

INSTRUMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE LAS ARENAS DE TUMACO (COLOMBIA)

J. García – Núñez ¹, A. Ledesma ²

¹ Ingeominas, Bogotá, Colombia; jesusg@ingeomin.gov.co

² Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España

RESUMEN

La zona de Tumaco está situada en la costa pacífica al sur de Colombia, cerca de la frontera con Ecuador. La población se asienta sobre grandes depósitos de arenas y limos arenosos saturados procedentes del delta del río Mira. En general se trata de depósitos sueltos susceptibles de licuar por efecto de un sismo. Por este motivo se ha realizado una campaña completa de caracterización geotécnica de esos materiales, tanto mediante ensayos "in situ" como con ensayos de laboratorio. También se ha instalado instrumentación para medir aceleraciones del terreno en el sustrato rocoso y en superficie, así como presiones de agua en el depósito arenoso. El artículo presenta la metodología seguida en el proceso de caracterización, y los resultados preliminares del análisis del potencial de licuación de la zona.

Palabras clave: Licuefacción, instrumentación, ensayos "in situ", triaxial cíclico.

SUMMARY

Tumaco is located in the pacific coast of Colombia, close to the Ecuador border. The city was built over large sand and silty sand deposits from the Mira river delta. Generally, they are loose deposits and therefore they can exhibit liquefaction under seismic loads. Because of that, a geotechnical characterization of these materials has been performed, including "in situ" and laboratory tests. Also, a set of instruments to measure accelerations on the rock basement and on the ground surface as well as pore water pressure generation within the sand pores have been installed. The paper presents the methodology used in the characterization process, and some preliminary results about the liquefaction potential of the zone.

Keywords: Liquefaction, instrumentation, "in situ" tests, cyclic triaxial.

Introducción

El municipio de Tumaco está localizado a 300 Km al suroccidente de Bogotá, sobre la costa pacífica (Figura 1). Está conformado por un par de islas cuya superficie no supera los 10 Km², presentando un régimen de lluvia media anual de 2245 mm al año. Tumaco se ha visto históricamente sometido a fuertes movimientos sísmicos, que han ocasionado la destrucción de una gran cantidad de viviendas así como la pérdida de muchas vidas humanas. Los principales eventos que han afectado al municipio son los siguientes (Ramírez, 1975) :

1906 - Enero 31. Este terremoto está considerado entre los 10 que más energía han liberado en toda la historia sísmica del mundo, con un área de influencia de 300.000 Km². Los estudios realizados concluyen que el movimiento principal fue precedido de cuatro sacudidas fuertes siendo la duración del movimiento telúrico de 4 a 5 minutos, y el temblor de tierra fue tan repentino que los habitantes fueron arrojados a tierra. Durante estos instantes se produjo la licuación de las arenas con la consecuente destrucción de numerosas viviendas, pero no hubo inicialmente pérdida de vidas humanas. Media hora después de finalizado el terremoto se generó una ola de 5 metros de altura que se estrelló contra dos islas situadas al frente de Tumaco,

que evitaron la destrucción del municipio. Sin embargo esto no evitó que 400 personas perecieran ahogadas.

1979 - Diciembre 12. Un violento terremoto de intensidad superior a 7 en la escala de Richter afectó a la costa pacífica colombiana. En Tumaco las viviendas y edificios localizados a lo largo de la calle del comercio se derrumbaron y por lo menos el 90 % de las casas quedaron agrietadas, algunas presentaron hundimientos importantes lo cual es signo de la licuación de los depósitos arenosos. El terminal marítimo y el muelle resultaron destruidos como consecuencia del embate de las olas que siguieron al terremoto, perecieron por lo menos 30 personas. Tomando como referencia los anteriores registros históricos se concluye que el municipio de Tumaco en el evento de un sismo fuerte se verá afectado por el fenómeno de licuación y por maremotos.

Objetivos

Las características de la zona la hacen idónea para estudiar el fenómeno de la licuefacción de arenas sueltas, y en último término, detectar las zonas más susceptibles a ella. Con este fin, se ha llevado a cabo en los últimos años, un programa de caracterización de dichas arenas, así como un análisis de la topografía de la zona y se ha instalado abundante instrumentación de campo. El objetivo es doble: por una parte se desea tener registros sísmicos de aceleraciones en la roca y en superficie, así como registros de incremento de presiones de poros, y por otra parte se desea caracterizar bien las arenas para usar en el futuro los modelos teóricos disponibles de predicción de la licuefacción:

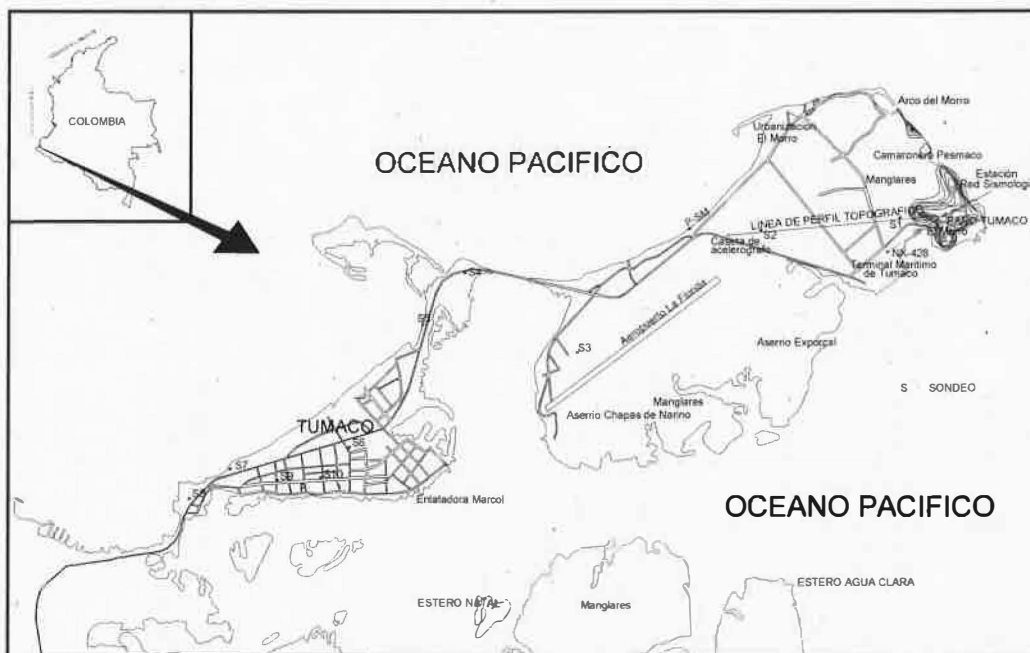


Figura 1. Localización de Tumaco sobre dos islas en la costa pacífica de Colombia. Se indican los sondeos realizados y la línea de perfil topográfico estudiada, ésta última en la zona de la derecha de la figura.

Instalación de instrumentación de campo

Para la instalación de los equipos, fue necesario llevar a cabo las siguientes actividades previas:

Levantamiento Topográfico

Con el fin de conocer en detalle las irregularidades del terreno en superficie, se realizó un levantamiento topográfico detallado comprendido entre el Cerro el Morro (faro de Tumaco) y el Batallón de infantería. El trazado en planta de dicho levantamiento se observa en la figura 1, mientras que el perfil topográfico del mismo se ilustra en la Figura 2. El tramo analizado fue de 1.6 Km.

