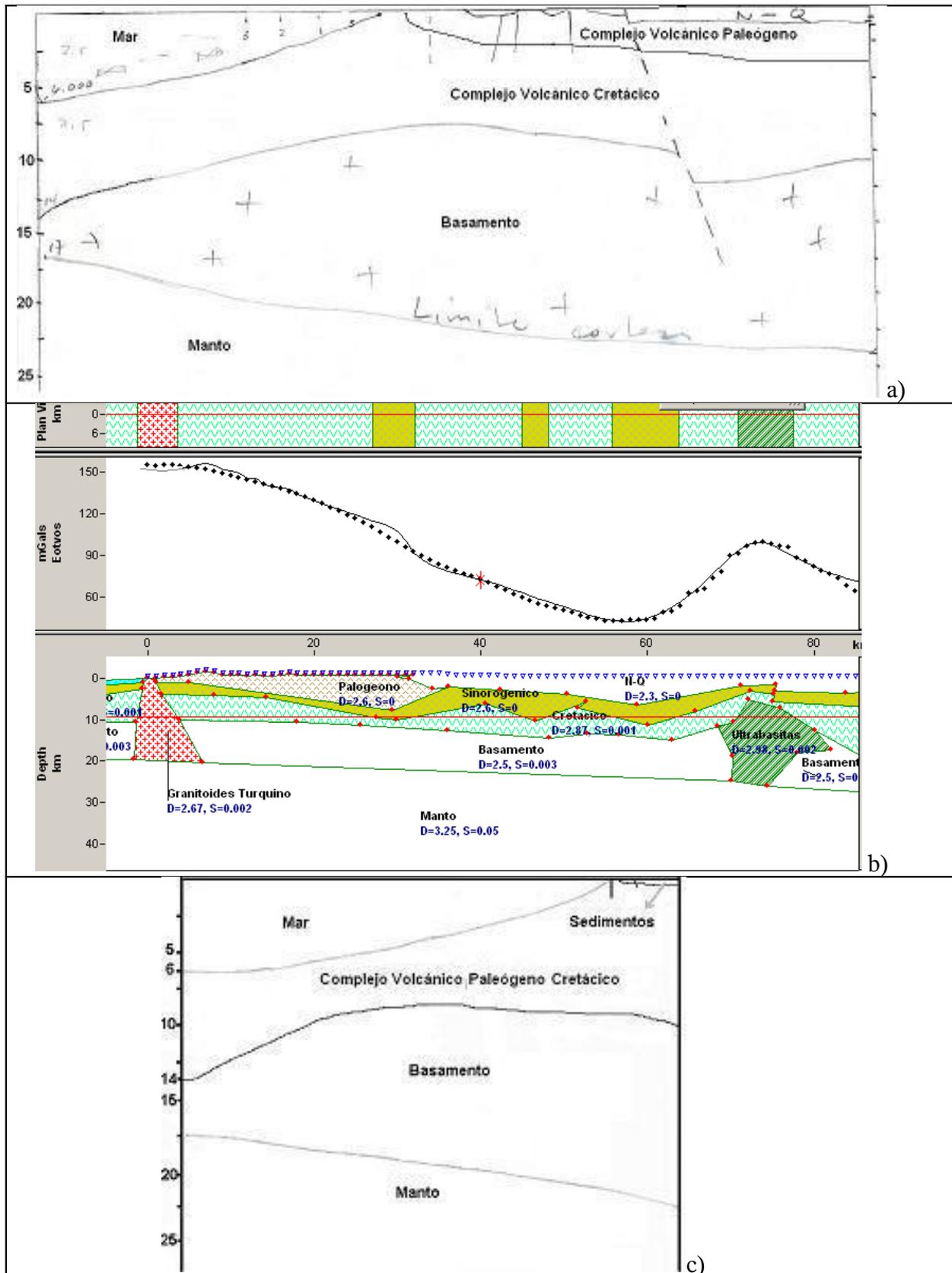


Fig. 5: Perfiles profundos de estructura, a) Cabo Cruz hasta la ciudad de Manzanillo, b) Modelo Geólogo-geofísico, Barttlet Caimán - ciudad de Bayamo, c) Cabo Cruz hasta la ciudad de Pilón.

En el perfil (c) la capa sedimentaria alcanza potencias muy pequeñas de hasta unos 300 m, por la incertidumbre en el contacto entre los complejos volcánicos del paleógeno y el cretácico fueron agrupados en una sola capa, alcanzando profundidades entre 10 y 14 km, la capa del basamento llega hasta unos 22 km aproximadamente. En todos los casos por debajo del basamento se encuentra el manto.

Los valores obtenidos en estos modelos son de densidades, a partir de las cuales se calcularan las velocidades de las capas. La densidad de la capa sedimentaria es de 1.95 g/cm², en los complejos volcánicos del paleógeno y del cretácico los autores no lo separan claramente pero si establecen cortes que varían entre 2.60 y 2.87 g/cm², el basamento tiene una densidad de 2.50 g/cm² y el manto de 3.25 g/cm².

Estructura geológica de las capas más superficiales de las cuencas

Las ciudades en estudio se encuentran ubicadas en diferentes cuencas, el basamento natural de la ciudad de Bayamo lo constituyen los sedimentos de la cuenca del Cauto, la ciudad de Manzanillo se encuentra sobre los sedimentos de la cuenca del río Gua y la ciudad de Pílon sobre los sedimentos de la cuenca del río Purgatorio. De las tres cuencas en estudio la cuenca del Cauto es la que mayor importancia reviste ya que constituye la tercera megamorfoestructura general de Cuba Suroriental, en la cual transcurrieron los descensos neotectónicos más intensos del archipiélago cubano. En realidad, esta es una zona marginal transitoria de tipo isostático de compensación, ubicada entre las regiones de los arcos insulares septentrional y meridional de Cuba Oriental.

Durante el Oligoceno-Mioceno en esta paleodepresión se depositaron grandes espesores de sedimentos carbonatados y terrígenos. Posteriormente fueron depositados conglomerados, areniscas y arenas arcillosas de las formaciones geológicas Bayamo y Cauto.

Para el estudio de la estructura geológica de estas cuencas fue necesario evaluar toda la información disponible, o sea, informes geólogo-geofísicos, perfiles regionales y locales, calas con su distribución en superficie y profundidad, propiedades físico-mecánicas, estudios de suelo y descripciones litológicas por estratos.

A continuación se describen los materiales con los que se cuenta para el trabajo y su alcance.

- De primera importancia poseemos el mapa geólogo-tectónico de Cuba Oriental a escala 1:500 000, el cual es fundamental para la confección e interpretación de los perfiles geológicos, que se deben utilizar para el cálculo de los sismogramas sintéticos.
- Muy importante también es la ubicación de 15 pozos profundos en la provincia Granma; estos permiten conocer en profundidad la potencia y las características de los estratos, muy útil para el trazado e interpretación de los perfiles a utilizar en el cálculo de sismogramas sintéticos. Existen otros pozos profundos ubicados en diferentes áreas de la región Oriental.
- Estudios ingeniero-geológicos realizados a diferentes obras en las ciudades de interés, lo cual permite conocer la descripción litológica del basamento natural que subyace a las ciudades y la profundidad del nivel freático, además, se obtienen las propiedades físico-mecánicas de los estratos tales como: dureza, densidad natural, densidad seca, humedad, índice de poros, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, índice de consistencia, cohesión, ángulo de rozamiento y el número de golpes, a partir de este último es posible calcular por diferentes métodos la velocidad de propagación de la onda S.
- Base de datos GEO, la cual contiene una información digitalizada resumida de los horizontes superiores que subyacen las ciudades de interés, como son: descripción litológica, profundidad del nivel freático y propiedades físico-mecánicas de los estratos. Esta contiene además, algunas otras características de las formaciones geológicas a las cuales están asociadas los sedimentos que la componen. En la Fig. 6 se representa la ubicación de las calas sobre la base topográfica para Bayamo y Manzanillo.
- Mapa geológico estructural del oriente de Cuba, mapa de superficies de nivelación, mapa tectónico y mapa de factores reales. Investigaciones geológicas para la CEN-Holguín. Estos mapas se encuentran digitalizados. De ellos se pueden obtener información geológica, tectónica, ubicación y descripción de pozos profundos, valores de amplitudes de isolíneas en

tierra y mar, etc.

- Mapa geológico de la región oriental en formato digital.

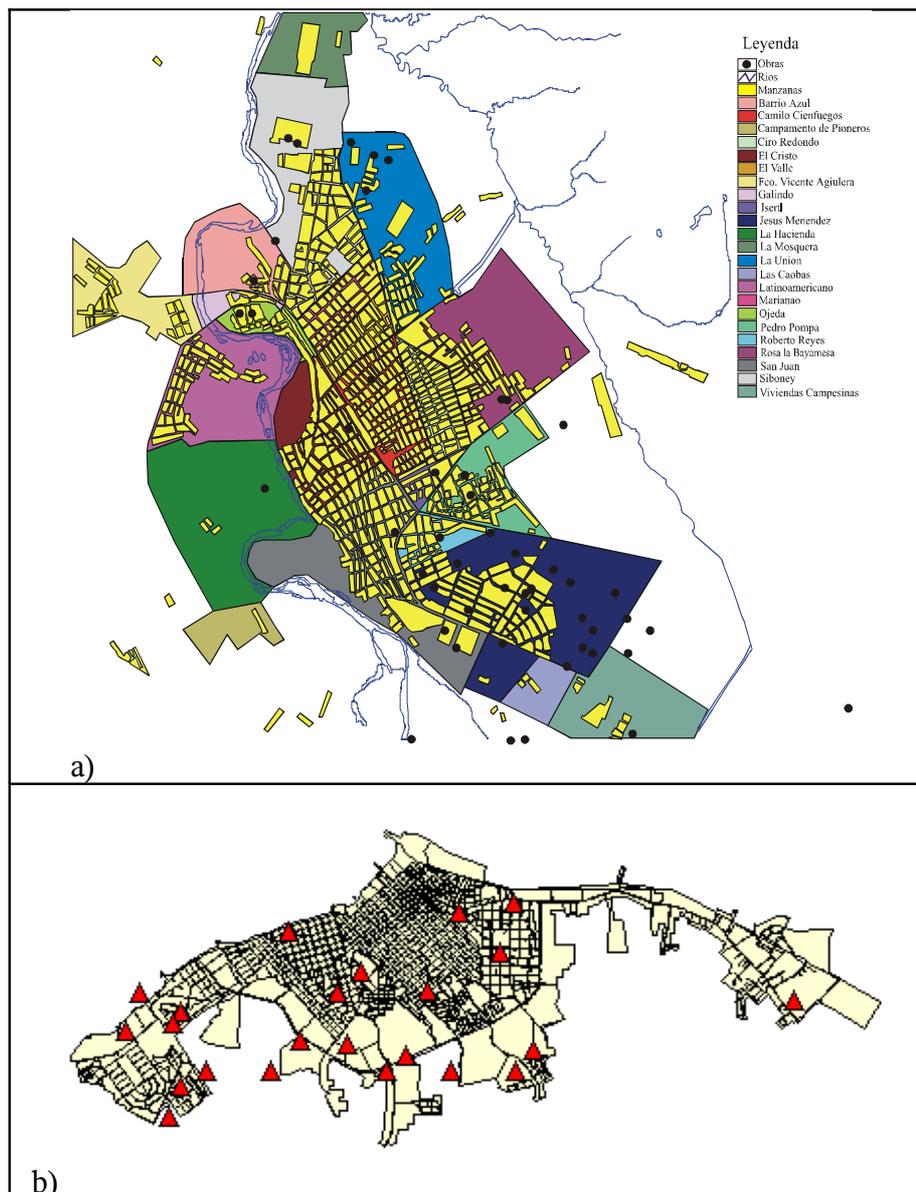


Fig. 6: Ubicación de las calas a) Ciudad de Bayamo con la división de la ciudad por repartos y manzanas y b) Ciudad de Manzanillo.

Estudio geólogo-geofísico complejo de las cuencas donde están ubicadas las ciudades

Para esta tarea se confeccionaron los mismos tipos de mapas que se prepararon a escala regional y que fueron discutidos en la tarea 1: gravimétrico y magnético, pero dos ventanas que cubren las ciudades de Bayamo y Manzanillo. Para la zona de Bayamo entre los límites de coordenadas de Lambert, $X=510000/530000$, $Y=180000/200000$ y para Manzanillo entre $X=460000/490000$, $Y=180000/200000$. Para la localidad de Pílon se establecieron los límites del informe (Guasch et al. 2002) $X=430000/458000$, $Y=13200/150000$. Recordemos que en este estadio debíamos haber realizado trabajos geofísicos de campo, pero las coordinaciones iniciales no realizadas lastraron los mismos. No obstante con los datos disponibles se logra una buena interpretación de los modelos de las cuencas.

Sector Bayamo.

Caracterización geológica de la ciudad de Bayamo

Desde el punto de vista geológico (Nagy, E. 1983) la zona de Bayamo está constituida por las siguientes formaciones (Fig. 7).

- Formación Bayamo (Fm. BAY); Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior. Está constituida por arcillas, areniscas polimícticas de variada granulometría de cemento calcítico y calcítico-arcilloso débil con intercalaciones lenticulares de arcillas, arenas arcillosas, capas de arcillas bentoníticas e inclusiones ocasionales de yeso; las areniscas tienen con frecuencia nódulos de calcita, goethita y fragmentos ferromangánicos. La coloración es abigarrada y la estratificación es fina, lenticular o cruzada, a veces indefinida.

Las arcillas tienen color carmelita y abigarrado, son plásticas y a veces arenosas, ocasionalmente tienen fractura concoidal irregular. Contiene concreciones de CaCO_3 y están manchadas por un pigmento ferromangánico. Entre otros minerales arcillosos predomina la montmorillonita y está presente la clorita. Las arcillas bentoníticas son de color verde grisáceo y carmelita, con manchas blancas y negras; a veces contienen intercalaciones de yeso.

Las arenas arcillosas tienen color verde grisáceo o carmelita, son de grano fino a mediano, a veces de grano grueso, formando gravas de 2-15 mm de material vulcanógeno con pátina negra superficial de pigmentos de FeO y MnO . Las gravas son subangulares y a veces redondeadas, y también contienen pisolitas ferromangánicas de 1-2 mm.

Las areniscas son de color amarillo blancuzco y carmelita, de grano fino a medio. Generalmente son friables, a veces compactas (cementadas con material carbonítico). El material de los clastos es de caliza, tufitas y cuarzo subredondeado.

Las arcillas y las areniscas generalmente contienen gravas (de material vulcanógeno y caliza con pátina de FeO y MnO), pisolitas ferromangánicas de 1-2 mm y manchas o concreciones de CaCO_3 .

- Formación Río (Fm. Río): AlQ_4 , sedimentos aluviales del cuaternario. Formada por sedimentos o depósitos en valles aluviales indiferenciados de composición y granulometría heterogénea. Se extiende en el cauce de los ríos, en la orilla y en la desembocadura de los mismos. Se observa una potente secuencia de los sedimentos aluviales, capa vegetal, bloques, gravas, cantos rodados, arenas no consolidadas y aleurolitas subordinadamente arcillas.

- Formación Cauto (Fm. Ca): Q_1 , sedimentos del cuaternario. Constituida por arcillas, limos, arenas, gravas y conglomerados, con estratificación horizontal y cruzada. La misma aparece en una pequeña área dentro de la ciudad.

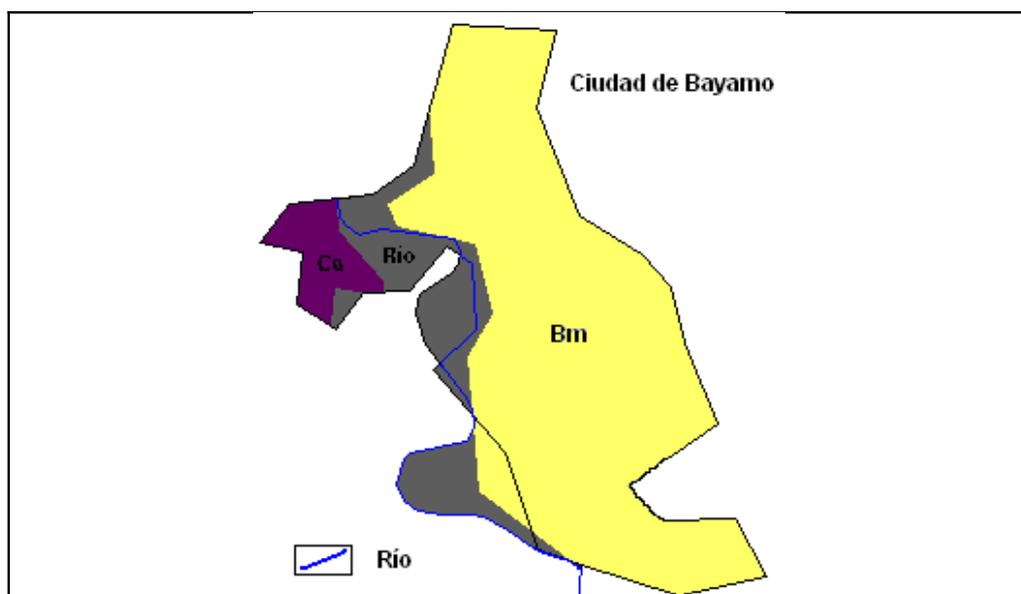


Fig. 7. Esquema geológico de la ciudad de Bayamo

Características hidrográficas e hidrogeológicas

La ciudad de Bayamo se encuentra atravesada por el río Bayamo; éste la bordea hacia la parte oeste, observándose grandes y numerosos meandros, lo cual indica su cambio de curso en repetidas ocasiones. Solapando la llanura del río Bayamo, se interpone la llanura aluvial del río Salado, el cual le sirve de afluente al antes mencionado. Se observan además varios arroyos hacia la parte norte de la ciudad. Por lo general en esta zona los ríos corren en dirección de sur a norte y son afluentes del río Cauto. Las aguas subterráneas se encuentran en intercalaciones y lentes de arenas; aumentando el contenido de agua hacia la parte inferior y en el contacto con las rocas más antiguas. No existen los datos suficientes para determinar la composición química de las aguas, aunque se supone que sean mineralizados ya que los suelos existentes en el lugar generalmente son carbonatados y con algunos componentes de Fe, Mn y otros. En los pozos analizados, los cuales se encuentran en los alrededores de la ciudad, prácticamente en los límites de esta, se puede apreciar que los niveles estáticos de las aguas subterráneas se encuentran a profundidades que oscilan entre 4.53 y 19.10 m, mientras que en las calas realizadas en la ciudad los niveles freáticos son muy variables oscilando entre 1.90 y 10.00 m, aunque es bueno señalar que en sentido general los niveles freáticos en la mayor parte del área investigada alcanzan profundidades mayores a los 4 m.

Tipos de suelos predominantes en la ciudad.

Aparecen diferentes tipos de suelos de acuerdo a sus características y propiedades físico-mecánicas (Tabla 1). En la parte superior de los mismos predomina la capa vegetal seguida en ocasiones por el relleno. Estos están descritos a continuación:

- Capa vegetal mezclada con arcilla orgánica y en algunos casos gravas y arenas, de coloraciones gris oscuro, carmelita oscuro o negro. Su espesor varía desde 0.15 hasta 1.90 m.
 - Relleno de color carmelita oscuro a grisáceo, constituido por arena, arcilla, limo, gravas, cantos rodados de diferentes diámetros, pedazos de hierro y fragmentos de ladrillos; en ocasiones está mezclado con la capa vegetal. Su espesor varía desde 0.50 hasta 4.00 m.
- 1- Suelos arcillosos, generalmente plásticos de color carmelita-amarillento con tonalidades oscuras, cremas, rojizas y verdosas; en ocasiones fisurados, con contenido variable de cantos rodados, gravas y arenas, y con cierta limosidad. Puede presentarse con manchas de óxido de hierro y manganeso, con fragmentos de caliza y nódulos de CaCO_3 . Consistencia de media a dura. Su espesor varía desde 0.75 hasta 10.00 m. Estos se clasifican de acuerdo a su contenido en: arcilla de alta plasticidad, arcilla limosa, arcilla arenosa y arcilla calcárea
 - 2- Arenas de granos finos a gruesos de color carmelita amarillento, mezcladas con arcillas, limo y gravas de granulometrías pequeñas a medianas; compacta. Su espesor varía desde 2.50 hasta 10.00 m. Estos, de acuerdo a su contenido se clasificaron en: arena gravosa, arena arcillosa y arena limosa con fragmentos de gravas.
 - 3- Suelo gravoso o conglomerático constituido por gravas y fragmentos de rocas de diversos orígenes (volcánico y sedimentario), de diferentes coloraciones (carmelitas con tonalidades amarillentas, grises y blancuzcas), en una matriz de arcilla limo-arenosa, con gran contenido de CaCO_3 . Compacto. Su espesor varía desde 2.50 hasta 6.00 m.
 - 4- Areniscas de granos finos cementadas por material carbonatado; aparecen mezcladas con pequeñas gravas de calizas y material volcánico, y en ocasiones con un material arcillo-limoso.
 - 5- Suelo aluvial de color carmelita amarillento con tonalidades grises claras y composición arcillo-gravosa, con abundante contenido de arena de diferentes granulometrías y cantos rodados. De semicompacto a compacto. Se encuentra fundamentalmente en el cauce y en los alrededores del río Bayamo. Su espesor varía desde 2.00 hasta 11.00 m.

El suelo predominante en la ciudad, y de mayores potencias en sus espesores, está constituido por arcilla plástica, en ocasiones fisurada, carmelita, con nódulos y bolsones calizos, con algunas gravas pequeñas y CaCO_3 ; de consistencia media a dura. A partir del número de golpes empleado en penetrar 30 cm. en las perforaciones geotécnicas, utilizando diferentes ecuaciones, se calculó la velocidad de la onda S para los diferentes tipos de suelos (Tabla 2).

Tabla 1: Propiedades físico-mecánicas. S: tipo de suelo, G: peso específico, rf: densidad húmeda, rd: densidad seca, W; humedad natural, e: relación de vacío, S: saturación, LL: límite líquido, LP: límite plástico, IP: índice de plasticidad, B: módulo de Young, IC: índice de consistencia, E: módulo de elasticidad, Ø: ángulo de rozamiento, Rs: resistencia a la compresión, C: cohesión, Ng: número de golpes

S	G g/cm ²	rf g/cm ²	rd g/cm ²	W %	e	S %	LL %	LP %	IP %	B Kg/cm ²	IC	E Kg/cm ²	Ø	Rs Kg/cm ²	C	Ng
1	2.75	1.91	1.52	25	0.80	84	54	24	31	0.49	0.96	130	16	2.25	0.79	45
2	2.75	1.95	1.61	21	0.70	79	44	20	24	0.47	0.30	152	21	2.20	0.90	63
3	2.76	1.90	1.59	19	0.71	73	54	23	31	0.63	1.13	80	12	2.00	0.46	41
5	2.78	2.00	1.69	18	0.64	77	40	19	21	0.17	1.15	350	28	3.00	0.30	90

Tabla 2: Velocidad de la onda S (m/seg) para los tipos de suelos predominantes en la ciudad determinada a partir del número de golpes. Las ecuaciones son: [$Vs' = 0.32 * (309 * NSPT)^{0.34}$], Ohta y Goto (1979)], [$Vs'' = 0.32 (185 NSPT)^{0.5}$], Seed e Idriss (1982)] y [$Vs''' = 5.3 NSPT + 134$, Fumal y Tinsley (1982)]. (nota: Ng = NSPT)

Suelo	Ng	Vs'	Vs''	Vs'''
1	45	360.74	397.12	372.5
2	63	404.47	469.88	467.9
3	41	349.51	379.06	351.30
5	90	456.61	561.62	611

Analizando los valores de velocidad aprobados en la Norma Sísmica Cubana notamos que los valores calculados para los estratos 1 y 3 se corresponden con un suelo S2, el estrato 2 que a su vez es el predominante o de mayor potencia tiene valores de velocidad en correspondencia con suelo S1 y S2, mientras que el estrato 5 se corresponde con un suelo S1 rígido. Al estrato 4 no fue posible determinarle la velocidad por falta de propiedades físico-mecánicas, en específico el número de golpes.

Perfiles de velocidad.

En la ciudad de Bayamo se trazaron 8 perfiles (Fig. 8) abarcando toda la ciudad, los cuales se trazaron de forma tal que cortaran o estuvieran lo mas cercanos posible a la mayor cantidad de calas, con el objetivo de hacer un análisis en profundidad de las características del suelo en las capas mas superficiales y la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el medio, atendiendo a la descripción de los estratos, espesores y propiedades físico-mecánicas de los mismos.

Como en la ciudad de Bayamo hay poco contraste en el suelo presente, es decir, que aparece fundamentalmente la formación Bayamo y en muy pocos lugares las formaciones Cauto y Río, se hacia muy complicado establecer una clasificación, por eso fue necesario separar los estratos presentes en el corte y hacer la clasificación por estrato y no por formación geológica, es por esto que al analizar la clasificación regional se pueden encontrar cierta diferencia con la clasificación local.

Siguiendo el trazado de los perfiles se describieron las calas que eran cortadas por los mismos, y atendiendo a las propiedades de los suelos y las descripciones (tabla 1 y anexo1) se clasificaron empleando diferentes métodos, de forma tal que se pudieran comparar los resultados. A estos estratos se les determinaron los valores de velocidad (tabla 3).

Para la clasificación de los suelos se tuvo en cuenta fundamentalmente la descripción del estrato predominante, o sea, el de mayor potencia en cada cala. Como se aprecia en la tabla 7 los suelos que aparecen se clasifican como suelo blando que son los suelos poco compactos y en suelo duro, estos

últimos constituyen los suelos predominantes en la ciudad de Bayamo, siendo suelos compactos de consistencia dura a muy dura, en algunos casos medias. No obstante hay que señalar que unido a otras características de relieve y a la profundidad del nivel freático en algunos lugares de la ciudad de Bayamo los suelos presentes pueden tener un comportamiento favorable al incremento de la intensidad sísmica de hasta un grado en caso de un terremoto de moderada o gran intensidad.

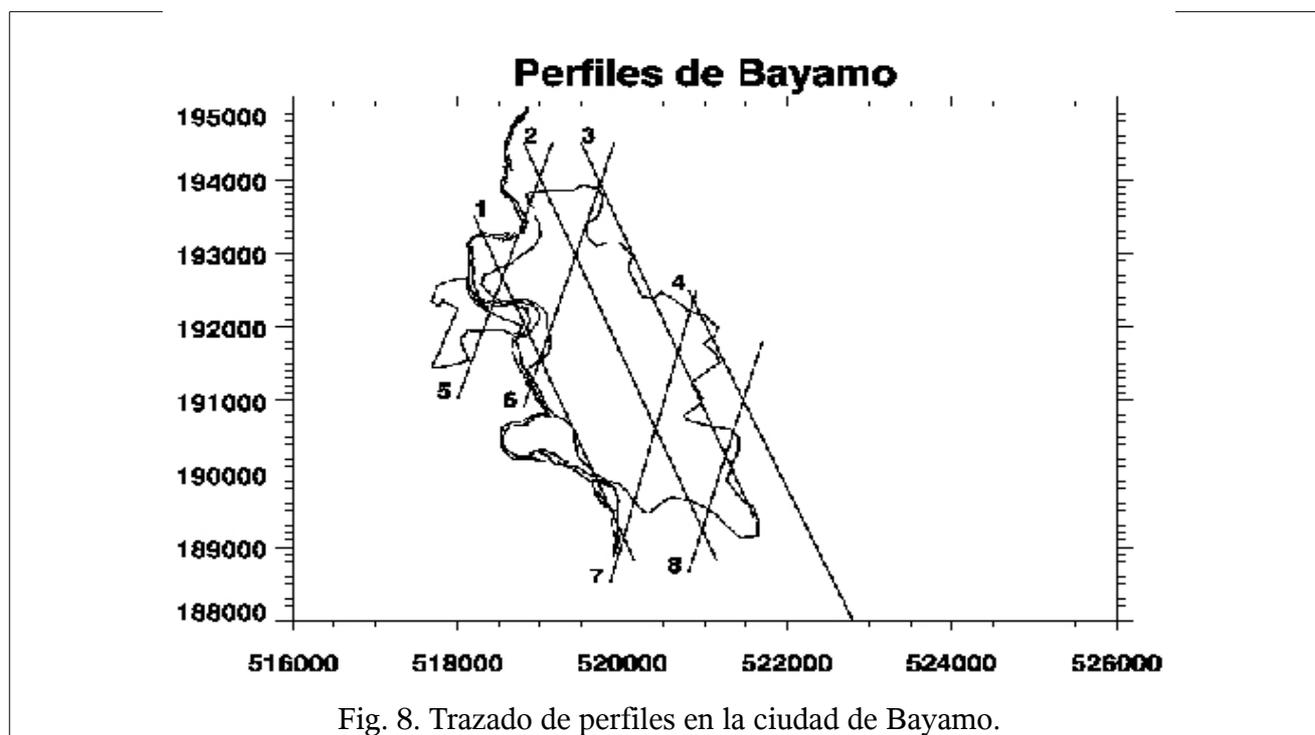


Fig. 8. Trazado de perfiles en la ciudad de Bayamo.

Tabla 3: Velocidad de propagación de la onda S. Amb96 clases acorde a Ambraseys et al. (1996): D=suelo duro, S=suelo blando; Dah95 clases acorde a Dahle et al. (1995): s = suelo; NEHRP clases y término multiplicativo acorde a NEHRP (BSSC, 2001); C=roca blanda, D=suelo duro, EC8 clases acorde al Euro código (CEN, 2002); b=suelo duro, c=suelo blando, MEV62 mínimos y máximos incrementos de intensidad acorde a Medvedev (1962);

OBRA	PROF MÁX. (M)	NG *	VS'	VS'	VS'''	AMB96	DAH95	NEHRP	EC8	MEV62 P (KG/M ³)	MEV62 VP (KM/S)
1	6.00	29	311	319	288	D	S	D	b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
2	3.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
3	3.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
4	10.50	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
5	3.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
6	8.00	-				S	S		c	1.4 – 1.8	0.2 – 1.00
7	6.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
8	10.00	65	409	477	478	S	S	C	c	1.4 – 1.8	0.2 – 1.00
9	10.00	28	307	313	288	D	S	D	b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
10	12.00	78	435	523	547	D	S	C	b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
11	8.10	101	475	595	669	S	S	C	c	1.4 – 1.8	0.2 – 1.00
12	10.20	74	427	509	547	D	S	C	b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
13	10.00	56	388	443	430	S	S	C	c	1.4 – 1.8	0.2 – 1.00
14	10.00	44	358	393	367	D	S	C-D	b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
15	12.00	100	473	592	664	S	S	C	c	1.4 – 1.8	0.2 – 1.00
16	10.00	90	456	562	611	D	S	C	b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
17	15.00	111	490	623	722	S	S	C	c	1.4 – 1.8	0.2 – 1.00
18	8.00	40	346	374	346	D	S	C-D	b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
19	10.00	46	363	401	377	D	S	C	b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
20	15.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
21	8.40	56	388	443	430	D	S	C	b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
22	10.00	38	340	364	335	S	S	C-D	c	1.4 – 1.8	0.2 – 1.00

23	10.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
24	8.00	50	374	419	399	D	S	C	b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
25	8.00	100	473	592	664	D	S	C	b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
26	10.00	100	473	592	664	S	S	C	c	1.4 – 1.8	0.2 – 1.00
27	10.00	53	381	430	414	D	S	C	b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
28	10.00	34	328	345	314	D	S	D	b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
29	10.00	16	254	237	218	D	S	D	b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
30	8.00	50	374	419	399	D	S	C	b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
31	10.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
32	8.00	56	388	443	430	D	S	C	b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
33	10.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
34	6.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
35	8.00	100	473	592	664	D	S	C	b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
36	10.20	41	349	379	351	D	S	C-D	b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
37	8.40	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
38	10.00	-				S	S		c	1.4 – 1.8	0.2 – 1.00
39	11.35	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
40	10.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
41	10.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
42	15.00	-				S	S		c	1.4 – 1.8	0.2 – 1.00
43	8.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
44	8.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
45	8.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
46	10.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
47	5.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
48	10.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
49	10.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
50	10.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
51	10.00	-				S	S		c	1.4 – 1.8	0.2 – 1.00
52	8.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
53	10.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6
54	8.00	-				D	S		b	1.6 – 2.00	0.4 – 1.6

Perfiles Geológicos Esquemáticos.

