GEOSTATISTICAL ANALYSIS TO OBTAIN A GEOTECHNICAL MODEL. CASE STUDY METRO DE BOGOTÁ – COLOMBIA

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO PARA LA OBTENCIÓN DE UN MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO. CASO DE ESTUDIO METRO DE BOGOTÁ- COLOMBIA

Narvaez Segura María Camila[1],
Torres Romero Carlos Eduardo[2]

[1]Estudiante Facultad de ingeniería civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá Colombia
Departamento de geociencias, Universidad de Évora, Portugal maria.narvaez@usantotomas.edu.co
[2]Docente Facultad de ingeniería civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá Colombia
Carlos.torresr@usantotomas.edu.co

Resumen

Existen herramientas computacionales que sirven como mecanismos poderosos para enlazar áreas de conocimiento como la Geología con la Ingeniería Civil, este es el caso de la conexión que debe existir al momento de analizar información y pruebas especializadas para caracterizar un terreno, dependiendo de la escala y la complejidad del mismo. Los modelos geologico-geotecnicos proveen al ingeniero la herramienta para entender mejor las condiciones predominantes en un lugar específico, estos pueden variar ampliamente e incluir descripciones escritas, secciones en dos dimensiones, diagramas de bloques o inclinarse hacia algún aspecto en particular, como el agua subterránea, procesos geomorfológicos, estructura rocosa, etc. (The Geological Society, 1997); Permitiendo identificar los problemas geotécnicos existentes con mayor relevancia y hacer la estimación de propiedades del suelo más cercana a la realidad. En este trabajo se muestra el proceso para la obtención de un modelo geológico-geotécnico para una sección del tramo cuatro de la línea subterránea del metro de Bogotá, gracias a esto se permite optimizar tiempo de estudio en los análisis y resultados de las propiedades del subsuelo de dicho proyecto. Finalmente, se encontró que a partir de la aplicación del método de Kriging, en el software de información geográfica ArcGis, y empleando un análisis geo estadístico, se puede obtener un perfil de predicción continuo a lo largo del corredor vial, diferenciándolo de manera positiva con los métodos utilizados convencionalmente.

Palabras clave: Modelo geológico-geotécnico, GIS, Geo estadística, Kriging.

Abstract

There are computational tools that serve as powerful mechanisms to link areas of knowledge such as Geology with Civil Engineering, this is the case of the connection that must exist when analysing information and specialized tests to characterize a terrain, depending on the scale and the complexity of it. Geological-geotechnical models provide to the engineer a tool for a better understanding of the prevailing conditions in a specific place, these can vary widely and include written descriptions, two-dimensional sections, block diagrams or lean towards some particular aspect, such as groundwater , geomorphological processes, rocky structure, etc. (The Geological Society, 1997); allowing to identify the most relevant existing geotechnical problems and make the estimation of soil properties closer to reality. This work shows the process to obtain for the design of a geological-geotechnical model for a part of section IV of the underground line of the Bogotá metro, thanks to this it is possible to optimize study time in the analysis and results of the properties of the subsoil of this project. Finally, it was found that from the application of the Kriging method, in the ArcGIS geographic information software, and geo-statistical analysis, a continuous prediction profile can be obtained along the road corridor, differentiating it positively with the methods conventionally used.

Key words: Geological-geotechnical model, GIS, Geostatistics, Kriging.

1. INTRODUCCIÓN

Un estudio de suelo representa una investigación ardua y sistemática, durante la cual se pueden presentar algunas dificultades en el análisis y recolección de los datos: como el desconocimiento la distribución en profundidad de los materiales, la cantidad insuficiente de información recolectada, la delimitación del área de estudio a trabajar, etc.; con esa precariedad en la información, el ingeniero se obliga a trabajar a partir de suposiciones y simplificaciones que restan rigor a los diseños detallados. Al respecto, desde los años 60's (Cressie, 1993) se plantean soluciones como los modelos geologicos-geotecnicos y las herramientas geoestadísticas que ayudan en la construcción de modelos detallados a partir de información puntual empleando técnicas de interpolación espacial. Estos modelos han tenido una evolución notable gracias al avance de la computación, yendo de los modelos bidimensionales a los modelos tridimensionales con el fin de representar las unidades básicas de información geotécnica en un área determinada, teniendo en cuenta variables como escala, profundidad y objeto de estudio (Montero & Larraz, 2008).

Para la obtención del modelo geológico- geotécnico es conveniente llevar a cabo el análisis de la información de forma secuencial y en etapas; la primera es la recolección de la mayor cantidad de información posible relacionada con el contexto geológico y estratigráfico del proyecto. De igual manera siempre es necesario integrar la información morfológica e hidrogeológica a los análisis, dado que estas características relacionadas con la génesis de los suelos y las rocas determinan a la postre las propias del perfil estratigráfico. En segundo lugar se debe clasificar dicha información generando bases de datos específicas con la selección de los parámetros que van a conformar el modelo planteado; en el caso particular se emplearon las características básicas y propiedades índice siendo que estas permiten identificar de forma clara los cambios que ocurren por el proceso natural de deposición. Seguido a esto, se realizan los análisis estadísticos de la información recolectada, cuyo resultado en términos de los parámetros estadísticos representativos de la distribución de los datos, es el insumo primario para el análisis geo estadístico. Por último, se usa un software de información geográfica para el modelado y la representación espacial de los resultados obtenidos. El software usado en el análisis, también incluye módulos que permiten realizar el análisis de interpolación espacial por diferentes métodos, de manera que su uso es adecuado para la obtención de los objetivos propuestos. Como resultado final del proceso analítico, se tiene la representación espacial de la variación de las propiedades del suelo mediante la visualización del corredor continuo y el modelo geotécnico del tramo seleccionado. Se tendrá como caso de estudio la línea del metro de Bogotá, ya que este proyecto cuenta con un fuerte impacto para el desarrollo de la movilidad de esta ciudad y suficiente información que puede ser aprovechada para este tipo de análisis.

2. ESTADO DEL ARTE

La estadística ligada a estudios de la tierra se conoce como "geo estadística", los primeros antecedentes conocidos se remontan a los años cincuenta donde el Dr. Krige y sus compañeros de estudio realizan la aplicación de técnicas de estadística con el fin de estimar las reservas minerales presentes en Sudáfrica; este término, fue acuñado por Hart en 1954 denotando diferentes técnicas estadísticas para enfatizar la ubicación de distribuciones de área en un contexto geográfico (Cressie, 1993). En los años sesenta el matemático francés G. Matheron recopila estas técnicas de estadística y sienta las bases matemáticas y probabilísticas de la geoestadística, aplicándolas en su lugar de trabajo en el Bureau de recherches géologique et minières (BRGM) en yacimientos mineros en Argelia (Matheron, 1962). Estos estudios tomaron fuerza dado que los costos de perforaciones mineras eran altos y en consecuencia a esto el análisis de los datos debía ser tratado con mayor importancia (Chica, 2003).

Se contemplan una serie de pasos en los análisis geo estadísticos convencionales (Isaaks & Srivastava, 1989), se toma como punto de partida el análisis estructural, a partir del análisis del variograma (Samper & Carrera, 1993), el cual arroja como resultado un posible modelo de variograma teórico para ser usado en la interpolación de la variable en los sitios no muestreados, para posteriormente elaborar mapas que se puedan emplear en el análisis y toma de decisiones (Chica, 2003).

La geo estadística se ha podido utilizar en diferentes áreas como: La minería con estudios realizado por Journel & Huijbregts en 1978, ecología con estudios realizados por Robertson en 1987, geología con estudios realizados

por Samper & Carrera en 1993 y ciencias ambientales con estudios realizados por Cressie & Majure en 1995, Diggle et al en 1995 y Páez & De Oliveira en 2005.

Actualmente, en el contexto local se han desarrollado trabajos de geo estadística como el de (Parra Gomez, 2019)en los cuales se aplican técnicas de interpolación espacial como el Kriging para la obtención de perfiles geotécnicos y la reducción de incertidumbre en Bogotá a partir de información del proyecto de metro subterráneo

3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Dado que las perforaciones de suelos tienen un elevado costo, el acceso a la información se ve limitado al número de dichas perforaciones que se pueda realizar en el proyecto. Esta es una de las razones por las cuales el ingeniero civil se ve en la necesidad de buscar alternativas de solución como los son los modelos geológicos - geotécnicos obtenidos a partir de análisis estadísticos, los cuales permiten entender, analizar y estudiar el subsuelo en forma continua y si el alcance lo permiten realizarlo en tres dimensiones.

Teniendo en cuenta lo anterior se busca crear un modelo geológico - geotécnico por medio de sistemas de información geográfica y el software ArcGis a partir de datos obtenidos en muestras, sondeos y exploraciones de campo, con el fin de disminuir la variación espacial y proporcionar un modelo más cercano a la realidad de un tramo seleccionado en la ciudad de Bogotá.

Se tendrá como caso de estudio la línea del metro de Bogotá, ya que este proyecto cuenta con un fuerte impacto para el desarrollo de la movilidad en la ciudad y suficiente información que puede ser aprovechada para este tipo de análisis.

3.1. Área de estudio

Bogotá está en proceso de desarrollo de la primera línea de metro y a lo largo de esto se han realizado estudios y sondeos de exploración de suelos del corredor propuesto (CONSORCIO L1, 2015) incluyendo perforaciones convencionales con equipo de percusión, rotación y lavado, pruebas de laboratorio y una colección bastante robusta de pruebas de CPTu (Ensayo de piezocono), DMT (Dilatómetro) y PTM (Presurometro). Gracias a este volumen de información se puede definir que el proyecto de la línea de metro es una buena opción para la aplicación de la metodología propuesta.

El corredor de metro subterráneo tiene una longitud aproximada de 29,6 km, con inicio en el occidente y una culminación total en el noroccidente de la ciudad, dividiéndose en cuatro tramos a lo largo del mismo (CONSORCIO L1, 2015). De igual manera, en su recorrido transcurre sobre diferentes zonas geotécnicas de la ciudad como se muestra en la Figura 1 y se seleccionó un área de estudio más específica en el noroccidente entre K 5+670 y K 6+760 (Calle 119 y Calle 127) del tramo cuatro como se muestra en la Figura 2.

