

Aplicación de modelos geoestadísticos a datos de ensayos de cono dinámico DPSH Grizzly® realizados en suelos potencialmente licuables en el sector norte de la ciudad de Punta Arenas

Application of geostatistical models to dynamic cone tests DPSH Grizzly® data carried out in potentially liquefiable soils in the northern sector of Punta Arenas city

Fecha de entrega: 20 de enero 2022
Fecha de aceptación: 11 de abril 2022

Pablo Villarroel y Ramón Carrasco

Geotecnia Patagonia Ltda., Av. España 0686, Punta Arenas, Chile, psvillarroelu@gmail.com, geotecniapat@gmail.com

En este trabajo se presenta la aplicación de modelos geoestadísticos a 71 ensayos con penetrómetro dinámico pesado DPSH Grizzly® realizados durante los últimos 7 años en una amplia zona del sector norte de la ciudad de Punta Arenas. Este sector, se caracteriza por tener una extensa unidad, compuesta de arenas saturadas sueltas potencialmente licuables, la que está acompañada de otras unidades de menor extensión compuesta por suelos orgánicos y arcillas blandas denominada localmente como "mazacote". Los modelos geoestadísticos permitieron obtener una correlación espacial de los datos de resistencia por punta del penetrómetro dinámico DPSH Grizzly®. Mediante estimaciones de interpolación geoestadístico Kriging, se identificaron las unidades geotécnicas que conforman el sector en estudio y también las zonas más susceptibles al fenómeno de licuación. Se complementó el estudio con datos de sondajes SPT, cartas geológicas y geomorfológicas y calibraciones al penetrómetro dinámico DPSH Grizzly®, realizadas durante la ejecución y revisión de los ensayos.

Palabras clave: geoestadística, penetrómetro dinámico, estimación por Kriging, licuación de suelos

In this paper, the application of geostatistical models to 71 tests with a dynamic probe super heavy DPSH Grizzly® carried out during the last 7 years over a wide area of the northern sector of the city of Punta Arenas is presented. This sector is characterized by having an extensive unit, composed of potentially liquefiable loose saturated sands, which is accompanied by other smaller units composed of organic soils and soft clays locally known as "mazacote". Geostatistics models allowed to obtain a spatial correlation of the tip resistance data of the dynamic penetrometer DPSH Grizzly®. Through Kriging geostatistical interpolation estimates, geotechnical units that make up the sector under study were identified as well as the most susceptible areas to the liquefaction phenomenon. The study was complemented with data from SPT tests, geological and geomorphological charts and calibrations to the dynamic penetrometer DPSH Grizzly®, undertaken during the execution and review of the tests.

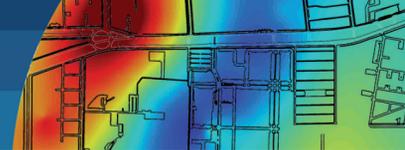
Keyword: geostatistics, dynamic penetrometer, Kriging estimation, soil liquefaction

Introducción

En la ciudad de Punta Arenas, se han realizado en los últimos 7 años más de 250 ensayos con penetrómetro dinámico DPSH-Grizzly® para distintos proyectos tanto públicos como privados, ya sean edificios de departamentos, loteos de viviendas sociales, condominios privados, locales comerciales, estructuras industriales,

entre otros. Del total de ensayos, 71 se realizaron sobre un cuadrante de aproximadamente 2800 x 2800 m acotado por las calles Enrique Abello-Avenida Frei y el borde costero de la ciudad según se observa en la Figura 1.

Dicho sector se caracteriza por tener una topografía bastante plana y con unidades geológicas definidas por una punta de acreción en gran parte de su extensión denominada



localmente como Punta Arenosa, la que como dice su nombre se caracteriza por tener estratos principalmente de arenas sueltas, mientras que hacia el oriente, se ubica el borde de una antigua terraza glaciolacustre y con estratos de suelo orgánico en su zona basal (Uribe, 1982). De acuerdo a la información recopilada de diversos estudios geotécnicos y estudios hidrogeológicos, otra característica del sector en estudio, es que posee una napa freática activa a una profundidad entre 1.5 y 2.5 m.