Con el objetivo de profundizar el análisis de la geología superficial de la cuenca y su comportamiento en profundidad, se confeccionaron 3 perfiles geológicos esquemáticos desde diferentes Focos terremotos fuertes con parámetros bien analizados hasta la ciudad de Bayamo (Fig 9).

Para la realización e interpretación de los perfiles o esquemas geológicos y llegar a un consenso en el trazado de los contactos y las fallas fue necesario apoyarse en el Mapa Geológico de la República de Cuba a escala 1:500 000 (MINBAS, 1985) y el Léxico Estratigráfico (Trujillo y otros, 2005). A pesar de que se hizo muy complicado establecer una escala en profundidad, si se pudieron determinar los espesores máximos de cada formación geológica presente en el área y de esta forma poder realizar la modelación de la estructura superficial de la cuenca.

Las formaciones geológicas que son cortadas por los perfiles son las siguientes: Jaimanitas con espesores de hasta 10 m de profundidad, Bayamo con espesores que oscilan entre 10 y 100 m, Cauto con espesores de 25 m, San Luís con espesores de 700 m, Caney con espesores de hasta 1000 m, El Cobre con espesores que oscilan entre 5000 y 6000 m, Manacal con espesores de 200 m y Pílon con espesores de 2000 m.

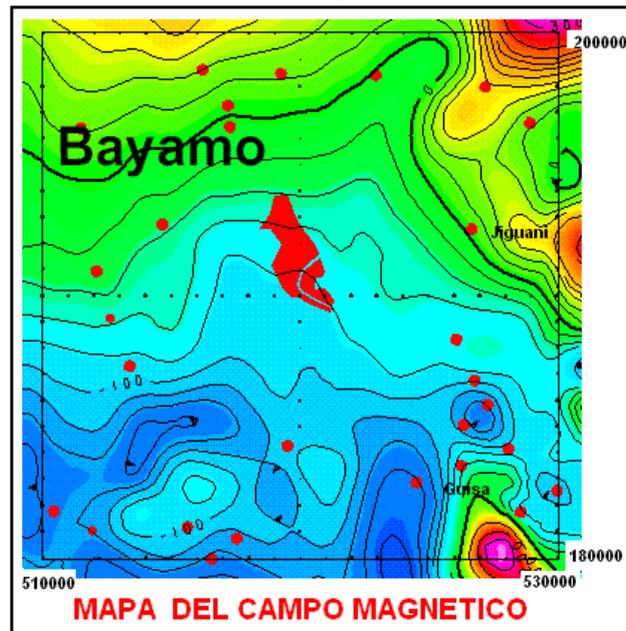


Fig.10. Mapa del campo magnético total. Escala 1: 50 000

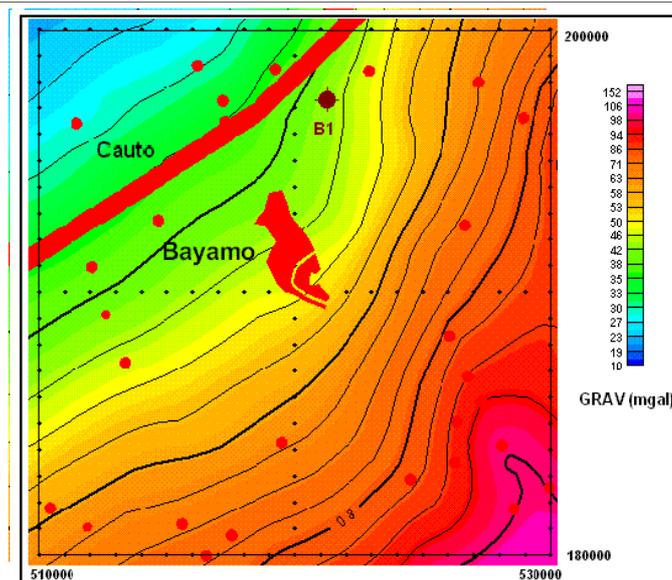


Fig. 11. Mapa de anomalía de Bouguer. Escala 1: 50 000

Realizando la interpretación del campo magnético según el algoritmo de la convolución de Euler para un coeficiente de 0.5, aparecen diques, contactos geológicos, y encontramos las fuentes geológicas magnéticas hasta las profundidades de 3000 m y más (Fig. 12). Al sur de la ciudad se encuentra la menor profundidad hasta las fuentes magnéticas (color azul), aquí se encuentran las rocas del AVP. Como conclusión, para este sector señalamos que donde está ubicada la ciudad existen potentes paquetes de rocas arcillosas y carbonatadas de hasta más 1000 m de potencia.

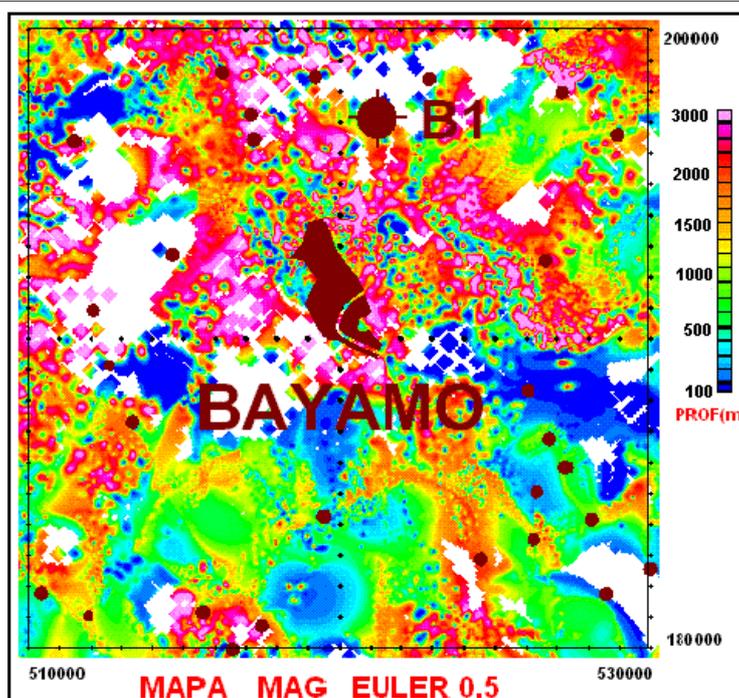


Fig. 12. Mapa de interpretación magnética según convolución de Euler. Escala 1:50 000

Sector Manzanillo.

Caracterización geológica de la ciudad de Manzanillo.

Desde el punto de vista geológico (Nagy, E. 1983) la zona está constituida por las siguientes formaciones (Fig. 13)

- *Formación Manzanillo* (Fm. Mz); Mioceno Medio parte alta. Ocupa casi toda el área de estudio y está constituida por calizas órgano - detríticas, duras, masivas, cavernosas, a veces brechoides, de color blanco, crema y amarillo parduzco. Estas calizas muchas veces son fosilíferas y en mayor o menor grado margosas. Están intercaladas con margas, arcillas, calcarenitas, margas arenosas y limonitas calcáreas friables o moderadamente consolidadas, de color crema, blanco y gris. A veces tienen intercalaciones de pseudoconglomerados calcáreos con material subredondeado y anguloso. Por lo general, la estratificación de estas rocas es irregular y está enmarcada por los cambios litológicos. Predominan los horizontes masivos y menos frecuentemente, los de estratificación mediana, ondulada o lenticular; los buzamientos que predominan son suaves hacia el centro de la cuenca.

- *Formación Jutía* (Fm. Jut.): PQ₄, sedimentos palustres cuaternarios. Ocupa una pequeña parte del área de estudio hacia la parte noroeste, muy próxima a la costa; está constituida por sedimentos de pantano en tierra - mar, con abundantes restos orgánicos, mangle y sedimentos terrígenos de lodo y arcilla. Desde el punto de vista ingeniero - geológico, estos sedimentos poseen propiedades físico - mecánicas muy desfavorables.

Tipos de suelos predominantes en la ciudad.

En el área de estudio se observa la capa vegetal, en ocasiones seguida de un relleno heterogéneo y por debajo diferentes tipos de suelos clasificados de acuerdo a su composición y propiedades físico-mecánicas (Tabla 4). Los mismos aparecen descritos a continuación:

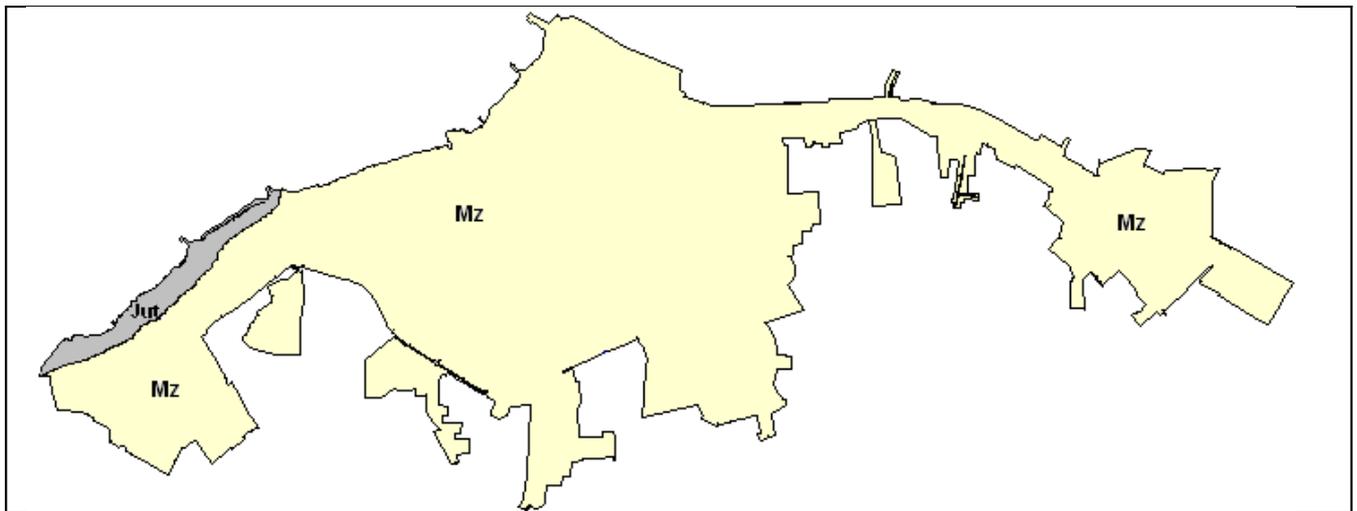


Fig. 13 Esquema geológico de la ciudad de Manzanillo.

- Capa vegetal. Su espesor varía desde 0.15 hasta 1.90 m.
 - Relleno heterogéneo, compuesto por arena arcillosa, arcilla arenosa, arenisca, mezcla de capa vegetal, gravas calizas y volcánicas, suelo calizo, pedazos de ladrillos, vidrio, madera y algunos caracoles pequeños, de color carmelita, a veces oscuro o blancuzco, con pequeñas raíces y gravas subangulares, calizas, semicompacto a compacto. Su espesor varía desde 0.15 hasta 3.90 m.
- 1- Limo o cieno arcilloso calcáreo de color carmelita y gris verdoso, con nódulos y bolsones calizos, compacto. Su espesor varía desde 0.20 hasta 1.00 m. Limo - areno - calcáreo de color carmelita, con bolsones calizos y fragmentos pequeños de roca mezclados con la capa vegetal. Compacto. Su espesor varía desde 0.50 hasta 1.70 m.
 - 2- Arcilla de color carmelita oscuro a carmelita blancuzco, con tonos grises, amarillentos, verdosos y rojizos, con manchas negras de OMn y materia orgánica, bolsones calizos, gravas pequeñas de origen calizo y fragmentos de roca caliza; en ocasiones presenta bolsones de arena. Puede aparecer muy intemperizada. Consistencia blanda a dura. Su espesor varía desde 0.30 hasta 6.22 m. Este de acuerdo a su contenido se clasifica en: arcilla calcárea, arcilla limosa, arcilla margosa y arcilla arenosa.
 - 3- Arena de granos gruesos a medios de color carmelita blancuzco, con abundantes fósiles marinos, de origen calizo; reacciona con el HCl; presenta mucho limo y abundantes fragmentos de roca caliza, compacta. Su espesor varía desde 0.50 hasta 1.30 m.
 - 4- Suelo calizo (textura arcillo - limosa, limo - arcillosa, areno - arcillosa, areno - limosa o limo - arenosa) de color carmelita blancuzco con tonalidades amarillentas y rosáceas, con manchas negras y de óxido, gravas, fragmentos de roca caliza, en algunos casos muy fracturadas y con muchas oquedades rellenas de suelo calizo. Compacto, semicompacto y muy compacto; consistencia dura. Su espesor varía desde 0.30 hasta 9.80 m. Este se clasifica en: caliza arcillosa, caliza margosa y caliza organógena.
 - 5- Roca caliza algo intemperizada, carmelita blancuzco con pequeñas oquedades y algunos fósiles, dureza media a alta. Su espesor varía desde 0.50 hasta 4.70 m.
 - 6- Semirroca caliza de intemperización muy severa, color carmelita con tonalidades verdosas, rosáceas y amarillentas, con vetas de arcilla margosa y fragmentos duros de roca caliza. Dureza muy baja. Su espesor varía desde 3.00 hasta 6.70 m.
 - 7- Semirroca de marga arcillosa, color carmelita con tonalidades grises y a veces rojizas, con fracturas manchadas de óxido, de intemperización muy severa y dureza baja a muy baja, presenta intervalos más arcillosos y más plásticos que otros. Su espesor varía desde 1.90 hasta 3.50 m.
- El suelo predominante y de mayor potencia en el área de estudio está constituido por el suelo calizo carmelita blancuzco, con pequeñas oquedades y fragmentos de roca caliza, en ocasiones con bolsones de arcilla margosa o de carbonato talcoso; semicompacto a compacto. En la tabla 4

aparecen todas las propiedades físico-mecánicas determinadas para cada estrato y en la tabla 5 las estimaciones de Vs para los diferentes estratos usando el “número de golpes”.

Tabla 4: Propiedades físico – mecánicas. G: peso específico, rf: densidad húmeda, rd: densidad seca, W; humedad natural, e: relación de vacío, S: saturación, LL: límite líquido, LP: límite plástico, IP: índice de plasticidad, IC: índice de consistencia, E: módulo de elasticidad, Ø: ángulo de rozamiento, Rs: resistencia a la compresión, C: cohesión, Ng: número de golpes.

Suelo	G g/cm ²	rf g/cm ²	rd g/cm ²	W %	e	S %	LL %	LP %	IP %	IC	E Kg/cm ³	Ø	Rs Kg/cm ²	C	Ng
2	2.67	1.89	1.66	22	0.74	76	52	23	28	1.09	377	17	3.7	0.3	42
3	-	2.04	1.72	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25
4	2.70	1.92	1.63	18	0.62	77	37	20	19	0.95	214	21	2.72	0.23	51
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	88
6	2.73	2.00	1.71	16	0.60	79	27	19	8	0.62	250	22.0	-	0.20	123
7	2.70	1.82	1.34	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8

Tabla 5 Velocidad de la onda S (m/seg) para los tipos de suelos predominantes en la ciudad. [Vs'=0.32*(309*NSPT^{0.34}), Ohta y Goto (1979)], [Vs'' = 0.32 (185 NSPT^{0.5}), Seed e Idriss (1982)] y [Vs''' = 5.3 NSPT + 134, Fumal y Tinsley (1982)]. (nota: Ng = NSPT)

Suelo	Ng	Vs'	Vs''	Vs'''
2	42	352,38	383,66	361,90
3	25	295,40	296,00	266,50
4	51	376,43	422,77	404,30
5	88	453,40	555,34	600,40
6	123	507,78	656,56	785,9
7	8	200,52	167,44	176,40

Analizando los valores de velocidad aprobados en la Norma Sísmica Cubana en este caso el estrato 7 se corresponde con un suelo S3, los estratos 2, 3 y 4 se corresponden con un suelo S2, los estratos 5 y 6 con un suelo S1. Al estrato 1 no fue posible determinarle la velocidad por falta de propiedades físico-mecánicas, en específico el número de golpes.

Perfiles de velocidad.

Siguiendo el mismo procedimiento que en la ciudad de Bayamo, se separaron los estratos presentes en el corte y se hizo la clasificación por estrato predominante y no por formación geológica, es por esto que al analizar la clasificación regional se pueden encontrar cierta diferencia con la clasificación local.

Se interpretaron las calas atendiendo a las propiedades de los suelos y las descripciones (tabla 6 y anexo 1), para clasificar los estratos predominantes empleando diferentes métodos, de forma tal que se pudieran comparar los resultados. A estos estratos se les determinaron los valores de velocidad (tabla 6). Para la clasificación de los suelos se tuvo en cuenta fundamentalmente la descripción del estrato predominante, o sea, el de mayor potencia en cada cala. Como se aprecia en la tabla 6 los suelos que predominantes en la ciudad son los suelos duros, compactos, de consistencia dura a muy dura, y escasamente suelo blando, poco compactos y roca.

Tabla 4: Propiedades físico – mecánicas. G: peso específico, rf: densidad húmeda, rd: densidad seca, W; humedad natural, e: relación de vacío, S: saturación, LL: límite líquido, LP: límite plástico, IP: índice de plasticidad, IC: índice de consistencia, E: módulo de elasticidad, Ø: ángulo de rozamiento, Rs: resistencia a la compresión, C: cohesión, Ng: número de golpes.

Suelo	G g/cm ²	rf g/cm ²	rd g/cm ²	W %	e	S %	LL %	LP %	IP %	IC	E Kg/cm ³	Ø	Rs Kg/cm ²	C	Ng
2	2.67	1.89	1.66	22	0.74	76	52	23	28	1.09	377	17	3.7	0.3	42
3	-	2.04	1.72	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25
4	2.70	1.92	1.63	18	0.62	77	37	20	19	0.95	214	21	2.72	0.23	51
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	88
6	2.73	2.00	1.71	16	0.60	79	27	19	8	0.62	250	22.0	-	0.20	123
7	2.70	1.82	1.34	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8

Tabla 5 Velocidad de la onda S (m/seg) para los tipos de suelos predominantes en la ciudad. [$Vs' = 0.32 \cdot (309 \cdot NSPT)^{0.34}$], Ohta y Goto (1979)], [$Vs'' = 0.32 (185 NSPT)^{0.5}$], Seed e Idriss (1982)] y [$Vs''' = 5.3 NSPT + 134$, Fumal y Tinsley (1982)]. (nota: Ng = NSPT)

Suelo	Ng	Vs'	Vs''	Vs'''
2	42	352,38	383,66	361,90
3	25	295,40	296,00	266,50
4	51	376,43	422,77	404,30
5	88	453,40	555,34	600,40
6	123	507,78	656,56	785,9
7	8	200,52	167,44	176,40

Analizando los valores de velocidad aprobados en la Norma Sísmica Cubana en este caso el estrato 7 se corresponde con un suelo S3, los estratos 2, 3 y 4 se corresponden con un suelo S2, los estratos 5 y 6 con un suelo S1. Al estrato 1 no fue posible determinarle la velocidad por falta de propiedades físico-mecánicas, en específico el número de golpes.

Perfiles de velocidad.

Siguiendo el mismo procedimiento que en la ciudad de Bayamo, se separaron los estratos presentes en el corte y se hizo la clasificación por estrato predominante y no por formación geológica, es por esto que al analizar la clasificación regional se pueden encontrar cierta diferencia con la clasificación local.

Se interpretaron las calas atendiendo a las propiedades de los suelos y las descripciones (tabla 6 y anexo 1), para clasificar los estratos predominantes empleando diferentes métodos, de forma tal que se pudieran comparar los resultados. A estos estratos se les determinaron los valores de velocidad (tabla 6).

Para la clasificación de los suelos se tuvo en cuenta fundamentalmente la descripción del estrato predominante, o sea, el de mayor potencia en cada cala. Como se aprecia en la tabla 6 los suelos que

predominantes en la ciudad son los suelos duros, compactos, de consistencia dura a muy dura, y escasamente suelo blando, poco compactos y roca.

Tabla 6: Velocidad de propagación de la onda S. Amb96 clases acorde a Ambraseys et al. (1996): D=suelo duro, S=suelo blando; Dah95 clases acorde a Dahle et al. (1995): s = suelo; NEHRP clases y término multiplicativo acorde a NEHRP (BSSC, 2001); C=roca blanda, D=suelo duro, EC8 clases acorde al Euro código (CEN, 2002); b=suelo duro, c=suelo blando, MEV62 mínimos y máximos incrementos de intensidad acorde a Medvedev (1962);

OBRA	PROF MÁX. (M)	NG *	VS'	VS''	VS'''	AMB96	DAH95	NEHRP	EC8	MEV62 P (KG/M ³)	MEV62 VP(KM/S)
1	6.85	49	375	371	414	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
2	7.90	-	-	-	-	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
3	11.30	97	468	593	648	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
4	3.00	-	-	-	-	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
5	12.30	44	358	335	367	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
6	2.50	-	-	-	-	S	S	E	c	1.4 – 1.8	0.2 – 1.0
7	14.90	-	-	-	-	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
8	10.00	50	374	419	399	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
9	15.60	39	344	310	341	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
10	10.00	-	-	-	-	S	S	E	c	1.4 – 1.8	0.2 – 1.0
11	6.50	50	374	419	399	D	S	C	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
12	4.50	47	366	406	383	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
13	20.10	16	254	237	219	D	S	D	b	1.4 – 1.8	0.2 – 1.0
14	9.80	123	508	657	786	R	R	B	a	1.7 – 2.6	1.3 – 3.5
15	9.80	-	-	-	-	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
16	11.20	-	-	-	-	S	S	E	d	1.3 - 1.7	0.1 - 0.5
17	10.30	56	389	443	431	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
18	4.30	36	334	355	325	S	S	E	c	1.4 – 1.8	0.2 – 1.0
19	2.00	-	-	-	-	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
20	-	35	331	350	320	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
21	14.22	16	254	237	219	S	S	E	c	1.4 – 1.8	0.2 – 1.0
22	1.20	123	508	657	786	R	R	B	a	1.7 – 2.6	1.3 – 3.5
23	10.00	33	325	340	309	S	S	E	c	1.4 – 1.8	0.2 – 1.0
24	14.00	-	-	-	-	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
25	7.60	50	374	419	399	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
26	12.90	-	-	-	-	D	S	D	b	1.4 – 1.8	0.2 – 1.0
27	10.00	80	439	529	558	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
28	11.00	-	-	-	-	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
29	10.00	-	-	-	-	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
30	9.10	40	347	374	346	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
31	10.70	61	400	462	463	D	S	C	d	1.3 - 1.7	0.1 - 0.5
32	11.00	-	-	-	-	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
33	10.20	44	358	335	367	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
34	6.00	86	450	549	590	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
35	10.00	80	439	529	558	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
36	15.00	35	331	350	319	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
37	11.75	40	347	374	346	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
38	15.00	98	470	586	653	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6
39	11.00	26	299	302	272	D	S	D	b	1.6 – 2.0	0.4 – 1.6

Perfiles Geológicos Esquemáticos.

Con el objetivo de profundizar el análisis de la geología superficial de la cuenca y su comportamiento en profundidad, se realizaron 2 perfiles geológicos esquemáticos desde diferentes focos de terremotos fuertes con parámetros bien analizados hasta la ciudad de Manzanillo (Fig. 14).

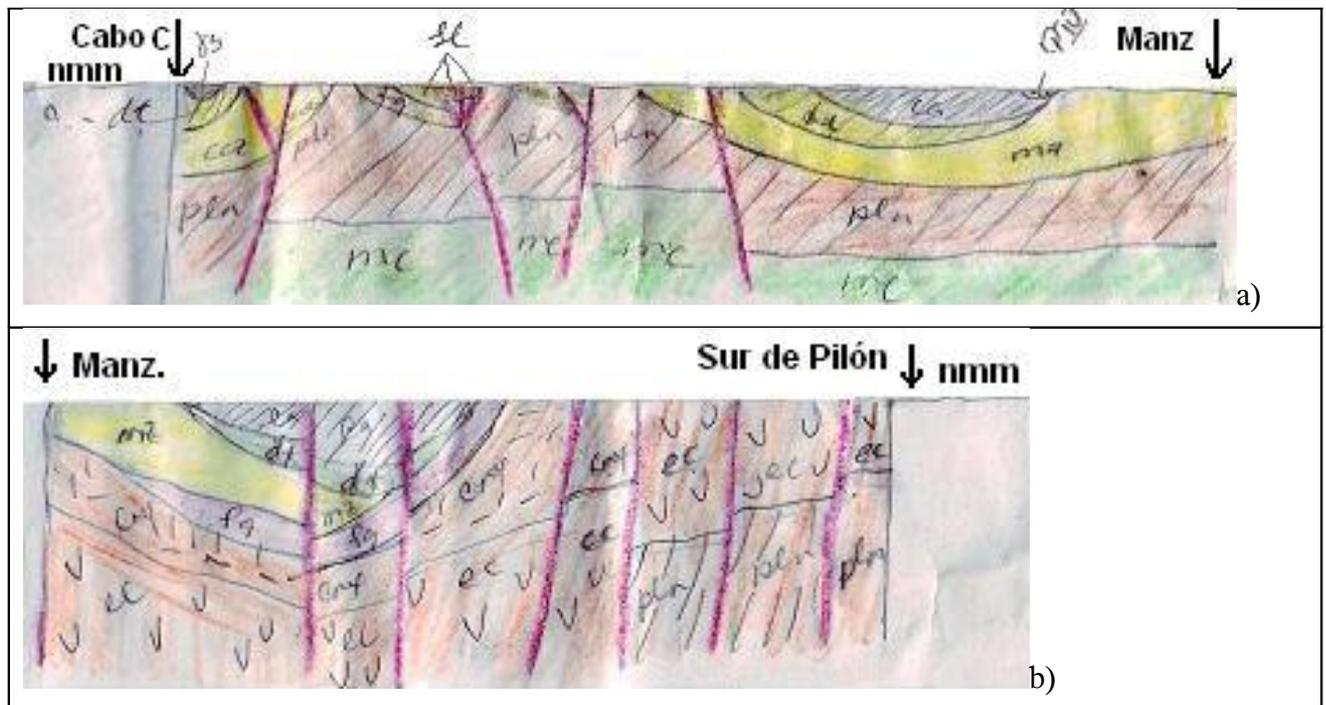
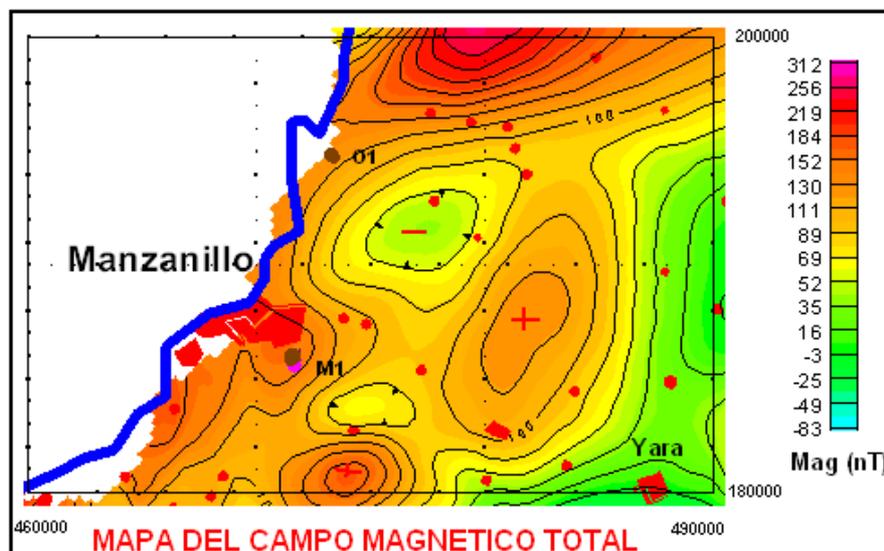


Fig. 14. Perfiles Geológicos Esquemáticos desde focos de terremotos conocidos hasta la ciudad de Manzanillo. 1:500 000

Para la realización e interpretación de los perfiles o esquemas geológicos y llegar a un consenso en el trazado de los contactos y las fallas fue necesario apoyarse en el Mapa Geológico de la Republica de Cuba a escala 1:500 000 (MINBAS, 1985) y el Léxico Estratigráfico (Trujillo y otros, 2005).

Las formaciones geológicas que son cortadas por los perfiles son las siguientes: Dátil con 34 m de espesor, Cauto con espesores de 25 m, Manzanillo con mas de 800 m de espesor, San Luís con espesores de 700 m, Caney con espesores de hasta 1000 m, El Cobre con espesores que oscilan entre 5000 y 6000 m, Manacal con espesores de 200 m y Pilon con espesores de 2000 m.



Interpretación geólogo-geofísica

En este sector de Manzanillo se mantienen las mismas secuencias rocosas, la formación Cauto ocupa la mayor parte del área, además de estar presentes los depósitos palustres de la formación Jutía en la porción norte y colindante con la costa. Propiamente la formación Manzanillo ocupa la parte sureste hasta las inmediaciones de Campechuela, compuesta fundamentalmente por calizas y margas. En el pozo Manzanillo 1 los primeros 400 m están constituidos por estos depósitos del Neógeno. En el propio pozo, al igual que en el Oruita1, no se cortan las rocas del Arco Volcánico

del Cretácico (AVC); todo el corte esta compuesto por los paquetes superiores del Paleógeno, incluyendo rocas tobáceas, tufitas, etc.