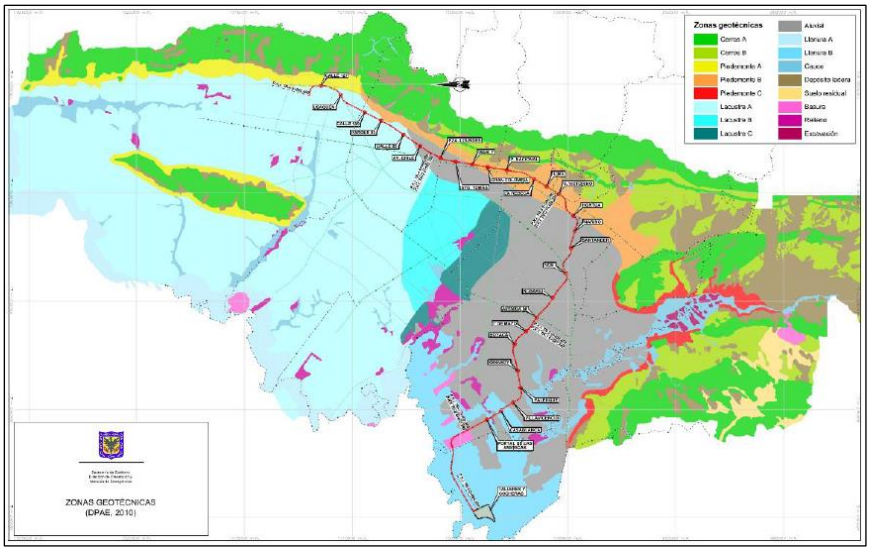


Figura 1. Localización del corredor de metro a través de zonas geotécnicas *(CONSORCIO L1, 2015)*

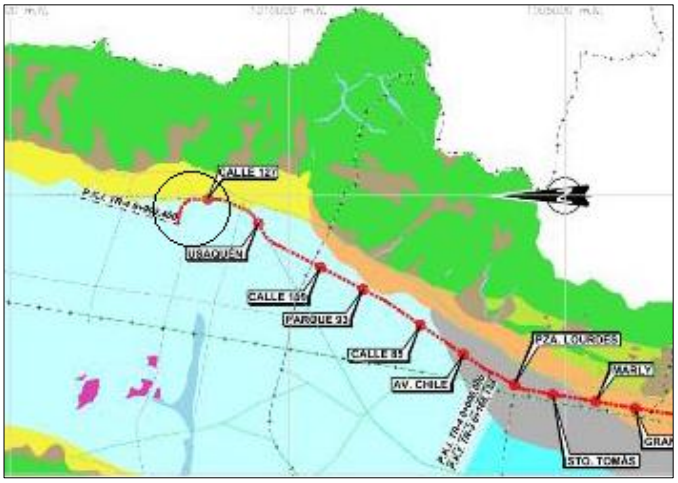


Figura 2. Corredor de metro tramo IV y ubicación del área de estudio a través de zonas geotécnicas. Elaborado con información presentada por: *(CONSORCIO L1, 2015)*

3.2. Contexto geológico

La Sabana de Bogotá está localizada en la parte central de la Cordillera Oriental y en ella afloran rocas desde el Cretácico Superior al Cuaternario las cuales evidencian diferentes condiciones de sedimentación. Las rocas más antiguas están representadas en las formaciones Chipaque, La Frontera, Simijaca y Conejo (Turoniano-Santoniano); ésta sedimentación se dio en ambientes marinos con la depositación de 1.200 m aproximados de secuencia. A partir del Campaniano las condiciones de sedimentación varían y se deposita en zonas distales la Formación Lidita Superior y la Formación Arenisca Dura en zonas proximales y continúa la sedimentación en el Campaniano Superior con la Formación Plaeners; la regresión se completa y deja como último registro marino la Formación Labor- Tierna y la parte inferior de la Formación Guaduas y empieza una sedimentación continental de tipo fluvial (SGC, 2015). Específicamente, subyaciendo los depósitos recientes en la zona de estudio se localizan rocas pertenecientes a la formación Plaeners (K2p) conformada por intercalaciones de lodolitas y arcillolitas con gran abundancia de foraminíferos bentónicos (SGC, 2015) y la formación Labor Tierna (K2t) conformada por intercalaciones de areniscas en capas medianas y gruesas con lodolitas en capas delgadas (SGC, 2015).

Según el decreto 523 de 2010, por el cual se adopta la microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá, la zona de estudio se encuentra en localizada sobre la unidad geotécnica denominada Lacustre A, la cual se describe como secuencias sedimentarias de consistencia muy blanda, con espesores que varían entre los 50 y los 200m de espesor (FOPAE, 2010). Específicamente, la zona que se estudio está localizada sobre la carrera novena entre calles 117 y 127, sector que pertenece a la zona sísmica denominada Lacustre 100, descrita por el FOPAE (2010) como "Arcillas limosas o limos arcillosos, en algunos sectores con intercalaciones de lentes de turba", pertenecientes a la formación Sabana (Q1sa), lo cual se puede evidenciar en la Figura 3.

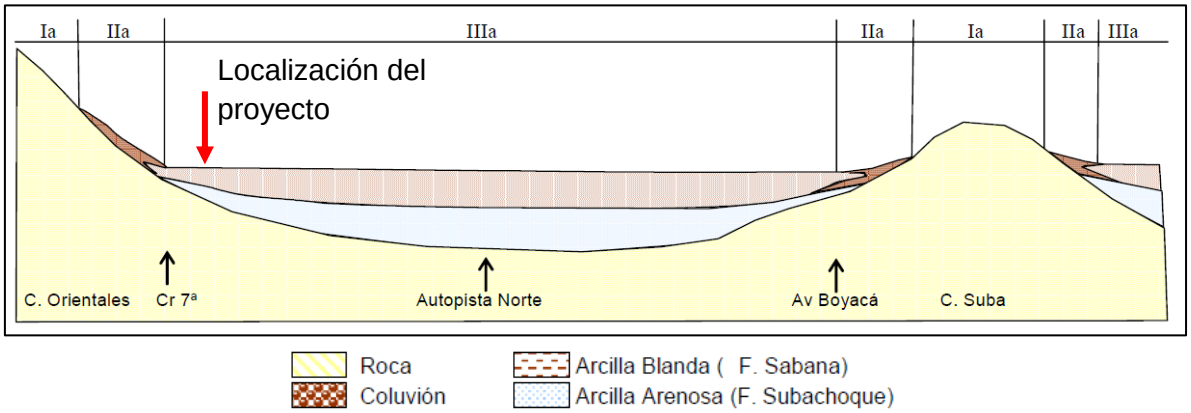


Figura 3.Sección geológica típica desde la calle 127 a la calle 200 en sentido oriente occidente*(FOPAE, 2010)*

El final de tramo cuatro de los estudios para la línea de metro subterráneo de Bogotá, que es el área de interés, presenta en superficie un nivel de arcillas/limos de origen lacustre con intercalaciones de pequeño espesor de niveles arenosos y gravosos. Estos materiales de naturaleza fundamentalmente lacustre presentan espesores medias de 20-30 m, aunque, localmente pueden llegar a los 50 m. Bajo estos materiales aparecen niveles arenosos y gravosos con intercalaciones de arcilla, en general procedentes de las laderas. (CONSORCIO L1, 2015)

Interestratificados en estos materiales lacustres y de conos aparecen una serie de pequeños niveles de materia orgánica con cierta continuidad lateral aunque irregular. De igual manera, se encuentran dos niveles de agua; uno freático situado bajo la superficie del terreno y que responde al acuífero superior lacustre de naturaleza cohesiva y otro piezométrico, en general situado por encima del terreno natural y que es el detectado en el acuífero profundo, situado los el acuífero lacustre superior, y formado por los materiales del complejo de conos mucho más permeables y conectados (CONSORCIO L1, 2015)

3.3. Procesamiento datos disponibles

El proyecto de la línea de metro de Bogotá, cuenta con un volumen considerable de información enfocada en el análisis del suelo (geológica, geotécnica y geofísica) en forma de perforaciones convencionales, pruebas y ensayos de laboratorio, pruebas in situ y diversas aplicaciones de técnicas de topografía. En el tramo seleccionado están disponibles 25 sondeos diferentes como lo muestra su localización en la Figura 4, los puntos en forma de cruz pertenecen a 14 sondeos convencionales y los cuadrados a 11 ensayos CPTu, con una separación aproximada de 100 m.

Se utilizan las pruebas CPTu como datos principales para el modelo geotécnico analizadas en el software ArcGis ya que sus datos son ideales para el análisis espacial y estadístico, tomando como parámetros a utilizar la resistencia en la punta del cono del equipo (Qc), la resistencia medida en los transductores ubicados en el fuste del mismo (Fs) y Índice de clasificación del suelo (Ic) (Robertson, 2010). Igualmente, los sondeos convencionales se utilizaron para realizar un modelo geotécnico a partir de la observación de la variación espacial de los datos en profundidad, con el cual comparar directamente los dos procesos.

Los sondeos convencionales realizados mediante percusión y rotación con equipo mecánico, y los ensayos de piezoconos se resumen en la Tabla 1 mostrando su posición exacta y las coordenadas con las cuales se realizó la localización de los mismos.