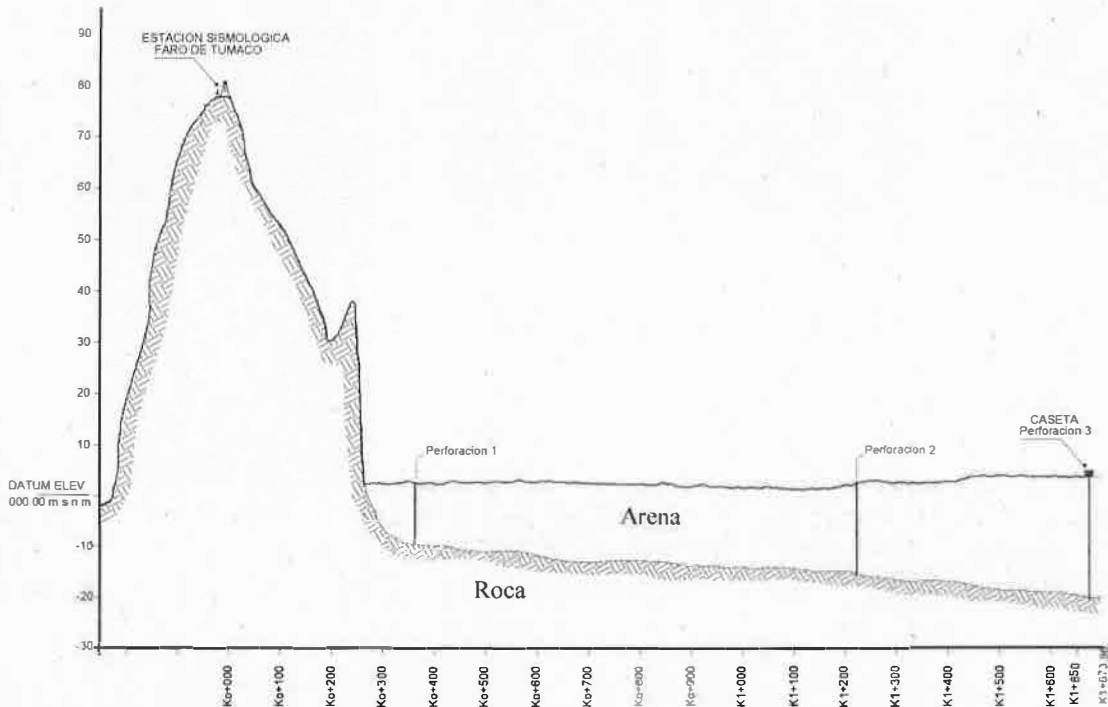


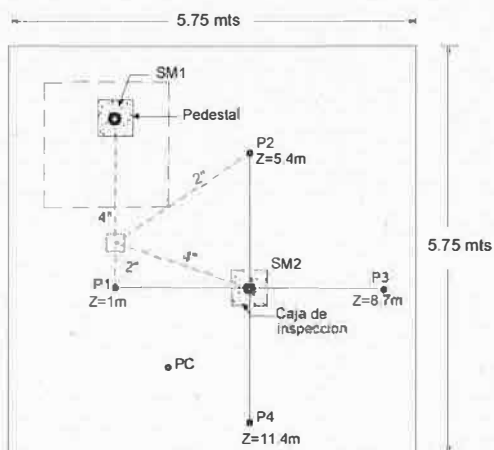
Figura 2 Perfil Topográfico Faro de Tumaco – Caseta de acelerógrafos

Instalación de los Equipos de Precisión.

Antes de instalar los equipos, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica sobre instrumentaciones similares realizadas en otras partes del mundo. Dentro de este tipo de instrumentación se destaca la realizada por Ishihara et al (1981) en Kyoto. Posteriormente, el Servicio Geológico de los Estados Unidos realizó una instrumentación al sureste de California, en el sitio denominado Wildlife (Youd & Holzer, 1994). Ésta constaba de dos acelerógrafos (uno en superficie y otro a 7.5 metros de profundidad) y seis transductores de presión de poros. Lo que hace especialmente interesante esta instrumentación fue que el 24 de noviembre de 1987 se generó un sismo de magnitud 6.6 que causó la licuación de la arena. Sin embargo, debido a que los piezómetros solo empezaron a registrar excesos de presión de poros 13.6 segundos después de dispararse los acelerógrafos, se presentaron serias discrepancias sobre la veracidad de los datos recolectados (Youd & Holzer, 1994; Hushmand & Scott, 1996; Zeghal & Elgamal, 1994; Hushmand et al, 1992; Scott & Hushmand, 1995). De hecho, Hushmand & Scott (1996) realizaron una serie de ensayos "in situ" con el fin de demostrar que las respuestas de los piezómetros presentaban un desfase en el tiempo con relación a las cargas sísmicas. Otro sector donde ocurrió licuación de arenas que se encontraba instrumentado corresponde a la

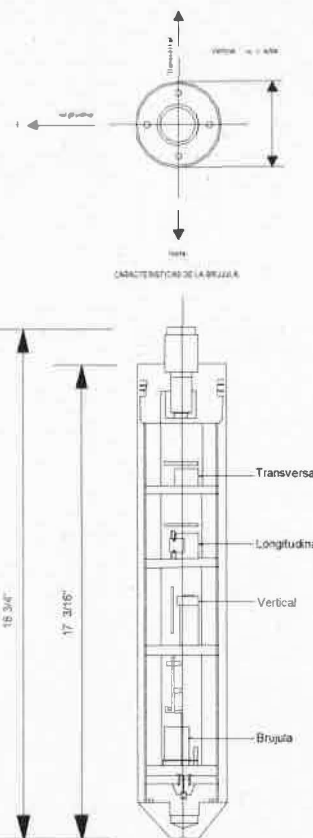
ciudad de Kobe, durante el sismo Hyogoken-Nanbu ocurrido en 1995 (Elgamal et al, 1996).

A partir de esas experiencias previas, se seleccionó un punto sobre el depósito arenoso donde construir una caseta de control con todos los equipos. Se realizaron varias perforaciones, para colocar un acelerógrafo en el substrato rocoso y cuatro piezómetros piezoresistivos a 3 m, 5.4 m, 8.4 m y 11.4 m de profundidad. Se instaló también otro acelerógrafo en superficie. Las figuras 3, 4 y 5 presentan esquemas de los aspectos más importantes de esta instalación.

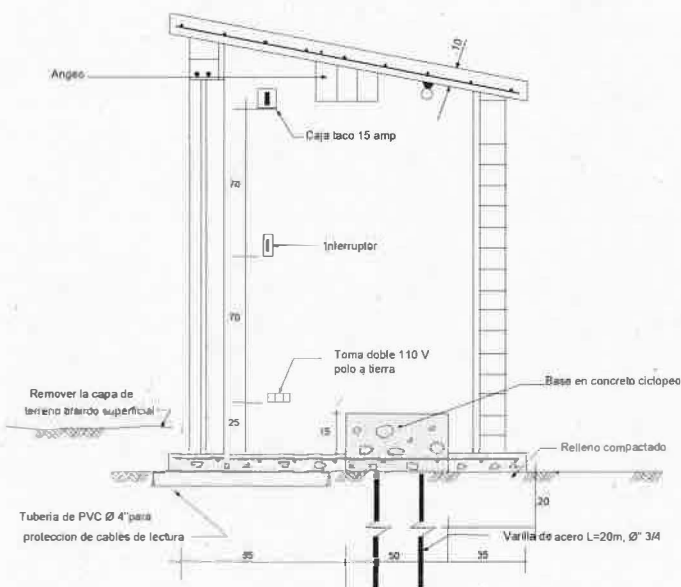


- P1,P2,P3,P4 Piezometro pizoresistivos
- PC Piezometro de Casagrande
- SM1 Acelerografo en superficie
- SM2 Acelerografo en roca (Z=2.5m)

