

Contribución a la gestión de riesgos urbanos en la ciudad de Pinar del Río mediante un modelo geológico-geotécnico 3D

Alexis Ordaz-Hernández

Resumen

El trabajo tuvo por objetivo elaborar el modelo geológico-geotécnico en tres dimensiones (MGG-3D) para el corte cenozoico más superficial de la ciudad de Pinar del Río (Cuba). El modelo podrá ser utilizado como base interpretativa de los fenómenos geotécnicos que surjan en el entorno urbano. El procedimiento seguido es fácilmente reproducible en otros casos de estudios a nivel mundial, especialmente donde se cuente con un volumen considerable de información geotécnica. En el modelo elaborado se identificaron seis tipos ingeniero-geológicos (TIG): rellenos artificiales, capa vegetal, aluvial marino grueso, aluvial marino fino, eluvial y rocoso. El MGG-3D permite visualizar la disposición espacial de los TIG anteriormente mencionados y puede contribuir notablemente a la toma de decisiones en la planificación urbana.

Palabras clave: geotecnia; modelo geológico-geotécnico; tipos ingeniero-geológicos; ordenamiento urbano.

Contribution to the management of urban risks in Pinar del Río city using a 3D geological-geotechnical model

Abstract

The objective of this paper is to elaborate a geological-geotechnical model in three dimensions for the Cenozoic section which is the shallowest of Pinar del Rio City. It is intended that the model obtained is used in future as an interpretative basis for geotechnical phenomena arising in the urban environment. The procedure followed can be easily applied to other worldwide studies, mainly in the areas that exist a big volume of geotechnical information. The procedure followed can be easily reproduced in other study cases worldwide, specifically counting on a wide volume of geotechnical information. Six Engineering Geological Types (EGT) are identified in the model, namely, Artificial fill, Vegetation layer, Marine alluvial coarse grained soil, Marine alluvial fine grained soil, Eluvial soil and Bed rock. The 3D geological-geotechnical model illustrates the spatial arrangement of the EGT above, and can contribute significantly at decision making in urban planning.

Keywords: geotechnics; geological-geotechnical model; geotechnical types; urban planning.

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos geológico-geotécnicos (MGG) constituyen una simplificación de la realidad; esta simplificación u omisión de detalles puede estar originada por desconocimiento o simplemente por el estricto interés de la investigación. Los MGG han evolucionado paralelamente a las técnicas asistidas por computadoras, desde los modelos en dos dimensiones (2D) hasta los actuales modelos tridimensionales (3D), pero en todos los casos han tenido como propósito representar espacialmente las unidades básicas de información geotécnicas (UBIG), las que pueden variar en función de la escala y finalidad del estudio.

Un término ya recurrente en publicaciones recientes es el de "geología urbana" (Neumann, Schönberg & Strobel 2006; Lapido & Pereyra 2010; Banlayá *et al.* 2013). El término geología urbana es aplicado a la solución de las problemáticas de génesis geológica en ciudades donde se emplean generalmente como unidades básicas para los modelos geológico-geotécnicos las siguientes:

- Formación de rocas precuaternarias: espacialmente indican un conjunto de facies unidas paragenéticamente según un ciclo geotectónico.
- Conjunto facial genético: Conjunto de rocas o suelos surgidas en las mismas condiciones faciales.
- Tipo petrográfico: Rocas o suelos de una misma composición mineralógica y con la misma estructura y textura.
- Tipo ingeniero-geológico: Parte de cierto tipo petrográfico caracterizado por la homogeneidad de las cualidades geotécnicas de los suelos o rocas.

Los MGG tienen un amplio rango de aplicaciones. La aplicación inmediata consiste en la identificación de las características litológicas, geomorfológicas y estructurales del objeto de estudio. De esta primera aplicación se pueden inferir las características del medio por donde eventualmente circularía el agua subterránea, y se puede determinar la predisposición o susceptibilidad del medio a la ocurrencia de procesos geológicos generadores de peligros geotécnicos, cuyos métodos de predicción siempre llevan implícito la variable litología.

Una aplicación, poco conocida, se refiere al vínculo estrecho entre el modelo geológico-geotécnico y la modelación de propiedades físicas o mecánicas. En este caso la geometría de la unidad básica de información es empleada como límite virtual para la estimación de la propiedad de interés (Rienzo,

Oreste & Pelizza 2008; Ordaz 2013; Chinthaka 2015, entre otros). Con esta aplicación se logra reducir considerablemente las incompatibilidades entre la interpretación cuantitativa, concebidas en función de un parámetro geotécnico y la realidad del medio físico.

Los primeros trabajos de generalización y sistematización del conocimiento geológico-geotécnico para la ciudad de Pinar del Río (caso de estudio seleccionado) fueron desarrollados por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA). El primer trabajo cartográfico se denominó "Esquema ingeniero-geológico de la ciudad de Pinar del Río" (Aguado 1993); este trabajo se realizó en formato analógico y contó con una densidad de puntos de documentación ingeniero-geológicos (PDIG) de 4,3 PDIG/km². En este caso se adoptó como UBIG el conjunto facial genético, donde se definieron cuatro conjuntos:

- 1) secuencia terrígena del Paleógeno (formación Capdevila),
- 2) secuencias terrígenas-carbonatadas del Neógeno (formación Paso Real),
- 3) depósitos aluvial-marino (formación Guane) y
- 4) depósitos aluviales.

Posteriormente, la ENIA elaboró un segundo esquema (Govea 2014), elaborado sobre plataforma de sistema de información geográfica y con 6,4 PDIG/km². En esta segunda versión del esquema ingeniero-geológico se adoptaron los mismos conjuntos faciales genéticos establecidos por Aguado (1993), cuyos límites espaciales sufrieron ligeras modificaciones, debido al conocimiento superior adquirido del área de estudio.

