

Ordaz-Hernández, Alexis; Hernández-Santana, José Ramón; Cofiño-Arada, Carlos Enrique; Chuy-Rodríguez, Tomás Jacinto; Méndez-Linares, Ana Patricia

Evaluación geomorfológica y del efecto de sitio como contribución a los estudios de peligrosidad sísmica a escala local: ciudad de San Cristóbal, Cuba occidental

Minería y Geología, vol. 31, núm. 4, octubre-diciembre, 2015, pp. 19-37

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa 'Dr Antonio Nuñez Jiménez'
Holguín, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223543341002>

Evaluación geomorfológica y del efecto de sitio como contribución a los estudios de peligrosidad sísmica a escala local: ciudad de San Cristóbal, Cuba occidental

Alexis Ordaz-Hernández
José Ramón Hernández-Santana
Carlos Enrique Cofiño-Arada
Tomás Jacinto Chuy-Rodríguez
Ana Patricia Méndez-Linares

Resumen

Esta investigación se enfocó en la evaluación geomorfológica del relieve con el objetivo de revelar rasgos de la actividad tectónica reciente como paso previo a la evaluación del efecto de sitio en la ciudad de San Cristóbal, donde tuvo lugar un sismo de intensidad 8 MSK, en 1880. La evaluación geomorfológica del sector montañoso contiguo a la zona sismogénica más cercana, mostró evidencias sobre el carácter activo de la falla Pinar, mediante la aplicación de los indicadores de disección vertical del relieve, incisión fluvial, separación de cuencas, y profundidad y sinuosidad del frente montañoso. Los resultados permitieron clasificar los suelos en tres tipos según su respuesta sísmica y realizar un pronóstico de la variación de la intensidad macrosísmica en función de las características geotécnicas locales, lo cual constituye una herramienta de trabajo para futuros planes de ordenamiento urbano.

Palabras clave: evaluación geomorfológica; tectónica; sismicidad; efecto de sitio; San Cristóbal; Cuba occidental.

Geomorphological assessment and site effects as a contribution to local seismic hazard analysis: San Cristobal, western Cuba

Abstract

This investigation is focused on the relief geomorphological assessment for the identification of the features of the recent tectonic activity prior to the evaluation of the site effects on the city of San Cristobal, where an earthquake measuring 8 MSK on the Richter scale struck in 1880. The geomorphological evaluation of the mountainous sector adjacent to the seismogenic zone showed evidence of the active nature of the Pinar faults, by applying the indicators of the vertical dissection of the relief, river incision, separation of basins, and the depth and sinuosity of the mountainous front. The results allowed classifying the soils into three types according to their seismic response in addition to anticipating the variation of the macro-seismic intensity based on local geotechnical characteristics, which is a tool for future urban planning.

Keywords: geomorphological evaluation; tectonics; seismicity; site effects; San Cristobal; Western Cuba.

1. INTRODUCCIÓN

Para lograr un ordenamiento urbano consistente y acertado, debe tenerse un conocimiento detallado del medio físico y sus posibles impactos sobre la población. Según Lapido & Pereyra (2010) deben considerarse las características de la litología y sus condiciones de meteorización, la estabilidad de las geoformas, los procesos endógenos como sismos o erupciones volcánicas, entre otros aspectos. Este conocimiento debería ser previo a la ocupación para tener un claro panorama de las amenazas naturales del entorno y la capacidad portante de los terrenos sobre los que se va asentar la infraestructura urbana.

Esta investigación estuvo dirigida a apoyar los estudios de peligrosidad sísmica local que se ejecutan sobre escalas superiores a 1: 25 000 y abarcan zonas, cuya extensión es del orden del término urbano o municipal.

El propósito fue revelar rasgos de la actividad neotectónica local para zonas sismogénicas con influencia en un emplazamiento, principalmente aquellas con expresión en el relieve. Por lo general, los estudios geomorfológicos en zonas de baja a moderada sismicidad en Cuba han sido limitados, especialmente en la zona sismogénica Pinar, la más importante del occidente cubano (Figura 1).

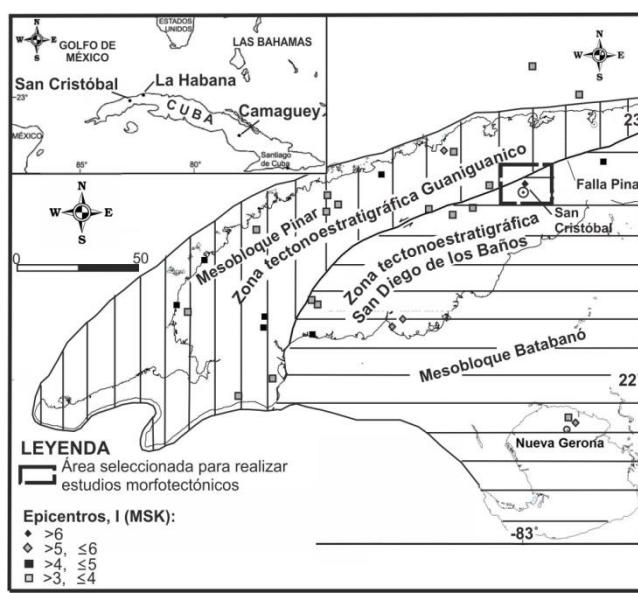


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio. Se muestra la actividad sísmica en el período 1528-2014.

La evaluación geomorfológica del relieve en este caso tuvo el objetivo de revelar rasgos de la actividad tectónica reciente y como paso previo a la evaluación del efecto de sitio. Se conoce como efecto de sitio la modificación del movimiento del suelo en su amplitud, duración

y contenido frecuencial; el mismo tiene un importante papel en el grado de distribución de daños durante un terremoto (Bard 1999 y Vila et al. 2012).