Mediante herramientas geoestadísticas se analizaron los penetrogramas de resistencia por punta de cada uno de los ensayos enmarcados de la zona de estudio, estableciendo correlaciones espaciales entre los ensayos mediante la determinación de variogramas experimentales, con los cuales se pueden definir variogramas teóricos necesarios para la interpolación mediante Kriging de una grilla de puntos contenida en el cuadrante (Villarroel, 2018). Esta herramienta, permite analizar gráficamente las unidades geotécnicas que conforman el sector en estudio y así acotar las zonas que posean una mayor o menor resistencia según sea el caso. En este sentido se ha establecido una correlación entre la resistencia de punta y un índice de susceptibilidad de licuación LPI (Iwasaki *et al.*, 1978), utilizando para ello un valor de umbral de resistencia de punta para el cual el sector en estudio es susceptible de licuación, según lo obtenido en estudios anteriores con ensayos DPSH y SPT (Peredo y Carrasco, 2018).



Figura 1: Zona nor-oriental de Punta Arenas, ensayos DPSH-Grizzly® y zona de estudio.

Penetrómetro DPSH – Grizzly®

El penetrómetro dinámico Grizzly® (sol-solution.com), mostrado en la Figura 2(a), permite realizar ensayos de penetración dinámica súper pesada DPSH, de acuerdo a la norma EN ISO 22476-2 (2005). El ensayo DPSH consiste en la hincada de un tren de barras metálicas con una punta cónica de 90° y un área de 20 cm² sobre las cuales se deja caer una masa de 63.5 kg a una altura de 76 cm, de manera similar a la ejecución de un ensayo SPT. El equipo posee un sistema automático y computarizado que permite medir, calcular y registrar en tiempo real la penetración obtenida en cada golpe, y la resistencia de punta q_d obtenida mediante la fórmula de hincado holandesa, eliminando así el factor humano en la obtención directa de los registros.

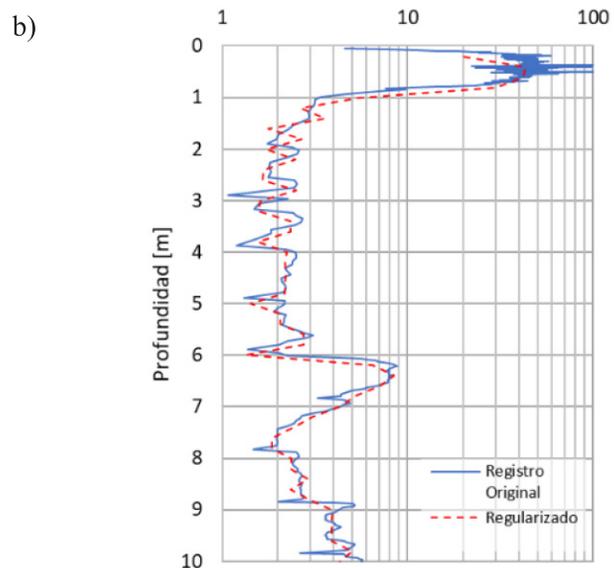
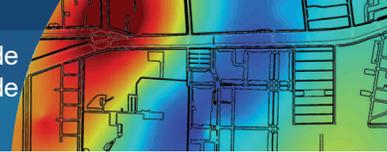


Figura 2: a) Equipo de ensayo DPSH Grizzly® y b) penetrograma de resistencia de punta



Los penetrogramas obtenidos de cada uno de los 71 ensayos utilizados para el presente estudio, se han regularizado según la expresión (1) con el fin de eliminar los valores atípicos, suavizar las señales y homogeneizar la longitud de todos los registros (Benz *et al.*, 2019). En esta ocasión se ha utilizado un valor de ventana de 0.20 m para la regularización de los penetrogramas.

$$q'_d = \frac{\sum q_d e_i}{\sum e_i} \quad (1)$$

Donde q_d corresponde a la resistencia de punta obtenida con un desplazamiento equivalente a e_i .