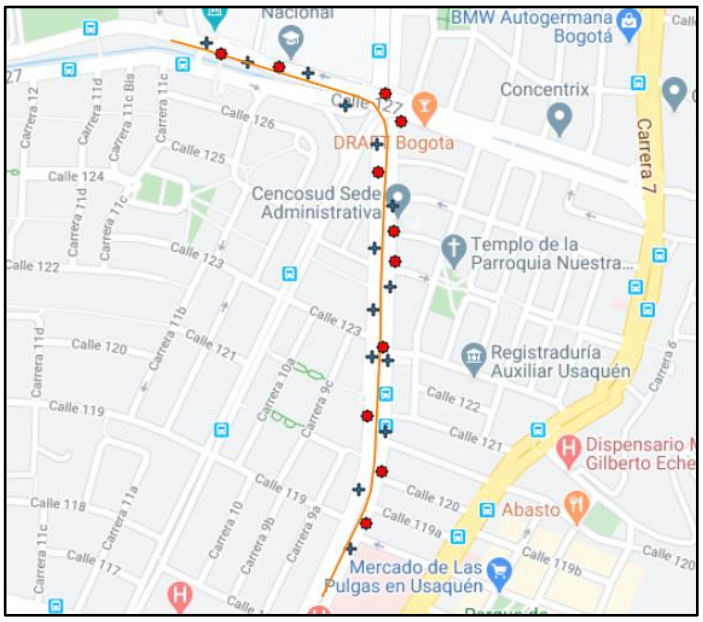


Figura 4. Sondeos en el tramo de estudio. Los cuadros representan los ensayos CPTu y las cruces los sondeos convencionales (Fuente propia)

ID	Tipo de Ensayo	Profundidad	Posición Relativa	Coordenadas		
				X	Y	Z
SL4-49	Tradicional	49,10 m	PK: 5+677 - 6,75 m D	1004887,896	1011063,551	2561,517
PZL4-31	CPT	14,98 m	PK: 5+731 - 6,25 m D	1004914,826	1011107,943	2560,425
SL4-51	Tradicional	46,80 m	PK: 5+781 - 19,70 m I	1004901,546	1011167,971	2559,705
PZL4-32	CPT	30,08 m	PK: 5-829 - 13,43 m D	1004943,453	1011199,551	2561,212
SL4-52	Tradicional	45,60 m	PK: 5+892 - 14,99 m D	1004949,951	1011272,168	2560,926
PZSL4-18	CPTu	23,40 m	PK 5+939 - 13,83 m I	1004916,734	1011298,794	2558,125
SE4-21	Tradicional	45,60 m	PK: 6+017 - 14,93 m D	1004953,94	1011397,111	2559,365
SL4-50	Tradicional	43,80 m	PK: 6+024 - 14,03 m I	1004925,219	1011404,805	2558,31
PZSE4-11	CPTu	36,42 m	PK: 6+051 - 15,72 m D	1004945,362	1011420,938	2559,754
SE4-22	Tradicional	48,60 m	PK: 6+107 - 14,42 m I	1004927,494	1011487,461	2557,957
SE4-23	Tradicional	47,00 m	PK: 6+148 - 15,46 m D	1004958,669	1011527,342	2558,243
PZSE4-12	CPTu	35,48 m	PK: 6+190 - 15,78 m D	1004966,828	1011573,28	2557,241
SE4-24	Tradicional	46,00 m	PK: 6+216 - 14,72 m I	1004930,706	1011596,617	2558,173
PZL4-33	CPT	36,04 m	PK: 6+252 - 15,46 m D	1004964,812	1011625,681	2558,252
SL4-53	Tradicional	47,10 m	PK: 6+289 - 16,79 m D	1004962,569	1011670,094	2559,016
PZL4-34	CPT	34,50 m	PK: 6+346 - 4,02 m I	1004936,597	1011730,481	2558,214
SL4-54	Tradicional	45,40 m	PK: 6+398 - 16,77 m I	1004935,265	1011780,916	2559,552
PZSL4-19	CPT	38,48 m	PK: 6+434 - 50,5 m D	1004976,905	1011821,174	2559,418
PZL4-35	CPT	36,42 m	PK: 6+482 - 6,25 m I	1004950,704	1011869,543	2559,578
SL4-55	Tradicional	48,00 m	PK: 6+483 - 4,52 m I	1004877,964	1011848,73	2558,743
SL4-56	Tradicional	48,60 m	PK: 6+569 - 4,40 m D	1004812,11	1011906,332	2508,512
PZL4-36	CPT	50,00 m	PK: 6+631 - 2,67 m I	1004759,242	1011917,912	2558,418
SL4-57	Tradicional	45,60 m	PK: 6+678 - 20,06 m I	1004705,254	1011924,796	2559,407
PZL4-37	CPT	50,00 m	PK: 6+740 (EJE)	1004656,457	1011940,082	2558,701
SL4-58	Tradicional	59,10 m	PK: 6+758 - 1,65 m D	1004631,477	1011960,551	2557,781

Tabla 1. Resumen de sondeos disponibles en el tramo de estudio (Fuente propia)

4. MARCO REFERENCIAL

Teniendo en cuenta que se plantea un análisis a partir de un método poco convencional en la modelación, predicción y obtención de perfiles estratigráficos con fines de uso en proyectos civiles de ingeniería, se describen a continuación los conceptos teóricos que enmarcan el análisis realizado.

4.1. Ensayo de Penetración de cono – CPT

"Es un método de resonancia versátil que se puede utilizar para determinar los materiales en un perfil de suelo y estimar sus propiedades de ingeniería" (Braja , 2013), se realiza in situ, mediante la penetración de una punta cónica, que mide de forma continua, la resistencia por punta (Qc), el rozamiento lateral (Fs) y la presión de poro (Geotecnia Facil , 2015) los datos de la prueba se usan para interpretar estratigrafía subsuperficial y mediante el uso de sitios específicos, proporcionan datos sobre propiedades de ingeniería de suelos destinados al uso en el diseño y construcción de movimientos de tierra y fundamentos para estructuras (ASTM D 3441 - 98)

Clasificación Suelos

Como parte fundamental en la geotecnia, se busca clasificar de forma adecuada los suelos, gracias a la similitud en propiedades, características y comportamiento de los mismos, estos pueden ser clasificados en grupos y subgrupos proporcionando un lenguaje común para expresar de forma clara características generales de su composición. (Das , 2013)

Para el diseño de la estratigrafía del modelo, se usó la clasificación del suelo (Robertson, 2010) según los intervalos que se muestran en la tabla 2, generando una leyenda predeterminada para comparación entre modelos.

Zone	***Soil Behavior Type***	I_c
1	*Sensitive, fine grained*	N/A
2	*Organic soils – clay*	> 3.6
3	*Clays – silty clay to clay*	2.95 – 3.6
4	*Silt mixtures – clayey silt to silty clay*	2.60 – 2.95
5	*Sand mixtures – silty sand to sandy silt*	2.05 – 2.6
6	*Sands – clean sand to silty sand*	1.31 – 2.05
7	*Gravelly sand to dense sand*	< 1.31
8	*Very stiff sand to clayey sand**	N/A
9	*Very stiff, fine grained**	N/A

Tabla 2. Clasificación Tipo de Suelo por intervalos en modelos geotécnicos (Robertson, 2010)

4.2. Geo estadística

Es una rama de la estadística que se especializa en el análisis y modelo de la variabilidad espacial. (GEOINNOVA, 2009) La geo estadística proporciona herramientas de evaluación, ya que considera que cada valor de un parámetro medido en un punto de una región cualquiera, representa únicamente una muestra de una determinada variable aleatoria. Si n valores fueron muestreados, éstos representan entonces muestras de n variables aleatorias, cada una de las cuales tendrá asociada una función de distribución. La estadística clásica supone que todos los valores muestreados provienen de una misma función de distribución. Para este caso, las variables aleatorias se encuentran distribuidas en el espacio, por lo que se definen como variables regionalizadas, y el espacio que éstas representan se denomina regionalización (Florez et al., 2000).

Según (Chica, 2003), la geo estadística está ampliamente aceptada como metodología para la estimación/simulación de variables espaciales que caracterizan los recursos hídricos y del medio ambiente. En la práctica el especialista debe saber elegir entre una amplia variedad de métodos, aquel que proporcione el mejor enfoque del problema y, consecuentemente, los mejores resultados

4.3. Método de Kriging

Es un método estadístico de predicción. Según (Cressie, 1993) resulta ser el mejor vaticinador lineal imparcial en soporte puntual o de bloques; en el sentido que sus varianzas en la predicción del error son minimizadas. Kriging predice valores en las ubicaciones no conocidas y evalúa la incertidumbre asociada, proveniente de esparcir muestras de datos ubicados en unos modelos estocásticos de variación espacial continua. Esto se logra teniendo en cuenta el alcance de la variación espacial como se representa en el variograma o covarianza (Oliver & Webster, 2015)

Existen varios tipos de Kriging: Ordinario, Sencillo y Universal. El kriging Ordinario es el predeterminado en herramientas GIS, presupone que el valor medio constante es desconocido, esto favorece el manejo de los datos (ArcGeek, 2018), y obedece a la siguiente ecuación. Se utiliza el método universal solo si se conoce una tendencia, este presupone que hay una tendencia de invalidación de datos y se requiere una justificación teórica para describirla (ArcMap).

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \, Z(s_i)$$

Donde:

$Z(s_i)$= el valor medido en la ubicación i

λ_i= una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i

s_0= la ubicación de la predicción

N = la cantidad de valores medidos

4.4. Semivariograma

El semivariograma es la herramienta generalmente utilizada para descubrir la estructura de la dependencia espacial del fenómeno de interés, debido a que cubre un espectro de fenómenos más amplio que el de los estacionarios de segundo orden (ArcMap). Dicho espectro es el de las funciones aleatorias intrínsecamente estacionarias en las cuales la covarianza puede no existir en el origen (ArcMap). Si el marco establecido es el de la estacionariedad de segundo orden, ambos, semivariograma y covariograma, resultan equivalentes a estos efectos en el plano teórico (Montero & Larraz, 2008)

4.5. Semivariograma Teórico

Existe la necesidad de comprender el funcionamiento y estructura del semivariograma, dado que muestra específicamente la auto correlación espacial de las muestras medidas, para describir estos modelos se utilizan tres componentes como se muestra en la Figura 5: Rango, Meseta y Nugget (ArcMap)

La distancia y altura en la cual el semivariograma se nivela o se vuelve constante se define como Rango y Meseta respectivamente. La discontinuidad en el origen es llamada efecto nugget, esto se debe a que si la distancia de separación tuviera como valor 0, el semivariograma tendría el mismo valor, por lo cual el valor en el eje Y debe ser mayor a este, el efecto puede generarse debido a errores de medición (ArcMap)

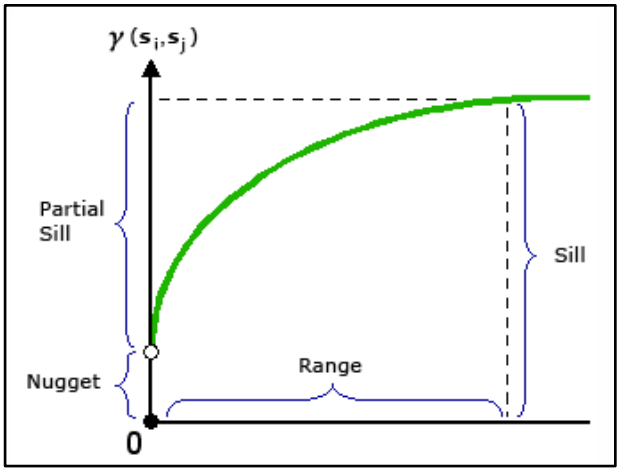


Figura 5. Componentes de un semivariograma (ArcMap)

