



Boletín de Geología
ISSN: 0120-0283
ISSN: 2145-8553
bolgeo@uis.edu.co
Universidad Industrial de Santander
Colombia

Cálculo de las propiedades geotécnicas a partir de las velocidades transversales obtenidas en la sísmica de refracción. Estudio de caso en la ciudad de Luanda (Angola)

Pereira de Barros da Silva, Maria Amélia; Fernández, Héctor Manuel; Baptista, João Júnior; Pereira Teixeira-Pires, Gabriela Jeremias

Cálculo de las propiedades geotécnicas a partir de las velocidades transversales obtenidas en la sísmica de refracción. Estudio de caso en la ciudad de Luanda (Angola)

Boletín de Geología, vol. 40, núm. 2, 2018

Universidad Industrial de Santander, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=349656897006>

DOI: <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n2-2018006>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.



Artículos

Cálculo de las propiedades geotécnicas a partir de las velocidades transversales obtenidas en la sísmica de refracción. Estudio de caso en la ciudad de Luanda (Angola)

Determination of geotechnical properties by using seismic refraction velocities. A case study in Luanda (Angola)

Maria Amélia Pereira de Barros da Silva mely-barros@hotmail.com

Universidad Agostinho Neto, Angola

 <http://orcid.org/0000-0001-7739-8174>

Héctor Manuel Fernández hector@civil.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana "José António Echeverría", Cuba

 <http://orcid.org/0000-0003-0096-2894>

João Júnior Baptista Joao.baptista@segeo.org

Universidad Agostinho Neto, Angola

 <http://orcid.org/0000-0001-8888-6923>

Gabriela Jeremias Pereira Teixeira-Pires

gabrielapires@hotmail.com

Universidad Agostinho Neto, Angola

 <http://orcid.org/0000-0002-6130-3959>

Boletín de Geología, vol. 40, núm. 2, 2018

Universidad Industrial de Santander, Colombia

Recepción: Septiembre 17, 2017

Aprobación: Mayo 03, 2018

DOI: <https://doi.org/10.18273/rebol.v40n2-2018006>

Redalyc: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=349656897006>

Financiamiento

Fuente: SASSCAL (Southern African Science Service Centre Sea Climate Change and Adaptive Land Use)
Beneficiario: Maria Amélia Pereira de Barros da Silva; Héctor Manuel Fernández; João Júnior Baptista; Gabriela Jeremias Pereira Teixeira-Pires

Resumen: La sísmica de refracción es un método de geofísica de prospección, que estudia las respuestas del terreno cuando se propaga a través de él una onda de compresión (onda P) producida por medios mecánicos en la superficie. El parámetro físico que se utiliza es la velocidad de propagación de la onda Vp que viaja a través de los materiales del subsuelo en función de la densidad del mismo. Tal parámetro aportará información de las características geomecánicas de la zona en la que se aplican. Los índices medidos mantienen correlaciones con la naturaleza geológica de los diversos horizontes, pudiéndose aún conocer sus respectivas profundidades y espesores. Este trabajo tiene como objetivo presentar un procedimiento para la representación de los parámetros geotécnicos, estimados por el método de refracción sísmica. Las velocidades longitudinales son obtenidas y se correlacionan con los valores de la resistencia a la penetración estandar (N) calculados por los ensayos homónimos de SPT. Los parámetros dinámicos se presentan en secciones 2D para conseguir una mejor representación e interpretación, siendo capaz de caracterizar continuamente todo el área desde el punto de vista geotécnico. El área de estudio está localizada en los suelos arenoso-limo - arcillosos de la ciudad de Luanda (Angola).

Palabras clave: Refracción sísmica, SPT, Parámetros dinámicos, Cartografía geotécnica.

Abstract: Seismic refraction is a prospecting geophysical method, which measures the terrain response in reaction to a P compression wave, mechanically produced at the surface and propagating across. The physical parameter in use, in the case, is the wave propagation velocity, Vp, which travel across the subsurface rock material

and reflects to the surface in function of the material's density it finds on its way down. That way, indexes associated to the parameter will measure and reveal the geomechanic characteristics of the terrain under study. Those indexes, whilst keeping some correlations with the geological nature of the rock in different horizons, allow to infer also their depths and thickness. The present study has the scope of showing a methodology to map geotechnical parameters using seismic reflection, and it has been noticed that the longitudinal velocities also computed are correlated with penetration resistance values, measured by Standard Penetration Tests (SPT). The dynamic parameters were chosen to be presented in 2D maps, in order to give either, a better representation of their characteristics, as well to allow for a continuous geotechnical interpretation over the entire area of study. The latter, is an area of silty/sandy soils located in the city of Luanda (Angola).

Keywords: Seismic refraction, SPT, Dynamic parameters, Geotechnical mapping.

INTRODUCCIÓN

Los métodos geofísicos han sido utilizados desde algunos años en las prospecciones geotécnicas y sus resultados han mejorado substancialmente estas investigaciones. Ejemplo de eso, son los trabajos de Luna y Jadi (2000), Naranjo y Dranichnikov (2012) y Nabil y Al-Heety (2014) por solo mencionar algunos de los consultados para esta investigación. La principal dificultad que se observa es en la representación de sus resultados que muchas veces deben ser presentados a ingenieros u otros investigadores que no entienden o desconocen en muchos casos el lenguaje de las Geociencias. Por otro lado, los parámetros fisicomecánicos calculados se presentan en tablas o se ofrecen sus valores para las diferentes capas sin reflejar la continuidad en la representación que dan estos métodos. Debido a lo anterior, el objetivo principal de este trabajo es el de ofrecer un procedimiento para la representación de los parámetros geotécnicos estimados por la sísmica de refracción, tomando como base los datos sísmicos medidos en un área de la ciudad de Luanda, Angola.

CONTEXTO GEOLÓGICO

Características geológicas del área de estudio

El terreno para esta campaña de prospección se sitúa en el barrio Proyecto Nueva Vida, en Luanda (FIGURA 1).