El movimiento del suelo durante un terremoto puede ser amplificado por las condiciones geológicas, geotécnicas y topográficas del terreno, por el que se propagan las ondas sísmicas que provienen del substrato. Para la evaluación de estos factores se emplean métodos indirectos o directos (Mulas de la Peña 1995, 2002; Macau 2008; Zaharia et al. 2008; entre otros). Los primeros permiten estimar parámetros dinámicos o realizar pronósticos de incrementos de intensidad sísmica, mediante ecuaciones empíricas o analogías ingeniero-geológicas, mientras los segundos están basados en el registro de onda sísmica real en el área que se desea estudiar.

Tomando en consideración la actividad neotectónica y reciente de la zona sismogénica Pinar (Díaz & Lilienberg 1989; Orbera et al. 1990; Magaz et al. 1997; Chuy 1999), se realizó la evaluación del efecto de sitio en la zona urbana de la ciudad de San Cristóbal como objetivo principal del presente trabajo.

1.1. Ubicación geográfica y contexto geológico

El territorio estudiado se ubica en la provincia Artemisa, Cuba occidental, entre los $22^{\circ}47'57,8''$ y $22^{\circ}41'6,6''$ de latitud norte y los $83^{\circ}0'1,6''$ y $83^{\circ}9'37,9''$ de longitud oeste, abarcando una superficie de $206,8 \text{ km}^2$. A lo largo del frente montañoso de la zona sismogénica Pinar se evaluaron algunos índices geomorfológicos, como disección vertical, incisión fluvial, separación de cuencas, desarrollo del frente montañoso y sinuosidad del frente montañoso. Posteriormente, se seleccionó un área de $16,2 \text{ km}^2$ (incluida dentro de la primera) entre las coordenadas $22^{\circ}41'37''$ y $22^{\circ}43'23''$, de latitud norte, y $83^{\circ}9'37''$ y $82^{\circ}59'56''$ de longitud oeste para realizar estudios del efecto de sitio (Figura 2).

El área se divide en dos zonas tectono-estratigráficas (ZTE) bien reconocidas: Guaniguanico y San Diego de Los Baños, las cuales aparecen separadas entre sí por la falla "Pinar" subvertical de primer orden. La ZTE San Diego de Los Baños se caracteriza por afloramientos de los depósitos de la cobertura neoplatafórmica (Oligoceno al presente) y constituye un bloque independiente, donde se desarrolla la Cuenca Los Palacios (Figuras 1 y 2), de carácter esencialmente post-orogénico, con una potencia aproximada de 3 km de depósitos neoplatafórmicos.

La ZTE Guaniguanico está formada esencialmente por capas del Jurásico y Cretácico del Paleomargen de América del Norte, sobre las que yacen

sedimentos de una cuenca de antepaís del Terciario inferior. Todas ellas están cubiertas por nappes o mantos tectónicos trasladados en general de sur a norte, que forman una estructura de varios kilómetros de espesor (Piotrowska 1978 y Cobiella et al. 2000).

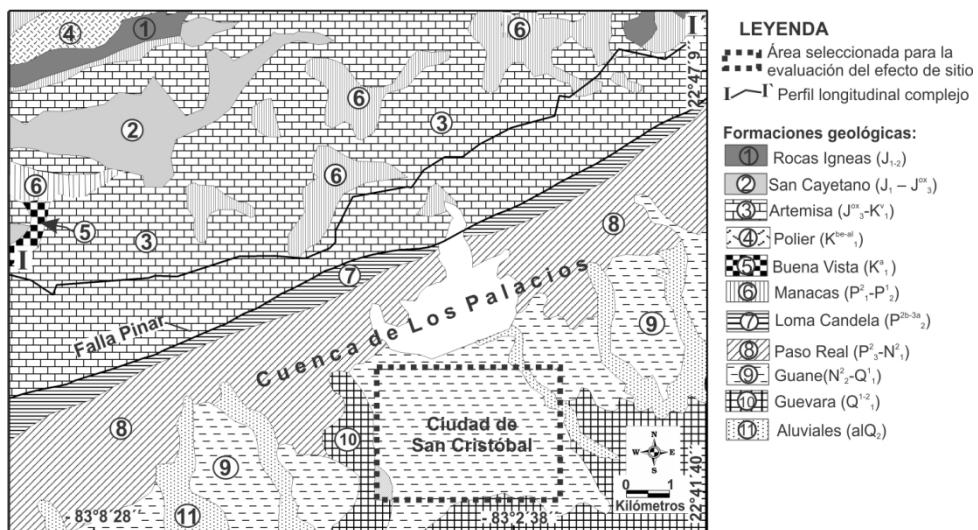


Figura 2. Mapa geológico de la región de estudio. Escala original 1:100 000. (Instituto de Geología y Paleontología de Cuba 2004)

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la evaluación geomorfológica se empleó el modelo digital del terreno y la red hidrográfica, con escala 1: 25 000 del Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía (1981), hoy GEOCUBA, todos actualizados mediante el análisis de imágenes Google Earth del año 2015. La determinación de morfoalineaciones, mediante evidencias geológicas, se realizó utilizando como base el mapa geológico 1: 50 000 del Instituto de Geología y Paleontología (2004).

La información geotécnica empleada en la evaluación del efecto de sitio de la ciudad de San Cristóbal se obtuvo de los informes técnicos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas de Cuba (ENIA), donde se reporta el uso de técnicas de sondeos de penetración estándar y perforación rotaria (Ramos y Torre 1984; Quintáns 1992; Quintáns et al. 1993; Ramos 1993; entre otros). En total se tabularon 77 sondeos, con profundidades variables entre 10 m y 40 m. Ellos incluyen las descripciones de columnas litológicas, ensayos de penetración dinámica estándar (SPT) y resultados de propiedades físicas de los suelos, obtenidos en el laboratorio.

La velocidad de ondas transversales (Vs) en los diferentes tipos de suelos, se estimaron mediante ecuaciones empíricas, las cuales emplean el número de golpes obtenido en el ensayo de penetración estándar

(NG-SPT). En este caso en particular, se empleó la propuesta de Akin et al. (2011), la cual considera la edad, génesis y profundidad de cada estrato estudiado (Tabla 1). Los valores de las estimaciones de Vs fueron comparados (como forma de validación), con mediciones realizadas para suelos de igual génesis en un sitio cercano dentro de la cuenca sedimentaria Los Palacios, donde emplearon el método de sísmica de refracción (Bustio 1988) (Tabla 2).