Existen diferentes funciones de semivariogramas teóricos como se muestra en la Figura 6. El método de interpolación Kriging requiere seleccionar el semivariograma teórico que se ajuste de forma más precisa a los datos modelados, esto influye directamente en la predicción de los valores desconocidos y la superficie de salida generando menor incertidumbre de error (ArcMap)

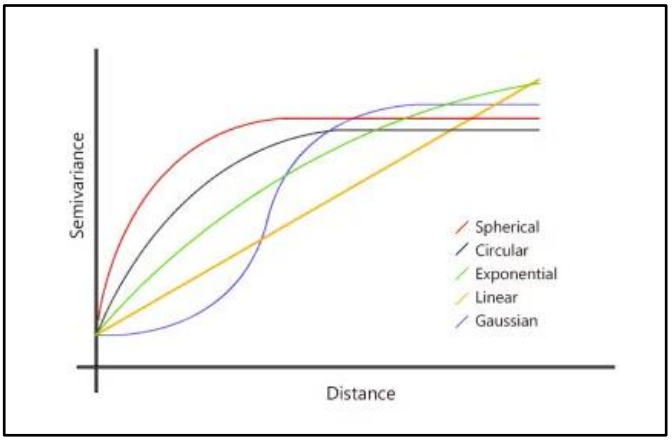


Figura 6. Semivariogramas Teóricos – figura modificada *(Isaaks & Srivastava, 1989)*

5. METODOLOGÍA

Se definieron varias etapas de trabajo para la elaboración del modelo geológico-geotécnico, comenzando con la recopilación de información e investigaciones exploratorias. Dentro de la información que se consultó está la geología de la zona de estudio, modelos digitales de elevación del terreno, perfiles geotécnicos, registro fotográfico de sondeos, ensayos de laboratorios, ensayos in situ, lecturas y estimaciones de piezométricos, etc.

La siguiente etapa fue la consolidación de dos bases de datos diferentes; la primera se definió con información de sondeos convencionales, que presenta cuatro atributos: parámetros de estado (Humedad natural, densidad seca y gravedad específica), granulometría, límites de Atterberg y parámetros de resistencia, esto con el fin de clasificar el suelo; la segunda se llevó a cabo únicamente con las lecturas de los ensayos CPTu, definiendo los parámetros a utilizar en el modelo: Resistencia en el fuste (Fs), resistencia en la punta (Qc) e Índice de clasificación del suelo (Ic).

Se grafican las coordenadas de los sondeos CPTu a lo largo del tramo seleccionado en forma de cuadros con la ubicación exacta donde fueron recopilados y adjuntando los campos en la tabla de atributos correspondientes a

los parámetros a trabajar en el modelo. Paralelo a esto se realizó un mapa de elevación digital del tramo para complementar el terreno a trabajar.

Se toma como información principal en el software la segunda base de datos, ya que cuenta con un volumen suficiente para realizar el análisis geo estadístico, que se efectúa a partir de la interpolación con el método de Kriging ordinario, siendo esta la cuarta etapa del proceso. Antes de comenzar con la interpolación se verificó que los datos cumplan con tres criterios que exige el método (Chica, 2003): los datos deben tener una distribución normal, ser estacionarios y no pueden tener tendencias.

Se procede a modelar con el asistente geo estadístico de ArcMap utilizando el método de interpolación mencionado, el cual genera una superficie de predicción, a partir de la construcción del semivariograma y permitiendo estimar una incertidumbre confiable en dicha predicción.

Finalmente, se realiza un modelo geotécnico tradicional con la primera base de datos, resultados y lecturas de ensayos CPTu para posteriormente hacer una comparación a escala con el modelo obtenido en el software.

6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

6.1. Modelo Geotécnico a partir del análisis convencional de los datos

Para la validación de los resultados obtenidos del modelo geoestadístico, se analizó la variación de las propiedades de suelo con respecto a la profundidad, para con esto identificar zonas homogéneas y esbozar un perfil estratigráfico. En la Figura 7 se presenta la variación del contenido de agua en el suelo, para diferentes estados volumétricos a partir del análisis del límite líquido y el índice de plasticidad, correspondientes a todos los sondeos de tipo convencional que se desarrollaron en el área de estudio.

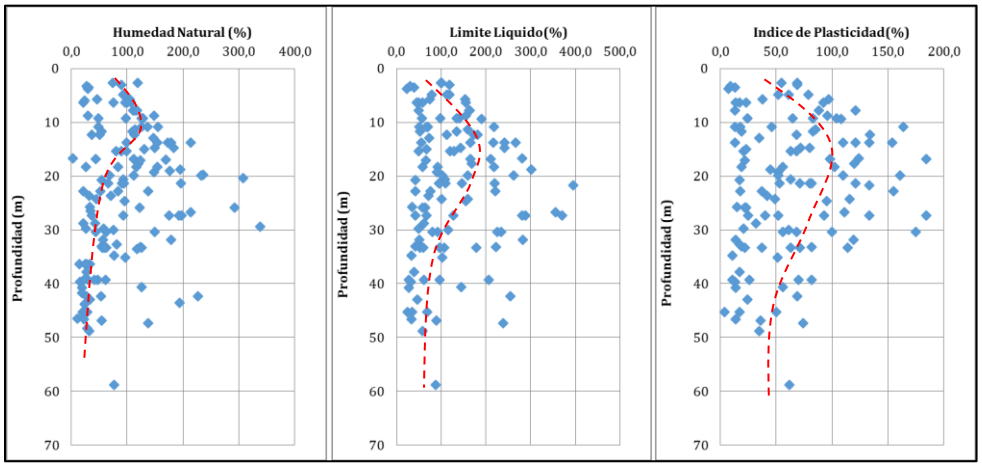


Figura 7. Variación del contenido de agua y la plasticidad con la profundidad (fuente propia)

Se puede observar en Figura 7 una gran dispersión de datos lo cual indica que la estratigrafía a trabajar no presenta un perfil homogéneo, es decir, presenta una variación estratigrafía en sentido longitudinal, siendo consecuente con la estratigrafía obtenida en los modelos finales y con lo que se presume típico en la sabana de Bogotá a partir del análisis de información de referencia.

Como primer dato se analiza el contenido de agua, como parámetro de estado e indicativo de la consistencia del suelo, encontrando una tendencia creciente de este valor hasta una profundidad de 20 m lo cual está asociado a la presencia de niveles de consistencia blanda a muy blanda. Igualmente en este nivel se observa una alta dispersión de los resultados, lo cual es un indicativo de niveles lenticulares de arenas, limos y material orgánica, suprayaciendo niveles con una consistencia más alta asociada al decrecimiento en el contenido de agua y la plasticidad, así como el hallazgo de niveles de arenas y gravas.

Los límites de Atterberg, se basan en el concepto de los diferentes estados que se pueden presentar en los suelos finos, dependiendo de su contenido de agua: Solido, semisólido, plástico y líquido. El limite líquido, es proporcional a la compresibilidad del suelo y el índice de plasticidad representa la variación en humedad que puede tener un suelo en estado plástico (Sowers & Sowers, 1972); se determina esta clasificación a partir de la carta de plasticidad de Casagrande que permite diferenciar tipos de suelos finos. En los resultados obtenidos se observa un estrato arcilloso de alta plasticidad a 35 m de profundidad evidenciando los valores máximos a los 15 m y comenzando a disminuir a partir de 21 m aproximadamente, verificando sobre la línea de tendencia un cambio en los datos a los 30 m, sin embargo en este punto los valores se encuentran aún en el límite de arcillas inorgánicas, por lo cual el segundo estrato se define a partir de 35 m de profundidad, mostrando una reducción clara y significativa en la plasticidad del material, definiéndolo como limos inorgánicos y arcillas orgánicas de alta compresibilidad. Debido a los valores presentados en el índice de plasticidad se determina que este suelo tiene un grado de expansión muy alto.

En la Figura 8 se presenta la variación del material encontrado a partir de granulometría, mostrando el porcentaje de gravas, arenas y arcillas respecto a la profundidad de los sondeos.

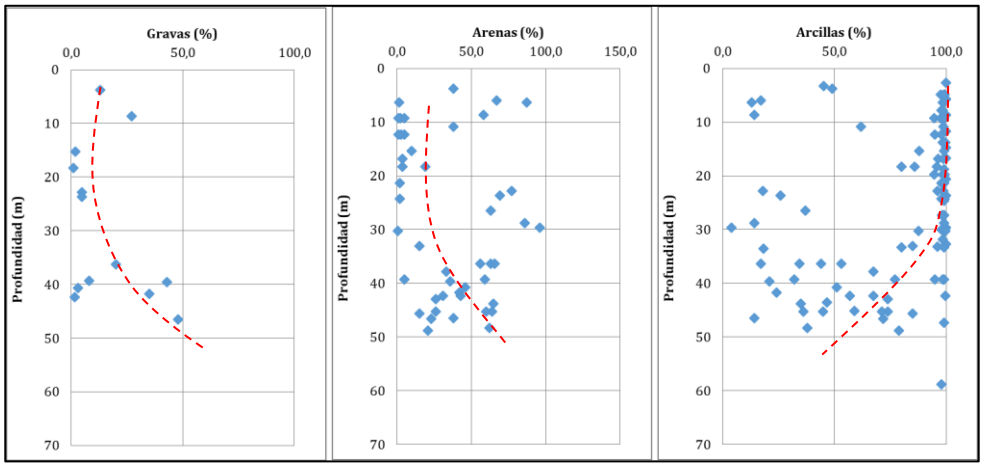


Figura 8. Variación del tamaño de partículas con la profundidad (fuente propia)

Como se puede apreciar en la Figura 8 se analizan los sondeos según su granulometría, clasificándolos en gravas, arenas y arcillas, donde se muestra el porcentaje de composición de cada fracción, encontrando un primer estrato hasta una profundidad de 30 m, con una composición cercana al 100% de material fino, que se clasifican en este caso como arcillas, determinando su composición a fondo mediante ensayos de hidrometría. El segundo estrato se identifica como una clara disminución en el material arcilloso y un aumento en el porcentaje de arenas y gravas, obteniendo una composición granulométrica de 50% arcillas, 45% arenas y 5% gravas corroborando de esta forma la disminución de permeabilidad encontrada y descrita en la Figura 7.