En el mapa del campo magnético total (Fig. 15) se ve una serie de anomalías positivas magnéticas; las dos ubicadas al sureste están relacionadas con las fuentes mas superficiales, y pueden ser las zonas de oxidación de las calizas de la Fm. Manzanillo. En el recálculo para un nivel superior, con aplicando la continuación analítica ascendente (CAA) para 5000 m, estas últimas desaparecen y toda la zona de anomalías magnéticas se estrecha en los alrededores de Manzanillo. La fuente de estas anomalías está vinculada seguramente al extremo inferior del área estructural Júcaro-Jobabo ya señalada en la parte regional del presente informe.

En el mapa de anomalías gravimétricas de Bouguer (Fig. 16), se señala una porción de la Falla Cauto; al Norte se encuentra la parte inferior de la anomalía Júcaro-Jiguaní, cuya fuente la consideramos como el emplazamiento en profundidad de las rocas del AVC, densas y de propiedades magnéticas medias a altas. Las características de estas anomalías gravimétricas confirman la gran potencia de los sedimentos cuaternarios y del Neógeno en este sector, característica similar para toda la región de estudio.

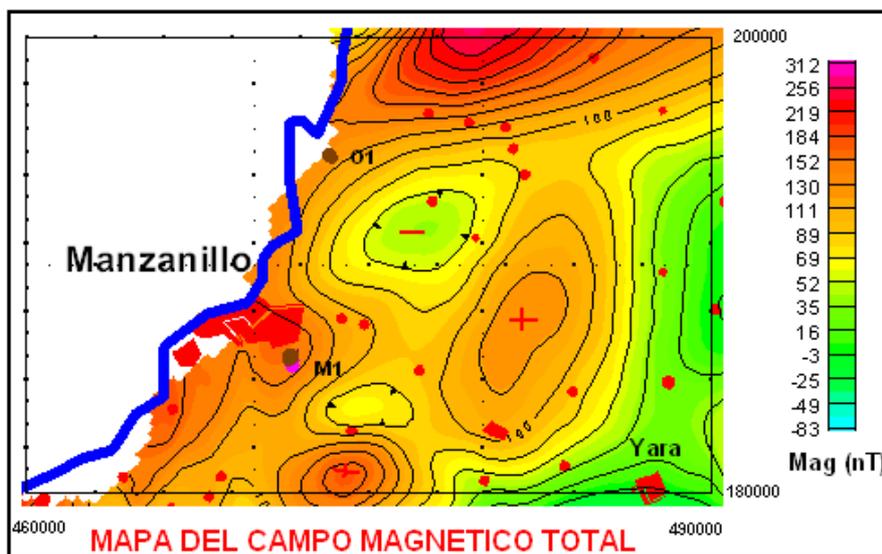


Fig. 15. Mapa del campo magnético total Escala 1:50 000

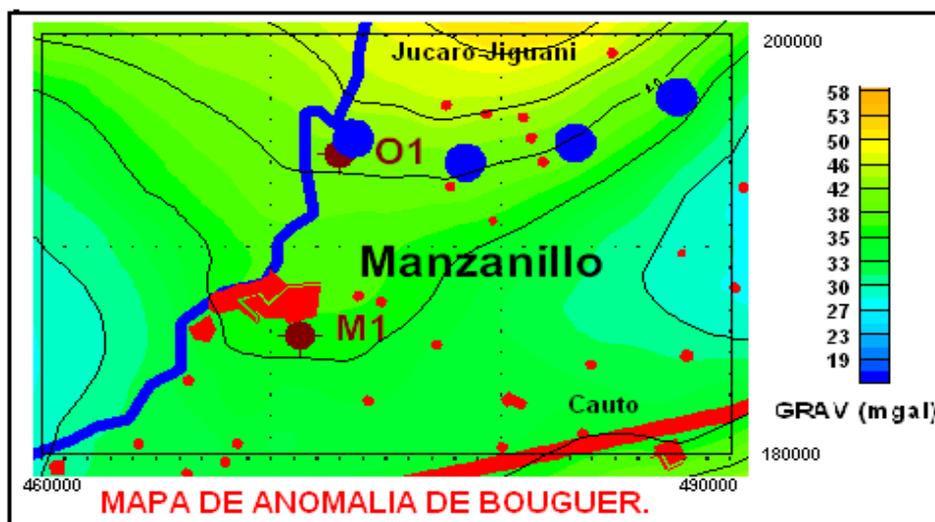


Fig. 16. Mapa de anomalía de Bouguer Escala 1:50 000

El mapa de interpretación por la convolución de Euler (cálculo de las fuentes geológicas magnéticas en profundidad), presentado en la Fig. 17, muestra que en los alrededores de la ciudad de Manzanillo, la potencia de los sedimentos disminuye, a diferencia de las zonas más al Norte y Noreste que ocupan gran profundidad hasta las fuentes magnéticas.

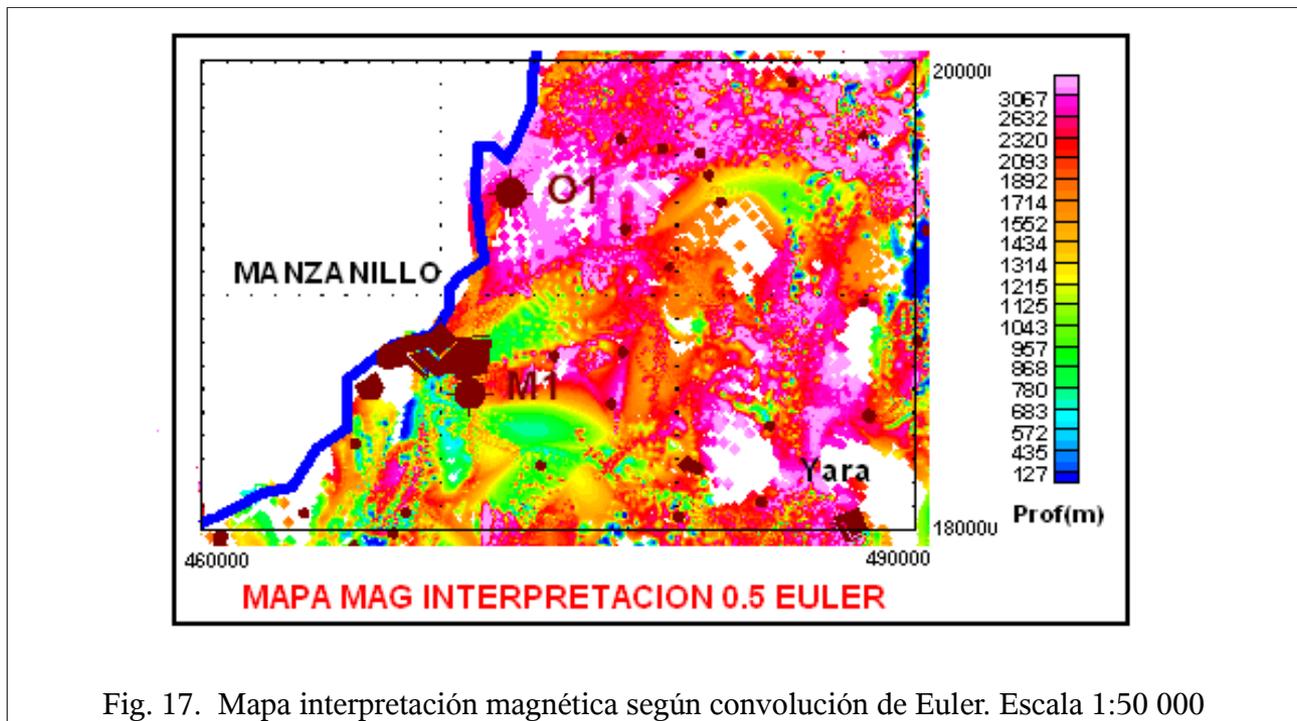


Fig. 17. Mapa interpretación magnética según convolución de Euler. Escala 1:50 000

Como conclusión para este sector, tenemos que la potencia de los sedimentos se mantiene, sólo más al suroeste disminuyen, siendo dichos sedimentos más calcáreos, mientras que la formación Manzanillo ocupa la zona cercana a la ciudad y constituye la fuente de las aguas subterráneas que la alimentan.

Sector Pilón

Caracterización geológica de la Ciudad de Pilón.

La región de Pilón se encuentra geográficamente situada en la parte occidental de la Sierra Maestra, la misma esta formada casi en su totalidad por secuencias volcánicas del arco de islas Paleógeno, es decir, rocas de origen volcánico formadas en condiciones submarinas de edad paleógena, donde predominan las rocas del grupo El Cobre, a la cual pertenece el miembro Pilón, entre otras. Estratigráficamente la ciudad está compuesta por las siguientes formaciones (Fig. 18):

- *Formación Jutía* (Fm. Jut.): PQ_4 , sedimentos palustres cuaternarios. Compuesta por sedimentos cuaternarios de depósitos palustres, con abundantes restos orgánicos, mangle y sedimentos terrígenos de lodo y arcilla. Desde el punto de vista ingeniero-geológico estos sedimentos poseen las propiedades físico - mecánicas muy desfavorables.

- *Formación Río Maya* (Fm. My): $N_2 - Q_1$. Neógeno - Cuaternario. Compuesta por calizas biohémicas dolomitizadas, arcillas e intercalaciones de conglomerados polimícticos.

Desde el punto de vista tectónico, las rocas de la región, como se ha mencionado reiteradamente por muchos autores, manifiestan los efectos de varias etapas de desarrollo con diferentes génesis, carácter y magnitud, por que se encuentran muy tectonizadas. Esto es característico de las rocas que forman el grupo El Cobre incluyendo al miembro Pilón.

En la actualidad existe un consenso generalizado en caracterizar a la Sierra Maestra como un gran anticlinorio del cual solo se conserva la mitad Norte como un monoclin al buzando suavemente hacia el Norte. Sin embargo, en el reconocimiento de campo se evidencian cambios bruscos o suaves del buzamiento de las rocas, sobre todo en el grupo Pilón, donde se observan con buzamientos muy pronunciados, en muchos casos verticales relacionados con una zona de fallas de

dirección Este–Oeste.

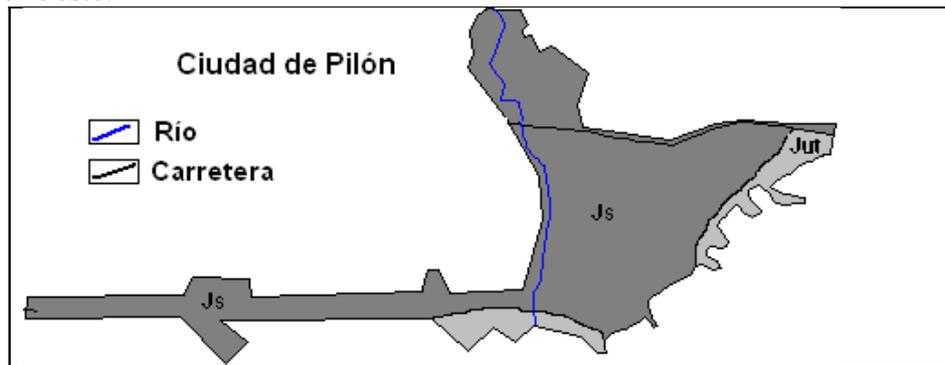


Fig. 18. Esquema geológico de la ciudad de Pilon.

Tipos de suelos predominantes en la ciudad.

Capa vegetal: Su espesor varía de 0,20 – 1,20 m.

1- Aluvio: compuesto por gravas mezcladas con arena y arcilla, no aparece en toda la zona.

2- Arcilla: de color carmelita con pequeños caracoles y grava de consistencia dura. Muy compacta.

El suelo predominante lo constituye la arcilla de consistencia dura y muy compacta. En la tabla 5 se presentan las propiedades físico mecánicas de los suelos. Por no poseer datos del número de golpes no fue posible estimar la velocidad de la onda S.

Tabla 7: Propiedades físico – mecánicas. G: peso específico, rf: densidad húmeda, rd: densidad seca, W; humedad natural, e: relación de vacío, S: saturación, LL: límite líquido, LP: límite plástico, IP: índice de plasticidad, IC: índice de consistencia, E: módulo de elasticidad, Ø: ángulo de rozamiento, C: cohesión, P: módulo de Poisson.

Suelo	G g/cm ³	rf g/cm ³	rd g/cm ³	W %	e	S %	LL %	LP %	IP %	IC	E Kg/cm ³	Ø	P Kg/cm ²	C
1	2.67	1.65	1.68	16	0.68	73	34	21	13	1.5	700	25	3.7	0.4
2	2.72	1.74	1.52	14	0.78	49	42	19	23	1.5	150	25	0.4	0.4

Perfiles Geológicos Esquemáticos.

Con el objetivo de profundizar el análisis de la geología superficial de la cuenca y su comportamiento en profundidad, se realizaron 2 perfiles geológicos esquemáticos desde diferentes focos de terremotos fuertes con parámetros bien analizados hasta la ciudad de Pilon (Fig. 19).

Para la realización e interpretación de los perfiles o esquemas geológicos y llegar a un consenso en el trazado de los contactos y las fallas fue necesario apoyarse en el Mapa Geológico de la República de Cuba a escala 1:500 000 (MINBAS, 1985) y el Léxico Estratigráfico (Trujillo y otros, 2005).

Las formaciones geológicas que son cortadas por los perfiles son las siguientes: Jaimanitas con espesores de hasta 10 m de profundidad, Cabo Cruz con espesores mayores de 200 m, El Cobre con espesores que oscilan entre 5000 y 6000 m, Manacal con espesores de 200 m y Pilon con espesores de 2000 m.

Interpretación geólogo-geofísica

Analizando los resultados de los datos magnéticos, podemos caracterizar las diferentes formaciones presentes en el corte, aunque en realidad son los paquetes rocosos de las series geológicas las que diferencian el campo magnético. Las isóneas de intensidades del campo magnético se distribuyen paralelamente de Este a Oeste, con pequeñas inflexiones provocadas por los procesos tectónicos.

En la Fig. 20 se señalan las zonas anómalas magnéticas, atendiendo a su grado de intensidad. La correlación de los campos físicos con los datos geológicos se explica según lo descrito por Golovkin et al. (1978). El léxico estratigráfico vigente agrupa tanto las Fm. Guamá y Uvero como

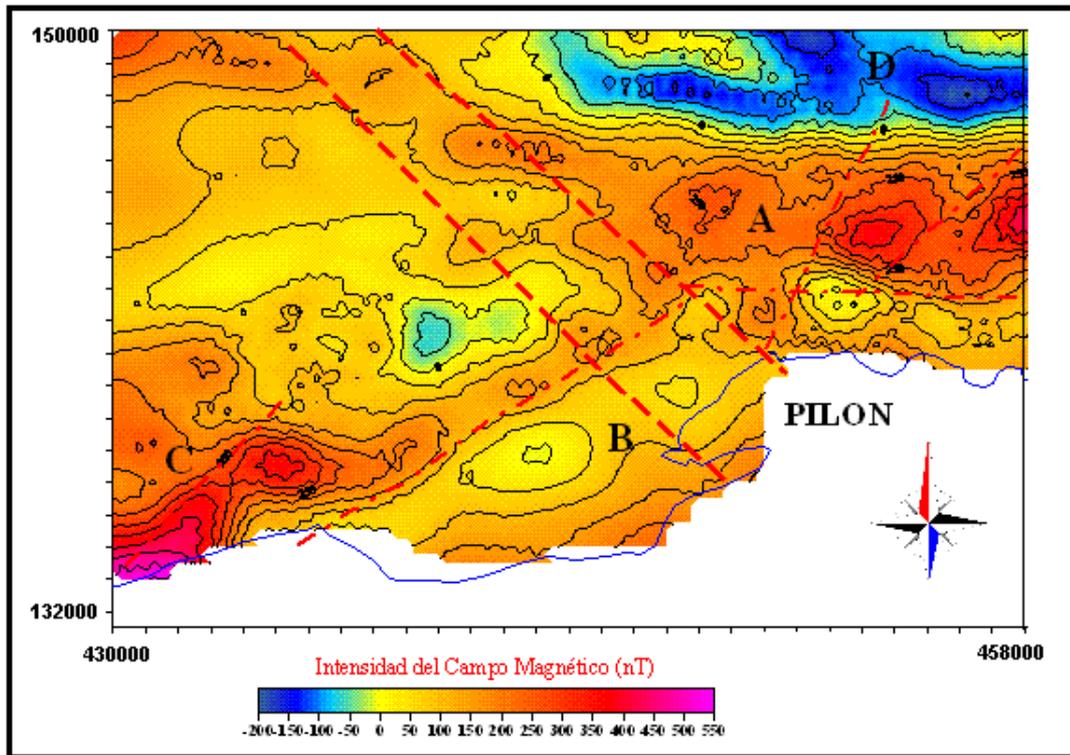


Fig. 20. Mapa del campo magnético total. Escala 1:50 000

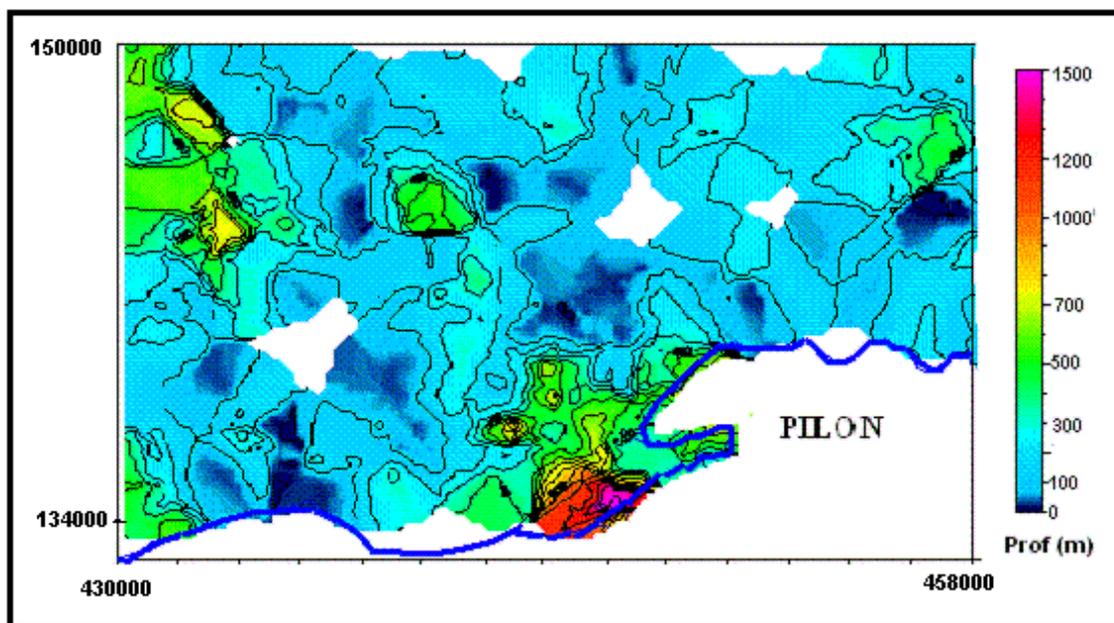


Fig.21. Mapa interpretación magnética según convolución de Euler.. Escala 1:50 000

Lo más interesante de este resultado es que desde el punto de vista estructural vemos una imagen de la cuenca Pilon que muestra la posibilidad de la existencia de un intrusivo en profundidad, cubierta por parte del Paleógeno y por las formaciones cuaternarias. La parte NE de esta imagen, que refleja una menor profundidad, pudiera estar enmascarada por la formación Guamá en su secuencia media, más magnética, lo que explicaría la no extensión de la mayor profundidad del objeto magnético. La

escala de intensidad señala donde las rocas magnéticas afloran, datos éstos muy bien correlacionados con los datos geológicos.

En la Fig. 22 se muestra la ubicación de los sondeos eléctricos verticales (SEV) y las líneas o modelos sintéticos geólogo-geofísicos. Presentamos solamente la línea WE (Fig. 23), que atraviesa todo el sector, la cual nos da una visión en extensión lateral del corte y de la intrusión salina por los bajos valores de resistividad. Parte del basamento esta compuesto por las rocas tobáceas, evidentemente por los bajos valores de resistividad (res) también con una fuerte mineralización salina.

Ya cercano a la población de Pílon se encuentran potencias mayores de 60m de una capa de sedimentos arcillosos y arcillo-arenosos. Esta línea, al igual que las demás, señala las diferentes capas o facies laterales; la complejidad del corte es evidente. En la misma aparecen dos discontinuidades eléctricas, que por su fuerte gradiente de resistividad, pudieran estar asociadas a la tectónica por debajo de estos sedimentos. En la propia línea se señalan las calas paramétricas; la cala C-6 muestra la correlación con el SEV, S-25.

Como conclusión, para este sector de Pílon, señalamos como elementos geológicos más llamativos, la potencia de sedimentos que pueden llegar hasta los 400m según datos magnéticos, además de la fuerte presencia en los cortes de la intrusión salina. El aporte de estos sedimentos está relacionado con las rocas tobáceas, tufitas, conglomerados del grupo El Cobre, en este caso particular, de las formaciones Pílon y Guamá, ambas del Eoceno Inferior.

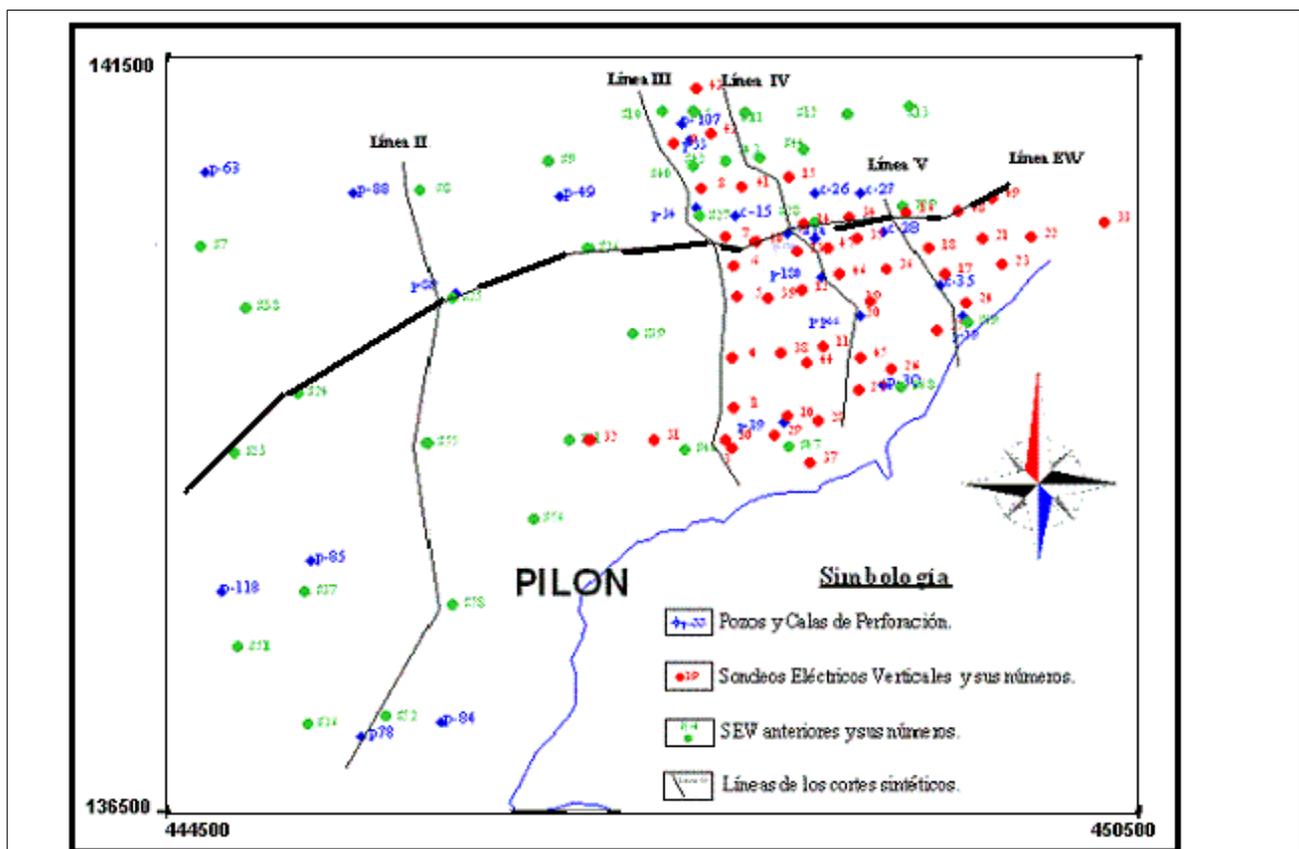
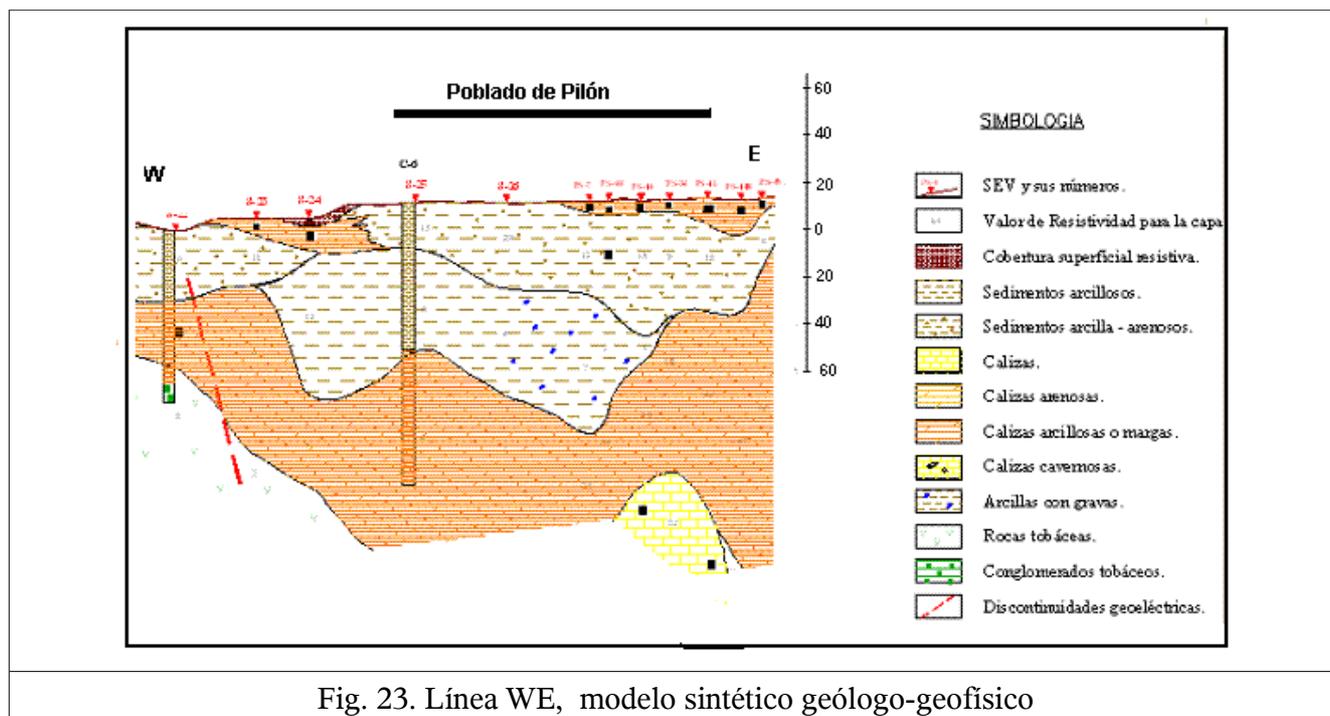


Fig. 22. Ubicación de los SEV y líneas geólogo-geofísicos de interpretación



Conclusiones:

- Se realizó una caracterización de la estructura geológica subyacente a las ciudades de Bayamo, Manzanillo y Pílon en dos escalas, una menos detallada donde se alcanzaron profundidades de hasta 1000 m, y otra más detallada donde se identificaron los suelos presentes en los primeros 20 m de profundidad.
- El suelo predominante en la ciudad de Bayamo es blando y está constituido por arcilla plástica, en ocasiones fisurada, de consistencia media a dura. En la ciudad de Manzanillo los suelos se encuentran entre duro y blando, predominando el suelo calizo con fragmentos de roca caliza, semicompacto a compacto. En la ciudad de Pílon el suelo es blando y predomina la arcilla de consistencia dura y muy compacta.
- Se determinó la existencia bajo Bayamo de paquetes de rocas carbonatadas y arcillosas de hasta 1000 m de potencia. En el caso de Manzanillo el espesor de los sedimentos es variable, aumentando de sur a norte, con valores entre 500 y 3000 m. Para Pílon la potencia de los sedimentos puede alcanzar 400 m.

Bibliografía

- AMBRASEYS, N.N.; SIMPSON, K.A.; BOMMER, J.J. (1996): Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, pp. 371-400.
- CALAIS, E.; LÉPINAY, B. (1990). A natural model of active transpressional tectonics: The en échelon structures of the Oriente deep along the northern Caribbean transcurrent plate boundary (Southern Cuban margin), *Rev. Inst. Fr. Pét.* 45, 147-160.
- CALAIS, E.; LÉPINAY, B.M. (1991): From transtension to transpression along the northern Caribbean plate boundary of Cuba: Implications for the Recent motion of the Caribbean plate. *Tectonophysics*, 186, pp. 329-350.
- CHUY, T.J. (1999): Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de Peligrosidad y Microzonación Sísmica. Tesis de opción de Grado de Doctor en Ciencias Geofísicas. Fondos del MES, CENAIIS e Instituto de Geofísica y Astronomía, 273pp.
- COBIELLA, J.L.; RODRIGUEZ, J. (1978). Algunos rasgos de la geología de Cuba Oriental.

