



Caracterización y mejoramiento del suelo en la urbanización Carmen Alicia para la elaboración de 300 viviendas de interés social ubicadas en el municipio de Sahagún, Córdoba.

Luis Guillermo Gómez Abisaad

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Civil

Asesor
Álvaro José Mattos Olivella
Especialista (Esp)

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil
Medellín, Antioquia, Colombia
2022

Cita	(Gómez Abisaad, 2022)
Referencia	Gómez Abisaad, L.G. (2022). <i>Caracterización y mejoramiento del suelo en la urbanización Carmen Alicia para la elaboración de 300 viviendas de interés social ubicadas en el municipio de Sahagún, Córdoba.</i>
Estilo APA 7 (2020)	[Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.c>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: Jhon Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Julio César Saldarriaga Molina

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	6
2. Objetivos	7
2.1. Objetivo general	7
2.2. Objetivos específicos	7
3. Marco teórico	7
3.1. Mejoramiento de suelos expansivos con Pilotines de Cal	23
4. Metodología	23
4.1. Descapote de la zona a intervenir.	23
4.2. Retiro de fallos en el terreno.....	24
4.3. Implementación del método de mejoramiento	25
4.4. Rellenos y compactaciones.....	26
4.5. Pruebas de densidad en campo	26
4.6. Cimentación.....	27
4.7. Suelo cemento.....	28
4.8. Implementación de las viviendas.....	28
5. Resultados y Análisis	28
6. Conclusiones	32
7. Referencias bibliográficas.....	34

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Muestra las coordenadas de los nueve sondeos realizados en la urbanización Carmen Alicia.	10
Tabla 2. Clasificación de las unidades de construcción por categorías.....	11
Tabla 3. Muestra la norma utilizada para cada ensayo de laboratorio.	12
Tabla 4. Muestra el registro del sondeo 1.	12
Tabla 5. Muestra el registro del sondeo 2.	14
Tabla 6. Muestra el registro del sondeo 3.	15
Tabla 7. Características generales del suelo de la urbanización.....	15
Tabla 8. Clasificación de suelos expansivos.	16
Tabla 9. Clasificación del suelo según USCS	16
Tabla 10. Muestra la granulometría que debe cumplir el material de relleno.	16
Tabla 11. Valores de Aa, Av y nivel de amenaza sísmica del municipio de los municipios de Córdoba.	18
Tabla 12. Nivel de amenaza sísmica según valores de Aa y Av.	19
Tabla 13. Clasificación del perfil de suelo.	19
Tabla 14. Muestra el resultado de los límites de consistencia del material de relleno.....	30

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Localización del Proyecto.....	7
Figura 2. Distribución de las 6 manzanas en el lote destinado para la elaboración de las 300 viviendas de interés social.....	8
Figura 3. Planta arquitectónica del proyecto, planta 1 y 2 respectivamente.	9
Figura 4. Fachada principal.....	9
Figura 5. Sección de corte.....	10
Figura 6. Localización de los nueve (9) sondeos realizados por INEICA.	10
Figura 7. Exploración del subsuelo.....	12
Figura 8. Zonas de amenaza sísmica aplicable a edificaciones.....	17
Figura 9. Muestra el sistema de entibado para excavaciones que estén a menos de 3.00m de estructuras vecinas.....	21
Figura 10. Cimentación para un bloque de 8 viviendas. Vista en planta.	22
Figura 11. Detalle Viga Amarre.....	22
Figura 12. Descapote de manzana 5.....	24
Figura 13. Retiro de fallo en la manzana 4	25
Figura 14. Mejoramiento de suelo con pilotines de cal	25
Figura 15. Relleno y compactación de material en la manzana 5	26
Figura 16. Prueba de densidad en campo utilizando el método del cono de arena.....	27
Figura 17. Viga de cimentación de L= 12.18m.....	27
Figura 18. Viga de cimentación de L=19.80m.....	27
Figura 19. Descargue de 500 metros cuadrados de Durapanel.	28
Figura 20. Muestra la profundidad y separación de las perforaciones realizadas en el terreno de la Urbanización Carmen Alicia para el mejoramiento de suelos expansivos utilizando el método de pilotines de cal viva.	29
Figura 21. Muestra los resultados de tamizado que se le realiza al material seleccionado para relleno.....	30
Figura 22. Muestra la granulometría del material seleccionado.	30
Figura 23. Densidad en campo utilizando el método del cono de arena en la Urbanización Carmen Alicia.	31
Figura 24. Muestra los resultados obtenidos en la prueba de densidad en campo utilizando el método del cono de arena.....	32

LISTADO DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Variación de las humedades respecto a la profundidad en el sondeo 1.	13
Gráfica 2. Variación de los esfuerzos respecto a la profundidad en el sondeo 1.	13
Gráfica 3. Variación de humedades respecto a la profundidad en el sondeo 2.	14
Gráfica 4. Variación de los esfuerzos respecto a la profundidad en el sondeo 2.	14
Gráfica 5. Variación de humedades respecto a la profundidad en el sondeo 3.	15
Gráfica 6. Variación de los esfuerzos respecto a la profundidad en el sondeo 3.	15
Gráfica 7. Coeficiente F_a para períodos cortos del espectro.	20
Gráfica 8. Coeficiente F_a para períodos intermedios del espectro.	20
Gráfica 9. Muestra la relación humedad-densidad del material utilizado para relleno.	31

Resumen

Este trabajo se realizó con el propósito de presentar soluciones de tipo ingenieril en el área geotécnica, teniendo en cuenta las características del suelo de la Urbanización Carmen Alicia, ubicada en el municipio de Sahagún, Córdoba, Colombia. Para llevar a cabo el mejoramiento de suelo, se analizaron las propiedades físicas y mecánicas del terreno destinado para la elaboración de 300 casas de interés social. Dicho mejoramiento se llevó a cabo utilizando pilotines de cal viva para la estabilización y mejoramiento del terreno, mediante el cual se trató de mitigar la problemática de suelos expansivos que presentó el lote destinado para dicha urbanización.

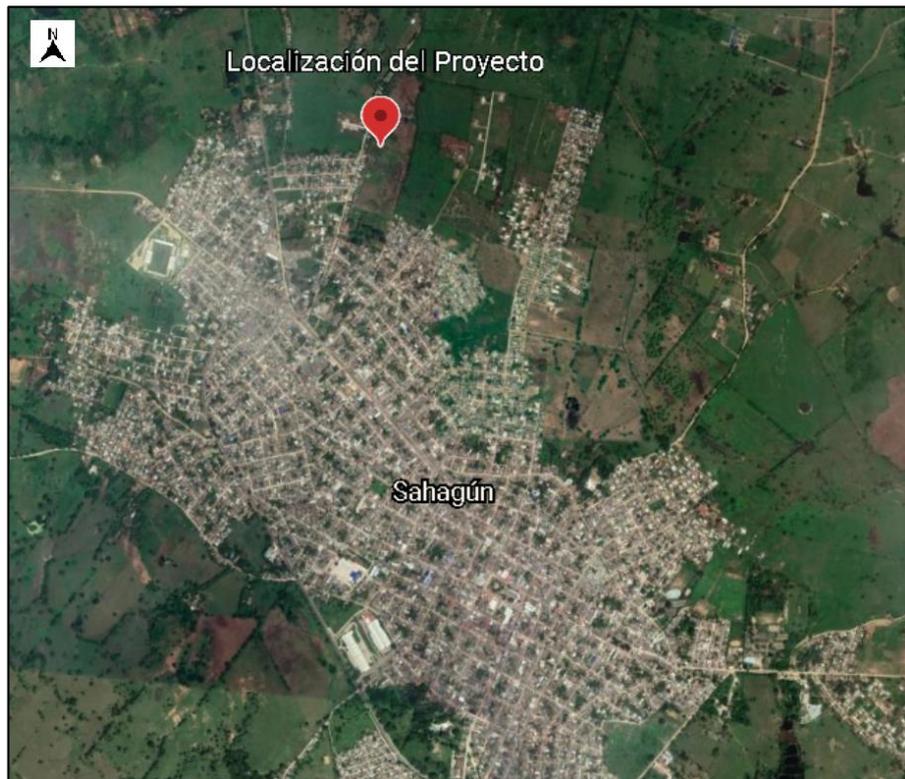
1. Introducción

La Urbanización Carmen Alicia es de carácter prioritario, se entregarán 300 viviendas a los habitantes más necesitados del municipio de Sahagún, Córdoba. El consorcio Viviendas Córdoba 2019, identificado con NIT 901346229-3 es el encargado de la ejecución del proyecto, pero antes se debe realizar un minucioso análisis del suelo para evitar futuras complicaciones con la construcción de las viviendas y garantizar la seguridad de los habitantes.

El lote destinado para la construcción de las 300 viviendas se ubica en el municipio de Sahagún en el departamento de Córdoba, la localización del mismo se encuentra en la figura 1, el municipio cuenta con una extensión de 992 km² y una población de 137.527 habitantes (*Alcaldía municipal de Sahagún, Córdoba, 2022*). Este lote presenta, en los registros de perforación y en los resultados de los ensayos de laboratorio, un suelo arcilloso; clasificado como CH (Arcillas inorgánicas de alta plasticidad), según la USCS. El proyecto se encuentra geotécnicamente determinado por la plasticidad y potencial expansivo de los materiales que conforman el subsuelo. El lote del proyecto fue destinado por más de 10 años a la agricultura por ello es de suma importancia realizar el estudio adecuado para asegurar su habitabilidad, estándares de calidad en diseño urbanístico, arquitectónico y de construcción. Estas VIS (Viviendas de Interés Social) garantizan la existencia de suelo urbanizable para su construcción a través de estrategias encaminadas a consolidar el problema de déficit habitacional que azota al municipio por su gran población.

La implementación del método elegido para el mejoramiento de suelo está consolidada en aspectos como costo-beneficio, cumpliendo todos los lineamientos establecidos por las normas de construcción vigentes en Colombia para 2021, entre los cuales está la obligación de presentar proyectos arquitectónicos que tengan en cuenta a personas en condición de discapacidad (ley1680/13) y exigencia de contar con una interventoría para proyectos contratados con el estado (ley 80/93).