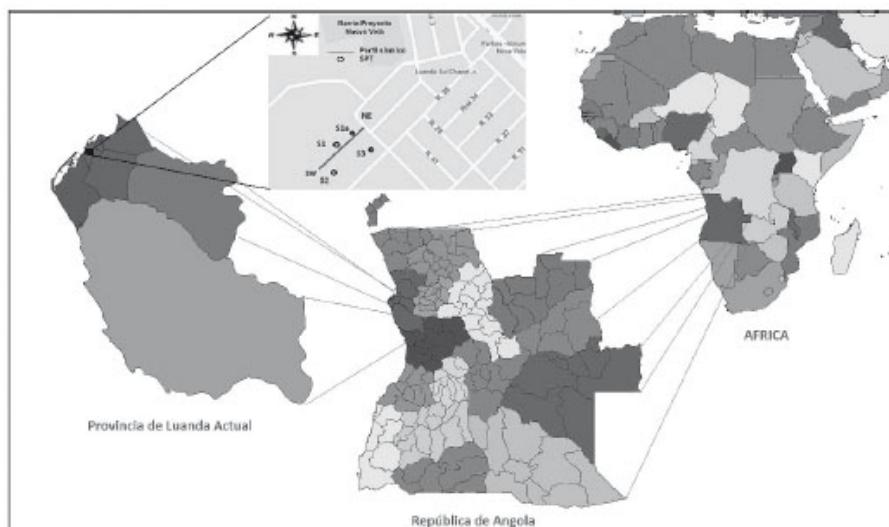


FIGURA 1
LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y LÍNEAS
SÍSMICAS ANALIZADAS (ADAPTADO DE GOOGLE MAP).

De acuerdo con la carta litológica, en la zona de Luanda aflora la parte superior de una potente sucesión Mesozoica y Terciaria que abarca en profundidad un máximo de 4000 m de espesor conformando tres cuencas sedimentarias siendo la más importante la cuenca del Kwanza que constituye gran parte de la franja de costa de Angola. La secuencia estratigráfica que se apoya sobre el basamento Pre-cambrico viene expuesta de forma sintética en la FIGURA 2.

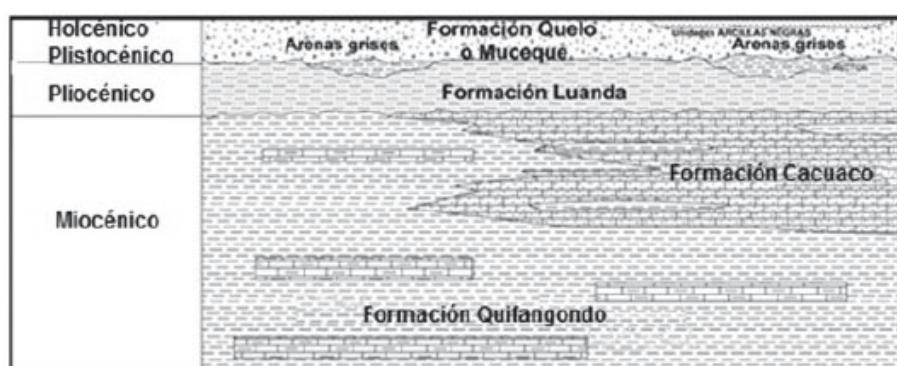


FIGURA 2
ESQUEMA GEOLÓGICO ESTRATIGRÁFICO DE LA CIUDAD
DE LUANDA, ANGOLA (MODIFICADO DE TECNASOL, 2007).

Litología

En la región de Luanda se distinguen dos unidades litológicas: las someras, que corresponden a las unidades recientes del Pleistoceno y las del substrato del Plioceno y del Mioceno (FIGURA 2).

Las unidades recientes incluyen los materiales no consolidados de origen antrópico (A), los aluviones, constituidos por materiales heterogéneos y los sedimentos fluvio-lacustres (Al), las arenas de playa

(ap) que constituyen las islas y cordones litorales, los depósitos de vertiente (a3) y conos de deyección (a2), los aluviones recientes (a1), que están asociados a las líneas de flujo superficial de agua, y la unidad de las arcillas negras o arcillas del Cazenga (Q3). Las formaciones Quelo con dos unidades, arenas rojas (Q2) y arenas grises (Q1) constituidas esencialmente por arenas de edad Pleistoceno, se incluyen también en las unidades someras. Las unidades del substrato corresponden a la formación Luanda (p1) del Plioceno, constituida por materiales no consolidados arenas, limos y arcillas y materiales consolidados de arenas y la formación Cacuaco (m1c), constituida por carbonatos descompuestos y calizas (FIGURA 2).

En el área de Luanda apenas afloran terrenos desde el Mioceno Inferior. Las formaciones reconocidas son, de la base para el tope, Quifangondo (m1), Cacuaco (m1c), Luanda (p1), Arenas cenizas (Q1), formación Quelo o Arena de Muceque (Q2) y la unidad informal de las Arcillas negras (Q3), o Formación del Cazenga. Sobre este paquete geológico se asientan otras formaciones del Holoceno, entre las que pueden ser nombradas están las arenas de dunas y de playa y depósitos actuales diversos (Teixeira Pires, 2006).

El objeto de estudio de esta investigación son los terrenos transportados del Pleistoceno y Plioceno de las formaciones Quelo y Luanda, respectivamente que constituyen las unidades geotécnicas de interés en esta área. Como característica propia de esta región se destaca la no presencia de un sustrato rocoso, por lo que se estudiaron sedimentos arenoso limo arcillosos que se compactan con la profundidad.

METODOLOGÍA

Campaña de prospección geológico - geotécnica

El trabajo consistió en la perforación de sondeos ejecutados con un equipo de percusión, acompañados de la realización de ensayos de penetración dinámica tipo SPT cada 1,5 m. Las prospecciones fueron dadas por terminadas después de haber alcanzado un mínimo de 15 metros de profundidad y después de lograrse tres valores de $N_{SPT} > 60$ golpes, a excepción de la prospección S1, donde no se consiguió proseguir la perforación debido a la naturaleza de las litologías encontradas.

Los diámetros de la perforación utilizada fueron de 8" y 6"(Ø 203,20 mm y Ø 152,40 mm), siendo los pozos protegidos por tubería de revestimiento de igual diámetro, conforme al propio método de perforación (Tecnasol, 2007).