- Revista Ciencias Técnicas, No. 3. pp. 7-21.
- FUMAL, T.E.; TINSLEY, J.C. (1982): Mapping shear-wave velocities of near-surface geologic materials. In: Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region. U.S. Geological Survey, Prof. Pap. 1360, Washington, 127-150.
- GOLOVKIN, L.; SVIRIDOV, M.; LÓPEZ, A.; SOJO, L. (1978): Informe sobre los resultados del levantamiento geológico a escala 1:100 000 realizado en la parte occidental del macizo montañoso de la Sierra Maestra. La Habana. Archivo de la Oficina nacional de Recursos Minerales, inédito, 155 pp.
- GUASCH, F.; AVICH, B. y ARANGO, E. (1993): Influencia de las condiciones ingenierogeológicas de la localidad de Pílon en la respuesta estructural de las edificaciones. Revista Geología y Minería.
- GUASCH, F.; ARANGO, E.; ZAPATA, J.; ESCOBAR, E.; HERNANDEZ, E.; ARTIMEZ, A.; VEGA, I.; y DIEZ, E. (2002): Monografía "Pílon, tierra que tiembla". Cuba, Editorial Academia, La Habana, 246 pp.
- MINBAS (1985): Mapa geológico de Cuba 1:500000. Programa: Trabajos Sismológicos. Investigaciones geológicas. CEN-Holguín.
- MORENO, B. (2003). The crustal structure of Cuba derived from receiver function analysis. *Journal of Seismology*, 7, pp. 359-375.
- NAGY, E. (1983): Contribución a la geología de Cuba Oriental. Instituto de Geología y Paleontología, Acc. Editorial Científico Técnica, La Habana, Cuba, 63 pp.
- OHTA, Y.; GOTO, N. (1978): Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes. *Earthquake Engng. And Struct. Dyn.*, 6, 167-187.
- OTERO, R.; PROL, J.L.; TENREYRO, R.; ARRIAZA, G.L. (1998). Características de la corteza terrestre de Cuba y su plataforma marina. *Minería y Geología*, 15, pp. 31-35.
- OTERO, R.; TENREYRO P. (1998): Secciones Geológicas - Geofísicas Regionales de Cuba. *Minería y Geología*.
- RIVERA Z. C. (2000): Microzonificación sísmica de la ciudad de Bayamo. En: Red de Estaciones Sismológicas en Cuba. Editorial Academia, La Habana, pp. 61-66.
- RIVERA, Z.; HERNÁNDEZ, E.; VÁZQUEZ, L. et al. (1998): Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Manzanillo. Escala 1:10 000. Informe. Fondos del CENAI, 32 pp.
- RIVERA, Z.C.; SLEJKO, D.; GARCIA, J.; PERUZZA, L.; REBEZ, A.; SANTULIN, M. (2004): Seismic hazard of the Bayamo region (eastern Cuba) considering local soil typologies. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, vol 45, No. 1-2, pp. 15-34.
- SEED, H. B.; ARANGO, I.; IDRIS, I. M. (1982): Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *J. Geotech. Eng. Div. ASCE* 109(3):458-82.
- TENREYRO, R.; LÓPEZ, J.G.; ECHEVARRÍA, G.; ALVAREZ, J.; SÁNCHEZ, J.R. (1994). Geologic evolution and structural geology of Cuba. Abstracts AAPG Annual Meeting, June 12- 15. Denver. Colorado.

Anexo 1. Parámetros de los diferentes tipos de suelo presentes en la región de estudio que fueron empleados en la clasificación reflejada en la Figura2

Formación Geológica	Descripción Geológica	g. str.	Amb96	Dah95	NEHRP	EC8	M62m	M62M	E&T85	cl.
bm = Bayamo	Arcilla, arena, areniscas y gravas polimícticas, con nódulos de calcita, geotita y fragmentos de hierro.	2	S	s	D	c	1.2	1.8	2.0	D2
br = Barrancas	Tufitas, areniscas vulcanimícticas y polimícticas, aleurolitas, arcillas, calizas con fragmentos de rocas volcánicas y tobas.	1	R	r	B	a	0.2	1.3	0.3	B1
cb = El Cobre	Rocas volcánicas y Vulcano-sedimentarias, lavas, tobas, tufitas, calizas, diques.	1	R	r	B	a	0.2	1.3	0.3	B1
cr = Charco Redondo	Calizas órgano detriticas con fósiles y brechas	1	R	r	B	a	0.2	1.3	1.2	B3
cu = Cauto	Arcillas, limos, arenas, gravas polimícticas y conglomerados.	2	S	s	D	c	1.0	1.6	2.0	D1
cy = Caney	Rocas volcánicas (alternancias de tobas, tufitas, calizas, lapilli y lavas)	1	R	r	B	a	0.2	1.3	0.3	B1
cz = Camazán	Caliza coralino-algaceas, calizas biodetríticas con intercalación de arcilla, marga y yeso ocasionalmente.	1	T	s	C	b	0.6	1.4	1.5	C
dt = Dátil	Fanglomerados polimícticos masivos	2	S	s	E	d	1.2	2.1	3.0	E1
mc = Micara	Aleurolitas, brechas, arenisca, arcillas masivas, caliza, marga, gravas, conglomerados y tobas.	1	R	r	B	a	0.2	1.3	0.8	B3
mz = Manzanillo	Calizas biodetríticas, arcilla, gravas y arenas de vulcanitas, margas y aleurolitas, fósiles.	2	T	s	C	b	0.6	1.4	1.5	C
pb = Puerto de Boniato	Calizas órgano-detriticas, con intercalación de margas y sílice	1	R	r	B	a	0.2	1.3	1.2	B3
pd = Pedernales	Conglomerados polimícticos cementados por clastos de diabasas, gabros y rocas ultramafitas.	2	R	r	B	a	0.2	1.3	1.2	B3
sl = San Luis	Areniscas polimícticas, aleurolitas, marga, arcillas, calizas, conglomerados polimícticos y arenosos. Diques y basaltos.	1	T	s	C	b	0.6	1.4	1.5	D1
tj = Tejas	Tobas, arenas tobaceas, diques andesíticos.	1	R	r	B	a	0.2	1.3	0.8	B2
yy = Yayal	Calizas micríticas, calcilitas, calcarenitas, intercalaciones de sílice con radiolarios, aleurolitas y areniscas.	2	T	s	C	b	0.6	1.4	1.5	C
As	Sedimentos aluviales, capa vegetal, bloques, gravas, arenas y arcillas.	2	S	s	E	d	1.7	2.8	3.0	E2
Bs	basaltos	1	R	r	A	a	0.0	0.0	0.0	A

g. str. = estructura geológica: 1 = Anticlinorium de la Sierra Maestra, 2 = Cuenca del Cauto;
Amb96 = clases acorde a Ambraseys et al. (1996): R = roca, D = suelo duro, S = suelo blando;
Dah95 = clases acorde a Dahle et al. (1995): r = roca, s = suelo;
NEHRP = clases y término multiplicativo acorde a NEHRP (BSSC, 2001); A = roca muy dura, B = roca, C = roca blanda, D = suelo duro, E = suelo blando
EC8 = clases acorde al Euro código (CEN, 2002); a = roca, b = suelo duro, c = suelo blando, c = suelo muy blando
M62m = mínimos incrementos de intensidad acorde a Medvedev (1962);
M62M = máximos incrementos de intensidad acorde a Medvedev (1962);
E&T85 = incrementos de intensidad acorde a Evernden and Thomson (1985);
cl. = clasificación usada en este estudio.

Anexo 3

Informe del resultado

Preparación de base computacional para el cálculo de sismogramas sintéticos y pruebas de los programas con los datos que se obtengan en el proyecto

Proyecto: Influencia de las características del suelo sobre los parámetros del movimiento del terreno durante terremotos en las ciudades de Bayamo, Manzanillo y Pilon

Programa: (909) Mejoramiento ambiental y desarrollo sostenible de la provincia Granma

Confeccionado por: José Leonardo Alvarez Gómez

Introducción

Este proyecto fue concebido en estrecha conexión con el proyecto internacional (UNESCO/IGCP – 487, ICTP Network NET-58) “Seismic microzoning in Latin America cities”, desarrollado en el período 2004-2008. En el mismo se perseguía el objetivo de estudiar los efectos de los terremotos en ciudades latinoamericanas ubicadas en cuencas sedimentarias [Barquisimeto (Venezuela), Lima (Perú), San José (Costa Rica) y Bayamo (Cuba)]. El proceso fue concebido en dos etapas diferentes. La parte más voluminosa de los cálculos, la correspondiente a los sismogramas sintéticos se realizaba en Trieste por acceso remoto, mientras que la microzonación sísmica se debía realizar in situ, donde cada país participante procesaba sus datos de forma independiente. Los trabajos nuestros en el proyecto internacional se dividieron entre las diversas tareas de este proyecto.

a) Cálculo de sismogramas sintéticos

Al ser realizados los cálculos por acceso remoto a la red de computadoras del ICTP en Trieste nuestra contribución fundamental fue en la automatización del proceso para que el tiempo de conexión fuese mínimo y los procesos se ejecutaran “fuera de línea”. Por otra parte, dada la poca o ninguna experiencia de los participantes de América Latina en este tipo de actividad, una parte importante del tiempo se dedicó a la preparación de instrucciones y la celebración de consultas. En el momento que se escribe este informe, ya el cálculo de sismogramas sintéticos de todos los participantes está casi terminado. Se celebraron diversas reuniones del proyecto internacional en que buena parte del tiempo fue empleado en actividades de instrucción.

Durante los dos primeros años de dicho proyecto se preparó un manual de instrucciones para el cálculo de sismogramas sintéticos en el que se indicaba que programas debían ejecutarse y en que orden. En el presente proyecto dicho manual fue enriquecido con la incorporación de numerosas explicaciones sobre la preparación de los datos iniciales y la solución de problemas típicos en los cálculos, se añadieron otros programas para facilitar la selección de datos para la microzonación sísmica, y sobre todo se perfeccionó la automatización del proceso de cálculo. En el anexo 1 se presenta una selección de tópicos del manual en su versión final.

En estos momentos, para el cálculo de sismogramas sintéticos en un perfil sólo es necesario transferir algunos ficheros de datos al ICTP, ejecutar un programa y enviar a ejecutar “fuera de línea” un fichero de procesamiento por lotes (“script” en Linux). Se irán recibiendo por correo electrónico mensajes indicando la marcha del proceso, y al final, todos los resultados se sitúan en el directorio donde se iniciaron los procesos. Estos resultados constan de ficheros ASCII con los sismogramas sintéticos y otros parámetros y un conjunto elevado de gráficos PostScript que facilitan su interpretación.

Los programas añadidos en este proyecto al paquete inicial son:

escenario – selección de datos del movimiento del terreno a partir de los sismogramas sintéticos en suelo. Prepara tablas de parámetros de parámetros del movimiento del terreno en suelo, lo que es útil para construir escenarios de terremotos específicos.

tab_cor – realiza un análisis de correlación entre las diferentes variables del movimiento del terreno que se extraen de los sismogramas sintéticos

Los programas modificados en este proyecto al paquete inicial son:

pfdg - prepara todos los ficheros de datos necesarios para el cálculo a partir de los datos iniciales básicos. En este programa fue donde se trabajó para incluirle la escritura de los “scripts” necesarios para ejecutar el proceso de cálculo “fuera de línea”

rcheck – obtención de los espectros de respuesta y selección de parámetros del movimiento del terreno a partir de los sismogramas sintéticos. Se añadió la preparación de ficheros de datos para el uso por parte de los programas “escenario” y “tab_cor”, así como los que serían usados para clasificación de funciones usando el programa P4

pcondfd – calcula los espectros elásticos energéticos a partir de los sismogramas sintéticos. Se añadió la preparación de ficheros de datos para el uso por parte de los programas “escenario” y “tab_cor”, así como los que serían usados para clasificación de funciones usando el programa P4

newplots – programa que prepara ficheros de datos para su graficado usando el sistema GMT. En el transcurso del proyecto se fue modificando paulatinamente para incluir cada vez más gráficos.

fdplota.pl – “script” en perl para preparar los gráficos usando el sistema GMT. En el transcurso del proyecto se fue modificando para incluir los mismos que se incluían en el programa “newplots”.

b) Microzonación sísmica

La concepción inicial de esta actividad en el proyecto estaba basada en la selección de funciones del movimiento del terreno con respecto a la frecuencia a partir de los sismogramas sintéticos considerando cocientes suelo/roca para ser clasificadas por algoritmos lógico-combinatorios con el programa P4, pasando a la microzonación sísmica por el análisis conjunto de esta información y los datos geólogo-tectónico-estructurales. No obstante, en dicha concepción el uso de otros parámetros del movimiento del terreno estaba bastante limitada. Es por ello que se pasó a un enfoque más amplio que incluye el uso de representaciones espaciales de cocientes suelo/roca de diversos parámetros univaluados del movimiento del terreno.

El trabajo fundamental en esta tarea estuvo dedicado a la preparación de datos para la microzonación sísmica. Los datos que se obtienen al calcular los sismogramas sintéticos corresponden a puntos ubicados a lo largo de perfiles, por tanto pueden ser geo-referenciados. Cuando el parámetro que se extrae de los sismogramas sintéticos es puntual, como por ejemplo algún valor máximo, el mismo puede ser representado en un mapa. Por tanto, cuando se considera el conjunto de perfiles que se calculan en una ciudad, dicho parámetro puede ser usado para preparar mapas de isolíneas que llevan aparejado un proceso de interpolación en redes regulares, la cual puede ser realizada por diferentes métodos. Como el sistema seleccionado para graficado (el GMT) tiene incluidos los métodos de interpolación de triangulación de Delaunay, de trazado de superficie de mínima curvatura y del método del vecino más cercano, los mismos fueron escogidos para ello. Por otra parte, los resultados de la clasificación de curvas también pueden ser objeto de representación gráfica (valor del grupo en que se clasifica cada punto).

Se escribieron numerosos programas para la selección de datos, preparación de las matrices iniciales para el programa P4, unión de datos de diferente perfiles y graficado. En el anexo 2 se muestra el manual donde se explica el uso de los mismos.

La microzonación sísmica debe ser el resultado del análisis complejo de toda la información obtenida de los sismogramas sintéticos y apoyada sobre la información geólogo-geofísica-estructural. En concreto en este punto se dispondrá de

- mapas para 24 escenarios de efectos en suelo (con los correspondientes ficheros de

- interpolación en celdas por 3 métodos diferentes)
- mapas para 56 cocientes suelo/roca de parámetros del movimientos del terreno (con los correspondientes ficheros de interpolación en celdas por 3 métodos diferentes)
- mapas para 24 cocientes suelo/roca de razones H/V (con los correspondientes ficheros de interpolación en celdas por 3 métodos diferentes)
- matrices y resultados de clasificación para 24 funciones $f(x,f)$
- un análisis de correlación (paramétrico y no paramétrico) de todas las combinaciones de cocientes suelo/roca

Un listado genérico de estos ficheros se presenta en el anexo 3.

El análisis complejo pasa por la eliminación de la información redundante usando los resultados del análisis de correlación entre variables, la representación gráfica de los parámetros del movimiento del terreno (cocientes suelo/roca) seleccionados y de los resultados de la clasificación de las funciones en frecuencia del movimiento del terreno (cocientes suelo/roca) también seleccionados, y en el caso de que se haya usado una sólo fuente sísmica para todos los perfiles de los mapas de parámetros del movimiento del terreno en suelo. En ese análisis complejo se puede usar un sistema de información geográfica (SIG), pero no es imprescindible.

Pruebas de los programas

Los programas para el cálculo de sismogramas sintéticos fueron probados por los participantes del proyecto internacional (UNESCO/IGCP – 487, ICTP Network NET-58) “Seismic microzoning in Latin America cities” a lo largo del desarrollo de esta tarea (Jamaica, Costa Rica, Perú, Venezuela y Cuba). Durante la misma se realizaron numerosas modificaciones para mejorar su desempeño. Los programas para el procesamiento de sismogramas sintéticos con vistas a realizar una microzonación sísmica, que inicialmente no estaban incluidos en el proyecto fueron probados en su totalidad con datos de Cuba (Bayamo) y parcialmente con datos de Venezuela. Estos deben continuar utilizándose por los participantes de Venezuela y Perú en el proyecto internacional mencionado.

Conclusiones

Se prepararon algunos programas y se modificaron otros para el cálculo “fuera de línea” de sismogramas sintéticos en el ICTP. En estos momentos el proceso está completamente automatizado.

Se preparó un paquete de programas para el procesamiento de los datos sobre el movimiento del terreno extraídos de los sismogramas sintéticos con vistas a una microzonación sísmica. Todos los resultados se presentan en mapas y ficheros ASCII que o pueden ser objeto de un procesamiento complejo con ayuda (o sin ella) de un SIG.

Se realizaron pruebas satisfactorias de los programas para el cálculo de sismogramas sintéticos con datos de Costa Rica, Venezuela, Jamaica, Perú y Cuba. Los programas para preparar datos para una microzonación sísmica fueron probados con datos de Venezuela y Cuba y se deben continuar utilizando en Venezuela y Perú.

Anexo 1

Fragmentos del manual preparado para calcular sismogramas sintéticos en la red de computadoras del ICTP

Programs in Linux based computers of ICTP

The specific programs for main calculations were written and compiled in FORTRAN 77. The plotting scripts, written mainly in perl, use the GNUPLOT, version 4.0 and the GMT, version 4.0. Also there are some optional programs that need IDL plotting system. You will need to add to your ICTP “.cshrc” file the lines:

```
setenv PATH /afs/ictp.trieste.it/public/l/leoalvar/SMLAC/binLinux:$PATH
setenv GMTHOME /afs/ictp.trieste.it/public/l/leoalvar/SMLAC/bin386/GMT4.0
set path=(/afs/ictp.trieste.it/public/l/leoalvar/SMLAC/bin386/GMT4.0/bin
                                                $path)
```

and optionally, only if IDL programs will be used for other plots (not described in this manual), the following:

```
source /afs/ictp.trieste.it/public/l/leoalvar/SMLAC/bin386/idl/idl/bin
                                                /idl_setup
setenv IDL_PATH /afs/ictp.trieste.it/public/l/leoalvar/SMLAC/SOURCEidl:
               /afs/ictp.trieste.it/public/l/leoalvar/SMLAC/bin386/idl/idl/lib
```

These settings are different from the ones presented in previous versions of this manual. The reason of the change is that ICTP will remove the disk were the programs were placed before.

Foreword

In the following, the process of computing synthetic seismograms for a 2D laterally heterogeneous model is described. In the example, the name of the model is assumed to be “n_o_m”, so all file names refer to that. Change the model name to whatever fits your needs if you run your own test. All the file names will change accordingly.

Before accepting the results obtained with the hybrid technique for the laterally heterogeneous model, a test is necessary where synthetic seismograms are computed for a laterally homogeneous model with the modal summation and with the hybrid techniques. If an acceptable fit is obtained using the two techniques for the laterally homogeneous model, the results obtained with the hybrid technique for the laterally heterogeneous model can be generally trusted.

Creation of the profile file using Linux and Windows programs

1) For the creation of the profile description file, first of all, you have to digitize it. The rules for digitization are simple:

- each area in profile have to be digitized in a closed contour (first point identical to last one) and saved in an independent file
- two neighbour areas has to be digitized by using the same points in the contact between them
- for the digitalization can be used any program (a GIS, a CAD type program, etc.)
- if you use a Windows program for digitizing, be sure of converting the output files to UNIX format

At the end you will have “n” files with the closing contours describing the different areas present in your profile. In general is preferred to name these files as “.bln” (program messages refer to them in this way), but you can give any name to them.

2) Use program “**bln2pof.out**” for creating the input .pof file. This program uses an input file “bln2pof.inp” were you have to give the data about the physical properties (density, V_P , V_S , Q_P , Q_S) and the name of the digitized contour for each area. The last version of the program also plots the model in three variants: with colour filled areas, with colour lines and with colour lines and the points defining them. These plots can be used for checking the model. The program also creates the input file plcontour.inp for the plcontour.pro IDL program. The output “.pof” file is compatible with DigiMac format and can be visualised using this Mac program.

3) You can use IDL program “plcontour.pro” for plotting the digitized profile. It uses the input file plcontour.inp and your contour files. In plcontour.inp you define the name of the output “.ps” file. If you are working in Linux this step is unnecessary because the last version of program “bln2pof” does the plot.

4) Check carefully the output “.ps” file. It is preferred to see it in the display in order that the image be zoomed as desired. If you don't find any error in the plot you can continue.

Notes:

- In ICTP network you can access to program bln2pof and to IDL program plcontour.pro. For the first case you have to run “bln2pof.out” and for the second there is a two step procedure. First, you have to run “idl” and then your prompt is changed to “IDL>”; in that prompt you have to write “plcontour.pro” and the program runs. After running, you should return to your original prompt by “exit”.
- There is possible to obtain Windows versions of program bln2pof and plcontour.pro. Last version of bln2pof makes use of gnuplot for plotting the graphs and is not tested in Windows yet. A demo version of IDL for Windows is also available. Contact L. Alvarez for them.
- You may desire an additional control of the quality of your .pof files. For this it is recommended to use the “DigiMac” program for Macintosh. Contact F. Vaccari for that. Program bln2pof creates an output compatible with DigiMac output files that can be visualized by it.
- You can plot the model in “.pof” format by using the program **plotpof.out**. It only requires as input a file “plotpof.inp” with the list of files to be plotted.

Digitizing of profiles in the case of use of topography

For considering topography in your profile it is mandatory to add an air layer that touches the free surface and extends to a little bit more than the maximum topographic height. This layer should be the first in .pof file. All the physical properties of this layer should be set as 0.

When digitizing, the value $y=0$ can be fixed in any point from the beginning of profiles, and the sign conveying is positive downwards and negative upwards. Program pfdg9 adjust the input to the proper values.

Computation of synthetic seismograms

Several programs must be used to generate the seismograms with the modal summation and the finite differences techniques. Program **pfdg9m.out** exists to ease up the whole process. It generates several scripts and all the input files required by those scripts at runtime.

Files required:

n_o_s.spl	Modes for Love waves
n_o_s.spr	Modes for Rayleigh waves
n_o_p.pof	Polygons describing the lateral heterogeneities
pfdg9.par	Parameters describing the modelling

Note: “n_o_s” means “name of structure” as defined in part I of this manual, while “n_o_p” means “name of profile”.

Steps:

The 2D synthetic seismograms calculation has 3 initial steps:

1) To edit file pfdg9.par to describe the modelling:

- The model size cannot exceed the dimensions specified (4000 x 600 along x and z respectively)
- Define all the parameters relative to the modal summation part
- To begin with, let all the parameter relative to the finite differences model be 0. Program pfdg9m.out will try to guess a reasonable choice for all of them. After running pfdg9m.out you'll have to check the choices made by it, and fix those parameters that doesn't fit your needs (usually, shorten the proposed duration of the time series and adjust the treatment of geometrical spreading, or force a different grid step and/or grid multiplying factor).
- In this file you have to put your e-mail address for receiving information when you process your

data by remote access at ICTP

2) To run program **pdfg9m.out**

This program prepares all the scripts and input files required to generate the synthetic seismograms, extracting ground motion from them and plotting typical graphics.

To check the output on screen and pdfg9.pri file; to adjust the parameters in pdfg9.par and to repeat step 1 until you're satisfied with the model definition.

3) Run **pdfg9m.out** more than once, adjusting the parameters and checking the output on screen and pdfg9.pri file until a proper model is obtained. To check the model run the Perl script:

fdplotm.pl

A postscript file named profile_name.model.1.ps will be generated

Programs used in synthetic seismograms' calculations

1) Love waves: **syl** (MS seismograms), **sylvdv** (MS 2 columns of seismograms), **finit56** (FD seismograms 1D and 2D)

2) Rayleigh waves: **syrr** (MS seismograms), **syndv** (MS 2 columns of seismograms), **finray53** (FD seismograms 1D and 2D)

2) **rcheckm1.out** - It computes spectral amplifications, prepares input files for plotting diverse graphics and calculates some single valued ratios 2D/1D of ground motion parameters. It also writes input files for programs "pcondfd", "newplots1" and some ".rat" files with real data of ratios 2D/1D of ground motion parameters for program "tab_cor".

3) **pcondfd.out** - It calculates of the energy input ratio, writes the input files for plotting it, and prepares some input files for program "newplots1".

Input file for program "pcondfd":

pcond.par

It is written by program rcheckm1

Parameter files for plotting:

fdplota.par.eir parameter file to plot EI ratio

fdplota.par.eir_lg parameter file to plot EI ratio (log)

4) **newplots1.out** - It reads the ground?.inp files, writes a set of input files for plotting ground motion parameters along profile and some ".rat" files with real data of ratios 2D/1D of ground motion parameters.

Input files for program "newplots1":

ground1.inp A matrix containing the data about maximum ground motion and Arias intensities for the 3 components and both 1D and 2D seismogram (generated by pcondfd.out)

ground2.inp A list of files with data about energy input ratio (generated by pcondfd.out)

ground3.inp A list of files with data about response spectra (generated by rcheckm1.out)

ground4.inp A simple file with epicentral distance to each receiver in the two cases: (tra,rad) and ver (generated by rcheckm1.out)

ground5.inp A list of files with data about response spectra ratio (generated by rcheckm1.out)

ground6.inp A list of files with data about energy input ratio maxima (generated by pcondfd.out)

ground7.inp A table with data about ratio 2D/1D of response spectra quotient H/V (generated by rcheckm1.out)

5) **tab_cor.out** - It makes a correlation analysis between several ground motion ratio 2D/1D variables

Input to tab_cor:

File tabcor.inp and several files .rat created by programs rcheck1 and newplots1

Output of tab_cor:

One file n_o_m.cor with the correlation analysis

6) **escenario.out** - It selects information of a 2D earthquake scenario. It uses as input several files "*.rat" created by previous programs and write results in the file n_o_m.esce.

Computation of synthetic seismograms by remote access

The 2D process can take a long time for many users, and it is necessary to do it by using the ICTP rules for long jobs. In this case, the process should be executed in a batch queue, and you can't control the different parts as was described above. The program "pfdg9m" also creates a script named job2D with all the needed command line instructions, that guides the process from data preparation to results storage, including notification by e-mail of the process advance. As the calculation of synthetic seismograms and graphics preparation requires a huge amount of disk storage space, the process is run out of your home partition in ICTP, and the obtained graphs (and the other results) are put in files compressed with programs "bzip2" and "zip" that can be easily decompressed in any Linux platform; bzip2 program was selected for bigger files because the compressed files are sensibly shorter than the obtained with other programs (some Windows programs can decompress them also – e.g., the free Izarc or 7-zip). They are placed back in your home partition and should be transferred for their posterior analysis at home institutions and for writing reports or papers.

The new "pfdg9m.out" program creates several executable files. **job2D** and similars execute all the operations described in the previous section (except printing of graphs), informing you by email how your calculations are going. They will send 4 (or less depending on variant) messages by email: "job1 finished" with a listing of the execution time of the programs of SH waves synthetic seismograms calculations, "job2 finished" with an equivalent content for P-SV waves, "profile name_of_file_pof calculated, see file ps2D.tar.bz2" with a listing of the prepared graphs and "copy and delete results from your_working_directory" with the list of compressed files copied there. You can run the 32 bit version on LSF system, but is better to use a powerful AMD computer at 64 bits. The programs are (job2D64, job2Da64, job2Db64, job2Dl64, job2Dr64). They do the same process of the 32 bit versions (job2D, job2Da, job2Db, job2Dl, job2Dr), using as working directory the /scratch in the amd64 computer, instead of the one used by LSF runs.

First of all, you have to enter in ICTP computer network by ssh:

```
ssh your_login_at_ICTP@ssh1.ictp.it
```

(also ssh.ictp.it or ssh2.ictp.it)

As the access to the "amd64-sand" computer is limited to group "geophys", all of us have now the group "geophys" as a secondary group. You can verify this with the command:

```
id your_login_name
```

then, for working in this machine, you have to put temporarily this group as primary, which is done with the command:

```
newgrp geophys
```

After this you have to log in "amd64-sand" computer, which is done by:

```
ssh amd64-sand
```

Once logged in, your job is sent to background execution through:

```
nohup ./job2D64 ... &
```

and the program is in execution. Now you can control the process by the command:

```
ps ux
```

that will indicate not only the time spent since the beginning of job2D64, but the consecutive running of all the programs called by this script.

Your job will be running in the working directory

/scratch/SMLAC-name_e_mail_in_pfdg9.par,

where "name_e_mail_in_pfdg9.par" is the user part of the e_mail that you give in your "pfdg9.par" file, which is deleted once the process is completed. If you want to run several profiles at the same time, put different e-mail directions in each one, even if these directions do not exist.

Running our jobs in this computer has the advantages:

- the programs run much faster
- the /scratch directory has enough space for our work
- the computer normally is not overcharged of work

How the job2D works

- a) In the file “pfdg9.par” you give the e-mail address for sending you the email reports. These address can be modified, and even you can put a non existing e-mail. Program “pfdg9m” only requires that it has a “[name@host](#)” format. It creates with this address a name of a working directory “SMLAC-name”. The scrip job2D creates this directory at the scratch directory. If at the beginning of your job this directory exist, it will be deleted. It is important to take into account that, if you want to sent to run several scripts job2D, in each one you have to put a different e-mail address.
- b) All the files that are in your initial directory are copied to the scratch directory and then they are compressed in your initial directory under a name “n_o_m.initial_data.zip”. The control is transferred to the working directory where calculations are done.
- c) When the calculation of synthetic seismograms for SH waves finished, there are copied to the initial directory the results plus the corresponding .pri files with indication about run of programs “syl”, “sylvdv” and “finit”. The files transferred are “n_o_m.l1d.bz2”, “n_o_m.l2d.bz2”. “n_o_m.syl.bz2” and “n_o_m.snapshots_L.tar.bz2”.
- c) When the calculation of synthetic seismograms for P-SV waves finished, there are copied to the initial directory the results plus the corresponding .pri files with indication about run of programs “syr”, “syndv” and “finray”. The files transferred are “n_o_m.r1d.bz2”, “n_o_m.r2d.bz2”. “n_o_m.syr.bz2” and “n_o_m.snapshots_R.tar.bz2”.
- d) The last process is the extraction of ground motion data and graphics plotting. After conclusion there are copied to the initial directory the files “n_o_m.ps2D.tar.bz2”, “n_o_m.pri.tar.bz2”, “n_o_m.p.extra.tar.bz2”, “n_o_m.correl.zip” and “n_o_m..dat_P4.zip”
- e) The working directory is deleted.

For doing the process you need:

- to create a new directory, that cans be inside the 1D one (is not recommendable to work in the same directory used for 1D calculations, because during execution all files are compressed in a single one); the directory structure more convenient is when it is used an independent directory for each profile)
- to copy in this directory the files “n_o_s.spl” and “n_o_s.spr” obtained in the 1D calculations
- to copy in this directory the files “pfdg9.par” with the specifications for the finite differences model and “n_o_p.pof” with the description of the profile, that you have to prepare before
- to execute “ **pfdg9m.out**” the times it will be necessary until you have properly adjusted all the parameters
- send job2D to LSF queue processing (see above explanation). If you run directly the script job2D, the machine will process your data, but if any of the programs called by the script remains more than 15 minutes in execution, the system will cancel it and you will not obtain good results by the whole process.
- to check in your initial directory if partial results are been saved; at the end of the job you should have 14 compressed files plus several execution reports “*.pri” files; additionally you should receive the email notifications about the execution of the different steps of “job2D” to the e-mail address given by you in the pfdg9.par file, and an additional message to your ICTP account with a summary of the complete execution (the display messages plus lsf run statistics), but it doesn't work always
- if the process finished satisfactorily, to transfer the graphics, that appears in “n_o_m.ps2D.tar.bz2”
- to analyse them; first to check the seismograms, second, to check the identity test (see below), and then, if you are satisfied with the obtained results, to transfer and save the other compressed files
- if you detected some problems in your results, to run again the whole process, making the necessary changes in file pfdg9.par

Take into account the volume of generated files, that for a profile of about 10 km length may be around 50 MB of compressed information --> transfer them for analysis on your PC

WARNINGS:

The possibility of running the hole process by using only some instructions do not means that you don't need to made some checking before the major calculations. In particular, you have to revise carefully the output messages on screen of program "pfdg9m.out", and make by hand in its input file "pfdg9.par" the necessary adjustments.

Before considering that you have your final results you have to be sure that your data passed satisfactorily the identity test (see below). Perhaps you will need to run again your 2D job more than once.