Tabla 1. Correlaciones empíricas para el cálculo de velocidades de ondas transversales (vs) basadas en el número de golpes del ensayo de penetración estándar N, teniendo en cuenta la profundidad, Z (Akin et al. 2011)

Tipo de suelo	vs (m/s)
Todos los suelos aluviales	$V_s = 59,44N^{0,109}Z^{0,426}$
Arenas aluviales	$V_s = 38,55N^{0,176}Z^{0,481}$
Arcillas aluviales	$V_s = 78,1N^{0,116}Z^{0,35}$
Todos los suelos del Plioceno	$V_s = 121,75N^{0,101}Z^{0,216}$
Arenas del Plioceno	$V_s = 52,04N^{0,359}Z^{0,177}$
Arcillas del Plioceno	$V_s = 140,61N^{0,049}Z^{0,232}$

Tabla 2. Rangos de velocidades de ondas transversales determinados mediante las ecuaciones de Akin et al. (2011) y los estimados por Bustio (1988)

Conjunto facial genético	vs (m/s)	vs (m/s)
	En este estudio	Bustio (1988)
Aluvial reciente	100 - 220*	125**
Aluvial marino del Plioceno-Cuaternario	180 - 330*	200**
Carbonatado del Neógeno	Arcillas carbonatadas Roca	300 - 400* ---
		400** 1070**

*Estimaciones en suelos del emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal (Cuenca Los Palacios).

**Estimaciones en suelos del emplazamiento del complejo hidráulico Río Hondo, Consolación del Sur (Cuenca Los Palacios).

La investigación se estructuró en dos etapas. La primera dirigida a la evaluación de índices geomorfológicos, como indicadores de la actividad neotectónica local. Entre los índices geomorfológicos analizados se encuentran:

- Índice de disección vertical o profundidad de disección (Dv), como reflejo de la magnitud del corte erosivo por unidad de área y se

calcula mediante la fórmula $Dv = H2 - H1$, donde $H2$ y $H1$ representan las altitudes máxima y mínima por unidad de área respectivamente, según Hernández Santana et al. (2009).

- b) Índice de Incisión fluvial (IIF), calculado mediante la relación $IIF = A / H$, donde A es el ancho del valle y H es la profundidad del valle, como promedio de las alturas relativas de los parteaguas en ambas márgenes $H = (H1 + H2) / 2$ (Tapia 2007).
- c) Índice de separación de cuencas (ISC), mediante la relación $ISC = SC / L$, donde SC es la distancia de separación entre cauces de cuencas vecinas y L es la longitud de la cuenca (Tapia 2007).
- d) Índice de desarrollo del frente montañoso (IDFM), que constituye la altura relativa del escarpe tectónico en el frente de montaña, asociado a la falla (Tapia 2007).
- e) Índice de sinuosidad del frente montañoso (ISFM), que relaciona la longitud del pie del frente montañoso (escarpe tectónico) con la longitud de la traza de la falla que lo controla. Se calcula mediante la fórmula $ISFM = Let / Ltf$, donde Let es la longitud del pie del escarpe tectónico y Ltf la longitud de la traza de la falla determinante (Casa et al. 2010).

Una vez demostrada la amenaza sísmica de la Falla Pinar, primeramente por su historia macrosísmica (Salteraín 1884; Chuy 2002; Ordaz 2014) y posteriormente mediante la estimación de índices geomorfológicos indicadores de la actividad neotectónica local, se hicieron estudios detallados del efecto de sitio. La evaluación del efecto de sitio se concentró en la ciudad de San Cristóbal por haber sido esta localidad escenario de los efectos del sismo más fuerte de Cuba occidental (I=8).

La evaluación del efecto de sitio tuvo como objetivo encontrar la aproximación más realista entre los factores de amplificación del terreno y los parámetros geotécnicos del objeto de estudio, lo que implicó realizar clasificaciones del suelo congruentes con las distribuciones de la respuesta sísmica superficial. En busca de este propósito se aplicaron métodos indirectos para solucionar dos tareas básicas: 1. Clasificación de los suelos en perfiles tipos; 2. Pronóstico de la variación de la intensidad macrosísmica.

Para la clasificación de los suelos en perfiles tipos, se empleó como base de referencia las descripciones contenidas en la Norma Cubana Sismorresistente NC 46: 1999 (Tabla 3). La información geotécnica anteriormente descrita permitió clasificar los suelos del según la norma

vigente. La zonificación en tipos de suelos (S1, S2, S3 o S4), según esta norma (para el caso cubano) o cualquier otra clasificación de acuerdo con el área geográfica en estudio (por ejemplo, para España en terrenos I, II, III, IV), debe constituir el nivel de zonificación más elemental para la planificación urbana de una ciudad.

Para la zonación en términos de variación de la intensidad macrosísmica se aplica el método de perfiles geológicos típicos Popov (1959) descrito en Zapata (1997) (Tabla 4).

Tabla 3. Clasificación de los suelos según su comportamiento sísmico (NC 46:1999)

Perfil tipo	Descripción
	Roca de cualquier tipo, sedimentaria o cristalina. Puede caracterizarse por una velocidad de propagación de la onda cortante mayor de 800 m/s.
S1	Suelos rígidos de un espesor menor de 60 m hasta la base rocosa, siempre y cuando los estratos superiores estén compuestos por depósitos estables de arenas, gravas o arcillas duras. Puede caracterizarse por una velocidad de propagación de la onda cortante entre 450 m/s y 750 m/s.
S2	Depósitos estables de suelos no cohesivos o arcillas duras. Los estratos superiores están compuestos por arenas, gravas o arcillas duras. Puede caracterizarse por una velocidad de propagación de una onda de cortante entre 240 m/s y 450 m/s.
S3	Depósitos de arcillas blandas o medias y arenas con espesores de 10 m o más con o sin presencia de capas intermedias de arenas u otra clase de suelos no cohesivos. Puede caracterizarse por una velocidad de propagación de una onda de cortante menor de 240 m/s.
S4	Depósitos de arcilla blanda con espesores mayores de 12 m. Puede caracterizarse por una velocidad de propagación de una onda cortante menor que 150 m/s.

