

**DISEÑO DE OBRAS GEOTÉCNICAS RELACIONADAS CON
CIMENTACIONES PROFUNDAS Y ESTABILIDAD DE TALUDES**

¹Fabián Antonio Valencia Ramírez

FACULTAD INGENIERÍAS
Programa Ingeniería Civil

Asesor Ing. MSc. Diana Mylena Zambrano Vásquez

Junio 2023

¹ Estudiante de la Universidad La Gran Colombia - correo: fvalenciar@ulagrancolombia.edu.co

RESUMEN

En el departamento de Magdalena se desarrolló un proyecto en donde la realización de cimentación profunda resulto indispensable por las condiciones geomorfológicas, para ello, fue necesario realizar los cálculos que determinan la capacidad de los pilotes y sus asentamientos, además de un análisis de los materiales a utilizar siendo lo más viable la madera por las características de su localización.

Por otro lado, en un proyecto de cimentación superficial con condiciones geológicas y geotécnicas diferentes, hizo necesario evaluar y verificar la estabilidad del relleno sobre el cual se construirá la planta de tratamiento de alimentos TRIFUD.

Para el cálculo de las cimentaciones, ya sean profundas, superficiales o mixtas se requiere el conocimiento del subsuelo y sus características geo mecánicas, siendo necesario hacer un riguroso plan de exploración geotécnica acorde a las necesidades del proyecto y la ejecución de los ensayos de laboratorio requeridos para determinar sus características.

Palabras claves: Cimentaciones, estabilidad de taludes, geotecnia, diseño

ABSTRACT

In the department of Magdalena a project was developed where the realization of deep foundations was indispensable for the geomorphological conditions, for this, it was necessary to carry out the calculations that determine the capacity of the piles and their settlements, in addition to an analysis of the materials to be used, being the most viable the wood due to the characteristics of its location.

On the other hand, in a surface foundation project with different geological and geotechnical conditions, it was necessary to evaluate and verify the stability of the landfill on which the TRIFUD food treatment plant will be built.

For the calculation of the foundations, whether deep, superficial or mixed, knowledge of the subsoil and its geomechanical characteristics is required, being necessary to make a rigorous geotechnical exploration plan according to the needs of the project and the execution of the laboratory tests required to determine its characteristics.

INTRODUCCIÓN

Dentro de la ingeniería geotécnica el diseño de obras enfocadas a la cimentación de las estructuras y la estabilidad de taludes es un pilar fundamental necesario para establecer los parámetros y condiciones del diseño geotécnico propuesto.

En este sentido, la cimentación profunda se configura como un parámetro del cual se estima el diseño del colegio San José de Nueva Venecia, en esto radica la importancia de construir y ejecutar un plan de exploración geotécnica que permita conocer el terreno donde se desarrolla el proyecto, que junto con el análisis de la información de campo y los ensayos de laboratorio conducen a la determinación de un perfil estratigráfico fiable. Estos insumos tras su minuciosa evaluación derivan en un diseño fiable, donde es posible conocer la afectación directa que tendrán las cargas sobre ella, reflejadas en el asentamiento de los pilotes.

Adicionalmente es necesario validar la estabilidad de los taludes que conforman el terraplén donde se desarrollara el proyecto arquitectónico de la planta de tratamiento TRIFUD, en función de los parámetros establecidos en la norma vigente NSR10, para así, garantizar que se cumplan los criterios idóneos en el desarrollo del proyecto.

REVISIÓN DE LITERATURA

Antecedentes

La planta de tratamiento TRIFUD ubicada en la ciudad de Barranquilla, cuenta tanto con el diseño arquitectónico, como con los planos para el desarrollo del proyecto.

Del mapa geológico de la ciudad de Barraquilla, establece que la zona de estudio en Mompox presenta afloramiento de rocas metamórficas, ígneas, sedimentarias y volcanoclásticas. Su origen data desde el Proterozoico hasta el Holoceno, con edad del Proterozoico se encuentran rocas metamórficas (neises cuarzofeldespáficos, hornbléndicos anfibolitas) integrados en la Serranía de San Lucas, por su parte en la cordillera central (del Jurasico) aflorando en el sur de

Bolivar se ubican rocas ígneas conformadas por plutónicas volcánicas además de integrar en esta edad rocas volcanoclásticas (arenitas y lodolitas tobáceas, rocas piroclásticas y efusivas), adicionalmente, las rocas con edades del Triásico-Jurásico al Neógeno, son las rocas sedimentarias conformadas por arenitas, limolitas, lodolitas, arcillolitas, calizas y conglomerados, las cuales se encuentran en unidades litoestratigraficas, o como grandes depósitos no consolidados del Cuaternario (SGC, 2022).