Los ensayos de penetración dinámica, tipo SPT, tienen como objetivo la determinación de la resistencia del suelo a la penetración de un muestreador estandarizado, al mismo tiempo se obtienen muestras representativas. Son realizados dentro de los pozos de prospección a profundidades definidas, y siempre que ocurra un cambio de litología. Los resultados de los cuatro sondeos realizados, se pueden observar en la TABLA 1 y representados en un perfil en la FIGURA 3.

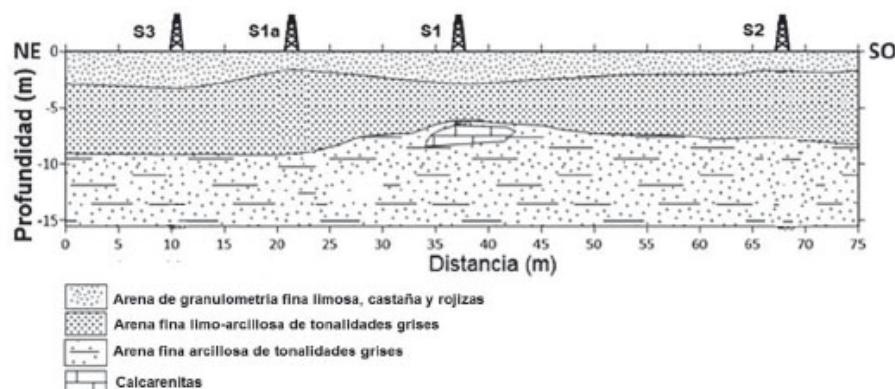


FIGURA 3
PERFIL LITOLÓGICO OBTENIDO CON LOS ENSAYOS DE SPT DE CAMPO.

TABLA 1
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE SPT.

Profundidad (m)	S3 N _{SPT}	Litología	S1a N _{SPT}	Litología	S1 N _{SPT}	Litología	S2 N _{SPT}	Litología
2	22	Arena fina limosas castaña rojiza	38	Arena de granulometria fina limosa, castañas y rojizas	18	Arena fina castaña y rojiza	52	Arena fina limosas castaña y rojiza
3,5	27		42	Arena limo-arcillosa de granulometria fina de tonalidades blancas, grises y amarillas	21		43	
5	32		48	Arena de granulometria gruesa, de tonalidades blancas	38	Arena fina limo-arcillosa blanquecina	54	Arena limosa de tonalidades grises
6,5	40	Arena fina limo-arcillosa de tonalidades grises				Calcareitas brechosas de tonalidades amarillas pasando a negro, recuperado como fragmentos	54	
8	50		50	Arena limo-arcillosa de granulometria fina de tonalidades blancas, grises y amarillas			60	Arena fina de tonalidades blancas
9,5	60	Arena fina arcillosa de tonalidades grises	60				60	Arena limo-arcillosa de tonalidades grises
11	60		60				60	
12,5	60		60				60	
14	60		60				60	
15,5	60						60	

Adquisición geofísica

Sísmica de refracción

La refracción sísmica se basa en el estudio de las ondas elásticas, para determinar en términos de velocidad y espesor, la disposición de las capas en el subsuelo, siendo posible detectar, con un grado elevado de fiabilidad estructuras geológicas en el subsuelo de un área (Lankston, 1989).

Según Sacasas (2012), la refracción sísmica captta la componente refractada de una onda entre dos medios con diferentes propiedades elásticas a lo largo de una serie de geófonos colocados en la superficie del suelo. La onda en el subsuelo es generada por una fuente impulsiva a partir de impactos directos en el suelo o por explosivos. Se logra registrar el movimiento de las ondas desde la fuente hasta los receptores a través de un sismógrafo, con diferentes arreglos de geófonos. Es de particular interés, para este método, las primeras entradas (ondas directas y ondas P refractada críticamente). Con las informaciones suministradas por esas ondas se construyen los gráficos tiempo-distancia, a partir de los cuales se realiza la interpretación y se obtienen las velocidades y los espesores de las diferentes capas del corte geológico.

Adquisición y tratamiento de los datos sísmicos

Metodología de adquisición

Para la adquisición de los datos fue utilizado un sismógrafo de la Geometrics, modelo Geode de 24 canales y geófonos de 14 ó 40 Hz siguiendo los procedimientos de la Norma ASTM D5777-95. La distancia entre los geófonos fue igual a 2 metros, generando una línea sísmica de 46 metros de largo, donde el primer geófono es considerado de referencia, se queda en la posición cero. La fuente de energía fue un martillo de aproximadamente 10 kilogramos con un trigger de contacto acoplado. Para aumentar el área de impacto entre el martillo y el suelo una chapa metálica fue usada, generando un frente de ondas mecánicas inicial mayor. Los puntos de impacto fueron dispuestos, con relación al geófono de referencia, en las posiciones: -12; -2; 23; 48; 58 metros (FIGURA 4). Cada punto de impacto fue caracterizado por el apilamiento (suma) de una secuencia de 30 golpes, lo que permitió atenuar los ruidos y aumentar la resolución.

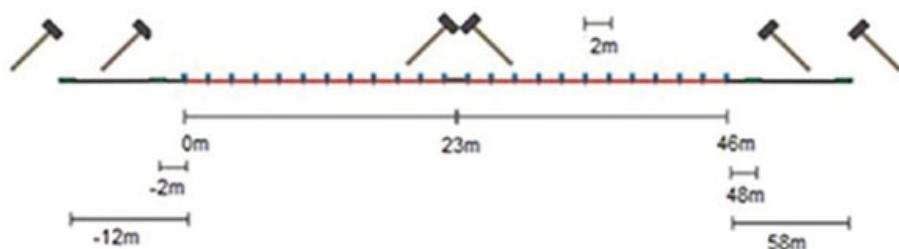


FIGURA 4
CONFIGURACIÓN DEL ARREGLO UTILIZADO EN EL LEVANTAMIENTO
DE LOS DATOS (MODIFICADO DE ARAÚJO Y PERES-ROCHA, 2010).