Figura 1. Localización del Proyecto



Escala 1:1000.

Fuente: Google Earth.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Caracterizar las técnicas de mejoramiento de suelo en el sitio de construcción de las 300 viviendas de la Urbanización Carmen Alicia en el municipio de Sahagún, Córdoba.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades mecánicas e índices del subsuelo del área de construcción por medio de sondeos, excavaciones y ensayos de laboratorio, según los lineamientos de la NSR – 10.
- Analizar factores de Sismicidad del municipio para garantizar la seguridad de las viviendas.
- Evaluar el suelo según ensayos proctor estándar y proctor modificado para caracterizar la compactación del suelo tras la construcción de rellenos y compactaciones, con prueba de densidad en campo, utilizando el método del cono de arena.

3. Marco teórico

El municipio de Sahagún se encuentra entre tres regiones geotécnicas de la subdivisión del departamento de Córdoba, la región de la zona estable o plataforma y la región geotécnica es la

correspondiente al Anticlinorio San Jacinto Sur y la región del Anticlinorio de San Jerónimo. (Alcaldía municipal de Sahagún)

La Urbanización Carmen Alicia se encuentra ubicada en la unidad geológica de símbolo N2-Sc, de conglomerados y arenitas líticas conglomeraticas intercaladas con arcillolitas, limolitas y turbas de la formación Sincelejo. El terreno en el cual se proyecta la construcción de la urbanización tiene forma geométrica rectangular, cuenta con un área total de 108.492,3 m² su configuración topográfica es algo ondulada; sin embargo, sus diferencias de nivel no superan los 2,5 metros. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2009)

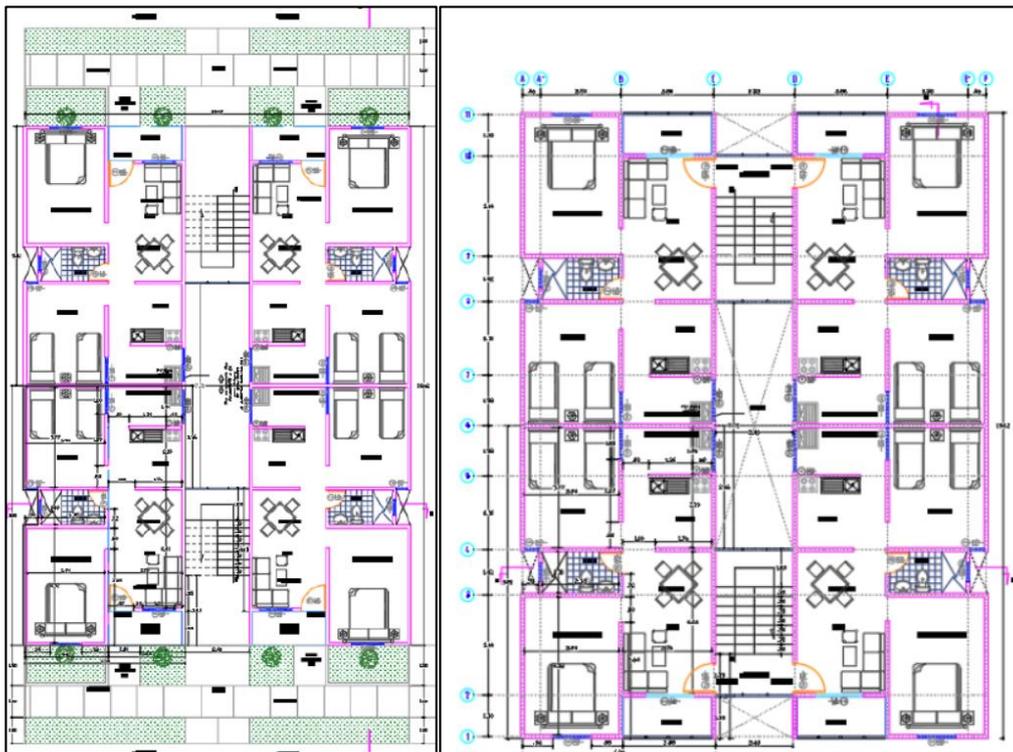
La Urbanización constará de las manzanas 1,2,3,4,5 y 6, como se puede observar en la figura 2, las cuales tienen 36,56,56,40,56 y 56 casas respectivamente para un total de 300 viviendas bifamiliares de interés prioritario de 2 plantas, estas tendrán forma rectangular con un área de 58,2 m² y contarán con dos alcobas, baño, cocina, cuarto de ropas y terraza o balcón como se muestra en las figuras 3, 4 y 5.

Figura 2. Distribución de las 6 manzanas en el lote destinado para la elaboración de las 300 viviendas de interés social



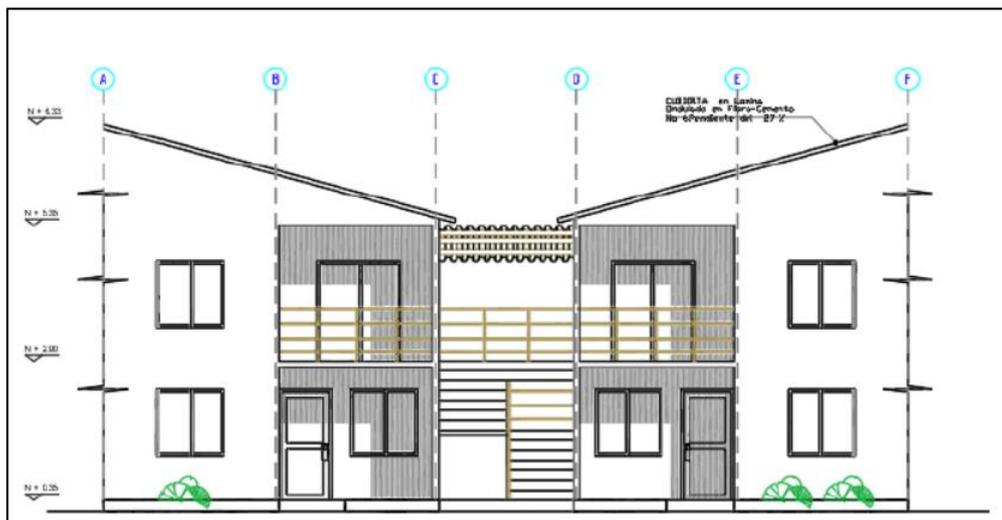
Fuente: Plano Urbanístico - Urb. Carmen Alicia

Figura 3. Planta arquitectónica del proyecto, planta 1 y 2 respectivamente.



Fuente: Plano Arquitectónico Urbanización Carmen Alicia

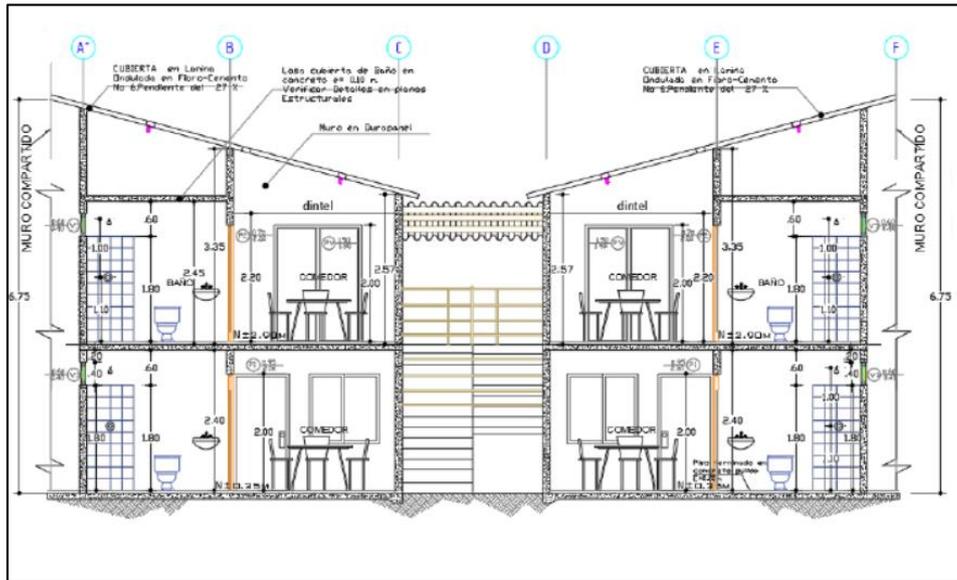
Figura 4. Fachada principal



Escala 1:50

Fuente: Plano Arquitectónico Urbanización Carmen Alicia

Figura 5. Sección de corte



Escala 1:50

Fuente: Plano Arquitectónico Urbanización Carmen Alicia

Con el fin de conocer el tipo de suelo, en el cual se ejecuta el proyecto, fueron llevados a cabo estudios geotécnicos. Según el informe presentado por la empresa INEICA se realizaron nueve (9) sondeos localizados como se muestra en la figura 6, las coordenadas N-E de estos sondeos estan dadas en la tabla 1.

Figura 6. Localización de los nueve (9) sondeos realizados por INEICA.



Fuente: Estudio de suelos de la urbanización Carmen Alicia. Realizado por INEICA.

Tabla 1. Muestra las coordenadas de los nueve sondeos realizados en la urbanización Carmen Alicia.

Sondeo	Coordenadas Magna-sirgas/Gauss-Krueger	
Sondeo N°1	14829989.646 N	849173.361 E
Sondeo N°2	1483002.971 N	849251.114 E
Sondeo N°3	1483057.144 N	849195.032 E
Sondeo N°4	1483068.504 N	849272.167 E

Sondeo N°5	1483211.647 N	849216.024 E
Sondeo N°6	1483142.315 N	849273.787 E
Sondeo N°7	1483190.021 N	849237.725 E
Sondeo N°8	1483207.786 N	849294.809 E
Sondeo N°9	1483256.507 N	849258.782 E

Fuente: Estudio de suelos de la urbanización Carmen Alicia. Realizado por INEICA.