Por lo general los ensayos DPSH con equipo Grizzly® que ha ejecutado Geotecnia Patagonia, tienen una profundidad de 10 m, y excepcionalmente se han alcanzado profundidades de hasta los 20 m, lo anterior con el objeto de evitar una elevada fricción en las barras, y evitar inclinación del tren de barras que pudieran dañar mecánicamente el equipo. Por otro lado, gran parte de la zona en estudio posee una intervención antrópica propias del crecimiento de la ciudad, por lo tanto, es común encontrar capas superficiales que no corresponden a suelo natural y que por tanto alteran el penetrograma obtenido (Figura 2(b)). Además, distintos estudios geotécnicos e información hidrogeológica del sector muestran que la napa freática se encuentra a una profundidad del orden de los 1.5 a 2.0 m dominada por la presencia de esteros que atraviesan la zona de estudio. Es por todo lo anterior que la profundidad para la cual se han realizado los análisis van desde los 2.0 hasta los 10.0 m de profundidad.

Modelo geoestadístico

Análisis estadísticos y variable a utilizar

La variable a utilizar para la determinación del modelo geoestadístico corresponde al valor de resistencia de punta promedio del penetrograma q'_d regularizado entre los 2 y 10 m de profundidad, variable que definimos como \bar{q}'_d , y que tendrá asignada una posición específica en un plano, obtenida mediante navegador convencional GPS en coordenadas UTM. Para un mejor tratamiento de la información en el software de Geoestadística y para la generación del modelo en un sistema ortogonal a los ejes de un plano se ha utilizado un plano relativo de ubicación.

Variogramas experimentales y teóricos

Los variogramas experimentales son la herramienta básica de los modelos geoestadísticos, dado que permite analizar el comportamiento espacial de una variable sobre un área definida, siendo fundamental para la posterior estimación por Kriging ordinario. El variograma entrega la evolución de la varianza entre pares de datos para distintas distancias de análisis, partiendo generalmente desde valores bajos de varianza hasta alcanzar una denominada meseta a una distancia que se denomina generalmente como alcance, desde la cual ya no se obtiene una correlación espacial de los datos y la mejor estimación viene dada por la estadística clásica (Villarroel, 2018). Es habitual que los datos utilizados no estén distribuidos de manera regular en el espacio, como lo es en este caso, por lo que los programas de análisis incorporan tolerancias sobre las distancias y ángulos para el cálculo de los variogramas, según se muestra en la Figura 3. En este estudio se ha utilizado el software de código abierto SGeMS desarrollado por la Universidad de Stanford (sgems.sourceforge.net).

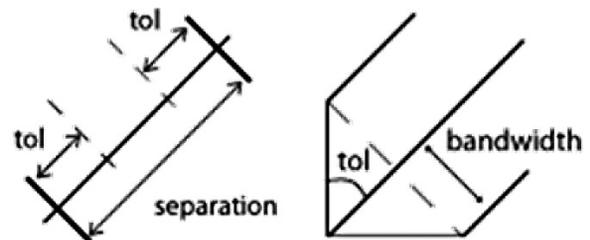


Figure 3: Tolerancias para la determinación de los variogramas experimentales SGeMS

Los variogramas teóricos corresponden al ajuste de una función matemática que mejor represente el variograma experimental, siendo los modelos esféricos, gaussiano y exponencial los más utilizados para la modelación geoestadística.

En la Figura 4 se muestra el omni-variograma experimental de la variable \bar{q}'_d , es decir, el variograma ponderado para todas las direcciones del plano, considerando para ello una separación entre pares de datos y ancho de banda de 70 m, y una tolerancia de 35 m. El variograma teórico que mejor se ajusta corresponde a un modelo esférico con un alcance de 950 m y una meseta de 6.9 MPa. Este alcance podría

interpretarse como la dimensión horizontal de las unidades geotécnicas que conforman la zona en estudio mientras que la disminución de la varianza para distancias mayores al alcance puede corresponder a la existencia de zonas alternadas de mayor y menor resistencia.