Posteriormente, se analizan los parámetros de peso unitario y gravedad especifica como se muestra en la Figura 9, mostrando un mejor comportamiento de los datos, ya que se agrupan los valores más frecuentes y se entienden los valores atípicos como lentes estratigráficos de diferentes materiales presentes en el corredor.

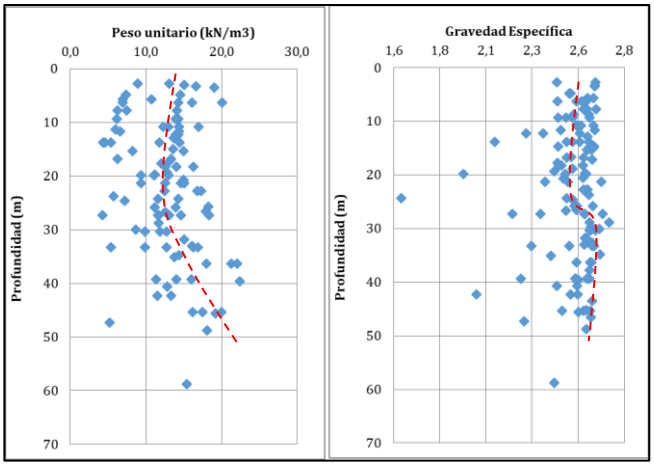


Figura 9. Variación del peso unitario y la gravedad especifica con la profundidad (fuente propia)

Con respecto a la gravedad específica, la cual es la relación entre la masa y el volumen de un suelo dado con respecto a la del agua a una temperatura de 4ºC (Terzagui, 1958) en la Figura 9 se observan dos zonas homogéneas relacionadas con la presencia de suelos de composición arcillosa y consistencia blanda hasta cerca de 30m de profundidad con valores de gravedad especifica variando entre 2.50 y 2.70 y pesos unitarios totales entre 12kN/m^3 y 17kN/m^3 típicos de este tipo de suelos. Subyaciendo este nivel, como se evidenció en los análisis anteriores, se incrementa el contenido de granulares en el suelo, coincidiendo con el aumento en la gravedad específica y el peso unitario.

Igualmente se analiza la variación de la resistencia no drenada del suelo (Cu) obtenida de ensayos de compresión inconfinada. Este análisis se presenta en la Figura 10.

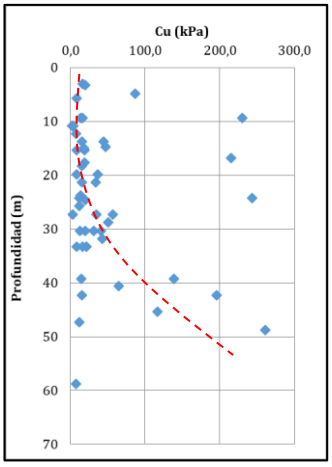


Figura 10. Variación de la cohesión no drenada con la profundidad (fuente propia)

Se observa en la Figura 10 que la resistencia no drenada tiene una tendencia a aumentar con respecto a la profundidad, con una dispersión que es un indicativo de la presencia de lentes de materiales con consistencias mayores o menores en algunas zonas puntuales del perfil longitudinal, hasta una profundidad cercana a los 30.0m, que como ya se ha visto, marca un cambio en la composición del perfil estratigráfico. A partir de este nivel, es evidente que aumenta localmente la resistencia no confinada y disminuye la cantidad de datos, lo cual está asociado al aumento de la fracción granular lo que imposibilita la obtención de este parámetro.

A partir del análisis anterior se puede inferir la existencia de 2 estratos, compuestos de mezcla de limos inorgánicos y arcilla (CL), limos inorgánicos y limos arcillosos (ML-CL) con presencia de mezcla de arena-limo-arcilla (ML) con finos poco plásticos y arenas limosas, mezcla de arena-limo (SM-SC) tomando como coincidiendo con lo que se encontró en el modelo geo estadístico.

Finalmente, a partir del análisis de los datos realizado se puede establecer una variación estratigráfica de la zona en sentido longitudinal, como una primera aproximación a la obtención del perfil, denominándose este procedimiento como la metodología convencional para la obtención de perfiles estratigráficos, siendo esta la combinación de criterios técnicos asociados a la variación geológica y geotécnica de las propiedades del perfil de suelo. El perfil estratigráfico inicial se presenta en la Figura 11.

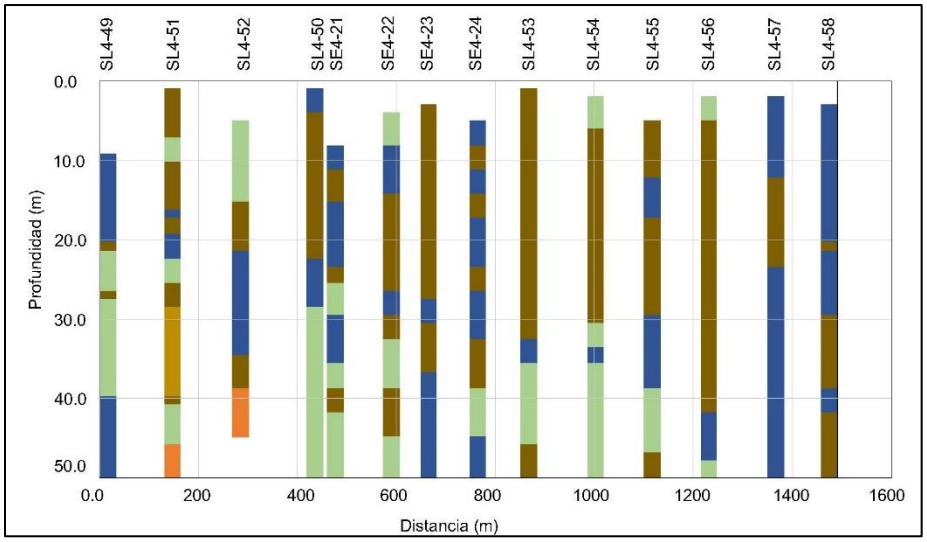


Figura 11. Modelo Geotécnico a partir de la clasificación del suelo (fuente propia)

Simbolo		Clasificación del suelo
	OH, MH	Material orgánico y limos de alta plasticidad
	CH	Arcilla de alta plasticidad
	CL	Arcilla de baja plasticidad
	ML	Limo de baja plasticidad
	SM	Arena limosa
	SW, GW	Arena o Grava limpia bien gradada
	SP, SC	Arena mal gradada, Arena arcillosa
	SP	Arena mal gradada

Tabla 3. Convenciones Clasificación del Suelo (Fuente propia)

Se considera pertinente describir el modelo geotécnico a partir de la clasificación del suelo Figura 11, para esto se sectorizan los sondeos que tienen estratigrafía semejante y se busca relacionarlos; el primer segmento se toma desde la abscisa 0,0 hasta PK+300 que comprende los primeros 3 sondeos, determinando el primer estrato de suelo a los 10 m, este contiene material orgánico y limos de alta plasticidad (OH,MH) teniendo continuidad por una capa decreciente de limos de baja plasticidad (ML) hasta 15m, los siguientes dos estratos están dispuestos en el mismo sentido, formando una línea diagonal, por lo que se clasifica un estrado de material OH-MH de 2 m de espesor, y otro de arcilla de alta plasticidad (CH) con un espesor inicial de 10 m, medio 5 m y final de 13m, de la misma forma, se genera una capa en la abscisa 0,0 desde 20 a 40 m de ML, observando un cambio significativo de material a Arena limosa del mismo espesor, seguido a esto se genera un estrato de material fino con un espesor inicial de 10m de arcilla de alta plasticidad (CH) y un espesor final de 50 cm con limos de baja plasticidad, por último se genera de forma creciente un estrato de espesor continuo de 5 m clasificado como Arena o Grava limpia bien gradada (SW-GW).

El segundo sector se toma desde el PK+400 hasta el PK1+200 el cual comprende 9 sondeos del tramo, para este, se establecen 4 estratos, el primero se define un estrato superficial de 5 m aproximadamente de espesor entre las abscisas PK+400 y PK+800 de suelo CH y entre las abscisas PK1+000 y PK1+200 de suelo ML, el segundo estrato general se toma desde la abscisa PK+400 a profundidad de 5 m, con un espesor inicial de 20 m, 32m en el medio y final de 36 m, notándose una disminución del espesor entre las abscisas PK1+000 y PK1+100, que contiene suelo tipo OH-MH, en este estrato se encuentran diferentes y considerables lentes de

arcilla de alta plasticidad CH con espesores medios de 5 m sobre todo en la abscisa PK+800 donde se encuentran dichos materiales intercalados. El tercer estrato se encuentra en una profundidad de 21 m, (Sondeo 4), tiene un espesor medio de 5 a 8 m, compuesto por material de tipo CH que se encuentra a lo largo del segmento de forma discontinua e intercalada pero con presencia en todas las exploraciones, por último se genera un cuarto estrato con espesor inicial de 20 m y disminución del mismo a lo largo del sector, este suelo se clasifica como limos de baja plasticidad, con presencia de lentes arcillosos y arena limosa, ubicados normalmente pasando los 40m de profundidad.

Por último, el tercer sector está comprendido entre las abscisas PK1+400 y PK1+600, identificando dos materiales predominantes: Arcillas de alta plasticidad y material orgánico – limo de alta plasticidad generando 2 claros estratos intercalados con dichos materiales, sin embargo, se resalta mayor presencia de suelo arcilloso, ya que los estratos están definidos con mayores espesores.

Finalmente, como complemento al análisis mostrado anteriormente, se realiza una representación de la variación de los índices Ic para la obtención del SBT (Robertson, 2010) con respecto a la profundidad, obtenidos de los diferentes ensayos de CPTu, la cual se presenta en la Figura 12.