Cumpliendo con el numeral H.3.2.3 de la NSR – 10, para unidades de construcción de categoría baja (edificaciones hasta 3 niveles), como lo muestra la tabla 2, se realizaron mínimo 3 sondeos a una profundidad mínima de 6.0 metros. Para el avance de las perforaciones se utilizaron barrenos manuales tipo helicoidal, además se realizaron pruebas de penetración estándar (SPT). Para la muestra inalterada la empresa en oficio acopló el tubo estándar o Shelby para llevarla a cabo. El tubo fue introducido a golpes con una almadana que tiene un peso de 63.5 kg, desplazándose en caída libre desde 0.762 m, hasta lograr una penetración aproximada de 0.45 m, espaciados cada 0.15m y contabilizando el número de golpes en cada segmento de suelo penetrado, luego de ello procedieron a tomar la muestra.

Tabla 2. Clasificación de las unidades de construcción por categorías

Categoría de la unidad de construcción	Según los niveles de construcción
Baja	Hasta 3 niveles
Media	Entre 4 y 10 niveles
Alta	Entre 11 y 20 niveles
Especial	Mayor de 20 niveles

Fuente: Título H, NSR – 10

Se estandarizó el número de penetración estándar de campo asumiendo que la energía aplicada corresponde a:

$$N_{60} = N * \eta_H * \eta_B * \eta_S * \eta_R$$

Donde:

N: Numero de golpes tomados en campo

η_H : Factor dependiente del tipo de martillo y la liberación del mismo.

η_B : Factor dependiente del diámetro de la tubería de revestimiento

η_S : Factor dependiente del tipo de muestreador

η_R : Factor dependiente de la longitud de la barra.

Figura 7. Exploración del subsuelo.



Fuente: Estudio de suelos de la urbanización Carmen Alicia. Realizado por INEICA.

De la exploración del subsuelo, como se muestra en la figura 7, las muestras más representativas, para la clasificación por el sistema unificado (USCS), la empresa INEICA las sometió a los ensayos de laboratorio indicados en la tabla 3.

Tabla 3. Muestra la norma utilizada para cada ensayo de laboratorio.

Ensayo	Norma
Tamizado mecánico	I.N.V. E-123-13
Límite líquido	I.N.V. E-125-13
Límite plástico	I.N.V. E-126-13
Determinación de humedad	I.N.V. E-122-13
Compresión inconfiada	I.N.V. E-152-13
Determinación del potencial de expansividad	I.N.V. E-120-13

Fuente: Estudio de suelos de la urbanización Carmen Alicia. Realizado por INEICA.

De los sondeos realizados con una profundidad mayor a 6.00m en el lote de la urbanización Carmen Alicia se tiene:

Sondeo 1

Las humedades de los materiales varían entre 18 y 29% como se observa en la gráfica 1, para este sondeo registraron el nivel freático a 3.20m de profundidad desde la superficie del suelo. La tabla 4 muestra un registro detallado del sondeo 1.

La variación de humedad, límite líquido y límite plástico respecto a la profundidad se muestra en la gráfica 1, mientras que en la gráfica 2 se observa la variación, respecto a la profundidad, de la resistencia a la compresión y el esfuerzo efectivo.

Tabla 4. Muestra el registro del sondeo 1.

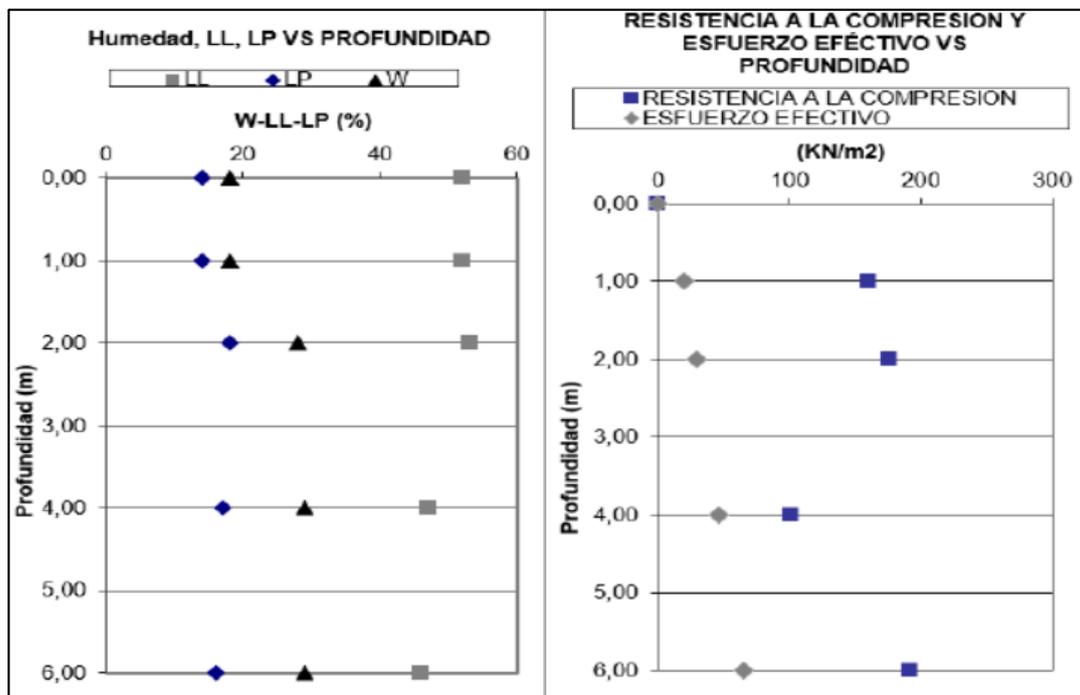
Profundidad	Descripción
0.00 – 0.25 m	Material de relleno

0.25 – 1.00 m	Arcilla arenosa de alta plasticidad de color pardo claro y gris claro de consistencia firme.
1.00 – 2.10 m	Arcilla arenosa de alta plasticidad de color pardo claro y gris claro de consistencia firme.
2.00 – 6.00 m	Arcilla arenosa de alta plasticidad de color pardo claro y gris claro de consistencia firme.

Fuente: Estudio de suelos de la urbanización Carmen Alicia. Realizado por INEICA.

Gráfica 1. Variación de las humedades respecto a la profundidad en el sondeo 1.

Gráfica 2. Variación de los esfuerzos respecto a la profundidad en el sondeo 1.



Fuente: Estudio de suelos de la urbanización Carmen Alicia. Realizado por INEICA.

Sondeo 2

Las humedades de los materiales varían entre 21 y 27%, mostrado en la gráfica 3, para este sondeo registraron el nivel freático a 3.30 m de profundidad desde la superficie del suelo. La tabla 5 muestra un registro detallado del sondeo 2.

La variación de humedad, limite líquido y limite plástico respecto a la profundidad se muestra en la gráfica 3, mientras que en la gráfica 4 se observa la variación, respecto a la profundidad, de la resistencia a la compresión y el esfuerzo efectivo.

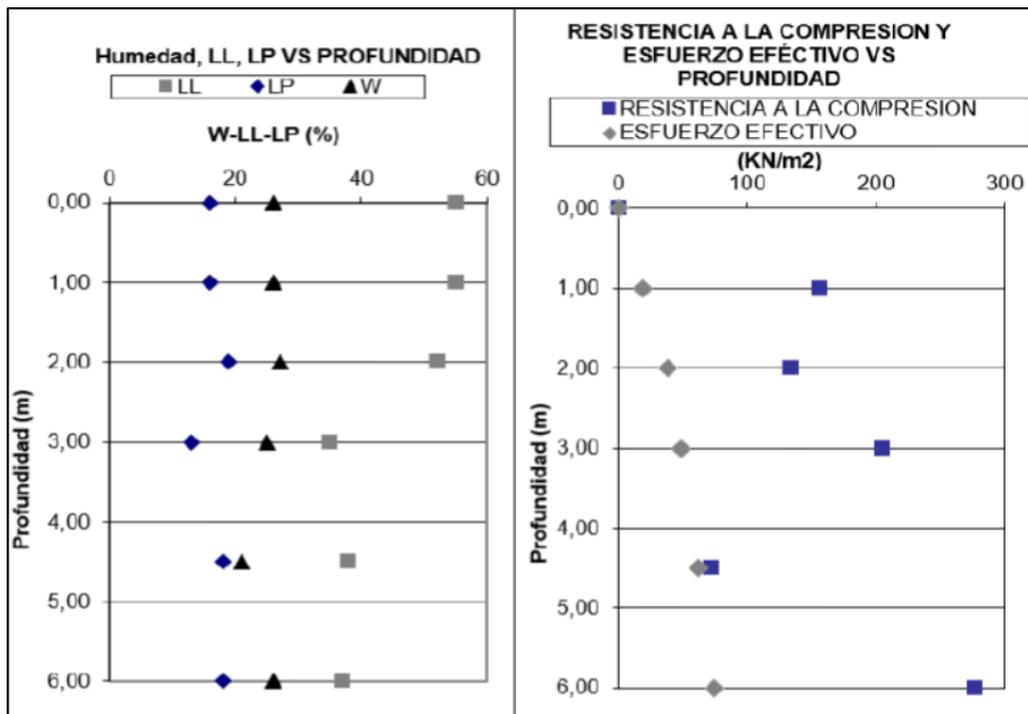
Tabla 5. Muestra el registro del sondeo 2.

Profundidad	Descripción
0.00 – 0.30 m	Material de relleno
0.30 – 2.00 m	Arcilla de alta plasticidad color pardo, vetas grises y rojizas de consistencia firme.
2.00 – 6.00 m	Arcilla arenosa de mediana plasticidad de color pardo claro y gris claro de consistencia variable entre mediana y muy firme.

Fuente: Estudio de suelos de la urbanización Carmen Alicia. Realizado por INEICA.

Gráfica 3. Variación de humedades respecto a la profundidad en el sondeo 2.