Ambos esquemas conforman importantes referentes para los estudios geotécnicos del sitio. Sin embargo, tienen limitaciones especialmente relacionadas con la interpretación en la dirección vertical. Además, sus memorias descriptivas están sesgadas al uso del suelo como base de cimentaciones, siendo prácticamente nulas las interpretaciones aplicadas a los peligros geotécnicos (carso, subsidencias, expansibilidad de los suelos, sufusión, respuesta sísmica, entre otros).

Tomando como base los antecedentes expuestos, este trabajo se propone como objetivo elaborar el modelo geológico en tres dimensiones para la ciudad de Pinar del Río. Se pretende que el modelo obtenido se utilice como base interpretativa para predecir los fenómenos geotécnicos que surgen en el entorno urbano. Además, la representación gráfica obtenida constituirá el modelo geométrico para la estimación espacial de propiedades geotécnicas (modelo geomecánico) en trabajos posteriores. Ejemplos de modelos

similares se han realizado en Alicante (España) (Tomás *et al.* 2004), en Thames Gateway (Inglaterra) (Royse, Reeves & Gibson 2008), en Turín (Italia) (Rienzo, Oreste & Pelizza 2008), entre otros casos a nivel internacional.

1.1. Ubicación geográfica y características geológicas del área de estudio

El área de estudio se ubica en el sector más occidental del Caribe, exactamente en el oeste de Cuba. Administrativamente el área de estudio pertenece a la provincia de Pinar del Río y abarca parte del municipio homónimo.

La investigación se enfoca en la ciudad de Pinar del Río, principal centro administrativo y político de la provincia; con una población de aproximadamente 150 000 habitantes. Los límites de la ciudad son irregulares, cubre una superficie de 31,0 km² y las coordenadas geográficas de su centro son: latitud norte 22°25' y longitud este 83°42' (Figura 1).

Desde el punto de vista geológico existe predominio de formaciones geológicas recientes, formadas en la cuenca cenozoica Los Palacios (Figura 2). Las rocas más antiguas que afloran en la ciudad de Pinar del Río pertenecen al Grupo Mariel, de edad Eoceno Inferior parte baja, constituido por areniscas polimícticas, limolitas, argilitas y conglomerados. Sobre este complejo vulcano-sedimentario se han depositado discordantemente las formaciones geológicas de composición terrígeno-carbonatadas, con una yacencia horizontal y sub-horizontal y edades desde el Eoceno Inferior al Mioceno Superior (formaciones Universidad y Paso Real).

Sobre las formaciones terrígeno-carbonatadas del Eoceno Inferior-Mioceno Superior yacen los sedimentos del Plioceno-Pleistoceno Inferior, representados en este caso de estudio por la formación Guane. Esta formación está constituida especialmente por gravas, arenas y arcillas arenosas; depositadas en un ambiente marino poco profundo con abundante aporte aluvial (Cabrera & Peñalver 2001). En la parte superior de la cuenca cenozoica Los Palacios se ubican los depósitos aluviales del Holoceno. Estos ocupan las primeras terrazas de los ríos presentes en el área, constituidas por arenas, arenas arcillosas y arcillas arenosas; sus espesores varían de 1,0 m hasta 5,0 m (Barrios *et al.* 1988).