Figuras 3. Distribución de los equipos en planta



Figuras 5. Acelerógrafo en Roca



Figuras 4. Sección Típica de la Caseta

Ensayos de Refracción Sísmica

La refracción sísmica fue utilizada para determinar tanto la velocidad de propagación de las ondas P y S, así como el espesor del depósito de arena (profundidad del basamento rocoso conformado por las areniscas calcáreas de la formación Naya-Guape). En total se realizaron 380 m de refracción sísmica para onda P distribuidos en 7 perfiles y 275 m de refracción sísmica de la onda S distribuidos en 5 perfiles (Olaya J, 1997). Para la mayoría de los casos el sondeo se orientó de manera que su rumbo coincidiera con la línea del levantamiento topográfico (N78E). Las velocidades de corte y de compresión promedio se indican en m/s en la figura 6.

Exploración del Terreno

Perforaciones Mecánicas

Se ejecutaron un total de 7 perforaciones mecánicas (percusión y lavado) distribuidas como se ilustra en la figura 1. De éstas, 5 fueron utilizadas para la instalación de los equipos de precisión (acelerógrafo y piezómetros), en tanto que las otras fueron aprovechadas para determinar el perfil estratigráfico del depósito, así como para la toma de muestras alteradas. En todas las perforaciones se realizó la prueba de SPT, correlacionable con otras propiedades. También se hicieron ensayos de penetración dinámica DP. Un ejemplo de un perfil típico se ilustra en la figura 6.

Determinación de las Densidades in situ

Debido a las dificultades inherentes a la toma de muestras inalteradas de arena, se utilizó un Densímetro Nuclear que consta de una fuente emisora rayos Gamma Cesio 137, para la determinación de la densidad "in situ". La variación de la densidad en profundidad obtenida mediante esta técnica se ilustra también en la figura 6.

Exploración del subsuelo mediante Dilatómetro de Marchetti (DTM)

Se utilizó el Dilatómetro para evaluar el coeficiente de presión de tierras en reposo K_0 . Para la evaluación de K_0 , se tuvo en cuenta las limitaciones descritas por Marchetti (1997). El autor sugiere que una adecuada evaluación de K_0 en arenas implica la realización conjunta del DTM y de ensayos de penetración estática CPT. La figura 6 recoge el perfil de K_0 obtenido con este procedimiento.

Exploración del subsuelo mediante el Piezocono Sísmico

Aunque mediante las perforaciones mecánicas y en particular con el ensayo de penetración estática SPT era posible obtener algunos parámetros del suelo, los resultados se veían afectados por variables diversas (Skempton, 1986; Kovacs & Salomene, 1982). Estos autores también muestran que los resultados dependen en gran medida de la energía transmitida por el martillo que se usa en el ensayo. Las correlaciones entre el ensayo SPT y otras propiedades de la arena tienen una utilidad muy limitada. Se decidió entonces completar el reconocimiento geotécnico con ensayos de penetración estática CPT y de piezocono CPTU. Se determinó la resistencia por punta, la fricción lateral y el incremento en presión de poros en la punta del cono. En la figura 6 se presentan resultados típicos para un sondeo.

Ensayos de Laboratorio

Identificación básica

La arena de Tumaco es de color grisáceo, y mestá compuesta por feldespatos, cuarzo y mica. Las partículas son subangulosas, tiene un peso específico de 27.7 kN/m³, un coeficiente de uniformidad de 2.5 y un coeficiente de gradación de 1.34. La

curva granulométrica de la misma se presenta en la figura 7. La arena clasifica como SP (Clasificación Universal de Suelos), correspondiente a una arena mal graduada.