How the job2Da, job2Db, job2Dl and job2Dr work

The scripts "job2Da" and "job2Db" do part of the work done by job2D. They are used when LSF system is not working properly and job2D cancels before finishing. "job2Da" is used when job2D was cancelled after the SH waves synthetic seismograms had been calculated and "job2Db" is used when job2D was cancelled after the P-SV waves synthetic seismograms had been calculated. If you are in one of this cases you have to decompress in your initial directory the file "n_o_m.initial_data.zip" and run by LSF the corresponding script. Be sure that in this directory are present the compressed files with synthetic seismograms already calculated. The script creates a working directory /home/nfs3/SMLAC-name in the scratch disk (home/nfs3) in the same way that "job2D" does. Then, it copies all the files in the working directory, decompress the synthetic seismograms files and continues the process as "job2D" does.

The scripts "job2Dl" and "job2Dr" are used for calculating only the synthetic seismograms of SH and P-SV respectively. They are executed in the same way that "job2D"

Graphics generated in a complete run of the 2D calculations

.hvl1df.1.ps	relations T/V, RV and H/V for 1D FD 5% damping [f(ω ,x)]	displacement
.hvl1dm.1.ps	relations T/V, RV and H/V for 1D FD at 5% damping displacement [f(ω ,x)]	
.hva2d.1.ps	relations T/V, RV and H/V for 2D at 5% damping [f(ω ,x)]	acceleration
.hvd2d.1.ps	relations T/V, RV and H/V for 2D at 5% damping [f(ω ,x)]	displacement
.hvpv2d.1.ps	relations T/V, RV and H/V for 2D at 5% damping velocity [f(ω ,x)]	pseudo
.hvv2d.1.ps	relations T/V, RV and H/V for 2D at 5% damping [f(ω ,x)]	velocity
.model.1.ps	1 page plot of the model alone	
.hva2d1d.1.ps	2D/1D ratio of the RSP quotient H/V for acceleration	
.hvv2d1d.1.ps	2D/1D ratio of the RSP quotient H/V for velocity	
.hvd2d1d.1.ps	2D/1D ratio of the RSP quotient H/V for displacement	
.hvpv2d1d.1.ps	2D/1D ratio of the RSP quotient H/V for pseudo velocity.plots1dL.1.ps seismograms 1D transverse	
.plots1dR.1.ps	displacement, upper plot MS, lower plot FD 1D seismograms 1D radial velocity, upper plot MS, lower plot FD 1D	
.plots1dZ.1.ps	seismograms 1D vertical velocity, upper plot MS, lower plot FD 1D	
.plots2dL.1.ps	seismograms 2D transverse displacement, velocity and acceleration	
.plots2dR.1.ps	seismograms 2D radial displacement, velocity and acceleration	
.plots2dZ.1.ps	seismograms 2D vertical displacement, velocity and acceleration	
.rspldf.1.ps	response spectra 1D FD transverse, vertical and radial at 5% damping [f(ω ,x)]	
.rspldm.1.ps	response spectra 1D MS transverse, vertical and radial at 5%	

```

damping [f( $\omega$ ,x)]
.rsp2d.1.ps      response spectra 2D transverse, vertical and radial at 5%
                 damping [f( $\omega$ ,x)]
.rsr1d.1.ps      response spectra ratio MS/1D_FD transverse, vertical and
                 radial at 5% damping [f( $\omega$ ,x)]
.rsr2d.1.ps      response spectra ratio 2D/1D_FD transverse,vertical and
                 radial at 5% damping for acceleration (SA) [f( $\omega$ ,x)]
.rsr2d.1.ps      response spectra ratio 2D/1D_FD transverse,vertical and
                 radial at 5% damping for displacement (SD) [f( $\omega$ ,x)]
.rsrpv2d.1.ps    response spectra ratio 2D/1D_FD transverse,vertical and
                 radial at 5% damping for pseudo velocity (PSV)[f( $\omega$ ,x)]
.rsrv2d.1.ps     response spectra ratio 2D/1D_FD transverse,vertical and
                 radial at 5% damping for velocity (SV) [f( $\omega$ ,x)]
.test1dr.peak.ps amax percent difference 1D_FD/MS classic 1D test, radial
                 velocity scaled for magnitude
.test1dr.upeak.ps maximum amplitude original unscaled unfiltered percent
                 difference 1D_FD/MS for radial velocity
.test1dt.peak.ps amax percent difference 1D_FD/MS - classic 1D test,
                 transverse displacement scaled for magnitude
.test1dt.upeak.ps maximum amplitude original unscaled unfiltered percent
                 difference 1D_FD/MS for transverse displacement
.test1dz.peak.ps amax percent difference 1D_FD/MS - classic 1D test, vertical
                 velocity scaled for magnitude
.test1dz.upeak.ps maximum amplitude original unscaled unfiltered percent
                 difference 1D_FD/MS for vertical velocity
f0.eir.1.ps      energy input spectra ratio [f( $\omega$ ,x)]
f0.lg_eir.1.ps   energy input spectra ratio [f( $\omega$ ,x)](logarithmic scale)
.aeir.fdp1ota.1.ps area under energy input spectra ratio 2D/1D [f(x)]
.amaxr.fdp1ota.1.ps maximum acceleration ratio 2D/1D [f(x)]
.dmaxr.fdp1ota.1.ps maximum displacement ratio 2D/1D [f(x)]
.vmaxr.fdp1ota.1.ps maximum velocity ratio 2D/1D [f(x)]
.epar.fdp1ota.1.ps effective peak acceleration ratio 2D/1D [f(x)]
.iariasr.fdp1ota.1.ps Arias intensity ratio 2D/1D [f(x)]
.eirmax.fdp1ota.1.ps maximum energy input spectra ratio 2D/1D, all
                 components {T(x),f(x)}
.lg_eirmax.fdp1ota.1.ps maximum energy input spectra ratio 2D/1D, all
                 components {T(x),f(x)} (logarithmic scale)
.rsrAmax.fdp1ota.1.ps maximum acceleration response spectra ratio 2D/1D,
                 all components {T(x),f(x)}
.rsrDmax.fdp1ota.1.ps maximum displacement response spectra ratio 2D/1D,
                 all components {T(x),f(x)}
.rsrPSVmax.fdp1ota.1.ps maximum pseudo velocity response spectra ratio
                 2D/1D, all components {T(x),f(x)}
.rsrVmax.fdp1ota.1.ps maximum velocity response spectra ratio 2D/1D, all
                 components {T(x),f(x)}
.acrsmaxrad.fdp1ota.1.ps acceleration response spectra maximum for radial
                 component, 2D and 1D {T(x),f(x)}
.acrsmaxtra.fdp1ota.1.ps acceleration response spectra maximum for
                 transverse component, 2D and 1D {T(x),f(x)}
.acrsmaxver.fdp1ota.1.ps acceleration response spectra maximum for vertical
                 component, 2D and 1D {T(x),f(x)}
.dirsmaxrad.fdp1ota.1.ps displacement response spectra maximum for radial
                 component, 2D and 1D {T(x),f(x)}
.dirsmaxtra.fdp1ota.1.ps displacement response spectra maximum for
                 transverse component, 2D and 1D {T(x),f(x)}
.dirsmaxver.fdp1ota.1.ps vertical response spectra maximum for transverse
                 component, 2D and 1D {T(x),f(x)}
.psvrsmaxrad.fdp1ota.1.ps pseudo velocity response spectra maximum for radial
                 component, 2D and 1D {T(x),f(x)}
.psvrsmaxtra.fdp1ota.1.ps pseudo velocity response spectra maximum for
                 transverse component, 2D and 1D {T(x),f(x)}
.psvrsmaxver.fdp1ota.1.ps pseudo velocity response spectra maximum for
                 vertical component, 2D and 1D {T(x),f(x)}

```

```
.versmaxrad.fdplota.1.ps    velocity response spectra maximum for radial
                             component, 2D and 1D {T(x),f(x)}
.versmaxtra.fdplota.1.ps    velocity response spectra maximum for transverse
                             component, 2D and 1D {T(x),f(x)}
.versmaxver.fdplota.1.ps    velocity response spectra maximum for vertical
                             component, 2D and 1D {T(x),f(x)}
.eimaxrad.fdplota.1.ps      energy input maximum for radial component, 2D and
                             1D {T(x),f(x)}
.eimaxtra.fdplota.1.ps      energy input maximum for transverse component, 2D
                             and 1D {T(x),f(x)}
.eimaxver.fdplota.1.ps      energy input maximum for vertical component, 2D and
                             1D {T(x),f(x)}
```

All the names begin with “n_o_m”

Content of the files placed in your working directory after a LSF run

```
.initial_data.zip           content of the directory after running pfdg9m.out
.extra.tar.bz2              intermediate input files with information extracted from
                             synthetic seismograms
.l1d.bz2                    1D Love waves FD seismograms
.l2d.bz2                    2D Love waves FD seismograms
.pri.tar.bz2                files .pri issued by the different programs
.ps2D.tar.bz2              the graphics in PostScript format
.r1d.bz2                    1D Rayleigh waves FD seismograms
.r2d.bz2                    2D Rayleigh waves FD seismograms
.snapshots_L.tar.bz2       snapshots of the different FD runs (1D and 2D, Love
                             waves
.snapshots_R.tar.bz2       snapshots of the different FD runs (1D and 2D, Rayleigh
                             waves
.syl.bz2                    Love waves MS seismograms
.syr.bz2                    Rayleigh waves MS seismograms
.correl.zip                 input data and results of correlation analysis between
                             single valued ratios 2D/1D of selected ground motion
                             parameters plus a file with 2D scenario data
.dat_p4.zip                 selected functions GM(f) along profiles to be processed
                             for using program p4 for classification
```

All the names begin with “n_o_m”

The identity test in hybrid (MS+FD) calculations

The correct use of a FD scheme requires that you make a test on “identity” of results. This test consist in the calculation of synthetic seismograms in the surface both by modal summation analytical procedure for the regional model at points in the region in which the 2D model will be embedded, and the same calculation using the hybrid technique, when the 2D embedded model is identical to the regional model. The objective of this is to guarantee that the FD numerical procedure do not introduce numerical errors in the calculated seismograms for the 2D model. This is done automatically by the script that you run (job2D of the procedure described in this manual) and you obtain 9 graphics to control the results of the test:

- n_o_m.plots1dL.1.ps, n_o_m.plots1dR.1.ps and n_o_m.plots1dZ.1.ps with the composite plot model + seismograms FD1D + seismograms MS for transverse displacement, radial velocity and vertical velocity
- n_o_m.test1dr.peak.ps, n_o_m.test1dt.peak.ps and n_o_m.test1dz.peak.ps with amax percent difference 1D_FD/MS – classic 1D test for radial velocity, vertical velocity and transverse displacement scaled for magnitude
- n_o_m.test1dr.upeak.ps, n_o_m.test1dt.upeak.ps and n_o_m.test1dz.upeak.ps with maximum amplitude original unscaled unfiltered percent difference 1D_FD/MS for radial velocity, vertical velocity and transverse displacement.

There is a difference in the input ground motion for making the test in Love and Rayleigh waves. Love waves uses displacement and Rayleigh waves velocity. This is doubt to the fact that the input

data for the programs of the FD scheme (the 2 columns of seismograms at the beginning of the profile) correspond to displacement for Love waves and to velocity for Rayleigh waves (this is a characteristic of the computer codes). Then, the identity of outputs have to be seek avoiding the use of signals that have passed a process of numerical integration or derivation.

The visual inspection of the graphics “n_o_m.plots1dL.1.ps”, “n_o_m.plots1dR.1.ps” and “n_o_m.p.plots1dZ.1.ps” should evidence the cases in which the waveforms are different. This is not common, but should occur. The other graphics show the maximum difference in amplitude of the signals between the MS and FD1D cases. From the experience of SAND group, a value greater than 6% is not acceptable in these plots. There are another 5 files that can give an idea about how close are the 1D MS and the 1D FD calculations. The first two correspond to simple response spectra (5% damping) for acceleration calculated for 1D MS and 1D FD seismograms (n_o_m.rsp1dm.1.ps, n_o_m.rsp1df.1.ps), while other two correspond to the response spectra (5% damping) for acceleration quotients (T/V, R/V and H/V) calculated for 1D MS and 1D FD seismograms (n_o_m.hv1dm.1.ps, n_o_m.hv1df.1.ps). In both cases the graphics should looks very similar between them. The other file corresponds to response spectra ratio MS/(FD 1D) calculated also with 5% damping for acceleration (n_o_m.rsr1df.ps). It should reflect values close to 1.

What to do in the case in which you obtain wrong results?

1) Program *pfdg9m* fails

Sometimes, when you run *npfdg9m*, you don't obtain a normal result, in the screen you see the message “STOP 25 statement executed” and in *pfdg9.pri* file appears the message “program interrupted ! the change of gridspacing (nfb) should be in a homogeneous region”. It is due to the fact that the change of depth interval between receivers in the column (they should be placed more closest between them until the depth of the 2D model) occurs on an interface of the 1D model. You can solve the problem by putting a depth not coinciding with interfaces of the 1D model in the line 34 of the *pfdg9.par* file: “Depth where step along z changes (0=auto)”

2) You do not obtain the 60 graphics

If your file *n_o_m.ps2.tar.bz2* do not contain the expected 60 graphics, it means that one or more programs failed. The first action is to revise the message that the LSF system have to be sent to you. Then you will be able to discriminate if it was a system error or a program error. In the first case resend your job. In the last case, you should analyse the outputs messages of each program (*.pri) that are in the file *n_o_m.pri.tar.bz2*, following the order in which they are called in “*jod2D*”. Once determined which programs failed, you should modified the particular data passed as input for them in file *pfdg9.par*.

3) The 1D test is rejected

In case of rejection of 1D identity test you have to turn back to the *pfdg9.par* file where you fix the parameters of the FD calculations. It is assumed that you have carefully checked the 1D part of the process, and the Love and Rayleigh spectra that your using are right. There are several points that you may control:

- The use of geometrical spreading (lines 39 and 40 of *pfdg9.par* file) may have a big influence on amplitudes. Putting 0 or 1 in both of them you will obtain different results. If the graph of “peak” or “upeak” type shows a high increase from left to right, probably it means that for this wave you didn't use the geometrical spreading and it is necessary to put it in calculations. By the other hand, if you see a high decrease in that plots from left to right it probably means that for this wave you used the geometrical spreading and it is not necessary to put it in calculations
- The depth of the model (line 31) may be a source of problems. Put a bigger value that the one fixed automatically by program *pfdg9m.out*.

4) *The run of finit56b breaks*

Sometimes, in cases of a 2D model not differing so much of the 1D model, you can obtain in pfdg9.pri, if you let all the options controlling model as automatic, a printout of the kind:

```
Sampling along x.....: 0.28300 km
Sampling along z.....: 0.28300 km
Dz change at (km from free surface):: 31.41300 km (nfb(2D)=112, nfb(1D)=112)
Number of layers in reference model.: 83
Multiplying factor for dz (nf).....: 1
Sampling along z below heterogeneity: 0.28300 km
Dimension along x.....: 129.04800 km ( 457 grid points)
Dimension along z.....: 30.56400 km ( 109 grid points)
INFO - NFB is deeper than the model, and will not be used
```

Note that in this case the dimension along Z of the model is less that the depth at which sampling Dz should change. It means that you will create input seismograms columns of equally spaced seismograms of only one block. If you continue, program finit56b will stop by error, because it needs at least two blocks of equally spaced seismograms with different spacing each one (the shallower more closest one to each other). For solving this, fix in the pfdg9.par the parameters:

```
160      FD model depth (km) (0=auto)
0        Grid spacing (km) (0=auto)
2        dz multiplier (0=auto)
81       Depth where step along z changes (0=auto)
```

in which case it is recommended that the “FD model depth” be fixed about twice the depth of the 2D embedded model, and the “Depth where step along z changes” should be fixed close to the maximum depth of the 2D model.

5) *Calculation in long profiles fails*

Programs finit56 and finray53 exist in several versions. That only differs one from each other in the maximum dimension in time and space that they allow to process. Begin working with finit56a.out and finray53b.out. These versions are less memory consuming and your job will run faster. But sometimes long profiles requires to use the versions finit56b.out and finray53c.out. You can decide what to use if you control the output of pfdg9m (pfdg9.pri). Put 4000 in the line that controls horizontal distance (line 26, Max number of grid points along X) and check what is the real number of grid points that your profile requires. If this number is less or equal to 2800 you can use finit56a.out and finray53b.out, but it is greater than this value you should use finit56b.out and finray53c.out (lines 64 and 65 of pfdg9.par).

6) *The run of finit56 or finray53 stops with a message “stop 444”*

This problem is presented when you are calculating seismograms with long duration. Program pfdg9 normally estimate the seismogram duration in excess. This is not a problem when you are calculating profiles close to the epicenter, but, if you are apart from it, your seismograms will be longer and the times that calculate pfdg9.out are very big. If you pass this information to the job, probably your FD calculations were break with message stop 444, and a explanation about that the program can calculate so long in time signals (the remainder part of the job will be wrong). You can see that in the .finit1D.pri, .finit2D.pri, .finray1D.pri and .finray2D.pri. First of all, use finit56b.out and finray53c.out (lines 64 and 65 of pfdg9.par). They can manager the longer in time as possible seismograms. Then control how much time you really need (see 2D seismograms) and reduce the time in accordance (lines 41-44 in file pfdg9.par). Check if with this reduced time you can use programs finit56a.out and finray53b.out

Anexo 2

Fragmentos del manual de procesamiento de los sismogramas para preparar los datos para una microzonación sísmica

During a run of jobs job2D, job2D64, job2Db and job2D64b it is created a compressed (profile.dat_P4.zip) file with a lot of information about frequency dependent ground motion (GM) parameters and another file (profile.correl.zip) with information about 2D GM parameters, 2D/1D GM parameters ratio and a non parametric correlation analysis of the last ones. The frequency dependent information can be used for preparing curves for classification, the 2D and 2D/1D information are suitable of space plotting [all of the files are of the kind (x,y,z)], while the correlation analysis is useful to pick up the variables that are really independent from the GM parameters. In present document are discussed all these possibilities. Plotting of results is done mainly online with GMT or gnuplot, but it is given the possibility of preparing some plots using a demo version of IDL.

a) Classification of frequency dependent ground motion parameters

Here are explained how to prepare the curves to classify with Windows programs P4, the main features of this program and how to process the results of the classification with seismic microzoning purposes.

cu2ma.f - It reads a set of files with GM data corresponding to sites in a profile and the data for calculating the coordinates of its points. Then, it prepares the initial matrices for PROGNOSIS (version P4 for Windows) for making a logical-combinatorial classification. During runtime it creates 2 subdirectories ("ma" and "ps") where it places the results.

The program can control sampling of data, both in sites and in frequency, and smooth curves with a moving average window. Additionally given the data about profile and sites' separation it fixes the coordinates of each site.

The initial data is of 2 kinds:

- 1) File cu2ma.inp that you have to prepare with data about your profiles and classification options
- 2) The files contained in the "name_of_profile.dat_P4.zip" file generated in a run of "job2D". They are files with eir, rsr and other data listed in the "fdplota.*" files (included in the same compressed file) that have to be converted to ".ma" files. They have the name "profile.code". The "fdplota" names are given in a subroutine of the proper program
- 3) A file "P4inp.txt" with a listing of codes corresponding to the different input files.

Output:

- 1) "name_of_file.ma" files that contain the initial matrices for PROGNOSIS, where name_of_file is the name of the corresponding input file with data (that is included in "name_of_profile.dat_P4.zip"), in the subdirectory "ma". The matrices has as variables the values of frequency or period, and as objects the values of the field (GM parameter).
- 2) "name_of_file.ps" files with a plot of the initial and smoothed and curves in the subdirectory "ps". Plots are done with "gnuplot"
- 3) "name_of_file.estad" files in subdirectory "est". They contain statistics for each variable (extremes, average, median, absolute first moment, standard deviation, variance, skewness and kurtosis)

The process is profile-dependent, and at this stage you can obtain only individual input matrices for classification by profile. If you want to classify the data for all the profile, once you finish the calculation of the matrices for all the profiles you have to join similar data matrices by using the program "join_ma". In this case is mandatory to use the same value of sampling in frequency for all the profiles.

Warning: In this process, the presence of dots (.) in names of files is conserved. But take into account that you can not use this names for classifying the curves with P4, because it is a Windows programs and it do not accept dots in names except the one that separate name from extension.

join_ma - It reads the input matrices for classification and join them in only one. It requires that all

the matrices are formed for the same range of values of frequency (x coordinates). If no, it stops and prints a warning message.

Input data:

- 1) File 'join_ma.inp' with list of files profiles which “.ma” files should be joined
- 2) File 'P4inp.txt' with the list of codes characterizing the different matrices (the same for all the profiles)
- 3) Files '.ma' to be joined for all the profiles

Output:

1. Files 'JOIN_code.ma' with all the information from initial files for the same “code”. This file has no intermediate dots ('.') into the name and can be used directly to classify with Windows program P4.
2. Files "JOIN_code.estad" files in subdirectory “est”. They contain statistics for each variable (extremes, average, median, absolute first moment, standard deviation, variance, skewness and kurtosis)

Program makes an alert when the total number of sites is greater than 350, because present version of program P4 (number 10) fails when the number of sites is about 400 due to limitations of the graphical representation that it uses. If that is the case, you have to reduce the total number of sites, by sampling, removing of profiles in the run, or manually deleting sites from the resulting '.ma' file. In new versions of program P4, this problem should be solved.

Classification with program P4

The program P4 in its present version (P4r10.exe) is able to classify until 400 curves. It uses as input the files 'name.ma' generated by programs 'cu2ma' and 'join_ma'. It does not accept dots in 'name'. Normally, outputs of cu2ma should contain dots in 'name'; then, if you want to classify these outputs you have to rename them. Program 'join_ma' gives outputs without these intermediate dots. The output of a classification program is in 'name.htx'.

Program P4 of course run in Windows, but you can run it in Linux using

wine “path”/P4r10.exe

(“wine” is present in all Linux distributions). If you run P4 in Linux it is tested that accepts input files in UNIX format, but the outputs are in DOS format. Nevertheless these output can be used as inputs for the other programs of this package without format conversion.

plotclas - Once you have run P4 and saved your results in an '.htx' file, you can run this program to pass to a graphical representation of results. It uses as inputs the input and output of a run of P4 program ('.ma' and '.htx'). You have to give interactively what is called "name of the problem" (=‘prob’), which is the part of the name of P4 files before the '.ma', and the program searches for the corresponding data files

Inputs:

- 1) Name of the problem given interactively: "prob"
- 2) Name of a contour file for GMT plotting of results
- 3) Diameter of sites symbols in the plot'

program searches for additional files:

- 4) Initial matrix for Prognosis : "prob.ma"
- 5) Results of classification : "prob.HTX"

The outputs have fixed names, formed from 'prob', and are used as inputs of 2 IDL programs: ('plmap1' and 'pclamu')

Outputs:

- 1) prob_post.dat - coordinates of site and number of group in which it was classified
- 2) prob_punt.dat - coordinates of site and its ordinal number in initial matrix
- 3) probMpost.dat - modification of file prob_post after the on-line subdivision of some groups, which constitutes a revised classification by other criteria.

These files are used to prepare some maps of input and output distribution with idl program 'plmap1'

- 4) probC.idl - average curve for each group
- 5) prob(1:5)Gnnn.idl - where nnn is the number of the group, one file per group.

6) probM.idl - modification of file probC.idl after the on-line subdivision of some groups, which constitutes a revised classification by other criteria

These files are for plotted with idl program 'pclammu'

7) pcmu.inp - input file for plotting with IDL program 'pclammu'

8) pclas.pri - information about compilation

9) fdtriangul.par - input for online plotting of a map with groups distribution using perl script "fdtriangul.pl"

10) prob.P4.ps - a plot of group number classification on a map

The program have the option of groups' subdivision, which may be useful when you classify using the connected components algorithm of P4. In this case you have to edit the file 'pcmu.inp' for adjusting the total number of graphics to plot (line 4). If instead of groups' subdivision you need groups' joining, you have to use program 'joingroup'.

joingroup - In process of classification you may obtain a bigger quantity of groups as you desire to process on, or perhaps you obtain a lot of groups with little elements. As microzoning is a process of generalization, you may be interested in joining groups that in the process of classification resulted separated. The criteria for joining is at individual consideration, and may be due to geophysical, geological or geographical considerations and so on.

It uses an input file 'join.inp'

The outputs are:

pcmu.inp - input file for plotting curves with idl program 'pclammu'. You have to edit this file for placing the real number of files to plot (line 4)

probG###.idl - files with curves corresponding to new groups formed, when ### is a consecutive number after the last of the original groups numeration made by 'plotclas'

probMJpost.dat - modification of initial 'probMpost.dat' file after joining groups

probCJ.idl - modification of 'probC.idl' (of the 'plotclass' run) file after joining groups

fdtriangul.par - input for online plotting of a map with groups distribution using perl script "fdtriangul.pl"

probMJpost.dat.ps - a plot of the numbers of groups in the final version

General procedure for classification:

- ◆ Run 'cu2ma' for creating input files for P4 program from the data calculated in a job2D run, contained in 'profile.dat_P4.zip' file, in order to add coordinates of the sites, to sample and smooth in frequency and, if necessary, to sample sites.
- ◆ Once it has been done for all the profiles, take the decision about which curves you will use for classification with microzoning purposes
- ◆ Join all the initial matrices for one kind of curve using 'join_ma'
- ◆ Run 'plotclas' without groups' subdivision and plot the results using idl programs 'plmap1' and 'pclammu'
- ◆ Analyse the results and take the decision of groups subdivision or joining. It is a good help to analyse together the plots of curves for groups and the map of sites' distribution.
- ◆ For subdivision rerun 'plotclass' and for joining run 'joingroup'. Follow this order because 'plotclas' uses the initial data ('.htx') from classification, while 'joingroup' uses as input the results of 'plotclas'
- ◆ Plot the results

b) 2D plotting of GM parameters

In file "profile.correl.zip" the GM data is presented in several files in the form of tables as function of site number along profile.

Mapesce – It generates (x,y,z) data for plotting from the tables

Input: "mapesce.par"

- one (x,y,z) file for each column of the tables processed:

48 files with 2D GM data, placed in directory "2D"

54 files with 2D/1D ratio of GM data, placed in directory "GMrat"

24 files with 2D/1D ratios of H/V relations, placed in directory “HVrat”

These output files have the name “profile.code.dat”, where “code” is formed in relation to the data contents.

- a file with the list of codes used in the different cases, placed in the corresponding directory (“GM.txt”, “Gmrat.txt”, “HVrat.txt”)

joinmap – It joins (x,y,z) files. Place the “.dat” files created by directory for all profiles in one directory, and add the common “.txt” file. It means that you have to form the three directories (“2D”, “Gmrat”, “HVrat”) each of one containing the “.dat” files obtained for all profiles (“profile.code.dat”). The program will create a set of files “all.code.dat” according to the data included in the corresponding file (“GM.txt”, “Gmrat.txt”, “HVrat.txt”). It has as input data the file joinmap.par. The first part of this files are the input for defining maps preparation with the “fdtriangul.pl” perl script (see above). The program creates an input for this script (“fdtriangul.par.code”) for each one of the joined “all.code.dat”. The list of profiles should finish without blank lines below (if it is not done with this care, program will stop).

fdtriangul.pl - A perl script for plotting (x,y,z) files. The GMT programming tool allow to process data for making different kinds of plots, including maps with a multiplicity of geographical projections. In the case of seismic microzoning, due to scale it is convenient to use planar coordinates, then the basic unit is the meter (m) and if you want to plot geographical accidents you should provide them in a file of the kind (x,y) - (bayamo.xy in the joinmap.par example). GMT includes several tens of programs that have to be called in command line, while the parameters that they used should be passed as arguments in this command line. It is facilitated by the use of perl programming. Between these programs there are several that allows to create a regular grid from unequally spaced observation data points. The script “fdtriangul.pl” creates 4 maps and 3 data files for each input “all.code.dat” or a map for each “JOIN_code.dat”:

code.XY.ps – a plot of the study area with sites where GM parameters have been calculated

code.DT.ps – a plot of the input data in a regular grid obtained by a Delaunay triangulation procedure

code.DT.xyz – an ASCII file with the result of gridding with the Delaunay triangulation procedure. Points with no data are filled with the value 1.10141e+38 as it is done by SURFER for Windows.

code.MC.xyz – an ASCII file with the result of gridding with a plot of the input data in a regular grid obtained with the minimum curvature interpolation procedure

code.MC.ps – the minimum curvature interpolation procedure

code.NN.ps – a plot of the input data in a regular grid obtained by a nearest neighbor interpolation procedure

code.NN.xyz – an ASCII file with the result of gridding with the nearest neighbor interpolation procedure. Points with no data are filled with the value 1.10141e+38 as it is done by SURFER for Windows.

code.estad – an ASCII file with main statistical characteristics of Z component (GM parameter) of input file

In file “joinmap.par” you should give the basic parameters for interpolation. Try several values using only one “all.code.dat” file, and then extent your selection to all the desired files.

JOIN_code.dat.P4.ps – a plot of the study area with sites used in classification

In file “join.inp” you should give the name of a contour file to use in this plot and the dimension of the numbers of groups to be placed in the map.

For running “fdtriangul” script you should issue the command
fdtriangul.pl fdtriangul.par.code

It is used both for scenario and P4 cases

In this script there are used 2 auxiliary programs:

cambiaXY – It changes the format of the file with coordinates (x,y) of the position of sites to the required by GMT program “pstext”

cambiaNaN – It changes the value assigned to the grid points without information from default

“NaN” to the one used by SURFER for Windows program: 1.70141+e38

estadigra – It calculates the general statistics for Z component of input files (extremes, average, median, absolute first moment, standard deviation, variance, skewness and kurtosis)

General procedure for scenario studies:

- ◆ Run 'mapesce' for selecting GM data from 'profile.correl.zip' file and to add coordinates of the sites for each profile. It will place the results in 3 directories GMrat, HVrat and 2D in dependence of the kind of data. Process 2D directory only for equivalent earthquakes. Do not join profiles calculated with earthquakes of different magnitudes or at different distances.
- ◆ Join the files of the same kind for profiles using the program “joinmap”. It not only join the files, but creates the input data for gridding and plotting all the GM data and a script (joinmap.job) for do this process (type sh joinmap.job)

c) Parametric and non-parametric correlation analysis

In a run of a profile by job2D a parametric and non-parametric correlation analysis is done for all the variables contained in the files with 2D/1D ratio of GM parameters. The result of this analysis is printed in the files “*.cor” included in each “profile.correl.zip” compressed file. The name of the variables in file “ground7.rat.cor” are not printed correctly and has to be corrected by running program “cambiaTAB”.

In each file you will see the values of correlation coefficients with confidence and other related measures, obtained by different methods. You have to use this information in the following way:

1. Determine which variables are statistically independent and drop from analysis all the redundant variables. For example, it is common than Amax, Vmax, Dmax and I_{arias} be strongly correlated. In that case, you should use only one of them; select the one that you consider that will be more useful for the final users of the microzoning. It means that, at the end of this analysis from the maps that you have plotted before it has sense to use only a fraction
2. Perform this analysis for all the components (radial, transverse and vertical) and try to compatibilize the results of all of them. Then add the results of the analysis of the H/V ratios and and you will have the selection for one profile.
3. Repeat the analysis for all the profiles and compatibilize the results. Then you will have a selection of GM parameters to be used in seismic microzoning.