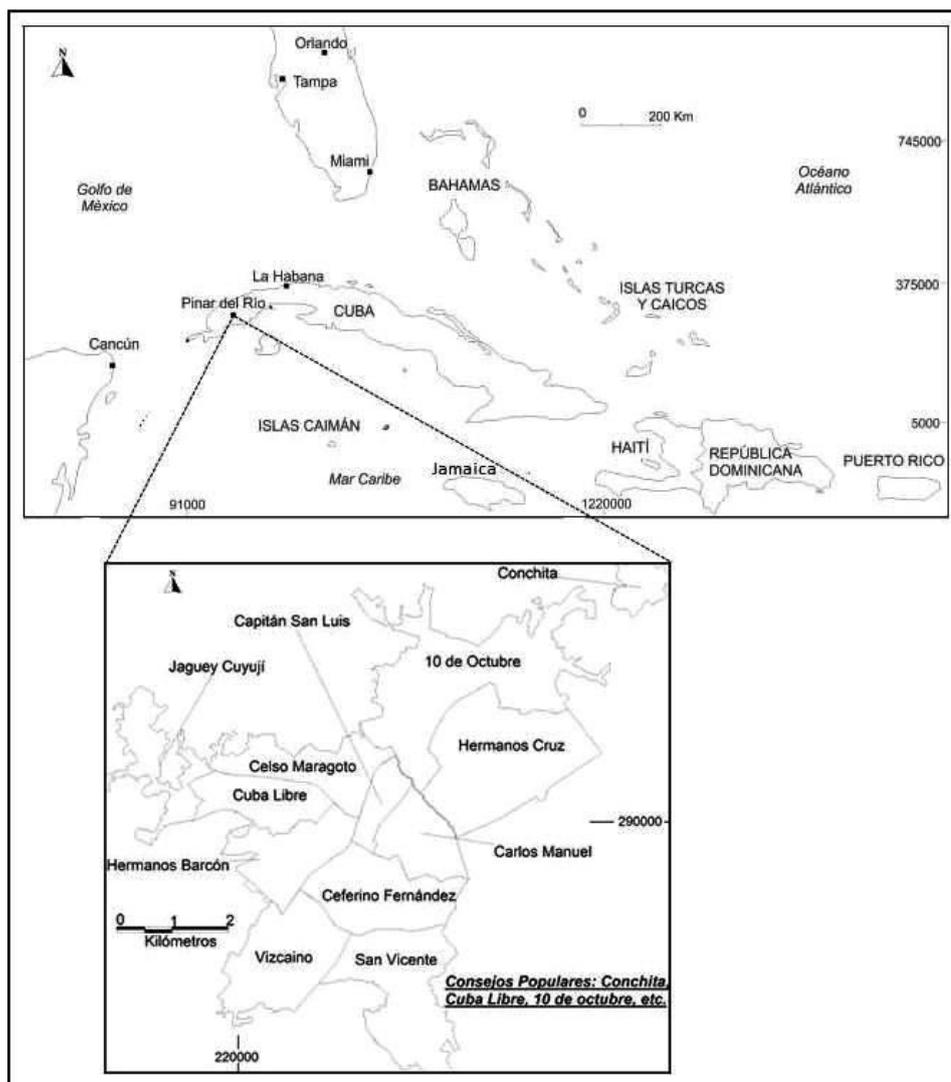


Figura 1. Ubicación geográfica de la ciudad de Pinar del Río y de sus consejos populares en el contexto del Caribe.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la confección del MGG de la ciudad de Pinar del Río se empleó la información geotécnica proveniente de 890 perforaciones, distribuidas en los 31,0 km² de la ciudad. Estas se realizaron con diferentes fines y con una profundidad mínima de 5 m y máxima de 25 m. Las perforaciones fueron ejecutadas por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, entre los años 1962 y 2015 (Figura 3).

Un segundo dato de partida para alcanzar el objetivo previsto en esta investigación lo constituyen los valores promedios de las propiedades físicas y mecánicas de los diferentes tipos ingeniero-geológicos (TIG) que conforman el corte geotécnico. Esta información se obtuvo de los trabajos de Govea (2014), Gilbert (2014) y Chinthaka (2015).

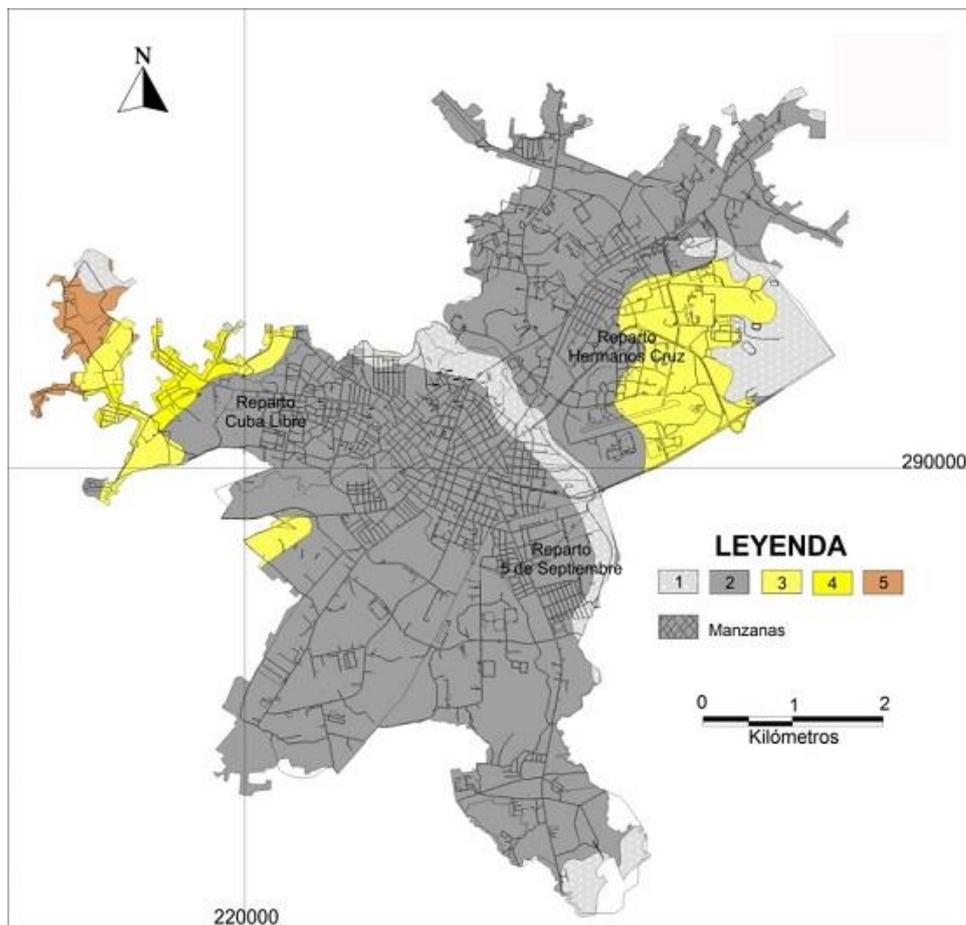


Figura 2. Mapa geológico para la ciudad de Pinar del Río, escala original 1: 100 000, modificado del Instituto de Geología y Paleontología de Cuba (2006). 1: depósitos aluviales del Holoceno, 2: formación Guane de edad Plioceno-Pleistoceno Inferior, 3: formación Paso Real (Oligoceno Superior), 4: formación Universidad (Eoceno Inferior), 5: Grupo Mariel (Eoceno Inferior parte baja).

El MGG-3D de la ciudad de Pinar del Río cubre la parte más superficial del corte cenozoico, especialmente en sus primeros 20 m. A esta profundidad ocurren los principales procesos de interacción cimentaciones-fenómenos geotécnicos. La confección del modelo siguió los siguientes pasos:

1. Elaboración de base de datos
2. Definición de los tipos ingeniero-geológicos que conforman el corte superficial cenozoico de la ciudad de Pinar del Río
3. Establecimiento del orden estratigráfico de los TIG
4. Modelación geométrica e interpretación.

La base datos confeccionada presenta seis atributos: (1) código de la perforación, (2) coordenadas, (3) cota, (4) tipo ingeniero-geológico, (5)

profundidad del piso y el techo de cada tipo ingeniero-geológico y (6) profundidad total de la perforación.

La definición de los TIG se fundamentó en los siguientes aspectos:

- Descripciones litológicas contenidas en los 890 reportes de perforaciones (columnas litológicas).
- Propiedades físico-mecánicas de los suelos y/o rocas presentes en el sitio (homogeneidad de las cualidades geotécnicas).
- Clasificaciones previas realizadas por otros investigadores (Aguado 1993; Govea 2014; Gilbert 2014 y Chinthaka 2015). La revisión detallada y asimilación de los tipos ingeniero-geológicos, descritos en los trabajos citados, permite la homogenización de la información y evita la aplicación de nuevos calificativos, para estratos con iguales características ya descritos con anterioridad.