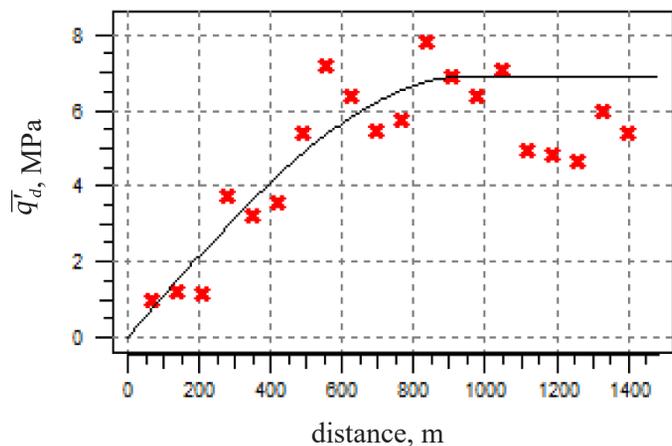


Figura 4: Variograma experimental y teórico de la variable \bar{q}_d

Interpolación mediante Kriging ordinario

La interpolación mediante Kriging utiliza como variables de entrada los valores de resistencia de punta \bar{q}_d con su respectiva ubicación en el plano relativo definido anteriormente, y además el modelo matemático del variograma teórico. Se ha definido una grilla de puntos distanciados a 5 m abarcando toda el área de estudio, para el cual el software obtendrá un valor de resistencia por punta de manera que se cumpla la variabilidad espacial definida por el variograma.

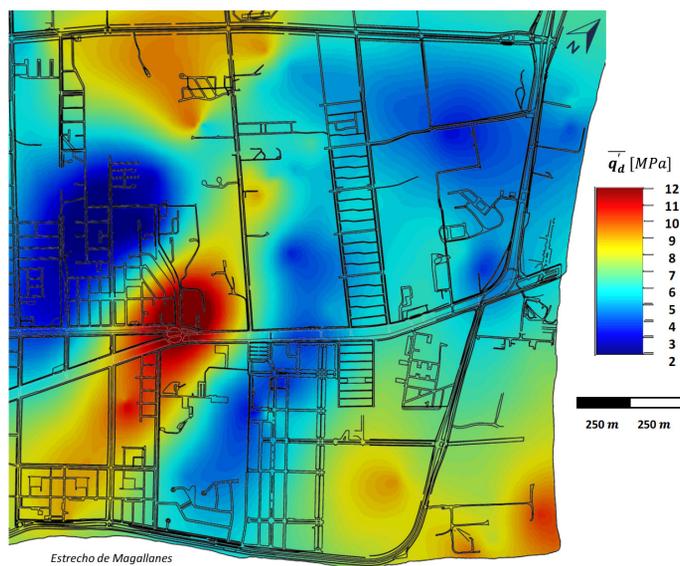


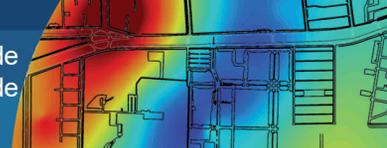
Figura 5: Estimación por Kriging de la resistencia de punta en el cuadrante en estudio

En la Figura 5 se muestra el resultado de la interpolación mediante Kriging ordinario de toda el área de estudio. De acuerdo a antecedentes geotécnicos como sondajes y calicatas realizadas en el sector junto con antecedentes geológicos (Uribe, 1982), la zona de más baja resistencia está dominada por la existencia de estratos de suelo con alto contenido orgánico. Las zonas de más alta resistencia ubicadas al oriente están dominadas por la existencia de un estrato de gravas de compacidad densa de unos 3 m de espesor (Carrasco, 1997). Mientras que la zona de alta resistencia ubicada al poniente está dominada por estratos arenosos densos sobre estratos de arcillas blandas denominadas localmente como mazacote, y que corresponden a una terraza glaciolacustre ubicada a una cota levemente superior que el resto de la zona en estudio. Además, se puede ver gráficamente la alternancia de zonas con mayor y menor resistencia, lo que ya se podía inferir del variograma experimental, y que las dimensiones de cada zona son aproximadamente equivalentes al alcance definido por el variograma.