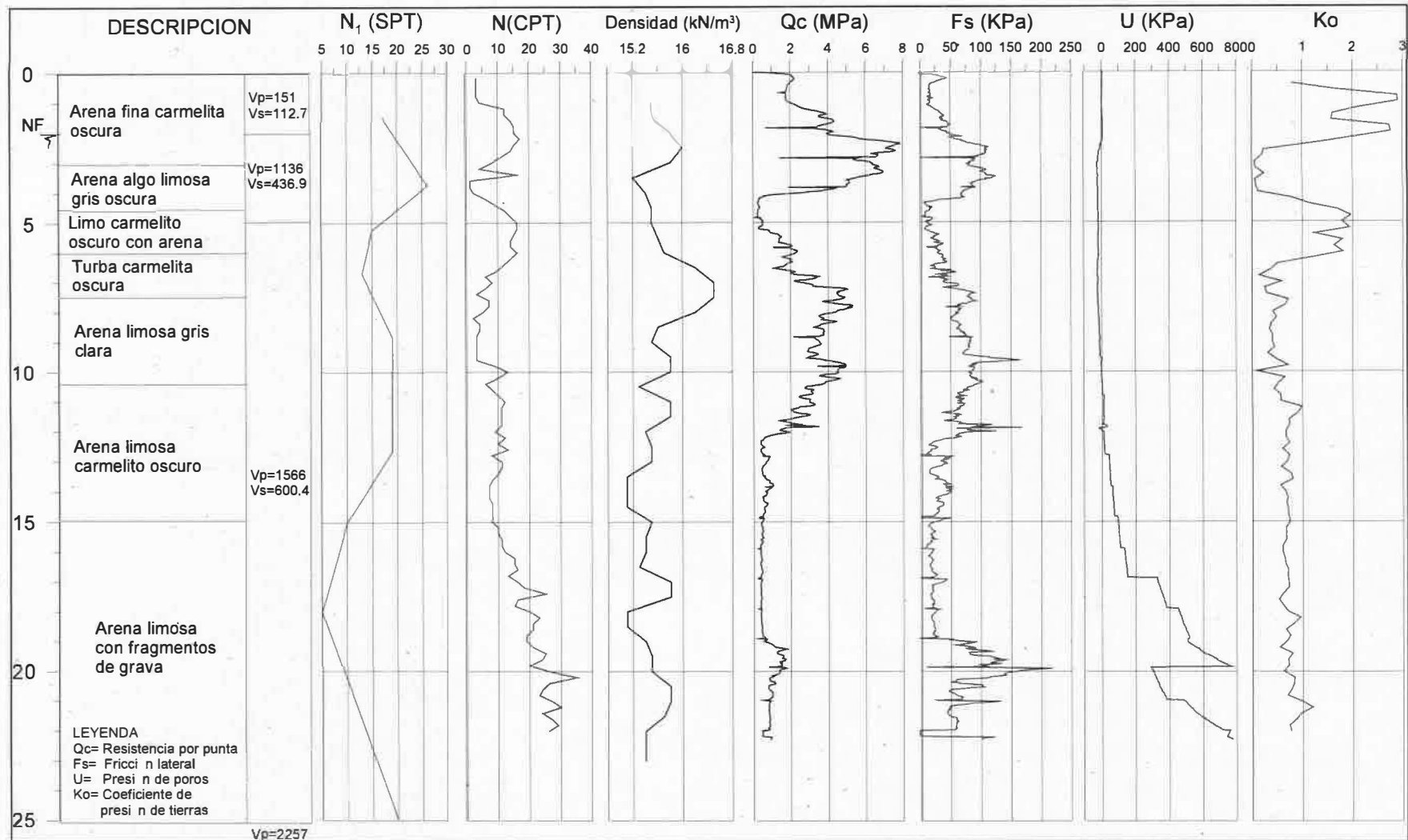


Figura 6. Perfil geotécnico - Caseta de Acelerógrafo: SPT, DP, Densidad, Res. Punta, Fricción Lat., Presión de poros, K₀

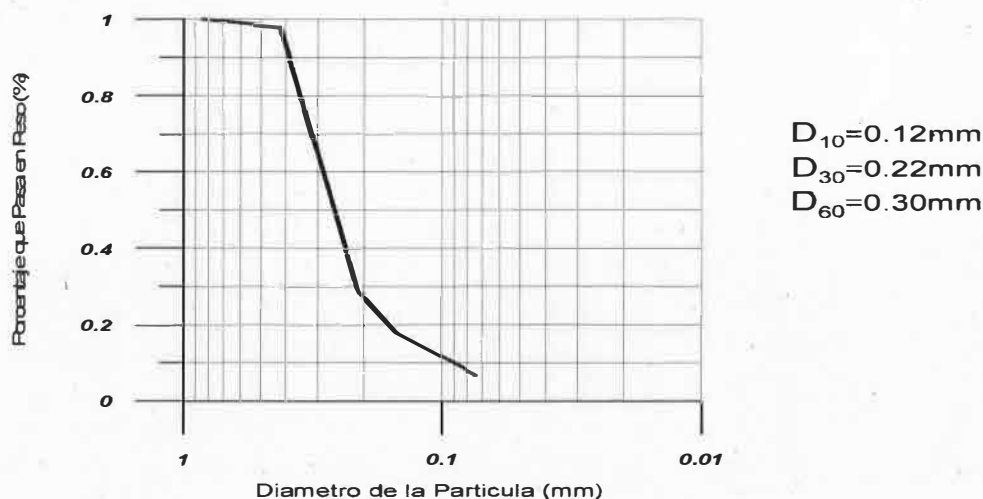


Figura 7. Curva Granulométrica

Ensayos Triaxiales Estáticos

Con el fin de conocer las propiedades de la arena de Tumaco, se realizaron pruebas triaxiales tanto estáticas como dinámicas. Durante la exploración del subsuelo se encontró que la arena presentaba un peso específico natural de 16 KN/m^3 en promedio. Con la anterior información se procedió a preparar las muestras reconstituidas a esta densidad, pero variando la presión de consolidación a presiones similares a las existentes en el terreno.