Tabla 4. Método de categorías por perfiles geológicos típicos (Popov 1959) descrito por Zapata (1997). Resumen con la descripción de algunos perfiles

Corte típico	Descripción	Variación de intensidad	Granito como patrón
1	Formaciones rocosas y semirrocosas, macizos cristalinos formando capas potentes compactas, no intemperizadas y no agrietadas, estructuras magmáticas cristalinas densas, formaciones sedimentarias de capas gruesas, metamórficas.	Disminuye 1 ó 2	0
2	Formaciones constituidas por capas menos compactas de rocas y semirrocas de gran potencia con yacencia normal o ligeramente plegadas, sin dislocaciones disyuntivas, no intemperizadas y no agrietadas.	Disminuye 1	0,7-1,1
3	Estratos potentes (no menos de 10 m) de suelo arcilloso seco con yacencia normal o plegada.	No varía	1,2-1,6
4	Estratos potentes (no menos de 10 m) de suelos densos granulares y compactos secos.	No varía	1,2-1,8
5	Capas de suelos rocosos y semirrocosos de escasa potencia (entre 1 y 2 m) que alternan con capas finas de sedimentos friables.	No varía o aumenta 1 en capas estratificadas	1,0-2,0
6	Capas alternas de suelos rocosos y semirrocosos con espesor inferior a 1 m, homogéneos, formando capas no muy potentes (entre 5 y 10 m). También suelos con variaciones faciales bruscas.	No varía o aumenta 1 en capas estratificadas	1,0-2,0
7	Suelos friables de potencia considerable inundados con nivel freático mayor a 5 m.	No varía o aumenta 1 en capas húmedas.	2,0-2,5
8	Suelos friables de potencia considerable inundados con niveles freáticos menores que 5 m o casi en la misma superficie (entre 1 y 3 m).	Aumenta 1	1,6-2,4
9	Suelos friables de menor potencia (entre 5 y 10 m) inundados casi hasta la superficie (entre 1 y 3 m).	Aumenta 1 a 2	1,6-2,0
10	Sedimentos eluviales, rocosos, semirrocosos y arcillosos, semirrocosos en estado seco e inundados, convertidos en fragmentos angulosos. Formaciones friables arenos arcillosas.	Aumenta 1 a 2	1,6-2,9
11	Suelos friables de escasa potencia (menos de 5 m) de capas finas (eluviales y deluviales), yacen sobre la superficie de formaciones	Aumenta 1 a 2	2,3-3,0

Corte típico	Descripción	Variación de intensidad	Granito como patrón
	compactas, se incluyen los contactos deluviales, aluviales y otros tipos.		
12	Suelos arcillosos pantanosos o muy húmedos (lechos de ríos, turberas), inundados de agua hasta la superficie.	Aumenta 1 a 2	2,3-3,9

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Evaluación de índices geomorfológicos

Los índices geomorfológicos se estimaron sobre el perfil I-I', trazado sobre las superficies cumbrales máximas del frente de montaña, asociado al plano tectónico de la falla Pinar. El trazado del perfil ocupa litologías predominantemente carbonatadas, principalmente la formación jurásica Artemisa, lo que descarta la influencia litológica en los diferentes grados de incisión erosiva.

El análisis de estos índices sugiere una diferenciación morfológico-morfométrica del relieve, representada por tres grandes unidades o bloques transversales a la falla Pinar. El análisis cuantitativo revela al bloque occidental (I) como el de mayor actividad neotectónica, presentando una morfología de valles estrechos y muy profundos (Figuras 3 y 4).

Estos resultados mejoran el nivel de conocimiento que hasta el momento se tenía sobre este segmento de la zona sismogénica Pinar, demostrándose la existencia de tres bloques morfotectónicos. La zona de articulación de los citados bloques con la falla Pinar, constituyen zonas de debilidad tectónica y requieren estudios estructurales detallados.

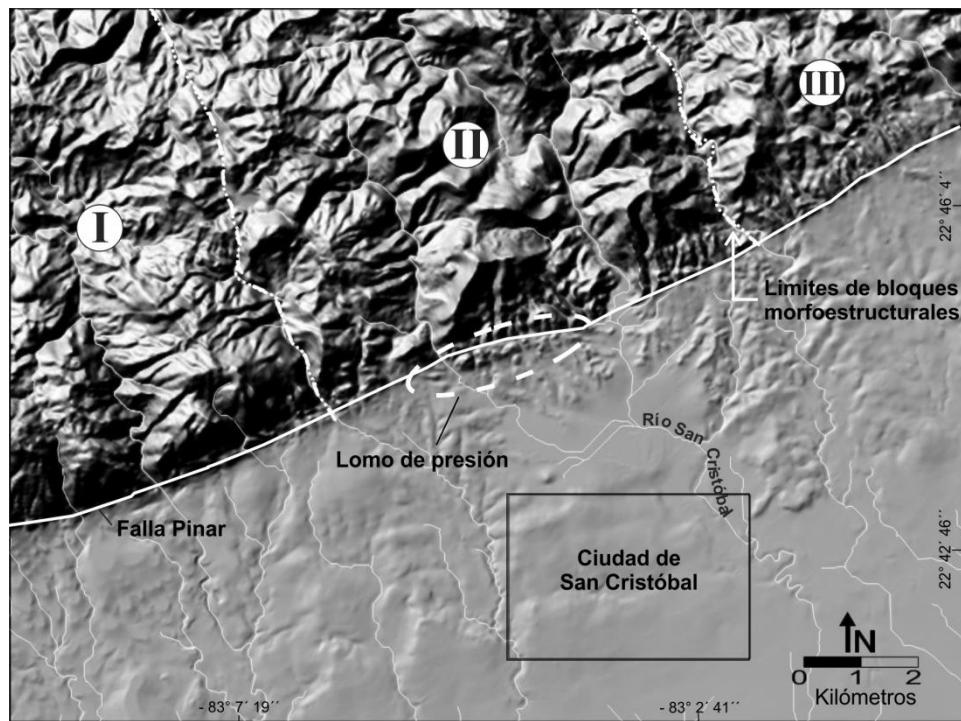


Figura 3. Bloques morfoestructurales sobre el modelo de sombreado del relieve. I. Bloque morfoestructural occidental, II. Bloque morfoestructural central y III. Bloque morfoestructural oriental.