Durante el proceso de adquisición de los datos se realizó un pre-procesamiento en el campo lo que permitió controlar la calidad de los datos que estaban siendo adquiridos. Para ejecución de este procedimiento fue usado el SIPQC que es un programa de interpretación interactivo confeccionado por la United States Geological Survey y la versión QC y que está incorporado en el software SCS (acquisition control software). El procedimiento obedeció a tres etapas: marcación de las primeras llegadas, generación del gráfico tiempo-distancia e inversión para crear el modelo de profundidades. La primera etapa en el análisis de los datos de sísmica de refracción consiste en la identificación de las primeras llegadas de la energía sísmica en cada traza. La FIGURA 5, ilustra el sismograma referido a la línea sísmica de Nueva Vida, generado con el impacto en el punto central (23 metros), donde fueron hechas marcaciones de las primeras llegadas de las ondas refractadas. La marcación de las primeras llegadas de todos los puntos de impacto suministró el gráfico del tiempo-distancia ilustrado en la FIGURA 6. Después de la marcación de las primeras llegadas y la generación del gráfico del tiempo-distancia se le realizó el control de calidad de los resultados con el SIPQC, cuyo ejemplo se ilustra en la FIGURA 7.

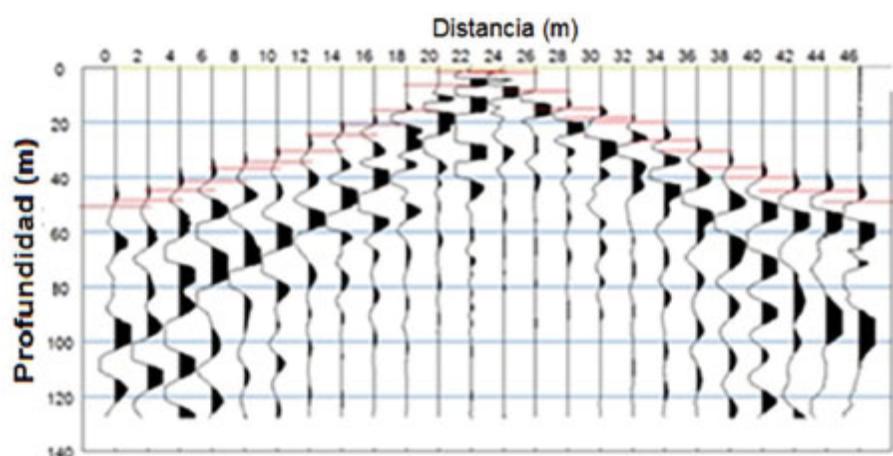


FIGURA 5
SISMOGRAMA Y MARCACIÓN DE LAS PRIMERAS LLEGADAS CON SIPQC.

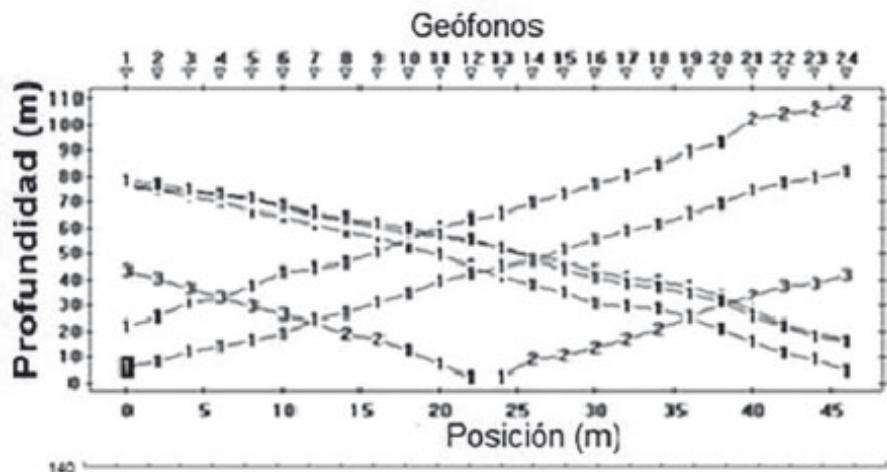


FIGURA 6
GRÁFICO TIEMPO-DISTANCIA GENERADO CON EL SIPQC.

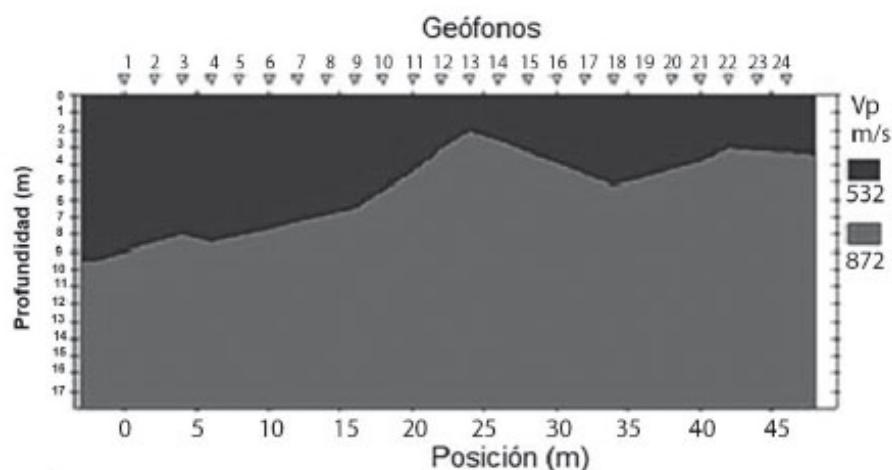


FIGURA 7
MODELO DE PROFUNDIDAD GENERADO CON SIPQC.

Posteriormente, los datos fueron sometidos al procesamiento final con la utilización del software SEISIMAGER 2D, que incorpora diversos paquetes entre ellos el Pickwin y el Plotrefa versiones 4.4.1.4 y 2.9.2.6, respectivamente, todas de la Geometrics Inc. Para la marcación de las primeras llegadas fue usado el paquete Pickwin, y para la generación de los gráficos de los tiempos de viaje y del modelo de velocidades el Plotrefa. En las FIGURAS 8 y 9 se presentan, respectivamente, el sismograma y el gráfico tiempo-distancia.