Del colegio San José de Nueva Venecia se conoce el diseño arquitectónico preliminar, además de la información de capacidad, estado de la infraestructura, requerimientos y necesidades del proyecto producto de la visita de campo realizada, así como, la información de Plan de Ordenamiento Territorial del municipio.

El departamento de Magdalena, está conformado por una depresión rellena con depósitos deltaicos del Cuaternario, adicionalmente se encuentra rodeado por rocas terciarias, algunas de las cuales son pleistocenas, también se encuentran rocas ígneas y metamórficas de la Sierra Nevada de Santa Marta. Los depósitos han sido formados gracias a procesos fluviales y marinos, que fueron llenando la cuenca de sur a norte conformado así una llanura deltaica extensa, por otro lado, existen depósitos de origen eólico, principalmente ubicados en las zonas costeras. Las diferentes posiciones del río Magdalena se marcan en los antiguos causes de este drenaje en donde se ubican depósitos aluviales (Servicio Geológico Colombiano, 2022).

En la zona de estudio es posible encontrar depósitos paludales del Holoceno cuya composición es principalmente de niveles de arena fina y limos.

Marco teórico

La composición, estructura, dinámica e historia de la Tierra es estudiada por la geología integrando disciplinas como estratigrafía, geología estructural, petrografía, geoquímica y bioestratigrafía entre otras, las cuales dependen de los recursos asignados para los diferentes estudios, y los levantamientos se realizan de acuerdo a la complejidad geológica con diferentes escalas como 1:250.000, 1:100.000, 1:50.000, 1:25.000. Para desarrollar estos productos

generalmente a cargo del estado por medio de las entidades correspondientes, se realiza el análisis haciendo uso de bases cartográficas, fotogrametría a partir de fotos aéreas y fotos satelitales, así mismo el levantamiento puede incluir recolección de muestras como rocas, fósiles minerales y registro de campo tales como datos estructurales, posteriormente se hacen los análisis correspondientes y se generan planchas. Colombia posee geología nacional a escala 1:1.000.000 y 1:500.000, sin embargo, dado que la geología regional está definida por la escala de trabajo es posible encontrar información en escalas 1:100.000 y 1:25.000.

Para el desarrollo de la exploración geotécnica de un proyecto es necesario aplicar técnicas y ensayos conducentes a caracterizar el suelo, esto es necesario para realizar una exploración de campo que consiste en la ejecución de pruebas directas (apiques, sondeos, trincheras) y así permiten la recuperación de especímenes o muestras de suelo a las cuales se realizan ensayos de laboratorio, así mismo se realizan pruebas indirectas (geo sísmica, geoelectrica) que permiten obtener información a partir de correlaciones, siendo un método no destructivo.

La determinación de la cantidad de exploración se establece de acuerdo a la categoría del proyecto (NSR10,2010) las cuales se establecen como:

- *Para categoría baja (hasta 3 niveles, cargas menores a 800 kN) se deben hacer mínimo 3 sondeos a no menos de.6.0m de profundidad*
- *Para categoría media (entre 4 y 10 niveles, cargas entre 801 y 4000 kN) se deben hacer mínimo 4 sondeos a no menos de.15.0m de profundidad*
- *Para categoría alta (entre 11 y 20 niveles, cargas entre 4001 y 8000 kN) se deben hacer mínimo 4 sondeos a no menos de.25.0m de profundidad*
- *Para categoría especial (mayor a 20 niveles, cargas mayores a 8000 kN) se deben hacer mínimo 5 sondeos a no menos de.30.0m de profundidad.*

Las propiedades índice de los suelos en la institución relacionan el tamaño de las partículas en curvas granulométricas para determinar su distribución. Estas propiedades, permiten clasificar los materiales de acuerdo a los sistemas establecidos, como el peso unitario o densidad, donde se tiene en cuenta la profundidad para determinar su disposición, así, el primer estrato del suelo generalmente posee menos resistencia a razón de la disposición de las partículas y sus orígenes, dado que en los suelos cohesivos la cantidad de vacíos existentes es considerablemente más baja, este tipo de suelos por su naturaleza poseen límites en referencia a los contenidos de humedad. En

este sentido para determinar las propiedades índice de los geomateriales es necesario la elaboración de un plan de ensayos de laboratorio, riguroso, adecuado y pertinente basado en la normatividad vigente.