Las envolventes de resistencia así como la curva esfuerzo deformación para los ensayos consolidados no drenados midiendo presión de poros (CU) se ilustran en la figura 8 en el plano de Cambridge. M es la pendiente de la línea de estado crítico, que se relaciona con el ángulo de fricción interna (ϕ), obteniendo un valor de $\phi = 36^\circ$. También se realizaron ensayos consolidados drenados (CD). Por limitaciones de espacio no se presentan los resultados, pero fueron consistentes con los ensayos CU.

Triaxiales Cíclicos

Al igual que los triaxiales estáticos las muestras se consolidaron a presiones similares existentes en el terreno. El esfuerzo desviador aplicado cumplió la siguiente condición: $0.1 \leq \sigma_d/2\sigma'_c \leq 0.3$, donde σ'_c es la tensión horizontal efectiva inicial y σ_d es el desviador cíclico aplicado. Un ejemplo típico de los resultados obtenidos se ilustra en la figura 9. Finalmente se realizaron varias pruebas con el fin de evaluar la influencia del esfuerzo desviador sobre el número de ciclos para causar licuación, obteniendo el resultado que se presenta en la figura 10.

Evaluación del potencial de licuefacción

Existen en la literatura varios métodos semi-empíricos para evaluar el potencial de licuación de un depósito de arena. Uno ampliamente difundido es el propuesto por Seed y Idriss (1971), basados en la prueba SPT y la aceleración máxima del terreno. Aunque el objetivo futuro es llevar a cabo un análisis en tensiones efectivas, por elementos finitos, se presenta aquí este análisis simplificado preliminar, basado en el SPT, que permite resaltar el riesgo de licuefacción de la zona. Al aplicar esta metodología se obtuvieron los resultados ilustrados en la tabla 1. Nótese que los primeros metros la arena es densa y no se licúa, para aceleraciones máximas de hasta $0.2g$; sin embargo para una aceleración máxima de $0.3g$ todo el depósito se licúa.