Gráfica 4. Variación de los esfuerzos respecto a la profundidad en el sondeo 2.



Fuente: Estudio de suelos de la urbanización Carmen Alicia. Realizado por INEICA.

Sondeo 3

Las humedades de los materiales varían entre 6 y 27%, como podemos notar en la gráfica 5, para este sondeo registraron el nivel freático a 3.00 m de profundidad desde la superficie del suelo. La tabla 6 muestra un registro detallado del sondeo 3.

La variación de humedad, limite líquido y limite plástico respecto a la profundidad se muestra en la gráfica 5, mientras que en la gráfica 6 se observa la variación, respecto a la profundidad, de la resistencia a la compresión y el esfuerzo efectivo.

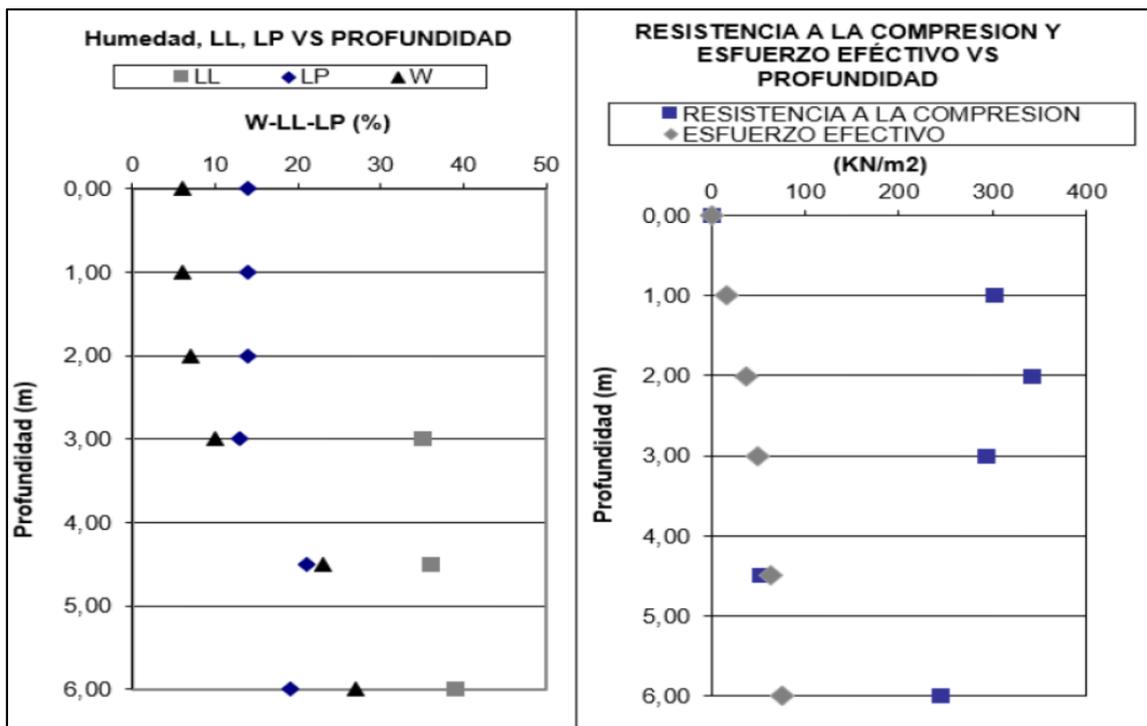
Tabla 6. Muestra el registro del sondeo 3.

Profundidad	Descripción
0.00 – 0.32 m	Material de relleno
0.32 – 2.50 m	Arcilla de alta plasticidad color pardo, vetas grises y rojizas de consistencia muy firme.
2.00 – 6.00 m	Arcilla arenosa de mediana plasticidad de color pardo claro y vetas grises de consistencia variable entre media y muy firme.

Fuente: Estudio de suelos de la urbanización Carmen Alicia. Realizado por INEICA.

Gráfica 5. Variación de humedades respecto a la profundidad en el sondeo 3.

Gráfica 6. Variación de los esfuerzos respecto a la profundidad en el sondeo 3.



Fuente: Estudio de suelos de la urbanización Carmen Alicia. Realizado por INEICA.

El perfil de diseño del suelo se encuentra caracterizado como se muestra en la tabla 7, según los ensayos descritos en párrafos anteriores.

Tabla 7. Características generales del suelo de la urbanización.

Profundidad (m)	Peso específico γ (KN/m ²)	Cohesión no drenada (KN/m ²)	Módulo de elasticidad E (KN/m ²)	Relación de Poisson μ
1.00	18.67	103.25	20650	0.50
2.00	19.69	108.70	21741	0.50
3.00	20.86	124.57	24914	0.50
4.00	18.63	50.45	10090	0.50
5.00	19.31	31.55	6311	0.50
6.00	18.75	118.90	23781	0.50

Fuente: Estudio de suelos de la urbanización Carmen Alicia. Realizado por INEICA.

El proyecto se encuentra geotécnicamente determinado por la plasticidad y potencial expansivo de los materiales que conforman el subsuelo. Según el título H de la NSR – 10, el material fino que conforma el subsuelo del lote de la urbanización el cual tiene valores de límite líquido contenidos en el rango del 35 al 55% y un índice plástico del 15 al 40%, podemos observar en la tabla 8 que se cualifica el suelo con potencial expansivo variable de alto a muy alto.

Tabla 8. Clasificación de suelos expansivos.

Potencial de expansión	Límite líquido LL (%)	Índice de plasticidad IP (%)
Muy alto	>63	>32
Alto	50 - 63	23 – 45
Medio	39 - 50	12 – 34
Bajo	<39	<20

Fuente: Título H de la norma NSR – 10

Por ende, en resumidas cuentas, la Urbanización Carmen Alicia posee las características del suelo mostradas en la tabla 9.

Tabla 9. Clasificación del suelo según USCS

Proyecto	Límite líquido LL (%)	Índice de plasticidad IP (%)	USCS	Potencial de expansión
Urbanización Carmen Alicia	24 – 48 51 - 66	7 – 30 29 - 40	CH	Alto – Muy alto

Fuente: Estudio de suelos de la urbanización Carmen Alicia. Realizado por INEICA.

El material seleccionado debe ser de baja permeabilidad, carente de finos plásticos compactado hasta alcanzar el 95% de máxima densidad del Proctor Modificado. Los rellenos que demanda el proyecto deben cumplir con los requisitos de la tabla 10.

Tabla 10. Muestra la granulometría que debe cumplir el material de relleno.

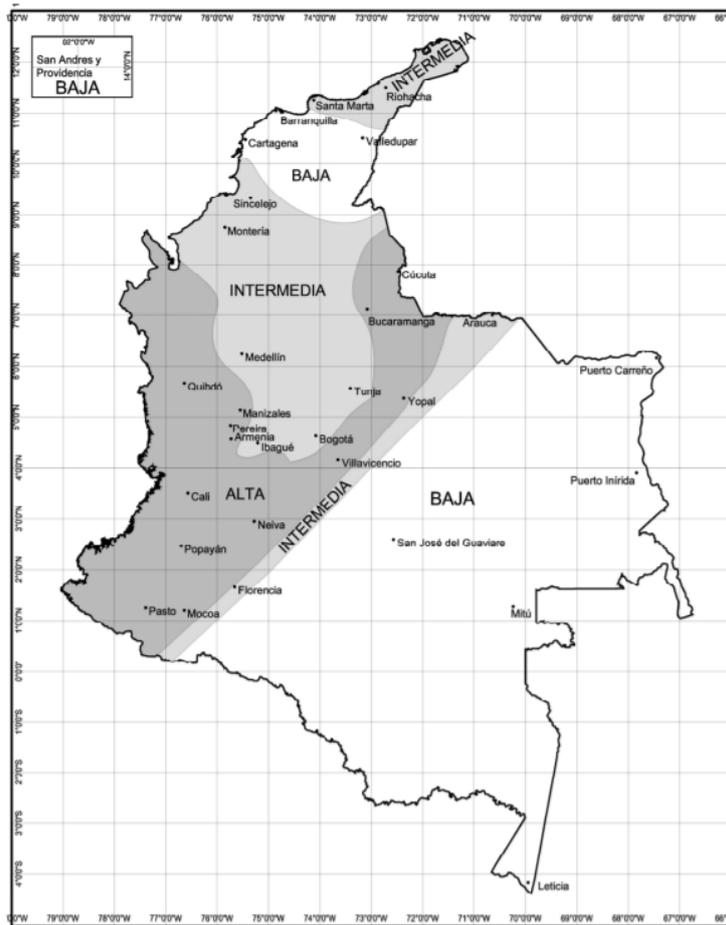
Tamiz (mm)	% Pasa
76,2	100
4,75	30 - 70
0,074	0 - 15

Tabla 10.

Fuente: INEICA LTDA.

Se debe tener en cuenta un factor muy importante para la correcta ejecución del proyecto: La Sismicidad. El municipio de Sahagún se encuentra localizado en zona de amenaza sísmica intermedia como se puede observar en la figura 8.

Figura 8. Zonas de amenaza sísmica aplicable a edificaciones



Fuente: Norma Sismo Resistente Colombiana

Tabla 11. Valores de A_a , A_v y nivel de amenaza sísmica del municipio de los municipios de Córdoba.