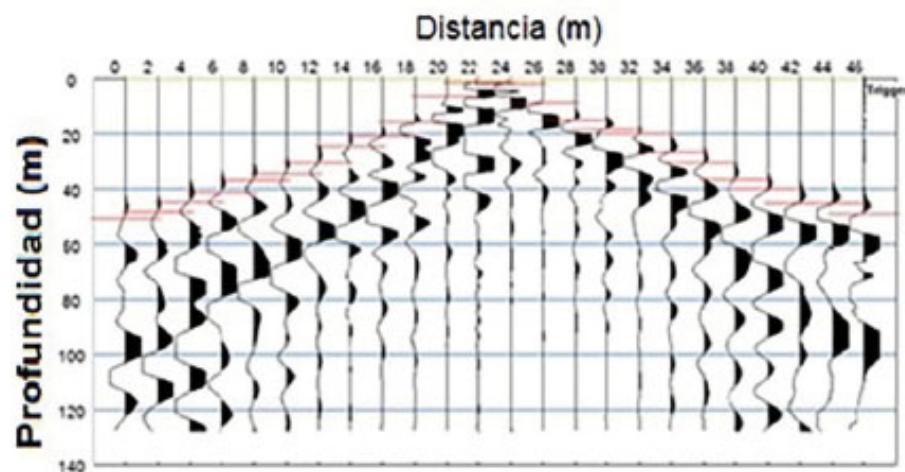


FIGURA 8
SISMOGRAMA RESULTADO DEL PUNTO DE IMPACTO EN LA POSICIÓN -12 m.

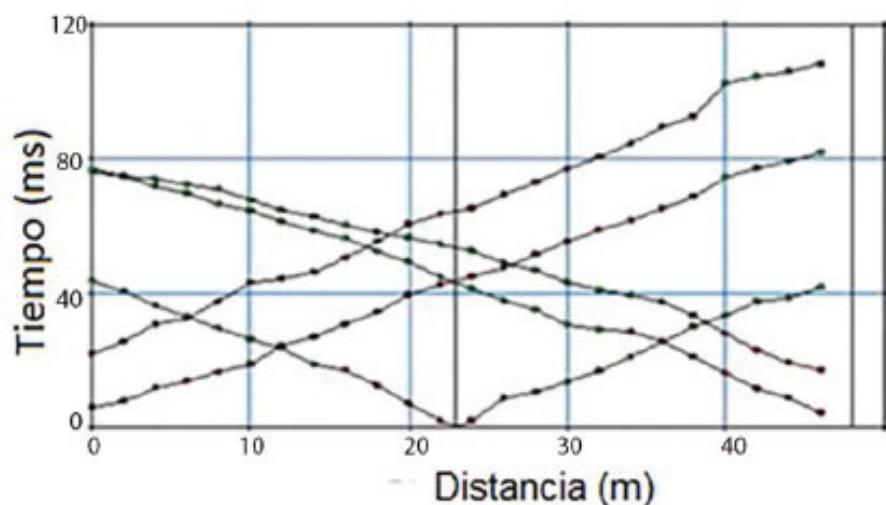


FIGURA 9
GRÁFICO DE LOS TIEMPOS DE VIAJE.

La FIGURA 10, ilustra el modelo de velocidades de propagación de las ondas sísmicas correspondiente al perfil sísmico. En el modelo pueden ser observadas dos capas con velocidades distintas, siendo el espesor de la segunda capa ilimitada, lo que refleja una situación en la que las interfaces refractoras son irregulares y en que la velocidad aumenta con la profundidad, que es condición necesaria para un levantamiento sísmico de refracción. Los valores de las velocidades en las capas pueden variar en función de algunos factores como la humedad local o alteraciones climáticas, y no siempre es posible lograr valores de velocidades idénticos, pero solamente con intervalos pequeños. Se puede verificar que el espesor de la primera capa disminuye significativamente en el punto 30, mostrando que existe variación lateral del espesor en las capas observadas.

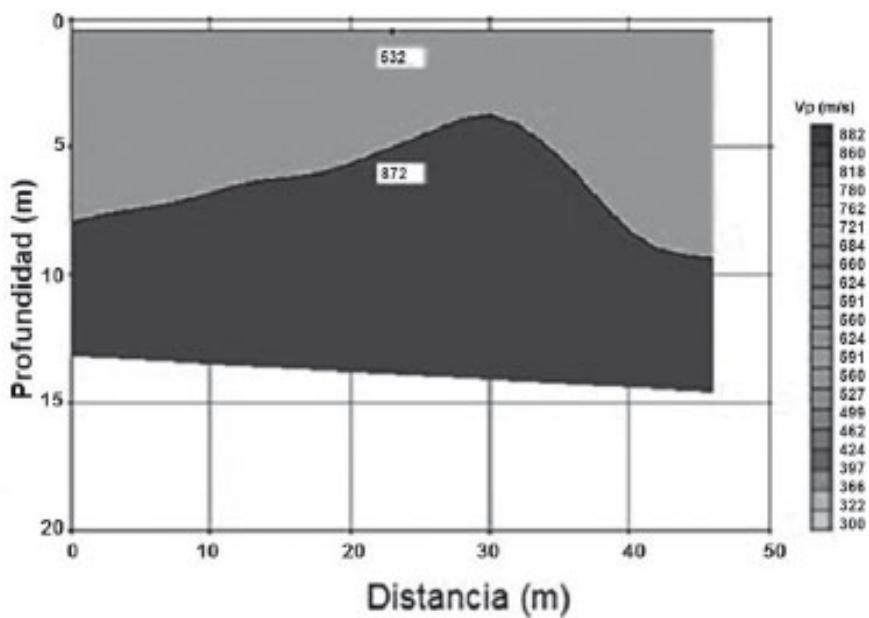


FIGURA 10
MODELO DE VELOCIDADES PARA EL PERFIL SÍSMICO NUEVA VIDA.

RESULTADOS

La mayor aplicación del método de refracción sísmica en este trabajo fue explorar los efectos geotécnicos someros a profundidades entre 0 y 30 m, permitiendo hacer la caracterización estratigráfica del subsuelo, determinar la profundidad donde el suelo está más compacto, y calcular algunas propiedades físico-mecánicas.