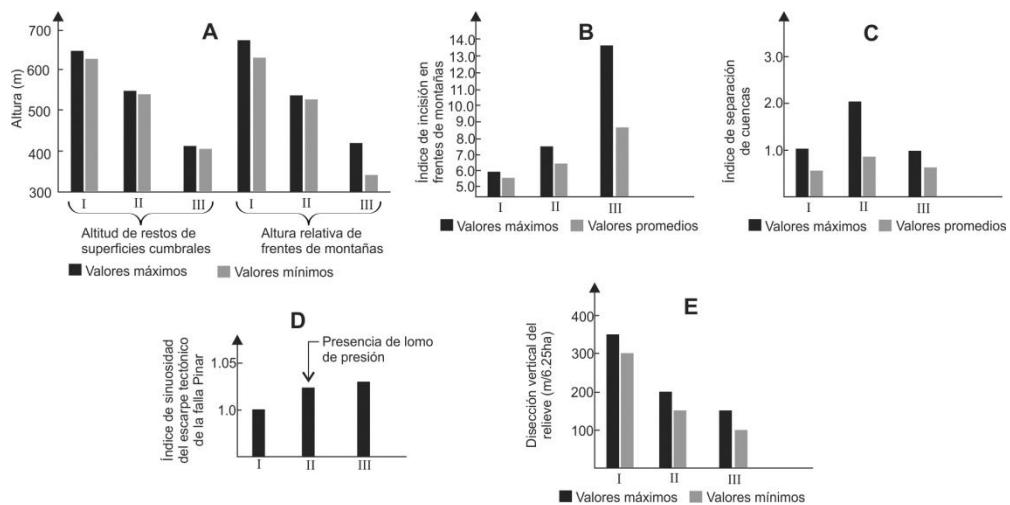


Figura 4. Estimación de índices geomorfológicos indicadores de la actividad neotectónica de la falla Pinar. I, II y III indican los bloques morfoestructurales identificados en el área contigua a la ciudad de San Cristóbal. A: Altura de las superficies cumbrales máximas y relativas al frente de montañas, B: Índice de incisión fluvial, C: Índice de separación de cuencas, D: Índice de sinuosidad del escarpe tectónico de la falla Pinar y E: Índice de Disección vertical.

3.2. Evaluación del efecto de sitio

3.2.1. Clasificación de los suelos en perfiles tipos

De acuerdo con el análisis de las columnas litológicas y descripciones obtenidas en los 77 puntos de documentación ingeniero-geológica, se pudo clasificar en perfiles tipos, según la Norma Cubana Sismorresistente NC 46: 1999, a los tres conjuntos faciales genéticos que se desarrollan en el área (CFG):

- CFG aluvial reciente: Se relacionan espacialmente con las terrazas fluviales del río San Cristóbal, constituidos por arenas poco arcillosas, arenas y gravas arenosas, que clasifican según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como arenas arcillosas (SC) y gravas arcillosas (GC). Son sedimentos poco consolidados, como indica el bajo valor promedio del número de golpes del ensayo de penetración estándar (NG-SPT) de 18. El valor obtenido de velocidad de ondas transversales (~ 142 m/s), mediante las ecuaciones empíricas de Akin et al. (2011), unido a sus características litológicas, le confiere a este CFG, la categoría de tipo S4, según la norma cubana NC 46: 1999.
- CFG aluvial marino del Plioceno-Pleistoceno inferior: La mayor parte de la infraestructura de San Cristóbal descansa sobre este CFG. La distribución espacial y potencia de estos suelos está muy bien definida (Figura 5A), yace sobre las rocas carbonatadas neógenas. Las arcillas, arcillas arenosas y arenas arcillosas con gravas, son las litologías más representativas, las que clasifican por el SUCS, como arcillas inorgánicas de baja compresibilidad (CL), arcillas inorgánicas de alta compresibilidad (CH) y arena arcillosa (SC). El valor del número de golpes del ensayo de penetración estándar (NG-SPT) promedio es de 31 y la densidad natural de $2,03$ g/cm³ (Tipo S2, según NC 46: 1999). En algunos sitios el CFG marino del Plioceno-Pleistoceno inferior, alcanza espesores entre 20 y 40 m, en esas circunstancias se le puede asignar la categoría de suelo tipo S3.
- CFG carbonatado del Neógeno: Este CFG, está representado petrográficamente por alternancias de calizas y margas fosilíferas, alcanzando espesores superiores a los 50 m. El techo del estrato rocoso, generalmente está meteorizado y lo conforman arcillas carbonatadas (CH según el SUCS) con fragmentos de calizas y valores de Vs entre 300 y 400 m/s (Tipo S2, según NC 46: 1999).

El valor de Vs para la roca no meteorizada es de 1070 m/s, lo que corresponde a un material del tipo S1.

En la figura 5B, se realiza la correlación entre algunas propiedades geotécnicas y dinámicas. Las interpretaciones de este análisis demostraron coincidencias espaciales entre sectores con:

- Espesores de sedimentos no consolidados mayor que 25 m, con densidad natural ponderada hasta los 30 m de profundidad (d30), menor que 2,1 g/cm³ y velocidad de ondas transversales equivalente hasta los 30 m (Vs30) inferior a 300 m/s.
- Espesores de sedimentos no consolidados entre 20 y 25 m, con d30 mayor que 2,1 g/cm³ y Vs30 entre 400 y 600 m/s.
- Espesores de sedimentos no consolidados inferiores a los 20 m, con d30 mayor que 2,1 g/cm³ y Vs30 mayor que 600 m/s.