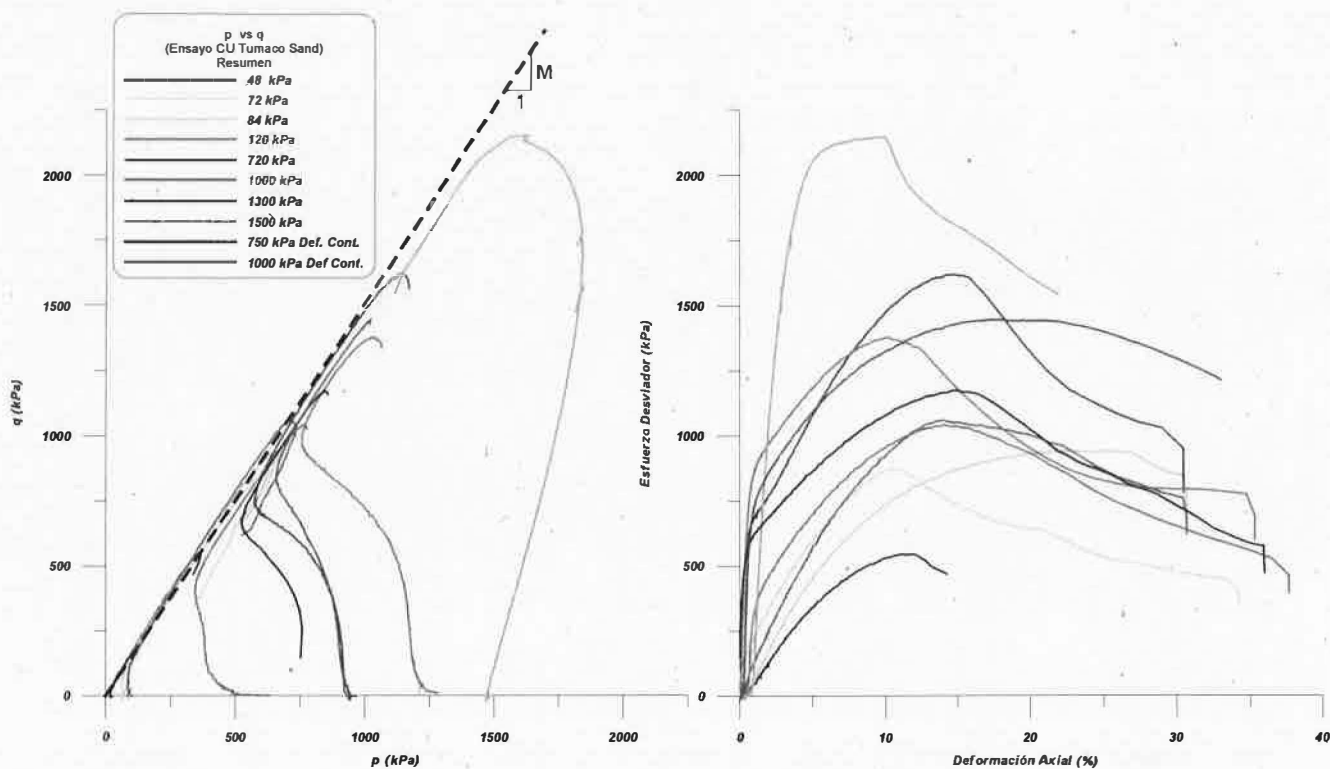


Figura 8. Triaxiales monotónicos de la Arena de Tumaco

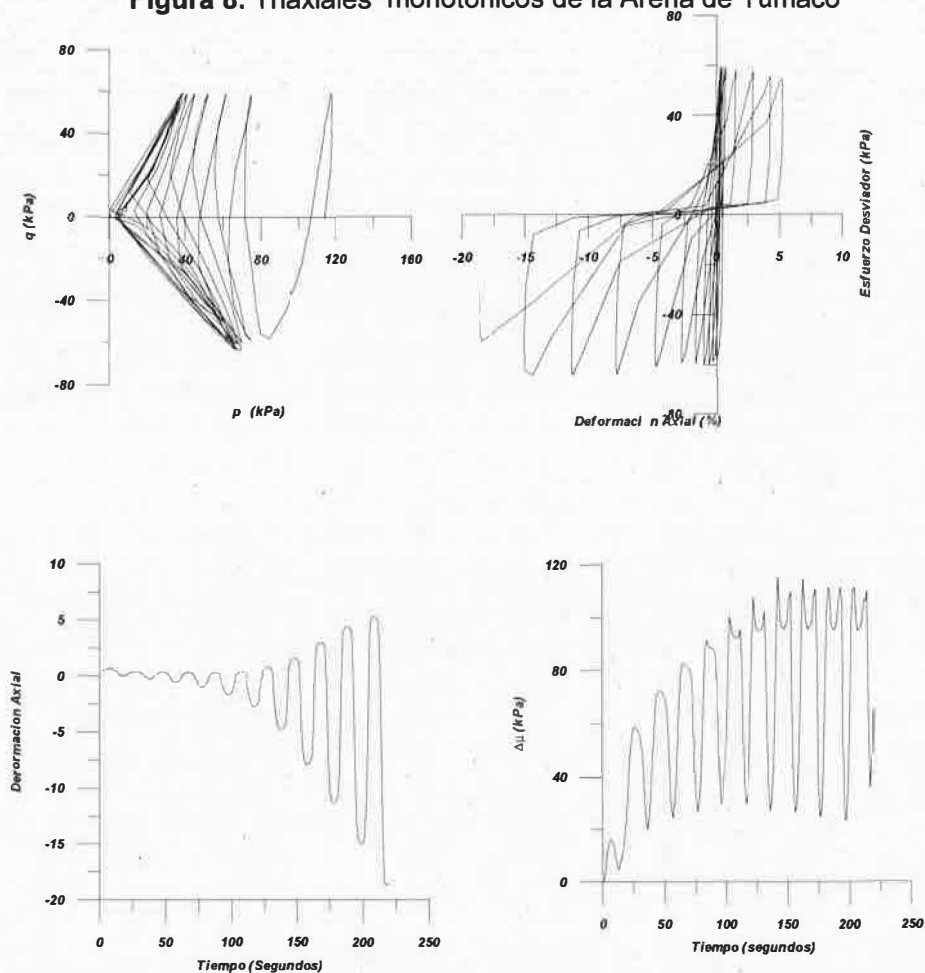


Figura 9. Comportamiento Dinámico de la Arena de Tumaco

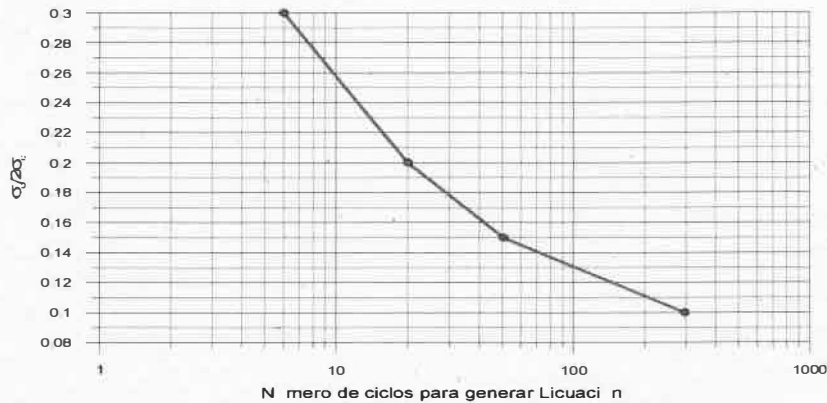


Figura 10. Efecto del esfuerzo desviador en el número de ciclos para causar licuación

Profundidad m	$a_{m\acute{a}x} = 0.1g$		$a_{m\acute{a}x} = 0.2g$		$a_{m\acute{a}x} = 0.3g$	
	Condición	FS	Condición	FS	Condición	FS
1.5	No licuable	2.13	No licuable	1.07	Licuable	0.71
3.75	No licuable	2.39	No licuable	1.20	Licuable	0.80
5.25	No licuable	1.32	Licuable	0.66	Licuable	0.44
6.7	No licuable	1.23	Licuable	0.62	Licuable	0.41
8.85	No licuable	1.97	Licuable	0.98	Licuable	0.66
12.65	No licuable	1.99	Licuable	0.99	Licuable	0.66
16.6	No licuable	5.13	No licuable	2.57	No licuable	1.71

Tabla 1. Resumen del análisis del potencial de licuación

Sismos registrados

Desde la instalación de los equipos en Tumaco, se han registrado 3 sismos, aunque poco relevantes. Un ejemplo es el sismo del Ecuador, el cual presentó una Magnitud de 6 y su localización se ilustra en la figura 11. Los registros de aceleración en superficie (3 componentes), en roca (3 comp.), y las lecturas de los 4 piezómetros se indican en la figura 12. Las aceleraciones fueron inferiores a $10 \text{ cm}^2/\text{s}$, y los incrementos de presión de poros inferiores a los 5 cm de altura de columna de agua.