Para el procesamiento de la información es necesario asignarle al programa computarizado empleado (RockWorks 15) el orden estratigráfico de las diferentes capas de suelos y/o rocas a modelar. En este caso de estudio se realizó un análisis de frecuencia de aparición de cada uno de los diferente TIG en las diferentes posiciones en el corte.

Posterior al establecimiento del orden estratigráfico se procede a la representación espacial de los diferentes TIG que componen los 20,0 m superiores del corte Cenozoico de la ciudad de Pinar del Río (modelación geométrica). La superficie topográfica se generó a partir del modelo digital del terreno con escala 1: 10 000 de la ciudad. El proceso automatizado se realizó con el software RockWorks 15. La modelación geométrica permite definir la posición espacial (profundidad de yacencia, espesores y distribución) de los tipos ingeniero-geológicos, sobre los cuales se emplaza la ciudad de Pinar del Río. Finalmente se concluye el proceso, con interpretaciones geotécnicas vinculadas especialmente a los diferentes fenómenos geotécnicos que pueden ocurrir en el subsuelo y que, de alguna forma, afectan o afectarán la infraestructura de la ciudad de Pinar del Río.

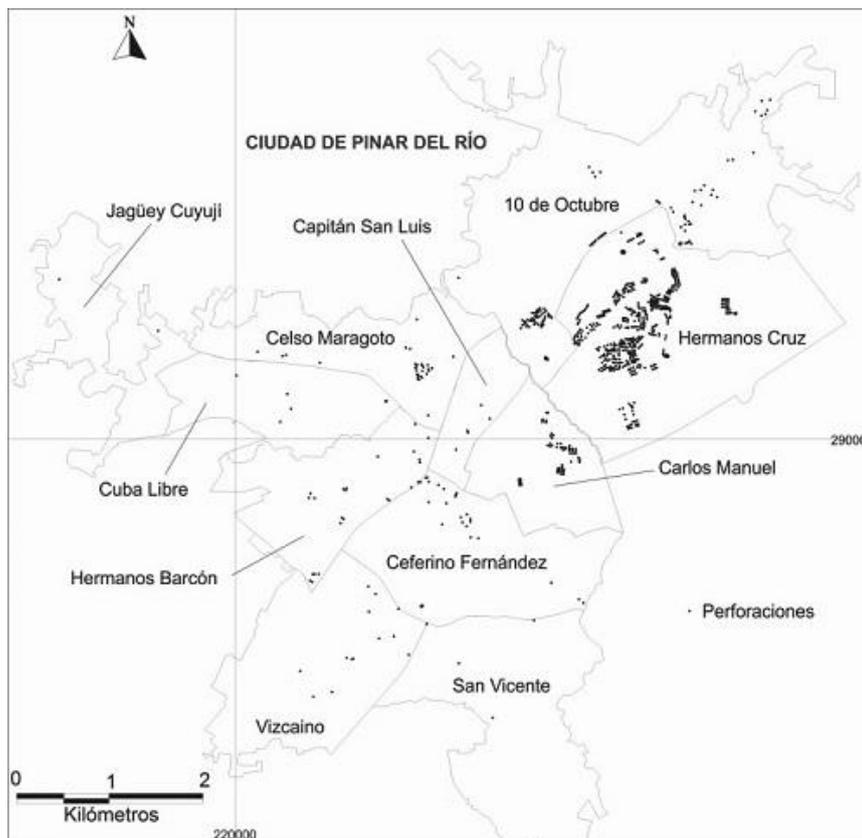


Figura 3. Distribución de perforaciones en la ciudad de Pinar del Río.

El proceso interpretativo se sustenta, desde el punto de vista técnico, en tres elementos: (1) en la modelación geométrica obtenida en este trabajo, (2) en la información geotécnica precedente que caracteriza cada TIG (Govea 2014; Gilbert 2014 y Chinthaka 2015) y (3) en los resultados de trabajos contenidos en la literatura especializada en geotécnica; en los cuales, a partir de sólidas argumentaciones, se relacionan litologías con fenómenos geotécnicos (Siyahi & Ansal 1999; González de Vallejo 2002; Redolfi 2007, Chávez & Guardado 2008, entre otros).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Unidades ingeniero-geológicas

Como se argumentó anteriormente, la unidad básica de información seleccionada para el modelo geológico-geotécnico de la ciudad de Pinar del Río es el TIG. De acuerdo con las descripciones litológicas contenidas en los 890 reportes de perforaciones, las propiedades físico-mecánicas de los suelos y rocas presentes en el sitio y las clasificaciones previas para el área se definen seis TIG (Tabla 1):

- 1) Relleno artificial
- 2) Capa vegetal

- 3) Aluvial marino grueso
- 4) Aluvial marino fino
- 5) Eluvial
- 6) Rocoso.