La mayor parte de la ciudad se desarrolla sobre los suelos S2 y S3. Estas aproximaciones contribuyen al conocimiento geotécnico del área, fundamentalmente aplicables a los depósitos de génesis aluvial marino de la cuenca cenozoica Los Palacios, nunca antes evaluados con fines de zonación sísmica detallada en Cuba occidental. La clasificación en perfiles tipos según la Norma Cubana Sismorresistente NC 46: 1999 y su argumentación geotécnica, es una herramienta imprescindible en estudios posteriores de riesgos sísmicos en la ciudad de San Cristóbal. Actualmente las bases de los diseños sismorresistentes parten de la previa clasificación de los suelos.

A modo de ejemplo, y con el propósito de ilustrar algunos de los datos primarios de partida de esta investigación, en la figura 5B se muestra la relación entre la velocidad de ondas transversales, espesor de los diferentes conjuntos faciales genéticos (diferentes litologías presentes en el área) y la densidad natural, información derivada de 88 muestras obtenidas en 77 pozos realizados con diferentes propósitos en investigaciones previas.

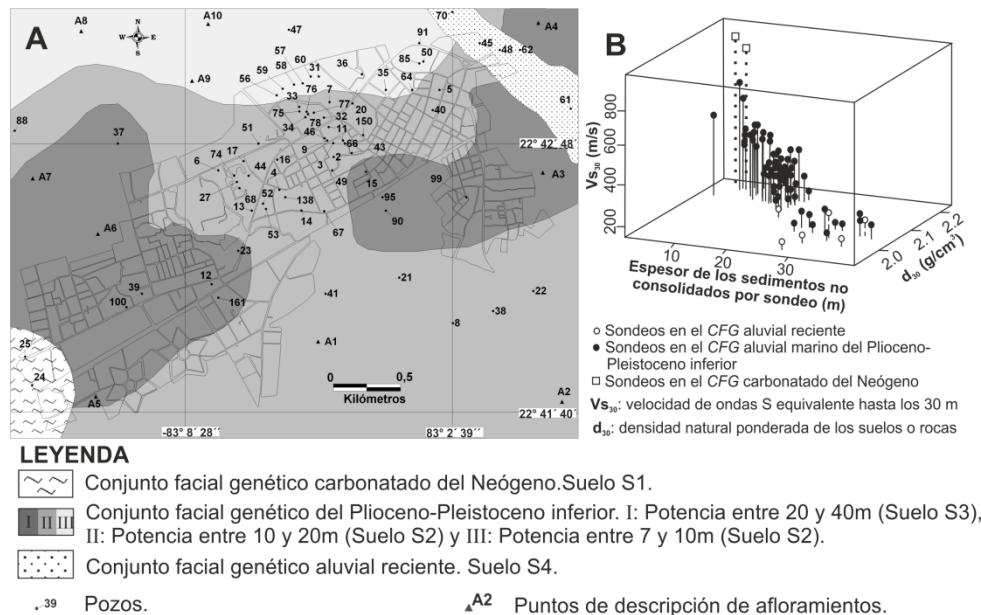


Figura 5. A. Esquema geológico-geotécnico y clasificación sísmica de los suelos según la Norma Cubana Sismorresistente NC 46: 1999, escala original 1: 10 000; B. Correlaciones entre parámetros geotécnicos y dinámicos.

3.2.2. Pronóstico de la variación de la intensidad macrosísmica

Partiendo de las características ingeniero-geológicas de la ciudad de San Cristóbal se definieron cuatro columnas generalizadas (situaciones ingeniero-geológicas típicas). Se tuvo en cuenta la composición litológica, la potencia de los suelos y la profundidad de yacencia de las aguas subterráneas. Posteriormente a cada columna generalizada se le asignó una variación de intensidad sísmica (ΔI), en función de los criterios de Popov (1959), adaptados a las condiciones ingeniero-geológicas locales (Tabla 4, Figura 6). Los criterios de Popov han sido muy aplicados en Cuba en más de una veintena de trabajos técnicos desarrollados por el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Zapata et al. 1991; González 1991; Rivera 1998; González y Pérez 2003; entre otros)

(A)

Capa	Conjunto facial genético	Espesor (m)	N.A. (m)		
				Corte tipo	ΔI
1	Carbonatado del Neógeno	>50	>10	3	No varía

(B)

Capa	Conjunto facial genético	Espesor (m)	N.A. (m)		
				Corte tipo	ΔI
1	Aluvial marino del Plioceno-Pleistoceno inferior	Variable entre 7 y 20 m	<3	8	Aumenta 1
2	Carbonatado del Neógeno	>50			

(C)

Capa	Conjunto facial genético	Espesor (m)	N.A. (m)		
				Corte tipo	ΔI
1	Aluvial marino del Plioceno-Pleistoceno inferior	Variable entre 10 y 40 m	<5	10	Aumenta de 1a 2
2	Carbonatado del Neógeno	>50			

(D)

Capa	Conjunto facial genético	Espesor (m)	N.A. (m)		
				Corte tipo	ΔI
1	AR-ALM	Variable entre 5 y 40 m	<3	12	Aumenta de 1a 2
2	Carbonatado del Neógeno	>50			

AR-ALM: Combinación de sedimentos aluviales recientes (terrazas del río San Cristóbal) y sedimentos aluviales marinos.

N.A.: Nivel de aguas subterráneas

Figura 6. Situaciones ingeniero-geológicas generales de la ciudad de San Cristóbal.

Finalmente se obtuvo el esquema pronóstico de la variación de la intensidad sísmica, donde destacan sectores con posibles incrementos de hasta 2 grados. Estas áreas de máximo incremento, se vinculan a espesores variables de sedimentos no consolidados (en ocasiones alcanzan los 40 m), o a los sedimentos de baja densidad de las terrazas del río San Cristóbal. Sobre el esquema pronóstico de variación de intensidad sísmica, se coloca la ubicación de algunos sitios que experimentaron daños severos durante el terremoto del 23 de enero de 1880 (Figura 7).