Although the correlation analysis is done for single GM parameters, their results may be useful also for selecting which functions $f(x,f)$ that has been processed for classification will be useful for seismic microzoning.

There are some programs that may help in the preparation of the data for the analysis:

cambiaTAB - It changes the names of the variables in the file ground7.rat.cor that are written incorrectly in the original file. The output is the same “ground7.rat.cor” file. Run always this program once you have unzipped the file “profile.correl.zip”.

uneTABcomp – It joins all the correlation analysis results for a profile in a single file. This program is called by 'uneTABpcomp “name of profile”' in the same directory where you unzipped the file “profile.correl.zip”. It searches for all the “.cor” files and joins them table by table. The result is a file named “profile.rat.cor”. The use of this program allows to make together the items 1 and 2 of the paragraph “Parametric ...”. It is very important to run program cambiaTAB before.

uneTABperf - It joins the correlation analysis results for all the profiles in a single file. In the input file “une.inp” you have to put the list of files “profile.rat.cor” for all the profiles. It joins those files table by table. The result is a file named “totalTAB.cor”. The use of this program allows to make together all the items of the paragraph “Parametric ...”, but the resulting file is very big.

BorraVAR – It deletes selected variables from files with correlation results. It deletes variables from files of the format “profile.rat.cor” and “totalTAB.cor”, that are specified in the input “borraVAR.inp:

The output is a file of the same format, which name is formed by adding a “.mod” code before the “.cor”, that at the end has a list of deleted variables. This program may help in the analysis of the correlation results.

d) automatic run of the most of the programs

microMapP4 – It generates scripts for automatic run of classification, 2D plotting processes and correlation analysis. The process of scenario plotting requires little intervention. You have only to select the proper values for the parameters of the “fdtriangul.par” file. Then, they are passed by input file joinmap.par and program joinmap creates the particular input file for each GM variable. This is not the case of the classification, when you have to interact with program P4, and the decisions should be different from one GM function to other. Then the automation of the first case can be done completely, while for the second case only partially.

This is done by program microMapP4. For using this program you have to:

- place in a directory the files profile.correl.zip and profile.dat_P4.zip for all the profiles
- create the files joinmap.par (program joinmap) and join_ma.inp (program join_ma) that will control the process and put them in the same directory
- create the input files mapesce.par.profile (program mapesce) and cu2ma.par.profile (program cu2ma) for all the profiles given in joinmap.par and join_ma.inp and put them in the same directory
- place in this directory also the file with contour to be plotted inside the working area

The program reads the files joinmap.par and join_ma.inp (may not be equal, you can do the selection of profiles that you want), then it checks for the presence of files mapesce.par.profile and cu2ma.par.profile. If they are present, program creates 3 scripts for processing the data:

cre_mapsES – for 2D scenario

cre_mapsP4 – for classification with P4

creaMaps – both

By running cre_mapsP4 you will obtain the input matrices for classification with P4. In the directory P4/ma it places the single matrices by profile while in the directory P4/matP4 it places the joined ones. In the directories P4/profile/dat_p4/ps it places the plotting of input not sampled curves with the sampled ones.

By running cre_mapsES you will obtain the input files for GMT plotting of a 2D scenario and the corresponding plots and data files for each joined GM data file in directories correl/esc2D, correl/escGM and correl/escHV. Take into account that all the files “code.XY.ps” are equal, because they correspond to site distribution, that is the same for all parameters.

WARNING: Take into account that the plots placed in directory correl/esc2D correspond to GM data extracted from 2D seismograms only. They have sense only in the case that all profiles correspond to the same scenario, i.e., the same earthquake at the same distance.

Additionally it runs in each profile the programs “cambiaTAB” and “uneTABcomp”, places the results for all profiles in the directory correl/cor and then it runs the program “uneTABperf”.

Anexo 3

Listado de los parámetros que son usados para la microzonación sísmica (fragmentos del manual de procesamiento de los sismogramas para preparar los datos para una microzonación sísmica)

a) Files with information about frequency dependent ground motion parameters [functions (f,x)]

profile.hva2d1d – acceleration H/V ratio 2D/1D
 profile.hvd2d1d – displacement H/V ratio 2D/1D
 profile.hvpv2d1d – pseudo velocity H/V ratio 2D/1D
 profile.hvv2d1d – velocity H/V ratio 2D/1D
 profile.r2d.rsra – radial response spectral ratio 2D/1D for acceleration
 profile.r2d.rsrd – radial response spectral ratio 2D/1D for displacement
 profile.r2d.rsrpv – radial response spectral ratio 2D/1D for pseudo velocity
 profile.r2d.rsrv – radial response spectral ratio 2D/1D for velocity
 profile.t2d.rsra – transverse response spectral ratio 2D/1D for acceleration
 profile.t2d.rsrd – transverse response spectral ratio 2D/1D for displacement
 profile.t2d.rsrpv – transverse response spectral ratio 2D/1D for pseudo velocity
 profile.t2d.rsrv – transverse response spectral ratio 2D/1D for velocity
 profile.z2d.rsra – vertical response spectral ratio 2D/1D for acceleration
 profile.z2d.rsrd – vertical response spectral ratio 2D/1D for displacement
 profile.z2d.rsrpv – vertical response spectral ratio 2D/1D for pseudo velocity
 profile.z2d.rsrv – vertical response spectral ratio 2D/1D for velocity
 profile.rad2d.rsp – 2D radial response spectra
 profile.tra2d.rsp – 2D transverse response spectra
 profile.ver2d.rsp – 2D vertical response spectra
 profilef0.rac.eir – radial energy input ratio 2D/1D scaled
 profilef0.rac.eir_lg – logarithm of radial energy input ratio 2D/1D scaled
 profilef0.tac.eir – transverse energy input ratio 2D/1D scaled
 profilef0.tac.eir_lg – logarithm of transverse energy input ratio 2D/1D scaled
 profilef0.zac.eir – vertical energy input ratio 2D/1D scaled
 profilef0.zac.eir_lg – logarithm of vertical energy input ratio 2D/1D scaled

b) Files with information about ground motion parameters [functions (x)]

profile.esce – GM parameters of the 2D synthetic seismograms (see annex 4)
 profile.r.rat – ratios 2D/1D for GM data and response spectra for radial component (see annex 5)
 profile.t.rat – GM ratios 2D/1D for GM data and response spectra for transverse component
 profile.z.rat – GM ratios 2D/1D for GM data and response spectra for vertical component
 ground7.rat – ratios 2D/1D for H/V parameters for all components (see annex 6)
 profile.r.rat.cor – correlation and non parametric correlation analysis for the variables included in file “profile.r.rat”
 profile.t.rat.cor – correlation and non parametric correlation analysis for the variables included in file “profile.t.rat”
 profile.z.rat.cor – correlation and non parametric correlation analysis for the variables included in file “profile.z.rat”
 ground7.rat.cor – correlation and non parametric correlation analysis for the variables included in file “ground7.rat”

c) GM parameters of the 2D synthetic seismograms

- Amax2_com – maximum acceleration for component com=(tra,rad,ver)
- Vmax2_com – maximum velocity for component com=(tra,rad,ver)
- Dmax2_com – maximum displacement for component com=(tra,rad,ver)
- Aria2_com – Arias intensity for component com=(tra,rad,ver)
- AEI_2_com – area under curve of energy integral for component com=(tra,rad,ver)
- EIma2_com – maximum of energy integral for component com=(tra,rad,ver)
- T_EI2_com – period of this maximum value
- EPA_2_com – effective peak acceleration for component com=(tra,rad,ver)
- c_SA5%max – maximum response spectra for acceleration at 5% damping for component c=(t,r,v)
- c_T_SAmx – period of this maximum value
- c_SV5%max – maximum response spectra for velocity at 5% damping for component c=(t,r,v)
- c_T_SVmx – period of this maximum value
- c_SD5%max – maximum response spectra for displacement at 5% damping for component c=(t,r,v)
- c_T_SDmx – period of this maximum value
- c_PSSV5%ma – maximum response spectra for pseudo velocity at 5% damping for component c=(t,r,v)
- c_T_PSSVma – period of this maximum value

In all this case the codes “com” and “c” means that there is a different file for each component.

d) ratios 2D/1D for GM data and response spectra

- c_Amax_ra – maximum acceleration ratio 2D/1D for component c=(t,r,v)
- c_Vmax_ra – maximum velocity ratio 2D/1D for component c=(t,r,v)
- c_Dmax_ra – maximum displacement ratio 2D/1D for component c=(t,r,v)
- c_I_Ariasra – Arias intensity ratio 2D/1D for component c=(t,r,v)
- c_AEI_ra – area under energy integral curve ratio 2D/1D for component c=(t,r,v)
- c_EPA_ra – effective peak acceleration ratio 2D/1D for component c=(t,r,v)
- c_EIRmax – maximum energy integral ratio 2D/1D for component c=(t,r,v)
- c_T_EIRmax – period of this maximum value
- c_lg_EIRmax – maximum energy integral logarithm ratio 2D/1D for component c=(t,r,v)
- c_T_lg_EIRm – period of this maximum value
- c_RSRmax_A – maximum response spectra for acceleration ratio 2D/1D for component c=(t,r,v)
- c_T_RSRm_A – period of this maximum value
- c_RSRmax_V – maximum response spectra for for velocity ratio 2D/1D for component c=(t,r,v)
- c_T_RSRm_V – period of this maximum value
- c_RSRmax_D – maximum response spectra for displacement ratio 2D/1D for component c=(t,r,v)
- c_T_RSRm_D – period of this maximum value
- c_RSRmax_PSV – maximum response spectra for pseudovelocity ratio 2D/1D for component c=(t,r,v)
- c_T_RSRm_PSV – period of this maximum value

In all this cases the code “c” means that there is a different file for each component.

e) ratios 2D/1D for H/V parameters

R_sV_{maxSA} – maximum ratio 2D/1D of the quotient R/V for acceleration

$f_{R_sV_{maxSA}}$ – frequency at which this maximum occurs

T_sV_{maxSA} – maximum ratio 2D/1D of the quotient T/V for acceleration

$f_{T_sV_{maxSA}}$ – frequency at which this maximum occurs

H_sV_{maxSA} – maximum ratio 2D/1D of the quotient H/V for acceleration

$f_{H_sV_{maxSA}}$ – frequency at which this maximum occurs

R_sV_{maxSV} – maximum ratio 2D/1D of the quotient R/V for velocity

$f_{R_sV_{maxSV}}$ – frequency at which this maximum occurs

T_sV_{maxSV} – maximum ratio 2D/1D of the quotient T/V for velocity

$f_{T_sV_{maxSV}}$ – frequency at which this maximum occurs

H_sV_{maxSV} – maximum ratio 2D/1D of the quotient R/V for velocity

$f_{H_sV_{maxSV}}$ – frequency at which this maximum occurs

R_sV_{maxSD} – maximum ratio 2D/1D of the quotient R/V for displacement

$f_{R_sV_{maxSD}}$ – frequency at which this maximum occurs

T_sV_{maxSD} – maximum ratio 2D/1D of the quotient T/V for displacement

$f_{T_sV_{maxSD}}$ – frequency at which this maximum occurs

H_sV_{maxSD} – maximum ratio 2D/1D of the quotient H/V for displacement

$f_{H_sV_{maxSD}}$ – frequency at which this maximum occurs

R_sV_{maxPV} – maximum ratio 2D/1D of the quotient R/V for pseudovelocity

$f_{R_sV_{maxPV}}$ – frequency at which this maximum occurs

T_sV_{maxPV} – maximum ratio 2D/1D of the quotient T/V for pseudovelocity

$f_{T_sV_{maxPV}}$ – frequency at which this maximum occurs

H_sV_{maxPV} – maximum ratio 2D/1D of the quotient H/V for pseudovelocity

$f_{H_sV_{maxPV}}$ – frequency at which this maximum occurs

T/V means transverse over vertical components, R/V means radial over vertical components, while H/V means horizontal over vertical components.

Informe del resultado

Cálculo de sismogramas sintéticos y microzonación sísmica

Proyecto: Influencia de las características del suelo sobre los parámetros del movimiento del terreno durante terremotos en las ciudades de Bayamo, Manzanillo y Pílon

Programa: (909) Mejoramiento ambiental y desarrollo sostenible de la provincia Granma

Confeccionado por: José Leonardo Álvarez Gómez, Zulima Caridad Rivera Álvarez, Eberto Hernández

Introducción

El uso de sismogramas sintéticos en la microzonación sísmica tiene antecedentes en Cuba (Álvarez et al., 2004, 2005). Entre los diferentes enfoques para calcular sismogramas sintéticos seleccionamos uno que combina dos métodos, la suma modal y las diferencias finitas, para los cuales se disponeía de un grupo inicial de programas de cómputo. Las técnicas de suma modal básicas, o sea, para el problema clásico 1D, {ver Panza (1985), Panza y Suhadolc (1987), Florsch et al. (1991) y Panza et al. (2000)}, usualmente consideran un semiespacio elástico estratificado lateralmente homogéneo y la solución computacional existe en forma de programas estables, precisos y eficientes. Para el caso de medios bidimensionales (2D) usaremos el método de diferencias finitas en la variante conocida como "técnica híbrida" (Fäh, 1992; Fäh et al., 1993, Fäh y Suhadolc, 1994). La idea principal es calcular trenes de onda completos generados por una fuente sísmica ubicada dentro de una estructura regional corteza-manto superior, la estructura de "roca", y aplicar ese movimiento como entrada a la estructura local. El problema se resuelve en dos etapas: (a) las señales de las ondas P-SV y SH son generadas en la estructura rocosa anelástica por el enfoque de suma modal (1D); (b) esos trenes de ondas son usados como entrada para un esquema de diferencias finitas que se emplea para obtener las formas de onda a lo largo de la estructura anelástica, de variación lateral, local.

Por otra parte, la microzonación sísmica se basa en el estudio de las variaciones espaciales del comportamiento de parámetros que caracterizan el movimiento del terreno, la cual tiene una fuerte dependencia de las características del terreno. El enfoque asumido en este trabajo es caracterizar la microzonación sísmica a partir del comportamiento de los cocientes de parámetros del movimiento del terreno "X" medidos en suelo y roca X_S/X_R o de cocientes funciones que caracterizan el movimiento del terreno en dependencia de la frecuencia $g_X(f)$ medidos en suelo y roca $g_X(f)_S/g_X(f)_R$ (Álvarez et al., 2004). En la Fig.1 se presenta el esquema general de trabajo de una microzonación.

En las tareas 1 y 2 de este proyecto ("Modelos de la estructura geológica profunda regional " y "Modelos de estructura geológica de las cuencas donde están ubicadas las ciudades a estudiar") se realizó un estudio de la estructura de la corteza y el manto superior para una amplia región que engloba a las ciudades de Bayamo, Manzanillo y Pílon, y las zonas fuente de los terremotos, así como un estudio más detallado de la estructura cercana a la superficie del terreno para dichas ciudades. En la tarea 3 (Preparación de base computacional para el cálculo de sismogramas sintéticos y pruebas de los programas con los datos que se obtengan en el proyecto) se describen los programas que se utilizan en la microzonación sísmica.

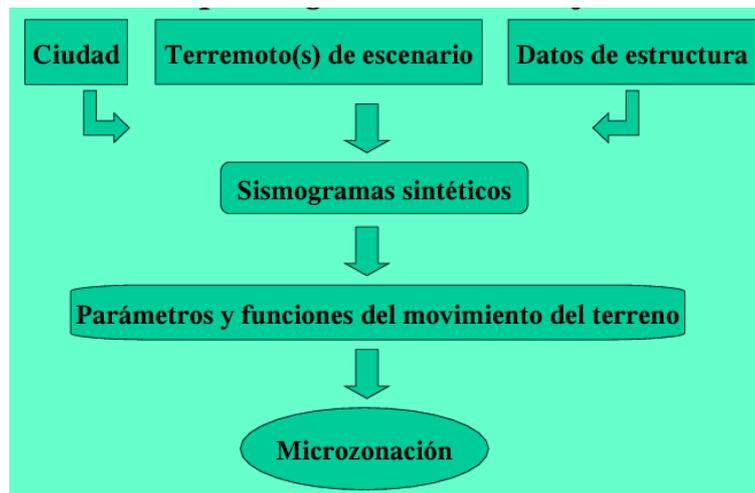


Fig. 1 Esquema general de trabajo de las microzonaciones a realizar

Selección de los terremotos de escenario

Se seleccionó un total de 3 terremotos correspondientes a 3 escenarios diferentes. El primero corresponde a la ubicación del terremoto de Cabo Cruz de 1992, con una magnitud de 7 y mecanismo focal dado por el CMT. El segundo corresponde a una ubicación un poco más al sur del epicentro del terremoto de Pílon de 1976, con un mecanismo focal al dado para ese terremoto por Alvarez et al. (1984). El último terremoto corresponde aproximadamente a la ubicación del terremoto de Santiago de Cuba de 1932, con una magnitud de 7, y el mecanismo focal es el mismo mecanismo típico del área usado por Alvarez et al. (2002, 2004). En la tabla 1 se reflejan estos parámetros y en la figura 2 se presenta un mapa con la ubicación de estos terremotos, las ciudades de Bayamo Manzanillo y Pílon, así como las trayectorias epicentro-ciudad utilizadas en el cálculo de sismogramas sintéticos.

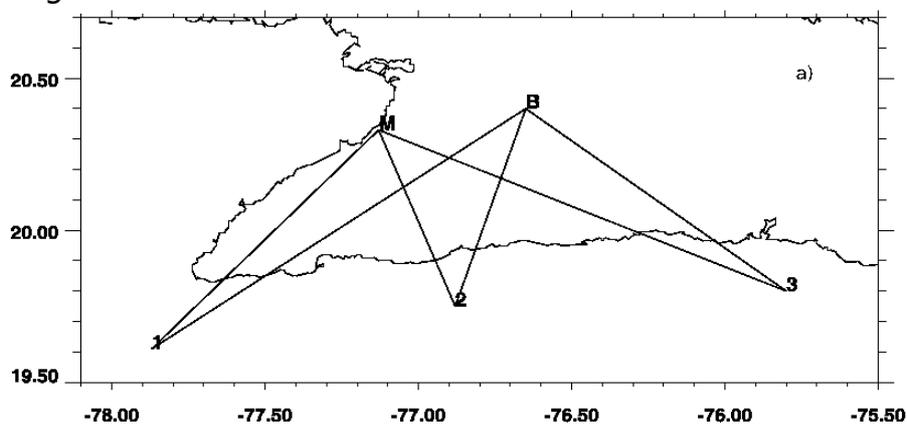


Fig. 2. Ubicación de los epicentros de los terremotos de escenario y trayectorias hasta las ciudades de a) Bayamo (B), Manzanillo (M) y b) Pílon (P)

Tabla 1. Parámetros de los 3 terremotos de escenario seleccionados. Los números de la clave corresponden a los representados en la Fig. 2.

Clave	Long.	Lat.	Azimet	Buzam.	Desliz.	Profund.	Magnit.
1	-77.87	19.61	304	66	14	25	7
2	-76.88	19.75	80	80	4	25	7
3	-75.58	19.75	100	21	21	25	7

Estructura regional de la corteza y el manto superior

El método de cálculo de sismogramas sintéticos seleccionado requiere de la preparación de un modelo regional de corteza y manto superior, en el cual se introducen los modelos locales de estructura (Fig. 3).

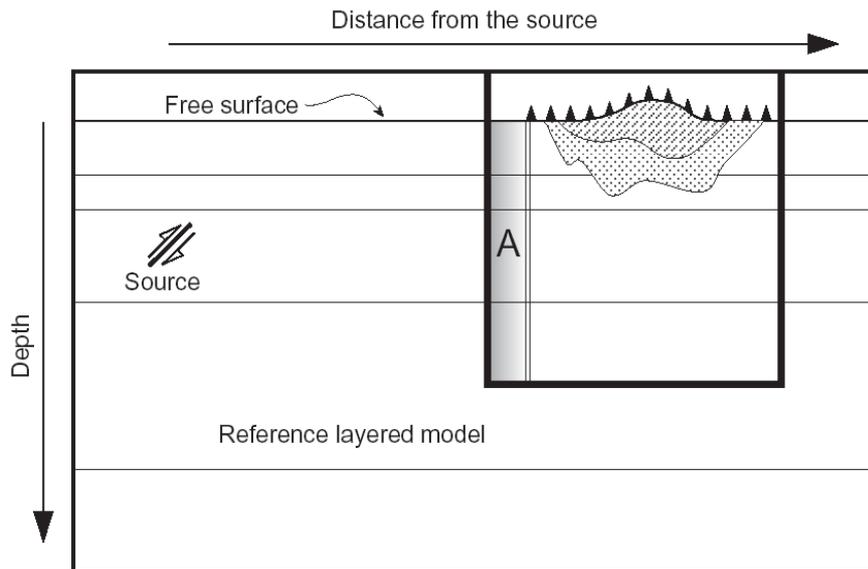


Fig. 3. Esquema general del cálculo de sismogramas sintéticos por el método seleccionado. Los cálculos con el método de suma modal (MS) se realizan para dos columnas de receptores ubicados al inicio del modelo de estructura local. Los sismogramas correspondientes constituyen los datos iniciales para los cálculos que se realizan por el método de diferencias finitas (FD) para diferentes receptores situados a lo largo del perfil, sobre su superficie.

Tomando en consideración los resultados obtenidos en las tareas 1 y 2 ya mencionadas se confeccionaron dos modelos de estructura de corteza y manto. El primero de ellos para ser usado en los cálculos para las ciudades de Bayamo y Manzanillo (Tabla 2a, Fig. 4a), y el segundo para ser usado en los cálculos para la localidad de Pílon (Tabla 2b, Fig. 4b). Ambas son estructuras unidimensionales como requiere el método utilizado. La primera de ellas se formó a partir de los datos correspondientes a la estructura de la corteza y el manto superior para la parte insular de Cuba presentados en los informes de las tareas 1 y 2, mientras que la segunda está formada por la estructura correspondiente a la parte cercana a la costa de la fosa de Bartlett (ver informe de la tarea 1), a la que se le eliminó la capa de agua.

Tabla 2. Modelos de corteza y manto superior usado para calcular los sismogramas sintéticos en Bayamo, Manzanillo y Pílon.

Bayamo y Manzanillo					
Espesor(Km)	Densidad (g/cm ³)	V _P (Km/s)	V _S (Km/s)	Q _P	Q _S
0.3	1.95	4.0	2.105	620	310
0.4	2.45	5.0	2.632	620	310
0.4	2.48	5.4	2.842	620	310
0.5	2.50	5.8	3.053	620	310
1.0	2.55	6.0	3.158	620	310
6.5	2.60	6.2	3.444	620	310
6.9	3.01	6.9	3.833	620	310

11.5	3.27	7.6	4.278	620	310
10.0	3.27	7.8	4.333	620	310
20.5	3.33	8.0	4.444	620	310
32.0	3.35	8.1	4.500	620	310
10.0	3.36	8.15	4.520	620	310
Pilón					
Espesor(Km)	Densidad (g/cm³)	V_P(Km/s)	V_S(Km/s)	Q_P	Q_S
1	2.3	3	1.58	620	310
1.5	2.4	4.4	2.32	620	310
9.5	2.65	5.4	3	620	310
6	2.8	6.4	3.56	620	310
4	3.27	7.6	4.22	620	310
13	3.3	8	4.44	620	310
50	3.37	8.1	4.5	620	310

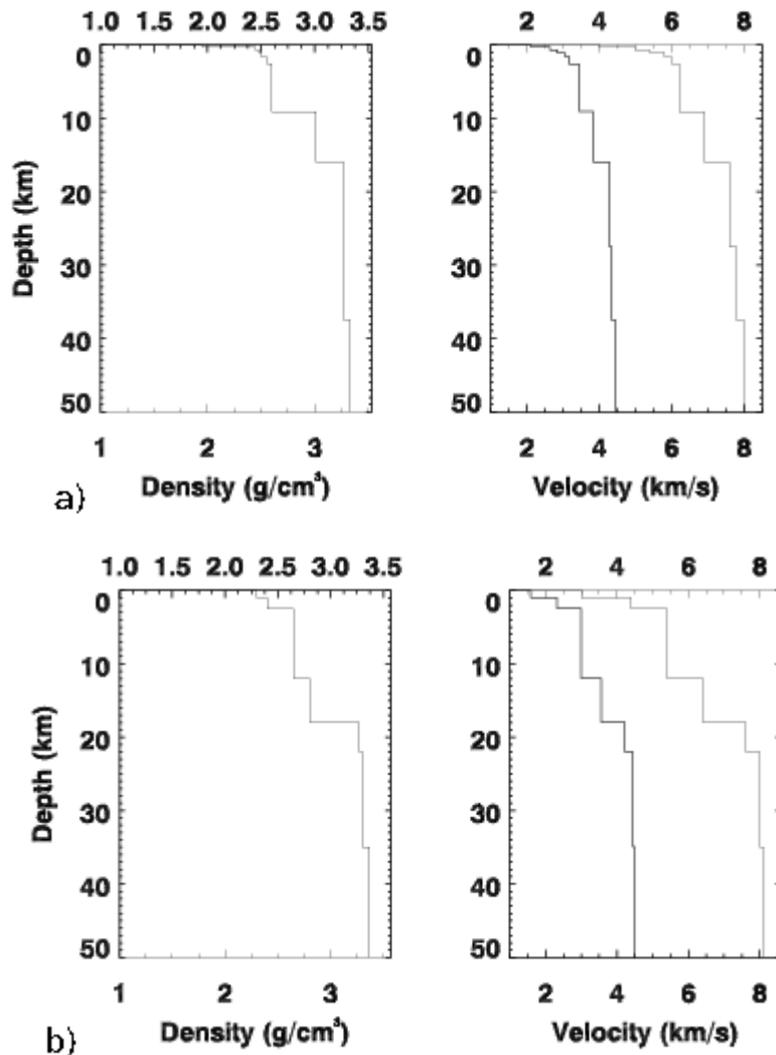


Fig. 4. Variación en profundidad de los parámetros físicos que caracterizan a la estructura usada para calcular los sismogramas sintéticos en Bayamo y Manzanillo (a) y en Pilón (b).

Perfiles para el cálculo de los sismogramas sintéticos en Bayamo, Manzanillo y Pilon

Para el cálculo de los sismogramas sintéticos en Bayamo se construyeron 11 perfiles de estructura de las capas superficiales del suelo. Para el caso de Manzanillo los perfiles construidos fueron 10, mientras que para el caso de Pilon, por la escasez de datos sobre estructura de los suelos de la ciudad sólo fue posible construir 1 perfil. Dichos perfiles siguen la orientación de las trayectorias epicentro-ciudad representadas en la Fig. 2. La base fundamental para la preparación de los cortes geológicos correspondientes a los perfiles la constituyen las calas geológicas disponibles en las inmediaciones de su trazado. En la Fig 5 se presentan los mapas correspondientes a los casos de Bayamo y Manzanillo, conjuntamente con las calas utilizadas. El caso de Pilon resulta más complicado, pues el área es muy pequeña, sólo se poseen dos perforaciones, prácticamente iguales, y el resto de los pozos están muy alejados del área urbanizada. Esto hace que sólo se pueda confeccionar un esquema simple tentativo combinando dichas calas con la información externa a la ciudad. De tal forma, sólo se preparó un perfil tipo, compuesto de 3 estratos, de dirección SE-NW y común a toda la ciudad. Esto obligó igualmente a considerar un sólo terremoto de escenario, por supuesto el correspondiente al terremoto de Pilon de 1976, pero su epicentro hubo de ser desplazado hacia el oeste hasta los (19.71°N, 77.13°W). En la Fig. 6 se presentan la ubicación del epicentro con relación al poblado de Pilon y el trazado del perfil típico. Las propiedades físicas de los estratos que componen los cortes geológicos fueron estimadas a partir de sus características litológicas usando valores tabulados por otros autores (Medvedev, ed., 1977; Sadovskii et al., 1977; Berge-Thierry et al., 1999) así como los que se presentaron en el informe de la tarea 2. En la tabla 3 aparecen valores para los diferentes estratos hallados en cada ciudad. En ellos se excluyen el relleno y la capa vegetal, que no son considerados en los cálculos.

Tabla3. Parámetros físicos de los suelos presentes en los diferentes perfiles confeccionados para Bayamo, Manzanillo y Pilon.