Municipio	Código Municipio	A_a	A_v	Zona de Amenaza Sísmica	A_e	A_d
Montería	23001	0.10	0.20	Intermedia	0.07	0.04
Ayapel	23068	0.15	0.15	Intermedia	0.07	0.04
Buenavista	23079	0.15	0.20	Intermedia	0.08	0.04
Canalete	23090	0.10	0.20	Intermedia	0.08	0.04
Cereté	23162	0.10	0.15	Intermedia	0.06	0.04
Chimá	23168	0.10	0.15	Intermedia	0.07	0.04
Chinú	23182	0.10	0.15	Intermedia	0.08	0.04
Ciénaga de Oro	23189	0.10	0.15	Intermedia	0.08	0.04
Cotorra	23300	0.10	0.15	Intermedia	0.06	0.03
La Apartada	23350	0.15	0.20	Intermedia	0.08	0.04
Lorica	23417	0.10	0.15	Intermedia	0.05	0.03
Los Córdoba	23419	0.10	0.20	Intermedia	0.08	0.05
Mofitos	23500	0.10	0.15	Intermedia	0.05	0.03
Momil	23464	0.10	0.15	Intermedia	0.07	0.03
Montelíbano	23466	0.15	0.20	Intermedia	0.08	0.04
Planeta Rica	23555	0.15	0.20	Intermedia	0.08	0.04
Pueblo Nuevo	23570	0.15	0.15	Intermedia	0.08	0.05
Puerto Escondido	23574	0.10	0.20	Intermedia	0.06	0.04
Puerto Libertador	23580	0.15	0.20	Intermedia	0.08	0.04
Purísima	23586	0.10	0.15	Intermedia	0.06	0.03
Sahagún	23660	0.15	0.15	Intermedia	0.08	0.04
San Andrés de Sotavento	23670	0.10	0.15	Intermedia	0.08	0.04
San Antero	23672	0.10	0.15	Intermedia	0.05	0.03
San Bernardo del Viento	23675	0.10	0.15	Intermedia	0.05	0.03
San Carlos	23678	0.10	0.15	Intermedia	0.08	0.04
San Pelayo	23686	0.10	0.15	Intermedia	0.06	0.03
Tierralta	23807	0.20	0.20	Intermedia	0.08	0.04
Valencia	23855	0.15	0.20	Intermedia	0.08	0.04

Fuente: NSR-10.

En la tabla 11 se puede observar los valores de A_a y A_v , donde:

A_a : Coeficiente que representa la aceleración pico efectiva para diseño.

A_v : Coeficiente de velocidad horizontal pico efectiva para diseño.

Es importante conocer el nivel de amenaza sísmica para poder realizar un buen diseño de la obra a ejecutar teniendo en cuenta cada uno de los parámetros que exige la NSR-10 con relación al sitio de localización de la Urbanización Carmen Alicia. El nivel de amenaza sísmica es Intermedia como se puede notar en las imágenes 7, 8 y 9. Por tal motivo se debe tener en cuenta una posible ocurrencia de eventos sísmicos y diseñar bajo esta modalidad. La zona de amenaza sísmica donde se encuentra la Urbanización Carmen Alicia, según los valores de A_a y A_v , se clasifica como intermedia. (Ver tabla 12)

Tabla 12. Nivel de amenaza sísmica según valores de A_a y A_v .

Mayor valor entre A_a y A_v	Asociado en mapas de las figuras A.2.3-2 y A.2.3-3 a Región N°	Amenaza Sísmica
0.50	10	Alta
0.45	9	Alta
0.40	8	Alta
0.35	7	Alta
0.30	6	Alta
0.25	5	Alta
0.20	4	Intermedia
0.15	3	Intermedia
0.10	2	Baja
0.05	1	Baja

Fuente: NSR-10

Se estima la resistencia al corte basándose en correlaciones empíricas del ensayo SPT con el número de golpes normalizados a N_{60} . Al observar detalladamente los valores obtenidos y la NSR-10, se clasifica el suelo como tipo D, como se observa en la tabla 13. (INEICA, 2017)

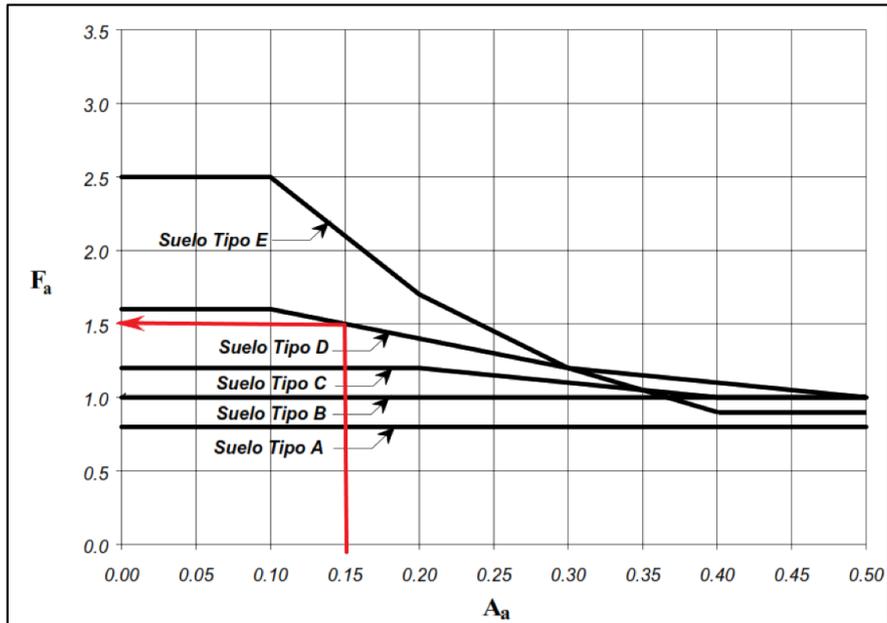
Tabla 13. Clasificación del perfil de suelo.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s > $\bar{v}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s > $\bar{v}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_{u1} \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s > $\bar{v}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²) > $\bar{s}_{u1} \geq 50$ kPa (≈ 0.5 kgf/cm ²)
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	180 m/s > \bar{v}_s
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ 50 kPa (≈ 0.50 kgf/cm ²) > \bar{s}_{u1}
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F₁ — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F₂ — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas ($H > 3$ m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F₃ — Arcillas de muy alta plasticidad ($H > 7.5$ m con Índice de Plasticidad $IP > 75$) F₄ — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda ($H > 36$ m)	

Fuente: NSR-10

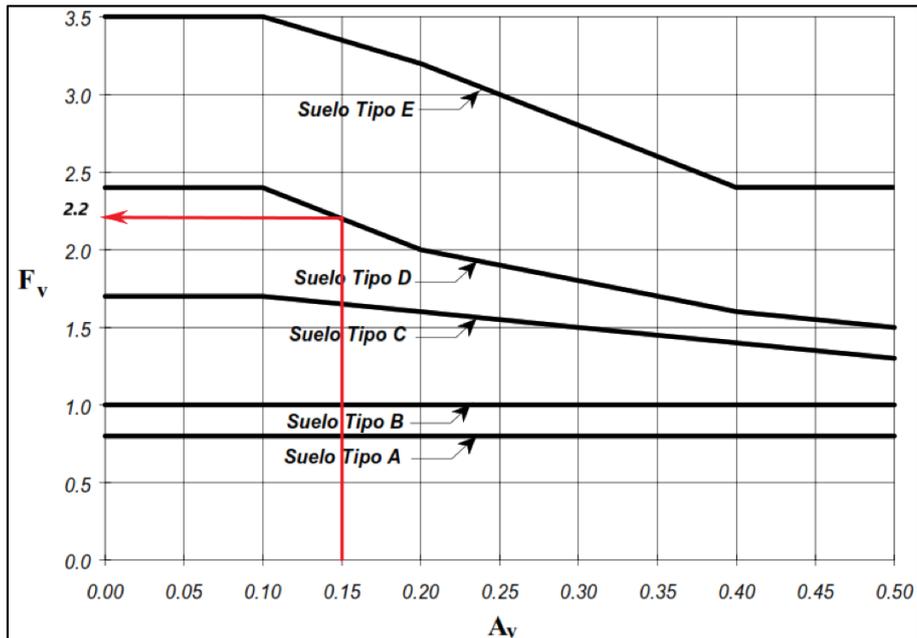
En relación al tipo de suelo se consideran los coeficientes de amplificación F_a y F_v del suelo, para las zonas de periodos cortos y períodos intermedios del espectro. Obteniendo de las gráficas 7 y 8 los valores para $F_a=1.5$ y $F_v=2.2$.

Gráfica 7. Coeficiente F_a para períodos cortos del espectro.



Fuente: NSR-10. Tabla A.2.4-3

Gráfica 8. Coeficiente F_v para períodos intermedios del espectro.



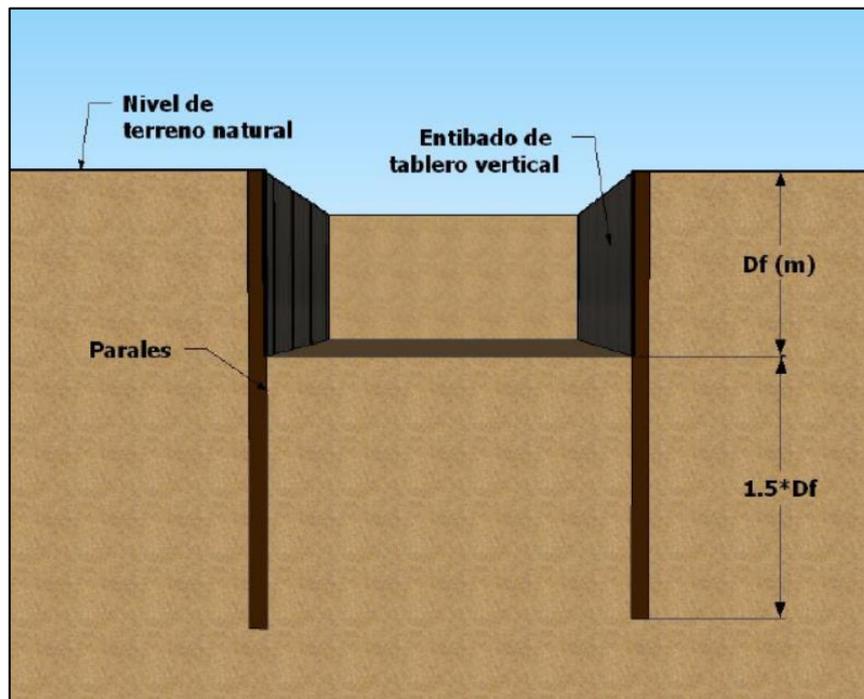
Fuente: NSR-10. Tabla A.2.4-4.