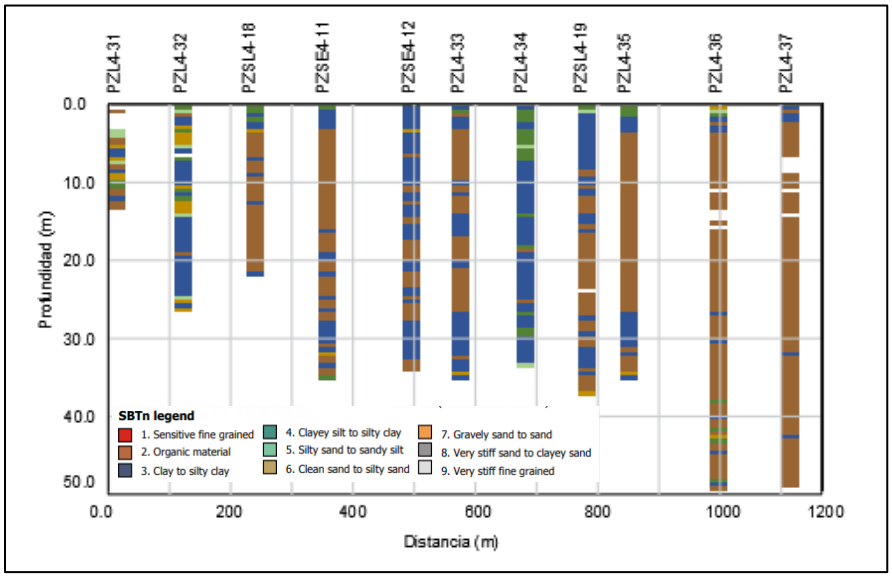


Figura 12.Modelo Geotécnico a partir de la clasificación de los piezoconos (Fuente propia)

Como resultado al análisis del índice Ic se modela una estratigrafía como complemento a los sondeos anteriormente mencionados, corroborando positivamente la clasificación del suelo realizada, visualmente se logra identificar estratos muy similares a los propuestos en el modelo anterior Figura 11 y permanecen los lentes de material arenoso, sobre todo en el primer sector, comprobando también los análisis y la clasificación a partir de los parámetros básicos del suelo: humedad natural, límites de Atertterberg, granulometría, peso unitario y gravedad especifica.

6.2. Verificación de criterios y análisis de datos

Se corroboran los tres criterios requeridos para la interpolación: El primero se muestra a partir del histograma en la Figura 13 , donde se observa que existe un pequeño conjunto de valores atípicos en el inicio de la gráfica que son ajustados por el programa a lo largo del proceso, los datos con valores de frecuencia más bajos se ubican de izquierda a derecha aumentando; lo cual significa que la mayor frecuencia en la muestra analizada se encuentra a la derecha entre los valores de 3,26 y 4,0 logrando observar una componente notoria de distribución Log normal, que confirma la viabilidad para el uso de estos datos, esta configuración se debe especificar de forma manual en el momento de implementar el método Kriging para que el programa ajuste la disposición matemática requerida.

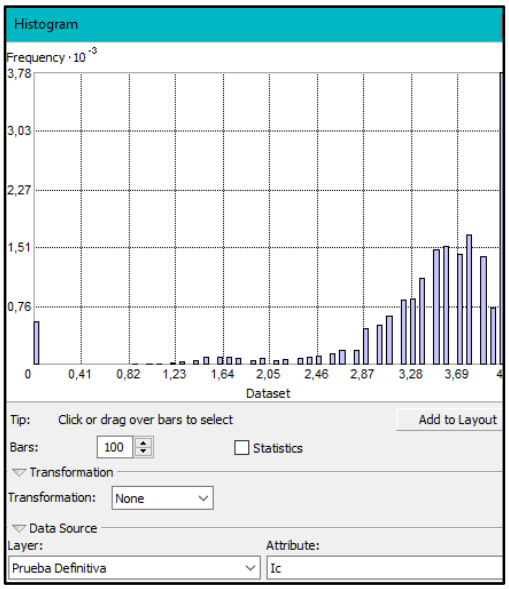


Figura 13. Histograma Sondeos CPTu, atributo Ic (Fuente propia)

Por otro lado, en la Figura 14 se presenta el Mapa de Voronoi, el cual permite analizar la estacionariedad de los datos; es decir, que los valores medidos, en este caso la desviación estándar no presente cambios bruscos o roturas en el área del mapa, obteniendo que los mismos tienen valores continuos y cercanos como se observa en la leyenda, lo cual permite confirmar que se cumple el criterio establecido para la aplicación correcta del método de interpolación.

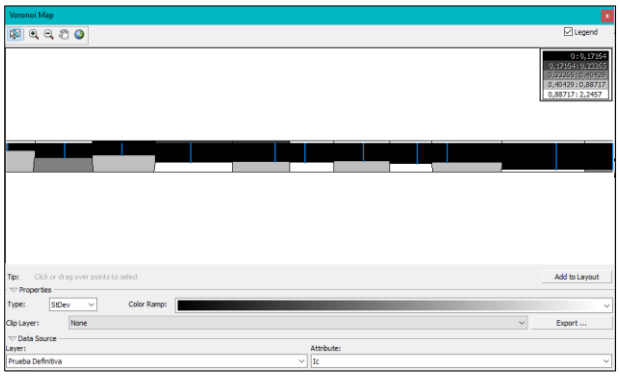


Figura 14. Mapa de Voronoi Sondeos CPTu, Atributo Ic (Fuente propia)

Finalmente, se corrobora el tercer criterio, analizando que los datos no presenten tendencias, la línea negra muestra la tendencia en sentido Norte-Sur y la línea amarilla traza la tendencia en sentido Este-Oeste, obteniendo que no producen cambios sistemáticos en el área de estudio, lo cual confirma el criterio requerido.

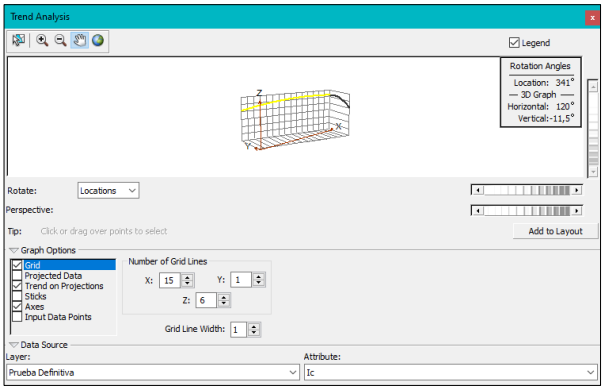


Figura 15. Análisis de tendencias Sondeos CPTu, Atributo Ic (Fuente Propia)

6.3. Análisis geo estadístico

Para realizar el análisis geo estadístico se empleó el método de Kriging, en el software ArcMap, verificando en una primera fase los parámetros estadísticos del modelo: El semivariograma experimental como se muestra en la Figura 16, se obtiene a partir de la base de datos, este aplica de forma clara el comportamiento espacial de la variable, para este caso el Ic; sin embargo, es necesario ajustar a un modelo teórico la función producida, con el fin de obtener los parámetros a utilizar en la interpolación, rango, nugget y meseta.

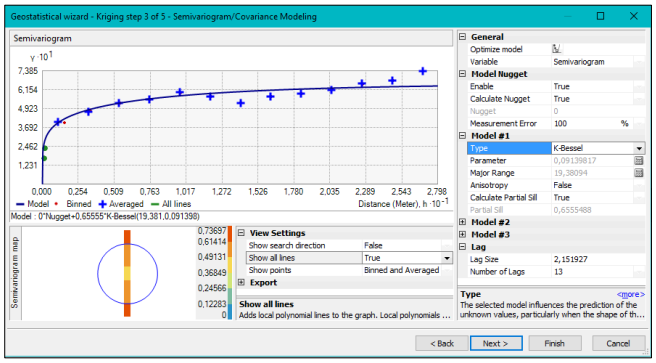


Figura 16. Semivariograma Base de datos (Fuente Propia)

Con el fin de minimizar la incertidumbre del error de estimación en necesario adaptar una función teórica que describa el comportamiento de la función experimental, permitiendo así predecir puntos desconocidos en el área que se está estudiando; por esta razón, se establece al modelo teórico K Bessel, el cual indica que su comportamiento es el que más se ajusta a la posición experimental de los datos y a la función graficada, estimando que es el modelo más adecuado y está incluido en software de trabajo.

Como resultado al modelo obtenido con respecto al semivariograma, con ayuda de la herramienta geo estadística se construye una superficie de predicción óptima, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 17. En este paso se pueden ajustar manualmente algunos parámetros, intervalos o establecer el número de puntos que se quiere en cierto radio.

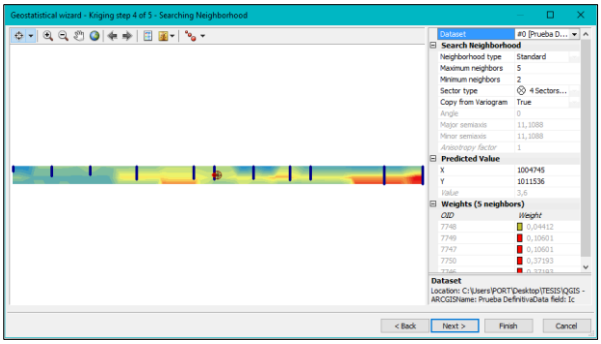


Figura 17. Superficie de Predicción. (Fuente propia)

En la Figura 17 se puede observar la superficie de interpolación de los datos, observándose un buen ajuste según la información de referencia consultada. Por ultimo en el proceso geo estadística se realiza la validación cruzada, esto hace referencia a verificar la validez de las predicciones iterando los puntos de entrada como se muestra en la Figura 18, los datos obtenidos se ajustan a una curva con pendiente de 45º, lo cual indica una buena correlación y resultado de la interpolación. El valor del coeficiente de determinación (R^2) es de 97% lo cual indica que se tiene una predicción correcta de lo que se busca.