Los datos sísmicos someros fueron procesados usando el programa SeisImager, con el objetivo de estudiar las ondas longitudinales directa y refractada. Como no fue realizada una metodología para estudiar las ondas superficiales, la velocidad de las ondas transversales de la primera capa se estimó con el método 1D MASW utilizando los disparos más apartados del registro con el siguiente análisis del carácter dispersivo del área. A través del Pickwin fue posible seleccionar los valores de tiempo de las primeras entradas de las ondas P registradas en cada sismograma del perfil que componen el área, utilizando los datos de refracción. Los resultados fueron interpretados en el módulo Plotrefa donde la interpretación fue realizada utilizando el método Time Term Inversion para dos tres capas y tomografía sísmica.

Los datos logrados de la tomografía sísmica fueron interpolados y representados como puede observarse en la FIGURA 11.

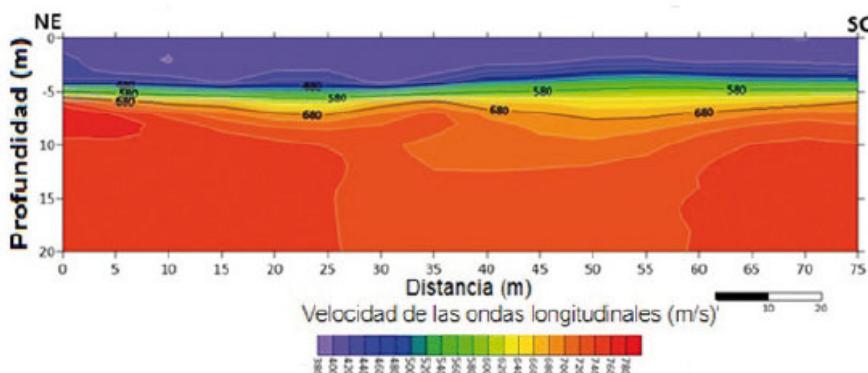


FIGURA 11

Los valores de velocidad fueron correlacionados con los valores SPT, teniendo en cuenta que los valores de velocidad calculados con la refracción sísmica no coinciden exactamente con la localización de las prospecciones SPT, sin embargo, fue realizado ese análisis para no usar las fórmulas propuestas por otros autores en diferentes condiciones geológicas y geotécnicas.

Cuando la correlación fue realizada con los datos de todos los ensayos SPT (TABLA 2), se obtuvo un coeficiente de correlación lineal de $r = 0,86$ que es aceptable si se tiene en cuenta que las dos variables no fueron medidas en la misma localización exactamente.

TABLA 2

ENSAYO	H(m)	X(m)	N _{SPT}	VP (m/s)	ENSAYO	H(m)	X(m)	N _{SPT}	VP (m/s)
SPT -S3	-2	10	22	404,1	SPT -S1	-2	37	18	405,2
	-3,5	10	27	404,2		-3,5	37	21	406,2
	-5	10	32	406,3		-5	37	38	468
	-6,5	10	40	706,4		-6,5	37	60	684,5
	-8	10	50	747,7		-2	67,6	52	410,9
	-9,5	10	60	747,7		-3,5	67,6	43	530,3
	-11	10	60	747,7		-5	67,6	54	666
	-12,5	10	60	747,7		-6,5	67,6	54	741,6
	-14	10	60	747,7	SPT -S2	-8	67,6	60	741,6
	-15,5	10	60	747,7		-9,5	67,6	60	742,1
SPT -S1a	-2	21,2	38	421		-11	67,6	60	742,5
	-3,5	21,2	42	425,1		-12,5	67,6	60	742,5
	-5	21,2	48	631,9		-14	67,6	60	742,5
	-6,5	21,2	48	745,3		-15,5	67,6	60	742,5
	-8	21,2	50	746,3					
	-9,5	21,2	60	747,3					
	-11	21,2	60	748,3					
	-12,5	21,2	60	749,3					
	-14	21,2	60	749,3					
					$r = 0,86$				

La ecuación de correlación lograda fue:

$$N_{SPT} = -0,286 + 0,0779V_p \quad (01)$$

Donde N_{SPT} es el Número de Golpes de los ensayos de SPT y V_p es la velocidad de las ondas sísmicas longitudinales.

La prueba de hipótesis realizada confirma que la ecuación es significativa aunque en algunos puntos los parámetros estimados a partir de ella no fueron muy buenos, sobre todo en el área cercana al ensayo S1, esto puede ser causado por la presencia de fragmentos de calizas dentro de estos suelos arenosos.

Esto prueba que con las velocidades obtenidas con el método de refracción sísmica puede estimarse los valores de N_{SPT} . Usando la fórmula 1 todos los valores de velocidad V_p fueron convertidos en valores de N_{SPT} como se puede observar en la FIGURA 12.

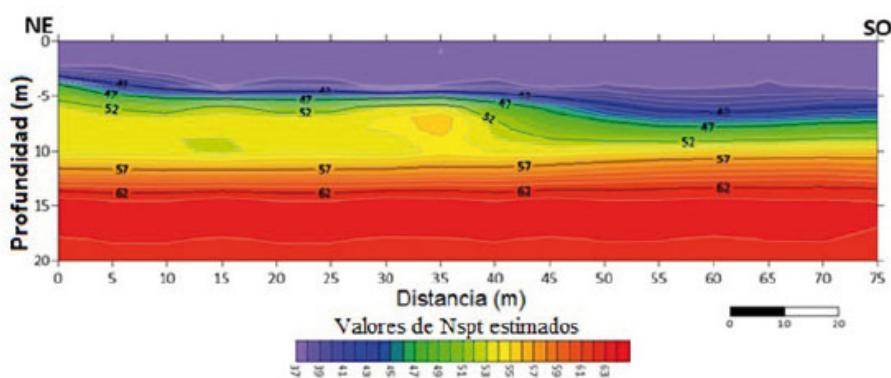


FIGURA 12
VALORES N_{SPT} ESTIMADOS DESDE LAS VELOCIDADES
OBTENIDAS POR LA SÍSMICA DE REFRACCIÓN.

Para calcular los parámetros físico-mecánicos fueron utilizados los datos de velocidad longitudinal creado por la tomografía sísmica.