Luego de conocer los factores más importantes de la sismicidad del entorno en el cual se realizarán las 300 viviendas, es de suma importancia indagar otros aspectos que demanda el proyecto, los cuales deben ser ejecutados cumpliendo la normatividad vigente.

Se debe verificar que el material seleccionado para rellenos sea de baja permeabilidad, carente de finos plásticos compactado hasta alcanzar el 95% de máxima densidad del Proctor Modificado. Los rellenos que demanda el proyecto deben cumplir con los requisitos granulométricos de la tabla 10.

Para la cimentación, el terreno debe ser adecuadamente nivelado. La limpieza del fondo de las excavaciones es fundamental para así evitar asentamientos instantáneos. No obstante, las excavaciones que estén a menos de 3.00m de estructuras vecinas deben ser empleadas con entibados de tableros verticales empotrados 1.50 veces la profundidad de apoyo del cimiento, para garantizar seguridad. El entibado debe ser precisado antes de realizar la excavación, como se puede observar en la figura 9.

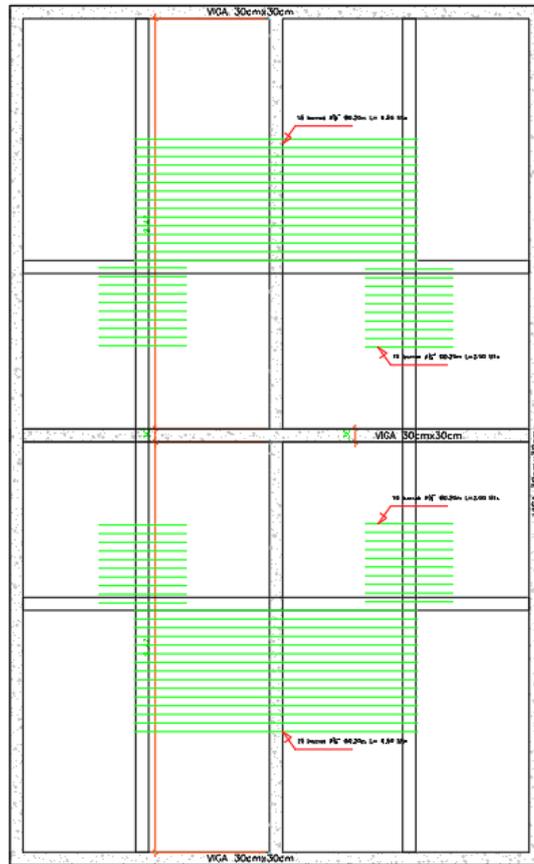
Figura 9. Muestra el sistema de entibado para excavaciones que estén a menos de 3.00m de estructuras vecinas



Fuente: Consultoría Geotecnia y Ambiente S.A.S.

Las viviendas serán cimentadas teniendo en cuenta las bajas solicitaciones de cargas, los cimientos serán por medio de losas con vigas descolgadas, como se observa en las figuras 10 y 11; empotradas con una profundidad no inferior al espesor total de la losa. Se colocará una capa de suelo cemento de 0.15m de espesor, seguido de una capa de base granular tipo INV-13 de 0.20m de espesor y 0.45m del material descrito en la tabla 10.

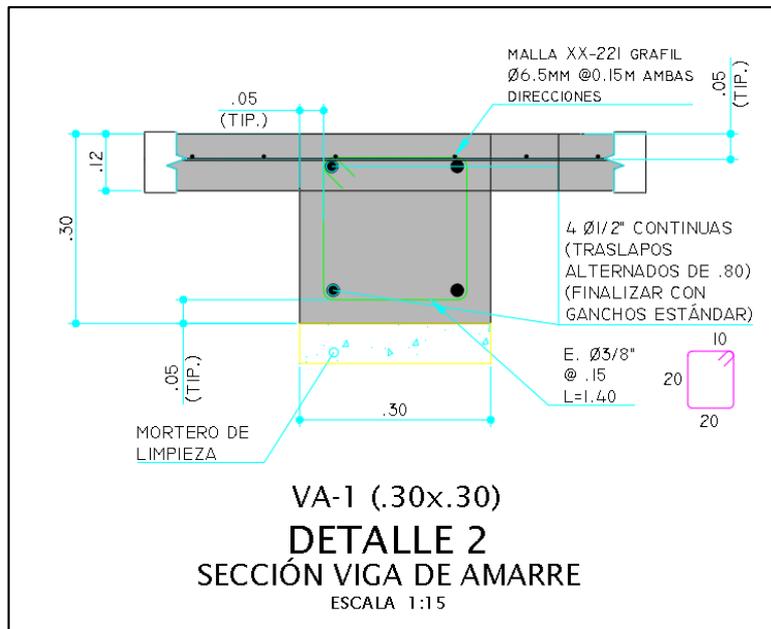
Figura 10. Cimentación para un bloque de 8 viviendas. Vista en planta.



Escala 1:50

Fuente: Plano Estructural Urbanización Carmen Alicia

Figura 11. Detalle Viga Amarre.



Fuente: Plano Estructural Urbanización Carmen Alicia

3.1. Mejoramiento de suelos expansivos con Pilotines de Cal

El método que se elige para el problema de suelos expansivos es realizar pilotines de cal viva. El consultor manifiesta haber tratado este tipo de problemática antes, para solucionar el proceso de estabilización y preparación del terreno. La Consultoría Geotecnia y Ambiente ha utilizado este tipo de soluciones en otros departamentos de la Costa Atlántica de Colombia y la información obtenida, luego de la aplicación de este procedimiento geotécnico, ha sido aceptable. La eficiencia de este método aumenta cuando la separación entre pilotines es menor.

La estabilización química con cal mediante la inclusión de pilotines de cal viva generará una reacción de floculación e intercambio iónico, con lo que se consigue una disminución de la plasticidad de los suelos y por ende su potencial de expansión, puesto que la cal reduce considerablemente el Índice de Plasticidad del suelo, dando como resultado un material con resistencia estructural.

Con la implementación de este método, se mantiene alejada la cimentación de los suelos con potencial de expansión y disminuyen la posibilidad de cambios en el contenido de humedad natural de los materiales de sitio. (Consultoría Geotecnia y Ambiente, 2021).

Es muy importante, dentro de este método, la escarificación antes de aplicar la cal, es decir antes de llevar a cabo dicho método, se debe realizar primero el descapote de toda la zona a intervenir. Además, como para el proyecto están siendo estabilizados suelos expansivos, la mezcla suelo-cal deberá ser compactada hasta alcanzar la densidad máxima obtenida en el ensayo proctor.

El empleo de cal es indispensable en este tipo de suelos, contribuyendo al empleo de otros materiales que de otra manera serían desperdiciados, transformándolos en materiales estructurales de alta calidad. (Nacional Lime Association, 2004)

4. Metodología

Luego de conocer la problemática que se presenta en el suelo del proyecto, se lleva a cabo un sustancial mejoramiento del terreno de la Urbanización Carmen Alicia. El subsuelo es de naturaleza heterogénea, conformado por depósitos cohesivos (arcillas expansivas), sus propiedades físicas y mecánicas son consideradas críticas, como se observa en la tabla 8, la cual define el suelo del proyecto con potencial expansivo de alto a muy alto. Pero cabe resaltar que el mejoramiento se realiza debido a la plasticidad más que por condiciones de soporte o capacidad de carga. Es decir, el cambio volumétrico que se presenta en el suelo debido al índice de hinchamiento del mismo es la mayor preocupación, con el fin de mitigar esta problemática se lleva a cabo el mejoramiento de suelo con micropilotes de cal viva.

4.1. Descapote de la zona a intervenir.

Se realiza descapote de 15 cm de las zonas a intervenir en la Urbanización Carmen Alicia. Iniciando por la manzana 6 hasta culminar en la 1, por cada una de las manzanas se descapotaron aproximadamente 2900 m² del terreno. Para ello se contó con una retroexcavadora pajarita y un minicargador, los cuales operaron en manzanas diferentes para agilizar dicho descapote. En la figura 12 se puede observar la retroexcavadora iniciando el descapote de la manzana 5.

Figura 12. Descapote de manzana 5



Fuente: Propia

4.2. Retiro de fallos en el terreno

Retirar los fallos (Capa del suelo que es demasiado inestable debido su alta plasticidad la cual no acepta mejoramiento) que se encuentren en el terreno luego de descapote, con el fin de albergar el mejoramiento de suelos en todas y cada una de las partes que este lo requiera. Posterior al retiro del fallo, se procede a verter una capa entre 1 y 2 cm de espesor de cal en el fondo de la excavación, como se observa en la figura 13, para luego rellenar con el material seleccionado.

Figura 13. Retiro de fallo en la manzana 4



Fuente: Propia

4.3. Implementación del método de mejoramiento

Implementación de pilotines de cal para el mejoramiento de suelos expansivos. Se realizaron pilotines con dimensiones de 1m de profundidad con 0.2m de diámetro separados a 1m de distancia entre ellos, como se observa en la figura 14. Los pilotines se realizaron principalmente en los lotes destinados para la elaboración de las viviendas. Se ejecutaron un total de 2200 pilotines por manzana. Cada pilotín requería de un total de 2 bolsas de 10kg de cal.

Figura 14. Mejoramiento de suelo con pilotines de cal



Fuente: Propia

4.4. Rellenos y compactaciones

Rellenos y compactaciones del material estipulado en la tabla 10. Para ello se coloca una capa de suelo cemento de 0.15m de espesor, seguido de una capa de base granular tipo INV-13 de 0.20m de espesor y material seleccionado con 0.45m de espesor, con la ayuda de un minicargador, una retroexcavadora pajarita y un vibrocompactador. El material seleccionado se puede observar en la figura 15.