Definida la variación de la intensidad sísmica (ΔI), esta puede ser sumada a la intensidad sísmica regional. El grado sísmico regional, en términos de intensidad y recurrencia, generalmente se puede localizar en atlas de peligros sísmicos debidamente actualizados y preferentemente en las normas emitidas para este fin; en el caso cubano la 46:1999 (Oficina de Normalización, 1999). Para San Cristóbal, según los estimados más actualizados (Chuy et al. 2011), para un periodo de

retorno de 100 años se esperan intensidades de 6.0, 6.5, 7.0 y 8.0 grados MSK para suelos S1, S2, S3 y S4 respectivamente.

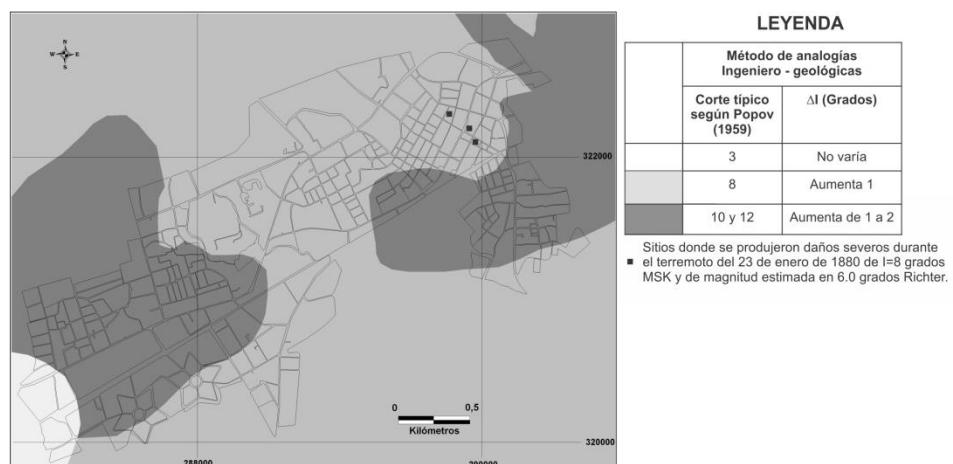


Figura 7. Esquema de variación de la intensidad sísmica, obtenido mediante el método de categorías por perfiles geológicos típicos.

4. CONCLUSIONES

- Las características geomorfológicas sugieren una actividad neotectónica diferenciada, expresada en tres bloques morfoestructurales escalonados y perpendiculares a la falla Pinar, en un sector contiguo a la ciudad de San Cristóbal. La zona de articulación de los citados bloques con la falla Pinar muestra debilidad tectónica, que establece contrastes en el desarrollo neotectónico y el modelado general del relieve, considerándose zonas sísmicas potenciales.
- De acuerdo con las características geotécnicas de los suelos, en la ciudad de San Cristóbal se identifican tres categorías de suelos tipos S1, S2 y S3, según la clasificación de la Norma Cubana Sismorresistente NC 46: 1999. La mayor parte de la infraestructura de la ciudad se desarrolla sobre los suelos S2 y S3.
- En general, la información derivada constituye una herramienta de trabajo para los futuros planes de ordenamiento urbano, pues permite una microlocalización constructiva más adecuada, de acuerdo con las condiciones geotécnicas locales y permite el establecimiento de nuevos diseños sismorresistentes ante dichas condiciones.

5. REFERENCIAS

- AKIN, M.K.; KRAMER, S. & TOPAL, T. 2011: Empirical correlations of shear wave velocity (V_s) and penetration resistance (SPT-N) for different

- soils in an earthquake-prone area (Erbaa-Turkey). *Engineering Geology*, 119:1-17.
- BARD, P.Y. 1999: Microtremor measurements: a tool for site effect estimation In: Irikura, K., Kudo, K., Okada, H., Sasatani, T. (eds.), The Effects of Surface Geology on Seismic Motion - Recent progress and new Horizon on ESG Study, vol. 3, Balkema, Rotterdam, 1251-1279.
- BUSTIO, L.C. 1988: Informe ingeniero-geológico del complejo hidráulico Río Hondo. Archivo técnico, ENIA. Pinar del Río, 35 p.
- CASA, A.; CORTÉS, J.M. & BORGNA, M. 2010: Evidencias de deformación pleistocena en el sistema de falla La Carrera (32°40'-33°15'ls), Cordillera Frontal de Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 67 (1): 91-104.
- CHUY, T. J. 1999: Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación sísmica. Tesis de doctorado. Centro Nacional de Investigaciones sismológicas, Santiago de Cuba. 178 p.
- CHUY, T. J. 2002: Precisión por zonas de la peligrosidad sísmica de Cuba con fines de su desarrollo económico sostenible. Nuevas Investigaciones Sismológicas en Cuba, Ed. Academia, La Habana, 27-36.
- CHUY, T. J.; NOASE, J. L. & INFANTE, Y. 2011: Mapa de peligrosidad sísmica de la provincia Artemisa. Reporte de Investigación. Fondos del CENAIS. Santiago de Cuba, 1 p.
- COBIELLA, J. L.; GIL, S.; HERNÁNDEZ, A. & DÍAZ, N. 2000: Estratigrafía y tectónica de la Sierra del Rosario, Cordillera de Guaniguanico, Cuba Occidental. *Revista Minería y Geología*. 17(1): 5-15.
- DÍAZ, J. L. & LILIENBERG, D. A. 1989: Nuevos datos sobre los movimientos tectónicos recientes en Cuba Occidental. *Reporte de Investigación del Instituto de Geografía* 4:11.
- GONZÁLEZ, B.E. 1991: Estimación del efecto sísmico en la ciudad de Santiago de Cuba. Tesis de doctorado, Instituto de Geofísica y Astronomía, La Habana, 170 p.
- GONZÁLEZ, B.E. & PÉREZ, L. 2003: Utilización de los datos ingeniero-geológicos, hidrogeológicos y tectónicos en la microzonación sísmica de áreas de objetivos económicos importantes". En memorias del V Taller Internacional de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente. Geomin'2003, La Habana, 6 p.
- HERNÁNDEZ-SANTANA, J. R.; BOLLO, M.; MÉNDEZ-LINARES, A. P. & FIGUEROA, M. 2009: Formación y morfogénesis del relieve del extremo noroccidental del Estado de Chiapas, México. *Investigaciones Geográficas*, 68: 25-40.
- Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía 1981: Hojas cartográficas 3584-II-d-2, 3584-II-d-3, 3584.IId-5, 3584-II-d-6, a escala 1:10 000. La Habana, 4 hojas.