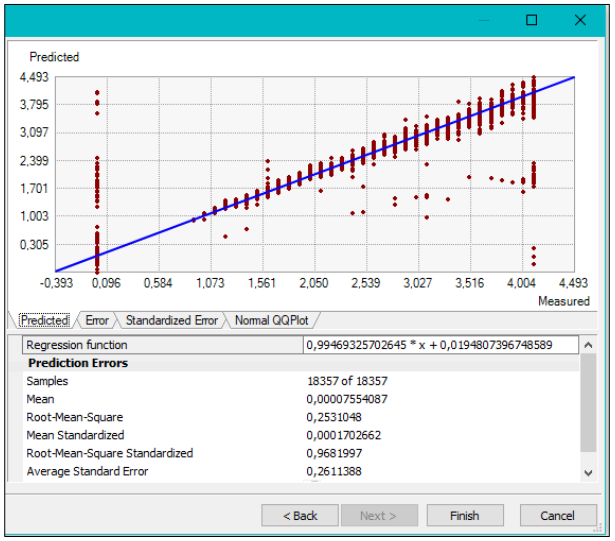


Figura 18.Resultados validación cruzada (Fuente Propia

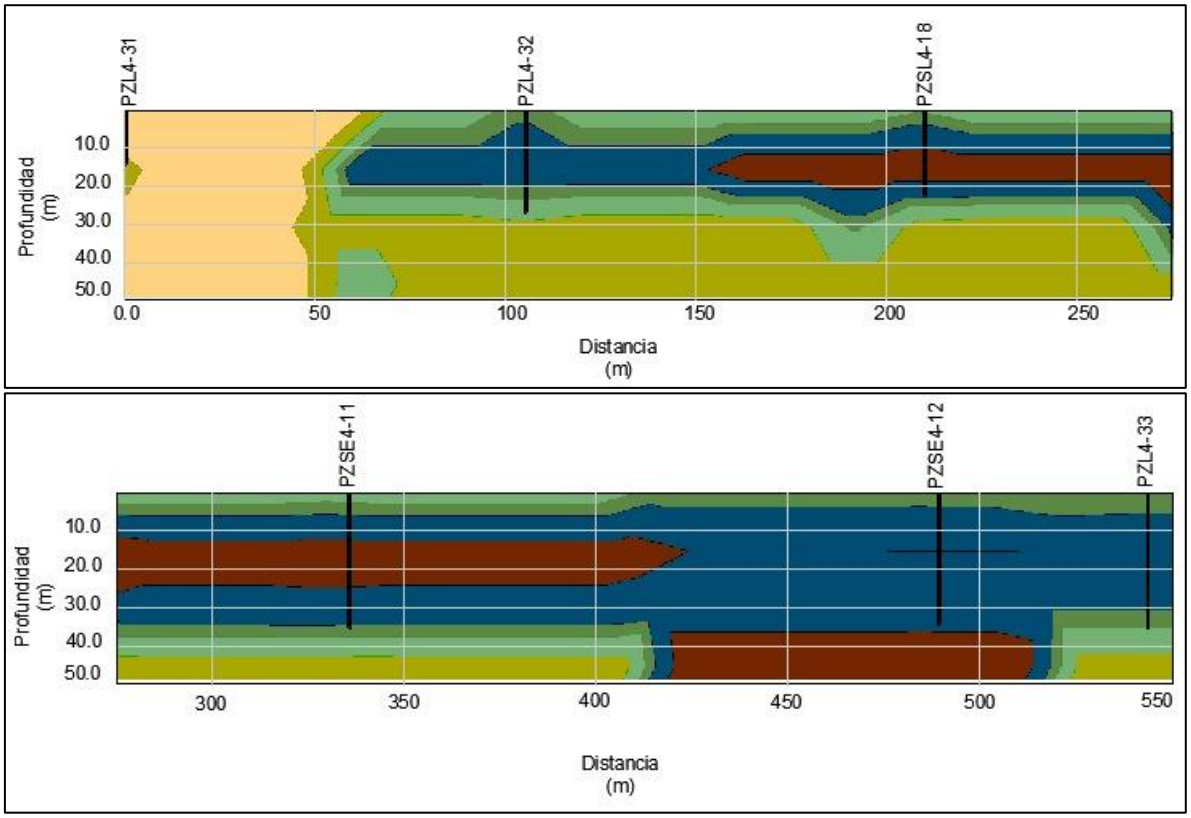
Se obtienen resultados de comparación entre los valores reales con los valores de predicción como se muestra en la Tabla 4, con un total de 18356 datos analizados y valores del error de predicción para cada medida en el proceso de validación cruzada, verificando que se obtienen valores muy bajos y ratifican la credibilidad producida en la regresión.

Geostatistical wizard - Kriging step 5 of 5 - Cross Validation

Source ID	Included	Measured	Predicted	Error	Stand...	Standar...	Normal...
45	Yes	0	0.120...	0.120...	0.392...	0.3077...	1.6714...
46	Yes	0	0.233...	0.233...	0.392...	0.5953...	1.9641...
47	Yes	0	0.410...	0.410...	0.392...	1.0461...	2.2011...
48	Yes	0	0.796...	0.796...	0.392...	2.0309...	2.3431...
49	Yes	0	2.036...	2.036...	0.392...	5.1913...	2.5884...
50	Yes	4.1	2.010...	-2.089...	0.392...	-5.3282...	-3.104...
51	Yes	4	3.265...	-0.734...	0.392...	-1.8718...	-2.326...
52	Yes	4	3.653...	-0.346...	0.392...	-0.8833...	-2.087...
53	Yes	4.1	3.823...	-0.276...	0.392...	-0.7044...	-2.000...
54	Yes	4.1	3.965...	-0.134...	0.392...	-0.3429...	-1.682...
55	Yes	4.1	4.092...	-0.007...	0.392...	-0.0183...	-0.472...
56	Yes	4.1	4.091...	-0.008...	0.392...	-0.0222...	-0.491...
57	Yes	4.1	4.073...	-0.026...	0.392...	-0.0672...	-0.800...
58	Yes	4.1	4.046...	-0.053...	0.392...	-0.1366...	-1.150...
59	Yes	4.1	3.996...	-0.103...	0.392...	-0.2643...	-1.532...
60	Yes	4.1	3.887...	-0.212...	0.392...	-0.5419...	-1.862...
61	Yes	4	3.671...	-0.328...	0.392...	-0.8387...	-2.067...
62	Yes	3.4	3.537...	0.137...	0.392...	0.3509...	1.7430...
63	Yes	3.1	3.301...	0.201...	0.392...	0.5144...	1.9080...
64	Yes	2.9	3.166...	0.266...	0.392...	0.6804...	2.0400...
65	Yes	2.8	3.160...	0.360...	0.392...	0.9183...	2.1599...
66	Yes	3	3.195...	0.195...	0.392...	0.4978...	1.8964...
67	Yes	3.2	3.249...	0.049...	0.392...	0.1267...	1.0789...

Tabla 4. Tabla de comparación entre valores de predicción y valores reales

Finalmente, se genera el modelo geotécnico a partir de los sondeos analizados como se muestra en la Figura 19. Seguido a esto se modifican y calculan los valores de los intervalos según el Índice de clasificación del suelo (Robertson, 2010).



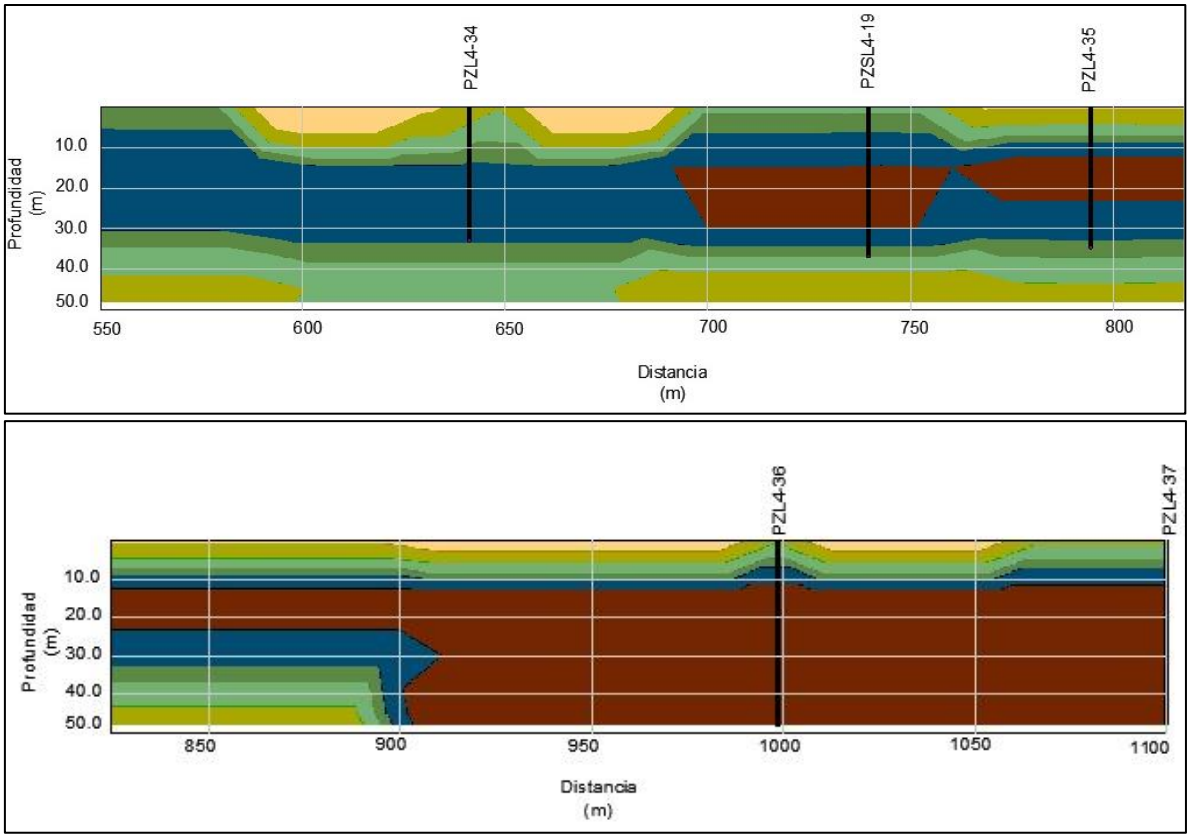


Figura 19. Modelo geotécnico obtenido a partir de geo estadística (fuente propia)