Figura 11. Localización del sismo del Ecuador

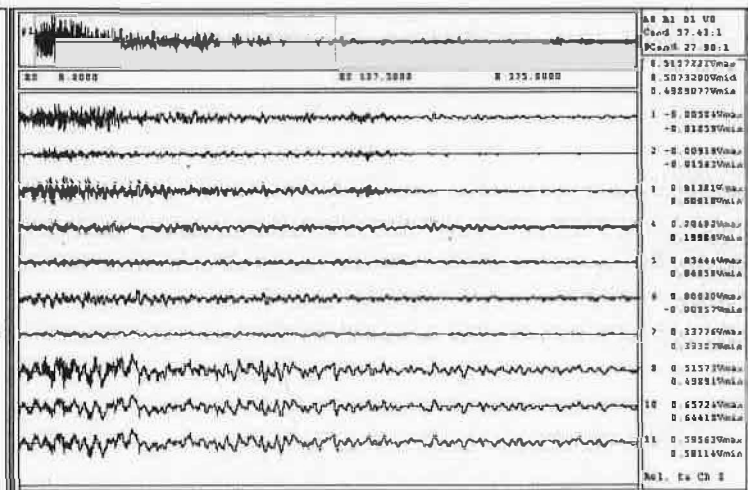


Figura 12. Registros de aceleraciones y presiones

Conclusiones

Los depósitos arenosos de la zona de Tumaco son susceptibles de licuar por efecto de un sismo, e incluso en algunos casos, bajo carga estática. Con el objetivo de estudiar en detalle dicha posibilidad, se han instalado acelerógrafos en la base rocosa y en la superficie del terreno, así como piezómetros para medir el incremento de presión de poros. También se ha llevado a cabo una intensa caracterización geotécnica de la arena. Las dificultades para extraer muestras inalteradas han exigido el empleo de técnicas de reconocimiento muy variadas: dilatómetro de Marchetti, SPT, cono sísmico, piezocono, densímetro nuclear y sísmica de refracción. También se han realizado ensayos triaxiales estáticos y cíclicos en el laboratorio sobre muestras reconstituidas. La información obtenida permite realizar una primera estimación del potencial de licuación de la zona usando una metodología empírica, pero es suficiente para análisis más sofisticados en el futuro. Por último se presenta un registro reciente donde se puede observar el buen funcionamiento de los acelerógrafos y de los piezómetros, si bien las medidas obtenidas son poco relevantes en este caso.

Referencias

- Elgamal A, Zeghal M, Parra E. (1996). Liquefaction of Reclaimed Island in Kobe, Japan. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE. Vol 122, No 1.
- Hushmand B, Scot R, Crouse C. (1992). On Place Calibration of USGS pore pressure transducers at Wildlife liquefaction site, California, USA, *Earthquake Engineering, tenth world conference*, Balkema.
- Hushmand B, Scott R. (1996). *In situ dynamic testing of pore pressure transducers at treasure island, California using "Caltech piezometer"*. Acapulco 1996
- Ishihara K, Shimuzu K, Yamada Y. (1981). Pore water pressures measured in sands deposits during an earthquake. *Soils and Foundations*. Vol 21, No 4.
- Olaya J. (1997). Refracción Sísmica de Tumaco, informe preliminar. Ingeominas.
- Kovacs, W and Salomene, L. (1982). SPT Hammer Energy Measurement. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. ASCE, Vol 108, No GT4, pages 599-620.
- Marchetti, S. (1997). The flat Dilatometer: "Design and Applications". Proc. Third International Geotechnical Engineering Conference, Keynote lecture, Cairo University, pp 421-448.
- Ramírez, J.E. (1975). Historia de los terremotos en Colombia. IGAC, Bogotá.
- Seed, H. And Idriss, I. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potencial. ASCE. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*. Vol. 97, 5179, pp 1249-1273.
- Scott R, Hushmand B. (1995). Piezometer Perfomance at Wildlife liquefaction site, California. *Journal of Geotechnical Engineering*.
- Skempton, A. W. (1986). Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressures relative density, particle size, ageing and overconsolidation. *Geotechnique* 36, No 3 pages 422-477.
- Youd L, Holzer T. (1994). Piezometer Perfomance at Wildlife liquefaction site, California *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE. Vol 120, No 6.
- Zeghal M, Elgamal A. (1994). Analysis of site liquefaction using earthquake records. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE. Vol 20, N0 6.