Figura 15. Relleno y compactación de material en la manzana 5



Fuente: Propia

4.5. Pruebas de densidad en campo

Luego de conocer por parte del Laboratorio el ensayo Proctor y Proctor modificado, se identificará con pruebas de cono la densidad en campo, como se puede observar en la figura 16, con el objetivo de verificar el Grado de Compactación. Estas pruebas alcanzaron un Grado de Compactación por encima del 95%. (Ver figura 24)

Figura 16. Prueba de densidad en campo utilizando el método del cono de arena

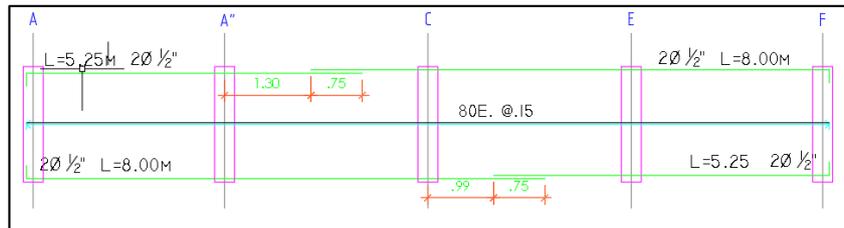


Fuente: Propia

4.6. Cimentación

Se realiza la entrega de detalles de planos a Oficiales, para llevar a cabo la cimentación de las viviendas. Se acatan las dimensiones y características de armado de la viga. Para dicho armado se emplean 2 tipos de viga, mostradas en las figuras 17 y 18. De esta forma se ejecuta la cimentación mostrada en la figura 10, la cual muestra la cimentación para una manzana.

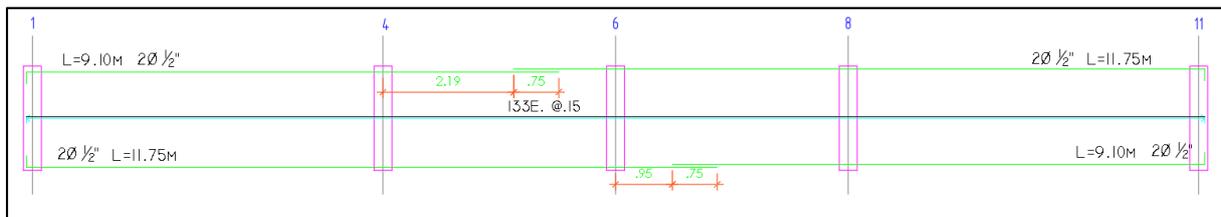
Figura 17. Viga de cimentación de $L= 12.18m$



Escala 1:50

Fuente: Plano Estructural Urbanización Carmen Alicia

Figura 18. Viga de cimentación de $L=19.80m$



Escala 1:50

Fuente: Plano estructural Urbanización Carmen Alicia

4.7. Suelo cemento

Ejecución de una capa de suelo cemento de 12 cm posterior a la cimentación. La finalidad de esta capa es brindar una mayor estabilidad, se aprovecha el material existente y se mezcla con cemento. Para luego mezclarlo hasta alcanzar su homogeneidad. Además, es perfilado por una motoniveladora y se compacta para que el cemento entre en un proceso de hidratación.

4.8. Implementación de las viviendas

Implementación de las viviendas en bloques de ocho realizadas en durapanel, poliestireno expandido el cual se emplea como solución constructiva y novedosa. Una herramienta de construcción versátil que reemplaza cualquier tipo de aligeramiento de loza convencional, un sistema constructivo integral, monolítico y homogéneo con estructura interior de acero galvanizado y conectores electrosoldados. En la figura 19 se puede observar parte del material utilizado para la elaboración de las viviendas.

Figura 19. Descargue de 500 metros cuadrados de Durapanel.



Fuente: Propia

5. Resultados y Análisis

El funcionamiento a largo plazo de cualquier proyecto de construcción está ligado a la calidad del suelo donde se ejecute el mismo. Los suelos inestables pueden ocasionar asentamientos diferenciales significativos, los cuales pueden llegar a generar problemas estructurales severos.

El mejoramiento del suelo de la Urbanización Carmen Alicia estuvo condicionado por el potencial expansivo del suelo y su alta plasticidad. Por ello, se procede a verter la cal con un

ligero acomodo o apisonamiento hasta el nivel de la superficie en cada uno de los pilotines, como se puede observar en la figura 20. Se espera una respuesta positiva del suelo tratado ya que la cal ayuda a transformar químicamente los suelos inestables en materiales utilizables.

Figura 20. Muestra la profundidad y separación de las perforaciones realizadas en el terreno de la Urbanización Carmen Alicia para el mejoramiento de suelos expansivos utilizando el método de pilotines de cal viva.



Fuente: Propia

” Este procedimiento se ha utilizado en el Atlántico y en otros departamentos de la costa, y la información obtenida permite anotar que los resultados han sido aceptables. Ineica Ltda entre los proyectos en los cuales ha utilizado el procedimiento, se menciona uno en el corregimiento de Juan Mina (Barranquilla), donde hay suelos de muy alta plasticidad y la edificación sobre el construida, es de un solo nivel y con solicitaciones de carga liviana”. (INEICA LTDA)

Al utilizar cal viva, la misma se hidrata inmediatamente, es decir, se combina con el agua presente en el terreno. El suelo tiende a secarse porque este proceso químico genera calor, eliminando la humedad adicional del terreno, lo que facilita el manejo y compactación del mismo.

Se procedió a realizar estos pilotines en el terreno utilizando ahoyadoras con brocas de 1.0m de longitud y 0.2m de diámetro cumpliendo de esta forma con la elección del comité según lo planteado con la consultoría encargada del estudio geotécnico de la urbanización.

Al finalizar el mejoramiento con cal se procede a rellenar y compactar las manzanas de la urbanización con material de tamaño máximo 1.50”, límite líquido inferior a 25% e índice plástico inferior al 10%. En la figura 21 observamos el tamizaje realizado al material de relleno

utilizado, mientras que en la figura 22 se describe la curva granulométrica del material seleccionado.

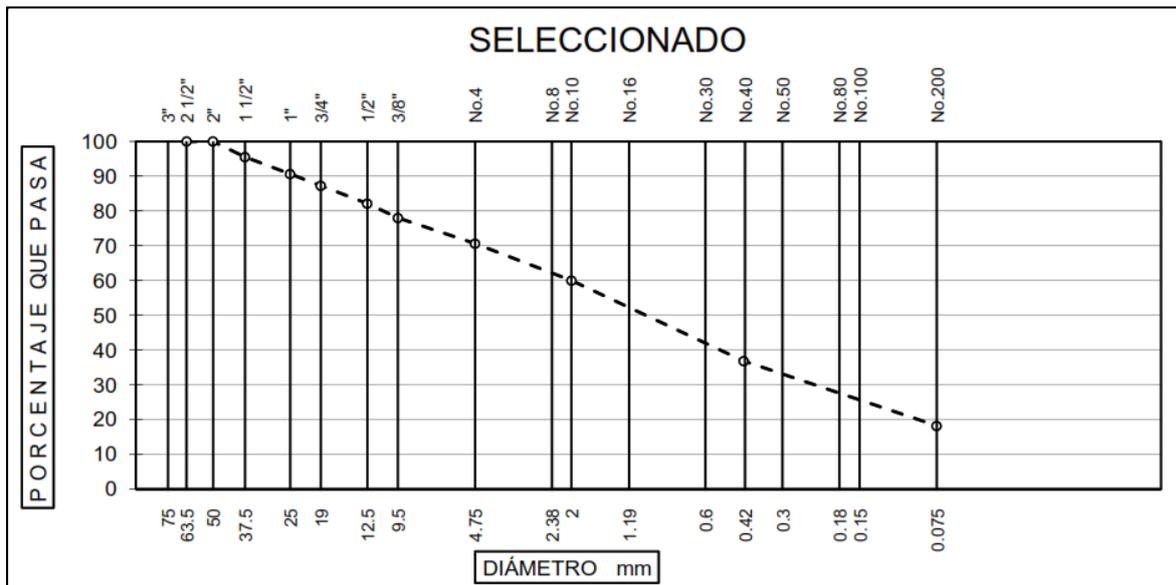
Figura 21. Muestra los resultados de tamizado que se le realiza al material seleccionado para relleno.

TAMIZ		Peso Retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	SUELO	
Pulg	mm					SELECC.	ADECUADO
Peso Seco de la Muestra (gr)		4622					
Peso Seco Después de lavado (gr)		3778					
3"	63.5	0.00	0.0	0.0	100	TM 3"	TM 4"
2"	50	0.00	0.0	0.0	100.0		
1 1/2"	37.5	207.00	4.5	4.5	95.5		
1"	25	227.0	4.9	9.4	90.6		
3/4"	19	155.0	3.4	12.7	87.3		
1/2"	12.5	238.0	5.1	17.9	82.1		
3/8"	9.5	187.0	4.0	21.9	78.1		
No. 4	4.75	342.0	7.4	29.3	70.7		
No. 10	2.00	491.0	10.6	40.0	60.0	≤ 80	≤ 80
No. 40	0.425	1071.0	23.2	63.1	36.9		
No. 200	0.075	860.0	18.6	81.7	18.3	≤ 25	≤ 35
PASA 200	844.0	18.3	100.0	0.0		
TOTAL		4622					

Fuente: Laboratorio Geotecnia y Pavimento.

El material seleccionado para relleno está compuesto de 29.34% grava, 52.40% arena y 18.26% de finos, resultados que se obtienen luego del tamizado, dando como resultado la curva granulométrica que se observa en la figura 22.

Figura 22. Muestra la granulometría del material seleccionado.