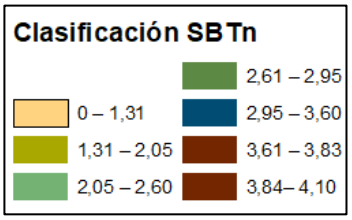


Tabla 5. Clasificación SBTn (Robertson, 2010)

Finalmente se obtiene un modelo geologico- geotecnico continuo entre los sondeos Figura 19, lo que resulta bastante beneficioso al momento de clasificar y parametrizar la estratigrafía en proyectos de ingeniería de igual forma, para facilidad en la descripción y una mejor visualización del suelo, se sectoriza el tramo estudiado y se muestran los rangos con los que se clasifico dicho modelo Tabla 5

Como se evidencia en el modelo geotécnico generado por el software ArcMap Figura 19, se pueden diferenciar tres estratos principales: El primer estrato está constituido por un suelo areno limoso que inicia aproximadamente entre el sondeo 1 y 2 mostrando su mayor espesor en este punto y disminuyendo progresivamente hasta el sondeo 4, El segundo estrato hace presencia a lo largo del modelo, identificado con el color azul, el cual corresponde a suelo de arcilla y arcilla limosa en este se muestra una gran variación en su espesor, teniendo su valor predominante alrededor del sondeo número 5 - 6 y por último el estrato 3 se considera como un suelo orgánico con presencia de arcillas, localizado en el tramo final del modelo, de igual manera se encuentran intercalados por niveles lenticulares de suelo que corresponden a arena limosa a limo arenoso y suelo limo arcilloso a arcilla limosa mostrados en color verde claro y oscuro respectivamente, lo cual es consecuente con las características esperadas de un perfil sedimentario.

Los valores del índice SBT que prevalecen son los mayores a 3,6; los cuales están relacionados con el tipo de suelo Orgánicos y Arcillosos. Es claro en la Figura 19 ***Figura 19*** la secuencia de deposición de materiales arcillosos con niveles de arenas lenticulares y materia orgánica, coincidiendo de manera adecuada con lo encontrado en la información de referencia.

7. CONCLUSIONES

- Se recolecta la mayor cantidad de información a nivel de exploraciones geotécnicas buscando una nube de datos robusta para la correcta simulación de los modelos; para esto el estudio de metro de la ciudad de Bogotá se presenta como el más adecuado, además de eso se realizaron búsquedas específicas para entender los fundamentos básicos y teóricos de los métodos a utilizar y proyectos de modelos geotécnicos realizados anteriormente

- Se busca a partir de métodos geoestadísticos disminuir la variación espacial de los datos y la incertidumbre de error en la interpolación de los mismos, permitiendo generar una superficie de predicción en la que se determina la confiabilidad del modelo realizado, así mismo, se verifican y adecuan los datos para cumplir los criterios establecidos por dichos métodos y así crear una base de datos capaz de soportar estos análisis.

- En la zona de estudio, se encontró una caracterización predominante de suelos blandos, de alta plasticidad, suelos arcillosos, limosos, y algunos estratos de material orgánico, lo cual es consecuente a las características de un perfil sedimentario, presentando también lentes de arenas y suelos de mayor tamaño normalmente a altas profundidades; observando una gran similitud en la mayoría de datos y por consiguiente en los tres modelos realizados, esto se debe a la disposición de suelo explorado, las características y las condiciones de los mismos. Al comparar el perfil estratigráfico a partir de ensayos CPTu con el de exploraciones convencionales tiene una aproximación bastante acertada, ya que con este tipo de ensayos las mediciones son continuas a lo largo de la profundidad reflejando el comportamiento in situ del terreno

- El modelo geotécnico a partir de sondeos CPTu, muestra grandes beneficios a comparación de los modelos realizados con perforaciones convencionales, es decir con equipo de percusión, rotación y lavado y pruebas de laboratorio, esto a causa de la dificultad que traen las perforaciones para recolectar muestras inalteradas de suelos blandos a muy blandos, el ensayo CPTu optimiza dicho proceso, ya que puede definir con claridad el perfil estratigráfico del suelo antes de la exploración, permitiendo análisis más sencillos, facilidad en la obtención de parámetros mecánicos y de resistencia, como lo son Qc, Fs, e Ic, etc. mientras que los otros métodos de exploración de subsuelo pueden presentar alteraciones en las muestras, errores de lectura, factor humano, etc., que pueden generar valores erróneos al momento de clasificar el suelo, por lo cual se presenta de forma clara que estos modelos no solo se relacionan si no que complementan la información y los parámetros proporcionados por cada uno, presentando un modelo sólido y robusto con relación a la información recolectada

- Para finalizar, se construye el modelo geotécnico obtenido a partir de análisis geo estadísticos en el software ArcMap, mostrando un modelo continuo a lo largo de la zona de estudio, trayendo como beneficio una mejor visualización del terreno, optimización en el tiempo de trabajo y facilidad en análisis que permiten al ingeniero tener una claridad mayor del suelo existente; de la misma forma cuenta con datos y parámetros en toda el área de estudio, a diferencia de los modelos convencionales y CPTu, esto se da a que gracias a la interpolación de los datos se generan valores en áreas del suelo inaccesibles por la falta de información, poca exploración de campo y bajo alcance que se tiene entre sondeos, permitiendo un mejor acercamiento al suelo que se tiene en la realidad.

8. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por siempre estar presente en mi vida, mostrarme con su sabiduría infinita el camino correcto que debo tomar en todas mis decisiones y sobre todo por poner a mí alrededor personas tan maravillosas.

Agradezco a mis padres, que amo con toda mi alma y a quienes debo todo lo que soy, por su comprensión, por su amistad, por su apoyo y compañía, que desde niña me construyeron grandes alas para volar, para realizarme como persona y como profesional, me enseñaron a tomar decisiones y sobre todo confían en el juicio con el que las tomo. A mi hermano por su apoyo incondicional, por sus consejos y sobre todo por siempre soñar a mi lado.

Agradezco a mi familia por tanto amor, entrega y confianza en mí, a mi chico, que día a día me escucho, me cuido, me aconsejo y nunca me dejo caer, a mi director en esta investigación por creer en mí y en este proyecto; y por último, no puedo decir que ha sido fácil pero de la mano de Dios y de estas personas maravillosas fue un camino increíble.

Referencias

ArcGeek. (2018, Abril 25). *Geoestadistica, Interpolación con Kriging*. From https://acolita.com/geoestadistica-interpolacion-con-kriging/

ArcMap . (n.d.). *Como funciona Kriging*. From https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm#ESRI_SECTION1_C1D6C1E74B8F468D94CAA30F68199CDC

ASTM D 3441 - 98. (n.d.). *Standart Test Method for Mechanical Cone Penetration Test of Soil.*

Braja , D. M. (2013). *Fundamentos de Ingenieria Geotecnica - Cuarta Edición.* Publicado por Cengage Learning.

Chica, M. O. (2003). *Geoestadistica y modelos matematicos en hidrogeologia* . Publicaciones de la Universitat Jaume .

CONSORCIO L1. (2015). Diseño para la primera linea de metro en el marco del sistema integrado de transporte publico SITP para la ciudad de Bogotá - Colombia, Estudio Geotecnico, Geologia de la zona de estudio. *Metro de Bogotá*.

CONSORCIO L1. (2015). *Diseño para la primera linea del metro en el marco del sistema integrado de transporte publico SITP para la ciudad de Bogotá - Colombia* . Bogotá - Colombia .

Cressie, N. A. (1993). *Statistics for spatial data.* Wiley Series in Probability and Statistics Ser.

Florez Ruiz, J. H., Marines Campos, R., Hernandez Quintero, J. E., Campos Enriquez, J. O., & Urrutia Fucugauchi, J. (2000). Geofisica . *Revista Geofisica*.

FOPAE. (2010). *Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para le diseño sismoresistente de edificaciones* . Bogotá : Fondo de atención y prevención de emergencias de Bogotá.

GEOINNOVA. (2009). From https://geoinnova.org/blog-territorio/que-es-la-geoestadistica-analisis-geoestadisticos/

Geotecnia Facil . (2015). From http://geotecniafacil.com/ensayo-cptu-piezocono-que-es/

Gonzales de Vallejo, L., & Rodriguez Ortiz , J. M. (n.d.). *Manual de Ingenieria Geologica* . España: Instituto Tecnologico GeoMinera de España .

INVIAS . (2007). *Noma Tecnica Colombiana NTC E-128-07.* Bogotá.

Isaaks , E. H., & Srivastava, M. R. (1989). *An introduction to applied Geostadistics* . New York: Universidad Oxford .

Matheron, G. (1962). *Traité de géostatistique appliqué, Volume 1.* Éditions Technip.

Montero Lorenzo , J. M., & Larraz Iribas, B. (2008). *Introduccion Geoestadistica Lineal* . Netbiblo.

Oliver , M. A., & Webster, R. (2015). *Basic Steps in Geoestadistics, The VAriogram and Kriging* . Ilustrada.

Parra Gomez, L. J. (n.d.).

Parra Gomez, L. J. (2019). *Spatial Geotechnical modeling of a lacustrine deposit using functional geostatistical analysis of CPTu test.* Bogotá, Colombia: Facultad Ingenieria, Universidad Nacional de Colombia.

Rivera Pardo, S. A., & Rojas Perilla, L. L. (2014). *Caracterización de suelos arcillosos desecados al occidente de la sabana de Bogotá.* Bogotá: Universidad Santo Tomas.

Robertson, P. K. (2010). Soil Behaviour Type from the CPT. *Gregg Drilling & Testing Inc, Signal Hill, California USA.*

Samper, J. F., & Carrera, J. (1993). *Geoestadistica. Aplicaciones a la Hidrologia Subterranea.* Centro Internacional de Metodos Númericos en Ingenieria .

SGC. (2015). *Geología de la Plancha 228 Bogotá Noreste.* Bogotá: Servicio Geológico Colombiano .

Sowers, G. B., & Sowers, G. F. (1972). *Introducción a la Mecanica de suelos y cimentaciones.* Mexico: Limusa Wiley .

Terzaghi, K. (1955). *Experimental Soil Mechanics.*

Terzagui, K. (1958). Design and performance of the Sasumua Dam. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 344-365.

The Geological Society. (1997, Noviembre). The Quarterly Journal of Engineering Geology. *An International journal encompassing geotechnical engineering and hydrogeology*, 149.