Tabla 1. Características generales de los tipos ingeniero-geológicos identificados en la ciudad de Pinar del Río

Tipo ingeniero-geológico	Unidad geológica	Edad	Litológica
Relleno artificial	-	-	Mezclas de materiales con alta heterogeneidad granulométrica, con espesores entre 1,0 m y 3,0 m
Capa vegetal	-	Holoceno	Materia orgánica muy compresible
Aluvial marino grueso	Formación Guane	Plioceno-Pleistoceno inferior	Arenas, arenas arcillosas y gravas arenosas que clasifican según el Sistema Unificado de Suelos (SUCS) como arenas arcillosas (SC) y gravas arcillosas (GC). Fase arenosa de la formación Guane
Aluvial marino fino	Formación Guane	Plioceno-Pleistoceno inferior	Clasifican según el SUCS como arcillas de alta plasticidad (CH) y arcillas de baja plasticidad (CL). Fase arcillosa de la formación Guane
Eluvial	Formación Paso Real	Oligoceno superior	Suelos o semirrocas que pertenecen a la parte superior de las unidades geológicas: Paso Real, Universidad y Mariel. Existe predominio de arcillas carbonatadas con fragmentos de calizas de tamaños variables
	Formación Universidad	Eoceno inferior	
	Grupo Mariel	Eoceno Inferior parte baja	
Rocoso	Formación Paso Real	Oligoceno superior	Conforma la parte basal del área de estudio. Está compuesta por alternancias de calizas y margas
	Formación Universidad	Eoceno inferior	
	Grupo Mariel	Eoceno Inferior parte baja	

De acuerdo con el origen y las edades de cada uno de los depósitos citados en la Tabla 1 la parte alta de corte estratigráfico sería ocupada por los rellenos artificiales y la parte baja por el tipo ingeniero-geológico rocoso. Este último, además de ocupar la base del corte cenozoico, también aflora en las zonas positivas del relieve y en algunos cauces fluviales.

3.2. Modelación de las unidades ingeniero-geológicas

La representación espacial en tres dimensiones de las unidades ingeniero-geológicas (Figuras 4, 5 y 6) muestra una amplia heterogeneidad en superficie. La heterogeneidad más evidente se concentra en el perímetro de la ciudad (Figura 4), donde confluyen el total de los tipos ingeniero-geológicos identificados. Al mismo tiempo es el sector mejor estudiado de la ciudad. Sin embargo, la variabilidad descrita es exclusiva de los primeros 10 m de profundidad (en ocasiones hasta los 20 m), a partir de esta profundidad se evidencia una homogeneidad notoria representada por el tipo ingeniero-geológico rocoso (formación Paso Real, formación Universidad y el Grupo Mariel (Figuras 5 y 6).

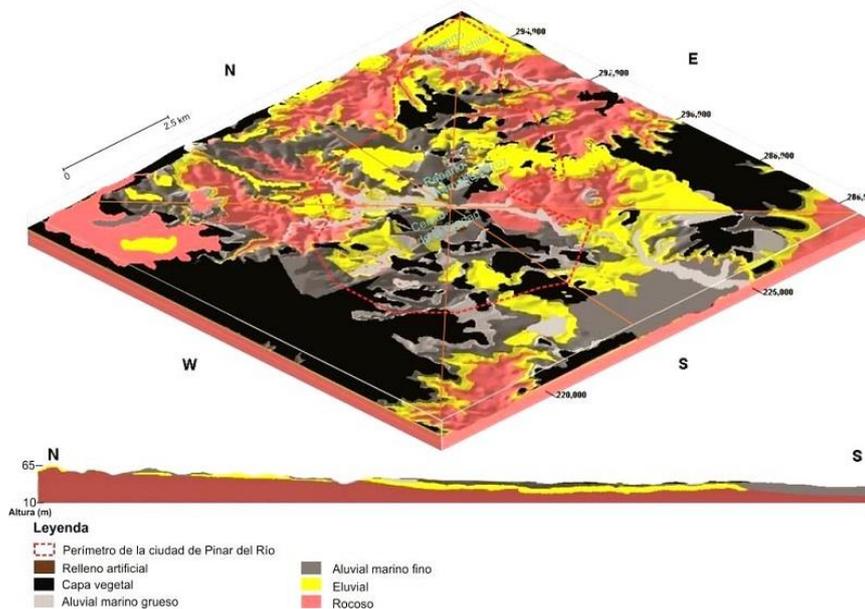


Figura 4. Modelo geológico para la ciudad de Pinar del Río. Cuba Occidental. Obsérvese como se concentran los espesores más pronunciados de tipos ingeniero-geológicos no consolidados.

De manera general, se demuestra que los espesores más pronunciados (entre 10 m y 20 m), de tipos ingeniero-geológicos no consolidados, se localizan al sur de la ciudad de Pinar del Río, coincidiendo con las zonas de relieve más deprimidas. En el perfil norte sur (N-S) de la Figura 4 resalta la continuidad lateral del TIG aluvial marino fino.

La Figura 6 muestra dos cortes orientados en direcciones ortogonales. La vista revela una buena relación en la ocurrencia de los tipos ingeniero-geológicos "eluvial" y "rocoso" con las zonas positivas del relieve (en este caso superiores a los 40,0 m sobre el nivel medio del mar); quedando reservados las pequeñas depresiones y los sectores llanos para la acumulación de los TIG aluviales marinos finos y gruesos.