La capacidad portante para pilotes posee dos componentes, la resistencia por punta que implica la interacción directa con el suelo, así como, la fricción del pilote, al sumar estas dos permiten determinar su capacidad última. Los diferentes autores y metodologías para el cálculo de la capacidad ultima de carga definen las más empleadas según:

Meyerhof (1963)

Hansen (1970)

Vesic (1975)

Jambu(1976)

El software Slide V.6.0, permite realizar análisis de estabilidad, verificando la geometría de una sección a partir de topografía real, de esta manera y haciendo uso de diferentes métodos como Janbu y Bishop, se puede establecer el valor del factor de seguridad el cual corresponde a una relación entre las fuerzas resistentes y fuerzas actuantes, usado para la evaluación del estado límite de falla, la ventaja del uso de algoritmos al interior de un programa es la capacidad de integrar múltiples variables para la ejecución de análisis, el uso de software especializado permite variar las condiciones del modelo a evaluar haciendo uso de métodos probabilísticos de análisis, de esta manera es posible haciendo uso del método de Montecarlo determinar la probabilidad de falla .

METODOLOGÍA

El Servicio Geológico Colombiano posee un geoportal donde es posible realizar la consulta de la geología del país, allí se pueden descargar las planchas geológicas a escala regional (1:25.000) y sus respectivas memorias, dada la amplia cobertura de la información es necesario delimitar la ubicación del proyecto para identificar qué unidades cronoestratigráficas existen, qué sistemas de fallas pueden afectar y toda información que redunde en conocer las condiciones del terreno, la memoria explicativa de cada plancha ofrece la posibilidad de conocer la composición

de cada unidad encontrada en los mapas, con esta información preliminar se establece una idea de los materiales a encontrar.

La norma Sismo resistente (NSR-10,2010) establece parámetros para desarrollar un plan de exploración dependiendo del proyecto, se identifican las cargas de servicio y los niveles para cada unidad, al establecer cargas de servicio menores a 800 kN y de un solo nivel en la planta de tratamiento se plantea la realización de sondeos de mínimo 6.0m de profundidad, en el colegio San José de Nueva Venecia dadas las condiciones y la necesidad de hacer cimentación profunda se proponen tres (3) sondeos a 10.0 de profundidad, verificando que se hagan en donde se va a desarrollar el proyecto y verificando en lo posible el acceso correcto del equipo de perforación.

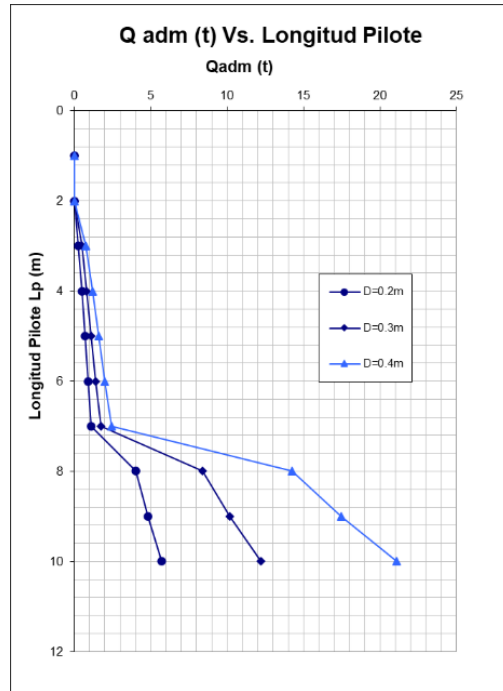
Para determinar el perfil estratigráfico se reúne la información disponible, es decir, ensayos de laboratorio, ensayos de campo (SPT) y los registros de perforación, se tabulan los datos de manera que la variable independiente sea la profundidad, y la variable dependiente sean los resultados.