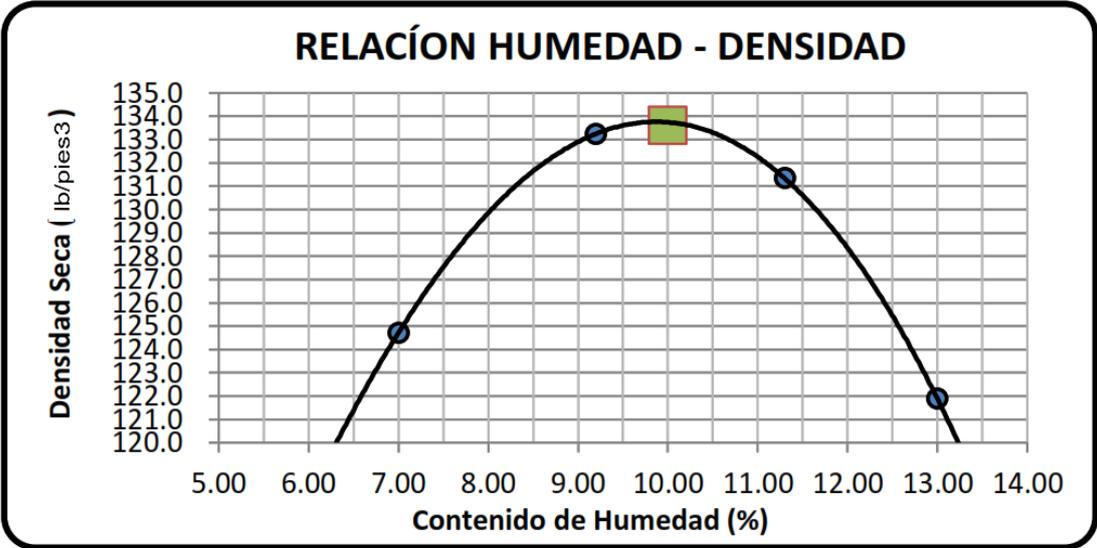
Fuente: Laboratorio Geotecnia y Pavimento.

A continuación, se muestran los resultados de los límites de consistencia del material de relleno. (Ver Tabla 14)

Tabla 14. Muestra el resultado de los límites de consistencia del material de relleno.

Límites de Consistencia (%)		
Límite Líquido	Límite Plástico	Índice Plástico

Gráfica 9. Muestra la relación humedad-densidad del material utilizado para relleno.



Fuente: Laboratorio Geotecnia y Pavimento.

El material arroja una humedad óptima del 10%, con una densidad seca máxima de 133.6 lb/pies³, como se puede observar en la gráfica 9. El material que se utilizó para el relleno cumplió a cabalidad con los límites de consistencia y la granulometría estipulados por la consultoría. Posterior a rellenos y compactaciones se procedió a realizar pruebas de densidad en campo con el método del cono de arena, como se observa en la figura 23.

Figura 23. Densidad en campo utilizando el método del cono de arena en la Urbanización Carmen Alicia.



Fuente: Propia

Figura 24. Muestra los resultados obtenidos en la prueba de densidad en campo utilizando el método del cono de arena.

ENSAYO	1	2	3	4
Capa No.				
Abscisa	MNZ 6	MNZ 6	MNZ 6	MNZ 6
Lado	LOTE 16	LOTE 4Y5	LOTE 20	LOTE 27,28
Peso Frasco + Arena Inicial (g)	6103	6081	6046	5989
Peso Suelo Extraído del Hueco (g)	3318	3353	3384	3965
Humedad del suelo Excavado (%)	8.6	8.0	8.4	7.9
Humedad Corregida (%)	8.4	7.8	8.2	7.7
Peso Seco Suelo Excavado (g)	3061	3110	3128	3682
Peso Frasco + Arena Final (g)	2326	2280	2241	1910
Peso Total Arena Usada (g)	3777	3801	3805	4079
Constante de Cono (g)	1561	1561	1561	1561
Peso Arena Total en el Hueco (g)	2216	2240	2244	2518
Densidad de la Arena (g/cm ³)	1.461	1.461	1.461	1.461
Volumen Suelo Excavado (cm ³)	1516.8	1533.2	1535.9	1723.5
Peso Material retenido en 3/4"	98.0	97.0	109.0	146.0
% Material Retenido en 3/4"	3.0	2.9	3.2	3.7
% Material Pasa 3/4"	97.0	97.1	96.8	96.3
Densidad del Material (g/cm ³)	2.018	2.028	2.036	2.136
Densidad Máx. del Proctor (De) (g/cm ³)	2.140	2.140	2.140	2.140
Humedad Óptima de Lab. (%)	10	10	10	10
Gravedad Especifica Ret. 3/4"	2.65	2.65	2.65	2.65
Densidad Máxima Corregida (g/cm ³)	2.132	2.131	2.133	2.154
Densidad del Material Correrida (g/cm ³)	2.031	2.041	2.051	2.151
Grado de Compactación (%)	95.3	95.8	96.2	99.8

Fuente: Laboratorio Geotecnia y Pavimento.

El grado de compactación es la operación o procedimiento de estabilización mecánica, cuyo objetivo fundamental es aumentar la densidad del suelo por medio de aproximación de partículas, disminuyendo así el índice de vacíos en el suelo. Los resultados que brinda el laboratorio fueron favorables, se alcanzó un grado de compactación de cada una de las pruebas realizadas mayor al que exige la consultoría en el estudio de suelos realizado (95%), como podemos observar en la figura 24.

6. Conclusiones

- De los ensayos de penetración estándar (SPT) se puede concluir que el sub-suelo del lote es de naturaleza heterogénea, conformado por suelos cohesivos de alta compresibilidad. Además, se encontró el nivel freático en los sondeos 1, 2 y 3 a 3.20, 3.30 y 3.00 m desde la superficie del suelo, respectivamente.
- La sismicidad de la zona donde se encuentra la Urbanización Carmen Alicia se clasifica como intermedia. Por ende, para cada una de las decisiones tomadas en cuanto a medidas estructurales, como mejoramiento del suelo, rellenos en el lote y la elaboración misma del plano estructural, se realizaron bajo este lineamiento, con el fin de minimizar la vulnerabilidad sísmica. Además, se reducen riesgos en la construcción de estas viviendas, se revisan tuberías, cables y demás objetos

que obstruyan la evacuación o puedan caer fácilmente, se diseñan también rutas de evacuación. Los muros interiores son realizados en dura panel, lo cual aligera la masa de la edificación y, por lo tanto, las fuerzas causadas por los sismos.

- De acuerdo a los análisis realizados mediante ensayos de laboratorio y las zonificaciones por plasticidad se obtienen los siguientes resultados: límite líquido del 35 al 55% e índice plástico entre el 15 y 40%. El mejoramiento de suelos que fue llevado a cabo debe ocasionar durante la aplicación de cargas un asentamiento estimado de 25 milímetros. Los asentamientos diferenciales esperados se consideran de magnitud despreciable y no afectarán el normal comportamiento de las edificaciones.

- El mejoramiento con pilotes de cal es fundamental en este tipo de suelos expansivos al momento de proyectar la construcción de las viviendas, puesto que con el método empleado se evitan futuros daños estructurales en la construcción de las mismas. Además, la cal aumenta la capacidad de carga del suelo, permitiendo una compactación permanente en suelos arcillosos, formando una mezcla cementante natural.

- La cal viva en cada una de las perforaciones del terreno, para tratar la condición expansiva del suelo, genera la disminución de plasticidad del mismo, alcanzando un grado de compactación, utilizando el método del cono de arena, mayor al 95% del Proctor Modificado.

- Para el mejoramiento de suelos se encuentran varios métodos o alternativas geotécnicas, para este proyecto se analizaron condiciones como la alta expansibilidad que presenta el suelo del lote, lo cual llevó a la implementación de pilotes de cal, cumpliendo su función a cabalidad. Se espera que la respuesta positiva con el tiempo sea aún más notoria.

- La estabilización de suelos con cal cambia considerablemente las características de éste, produciendo resistencia y estabilidad a largo plazo, esta puede ser utilizada sola o en combinación con otros materiales. El consultor dentro de las adendas elige aplicar la cal viva porque se aprovecha al máximo el óxido de calcio. La utilización de pilotes de cal ha sido implementada por esta consultoría en el Atlántico y varios departamentos de la costa que tienen el mismo tipo de suelo y los resultados han sido aceptables. Sin embargo, el consultor acepta que la efectividad de este mejoramiento de suelos es mayor a medida que la separación entre pilotes es menor.

- Además del tratamiento con cal, se lleva a cabo una cimentación como se mostró anteriormente más una capa de suelo cemento de 12 cm de espesor lo que hace que los cimientos sean estructuralmente adecuados para la implementación de las viviendas. Este tratamiento es no reversible, mediante el cual se transforman químicamente las partículas de arcillas, creando una estructura relativamente impermeable con mayor capacidad de carga, es decir, los suelos tratados con cal forman capas flexibles e impermeabilizantes, generando una mayor durabilidad. El potencial de expansión y compresión del suelo son disminuidos considerablemente.

7. Referencias bibliográficas

- D. Daryati et al 2019
Soil characteristics analysis based on the unified soil classification system
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1402/2/022028/pdf>
- Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR – 10
Titulo H: Estudios Geotécnicos
- INEICA,2017. “Estudio de Suelos de la Urbanización Carmen Alicia municipio de Sahagún departamento de Córdoba”.
- Laboratorio Geotecnia y Pavimento, 2021. Densidad en el terreno – Método del cono y arena.
- Instituto geográfico Agustín Codazzi, 2009. “Estudio general de suelos y zonificación de tierras- Departamento de Córdoba.” Imprenta nacional de Colombia, Bogotá D.C.
- Braja M. Das, “Fundamentos de ingeniería de cimentaciones”, Thomson Learning.
- INEICA,2017. “Respuesta a observaciones Fase II, a los estudios de suelos realizados en el municipio de Sahagún, Departamento de Córdoba.”, 2017.
- J. Pérez, 2008. Mejora y Consolidación de suelos. Departamento de Tecnología de la Construcción. E.T.S. Arquitectura de A Coruña
- L. Olaya, 2021. Revisión del mejoramiento de suelos arcillosos complejos en Colombia mediante el uso de materiales reciclados. Villavicencio, Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Civil.
- Alcaldía municipal de Sahagún, recuperado el 9 de marzo de 2022
<https://www.sahagun-cordoba.gov.co/Paginas/default.aspx>
- Nacional Lime Association, 2004. Manual de estabilización de suelo tratado con cal. Estabilización y modificación con cal.