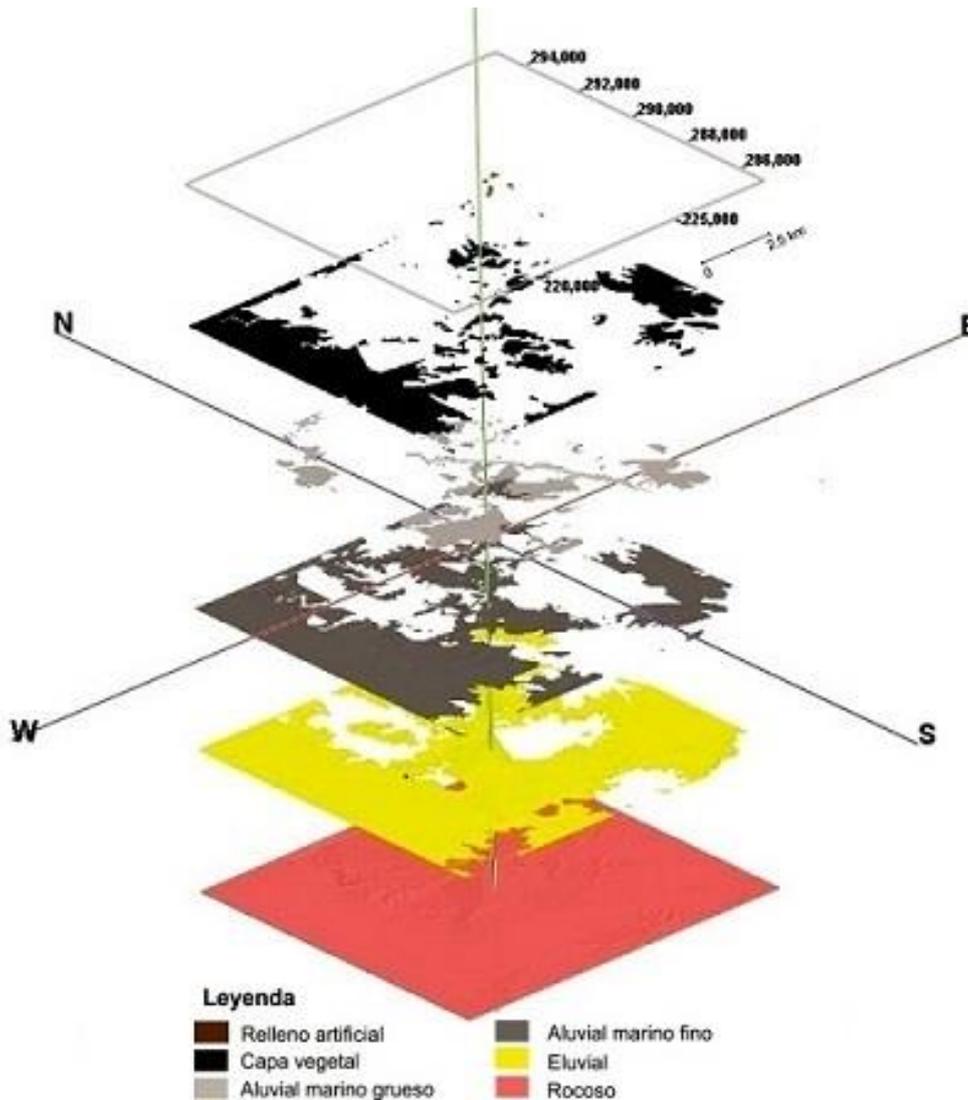


Figura 5. Vista desagregada de los diferentes tipos ingeniero-geológicos, ciudad de Pinar del Río.

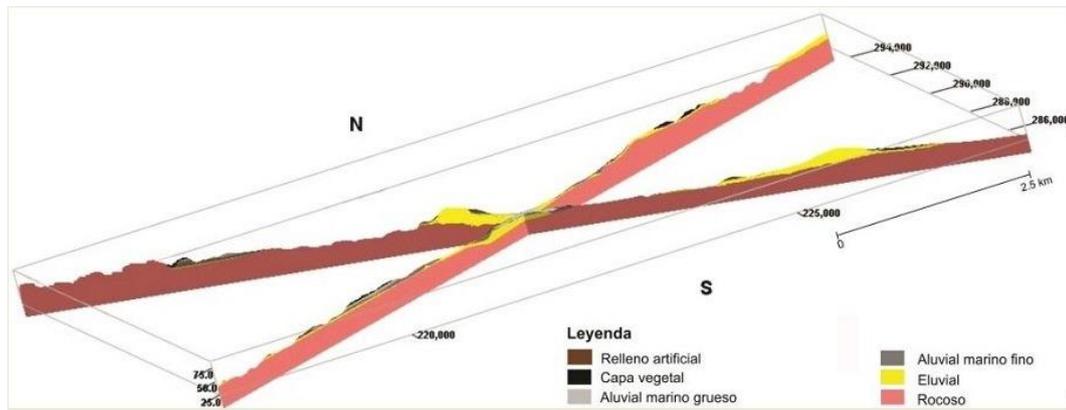


Figura 6. Vistas de cortes orientados en direcciones perpendiculares NE-SW y NW-SE.

Las diferentes vistas del corte geológico cenozoico de la ciudad de Pinar del Río permiten dilucidar la disposición espacial de los suelos y rocas que lo componen. Esto último es un elemento clave en el pronóstico de los peligros geólogo-geotécnicos que pueden ocurrir en este espacio geográfico, pero no es el único criterio, pues el análisis debe completarse con las propiedades geotécnicas de los materiales, aspectos que se tratan a continuación.

Capa vegetal y rellenos artificiales: Los tipos ingeniero-geológicos “capa vegetal y rellenos artificiales” para el caso de la ciudad de Pinar del Río, y desde la óptica de los peligros geológico-geotécnicos, no presentan relevancia. La capa vegetal (o suelos orgánicos) en el perímetro urbano ha sido prácticamente retirada. En los lugares donde se cartografiaron no presentan espesores superiores a los 0,5 m y la práctica seguida por las empresas constructoras, en todos los casos, consiste en evitar estos suelos como base de las cimentaciones.

De lo anterior se deriva que los suelos orgánicos no han sido estudiados con fines geotécnicos, en este caso de estudio. Según los datos aportados por la literatura, la compresibilidad es el principal fenómeno geotécnico que puede ocurrir en los suelos orgánicos (Hibino, Yamaguchi & Kogure 1989; Kogure, Yamguchi & Shogaki 1993; Calderón, Livia & Aguilar 2003, entre otros). Por otro lado, la distribución de los rellenos artificiales es muy restringida (Figuras 4 y 5); estos materiales, al igual que la capa vegetal, no han sido estudiados geotécnicamente, ni empleados como base de cimentaciones.

Aluvial marino grueso: El fenómeno geológico-geotécnico reportado con más recurrencia en estos suelos ha sido la erosión subterránea; algunas veces identificado también en la literatura técnica con el término sufusión. Este fenómeno se ha originado, especialmente, debido a la composición granulométrica de los suelos aluviales marinos gruesos; en los que resalta un 60,16 % de arena, para un 64,61 % de la fracción gruesa (gravas y

arenas) (Tabla 2). Estas condiciones naturales, en combinación con elevados gradientes hidráulicos que eventualmente se desarrollan por roturas en redes hidráulicas, han generado en la ciudad algunos colapsos de la carpeta asfáltica (Figura 7).