Al analizar el comportamiento de la información en profundidad se contrastan los cambios representativos en los diferentes grupos de datos con el registro de perforación y de esta manera se definen los espesores de suelo, una vez determinados los espesores se establece el perfil estratigráfico y se computan los resultados teniendo en cuenta el estrato al que pertenecen, y tras un análisis estadístico se determinan las propiedades y parámetros para cada uno de los resultados del ensayo de SPT, por último se normalizan estos resultados de acuerdo a lo establecido por Gonzales, (2010)

Una vez determinado el perfil estratigráfico se calcula el valor de la capacidad portante, dado que la cimentación es profunda, se determina, el valor de Q_u , hallado de acuerdo al método propuesto por Janbu (1976), que determina la capacidad por punta y usando las ecuaciones de Meyerhof se establece la resistencia por fuste o fricción, la capacidad portante es la sumatoria de estos dos valores. El cálculo dado por la siguiente expresión, se analiza bajo tres diámetros diferentes (0.2m, 0.3m y 0.4m): A continuación, en la Figura 1 se muestran los resultados de la

capacidad admisible en función de la longitud del pilote teniendo en cuenta cada uno de los diámetros analizados:

Figura 1 Abaco de capacidad admisible para pilotes



Fuente: Elaboración Propia

Con el resultado de la capacidad portante y teniendo en cuenta la metodología propuesta por Das (2001), se determinan los asentamientos inmediatos:

$$Se_1 = \frac{(Q_{wp} + \varepsilon \cdot Q_{ws}) L_p}{A_p \cdot E_p}$$

Deformación del fuste

$$Se_2 = \frac{q_{wp} \cdot D}{E_s} \cdot (1 - \mu_s^2) I_{wp}$$

Deformación por carga en la punta

$$Se_3 = \left(\frac{Q_{ws}}{p \cdot L_p} \right) \frac{D}{E_s} \cdot (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

Deformación por carga transmitida a lo largo del fuste

Para determinar los valores del factor de seguridad de la estabilidad global del terraplén, se desarrolla un modelo que se estudia en el software Slide V6.0 de la casa Rocscience, se carga

la información correspondiente a geometría del talud y de los estratos identificados, así como los parámetros de resistencia de cada uno.

Finalmente se analizan los resultados de acuerdo a las diferentes familias de superficies de falla existente, determinando la pertinencia de diferentes obras para la estabilización de los taludes.

RESULTADOS

El área de estudio se ubica en la ciénaga de Pajara, corregimiento de Nueva Venecia, el cual corresponde a un pueblo palafito, en la Figura 2 se muestra la localización del sitio

El ámbito geológico muestra la presencia de depósitos deltaicos pertenecientes al cuaternario, con algunas rocas originadas en pleistoceno, en el área de estudio se encuentran depósitos de origen eólico y algunos depósitos enmarcados en procesos fluviales y marinos, la composición encontrada de los depósitos paludales encontrados en la zona de estudio corresponde a niveles de arena fina y limos.

Figura 2 Localización área de estudio



Fuente: Modificado Servidor de mapas Google

Se ejecutó una campaña de exploración geotécnica por métodos directos, los cuales consistieron en tres perforaciones mecánicas de 10.m de profundidad, realizando la extracción de especímenes de suelo para la realización de ensayos de laboratorio y ensayos de campo normalizados (SPT)

Se realizaron ensayos de laboratorio de caracterización física o propiedades índice tales como contenido de humedad, límites de Atterberg, granulometría, peso unitario total, peso específico y materia orgánica; adicionalmente se hicieron ensayos de compresión inconfiada y corte directo para establecer parámetros de resistencia de los suelos. En la Tabla 1 se relaciona la cantidad de ensayos ejecutados:

Tabla 1 Ensayos de Laboratorio realizados

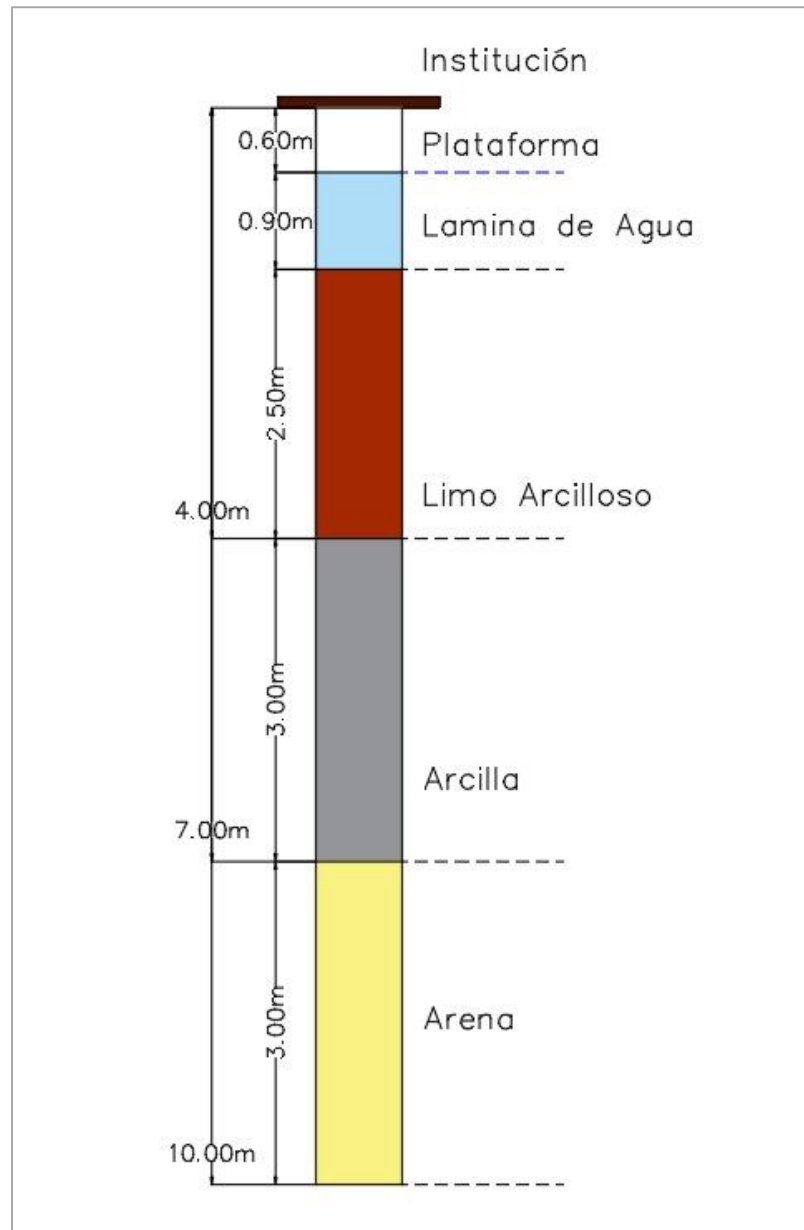
TIPO DE ENSAYO	TOTAL
Humedad Natural	19
Límites De Atterberg	19
Granulometría	18
Peso Unitario Parafinado	7
Gravedad Especifica	7
Contenido de Materia Orgánica	2
Compresión Inconfiada en Suelo	
Corte Directo	3
Expansión libre	4

A partir de los resultados de los ensayos de laboratorio y de los ensayos de campo se pudo establecer el perfil estratigráfico y los parámetros de cada uno de los estratos encontrados.

- **Plataforma: 0.0 - 0.6m**
- **Lamina de agua 0.6 – 1.5m**
- **Material No 1. Limo arcilloso de baja plasticidad (1.5 – 4.0m):** corresponde a la parte inicial del lecho, es un limo muy lodoso, de baja plasticidad de consistencia muy blanda, sus propiedades índice y parámetros de resistencia son:
 - *Humedad Natural (W_n): 34%.*
 - *Limite Líquido (LL): 41%.*
 - *Limite Plástico (LP): 20%.*
 - *Composición Granulométrica:*
 - *Gravas: 1%*
 - *Arenas: 9%*
 - *Finos: 90%.*
 - *Peso unitario total (γ_t): 1,9 t/m³*
 - *Resistencia a la Penetración Estándar N1(60): 2 golpes/pie.*
 - *Resistencia al corte no drenada (c_u): 0.9 t/m² correlación con N1(60).*
 - *Módulo de Elasticidad (E_s): 225 t/m². Se estimó a partir de la correlación propuesta por Schmertmann y Hartman (1978) E_s=250*Cu.*