Las velocidades de las ondas transversales fueron estimadas con el software SeisImager empleando los disparos más distantes de la sísmica de refracción e interpretado con la metodología 1D MASW, los resultados son presentados en la FIGURA 13. Se tiene una velocidad constante hasta los 10 metros de profundidad, el valor $V_s=277\text{m/s}$ puede ser utilizado para el cálculo de las propiedades físico mecánicas.

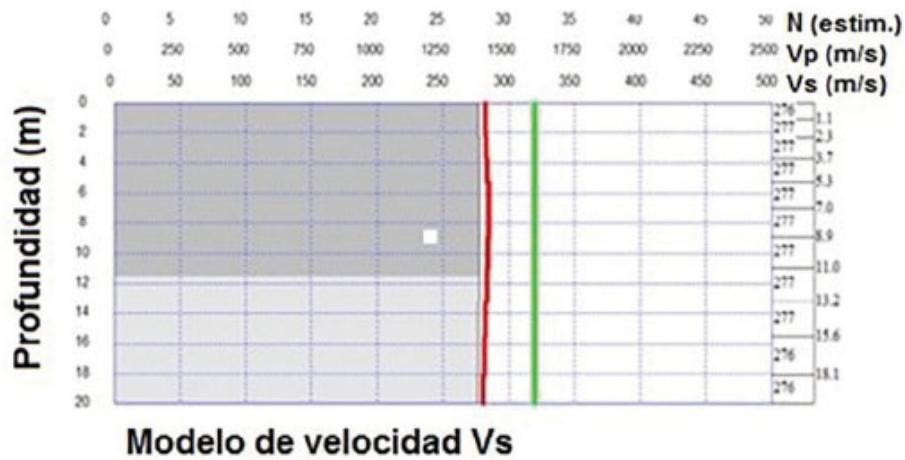


FIGURA 13
ESTIMATIVA DE LAS VELOCIDADES
TRANSVERSALES (Vs) CON EL MÉTODO 1DMASW.

Una vez obtenido el perfil de velocidades de las ondas longitudinales (V_p) y el de las ondas transversales (V_s) se estimaron otros parámetros geotécnicos que son muy importante para el cálculo de la capacidad portante de los suelos utilizando las siguientes expresiones matemáticas.

Módulo de Elasticidad o Módulo de Young (Edin): Representa la cantidad de esfuerzo por unidad de deformación $E=\sigma/\varepsilon$.

$$E_{din} = \delta V_s^2 \left(\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right) \quad (02)$$

Módulo de Corte o Cizallamiento (G): definido como la relación entre la tensión y la deformación de corte, es una medida de la dureza del material.

$$G = \frac{E}{2(1+\eta)} = \delta V_s^2; \quad \delta = 0,2 V_p^{0,25}$$

(Densidad del material del terreno) (03)

Coeficiente de Poisson, η : Expresa la relación entre las deformaciones transversales y longitudinales.

$$\eta = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (04)$$

DISCUSIÓN

Se observa que las ecuaciones de regresión logradas entre los valores de velocidades y la Resistencia a la Penetración Estándar de los ensayos SPT son significativos, pudiendo ser empleadas con confiabilidad para estimar de manera preliminar este parámetro geotécnico desde la sísmica de refracción. Una gran ventaja que ofrece la sísmica es que se obtienen datos más continuos que los ofrecidos por las prospecciones geotécnicas.

Por la descripción litológica de las prospecciones se observa la presencia de rocas calizas en el centro del área coincidente con la prospección S1, éste tuvo que ser eliminado del análisis porque ya a los 5 metros no se pudo continuar con el ensayo de penetración estandar. En estos suelos es común que aparezcan fragmentos de roca caliza dentro de las capas. Cuando se realizó el perfil con los datos de N_{SPT} sin corregir, se observó como en esa zona aumentaba estos valores a poca profundidad (FIGURA 3), la información sísmica corroboró igualmente esta situación al existir un aumento de las velocidades sísmicas en esta zona (FIGURA 12), se puede ver que con la sísmica se detallan las dimensiones de este cuerpo, la presencia de fragmentos de rocas calizas pueden afectar los ensayos geotécnicos, dando lugar a falsas interpretaciones y pensar que se encontró un suelo más compacto para las cimentaciones, cuando no es así. En este trabajo se decidió hacer otro ensayo de SPT a pocos metros y no se encontraron los fragmentos de rocas.

Para calcular las velocidades de las ondas transversales se utilizó el disparo más distante (6 m), con el objetivo de interpretarlo utilizando la metodología 1D MASW, esto no es lo correcto y solo se logra una velocidad con la profundidad como puede ser observado en la FIGURA 13. Lo ideal es realizar estudios de ondas superficiales utilizando las metodologías de adquisición de los métodos 1D MASW, 2D MASW o REMI descritos por diferentes autores (Humire *et al.*, 2015), todos estos procedimientos permiten calcular las velocidades de las ondas transversales con mayor precisión.

En las FIGURAS 14, 15, y 16 se observa como el módulo de Young, módulo de Rigidez y el coeficiente de Poisson aumentan con la profundidad delimitando dos capas, por otro lado puede observarse, como en el lugar donde existía presencia de fragmentos de rocas calcáreas, se presentan los valores mas bajos de los modulos de Young y de Corte, indicando condiciones geotécnicas más mala, es posible que en esta área se hubiese realizado algún tipo de excavación, de ahí que los suelos esten menos compactos y que existan fragmentos de rocas.

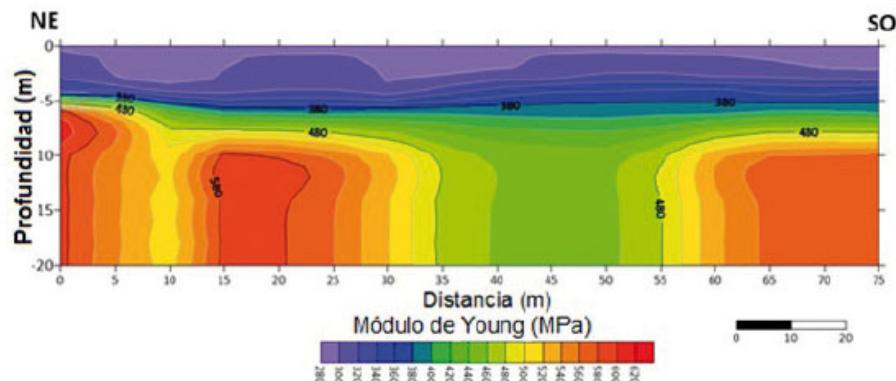


FIGURA 14
MÓDULO DE YOUNG, DINÁMICO CALCULADO
A PARTIR DE LOS DATOS SÍSMICOS.