Figura 7. Hundimientos y colapsos de carreteras debido al fenómeno de erosión subterránea, ciudad de Pinar del Río, Cuba Occidental.

En los cortes representados en la Figura 6 se pueden constatar la presencia del TIG aluvial marino grueso hacia el centro de la ciudad.

Las diversas representaciones ofrecidas en las Figuras 4, 5 y 6 permiten tener una percepción clara de la distribución espacial de los suelos aluviales marinos gruesos, lo que sugiere, para estos sitios, estudios geotécnicos dirigidos a aclarar los factores condicionantes y desencadenantes a la ocurrencia de la erosión subterránea.

Aluvial marino fino: en el caso particular de la ciudad de Pinar del Río se caracterizan por contenidos de arcillas y limos de un 64,55 %, aproximadamente, como promedio y un límite líquido promedio del 44,9 %. Estas características sugieren un potencial de expansividad medio. En la ciudad se han reportado reiterados casos de daños estructurales a los inmuebles, debido a este fenómeno (Figura 8). Trabajos recientes realizados por Chinthaka y otros investigadores (2016) en el Consejo Popular Hermanos Cruz, emplazado al este de la ciudad (Figura 1), demostraron la presencia de arcillas con potencial de expansión de bajo a medio, en el tipo ingeniero-geológico aluvial marino fino.



Figura 8. Fenómenos geotécnicos en el tipo ingeniero-geológico aluvial marino fino. Donde, a y b: grietas bien desarrolladas en los muros de la vivienda y c: afloramientos de arcillas en las cercanías de la vivienda.

Eluvial: Se debe indicar la buena estabilidad de los suelos incluidos en el tipo ingeniero-geológico eluvial; la no ocurrencia de fenómenos geológico-geotécnicos en los suelos que componen este TIG se debe, fundamentalmente, a los contenidos equilibrados de las fracciones de grava, arena, limo y arcilla (Tabla 2).

Tabla 2. Comportamiento de algunos parámetros geotécnicos que caracterizan los tipos ingeniero-geológicos identificados en la ciudad de Pinar del Río; se excluye la capa vegetal y el relleno artificial

Propiedades geotécnicas	Tipos ingeniero-geológicos							
	Aluvial Marino grueso		Aluvial Marino fino		Eluvial		Rocoso	
Contenido de grava promedio (%)	4,45	(454)	1,45	(411)	12,40	(355)	-	-
Contenido de arena promedio (%)	60,16	(454)	34,00	(411)	31,12	(355)	-	-
Contenido de limo promedio (%)	14,85	(454)	22,55	(411)	21,19	(355)	-	-
Contenido de arcilla promedio (%)	20,54	(454)	42,00	(411)	35,29	(355)	-	-
Límite líquido promedio (%)	32,83	(404)	44,90	(410)	33,86	(351)	-	-
Índice de plasticidad promedio	18,83	(404)	24,90	(410)	18,41	(351)	-	-
Densidad natural promedio (g/cm ³)	2,00	(352)	2,08	(347)	2,04	(288)	2,22	(15)

Cohesión promedio (kg/cm ²)	0,03	(243)	0,62	(238)	0,37	(194)	-	-
Ángulo de fricción Interna promedio	18°	(250)	13°	(237)	17	(185)	-	-
Porosidad Promedio (%)	34,38	(260)	38,17	(190)	36,59	(198)	25	(15)
Resistencia a la Compresión Simple promedio (MPa)	-	-	-	-	-	-	5,1	(15)

El valor medio de las propiedades geotécnicas fue calculado utilizando el total de mediciones existentes y ponderando por el espesor de los estratos
Entre paréntesis se indica el número de mediciones o muestras de suelo estudiadas

3.3. Predisposición a la ocurrencia de fenómenos geotécnicos en los TIG que forman el substrato del entorno urbano

Cada uno de los TIG identificados en el área y representados espacialmente en las Figuras 4, 5 y 6 tendrán diferentes niveles de influencia en la ocurrencia de fenómenos generadores de riesgos geológicos en el entorno urbano objeto de estudio. En este trabajo no se pretende elaborar mapas de peligrosidad a la ocurrencia de algún fenómeno geológico-geotécnico específico, generador de riesgos; simplemente se demostrará la predisposición de los TIG identificados a la ocurrencia de los citados fenómenos.

Rocoso: Si se considera la naturaleza carbonatada de este tipo ingeniero-geológico, y los informes de oquedades de hasta 10,0 cm de diámetro en las descripciones litológicas contenidas en los reportes de perforaciones, se pudiera inferir la ocurrencia de desplomes o derrumbes kársticos. Sin embargo, hasta el momento no existen reportes en la ciudad de Pinar del Río de los fenómenos citados.

No obstante, se sugiere la realización de estudios geofísicos para el emplazamiento de obras civiles de importancia. Especialmente se sugieren levantamientos gravimétricos de detalle, geoelectrónicos o sísmicos, en sitios donde aflore el TIG rocoso o en los casos donde los espesores de los suelos que lo sobreyacen sean inferiores a los 15 m. En este sentido, el modelo geológico para el corte cenozoico, realizado y discutido anteriormente, puede constituir una guía para la planificación de los trabajos geofísicos.