Susceptibilidad de licuación

Definición del índice LPI_{GR}

Estudios anteriores realizados por Peredo y Carrasco (2018) determinaron en base a la comparación de ensayos DPSH – Grizzly® con ensayos SPT un valor umbral de resistencia de punta para el cual las arenas de la formación de la punta de acreción son susceptibles de licuación, valor definido en $\bar{q}_d \leq 7.5$ MPa. Considerando que la zona en estudio está conformada por arenas saturadas en gran parte de su extensión y tomando en cuenta el valor umbral de resistencia se ha definido un factor de seguridad según la expresión (2), el cual se utilizará para la determinación de un índice de potencial de licuación LPI_{GR} definido en (3). El propósito de este análisis es comparar los penetrogramas de cada uno de los ensayos cuantificando y ponderando las zonas que posean una resistencia por debajo de la resistencia umbral. Debido a que el índice de potencial de licuación LPI está ligado a un factor de seguridad a la licuación (Iwasaki *et al.*, 1978) proviene originalmente de un análisis realizado para ensayos SPT, sobre el cual existen rangos asociados al potencial de licuación, y que además los penetrogramas utilizados en este estudio tienen registros hasta los 10 m de profundidad y no hasta los 20 m, es que se ha diferenciado la nomenclatura a LPI_{GR} .



$$FS_{GR} = \begin{cases} 1 - \frac{q'_d(z)}{7.5} & \text{si } q'_d \leq 7.5 \text{ MPa} \\ 0 & \text{si } q'_d > 7.5 \text{ MPa} \end{cases} \quad (2)$$

Donde $\bar{q}'_d(z)$ es la resistencia de punta regularizada para un intervalo de 0.20 m a una profundidad z .

$$LPI_{GR} = \int_{z=2}^{z=10} FS \times W(z) dz \quad (3)$$

Donde $W(z) = 10 - 0.5z$

Relación entre \bar{q}'_d y LPI_{GR}

Como una manera de visualizar si \bar{q}'_d puede ser una variable representativa de todo el penetrograma se han obtenido los valores de LPI_{GR} para cada uno de los 71 ensayos analizados y se han comparado con su respectivo valor de \bar{q}'_d . En la Figura 6(a) se presentan ambas variables donde se observa que en términos generales existe una buena correlación entre ambas variables, lo que evidentemente está dominada por valores de $\bar{q}'_d \leq 7.5 \text{ MPa}$, correspondiente al 66% del