Bayamo					
Tipo de suelo	Densidad	V _P	V _S	Q _P	Q _S
suelo arcilloso	1.8	0.78	0.39	100	50
arena	1.9	0.9	0.45	100	50
suelo aluvial	2.0	1.1	0.55	100	50
suelo gravoso	1.75	0.7	0.35	100	50
Manzanillo					
Tipo de suelo	Densidad	V _P	V _S	Q _P	Q _S
arcilla	1.6	0.7	0.36	100	50
arenas	1.5	0.55	0.28	100	50
suelo calizo	1.85	0.8	0.4	100	50
roca caliza	2.2	1.4	0.6	100	50
semiroca caliza	2.05	1.0	0.7	100	50
semiroca de margas arcillosas	2.2	1.3	0.65	100	50
Pilon					
Tipo de suelo	Densidad	V _P	V _S	Q _P	Q _S
aluvio	2	1	0.55	100	50
arcillas	1.8	0.78	0.39	100	50
calizas arcillosas o margosas	2.05	1	0.7	100	50

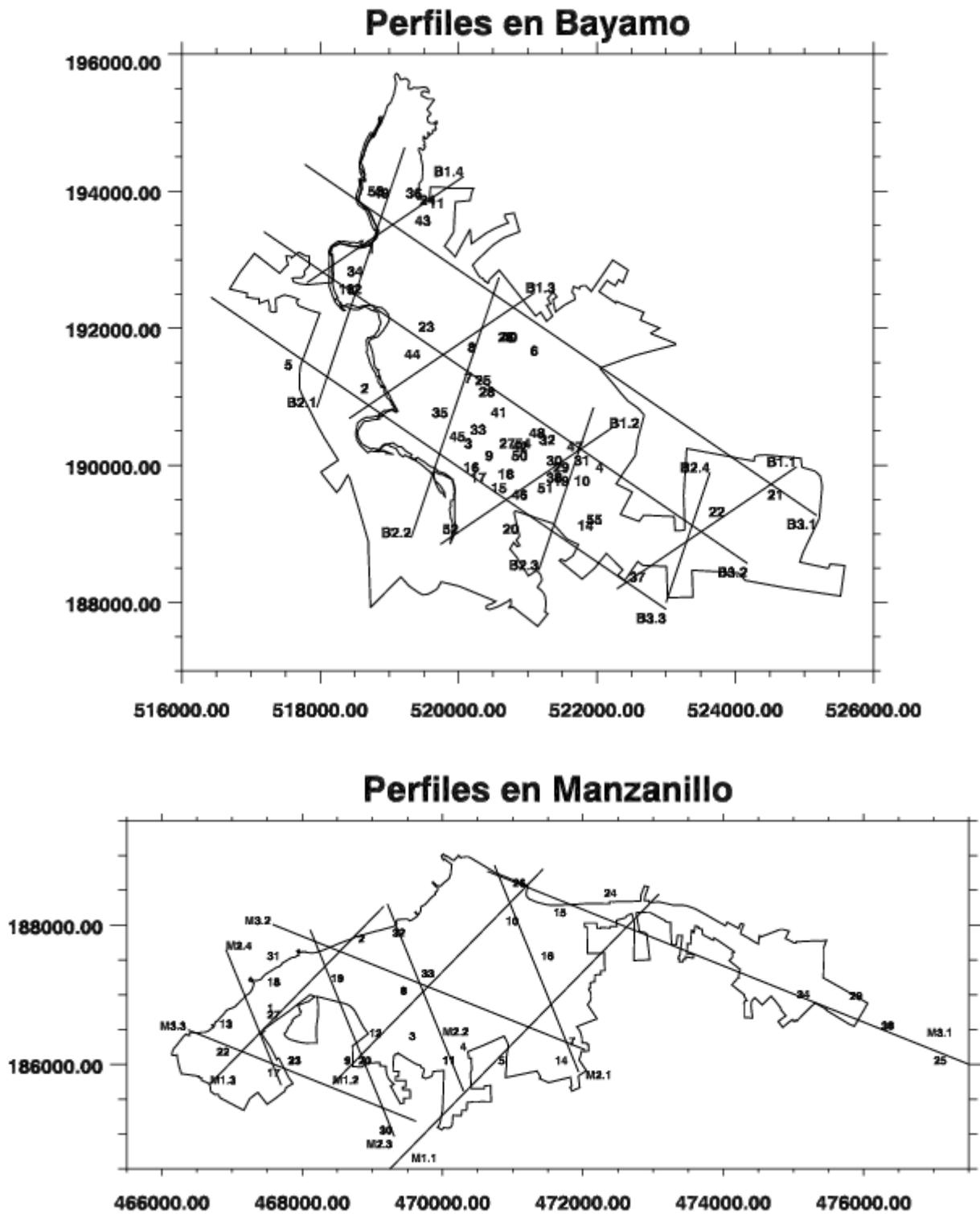


Fig. 5. Trazado de los perfiles utilizados conjuntamente con la ubicación de las calas geotécnicas. Las calas se representan por números consecutivos y los perfiles usando el código ciudad-epicentro-numero_de_perfil. Ciudad y epicentro se dan con los códigos de la Fig. 2, mientras que los números de perfil comienzan desde 1 para cada epicentro. Dichos códigos se irán repitiendo a lo largo de este informe.

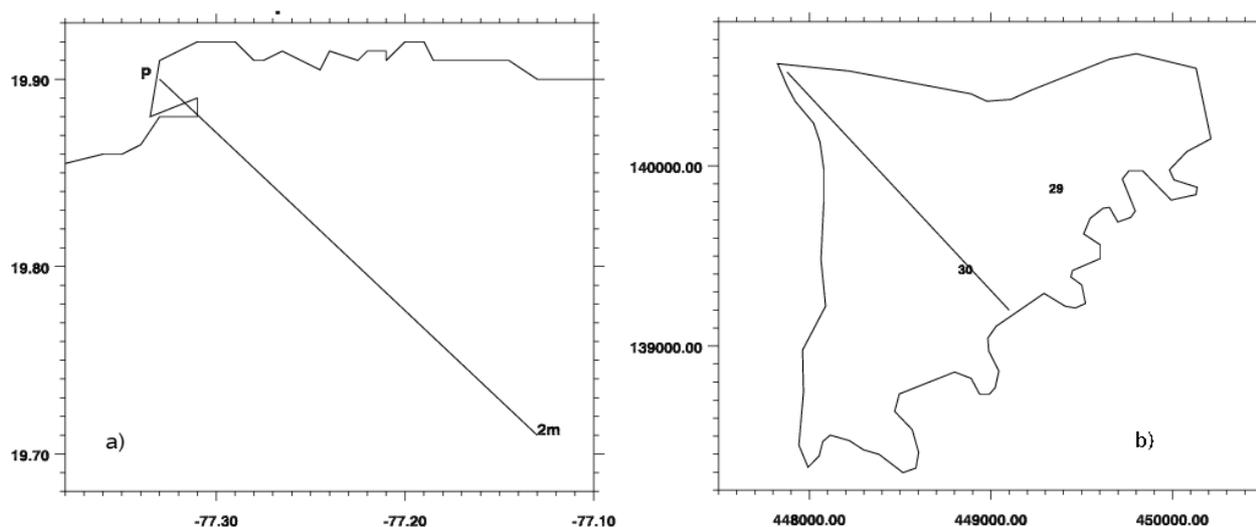


Fig. 6. Ubicación relativa del terremoto de escenario con respecto a la localidad de Pílon (a) y trazado del perfil tipo en ella (b).

Sismogramas sintéticos calculados y parámetros extraídos de ellos

Siguiendo el esquema presentado en la Fig. 3 fueron calculados los sismogramas sintéticos para todos los perfiles. Los parámetros de la malla para la parte del cálculo por diferencias finitas se determinan a partir de los valores de velocidad presentes en los estratos, mientras que la distancia entre sismogramas se fija como un múltiplo de ese valor de acuerdo a los requerimientos del problema a resolver. El tamaño de la celda en la malla fue determinado en 7x7 metros, y los sismogramas se calcularon cada 84 metros a lo largo de los perfiles, valor adecuado para el propósito final de preparar mapas de microzonación sísmica. Los sismogramas se calcularon para un momento sísmico $M_0=1.10^{20}$ din-cm, y luego se escalan al valor de magnitud seleccionado ($M=7$) usando la ley de escalado Gusev(1983), en la forma en que la presenta Aki (1987). Los cálculos se realizaron para las ondas P-SV (Rayleigh) y Love (SH) lo que corresponde a 3 componentes (radial, vertical y transversal). En la Fig. 7 se muestran algunos de los sismogramas sintéticos calculados.

Como se ve de las figuras, existen variaciones entre los sismogramas calculados en diferentes puntos de los perfiles. Estas pueden ser estudiadas mucho mejor si se extraen de los sismogramas un conjunto de parámetros o funciones (con respecto a la frecuencia). En general los parámetros son valores máximos (y frecuencia a la que ocurren) o algunas valoraciones integrales de las señales, mientras que las funciones son del tipo de espectros de respuesta, energía de entrada, o razones H/V. De este tipo de datos lo que interesa para la microzonación sísmica son los cocientes entre sus valores determinados en el perfil (2D) y determinados para una distancia equivalente usando el modelo de estructura regional (1D). En lo adelante nos referiremos a estos cocientes como "2D/1D". En el anexo 3 del informe de la tarea 3 aparece un listado completo de todos los parámetros y funciones que se utilizan en el estado actual de desarrollo del paquete de programas.

Microzonación sísmica

Para la realización de la microzonación sísmica en las diferentes ciudades bajo estudio se siguió el procedimiento siguiente:

- Se prepararon mapas de cocientes 2D/1D de 14 parámetros del movimiento del terreno (en 3 componentes) y de 12 razones H/V usando 3 métodos diferentes de interpolación (triangulación de Delaunay, vecino más cercano y mínima curvatura).
- Se clasificaron, usando el programa P4, 24 funciones de parámetros del movimiento del terreno y los resultados se representaron en mapas.
- Se realizó un análisis de correlación de todas las combinaciones de cocientes 2D/1D de parámetros del movimiento del terreno y razones H/V.
- Se usaron los resultados del análisis de correlación para discriminar entre las variables y

funciones a seleccionar para la confección del mapa de microzonación

- Se combinaron los mapas seleccionados con la información geólogo-tectónico estructural de la área de estudio para delinear zonas con un comportamiento cuasi-homogéneo del movimiento del terreno.
- Se documentó cada una de las zonas creadas con el máximo de la información posible a partir del promedio de los parámetros y funciones de movimiento del terreno para los puntos con sismogramas sintéticos calculados presentes en ellas.

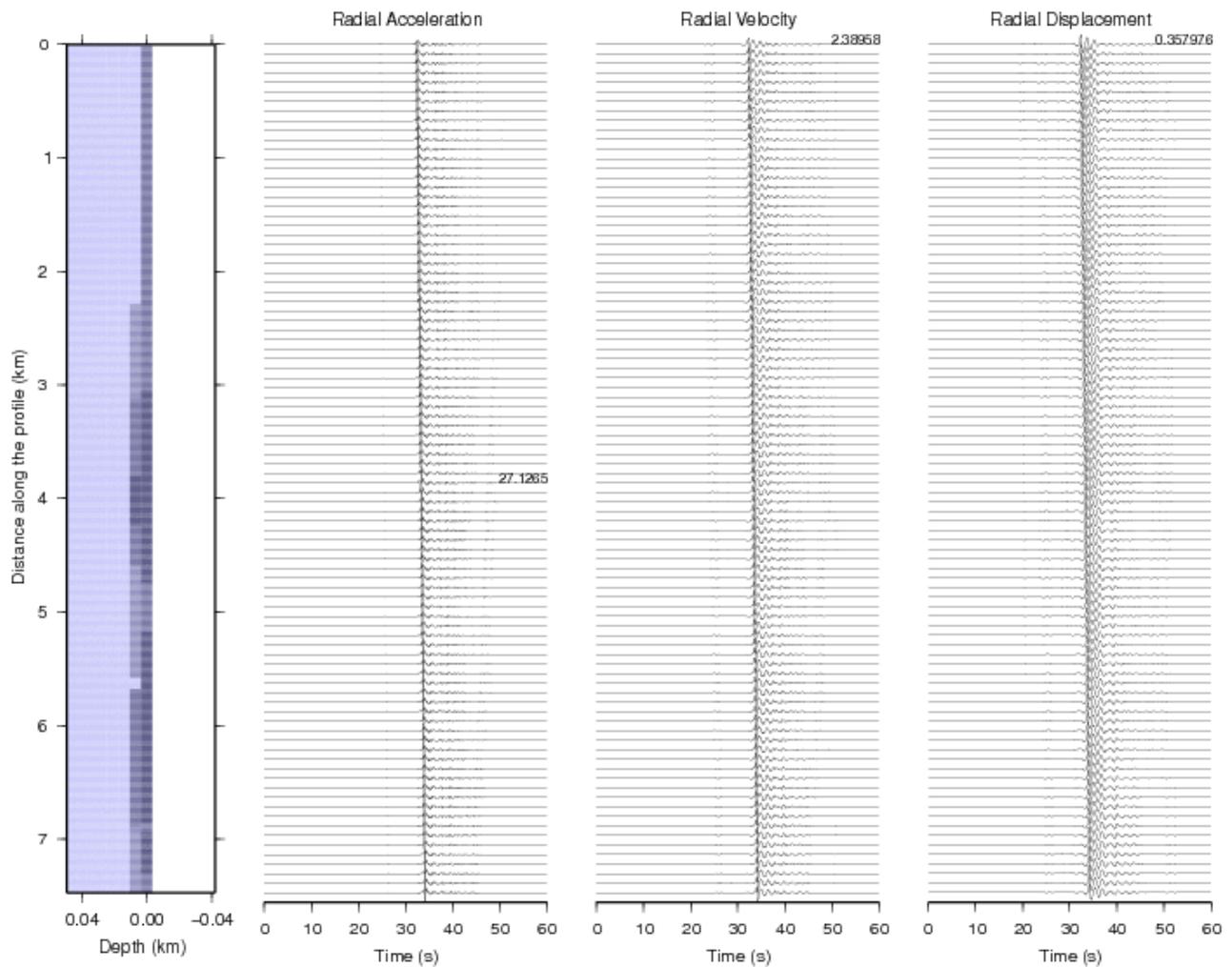


Fig. 7a. Sismogramas sintéticos para la componente radial en el perfil B32 (ver Fig. 6 para el trazado). Corresponden a la señal sin escalar.

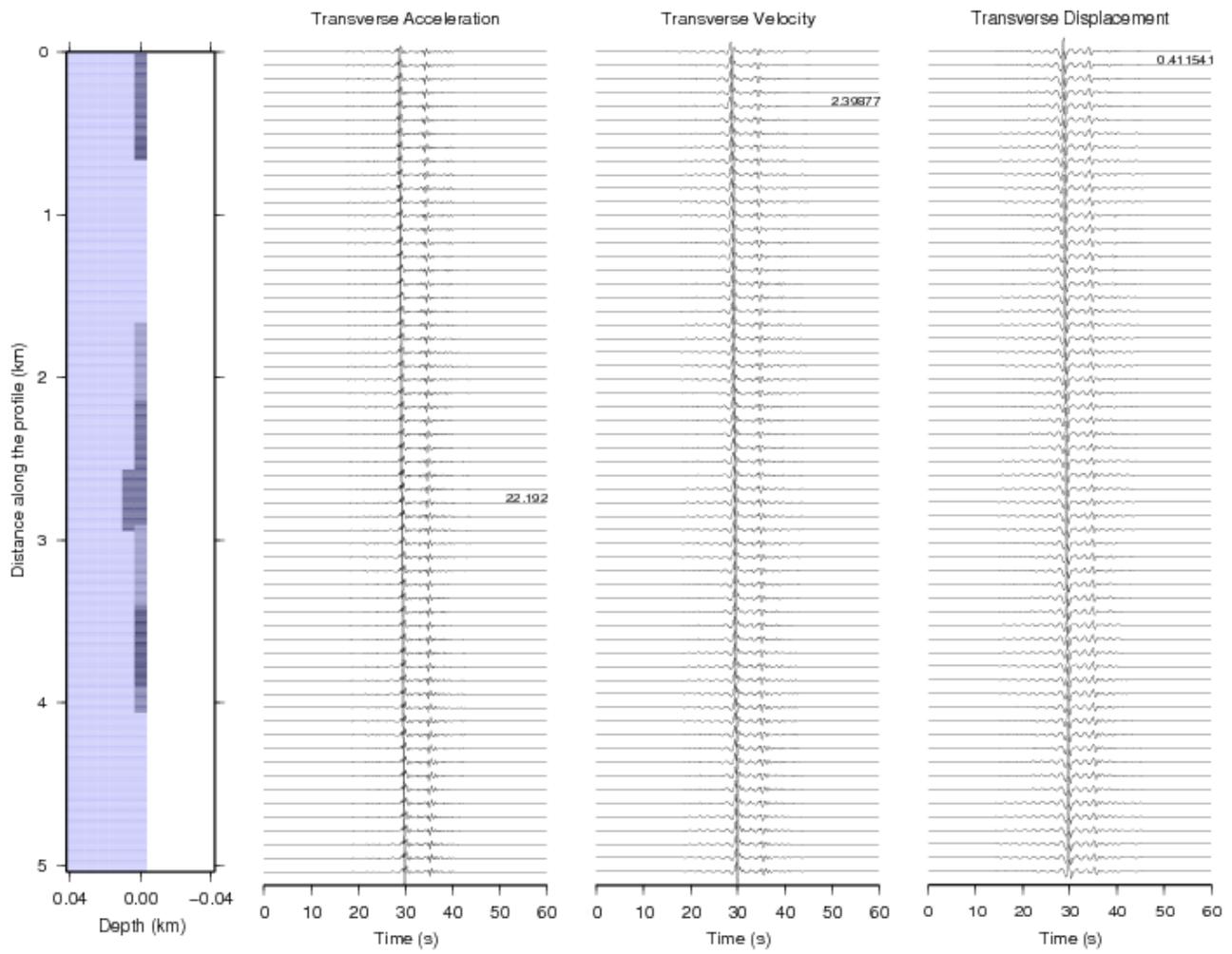


Fig. 7b. Sismogramas sintéticos para la componente transversal en el perfil M11 (ver Fig. 5 para el trazado). Corresponden a la señal sin escalar.

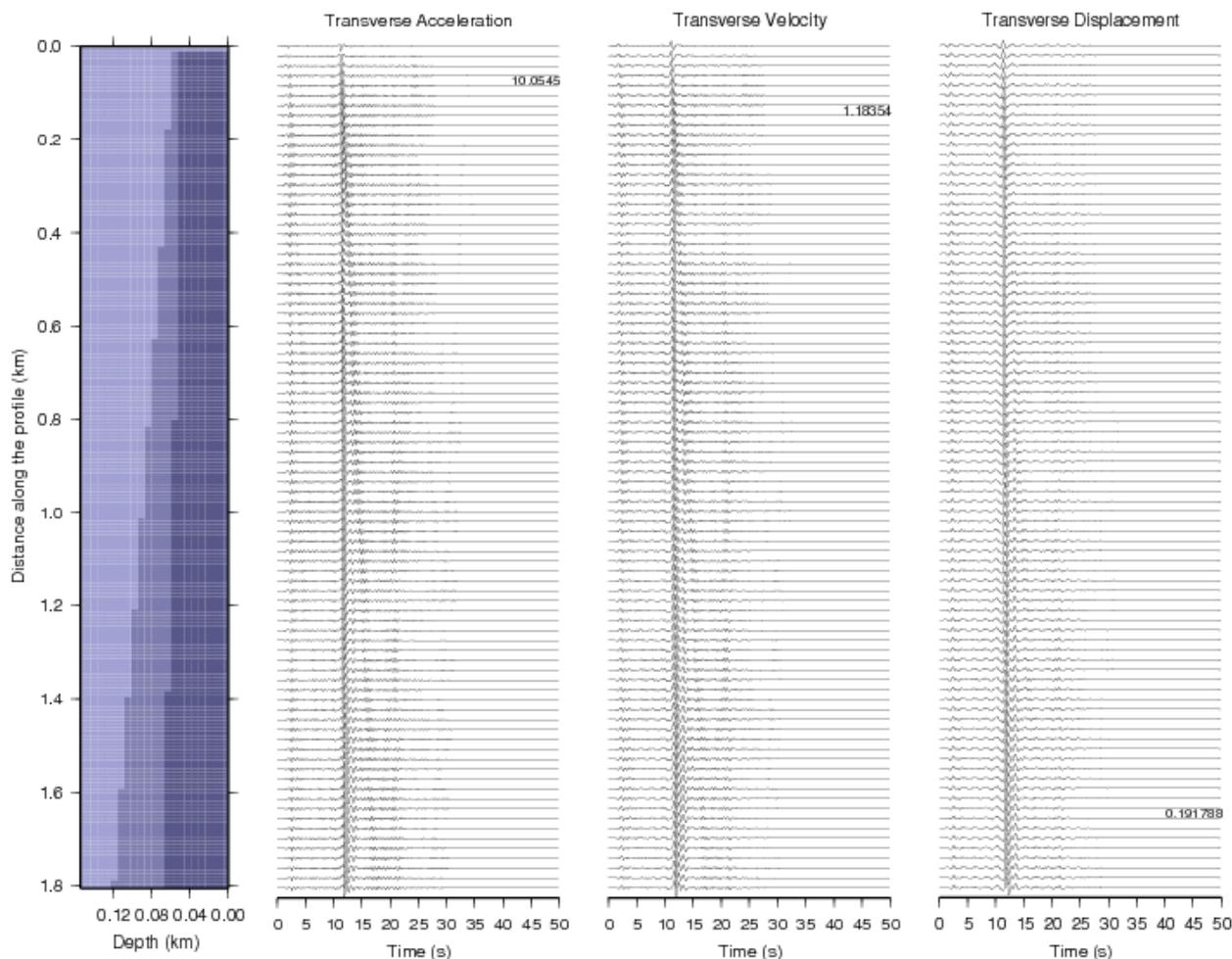


Fig. 7c. Sismogramas sintéticos para la componente transversal en el perfil P1 (ver Fig. 5 para el trazado). Corresponden a la señal sin escalar.

Del análisis de todo el conjunto de mapas y gráficos obtenidos (ver anexo 3 de la tarea 3) resulta que los parámetros (cocientes roca/suelo o 2D/1D) que reflejan con mayor nitidez la variabilidad espacial del movimiento del terreno son el área bajo la curva de la energía de ingreso (AEI), la aceleración pico efectiva (EPA) y el espectro de respuesta (RS). En menor medida la relación H/V, y para el caso de Pílon solamente, la aceleración máxima. Hay muchos parámetros de los descritos en el anexo 3 de la tarea 3 que resultan redundantes, como son la velocidad y el desplazamiento máximos, que junto con la intensidad de Arias tienen un comportamiento equivalente a la aceleración máxima, así como los casos del espectro de respuesta (donde los de velocidad, desplazamiento y pseudovelocidad son equivalentes a los de aceleración) y el caso de las relaciones H/V (donde las R/V y T/V tienen un comportamiento equivalente a los de H/V, y las de velocidad, desplazamiento y pseudovelocidad son equivalentes a los de aceleración). Esto se deduce no sólo del análisis de correlación entre variables, sino de la inspección visual de los mapas y gráficos.

El procedimiento para obtener la microzonación sísmica de Bayamo y Manzanillo es el mismo, y consiste en la superposición de los mapas de EPA y AEI, junto con los resultados de la clasificación de las curvas de RS y H/V (para desplazamiento y aceleración respectivamente), a lo que se suma la información geológico tectónica existente, usando el sistema de información geográfica MapInfo (). En el caso de Pílon se identifican zonas a lo largo del perfil donde se obtengan características cuasi-homogéneas de los parámetros del movimiento del terreno AEI, EPA, RS, H/V y Amax.

En las Fig. 8 y 9 se presentan los mapas de AEI y EPA para las ciudades de Bayamo y Manzanillo respectivamente.

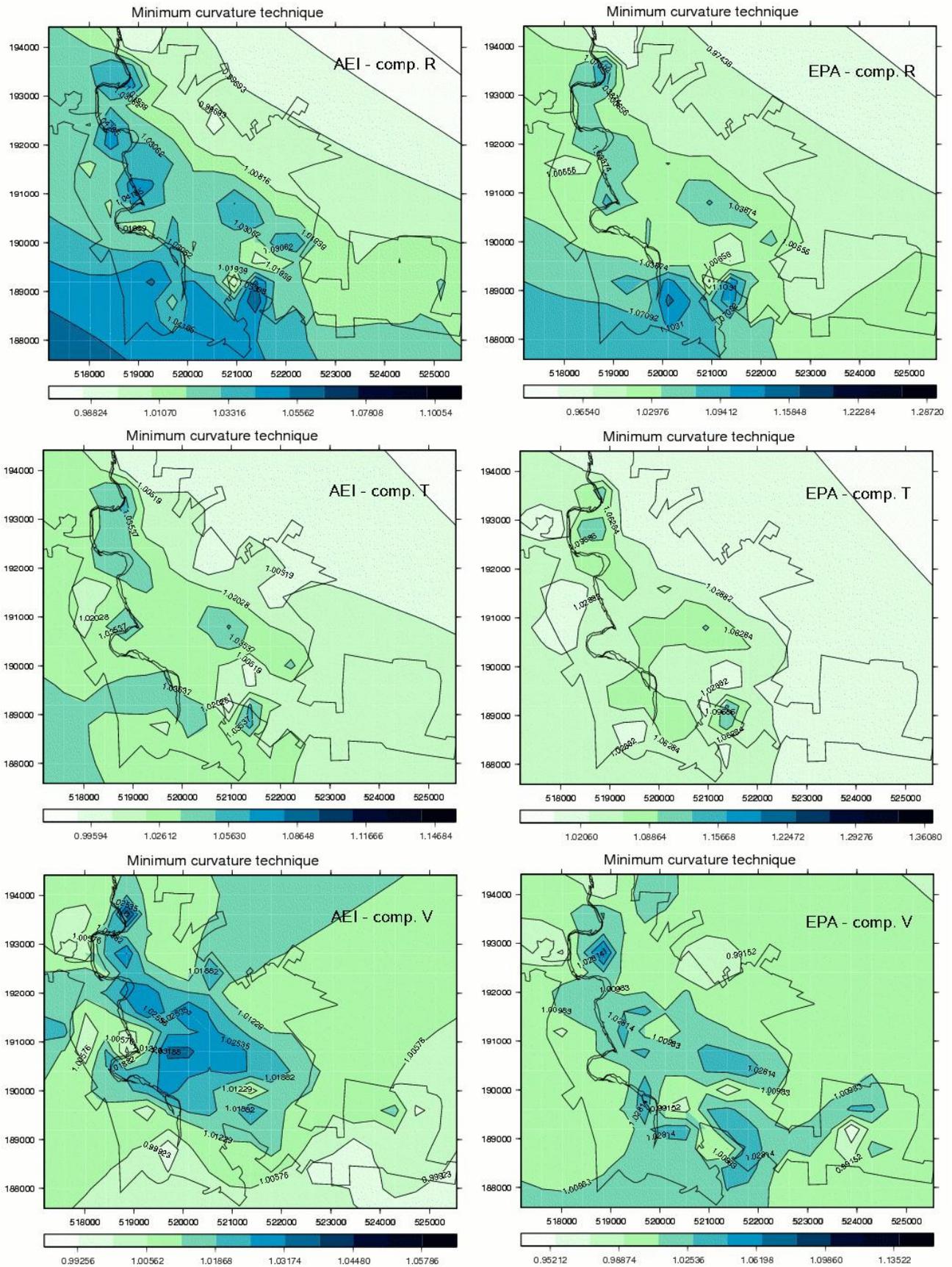


Fig. 8. Comportamiento espacial de los parámetros AEI y EPA para las 3 componentes en la ciudad de Bayamo. La interpolación fue realizada con el método de curvatura mínima.

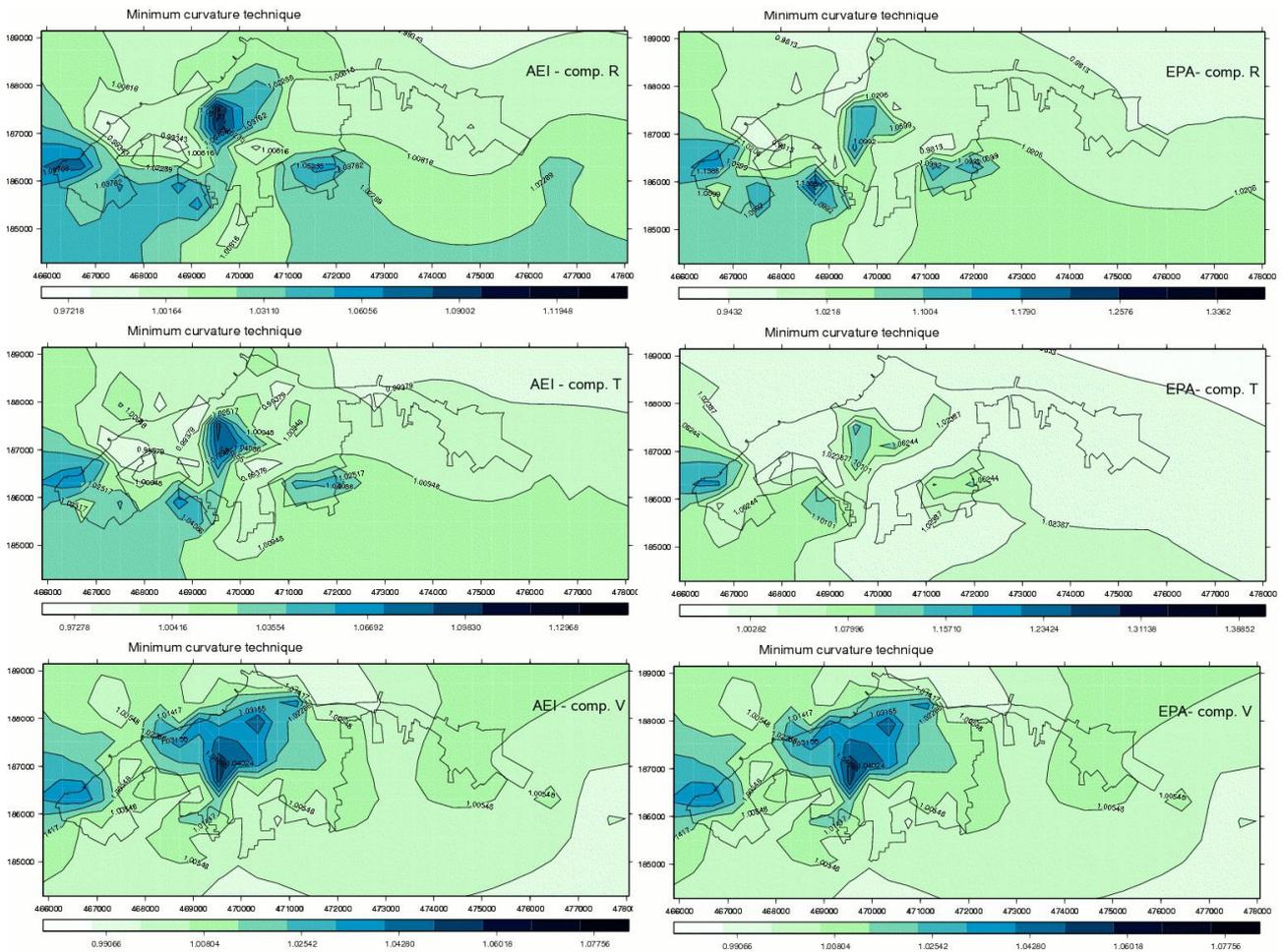


Fig. 9. Comportamiento espacial de los parámetros AEI y EPA para las 3 componentes en la ciudad de Manzanillo. La interpolación fue realizada con el método de curvatura mínima.

En la Fig. 10 se muestra un gráfico que presenta el comportamiento en frecuencia de del cociente de los espectros de respuesta para aceleración a lo largo del perfil de la localidad de Pílon. De ella se deduce que hay un comportamiento diferenciado en 3 sectores de unos 600 metros cada uno de longitud. Aunque esta diferenciación no es muy grande, aparece aproximadamente igual en los otros parámetros utilizados, y por tanto se puede tomar como base del esquema de microzonación de la localidad de Pílon. Es por ello que se decidió preparar dicho esquema de microzonación a partir de 2 líneas perpendiculares al trazado del perfil a 550 y 1200 metros de su inicio, quedando la localidad de Pílon dividida en 3 zonas como se muestra en la Fig. 11.