- *Relación de Poisson (μ): teniendo en cuenta que en la literatura se presentan rangos muy variados para la relación de poisson, se asume un valor conservativo de 0.4.*
 - *Ángulo de fricción del material (ϕ): 30°*
 - *Cohesión (c'): 1.25 t/m²*
- **Material No 2. Arcilla de alta plasticidad CH (4,0 – 7,0m):** corresponde a una Arcilla de alta plasticidad muy blanda, con rastros de turba, de baja densidad, sus propiedades índice y parámetros de resistencia son:
- *Humedad Natural (W_n): 50 - 226%.*
 - *Limite Líquido (LL): 44 - 93%.*
 - *Limite Plástico (LP): 19 - 48 %.*
 - *Composición Granulométrica:*
 - *Gravas: 1,5%*
 - *Arenas: 2%*
 - *Finos: 96,5%.*
 - *Peso unitario total (γ_t): 1,26 t/m³.*
 - *Resistencia a la Penetración Estándar N1(60): 2 golpes/pie.*
 - *Resistencia al corte no drenada (c_u): 0,9 t/m².*
 - *Módulo de Elasticidad (E_s): 225 t/m². Se estimó a partir de la correlación propuesta por Schmertmann y Hartman (1978) $E_s = 250 * C_u$.*
 - *Cohesión (c'): 0.6 t/m²*
 - *Angulo de fricción del material (ϕ): 18°*
- **Material No 3. Arena limosa (7,0 – 10,0m):** corresponde a una arena de grano fino de compacidad densa, sus propiedades índice y parámetros de resistencia son:
- *Humedad Natural (W_n): 23%.*
 - *Limite Líquido (LL): NL.*
 - *Limite Plástico (LP): NP.*
 - *Composición Granulométrica:*
 - *Gravas: 1%*
 - *Arenas: 62%*
 - *Finos: 37%.*
 - *Peso unitario total (γ_t): 1,98 t/m³.*
 - *Resistencia a la Penetración Estándar N1(60): 35 golpes/pie*
 - *Módulo de Elasticidad (E_s): 2681 t/m²*
 - *Angulo de fricción del material (ϕ): 41°*

Figura 3 Perfil geotécnico Nueva Venecia



Fuente: Elaboración Propia

Para determinar la capacidad portante y haciendo uso de las expresiones algebraicas antes mencionadas se pudo obtener que un pilote de 0.4m de diámetro tienen una capacidad portante de 17.5 a 9.0m de profundidad desde la plataforma, también se obtuvieron los valores de los módulos de reacción vertical y módulos reacción horizontal tal como se consigna en la siguiente tabla:

Tabla 2 Mulos de reacción Vertical y Horizontal de pilotes para la institución San José de Nueva Venecia

L pilote (m)	Módulo de reacción vertical Kv t/m3			Módulo de reacción Horizontal Kh t/m3		
	Diámetro (m)			Diámetro (m)		
	D=0.2m	D=0.3m	D=0.4m	D=0.2m	D=0.3m	D=0.4m
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,00	1575,63	1050,42	787,82	1339,29	892,86	669,64
4,00	1575,63	1050,42	787,82	1339,29	892,86	669,64
5,00	1575,63	1050,42	787,82	1339,29	892,86	669,64
6,00	1575,63	1050,42	787,82	1339,29	892,86	669,64
7,00	1575,63	1050,42	787,82	1339,29	892,86	669,64
8,00	17972,22	11981,48	8986,11	15276,35	10184,24	7638,18
9,00	17972,22	11981,48	8986,11	15276,35	10184,24	7638,18
10,00	17972,22	11981,48	8986,11	15276,35	10184,24	7638,18