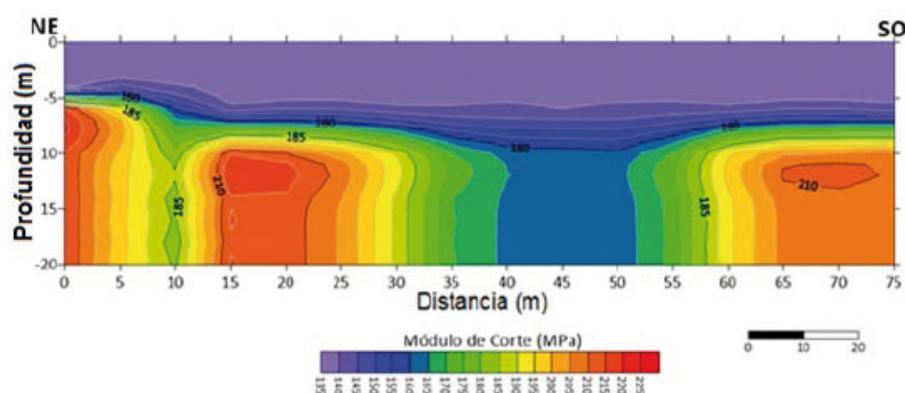


FIGURA 15

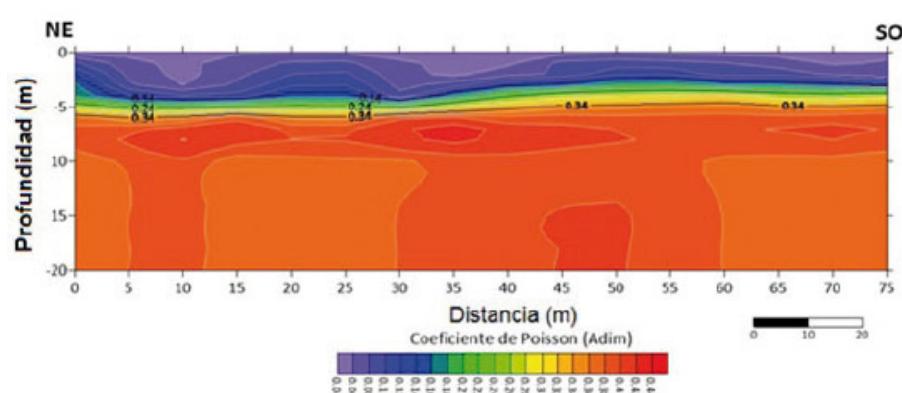


FIGURA 16

CONCLUSIONES

La presentación de los parámetros geotécnicos en mapas 2D, son más representativos que la información tabulada.

Se puede convertir todos los valores de velocidades en parámetros geotécnicos si existen ecuaciones de correlaciones lo suficientemente significativas.

Al tener las velocidades de las ondas longitudinales y las transversales se pueden estimar mucho más parámetros geotécnicos y representarlos en mapas 2D.

En el área de estudio se observó refracciones débiles, debido a que no existen grandes contrastes entre las velocidades de las diferentes capas de arena, limo y arcillas con la profundidad, causados principalmente por la ausencia de un sustrato rocoso.

Se observó un nivel de ruido alto en el sismograma obtenido propio del ambiente urbano donde se hicieron las mediciones sísmicas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a SASSCAL (Southern African Science Service Centre Sea Climate Change and Adaptive Land Use) por la financiación del equipo y algunas actividades para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- Araújo, P., y Peres-Rocha, M. (2010). Estudo do método geofísico de sísmica de refração com aplicação no futuro trecho norte do metrô de Brasília. Curso de Física, Universidade Católica de Brasília e Instituto de Geociências - Universidade de Brasília.
- ASTM D5777-95. 1999. Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation.
- Humire, F., Sáez, E., y Leyton, F. (2015). *Manual de aplicación de técnicas geofísicas basadas en ondas de superficie para la determinación del parámetro VS30*. Santiago de Chile: Instituto de la Construcción.
- Lankston, R.W. (1989). The seismic refraction method: A viable tool for mapping shallow targets into the 1990s. *Geophysics*, 54, 1535-1542.
- Luna, R., and Jadi, H. (2000). Determination of dynamic soil properties using geophysical methods. *First International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure*. St. Louis, USA.
- Nabil, H.A., and Al-Heety, A.J. (2014). Seismic refraction tomography and MASW survey for geotechnical evaluation of soil for the teaching hospital project at Mosul University. *Journal of Zankoy Sulaimani- Part A*, 16(1), 1-14. doi: 10.17656/jzs.10279.
- Naranjo, H., y Dranichnikov, T. (2012). *Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional. El caso del puente sobre o río Maicito*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.
- Sacasas, C. (2012). Sísmica Somera. Notas de Clases. Cujae. La Habana.
- Tecnasol. (2007). Edificio No Projecto Nova Vida Luanda – Angola Prospecção Geológico- Geotécnica Nota Técnica, Luanda, Dezembro de 2007.

Teixeira Pires, G.J.P. (2006). Caracterização geológica e geotécnica dos solos de Luanda para o ordenamento do território. Tese de Mestrado, Departamento de Geología, Universidade de Lisboa, Portugal.

Información adicional

Forma de citar: De Barros da Silva, M.A.P., Fernández, H.M., Baptista, J.Jr., y Teixeira-Pires, G.J.P. (2018). Cálculo de las propiedades geotécnicas a partir de las velocidades transversales obtenidas en la sísmica de refracción. Estudio de caso en la ciudad de Luanda (Angola). *Boletín de Geología*, 40(2), 101-112. DOI: 10.18273/revbol.v40n2-2018006.