4. CONCLUSIONES

- El nivel de conocimiento actual de las condiciones geólogo-geotécnicas de la ciudad de Pinar del Río permitió la confección del modelo geológico-geotécnico 3D para su corte cenozoico más superficial. En el modelo elaborado se identifican seis tipos ingeniero-geológicos (TIG): rellenos artificiales, capa vegetal, aluvial marino grueso, aluvial marino fino, eluvial y rocoso.
- El comportamiento de algunos parámetros geotécnicos y antecedentes de ocurrencia de daños estructurales en la ciudad vinculan al TIG aluvial marino grueso con la ocurrencia de la erosión subterránea; y al TIG aluvial marino fino con fenómenos de expansividad de las arcillas.
- Aunque hasta la actualidad no se han reportado desplomes kársticos en la ciudad, se proponen levantamientos gravimétricos de detalle, geoelectrónicos o sísmicos donde aflore el TIG rocoso o donde los espesores de los sedimentos consolidados sobreyacentes sean inferiores a 15 m.
- El modelo geológico-geotécnico 3D permite visualizar la disposición espacial de los seis TIG anteriormente mencionados y asiste la toma de decisiones en la planificación urbana. Además, constituye un antecedente de consulta para posteriores análisis de peligros geólogo-geotécnicos.

5. REFERENCIAS

- AGUADO, N. 1993: Esquema Ingeniero-Geológico de la ciudad de Pinar del Río. Informe inédito. Archivos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Cuba, 4 p.
- BANLAYÁ, J. C.; BARCOS, L.; BRUQUE, J. M.; CORDERO, T.; DÍAZ-AZPIROZ, M.; EXPÓSITO, I.; JIMÉNEZ, A.; MARTÍ, J. M.; MORAL, F.; OLÍAS, M.; ORTIZ, M. P.; ORTIZ, R.; PARRA, M.; RODRÍGUEZ, M. & VÁZQUEZ, M. A. 2013: *Geología Urbana de Sevilla*. Sociedad Geológica de España, Sevilla, 12 p.
- BARRIOS, E.; MARRERO, J.; PORTUONDO, A.; NUÑEZ, R. & PLACERES, R. 1988: Levantamiento geológico a escala 1:100 000 y búsqueda acompañante Pinar Sur. Oficina Nacional de Recursos Naturales, La Habana, 4 p.
- CABRERA, M. & PEÑALVER, L. 2001: Contribución a la estratigrafía de los depósitos cuaternarios de Cuba. *Revista Cuaternario y Geomorfología* 15(3-4): 37-49.
- CALDERÓN, D. L.; LIVIA, C. M. & AGUILAR, Z. 2003: Consideraciones sobre la compresibilidad de suelos orgánicos y turbas. En: XIV Congreso

- Nacional de Ingeniería Civil del Consejo Departamental de Loreto del Colegio de Ingeniería del Perú, 1-11.
- CHÁVEZ, M. & GUARDADO, R. 2008: Evaluación ingeniero-geológica del deterioro de las rocas en la provincia de Manabí, Ecuador. *Minería y Geología* 24(4): 1-13.
- CHINTHAKA, G. A. 2015: *Evaluación del potencial de expansión de los suelos en el Reparto Hermanos Cruz. Una contribución a la planificación urbana*. Tesis de grado. Universidad de Pinar del Río. 107 p.
- CHINTHAKA, G. A.; SAID, A.; ORDAZ, A.; ESTÉVEZ, E. & HERNÁNDEZ-SANTANA, J. R. 2016: Evaluación de la expansividad de los suelos en el reparto Hermanos Cruz, Pinar del Río, Cuba. *Boletín Geológico y Minero* 127(4): 811-826.
- GIRBERT, Y. 2014: *Pronóstico sobre la expansividad de las arcillas en la ciudad de Pinar del Río*. Tesis de maestría. Universidad de Pinar del Río. 100 p.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. I. 2002: *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación, Madrid, 744 p.
- GOVEA, D. 2014: Esquema Ingeniero-Geológico de la ciudad de Pinar del Río. Informe inédito. Archivos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Cuba, 20 p.
- HIBINO, T.; YAMAGUCHI, H. & KOGURE, K. 1989: Compression characteristics of highly organic soils. In: *Symp. of highly organic soils*: 19-28.
- KOGURE, K.; YAMAGUCHI, H. & SHOGAKI, T. 1993: Physical and pore properties of fibrous peat deposit. In: 11th Southeast Asian Geotechnical Conference. Singapore: 135-139.
- LAPIDO, O. & PEREYRA, F. 2010: Geología urbana y ordenamiento territorial. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66(4): 459-460.
- NEUMANN, D.; SCHÖNBERG, G. & STROBEL, G. 2006: 3D-modeling of ground conditions for the engineering geology map of the city of Magdeburg. *The International Association for Engineering Geology and the Environment* (IAEG) 444: 1-7.
- ORDAZ, A. 2013: *Evaluación de las condiciones ingeniero-geológicas para el pronóstico de la respuesta dinámica de los suelos. Caso de estudio: Ciudad de San Cristóbal, Cuba occidental*. Tesis doctoral. Universidad de Pinar del Río. 170 p.
- REDOLFI, E. 2007: *Suelos Colapsables*. Manual. Universidad Nacional de Córdoba, 36 p.
- RIENZO, F.; ORESTE, P. & PELIZZA, S. 2008: Subsurface geological-geotechnical modelling to sustain underground civil planning. *Engineering Geology* 96(3): 187-204.

- ROCKWORKS 15: Earth Science and GIS Software. (Trial mode). Disponible en: <https://www.rockware.com/product/productDemo.php?id=165>
- ROYSE, K.; REEVES, H. & GIBSON, A. 2008: The modelling and visualization of digital geoscientific data as a communication aid to land-use planning in the urban environment: an example from the Thames Gateway. *Geological Society*, London, Special Publications, 305(1): 89-106.
- SIYABI, B. G. & ANSAL, A. 1999: Manual for zonation on seismic geotechnical hazards. Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering. *Technical Committee 4*: 68-70.
- TOMÁS, R.; CUENCA, A.; DELGADO, J. & DOMÉNECH, C. 2004: Diseño de un modelo geológico-geotécnico 3D de la Vega Baja del río Segura (Alicante, SE España). En: XVI Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. Universidad de Alicante, España. Departamento de Expresión Gráfica y Cartografía, 1-10.

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

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Categoría B. Facultad de Geografía.
Universidad Autónoma del Estado de México, México.