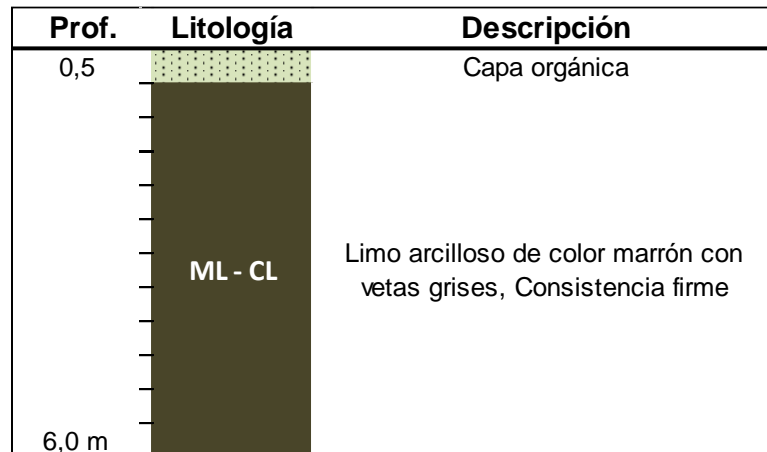
La planta de tratamiento se ubica en la zona rural del municipio de Mompo, en la zona sur del departamento de Bolívar, sobre el costado norte de la carretera nacional (Ruta 78) que comunica los municipios de Mompo y Talaiga Nuevo.

El contexto geológico de la zona presenta afloramientos de rocas metamórficas, ígneas, sedimentarias y volcanoclásticas, su origen data desde el Proterozoico hasta el Holoceno, se encuentran arenitas y lodolitas tobáceas, rocas piroclásticas y efusivas (origen volcánico), así mismo, arenitas, limolitas, lodolitas, arcillolitas, calizas y conglomerados en unidades litoestratigráficas de origen sedimentario (Servicio Geológico Colombiano, 2022).

Allí se realizaron dos (2) sondeos a profundidades de 6.0m, donde los ensayos de campo tipo SPT permitieron recuperar especímenes de suelo, posteriormente tras el ensayo de laboratorio se determinó su clasificación, a partir de determinar el contenido de humedad, límites de Atterberg y granulometría.

Se estableció un perfil geotécnico con una primer capa correspondiente a la capa orgánica, compuesta por un limo arcilloso, subsiguiente a este material se encuentra un limo arcilloso color marrón con vetas grises, cuya consistencia varía en profundidad de firme a muy firme. A continuación, en la figura 4 se muestra el perfil estratigráfico obtenido para los análisis:

Figura 4 Perfil geotecnico Plata Trifud



Fuente: Elaboración Propia

Se calcularon los valores de Factores seguridad de los análisis de estabilidad los cuales se tabularon para poder verificar su cumplimiento con la Norma Sismo Resistente:

Tabla 3 Resumen Factores de seguridad (Derecho)

FS	Estático	Pseudo-estático
Sin Agua	2.046	1.605
Agua	2.043	1.600

Tabla 4 Resumen Factores de seguridad (Izquierdo)

FS	Estático	Pseudo-estático
Sin Agua	2.204	1.719
Agua	2.196	1.712

Conclusiones y recomendaciones

Con los datos obtenidos a partir de la información de antecedentes, la exploración y los ensayos de laboratorio se pueden obtener las recomendaciones para la cimentación de la institución San José de Nueva Venecia, con lo anterior se establece la utilización de cimentación profunda que según las características en el Magdalena explica el uso de institución de palafito, para ello se deben utilizar pilotes hincados en madera, la longitud no debe ser menor a 9.0m de longitud y se debe tener en cuenta que esta distancia debe ser medida desde la plataforma.

A fin de garantizar la estabilidad global del sistema y teniendo en cuenta las características de los materiales y los análisis realizados, los taludes del relleno que se debe realizar para la implantación de la planta de tratamiento, deben ser conformados con una pendiente no mayor a 1,5H: 1V, cumpliendo con las recomendaciones establecidas en la norma INV-220-22, posterior a un descapote de no menos de 0.5m.

Lista de Referencias

- *ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10). Título A: Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente. Título H: Estudios Geotécnicos, 2010.*
- *DAS, B. M. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. California State University, Sacramento. 4 ed. 2001.*
- *MEYERHOF, Geoffrey. G. Bearing Capacity and Settlement Of Pile Foundations, Journal Of The Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 102, No GT3. 1976.*
- *HURTADO, J. E. A. (1994). Análisis de estabilidad de taludes. Ciencia y Tecnología-Facultad de Ingeniería Civil, 62.*
- *GONZALEZ, Álvaro (1999) Jornadas Geotécnicas de la ingeniería colombiana. Estimación de parámetros efectivos de resistencia con el SPT*
- *Servicio Geológico Colombiano. (2022, agosto). Visor integrado geoportal. https://srvags.sgc.gov.co/JSViewer/Visor_Integrado_Geoportal/*