- Instituto de Geología y Paleontología 2004: Mapa geológico digital, Hoja Los Palacios 3583. Centro Nacional de Información Geológica. La Habana, 1 hoja.
- LAPIDO, O. R. & PEREYRA, F. X. 2010: Geología urbana y ordenamiento territorial. *Rev. Asociación Geológica Argentina* 66 (4): 459.
- MACAU, A. 2008: Microzonación sísmica. Contribución a los estudios de peligrosidad sísmica a escala local en zonas rurales y urbanas. Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña. 344 p.
- MAGAZ, A.; DÍAZ, J. L. & HERNÁNDEZ, J. R. 1997: Elementos geomorfológicos básicos para el análisis y determinación de zonas de fallamiento activo en las condiciones de Cuba. *Revista Investigaciones Geográficas*. 35: 9-83.
- MULAS DE LA PEÑA, J. 1995: Estudios de microzonación de la peligrosidad y vulnerabilidad sísmica en Alcoy Lorca. En *Memorias de Jornadas sobre Reducción de Riesgos Geológicos en España*. Madrid, España. 21-39.
- MULAS DE LA PEÑA, J. 2002: Microzonación de la respuesta sísmica del terreno por factores locales. In Ayala-Carcedo, FJ y Olcina Cantos, J. (Coords.). *Riesgos naturales*. Ariel. Barcelona, España. 345-362.
- Oficina Nacional de Normalización 1999: Construcciones sismo-resistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción (Norma Cubana-46:1999). La Habana, 1-101.
- ORBERA, L.; GONZÁLEZ, B.; CHUY, T. J., & ORO, J. 1990: Investigaciones sísmicas en la región de emplazamiento del Centro de Investigaciones Nucleares. Secretaría Ejecutiva para Asuntos Nucleares de Cuba, 1-344.
- ORDAZ, A. 2014: Evaluación de las condiciones ingeniero-geológicas para el pronóstico de la respuesta dinámica de los suelos. Caso de estudio: ciudad de San Cristóbal, Cuba occidental. Tesis de Doctorado Universidad de Pinar del Río, Cuba. 171 pp.
- PIOTROWSKA, K. 1978: Nappe structures of Sierra de los Órganos, Western Cuba, *Acta Geol.* (20): 97-170.
- POPOV, V. V. 1959: Criterios ingeniero-geológicos de la zonación sísmica detallada. *Sismología Ingenieril* (2): 1-40.
- QUINTÁNS, M.; RAMOS, G.; GARCÍA, J. A. & SARMIENTO, J. 1993: Informe ingeniero geológico túneles populares San Cristóbal. Archivos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, Unidad de Investigaciones para la Construcción de Pinar del Río, 30p.
- QUINTÁNS, M. 1992: Informe ingeniero geológico torres de iluminación campo de fútbol. Archivos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, Unidad de Investigaciones para la Construcción de Pinar del Río, 29p.
- RAMOS, F. & DE LA TORRE, P. 1984: Informe ingeniero geológico envasadero de oxígeno. Archivos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, Unidad de Investigaciones para la Construcción de Pinar del Río, 16p.

- RAMOS, G. 1993: Investigación Ingeniero-Geológica. Túneles Populares de San Cristóbal. Archivo Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, 70p.
- RIVERA, Z. 1998: Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Manzanillo. Escala 1:10 000. Informe Técnico. Archivos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba, 48 p.
- SALTERAÍN, P. 1884: Ligera reseña de los temblores de tierra ocurridos en la Isla de Cuba. *Anales de la Academia de Ciencias de La Habana* 21: 203-218.
- TAPIA, A.A. 2007: Neotectónica del sistema de fallas Soná-Azuero, Región de Los Santos, Panamá. Tesis de Maestría Universidad de Panamá. 125p.
- VILA, S.; MACAU, A.; BELVAUX, M.; TARRES, M.; MORENO, B.; GASÀ, A.; VIDAL, T. & GOULA, X. 2012: Caracterización de efectos sísmicos locales en la ciudad de Lorca. *Física de la Tierra* 24: 235-254.
- ZAHARIA, B.; RADULIAN, M.; POPA, M.; GRECU, B.; BALA, A. & TATARU, D. 2008: Estimation of the local response using the Nakamura Method for the Bucharest area. *Romanian Reports in Physics*. 60(1) 131-144.
- ZAPATA, J.A. 1997: Utilización de variantes Metodológicas de microzonificación Sísmica en la ciudad de Santiago de Cuba. Tesis de Opción al Grado de Doctor en Ciencias Geofísicas. Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. 122 p.
- ZAPATA, J.A.; GONZÁLEZ, B.E.; PÉREZ, L.D.; FERNÁNDEZ, A.I. & FERNÁNDEZ, B. 1991: Determinación de las variaciones de la intensidad sísmica de base en los territorios urbanos. II Encuentro Nacional de Ingenieros Geofísicos, ISPJAE, La Habana.

Alexis Ordaz-Hernández. alexisordaz.1978@gmail.com

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor-Investigador. Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), México.

José Ramón Hernández-Santana. santana@igg.unam.mx

Doctor en Ciencias Geográficas. Investigador Titular A. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Carlos Enrique Cofiño-Arada. ceniques@geo.upr.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad de Pinar del Río (UPR), Cuba.

Tomás Jacinto Chuy-Rodríguez. chuy@cenaism.mx

Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular. Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIS), Cuba.

Ana Patricia Méndez-Linares. patyml@igg.unam.mx

Maestra en Ciencias. Especialista en SIGs. Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México.