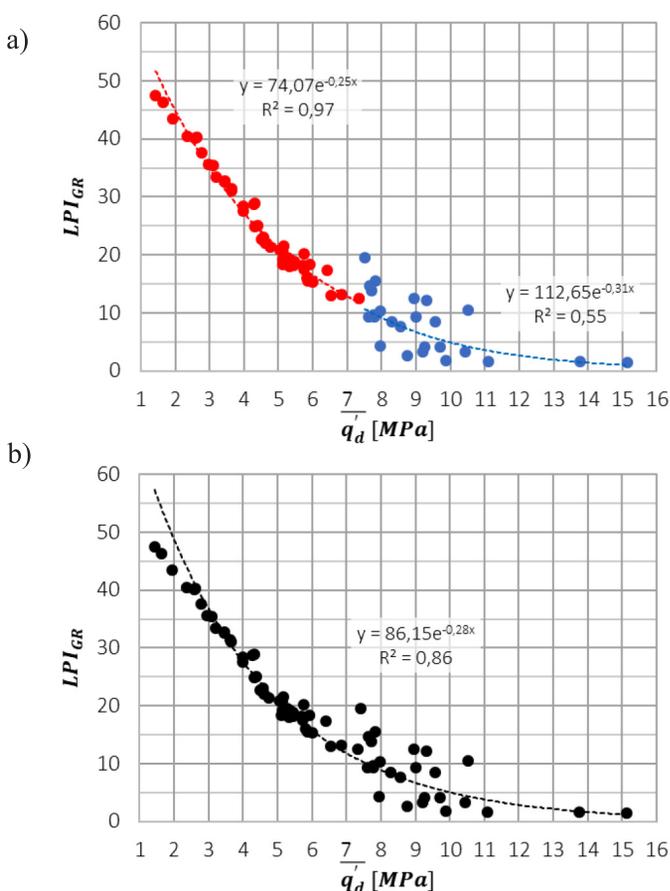


Figura 6: Relación LPI_{GR} versus \bar{q}'_d , a) ajustes para $7.5 \text{ MPa} \leq \bar{q}'_d$ y b) ajuste para todos los datos

total de ensayos, donde para una función exponencial se obtiene una calidad de ajuste $R^2 = 0.97$, mientras que para valores mayores la variabilidad aumenta significativamente, donde el valor \bar{q}'_d no entrega valores acotados de LPI_{GR} , con un $R^2 = 0.55$. La Figura 6(b) muestra una curva de mejor ajuste para todos los datos con $R^2 = 0.86$.

Comparación con ensayos SPT

Por lo general los ensayos DPSH-Grizzly® ejecutados, han sido parte de estudios geotécnicos sin otros ensayos o bien como un complemento de sondajes con ensayos SPT, por lo tanto, no siempre están lo suficientemente cercanos entre sí para obtener una comparación directa entre todos los ensayos utilizados. Sin embargo, la geoestadística y la relación con la variable LPI_{GR} pueden entregar información espacial para corroborar si existe relación con la variable LPI obtenida directamente de ensayos SPT. Para corroborar aquello se realizó un análisis que consistió, en primer lugar, en la obtención por medio de la interpolación geoestadística de resistencia de punta \bar{q}'_d sobre un punto espacial donde se tenga información de ensayos SPT. Posteriormente se obtiene el valor LPI_{GR} con la correlación obtenida en la Figura 6(a), valor que finalmente se compara con el valor de LPI (Iwasaki *et al.*, 1978, 1981, 1982) obtenido del ensayo SPT.

La obtención del Índice de Potencial de Licuación LPI se obtuvo considerando un sismo de magnitud $M_w = 6.8$ y aceleración $A_0 = 0.28g$, valores utilizados para la obtención de la resistencia por punta umbral (Peredo y Carrasco, 2018) y que corresponde a valores habituales entregados por informes de riesgo sísmico para la zona en estudio. Por otro lado, los ensayos SPT seleccionados para este estudio fueron ejecutados por el mismo operador y la misma máquina, evitando con ello mayor variabilidad en los datos producto de factores de ejecución y eficiencia del ensayo.

En la Figura 7, se muestra la relación entre las variables $LPI(SPT)$ y LPI_{GR} , esta última obtenida indirectamente mediante la interpolación de la variable \bar{q}'_d . Se observa que para la zona donde existe un valor de $\bar{q}'_d \leq 7.5 \text{ MPa}$, la variable LPI_{GR} tiene una relación lineal con la variable LPI obtenida de ensayos SPT, con un $R^2 = 0.92$ y con 11 ensayos SPT analizados, permitiendo inferir que la variable \bar{q}'_d es un buen indicador de la susceptibilidad de licuación para esas zonas en particular. Esto podría explicarse en que esta

zona posee estratos arenosos de compacidad suelta y relativamente uniformes en profundidad, no así en la zona con $\bar{q}'_d \leq 7.5$ MPa, donde se analizaron 7 ensayos SPT, en el cual un valor alto de resistencia de punta \bar{q}'_d , y por tanto un valor bajo de LPI_{GR} , no garantiza una menor susceptibilidad de licuación, puesto que a profundidades entre 10 y 20 m existen suelos arenosos sueltos y saturados que definen los valores altos de LPI .