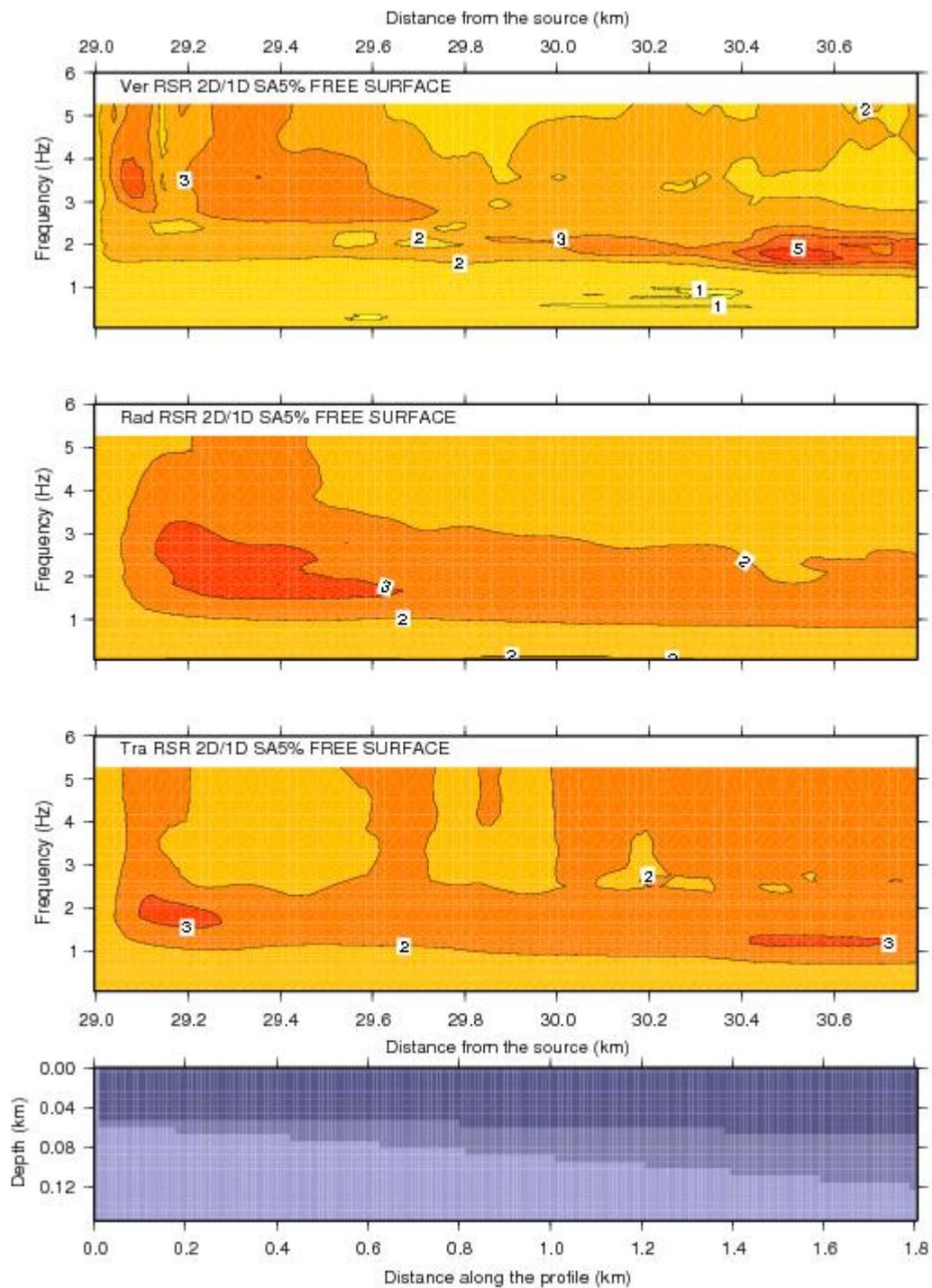


Fig. 10. Gráfico del comportamiento en frecuencia del cociente de los espectros de respuesta de aceleración a lo largo del perfil confeccionado en la localidad de Pílon. El perfil se muestra en la parte inferior del gráfico.

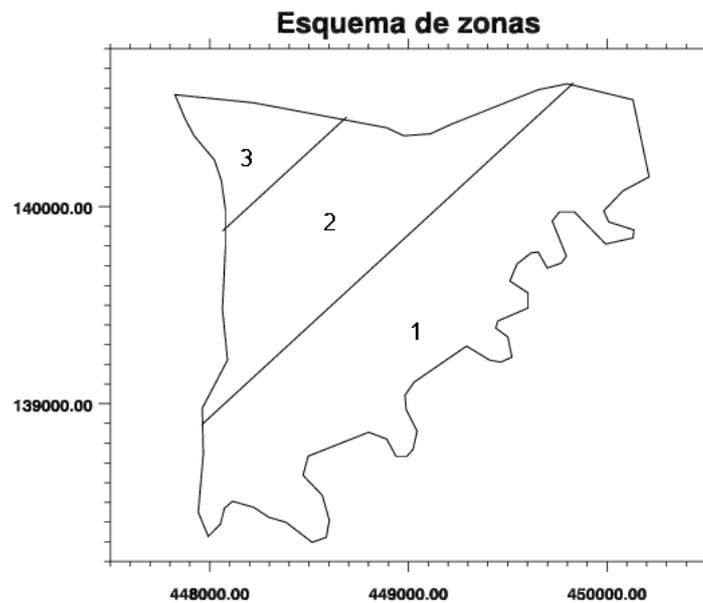


Fig. 11. Esquema de microzonación de la localidad de Pílon

Para el caso de Bayamo y Manzanillo se procesaron los 6 mapas de las Fig. 8 y 9 con ayuda del SIG para determinar zonas de comportamiento similar. En la Fig. 12 se muestra el mapa obtenido para la ciudad de Manzanillo, y en la Fig. 12 el obtenido para la ciudad de Bayamo.



Fig. 12. Microzonación sísmica de Manzanillo. Se identificaron 3 zonas de comportamiento cuasi-homogéneo de los valores relativos suelo/roca del movimiento del terreno. El área aproximada de la ciudad aparece sombreada en gris claro.

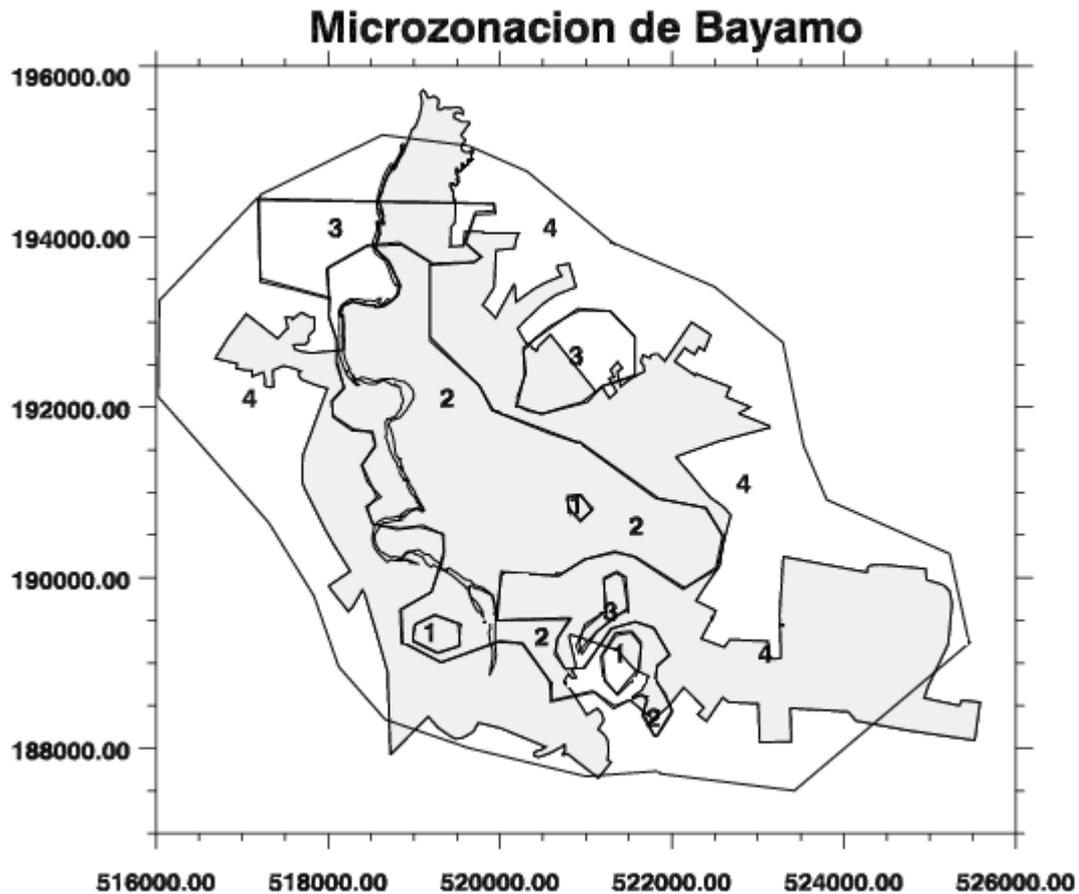


Fig. 13. Microzonación sísmica de Bayamo. Se identificaron 4 zonas de comportamiento cuasi-homogéneo de los valores relativos suelo/roca del movimiento del terreno. El área aproximada de la ciudad aparece sombreada en gris claro.

A diferencia de otros estudios de microzonación sísmica cuyos resultados son expresados en términos de un parámetro simple (ya sea en variaciones de la intensidad sísmica, en factores de amplificación de aceleración, etc.), el hecho de disponer de sismogramas sintéticos para numerosos puntos dentro de las ciudades objeto de estudio, permite caracterizar las zonas con una multiplicidad de parámetros y funciones del movimiento del terreno. Entre los parámetros seleccionados para este estudio se encuentran los cocientes suelo/roca de aceleración pico, aceleración efectiva y área bajo la curva de la integral de la energía para tres componentes (radial, transversal y vertical). Las funciones seleccionadas son los cocientes suelo/roca de los espectros de respuesta de aceleración y de las razones H/V para los espectros de aceleración. Para caracterizar cada una de las zonas presentadas en los mapas de las figuras 11-13, se promediaron los valores de los parámetros seleccionados en todos los puntos donde se calcularon sismogramas sintéticos que estén incluidos en cada una de ellas. Con respecto a las funciones, como iban a ser objeto de una clasificación, se calcularon muestreando los puntos con sismogramas sintéticos a intervalos de 2, (por lo que el promedio de las mismas se efectuó aproximadamente para la mitad de los puntos que en el caso anterior). En las tablas 4-6 se presentan los resultados de la promediación de los parámetros seleccionado del movimiento del terreno para Pión, Manzanillo y Bayamo, mientras que en las Fig. 14-16 se presentan algunas de las funciones promediadas correspondientes a las mismas ciudades.

Tabla 4. Valores promedio de los cocientes suelo/roca de los parámetros del movimiento del terreno dentro de cada una de las zonas para la localidad de Pílon.

Zone	radial			transversal			vertical		
	AEI	Amax	EPA	AEI	Amax	EPA	AEI	Amax	EPA
1	3.447	0.988	2.099	3.732	0.983	2.141	2.212	0.993	2.368
2	3.710	1.004	1.922	5.058	1.008	2.108	4.239	1.002	2.528
3	3.069	1.058	2.444	2.929	1.065	2.051	1.819	1.047	2.736

Tabla 5. Valores promedio de los cocientes suelo/roca de los parámetros del movimiento del terreno dentro de cada una de las zonas para la ciudad de Manzanillo.

Zone	radial			transversal			vertical		
	AEI	Amax	EPA	AEI	Amax	EPA	AEI	Amax	EPA
1	1.015	0.957	1.015	1.010	0.954	1.026	1.008	0.961	1.014
2	1.003	0.986	0.995	0.999	0.984	1.006	1.008	0.986	1.007
3	1.045	0.972	1.084	1.039	0.972	1.086	1.022	0.972	1.038

Tabla 6. Valores promedio de los cocientes suelo/roca de los parámetros del movimiento del terreno dentro de cada una de las zonas para la ciudad de Bayamo.

Zone	radial			transversal			vertical		
	AEI	Amax	EPA	AEI	Amax	EPA	AEI	Amax	EPA
1	1.044	0.959	1.075	1.040	0.877	1.086	1.012	1.001	1.023
2	1.030	0.982	1.041	1.032	0.989	1.062	1.020	0.980	1.020
3	1.001	1.018	0.986	1.003	1.015	1.016	1.018	1.014	1.004
4	1.016	0.966	1.012	1.016	0.966	1.025	1.009	0.964	1.007

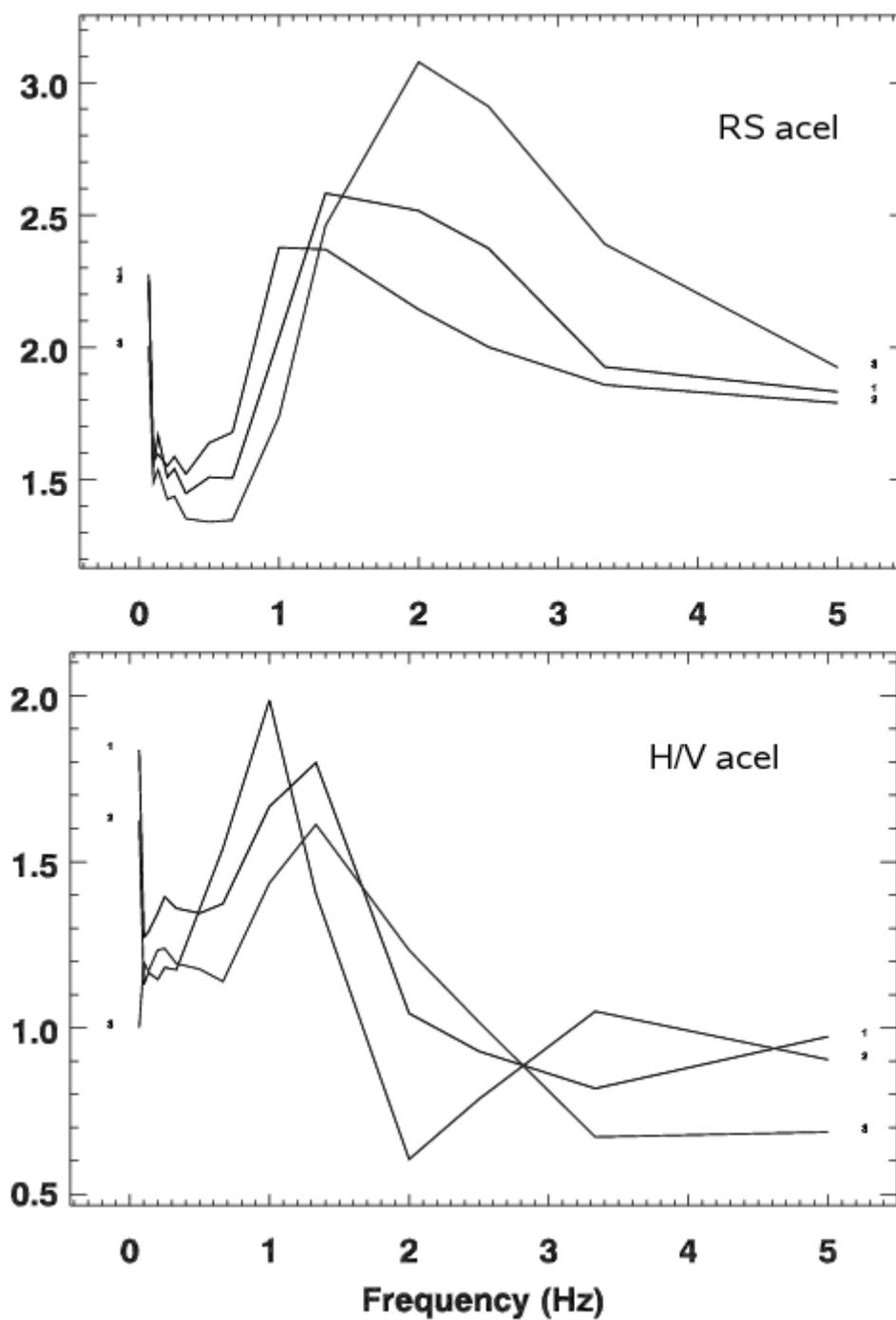


Fig. 14. Curvas medias dentro de cada zona de los cocientes suelo/roca del espectro de respuesta en su componente radial y de la razón H/V (para aceleración) para la localidad de Pílon.

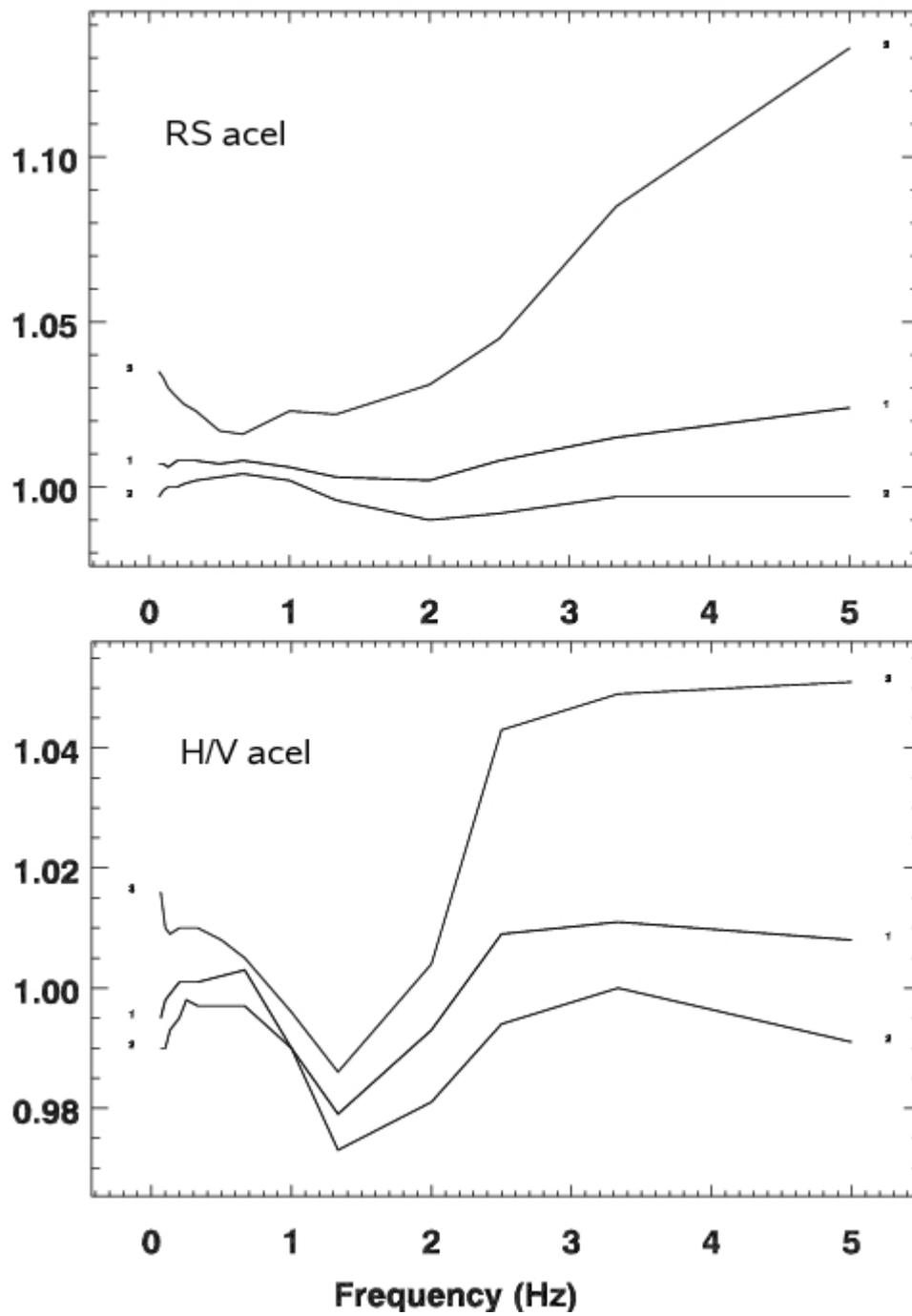


Fig. 15. Curvas medias dentro de cada zona de los cocientes suelo/roca del espectro de respuesta en su componente radial y de la razón H/V (para aceleración) para la ciudad de Manzanillo.

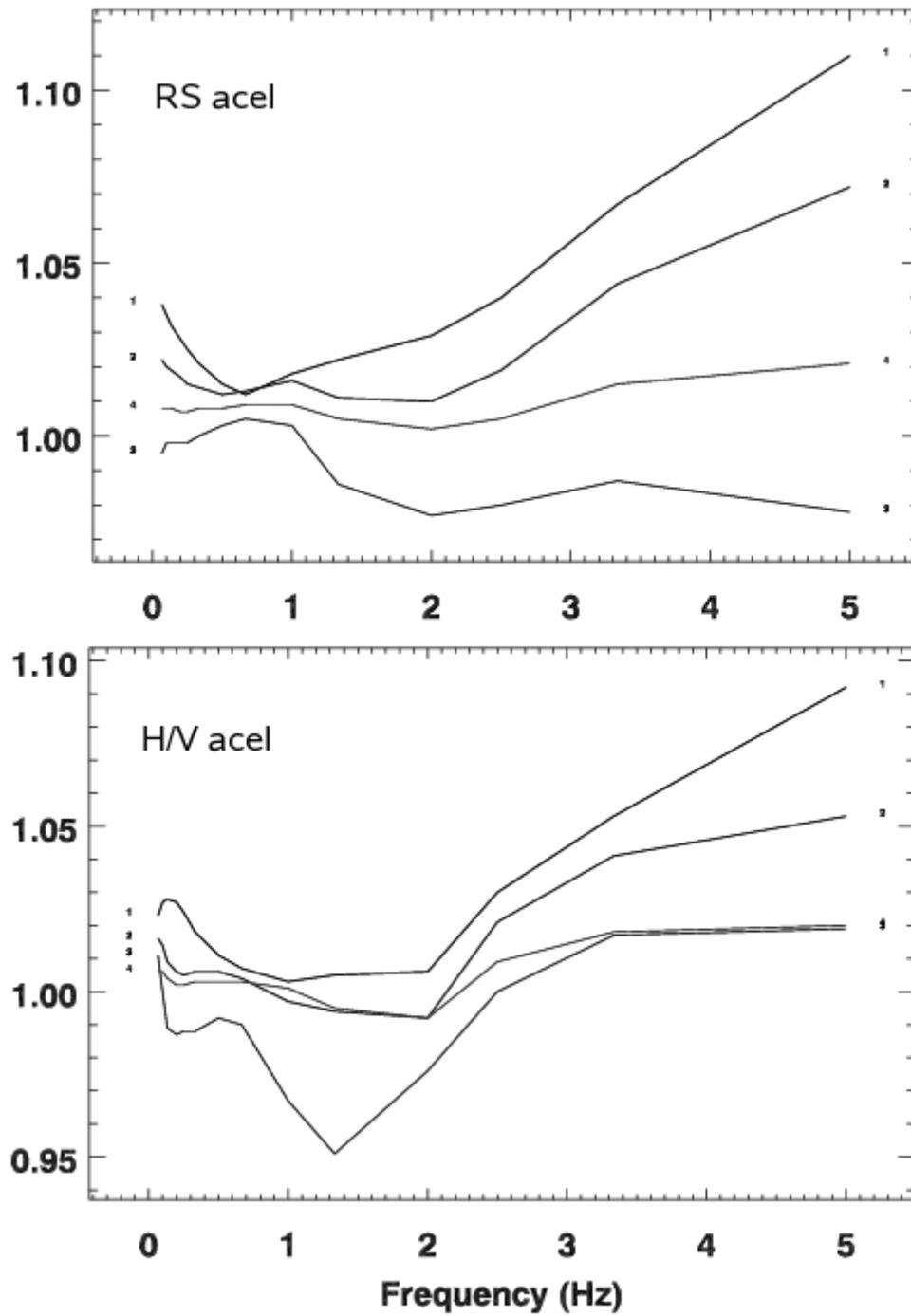


Fig. 16. Curvas medias dentro de cada zona de los cocientes suelo/roca del espectro de respuesta en su componente radial y de la razón H/V (para aceleración) para la ciudad de Bayamo.

Discusión

Los datos que se pudieron recopilar sobre las características ingeniero-geológicas de los suelos en las diferentes localidades estudiadas fueron determinantes a la hora de buscar las variantes de solución del problema de la microzonación sísmica. En el caso de Bayamo y Manzanillo, a pesar de disponerse de una buena base de datos de perforaciones que permitieron llevar los resultados a la categoría de mapas, la profundidad de las mismas por regla general no pasaba de los 20 m, por lo que sólo pudimos estudiar la influencia de las capas más superficiales de los suelos sobre las señales sísmicas. Si bien pudieron identificarse 4 zonas en Bayamo y 3 en Manzanillo, la diferencia de comportamiento ante la ocurrencia de terremotos fuertes no es muy grande, lo que se puede ver en las tablas 5-6 para los parámetros del movimiento del terreno más significativos y en las figuras 15 y 16 para las funciones que dependen de la frecuencia. Por otra parte, en Pílon prácticamente no se pudieron obtener datos de perforaciones, y la estructura tuvo que ser inferida usando perforaciones ubicadas fuera de la ciudad, por lo que sólo se pudo dar una tendencia de comportamiento según nos alejábamos de la costa en dirección NW. Esto fue determinante para que los resultados pudieran darse sólo en forma de esquema. Sin embargo, las pocas perforaciones de que dispusimos permitieron estudiar la influencia de estratos más profundos, lo que se refleja en la mayor variabilidad de los parámetros del movimiento del terreno presentados en la tabla 4 y en las funciones dependientes de la frecuencia en la figura 14.

En este informe se han presentado solamente una pequeña cantidad de los resultados obtenidos, lo que los autores consideraron como más significativo. Por ejemplo en las figuras 14-16 se presentan resultados sólo para la componente radial de la aceleración, Existen resultados similares para las componentes vertical y transversal, así como para desplazamiento, velocidad y pseudovelocidad. En el informe de la tarea 3 se da un listado de todo el material disponible, el cual puede ser consultado según se desee. El proceso de delineado de zonas en cada ciudad se basó fundamentalmente en el procesamiento con un SIG de datos espacialmente distribuidos de parámetros del movimiento del terreno. En este caso los resultados de la clasificación de las curvas con el programa P4 no fue de utilidad en el mismo, a nuestro juicio debido a la baja variabilidad de las funciones a clasificar, lo que contrasta con el método usado en el caso de Santiago de Cuba por Alvarez et al. (2005), donde la delimitación de zonas se basó precisamente en ese tipo de material.

La ventaja que posee este enfoque de la microzonación es que puede ser repetido con muy poco costo si varían los datos básicos de estructura de la corteza y de las cuencas donde están las localidades, así como si se desea probar con otros parámetros de los terremotos de escenario. De hecho el problema está siempre abierto a sucesivas actualizaciones.

Conclusiones

- Se obtuvieron sismogramas sintéticos (aceleración, velocidad y desplazamiento) en tres componentes (radial, transversal y vertical) de las ondas de Love y Rayleigh para puntos ubicados a lo largo de perfiles en las ciudades de Bayamo, Manzanillo y Pílon. Se extrajo de los mismos una amplia información sobre el movimiento del terreno.
- Se prepararon los mapas de microzonación sísmica de Bayamo y Manzanillo así como un esquema de microzonación sísmica de Pílon. Estos mapas sólo muestran una división en zonas que presentan características cuasi-homogéneas ante la ocurrencia de terremotos.
- Las microzonaciones sísmicas se acompañan de una amplia información sobre el comportamiento esperado de los valores relativos suelo/roca de algunos parámetros del movimiento del terreno y de ciertas funciones dependientes de la frecuencia que reflejan características integrales del movimiento del terreno.
- El proceso de cálculo de sismogramas sintéticos y su procesamiento ulterior para obtener las microzonaciones puede ser repetido en cualquier momento en que varíe el conocimiento de la estructura de la corteza y sobre todo de las cuencas sedimentarias donde están ubicadas las ciudades estudiadas.

Bibliografía

- AKI, K. (1987): Strong motion seismology. En: Erdik M.Ö. , Toksöz M.N., ed., Strong ground motion seismology, NATO ASI series,. Series C: Mathematical and Physical Sciences, vol. 204. Dordrecht: Reidel Publishing Company; 1987. p. 3–41.
- ALVAREZ, L.; GARCIA, J.; VACCARI, F.; PANZA, G.F.; GONZALEZ, B.; REYES, C.; FERNANDEZ, B.; PICO, R.; ZAPATA, J.; ARANGO, E. (2004): Ground Motion Zoning of Santiago de Cuba: An Approach by SH Waves Modelling. *Pure and Applied Geophysics*, 161, pp. 1041-1059.
- ALVAREZ, L.; VACCARI, F.; PANZA, G.F.; PICO, R. (2005): Seismic microzoning from synthetic ground motion parameters: case study, Santiago de Cuba. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 25, No. 5, pp. 383-401.
- ALVAREZ, L.; SERRANO, M.; RUBIO, M.; CHUY, T.; GONZÁLEZ, B. (1984): El terremoto del 19 de febrero de 1976, Pilon, región oriental de Cuba. *Investigaciones Sismológicas en Cuba*. No. 5, pp. 5-60.
- BERGE-THIERRY, C.; LUSSOU, P.; HERNÁNDEZ, B.; COTTON, E.; GARIEL, J.C. (1999): Computation of the strong motions during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, combining the k-square spectral source model and the discrete wavenumber technique. In: *Proceedings of the Second International Symposium on the Effects of Surface geology on Seismic Motion, Yokohama, Japan, 1–3 December, 1998; Volume 3, The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Recent Progress and New Horizon on ESG Study*, pp. 1414–1424.
- FÄH, D. (1992), A hybrid technique for the estimation of strong ground motion in sedimentary basins, Ph.D. Thesis, Nr. 9767, Swiss Fed. Inst. Technology, Zurich, 161 pp.
- FÄH, D., IODICE, C., SUHADOLC, P., PANZA, G.F. (1993), A new method for the realistic estimation of seismic ground motion in megacities, the case of Rome, *Earthquake Spectra*, 9, 643-668.
- FÄH, D., SUHADOLC, P. (1994): Application of numerical wave propagation techniques to study local site effects: the case of Benevento, *Pure appl. geophys.*, 143, 513-526.
- FLORSCH, N., FÄH, D., SUHADOLC, P., PANZA, G.F. (1991), Complete synthetic seismograms for high-frequency multimode SH-waves, *Pure appl. Geophys.*, 136, 529-560.
- GUSEV, A.A. (1983): Descriptive statistical model of earthquake source radiation and its application to an estimation of short period strong motion. *Geophys J Roy Astron Soc* 1983;74:787–800.
- MEDVEDEV, S.M. (ed.) (1977): *Seismic Microzoning* (in Russian), Moscow, Nauka, 248 pp.
- PANZA, G.F. (1985), Synthetic seismograms: the Rayleigh waves modal summation, *J. Geophys. Res.*, 58, pp. 125-145.
- PANZA, G. F., ROMANELLI, F., VACCARI, F. (2000): Seismic wave propagation in laterally heterogeneous media: Theory and applications to the seismic zonation, In: *Advances in Geophysics*, Vol. 43, (Academic Press, San Diego) pp. 1-95.
- PANZA, G. F., SUHADOLC, P. (1987), Complete strong motion synthetics. In: *Seismic strong motion synthetics, Computational techniques 4* (ed. Bolt B. A.), Academic Press, pp. 153-204
- SADOVSKII, M. A.; NERSESOV, I.L.; MEDVEDEV, S.V.; LIAMZINA, G.A. (1973) : Main principles of the seismic microzoning (in Russian). *Voprosii Inzheniernoi Seismologii*, No. 15, Moscow, pp. 3-34.