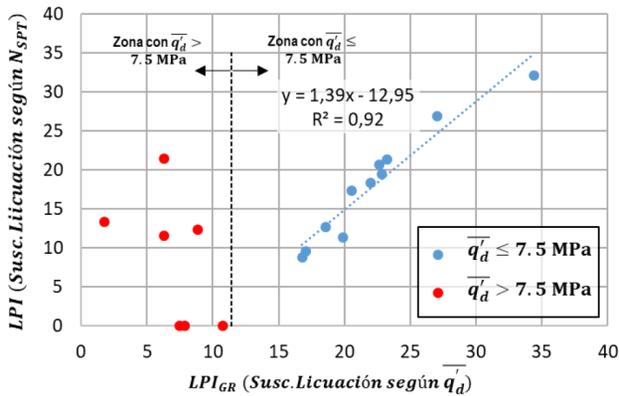


Figura 7: Comparación LPI_{GR} y $LPI(SPT)$ por zonas

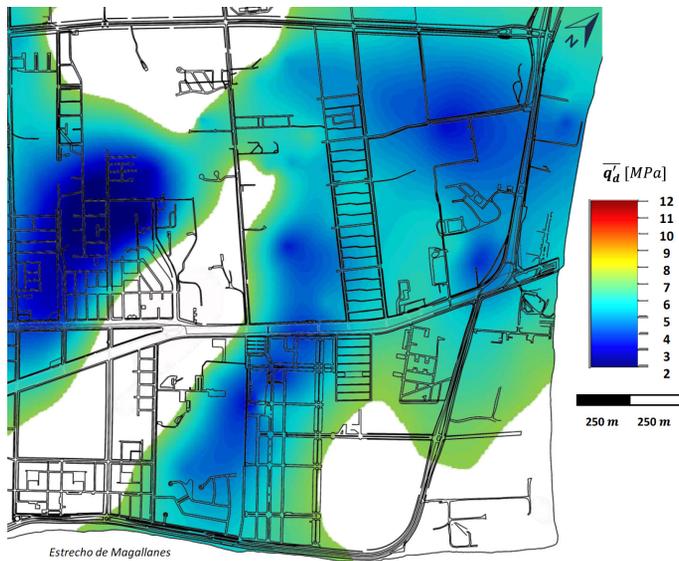


Figura 8: Zonas con $\bar{q}'_d \leq 7.5$ MPa

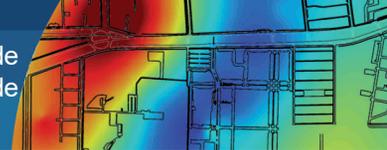
De manera particular los puntos donde existe un $LPI = 0$ se encuentran ubicados en la zona con $\bar{q}'_d \leq 7.5$ MPa ubicada al poniente, donde según se ha mencionado anteriormente existen estratos granulares densos superficiales pero en profundidad aparecen suelos de consistencia blanda denominados como “mazacote”, cuya clasificación habitual según sistema USCS es CL o CH, donde evidentemente el análisis de licuación no es aplicable.

En la Figura 8 se presenta las zonas donde la variable \bar{q}'_d podría ser un buen indicador respecto a la susceptibilidad de licuación del suelo.

Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante la aplicación de modelos geoestadísticos y los análisis espaciales entre los ensayos DPSH – Grizzly® y ensayos SPT, es posible inferir las siguientes conclusiones:

- Si bien la obtención del variograma experimental muestra un claro ajuste teórico, el espaciamiento irregular entre ensayos y la existencia de sub-zonas con mayor/menor densidad de ensayos hace aumentar la dispersión del variograma, por lo que lógicamente, en la medida que se ejecuten más ensayos dentro de esta zona se debería obtener un ajuste cada vez más preciso.
- Valores de $\bar{q}'_d \leq 7.5$ MPa resulta ser un buen indicador de todo el penetrograma de resistencia en profundidad expresado en la variable de susceptibilidad LPI_{GR} . Para valores mayores, la variabilidad aumenta significativamente, lo que indica la existencia de estratos con diferencias considerables en su resistencia de punta. Esta diferencia podría indicar la existencia de un proceso/origen geológico específico para esas zonas, distinto a las demás zonas en estudio.
- De la misma manera para las zonas de $\bar{q}'_d \leq 7.5$ MPa se obtiene una buena correlación entre las variables LPI_{GR} (obtenida indirectamente de la variable \bar{q}'_d) y LPI (obtenida directamente de los ensayos SPT), por lo que en estos casos un ensayo DPSH (Grizzly) de 10 m de profundidad resulta representativo para un análisis de susceptibilidad de licuación. En las zonas con $\bar{q}'_d \geq 7.5$ MPa no se obtiene una tendencia, y no se garantizan menores valores de susceptibilidad, excepto en las zonas ubicadas al poniente donde existen matrices de suelos finos en los que no aplica la determinación de estos índices. En estos casos, profundizar el ensayo y acercarse hasta los 20 m resulta ser una alternativa válida para obtener una mejor interpretación en términos de susceptibilidad, siempre que se tome en consideración los riesgos mecánicos propios de la ejecución (inclinación, aumento de roce, rotura de barras).



- La zona en estudio representa aproximadamente el 20% de la superficie urbana de Punta Arenas, y de acuerdo al análisis de susceptibilidad realizado, una gran parte de esta zona, posee una clasificación superior a 5 (medio) e incluso superiores a 15 (muy alto), lo que indica que existe un alto potencial de efectos adversos ante un evento sísmico importante, más aún si se considera, que por esta zona, pasa gran parte de las líneas subterráneas de suministros básicos de la ciudad.
- Finalmente, se puede concluir, que el ensayo con penetrómetro dinámico DPSH (Grizzly®) puede ser una herramienta útil para la caracterización geotécnica del subsuelo y un buen complemento para los ensayos SPT, lo que permitiría abarcar una mayor extensión de exploración geotécnica y zonificación, mediante herramientas geoestadísticas en otras zonas de la ciudad, acotando, por cierto, aquellas áreas donde un ensayo de 10 m de profundidad entregue un valor representativo.

Referencias

- Benz-Navarrete, M.A., Breul, P. and Moustan, P. (2019). Servo-assisted and computer-controlled variable energy dynamic super heavy penetrometer. *XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, López-Acosta et al. (eds.), Cancun, Mexico, IOS Press, 65-72
- Carrasco, R. (1997). *Zonificación geotécnica en algunos sectores de Punta Arenas y soluciones particulares para mejoramiento y fundaciones*. Memoria de título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile
- EN ISO 22476-2 (2005). Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 2: Dynamic probing. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium
- Iwasaki, T., Arakawa, T. and Tokida, K. (1982). Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes. *Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Southampton, UK, 925–939
- Iwasaki, T., Tokida, K. and Tatsuoka, F. (1981). Soil liquefaction potential evaluation with use of the simplified procedure. *First International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis MO, USA, 209-214
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K. and Yasuda S. (1978). A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. *2nd International Conference on Microzonation for Safer Construction – Research and Application*, San Francisco CA, USA, vol. 2, 885–896
- Peredo, V. y Carrasco, R. (2018). Correlación entre el ensayo penetrómetro dinámico Grizzly (DPSH) y SPT en arenas potencialmente licuables del sector Punta Arenosa en la ciudad de Punta Arenas. *X Congreso Chileno de Geotecnia*. Valparaíso, Chile, artículo 1661
- Uribe, P. (1982). Geología y consideraciones geotécnicas del suelo de fundación de Punta Arenas. Informe taller de título II. Departamento de Geología Universidad de Chile, Santiago, Chile
- Villarroel, P. (2018). *Estudio del control de compactación de tranques de relaves mineros utilizando modelos geoestadísticos*. Memoria de título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile