



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA
Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**MODELO 3D GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DEL SUBSUELO
EN UNA ÁREA DEFINIDA ENTRE LAS PARROQUIAS DE
CUENCA Y NULTI UTILIZANDO DATOS EXISTENTES DEL
SUELO**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

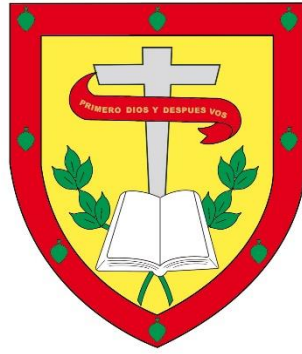
AUTOR: YOMARA ABIGAIL RAMÓN ASTUDILLO

DIRECTOR: ING. JUAN SEBASTIÁN MALDONADO NOBOA

CUENCA - ECUADOR

2023

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA INGENIERÍA, INDUSTRIA Y
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**MODELO 3D GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DEL SUBSUELO EN UNA
ÁREA DEFINIDA ENTRE LAS PARROQUIAS DE CUENCA Y NULTI
UTILIZANDO DATOS EXISTENTES DEL SUELO**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR: YOMARA ABIGAIL RAMÓN ASTUDILLO

DIRECTOR: ING. JUAN SEBASTIÁN MALDONADO NOBOA

CUENCA - ECUADOR

2023

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

DEDICATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

Yomara Abigail Ramón Astudillo portador de la cédula de ciudadanía N° 1900817642
Declaro ser el autor de la obra: **“Modelo 3D geológico-geotécnico del subsuelo en una área definida entre las parroquias de Cuenca y Nulti utilizando datos existentes del suelo”**, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 11 de octubre de 2023



F:

Yomara Abigail Ramón Astudillo

1900817642

CERTIFICACIÓN

Yo, **Ing. Juan Sebastián Maldonado Noboa MSc.** certifico que el presente trabajo de titulación con título **“Modelo 3D geológico-geotécnico del subsuelo en una área definida entre las parroquias de Cuenca y Nulti utilizando datos existentes del suelo”**, realizado por Yomara Abigail Ramón Astudillo de la Facultad de Ingeniería Civil perteneciente a la unidad académica de Ingeniería, Industria y Construcción, se desarrolló bajo mi supervisión y tutoría, siendo un trabajo elaborado de manera personal e inédita.

Cuenca, 11 de octubre de 2023



Firmado electrónicamente por:
**JUAN SEBASTIAN
MALDONADO NOBOA**

F:
Ing. Juan Sebastián Maldonado Noboa MSc.
Tutor del Proyecto de Titulación

DEDICATORIA

Este proyecto de titulación se lo dedico a todas las personas que han sido parte fundamental en mi vida y que me impulsaron a llegar al final de esta etapa, esto no ha sido nada fácil y les dedico el resultado de mi esfuerzo y sacrificio porque sin ustedes esto no lo hubiese logrado.

Quiero empezar por mis padres Edgar y Flor, este trabajo es principalmente para ustedes y se lo merecen por todo el apoyo emocional, económico, la motivación y el amor infinito que día a día me han brindado, sus consejos, los valores y su ejemplo me formaron como persona y me ayudaron a culminar mi tercera etapa académica.

A mis abuelitos, mis segundos padres, papi Humberto a la mitad de esta etapa tuviste que partir a una mejor vida, ahora no estás, pero estoy segura que me estás escuchando y viéndome en cada momento, eso te convierte en el mayor testigo de todo lo que tuve que pasar. Mami Maura, que bonito es tenerte aún en mi vida y gracias a Dios que te da vida y salud para que puedas verme cumplir este sueño. Este trabajo se los dedico a los dos con tanto amor por ser esas personas que me llenaron de amor, valores, consejos y apoyo de muchas formas.

A mis hermanas Anali y Paula, siempre he querido ser una buena hermana, ser ejemplo para ustedes y motivarles a ser mejores que yo, les dedico este trabajo porque fueron ese impulso y mi mejor compañía en este largo camino.

A mis amigas Nahomi y Laura, esto se los dedico por estar siempre en mis momentos difíciles y en los buenos momentos en los que se alegraban de lo que me salía bien, nunca me faltó sus muestras de cariño y apoyo emocional.

A mi enamorado George, te dedico esto por ser una persona ejemplo para mí, te admiro por el hombre inteligente, luchador, y trabajador que eres, gracias por ser ahora ese compañero que me apoya y me impulsa a soñar en grande, no tengo idea hasta cuando estés conmigo, pero ahora eres mi presente.

AGRADECIMIENTO

Primero quiero agradecer a Dios y a la Virgen por darme salud, fuerzas y la inteligencia necesaria para superar todo obstáculo que tuve en mi formación académica.

Quiero expresar y plasmar en este trabajo lo agradecida que estoy con Dios y con la vida por bendecirme con unos excelentes padres. Lo que puedo transmitir aquí es solo una pequeña parte de todo lo que han aportado a mi vida; sus acciones y amor superan mis palabras. Infinitas gracias, porque mis logros no son solamente producto de mi esfuerzo, sino también el reflejo directo de la educación ejemplar que me han proporcionado, ustedes son mis modelos de educación, admiración, lucha, fuerza, respeto y más valores. Agradezco profundamente a mi padre por siempre estar pendiente de mi bienestar, por su amor incondicional y por sus palabras alentadoras, que han fortalecido mis decisiones, y a mi madre por su enorme amor, expresado en dulces palabras, abrazos y besos que me han dado fuerzas para avanzar. Nuevamente gracias, porque soy quien soy gracias a cada enseñanza, cada abrazo, cada consejo y cada sacrificio que han hecho y hacen en mi vida. Cada valor que me han inculcado ha dejado una huella en mí y solo soy el resultado de tener unas grandiosas personas como padres.

Mis abuelitos, estaré eternamente agradecida con ustedes, ya que, a lo largo de mi vida, también han sido quienes han iluminado mi camino y son una parte vital de la motivación que me ha impulsado a superar cada obstáculo, también quiero resaltar que desde que nací ustedes siempre han estado a mi lado, brindándome su amor, apoyo y cultivando en mí numerosos valores. Les doy infinitas gracias por haber contribuido significativamente a la persona en la que me he convertido, ustedes han enriquecido mi vida de maneras que van más allá de todas las palabras que puedo expresar.

Mis queridas hermanas, ustedes siempre han sido parte de la fuerza que me motiva día a día, les agradezco desde lo más profundo de mi ser por cada risa y cada inconveniente superado

juntas. Gracias por estar conmigo y nunca dejarme sola, han sido parte de mis tristezas y mis alegrías, gracias por cada abrazo y por esas conversaciones que nos ayuda juntas a mejorar como personas. Deseo siempre que estemos juntas, porque gracias a eso me he levantado muchas veces, y este logro es parte de eso, además, no solo es mío, sino también de ustedes, ya que, en los momentos más difíciles, su apoyo y compañía me han dado la fortaleza necesaria, y en los momentos felices, han compartido mis alegrías. Gracias por ser mi apoyo constante, mis confidentes y mis amadas hermanas de por vida.

Mis queridas amigas, primero gracias por aguantarme y por brindarme su amistad por varios años, reír, llorar y pelear nos ha hecho fortalecer esta bonita amistad que hemos construido, gracias por estar y ser testigos de los momentos más difíciles, por aquellas conversaciones que aportaron a mi vida, su apoyo y compañía también ha sido parte fundamental para salir en adelante y desde lo más profundo de mi corazón deseo que ustedes también logren todas sus metas.

Gracias a mi demás familia, mis tías y primas que siempre tenían palabras de motivación o algún consejo, gracias por cada abrazo y cada sonrisa que me regalaban cada vez que me veían.

Gracias a mis profesores y a todas las personas que de manera directa o indirecta contribuyeron con en mis conocimientos y experiencias, les expreso mi más profunda gratitud.

Por último, gracias Marlon por tu amistad real, sincera e incondicional, la universidad me permitió conocer a una persona de un corazón enorme y muy inteligente, siempre creíste en mis capacidades, me motivaste y me ayudaste a sobresalir, sin tu ayuda tampoco lo hubiese logrado.

RESUMEN

El crecimiento de la población implica buscar nuevas áreas para vivir y construir infraestructuras seguras y habitables, por esta razón, para los diseñadores, ingenieros y constructores es importante tener información geológica-geotécnica y sísmica que proporcionen datos necesarios sobre las características y propiedades de los suelos para poder estudiar el comportamiento de estructuras y puentes.

No existe suficiente información publicada sobre el subsuelo de las ciudades en países en vías de desarrollo, datos de ensayos de tomografías eléctricas o ensayos para determinar las propiedades geomorfológicas del suelo, y muchas de las veces esto es de uso exclusivo de ingenieros expertos en geotecnia. Teniendo en cuenta esto, la mayor parte de esta información se encuentra restringida, por ello, se plantea hacer uso de la información recopilada por el proyecto de vinculación “Microzonificación sísmica del cantón Cuenca”, misma que se encuentra cargada en Geo-portal de información geográfica del laboratorio DATACHADEMICS de la Universidad Católica de Cuenca, incluye información geológica, geotécnica, perfiles estratigráficos, tipos de suelos, y clasificación de los suelos con normativa local (NEC-SE-DS) e internacional SUCS, esta base de datos almacena los ensayos que año a año los expertos realizan, los mismos que son fundamentales para el modelado tridimensional geológico-geotécnico dentro del proyecto de microzonificación sísmica del cantón Cuenca. Además, el objetivo de este trabajo es trabajar con la información GIS y softwares para generar un modelo de un mapa tridimensional 3D del subsuelo de un área definida entre las parroquias de Cuenca y Nulti, correlacionando información que permita visualizar fácilmente las zonas que tengan posibles condiciones de riesgo.

Palabras clave: Modelo Geológico-Geotécnico, ensayos de suelo, Leapfrog Geo, zonas problemáticas.

ABSTRACT

Population growth implies looking for new areas for living and building safe and habitable infrastructures. For this reason, designers, engineers, and builders need to have geological-geotechnical and seismic information that provides the necessary data on the characteristics and properties of soils to study the behavior of structures and bridges.

There is not enough published information on the subsoil of cities in developing countries, electrical tomography test data, or tests to determine the geomorphological properties of the soil, and many times, this is for the exclusive use of geotechnical engineers. Considering this, most of this information is restricted. Therefore, it is proposed to make use of the data collected by the linkage project "Seismic Microzonation of the Canton of Cuenca," which is uploaded in the Geo-portal of geographic information of the DATACHADEMICS laboratory of the Catholic University of Cuenca, including geological and geotechnical information, stratigraphic profiles, soil types, and soil classification with local standards (NEC-SE-DS) and international *Unified Soil Classification System (SUCS)*, by its Spanish acronym). This database stores the tests that, year after year, the experts perform, which are fundamental for the three-dimensional geological-geotechnical modeling within the seismic microzonation project of the Canton of Cuenca. In addition, this study aims to work with Geographic Information System (GIS) and software to generate a three-dimensional 3D subsoil map model of a defined area between the parishes of Cuenca and Nulti, correlating information that enables easy visualization of areas with possible risk conditions.

Keywords: Geological-geotechnical model, soil testing, Leapfrog Geo, problematic areas.

INDICE

DEDICATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD.....	III
CERTIFICACIÓN.....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO	VI
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
INDICE	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
ÍNDICE DE IMÁGENES.....	XIV
INTRODUCCIÓN	17
ANTECEDENTES.....	18
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	19
DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	20
JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	20
OBJETIVOS.....	22
GENERAL	22
ESPECIFICOS	22
CAPITULO I. ZONA DE ESTUDIO.....	23
1.1 UBICACIÓN	23

1.2	CLIMA.....	24
1.3	RELIEVE.....	25
1.3.1	Pendientes	25
1.4	GEOLOGÍA.....	26
1.4.1	Geología regional.....	26
1.4.2	Geología local	28
1.4.3	Geología área de estudio	29
1.4.4	Depósitos Aluviales	29
1.4.5	Depósitos Coluviales	30
1.4.6	Formación Azogues (Ma)	31
1.4.7	Formación Loyola (MI)	31
1.5	TECTÓNICA REGIONAL Y SÍSMICA	33
1.5.1	Descripción Tectónica	33
1.5.2	Sismicidad.....	34
1.5.3	Sistema sísmico del área de estudio	35
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.....		35
2.1	GEOTECNIA.....	35
2.1.1	Suelos	36
2.1.2	Tipos de suelos por su origen	36
2.1.3	Exploración de suelos.....	37
2.1.4	Tipos de sondeos	39
2.1.5	Propiedades físicas y mecánicas del suelo	41
2.1.6	Características geomecánicas de los suelos.....	44
2.1.7	Clasificación de los suelos.....	47
2.1.8	Suelo-Estructura (CIMENTACIÓN).....	52

2.1.9 PERFIL DEL TERRENO NEC 2015.....	55
56	
2.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)	56
2.2.1 Tipos de análisis con SIG	57
2.2.2 Sistemas de información geográfica y ordenamiento territorial	59
2.3 ARCGIS	60
2.4 LEAPFROG GEO SOFTWARE DE MODELADO 3D	61
2.5 MAPAS.....	63
2.5.1 Mapa Geológico.....	64
2.5.2 Mapa Geotécnico	64
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	65
3.1 SELECCIÓN DE INFORMACIÓN DEL GEOVISOR (DATHACHADEMICS)..	66
3.2 DIGITALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN SELECCIONADA.....	67
3.3 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS DATOS	67
3.4 CORRELACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS-MECÁNICAS DE LOS SUELOS PARA LA CREACIÓN DE MAPAS	68
3.5 ELABORACIÓN DE MAPAS 2D	69
3.6 DIGITALIZACIÓN DE DATOS PARA LEAPFROG GEO	69
3.7 MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO 3D.....	70
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	74
MAPAS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO.....	74
4.1 ANÁLISIS EN LA PROFUNDIDAD DE 0 A 3M	74
4.2 ANÁLISIS EN LA PROFUNDIDAD DE 3 A 6M	77
4.3 ANÁLISIS EN LA PROFUNDIDAD DE 6 A 9M	80

4.4 ANÁLISIS EN LA PROFUNDIDAD DE 9 A 12M	83
4.5 ANÁLISIS EN LA PROFUNDIDAD DE 12 A 15M	85
4.6 ANÁLISIS EN LA PROFUNDIDAD MAYOR A 15M	87
4.7 MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO	88
4.7 ANÁLISIS DEL MODELO 3D GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO.....	89
4.8 ANÁLISIS EN PERFIL DEL MODELO 3D GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO	92
CONCLUSIONES	94
RECOMENDACIONES.....	95
BIBLIOGRAFÍA	96
ANEXOS	98
DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sondeos recomendados, Clasificación de las unidades de construcción NEC SE CM (Geotecnia y Cimentaciones).....	38
Tabla 2. Número mínimo de sondeos y profundidad por cada unidad de construcción	38
Tabla 3. Clasificación del grado de expansión con Holtz y Gibbs 1959, utilizando IP.....	44
Tabla 4. Tipos de perfiles de suelos para el diseño sísmico	55

ÍNDICE DE IMÁGENES

Figura 1. Ubicación del área de estudio.....	24
Figura 2. Ubicación del área de estudio.....	24
Figura 3. Mapa del clima del área de estudio	25
Figura 4. Mapa de pendientes el área de estudio	26
Figura 5. Mapa geológico del sur del Ecuador.	27
Figura 6. “Estratigrafía de las formaciones de Cuenca”	28
Figura 7. “Estratigrafía de las formaciones de la cuenca de Cuenca”	28
Figura 8. Mapa de la geología local donde se ubica el área de estudio.	29
Figura 9. Valores estimados a partir de características físicas de la formación Loyola.	33
Figura 10. Movimiento de las placas tectónicas en el Ecuador.	34
Figura 11. Movimiento de las placas tectónicas en el Ecuador.	34
Figura 12. Estados y límites de consistencia del suelo	43
Figura 13. Estados y límites de consistencia del suelo	43
Figura 14. Definición de los límites de Atterberg.....	43
Figura 15. Definición de los límites de Atterberg.....	43
Figura 16. Imágenes reales por asentamientos diferenciales en suelos expansivos.	45
Figura 17. Imágenes reales por asentamientos diferenciales en suelos expansivos.	45
Figura 18. Carta de plasticidad, ASTM D-2487, para clasificar los suelos por SUCS.	49
Figura 19. Carta de plasticidad, ASTM D-2487, para clasificar los suelos por SUCS.	49

Figura 20. Sistema unificado de clasificación por SUCS	50
Figura 21. Sistema de clasificación AASHTO	52
Figura 22. Metodología establecida.....	66
Figura 23. Data general y formatos de los sondajes para el modelado.....	71
Figura 24. Importación de datos.	72
Figura 25. Superficies y capas generadas por interpolación.....	72
Figura 26. Volúmenes y modelo 3D.....	73
Figura 27. Mapa geológico-geotécnico profundidad 0-3m.....	75
Figura 28. Mapa geológico-geotécnico profundidad 0-3m.....	75
Figura 29. Gráfica de barras respecto a la clasificación SUCS de 0 a 3m.....	76
Figura 30. Gráfica de expansión respecto al IP de 0 a 3m.....	76
Figura 31. Gráfica del riesgo de hinchamiento respecto al ensayo realizado 0 a 3m	76
Figura 32. Mapa geológico-geotécnico profundidad 3-6m.....	78
Figura 33. Mapa geológico-geotécnico profundidad 3-6m.....	78
Figura 34. Gráfica de barras respecto a la clasificación SUCS de 3 a 6m.....	79
Figura 35. Gráfica de expansión respecto al IP de 3 a 6m.....	79
Figura 36. Gráfica del riesgo de hinchamiento respecto al ensayo realizado 3 a 6m	79
Figura 37. Mapa geológico-geotécnico profundidad 6-9m.....	81
Figura 38. Mapa geológico-geotécnico profundidad 6-9m.....	81
Figura 39. Gráfica de barras respecto a la clasificación SUCS de 6 a 9m.....	82
Figura 40. Gráfica de expansión respecto al IP de 6 a 9m.....	82

Figura 41. Mapa geológico-geotécnico profundidad 9-12m.....	84
Figura 42. Gráfica de barras respecto a la clasificación SUCS de 9 a 12m.....	84
Figura 43. Mapa geológico-geotécnico profundidad 12-15m.....	86
Figura 44. Gráfica de barras respecto a la clasificación SUCS de 12 a 15m.....	86
Figura 45. Mapa geológico-geotécnico profundidad mayor a 15m.....	88
Figura 46. Gráfica de barras respecto a la clasificación SUCS mayor a 15m	88
Figura 47. Modelo tridimensional geológico-geotécnico en un área definida entre las parroquias Cuenca-Nulti	91
Figura 48. Cortes en el Modelo tridimensional Geológico-Geotécnico	93

INTRODUCCIÓN

El enfoque de este proyecto se dirige a un propósito específico: hacer uso de los datos compilados junto con la tecnología SIG para concebir un modelo tridimensional (3D) del subsuelo en el área delimitada entre las parroquias Cuenca y Nulti. En este proceso de modelado, se incorporarán los datos geológico-geotécnicos que ya han sido obtenidos a través de previos estudios. Es fundamental tener en cuenta que esta zona se encuentra catalogada como una zona de amenaza media debido a la inestabilidad del terreno, por esta razón el modelo tridimensional es una herramienta de gran utilidad para visualizar de manera clara y accesible para identificar aquellos puntos que puedan presentar condiciones geotécnicas adversas, representando un riesgo para futuras construcciones.

A través de esta iniciativa, el propósito es resaltar la importancia de la disponibilidad de información geotécnica y geológica para un terreno en particular, ya que la representación en un modelo tridimensional busca demostrar este valor, demostrando que, a medida que se acumule más información, la precisión del modelo aumentará de manera significativa. Esto en un futuro permitirá representar de manera más realista la estructura del suelo, generando simulaciones que se asemejen cada vez más a la realidad.

En este contexto, la información resultante es sumamente beneficiosa y práctica para identificar riesgos geotécnicos de manera temprana, aportando a la planificación del desarrollo territorial, aplicar estrategias de mitigación durante el diseño y la construcción de infraestructuras, además, prevenir posibles pérdidas humanas, daños estructurales, y pérdidas económicas significativas.

ANTECEDENTES

Conforme a la actualización del PDYOT (Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial) del cantón Cuenca para el período 2019-2023, y en base al análisis de la información, se observa que históricamente los eventos adversos están relacionados con amenazas de movimientos de tierra. En particular, se consideran como una amenaza los desprendimientos o caídas de rocas., estos tipos de movimientos se originan cuando un talud con una pronunciada inclinación se desprende, ya sea cayendo libremente, rodando o dando saltos. En las zonas de Nulti Centro y Loma de Capilla, se identifican áreas propensas a movimientos de tierra específicamente por deslizamientos o caída de rocas. El análisis de amenazas revela que en Nulti Centro, de un total de 55.42 hectáreas, 43.86 hectáreas presentan susceptibilidad a movimientos de tierra, lo que representa un 79.15% del territorio afectado por deslizamientos en esta área. Estos deslizamientos afectan infraestructuras como viviendas y vías. El PDYOT determina que la exposición a la amenaza de deslizamientos en Nulti Centro se categoriza como "Media" basada en criterios geográficos y geológicos. Estos criterios incluyen la ubicación de la zona en un área con eventos asociados a la tectónica regional, la presencia de geología caracterizada por rocas poco consolidadas y altamente fracturadas, procesos erosivos de alta intensidad (tanto eólicos como hídricos), y un grado significativo de meteorización. Además, el terreno presenta un relieve fuertemente disectado o fragmentado, con pendientes pronunciadas en la mayor parte del territorio que varían entre 40-70%. También un estudio geotécnico y actualización del mapa de amenaza por fenómenos de inestabilidad de terrenos de en una un área aproximada de 221.62 hectáreas en Nulti en el 2018 determina que es una zona urbanizable con restricciones, viviendas unifamiliares aisladas y 2 pisos máximo.

Por ello, y de acuerdo a lo mencionado se resuelve que esta zona es riesgosa para la construcción, por lo que, la bibliografía del Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias recomienda los siguientes estudios a profundidad; geofísica, radargrametría,

geotecnia, para determinar la situación de la estructura interna del suelo, utilización de software especializado para determinar la deformación de las superficies de terreno y sus causas (acción hídrica y tectonismo), a través del uso de información primaria y secundaria (GAD NULTI, 2019).

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

A nivel mundial algunas estructuras civiles son propensas a sufrir daños críticos o leves, debido a irregularidades en el diseño, cálculos y consideraciones erróneas, fenómenos naturales, desconocimientos de las condiciones del terreno, incumplimiento de normativas etc., esto implica que las edificaciones o cualquier tipo de infraestructura civil esté vulnerable frente a cualquier tipo de exposición. La construcción y la estabilidad de una edificación depende en gran parte conocer sobre el tipo de suelo en el que se va a construir, para ello, se debe estudiar y entender la parte geológica-geotécnica y sísmica de un suelo, ya que a partir de esto se puede generar soluciones para evitar futuros daños e inconvenientes.

Por otro lado, la evolución de la tecnología digital ayuda a procesar de manera más rápida y eficiente los datos geográficos, también, permite analizar, manipular, crear, almacenar y desplegar información de cualquier forma de manera lógica y coordinada para obtener los resultados e información deseada. Sin embargo, la búsqueda y recolección de estos datos suele ser interrumpida por la accesibilidad, ya que muchas de las veces los sitios no son abiertos al público, lo que implica no tener la suficiente información para generar la investigación requerida. Además, la información suele estar representada en mapas temáticos en 2D, lo que reduce a tener solo una interpretación en planta.

Por ello, es de interés establecer una metodología dentro del trabajo que permita generar Mapas 3D del subsuelo a partir de integrar información de ensayos geotécnicos, SPT, perforaciones, y calicatas, elaborando así modelo tridimensional del subsuelo de manera correcta a partir de

correlacionar información de una zona, con el fin de obtener una visualización detallada del subsuelo para futuros análisis del comportamiento hidrológico o sísmico, contribuyendo a la toma de decisiones informadas en el ámbito geotécnico y de ingeniería civil para la planificación de infraestructuras y proyectos de construcción seguros y exitosos a largo plazo.

DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

Este estudio se enfoca en la utilización e integración de toda la información geográfica que permita elaborar un modelo 3D geológico-geotécnico de una área definida entre las parroquias de Cuenca y Nulti de aproximadamente 182.05 ha, la información y datos que se usará es del proyecto de vinculación de “Microzonificación Sísmica del cantón Cuenca”, datos que ya se encuentran en el Geo-portal de la Universidad Católica de Cuenca, además, también se hará uso de información geográfica existente en portales públicos y de esta forma correlacionar toda la información útil para generar el modelo 3D.

Para esto se usará softwares que permitan importar, exportar, integrar y combinar la información geológica-geotécnica existente de la zona de estudio para generar el modelo 3D, también se realizará mapas que aporten con otro tipo de información detallada y así entender las características geológicas-geotécnicas del subsuelo para una mejor identificación de los sitios seguros y habitables.

JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En el área de estudio existe un registro de problemas geológicos, su principal amenaza son los deslizamientos y de acuerdo a estudios realizados en la zona se ha determinado que este sector se ve afectado por deslizamientos en los últimos 20 años, los mismos que han sido causantes de: destrucción de viviendas, daños a la red de energía eléctrica, paralización de la red vial, daños a sistemas de alcantarillado y agua potable, estos problemas continuarán si no se toman

medidas preventivas, por lo que, expertos han realizado a lo largo de los años estudios y ensayos que han permitido conocer cuáles son las características geológicas y geotécnicas que permiten entender el comportamiento del suelo, a la vez dar soluciones óptimas para la zona.

Los datos de todas las investigaciones realizadas en el suelo se encuentran recopilados en el Geo-Portal del laboratorio DATACHADEMICS del Centro de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología (CIITT) de la Universidad Católica de Cuenca, los mismos que serán útiles para generar el modelo 3D geológico-geotécnico.

En base a lo expuesto, el desarrollo de este proyecto es evaluar e integrar información geológica-geotécnica del subsuelo y de esta forma lograr procesarla para analizar y estimar los problemas a los que está expuesto el terreno, integrando conceptos y metodologías que permitan comprender e identificar las características del mismo, y así, contribuir con información preliminar que sea punto de partida para una perspectiva más clara al momento de toma de decisiones en el ordenamiento territorial, diseño y mitigación de riesgos, identificando los lugares seguros y habitables para las personas.

Además de esto, el modelo servirá como aporte en el Geo-portal geográfico de la Universidad Católica de Cuenca, donde se podrá visualizar tridimensionalmente el área de estudio.

OBJETIVOS

GENERAL

Generar un modelo 3D del subsuelo combinando información recopilada de estudios geológicos-geotécnicos, geofísicos, que proporcionan datos de las propiedades mecánicas del subsuelo del área definida entre las parroquias Cuenca y Nulti, información que permitirá identificar zonas peligrosas para la construcción.

ESPECIFICOS

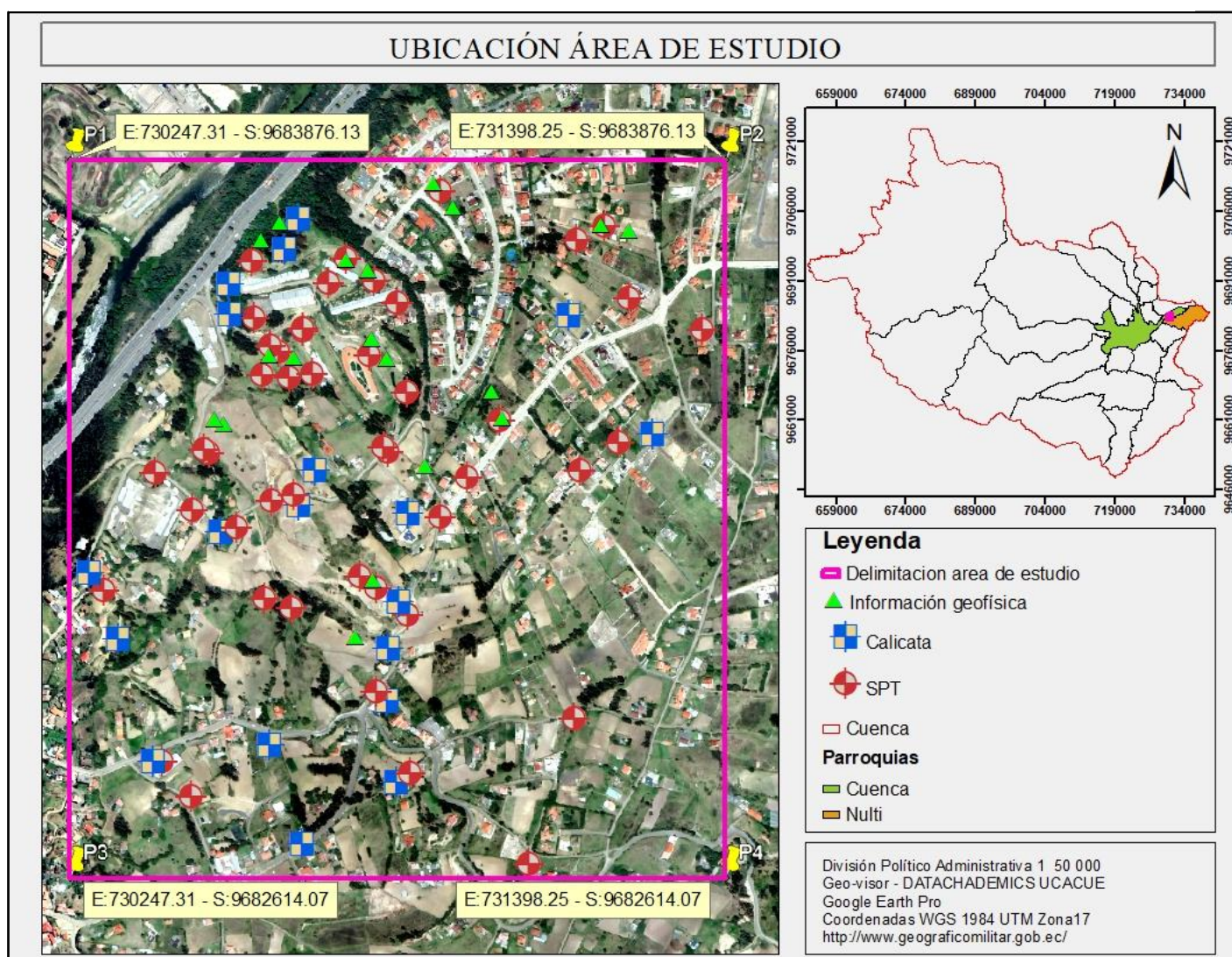
- Procesar los datos recopilados de los estudios geológicos-geotécnicos del suelo para obtener información precisa sobre las propiedades mecánicas del subsuelo.
- Elaborar un modelo tridimensional y mapas integrando la información geológica-geotécnica, que permita visualizar las características y propiedades del terreno.
- Identificar las zonas críticas en el subsuelo que puedan representar un riesgo para la construcción de infraestructuras y analizar el impacto en función de las características del suelo para recomendar medidas en la planificación de proyectos futuros.

CAPITULO I. ZONA DE ESTUDIO

1.1 Ubicación

El área de estudio de este trabajo de titulación se encuentra en las parroquias de Cuenca y Nulti, siendo Nulti una parroquia situada al noroeste de la ciudad de Cuenca. La elección de esta área, que abarca un total de 182.04 hectáreas es parte de la zona noroeste de cuenca y parte de la comunidad Nulti Centro, se seleccionó esta área con base a la disponibilidad de una amplia cantidad de datos para desarrollar el modelo 3D geológico-geotécnico propuesto. Los datos utilizados en este estudio se obtuvieron a partir de 46 ensayos SPT (Standard Penetration Test), 19 calicatas y 19 ensayos geofísicos. Estos datos fueron recopilados y seleccionados del Geoportal de información geográfica del laboratorio DATACHADEMICS de la Universidad Católica de Cuenca.

Figura 1. Ubicación del área de estudio

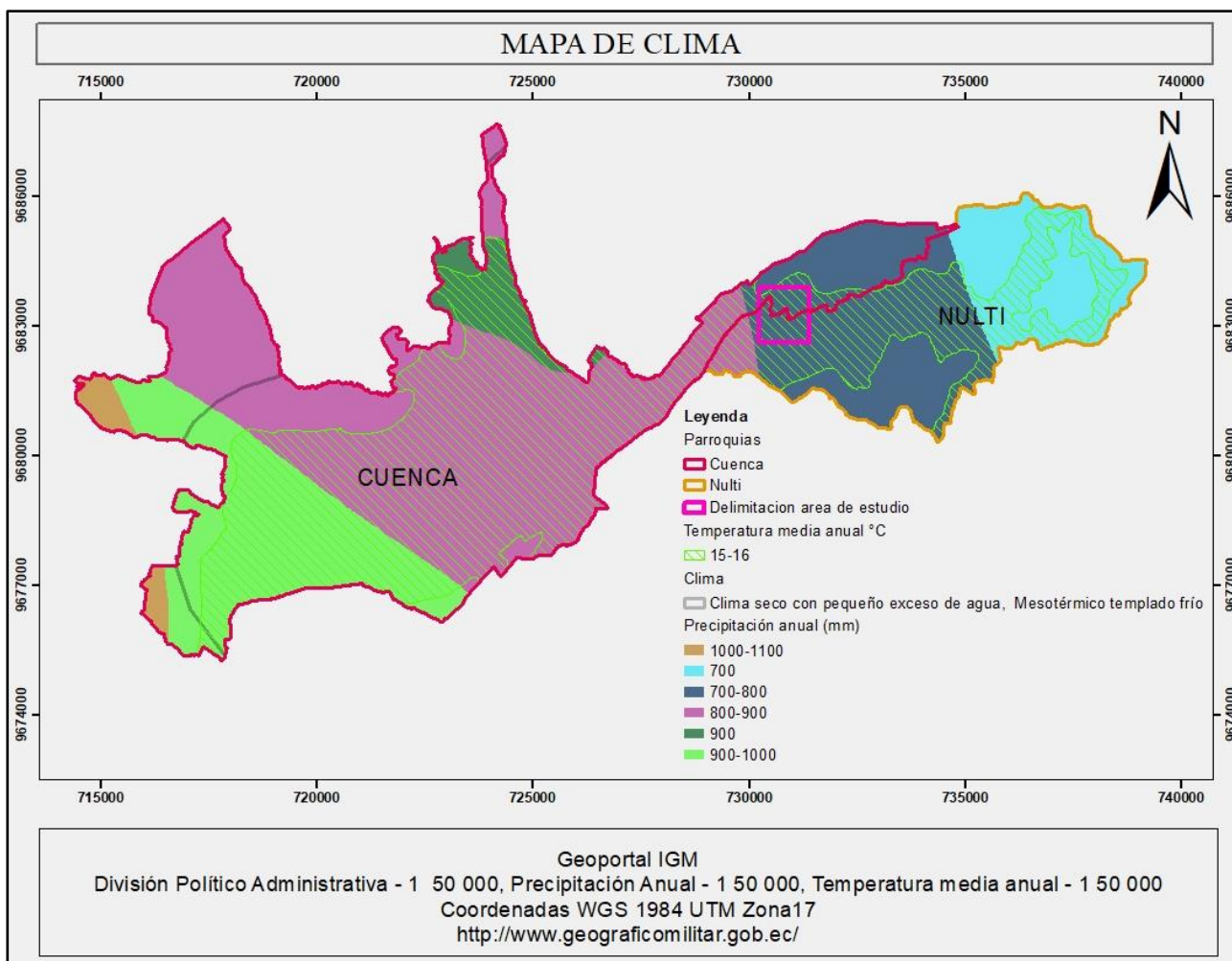


Nota. Fuente: Elaboración propia

1.2 Clima

El área de estudio presenta un clima seco con pequeño exceso de agua-mesotérmico templado frío, caracterizado por una temperatura media anual de 15-16 °C. Además, se registra una precipitación anual de 700-800 mm, lo que indica que la zona si presenta una cantidad significativa de lluvias a lo largo del año, específicamente en los meses de octubre a mayo.

Figura 3. Mapa del clima del área de estudio



Nota. Fuente: Elaboración propia

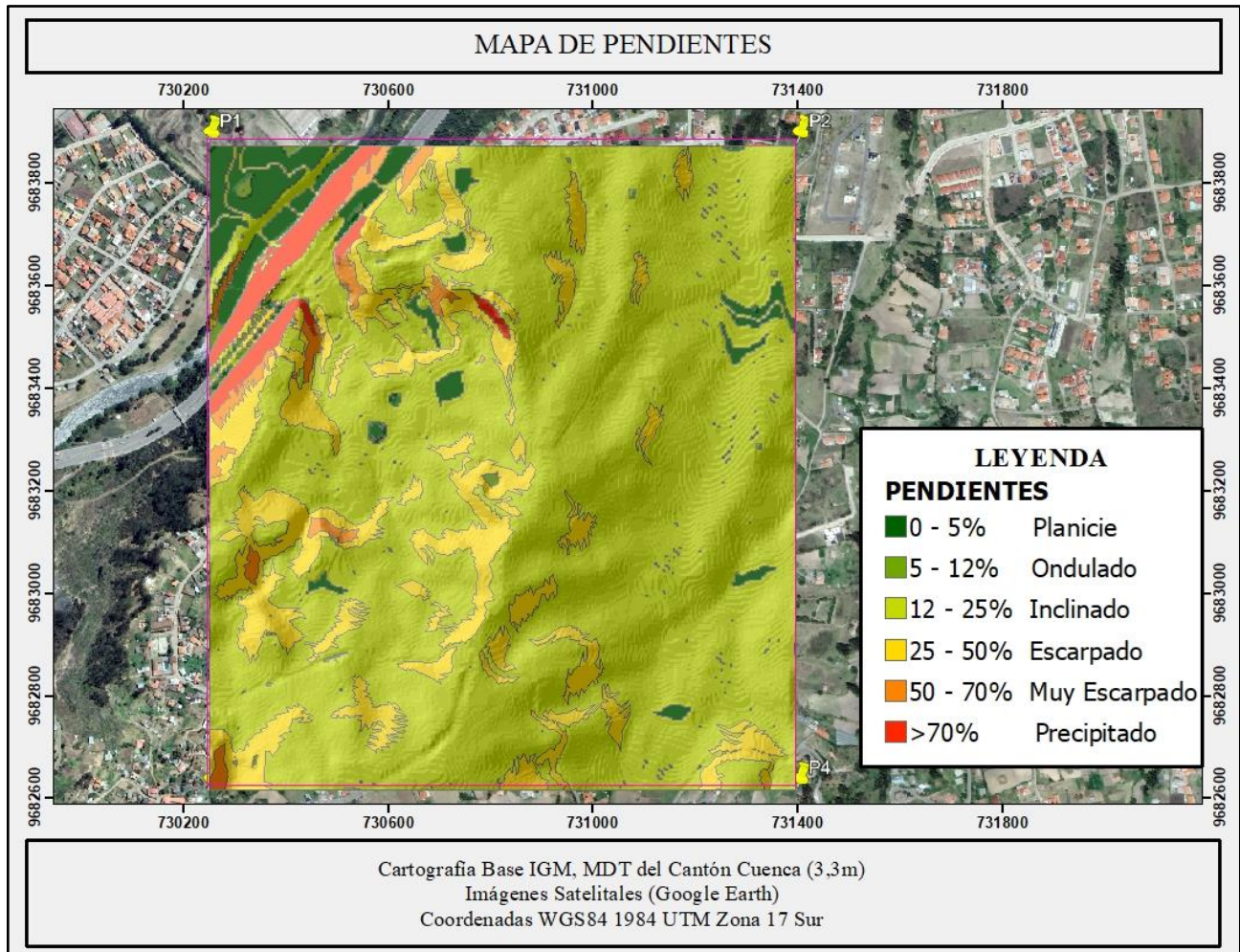
1.3 Relieve

1.3.1 Pendientes

El mapa de pendientes del sitio de estudio muestra que; las pendientes entre (12-25%) Incluidas, son las que abarcan la mayor parte de la superficie, representando un 81.28% del área total, seguido de (25-50%) terreno muy escarpado, el mismo que ocupa el 11.65% de la extensión total, luego se ubican las pendientes (0-5%) terreno denominado como planicie, este representa un 3.50% del área, luego sigue las pendientes más fuertes (>70%) terreno precipitado, este ocupa un porcentaje significativo del 1.81% del área total, finalmente las pendientes (5-12%) ondulado y (25-50%) escarpado, ocupan el 0.40% y 1.35% siendo el

menor porcentaje del área total. En resumen, el terreno de estudio tiene una topografía accidentada.

Figura 4. Mapa de pendientes el área de estudio



Nota. Fuente: Elaboración propia

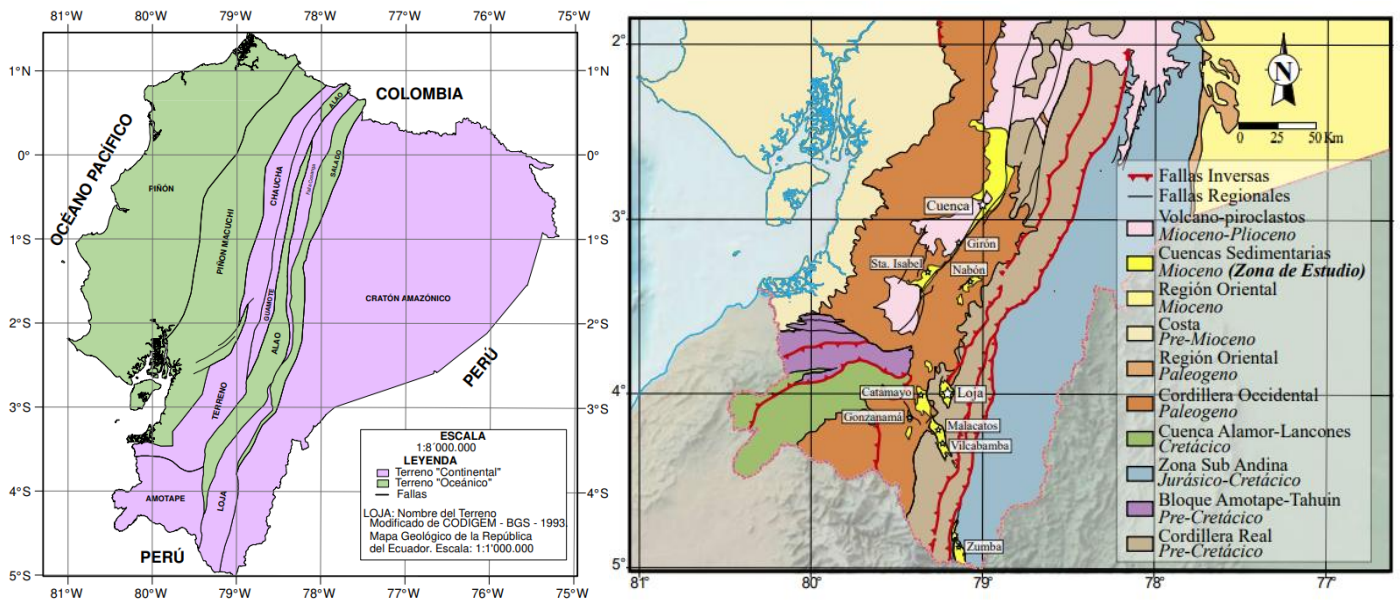
1.4 Geología

1.4.1 Geología regional

La geología en la región sur de Ecuador se forma por secuencias sedimentarias significativas entre los 1000 y 2500 metros sobre el nivel del mar, que van desde 500 a 1500 metros de grosor. Existen diversas teorías de su origen, como la depresión creada a través de los esfuerzos compresivos o tectónica strike-slip. Sin embargo, nuevos estudios sugieren que algunas de las cuencas tienen un origen marino-continental. Estudios litoestratigráficos y sedimentológicos recientes han proporcionado pruebas adicionales de las incursiones marinas en diversas

cuenclas, incluyendo Catamayo-Gonzanamá, Malacatos-Vilcabamba y Cuenca (Solís et al., 2022).

Figura 5. Mapa geológico del sur del Ecuador.



Nota. Fuente: Égüez y otros, 2017.

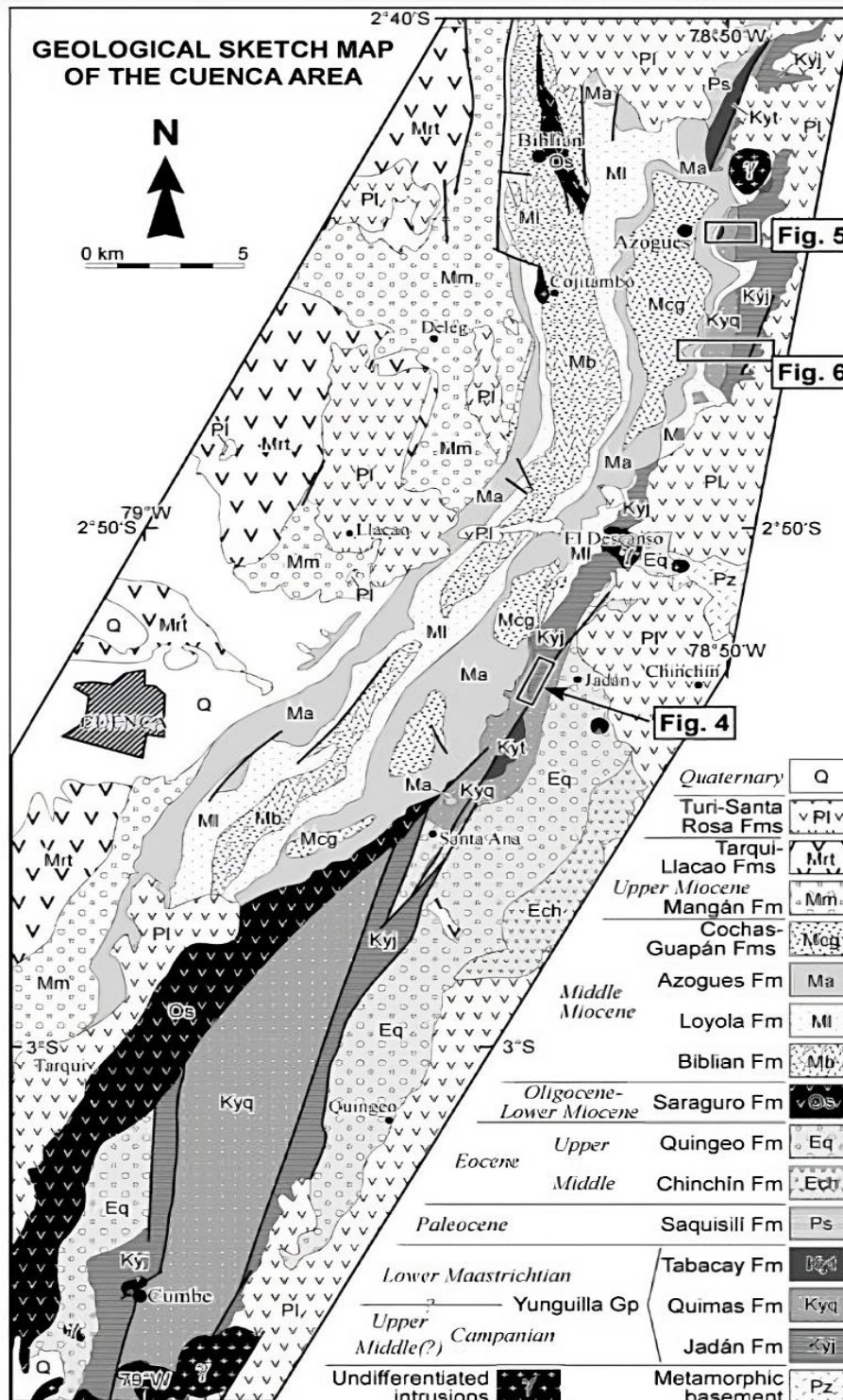
El área de estudio se ubica en al sur del Valle Interandino, el mapa está dividido en varias cuencas las mismas que corresponde a rocas sedimentarias y volcanoclásticas. La cuenca de Cuenca, ubicada en la zona sur, tiene un relleno de edad Mioceno-Pliocénica (periodo terciario), además también es parte de las formaciones Alao y Yunguilla, según Hungerbühlerr y otros, 2002 menciona que la formación Alao está hace unos 23.8 millones de años provenientes de un arco volcánico pero depositados en un ambiente submarino y Yunguilla hace 66 millones de años con entornos croáticos.

Hungerbühlerr y otros, 2002 también menciona que, durante el Mioceno Medio debido a la subsidencia extensional en la región interandina, se generó la presencia de mareas poco profundas en Cuenca, y durante ese periodo se acumuló sedimentos fluviales, deltaicos, lacustres y volcánicos, constituyendo las formaciones Biblián, Azogues, Loyola, y Mangán.

1.4.2 Geología local

El mapa de (Steinmann M. & Hungerbühler D., 1996) presenta la estratigrafía de la cuenca de Cuenca, donde clasifica las formaciones y depósitos por edad geológica. Esta imagen también permite identificar con más detalle la geología local.

Figura 6. "Estratigrafía de las formaciones de Cuenca"

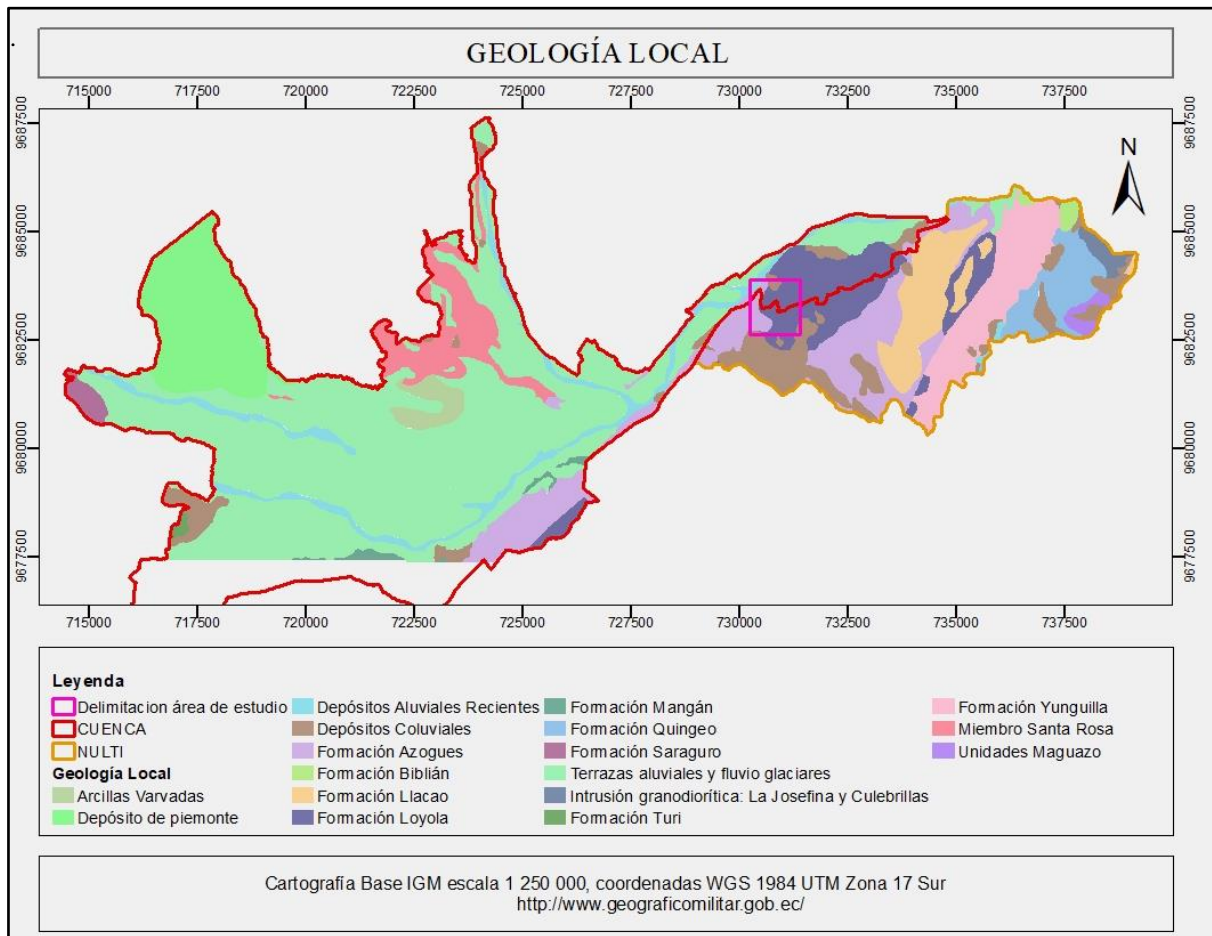


Nota. Fuente Tomado de Steinmann M. & Hungerbühler D., 1996

1.4.3 Geología área de estudio

Con la cartografía geológica actual del Ecuador se puede comprobar que sí existe relación con el mapa de Steinmann M. & Hungerbühler D., 1996, definiendo de esta forma que el área de interés corresponde a; las formaciones Loyola y Azogues, y está cerca de depósitos aluviales y coluviales.

Figura 8. Mapa de la geología local donde se ubica el área de estudio.



Nota. Fuente: Elaboración propia

1.4.4 Depósitos Aluviales

El término depósito fluvial o aluvial se refiere a sedimentos depositados en un sistema de corrientes de agua continentales en cualquier lugar desde la zona de origen hasta la salida a una cuenca, que generalmente es marina, pero a veces lacustre. Los elementos que los conforman comprenden arcillas, arenas, gránulos, guijarros, cantos y bloques de formas muy variables desde angulosas a redondeadas. Los componentes que los constituyen incluyen diversos tipos de suelos,

como arenas, arcillas, gránulos, guijarros y bloques, que varían en forma desde angulosa hasta redondeada. Estos materiales ocupan lechos de ríos, planicies y antiguos cauces en forma de abanicos (Ayala, 2018).

Estos depósitos aluviales también se registran por el área de estudio, esto influenciado por la dinámica y la forma del curso fluvial en la región, este depósito tiene una litología formada de arenas, limos, arcillas y conglomerados.

1.4.5 Depósitos Coluviales

Son producto de la alteración y desprendimiento *in situ* de los macizos rocosos a lo largo de las laderas. Por lo general, están conformados por masas inestables de gravas (guijarros, cantos y bloques) angulosas transportadas por gravedad y agua bajo la forma de derrubios. Tienen matriz limo arcillosa y su espesor no suele superar los 5m de espesor. Además, su resistencia es baja, sobre todo en la zona de contacto con el sustrato rocoso que es donde se desarrollan altas presiones como resultado del ingreso de agua intersticial.

De este modo, estos depósitos se presentan en regiones húmedas y/o áridas (Ayala, 2018).

Estos depósitos también se registran cerca del área de estudio, y según la cartografía base, se trata de depósitos que se localizan en laderas y en la base de taludes. Estos materiales han experimentado un transporte limitado y presentan una composición heterogénea según la zona.

Están formados por una combinación variada de bloques y fragmentos angulares y subangulares, que se encuentran en una matriz de limo arcilloso con microfragmentos.

1.4.6 Formación Azogues (Ma)

Autor: Bristow & Hoffstetter (1977) refiere que fue nombrada por Schneider-Scherbina (1969) y posteriormente revisada por Bristow (1973), pero Steinmann (1997) redefine esta formación en tres miembros: Azogues, Guapán y Cochás.

Litología: Constituida por areniscas masivas de color gris y grano grueso, limolitas y lutitas limosas con tendencia regional de S a NO. Hacia el NO, en la facies distal, existen areniscas cafés, limolitas y lutitas; las areniscas tienen características turbiditas (Noblet y otros, 1988).

Por otro lado, el PDYOT de Nulti, define la litología de la siguiente manera, areniscas tobáceas de grano medio a grueso; niveles de conglomerados y capas poco potentes de arcillas, limos y lutitas.

Ambiente de depositación: Sistema fluvial y aluvial que se transformó a un sistema dominado por un delta fluvial hacia el NW.

Espesor: Tiene entre 400 y 500 m.

Edad: Steinmann (1997) determinó mediante dataciones radiométricas ZFT las edades de la formación Azogues está entre $13,0 \pm 1,0$ y $11,9 \pm 1,2$ Ma.

Susceptibilidad a terrenos inestables: Moderada a baja, en fuertes pendientes. Son propicios a desprendimientos y caídas de bloques, deslizamientos relacionados a la mayor fracturación del macizo en general rotura de lutitas saturadas (Precupa, 1998).

1.4.7 Formación Loyola (MI)

Autor: Según lo mencionado por Bristow & Hoffstetter (1977), el nombre de la formación fue sugerido por Schneider-Scherbina (1965), quien publicó por primera vez sobre la formación

Sigal en 1968 y se incluyó en el Grupo Azogues. Sin embargo, Steinmann (1997) llevó a cabo una redefinición de la formación.

Litología: Se tienen lutitas ricas en sulfuros y se tienen intercalaciones de arenisca fina (al norte) y gruesa (al sur). Gonzaga (2018) se reporta al este de la cuenca areniscas, microconglomerados y conglomerados polimícticos con cemento calcáreo (Solís et al., 2022).

Por otro lado, el PDYOT de Nulti, define la litología de la siguiente manera, Lutitas laminadas claras, con yeso; localmente, areniscas y conglomerados basales con niveles de arcillas y limolitas.

Ambiente de deposición: Se tienen facies de abanicos marinos y salobres, así como las facies fluviales lacustres y distales, que se encontraban depositadas en ambientes de baja energía. Se cree que este entorno se situaba en una zona marina, aunque es difícil estimar la profundidad del agua, se sabe que era más profundo que el tren de oleaje. Además, según Verdezoto (2006), las limolitas fosilíferas indican que el ambiente de depósito se encontraría en una zona continental-lacustre, basado en el análisis $87\text{Sr}/86\text{Sr}$.

Espesor: El espesor es estimado es 450 m (Verdezoto, 2006).

Edad: Steinmann (1997), a través de ZFT, determina una edad entre $13,9 \pm 1,4$ Ma y $11,1 \pm 1,0$ Ma; esta edad es consistente con los estudios realizados en micro y microfósiles. (Solís et al., 2022)

Comportamiento Geotécnico: Aunque la capa de arenosa no es muy característica, la facie más fina presenta características notables, esta capa muestra evidencia de una alteración residual que se extiende hasta un espesor de 3 metros, con una tendencia a expandirse en condiciones de saturación (media-alta) y sus propiedades mecánicas son relativamente bajas, y

en términos de resistencia al corte, los materiales tienden a colapsar cuando están completamente saturados (Precupa, 1998).

Figura 9. Valores estimados a partir de características físicas de la formación Loyola.

CLASIFIC. SUCS	PARAMETROS FISICO-MECANICOS						CLASIFIC. Bieniawski
	K (m/s)	γ (KN/m ³)	C' (MN/m ²)	ϕ' (°)	C _u (MN/m ²)	ϕ_u (°)	
ML-CL-CH	10 ⁻⁸ -10 ⁻¹⁰	18 - 21	0.01 - 0.03	20 - 25	0.02 - 0.04	7 - 15	
SM	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁶	*19 - 21	0.05 - 0.1	30 *	-	-	IV

Nota. Fuente: (Precupa, 1998)

Susceptibilidad del terreno inestable: Moderada a alta, esta formación propicia en condiciones no drenadas deslizamientos rotacionales profundos en bajas y medias pendientes, esta formación presenta el mayor número de deslizamientos, no apta para construcción (Precupa, 1998).

1.5 Tectónica Regional y Sísmica

1.5.1 Descripción Tectónica

Ecuador se ubica en una zona con actividad tectónica particular, ya que una porción de su territorio forma parte de la microplaca llamada "Bloque Norandino", que es parte de la placa sudamericana. Esta microplaca interactúa con las placas de Nazca, Cocos y Caribe, lo que genera un movimiento sísmico de aproximadamente 50-60 mm cada año, por otro lado, el movimiento de la placa continental es de 2 a 6 mm/año. Además, en la parte sur del Ecuador se encuentra en la intersección de la placa Sudamericana y Nazca, lo que ha generado tres inclinaciones diferentes de la subducción de la placa de Nazca en la placa Continental (Quinde & Reinoso, 2016).

son superficiales. Cada una de estas fuentes de actividades sísmicas libera y acumula energía de manera independiente. Los sismos interplaca ocurren a profundidades menores de 40 km, debido al roce entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana, en la zona donde convergen. Por otro lado, los sismos intraplaca ocurren a profundidades de 40-300 km, pero en este caso, son de falla normal de profundidad intermedia que se localizan en la placa oceánica de Nazca que subduce bajo la placa continental Sudamericana. Finalmente, los sismos corticales son someros con profundidades menores a 40km y se producen dentro de la placa Sudamericana (Quinde & Reinoso, 2016).

1.5.3 Sistema sísmico del área de estudio

El sitio se encuentra en un sistema “Dextral y de Subducción”, es una zona con sismos moderados a altos y se ubica en la falla Girón. Esto significa que las placas tectónicas activas se desplazan horizontalmente en una dirección este-oeste. Además, la ciudad se encuentra en una zona de subducción, lo que indica que una placa tectónica se desliza bajo otra, lo que puede provocar la liberación de energía sísmica y ocasionar sismos de alta intensidad.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Geotecnia

El estudio de Ingeniería Geotécnica en la carrera de Ingeniería Civil se enfoca en investigar las propiedades hidráulicas, mecánicas e ingenieriles de los materiales provenientes de la tierra. Los Ingenieros Geotécnicos realizan un minucioso análisis de los suelos y rocas subterráneas para determinar sus características y diseñar cimentaciones adecuadas para diversas estructuras, como puentes, vías, edificios, centrales hidroeléctricas, túneles, entre otros.

Para este fin, es fundamental comprender los conceptos fundamentales de la geología además de los principios básicos de la hidráulica y mecánica. Es importante tener conocimiento sobre las condiciones bajo las que ciertos materiales se crearon o depositaron.

2.1.1 Suelos

El suelo es la capa superior de la superficie terrestre compuesta por materiales como rocas, arena, arcilla y materia orgánica. La ingeniería civil utiliza el suelo como base para la mayoría de las estructuras, desde cimientos de edificios hasta carreteras y puentes. Es importante conocer las propiedades del suelo, como su origen capacidad de carga, distribución granulométrica, permeabilidad, comprensibilidad, resistencia a corte con el fin de diseñar y construir estructuras seguras y duraderas.

2.1.2 Tipos de suelos por su origen

“1. Residuales: permanecen donde se forman y cubren la superficie rocosa de la que se derivan.

2. Transportados:

- Aluviales o fluviales: depositados por agua en movimiento.

- Coluviales: depositados por el movimiento que tiene el suelo, es decir se mueve de su lugar original por la acción de gravedad, por ejemplo, los deslizamientos.

- Glaciales: depositados por acción glacial.

- Eólicos: depositados por la acción del viento.

3. Turbas: descomposición de materia orgánica encontrados en área d poca altura donde el nivel freático está cerca o arriba de la superficie del terreno. La presencia de un nivel alto del agua freática ayuda o soporta el crecimiento de plantas acuáticas, que, al descomponerse, forman la turba. Este tipo de suelo se encuentra en áreas costeras.

4. Orgánico: mezcla de turba en grandes cantidades y suelo inorgánico. Tienen como característica un contenido natural de agua entre 200% y 300% y son altamente compresibles bajo carga, se obtiene gran asentamiento, 60 debido a la consolidación secundaria de los suelos orgánicos.

5. De acuerdo al tipo de partículas:

- Grava: fragmento de rocas ocasionalmente con partículas de cuarzo, feldespato y otros minerales.
- Arena: partículas formadas principalmente de cuarzo, feldespato y otros granos minerales.
- Limos: fracciones microscópicas de suelo que consisten en gravas muy finas de cuarzo y algunas partículas en forma de escamas (hojuelos) que son fragmentos de minerales icáceos.
- Arcillas: partículas submicroscópicas de forma de escama de mica, minerales arcillosos y otros minerales.” (Macías Loor et al., 2018)

2.1.3 Exploración de suelos

Se realizan exploraciones de suelos para recopilar datos acerca de las características, la composición y estructura del mismo. Los sondeos se llevan a cabo a diferentes profundidades y ubicaciones, además, existen normativa que regula el número de sondeos y profundidad de estos de acuerdo al tipo de categoría (importancia de la obra). Además, el factor económico también juega un papel determinante y limitante en el estudio del terreno.

Las exploraciones realizadas abarcan estudios efectuados en los años 2017, 2018 y 2019, que incluyen la realización de calicatas, ensayos de penetración estándar (SPT) y estudios de refracción sísmica. Toda esta información se ha recopilado y consolidado en el Geo-visor del Laboratorio de Dathachademics, lo que ha posibilitado su utilización en la ejecución del proyecto.

Importancia de la exploración de suelos en la construcción de obras civiles

La información de los sondeos es importante porque ayuda al ingeniero geotécnico a:

- Seleccionar el tipo y la profundidad de la cimentación adecuada para una estructura dada.
- Evaluar la capacidad de soporte de carga de la cimentación.
- Estimar el asentamiento probable de una estructura.
- Determinar los problemas potenciales de la cimentación (por ejemplo, suelo expansivo, suelo colapsable, relleno sanitario, etcétera).
- Determinar la ubicación del nivel freático.
- Predecir la presión lateral de tierra en estructuras como muros de retención, muros de tabla estacas y cortes apuntalados.
- Establecer los métodos de construcción para cambiar las condiciones del subsuelo. La exploración subsuperficial también puede ser necesaria cuando se contemplan adiciones y alteraciones a estructuras existentes.” (Das, 2011)

Tabla 1. Sondeos recomendados, Clasificación de las unidades de construcción NEC SE CM (Geotecnia y Cimentaciones).

Clasificación	Según los niveles de construcción	Según las cargas máximas de servicio en columnas (kN)
Baja	Hasta 3 niveles	Menores de 800
Media	Entre 4 y 10 niveles	Entre 801 y 4000
Alta	Entre 11 y 20 niveles	Entre 4001 y 8000
Especial	Mayor de 20 niveles	Mayores de 8000

Nota. Fuente: (NEC, 2015)

Tabla 2. Número mínimo de sondeos y profundidad por cada unidad de construcción

CATEGORÍA DE LA UNIDAD DE CONSTRUCCIÓN			
Baja	Media	Alta	Especial
Profundidad Mínima de sondeos: 6 m.	Profundidad Mínima de sondeos: 15 m.	Profundidad Mínima de sondeos: 25 m.	Profundidad Mínima de sondeos: 30 m.

Número mínimo de sondeos: 3	Número mínimo de sondeos: 4	Número mínimo de sondeos: 4	Número mínimo de sondeos: 5
-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------

Nota. Fuente: (NEC, 2015)

2.1.4 Tipos de sondeos

SPT

Para llevar a cabo este experimento se necesita un trípode, motor, polea, martillo, cuerda, cañas guía y una partida. El objetivo es determinar la cantidad de golpes (N) necesarios para que una barra vertical, llamada caña, se hunda un pie (30 cm) en la tierra mediante un golpe de martillo de 140 libras (63.5kg) levantado y soltado desde una altura de 76 cm (30"). El número de golpes obtenido permitirá calcular la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, el coeficiente de balasto, el coeficiente de variación volumétrica y la capacidad de carga del suelo. Todo esto se realiza en el mismo lugar sin necesidad de mover ninguno de los elementos utilizados.

La profundidad máxima a la que se puede realizar el ensayo depende principalmente de la longitud de la varilla que se utiliza y de las condiciones del subsuelo. (Rodríguez S, 2020).

Este ensayo está estandarizado por las normas SPT UNE-EN ISO 22476-3:2006 O ASTM D1586.

Información de los SPT: Coordenadas UTM, profundidad del ensayo, clasificación por SUCS, nivel freático, número de golpes, factor de corrección, número de golpes corregidos, % del tamiz 200, límites de Atterberg, % de humedad, AASHTO y corte directo.

Nota: Los datos de interés para el modelo 3D son, coordenadas UTM, profundidad del ensayo, tipo de suelo por SUCS, los límites de Atterberg y nivel freático.

CALITAS

Una exploración calicata es una técnica de muestreo del suelo que se utiliza para identificar las características del terreno y recolectar muestras de suelo para su análisis. Este método consiste en excavar un agujero en el suelo con el objetivo de analizar las diferentes características del suelo a diferentes profundidades. La profundidad de las calicatas dependerá del propósito de la exploración y el tipo de suelo que se observe durante el proceso.

Es el mejor método para observar a gran detalle las estratificaciones de suelo. Además de excavaciones manuales a cielo abierto, se pueden tomar muestras inalteradas de bloque de gran calidad, realizando su extracción de acuerdo al procedimiento indicado en la Figura 4. La muestra debe ser sellada con parafina para conservar su humedad natural. Se debe ser cuidadoso para evitar el colapso de la excavación y no se debe realizar una excavación sin soporte (o abatimiento de los taludes) de más de 1.2 metros (NEC, 2015).

Información de las calicatas: Coordenadas UTM, profundidad del ensayo, clasificación por SUCS, AASHTO, nivel freático, % pasa tamiz #200, límites de Atterberg, peso específico, corte directo y ángulo de fricción.

Nota: Los datos de interés para el modelo 3D son, coordenadas UTM, profundidad del ensayo, tipo de suelo por SUCS, clasificación por NEC.

SONDEOS POR REFRACCIÓN SÍSMICA

La exploración geofísica es una buena opción cuando se necesita realizar una evaluación veloz de las propiedades del subsuelo. Además, gracias a estas técnicas es posible cubrir grandes extensiones de terreno a un menor costo que con la exploración convencional que implica perforaciones. A pesar de esto, es importante tener en cuenta que en ocasiones la interpretación de los resultados obtenidos puede resultar complicada. Por lo tanto, es recomendable utilizar estas técnicas de manera preliminar antes de tomar decisiones definitivas.

El sondeo por refracción sísmica es un método indirecto y es útil para obtener información preliminar acerca del espesor de los estratos de varios suelos y de la profundidad de la roca o suelo duro en un emplazamiento. Los sondeos por refracción se realizan mediante impactos sobre la superficie del terreno, y observando la primera llegada de las perturbaciones (ondas de esfuerzo) a varios otros puntos (por ejemplo, B, C, D, . . .), que se registran por geófonos. El impacto sobre la superficie del terreno crea dos tipos de ondas de esfuerzo: ondas P (u ondas de compresión planas) y ondas S (u ondas de cortante). Las ondas P viajan más rápido que las ondas S; de aquí que la primera llegada de las ondas perturbadoras estará relacionada con las velocidades de las ondas P en varios estratos (Das, 2011).

Esta técnica geofísica tiene la capacidad de detectar capas de suelo más suaves que se encuentran debajo de suelos más duros, esta es una ventaja importante que ofrecen.

Información del ensayo: Coordenadas UTM, profundidad de ondas P y S, clasificación SUCS, y NEC.

Nota: Los datos de interés para el modelo son, Coordenadas UTM, profundidad del ensayo, tipo de suelo por SUCS,

2.1.5 Propiedades físicas y mecánicas del suelo

Físicas: Son aquellos que permiten describir; tamaño, textura, forma, densidad, porosidad, color, humedad y permeabilidad de un suelo, y a la vez son los que proporcionan información sobre su comportamiento natural.

Mecánicas: Las propiedades mecánicas de un suelo son las que determinan el comportamiento del mismo frente a cargas y la capacidad de transmitir esfuerzos, estas son: ángulo de fricción, capacidad portante, resistencia al corte, cohesión, comprensibilidad y consolidación.

En resumen, aquellos indican de una manera rápida y práctica, el estado y naturaleza del suelo, para; clasificación de suelos, elaborar perfiles estratigráficos, conocer parámetros complementarios de capacidad portante y las propiedades, con fines de diseñar cimentaciones seguras (Rodríguez S, 2020).

Consistencia del suelo (Límites de Atterberg)

Se puede definir a la consistencia de un suelo como las propiedades que tiene para expandirse o contraerse, estas propiedades son causantes de muchos de los problemas en las construcciones.

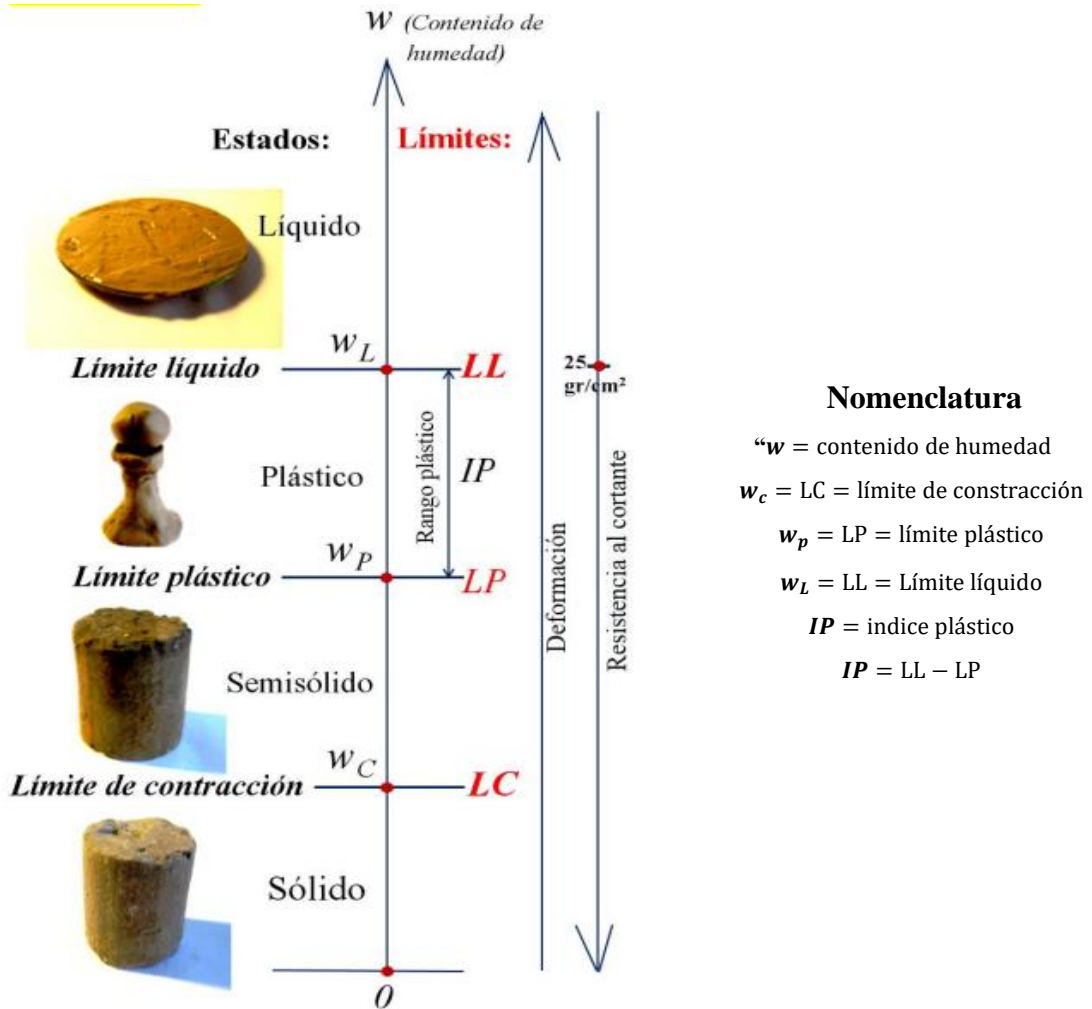
El estado en que se presentan, depende de su contenido de humedad, Albert Atterberg, fue un ingeniero químico sueco, quien estableció los llamados Estados de consistencia, a partir de los cuales se han establecido límites de consistencia.

Consistencia. - Es la mayor o menor resistencia del suelo que ofrece para cambiar de forma, dependiendo del contenido de humedad y de la mineralogía.

Plasticidad. - Propiedad del suelo de cambiar de forma bajo acción de esfuerzos, sin variación volumétrica, y sin desmoronarse ni agrietarse.

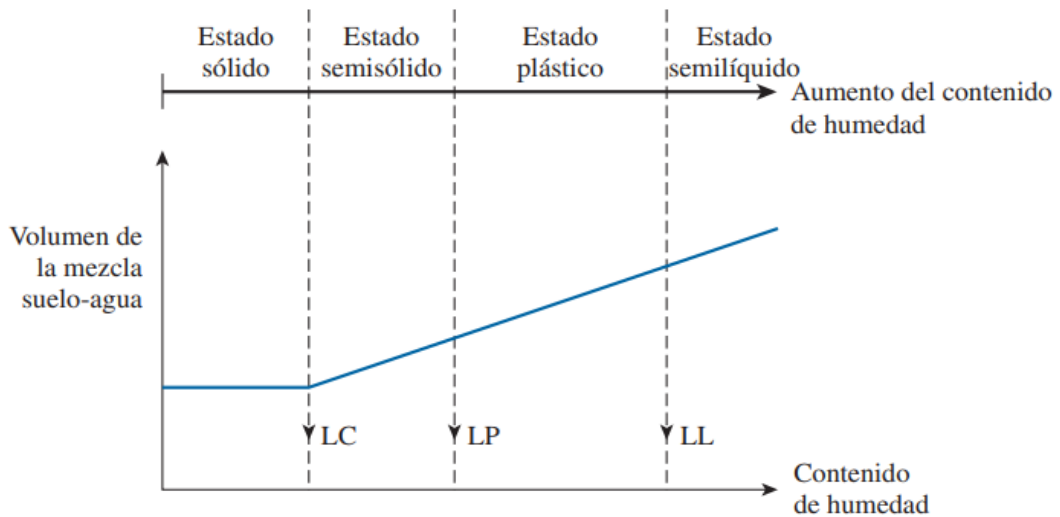
Estados. - Se consideran los siguientes: a) Sólido. b) Semisólido. c) Plástico. d) Líquido o fluido viscoso. (Rodríguez S, 2020)

Figura 12. Estados y límites de consistencia del suelo



Nota. Fuente: (Rodríguez S, 2020)

Figura 14. Definición de los límites de Atterberg



Nota. Fuente: (Das, 2011)

La importancia de determinar el LL y LP en el estudio de suelos sirve para:

-Determinar el potencial de expansión del suelo y clasificar los suelos con la carta de plasticidad (Rodríguez S, 2020).

Tabla 3. Clasificación del grado de expansión con Holtz y Gibbs 1959, utilizando IP

Grado de Expansión	Índice de plasticidad IP (%)	Límite de contracción	Probable expansión
Muy alto	> 35	< 11	> 30
Alto	25 a 41	7 a 12	20 a 30
Medio	15 a 28	10 a 16	10 a 20
Bajo	< 18	> 15	< 10

Nota. Fuente: (Rodríguez S, 2020)

2.1.6 Características geomecánicas de los suelos

Expansividad

La expansión del suelo se refiere a la capacidad de un suelo para experimentar cambios volumétricos o de generar presión al modificarse las condiciones de humedad. Este fenómeno está asociado a algunos tipos de arcillas, especialmente las montmorillonitas, que modifican su estructura al adsorber agua u otros líquidos. La expansión del suelo es una característica importante a tener en cuenta en la construcción, ya que puede afectar la estabilidad y la seguridad de las estructuras. Los suelos expansivos pueden generar problemas como levantamientos, agrietamientos y deformaciones en las estructuras construidas sobre ellos.

La detección de suelos expansivos puede lograrse a través de ensayos de laboratorio o mediante la observación de sus propiedades, como el contenido de arcilla y el nivel de saturación. Cuando el suelo presenta un potencial de expansión bajo, es posible seguir las prácticas de construcción habituales. No obstante, si el suelo tiene un potencial de expansión moderado o alto, se deben tomar precauciones adicionales, que pueden incluir:

1. Sustituir el suelo expansivo, es decir cambiarlo por un mejor suelo bajo la cimentación.
2. Modificar la naturaleza del suelo expansivo, como: controlando la compactación, instalación de barreras de humedad, prehumedecimiento, o estabilización química
3. Reforzar las estructuras para resistir al levantamiento, construir estructuras que sean lo suficientemente flexibles de manera que soporte el levantamiento diferencial del suelo sin sufrir daños o construir cimientos profundos aislados a una profundidad mayor que la zona activa

Es posible que un método no sea suficiente en todas las situaciones. Puede ser necesario combinar varias técnicas en función de la situación específica, y siempre se debe considerar la experiencia y antecedente en construcciones cercanas. (Das, 2011)

Figura 16. Imágenes reales por asentamientos diferenciales en suelos expansivos.



Nota. Fuente: (Rodríguez S, 2020)

Presión de hinchamiento

La presión de hinchamiento en suelos es una característica geotécnica que se refiere a la tendencia de ciertos tipos de suelos, como arcillas expansivas, a aumentar su volumen cuando absorben agua. Este fenómeno puede tener efectos significativos en las estructuras construidas sobre estos suelos, ya que puede dar lugar a movimientos no deseados, deformaciones y daños.

Para determinar la presión de hinchamiento en un suelo, se utiliza un ensayo específico conocido como el ensayo de expansión libre. En este procedimiento, se toma una muestra representativa del suelo y se coloca en una celda de ensayo. A continuación, se le permite absorber agua y se mide el cambio de volumen que experimenta durante el proceso. Los resultados de este ensayo permiten comprender mejor el comportamiento del suelo y su potencial de hinchamiento bajo condiciones de humedad.

El riesgo potencial de hinchamiento se refiere a la evaluación del impacto que la expansión del suelo puede tener en las construcciones y en el entorno circundante. Cuando un suelo tiene un alto riesgo potencial de hinchamiento, esto significa que existe una mayor probabilidad de que ocurran daños o desplazamientos significativos en las estructuras construidas sobre ese suelo debido a la expansión cuando se encuentre expuesto a la humedad. Este riesgo potencial de hinchamiento debe ser considerado cuidadosamente en la planificación y diseño de proyectos de construcción. Es fundamental realizar estudios geotécnicos adecuados para identificar y evaluar la presencia de suelos expansivos y comprender su comportamiento frente a diferentes condiciones ambientales. Con esta información, se pueden tomar las medidas y precauciones adecuadas para mitigar los riesgos asociados a la presión de hinchamiento y garantizar la estabilidad y durabilidad de las estructuras a lo largo del tiempo.

Nivel freático

Conocer el nivel freático en el contexto de la construcción es de vital importancia, ya que este factor tiene un impacto significativo en la estabilidad y durabilidad de las estructuras. El nivel freático se refiere al nivel del agua subterránea presente en el suelo, y su conocimiento es esencial para tomar decisiones adecuadas durante el proceso constructivo, es importante para determinar el tipo de cimentación y la profundidad de esta.

La importancia de conocer el nivel freático radica en su capacidad para afectar directamente las cimentaciones de las edificaciones. Un nivel freático alto puede generar presiones hidrostáticas que debiliten la capacidad portante del suelo, provocando asentamientos diferenciales y deformaciones en la estructura. Por otro lado, un nivel freático bajo puede ocasionar la compactación y contracción del suelo, lo que también puede resultar en hundimientos y problemas estructurales. En la construcción, los problemas asociados al nivel freático pueden ser diversos. Uno de los principales inconvenientes es la posibilidad de que el agua penetre en los cimientos y afecte la resistencia del suelo. Esto puede resultar en daños a la estructura, filtraciones, corrosión de materiales y deterioro prematuro. Además, el exceso de humedad puede propiciar la aparición de moho y hongos, lo que representa un riesgo para la salud de los ocupantes.

Las soluciones para lidiar con el nivel freático en la construcción pueden variar según el caso específico. En general, se deben llevar a cabo estudios geotécnicos exhaustivos para determinar la profundidad y comportamiento del nivel freático en el área de construcción. A partir de esta información, se pueden implementar sistemas de drenaje, como pozos de absorción, zanjas de drenaje o la instalación de sistemas de impermeabilización adecuados para mantener el nivel freático bajo control. Asimismo, es importante considerar el diseño y la elección de materiales que minimicen los efectos del agua subterránea en la estructura.

2.1.7 Clasificación de los suelos

“La clasificación de suelos es una forma de categorizar los diferentes tipos de suelo son sistemas de clasificación que proporcionan un lenguaje común para expresar en forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas sin una descripción detallada” (Macías Loor et al., 2018).

Existen varios sistemas de clasificación:

Sistema SUCS (Sistema unificado de clasificación de suelos).

Sistema AASHTO (Asociación Americana de Agencias Oficiales de Carreteras y Transportes).

Sistema USDA (Departamento de Agricultura de Estados Unidos).

Sistema de la ASTM (Asociación Americana de Ensayo de Materiales).

Sistema FAA (Agencia Federal de Aviación). (Rodríguez S, 2020)

En este caso de estudio tiene las dos clasificaciones más comunes, sistema SUCS, el cual tiene como base la llamada Carta de plasticidad, y AASHTO.

SUCS

Este sistema es planteado por Casagrande en 1942 para usarse en la construcción de aeropuertos durante la segunda guerra mundial.

Se clasifica los suelos en dos categorías.

1. Suelos de granos gruesos que son de naturaleza tipo grava arenosa con menos del 50% pasando por la malla no. 200.

Símbolos que empiezan con G o S

G: grava o suelo arenoso.

S: arena o suelo arenoso.

2. Los suelos de grano fino con 50% o más pasando por la malla no.200.

Los símbolos de grupo

M: limo inorgánico.

C: arcilla inorgánica.

O: limos y arcillas orgánicas.

Pt: turbos, lodos y otros suelos orgánicos.

Otros símbolos usados son

W: bien graduados.

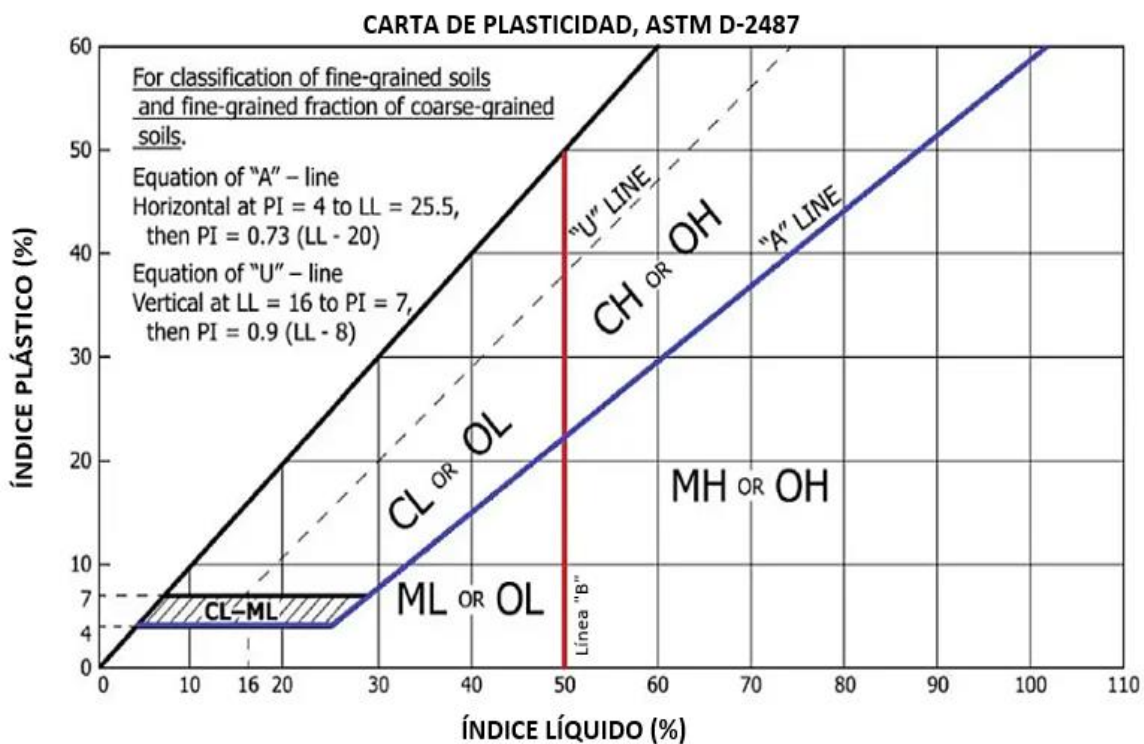
P: mal graduado.

L: baja o mediana plasticidad

H: alta plasticidad. (Macías Loor et al., 2018)

La información proporcionada en la carta de plasticidad es de gran valor y es la base para la clasificación de los suelos de grano fino en el Sistema de Clasificación Unificado de Suelos

Figura 18. Carta de plasticidad, ASTM D-2487, para clasificar los suelos por SUCS.



Nota. Fuente: (<https://es.scribd.com/document/493012336/5-2-Carta-Plasticidad-ASTM-D2487#>)

Figura 20. Sistema unificado de clasificación por SUCS

Divisiones mayores		Símbolo de grupo		Nombres típicos	Criterios de clasificación para suelos granulares		
Suelos de grano grueso (más del 50% del material es mayor en tamaño que tamiz N° 200)	Gravas (Más de la mitad de la fracción gruesa es mayor que el tamiz N° 4)	Gravas limpias (pocos o ningún fino)	GW		Gravas bien gradadas, mezclas gravosas, pocos o ningún fino.	$C_v = D_{60}/D_{10} > 4$ $C_c = 1 < D_{30}^2/(D_{10} * D_{60}) < 3$	
			GP		Gravas pobremente gradadas, mezclas grava-arena, pocos o ningún fino.	No cumplir todos los requisitos de gradación para GW.	
		Gravas con finos (cantidad apreciable de finos)	GM	$\frac{d}{u}$	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.	Límites de Atterberg por debajo de la línea A o $I_p < 4$	A los materiales sobre la línea A con $4 < I_p < 7$ se considera de frontera y se les asigna doble símbolo.
			GC		Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcillosas.	Límites de Atterberg por encima de la línea A o $I_p > 7$	
	Arenas (Más del 50% de la fracción gruesa es menor que el tamiz N° 4)	Arenas limpias (pocos o ningún fino)	SW		Arenas bien gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino.	$C_v = D_{60}/D_{10} > 6$ $C_c = 1 < D_{30}^2/(D_{10} * D_{60}) < 3$	
			SP		Arenas pobremente gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino.	No cumplir todos los requisitos de gradación para SW.	
		Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)	SM	$\frac{d}{u}$	Arenas limosas, mezclas arena-limo.	Límites de Atterberg por debajo de la línea A o $I_p < 4$	Si el material está en la zona sombreada con $4 \leq I_p \leq 7$ se considera de frontera y se le asigna doble símbolo.
			SC		Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.	Límites de Atterberg por encima de la línea A o $I_p > 7$	
	Suelos de grano fino (más del 50% del material pasa el tamiz N° 200)	Limo y arcillas (límite líquido $\omega_L < 50$)	ML		Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas, o limos arcillosos con poca plasticidad.	1. Determinar el porcentaje de arenas y gravas de la curva de granulometría. 2. Dependiendo del porcentaje de fino (fracción menor que el tamiz N° 200) Los suelos gruesos se clasifican como sigue: Menos del 5% - GW, GP, SW, SP Más del 12% - GM, GC, SM, SC De 5 a 12% - Casos de frontera que requieren doble símbolo.	
			CL		Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arenas limosas, arcillas magras.		
OL			Limos orgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.				
Limo y arcillas (límite líquido > 50)		MH		Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomáceos, suelos elásticos.			
		CH		Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas.			
		OH		Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos.			
Suelos altamente orgánicos		Pt		Turba y otros suelos altamente orgánicos.			

Nota. Fuente: (Rodríguez S, 2020)

AASHTO

- El suelo se clasifica en siete grupos mayores A-1 al A-7.
- Los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares donde el 35% o menos de las partículas pasan el tamiz 200.
- Los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 más del 35% pasa por el tamiz 200.
- La mayoría están formada por materiales tipo limo y arcilla.

Este sistema se basa en los siguientes criterios.

1. Tamaño del grano:

Grava: fracción que pasa la malla de 75mm y es retenida en la malla no. 10 (2mm) de E Unidos.

Arena: fracción que pasa la malla no. 10 (2mm) E U y es retenida en la malla no.200 (0.075mm) E U.

Limo y Arcilla: fracción que pasa la malla no.200.

2. Plasticidad: el término limoso se aplica cuando las fracciones de finos del suelo tienen un índice de plasticidad de 10 o menor. El término arcilloso se aplica cuando las fracciones de finos tienen como índice de plasticidad de 11 o mayor.

3. Si cantos rodados y bolsos (tamaños mayores de 75 mm) están presente, estos se excluyen de la porción de la muestra de suelo que está clasificando. Sin embargo, el porcentaje de tal material se registra.

Para la evaluación de la calidad de un suelo como material para subrasantes de carreteras, se incorporan también un número llamado índice de grupos (GI) junto con los grupos y subgrupos del suelo. Este número se escribe en paréntesis después de la designación del grupo o subgrupo. Si el índice de grupo de un suelo es alto, significa que su desempeño como capa subrasante es deficiente. Por ejemplo, un índice de grupo mayor o igual a 20

indica que el material es inapropiado para ser utilizado como capa subrasante debido a su baja calidad. (Macías Loor et al., 2018)

Figura 21. Sistema de clasificación AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos de la muestra total pasa la malla núm. 200)						
	A-1			A-2			
	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis por mallas (% que pasa)							
Malla núm. 10	50 máx						
Malla núm. 40	30 máx	50 máx	51 mín				
Malla núm. 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx
Para la fracción que pasa Malla núm. 40							
Límite líquido (LL)				40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidad (IP)	6 máx		No plástico	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Tipo usual de material	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa			
Clasificación de la capa	Excelente a buena						
Clasificación general	Materiales de limo y arcilla (más de 35% de la muestra total pasa la malla núm. 200)						
	A-4	A-5	A-6	A-7			
Análisis por mallas (% que pasa)							
Malla núm. 10							
Malla núm. 40							
Malla núm. 200	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín			
Para la fracción que pasa Malla núm. 40							
Límite líquido (LL)	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín			
Índice de plasticidad (IP)	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín			
Tipo usual de material	Principalmente suelos limosos		Principalmente suelos arcillosos				
Calificación subrasante	Regular a malo						

^aSi $IP \leq LL - 30$, la clasificación es A-7-5.

^bSi $IP > LL - 30$, la clasificación es A-7-6.

Nota. Fuente: (Das, 2011)

2.1.8 Suelo-Estructura (CIMENTACIÓN)

Es importante considerar tanto el suelo como la estructura como un sistema interdependiente, ya que interactúan entre sí de manera significativa. Cualquier evento que afecte a uno de los componentes, por ejemplo, el suelo, inevitablemente tendrá un impacto en la edificación. Es un error separarlos y estudiarlos de manera aislada, aunque a veces se realicen modelos teóricos

con fines de simplificación en cálculos. Sin embargo, esto no garantiza que dicha separación sea válida en la realidad.

Incluso si el suelo parece tener características favorables, como ser de naturaleza gravosa, no se debe asumir automáticamente que es adecuado para construir sin un estudio geotécnico adecuado. Existen factores adicionales a considerar, como la ubicación del suelo, que podría estar en una zona propensa a inundaciones o sismos. Asimismo, el suelo podría contener partículas finas con una alta capacidad de expansión, lo que podría generar problemas inesperados. El enfoque adecuado es entender el suelo y la estructura como un sistema integral y llevar a cabo estudios geotécnicos completos para tomar decisiones fundamentadas y asegurar la seguridad y durabilidad de cualquier proyecto de construcción.

Profundidad de cimentaciones

La profundidad de las cimentaciones es una consideración crítica en el diseño y construcción de cualquier estructura. Su nivel de penetración en el suelo depende de varios factores que deben ser evaluados cuidadosamente para garantizar la estabilidad y la seguridad a largo plazo.

-En primer lugar, el tipo de suelo sobre el cual se va a cimentar es uno de los principales factores determinantes. Diferentes tipos de suelos tienen distintas características de carga y resistencia, lo que afecta directamente la capacidad de soporte que pueden ofrecer a la estructura. Suelos más firmes y compactos, como rocas o terrenos granulares densos, generalmente permiten cimentaciones más superficiales. Por otro lado, suelos más blandos o expansivos, como arcillas y limos, requieren cimentaciones más profundas para evitar problemas de asentamiento o deformación.

-Otro factor clave es la carga o peso total que la estructura ejercerá sobre el suelo. Cuanto mayor sea la carga, mayor será la necesidad de una cimentación profunda para distribuir adecuadamente las fuerzas y evitar hundimientos no deseados.

-La presencia del nivel freático (el nivel del agua subterránea) también influye en la profundidad de las cimentaciones. Si el nivel freático está cerca de la superficie del suelo, puede afectar negativamente la capacidad portante y la estabilidad del terreno, lo que puede requerir cimentaciones más profundas para evitar problemas de inundación o debilitamiento del suelo. La elección de la profundidad de cimentaciones como ya se mencionó depende de varios factores, por ello un adecuado estudio geotécnico y una cuidadosa evaluación de estos elementos son esenciales para determinar la profundidad óptima de las cimentaciones, sin embargo, algunos autores mencionan lo siguiente:

“McCarthy recomienda “cimentar por debajo del nivel activo o erosión potencial, si se trata de arenas compactas. En el caso de arcillas o limos firmes, recomienda cimentar por debajo del nivel activo por cambios de volumen.”

Manuel Delgado Vargas, en su libro “Ingeniería de Cimentaciones”, afirma que se requiere cierta profundidad de cimentación, para evitar la socavación del suelo por debajo del cimiento superficial, siendo ésta de 0.50 m.

ATM, Army Technical Manual (Manual técnico del ejército de EEUU.) y el AFM, Air Force Manual, la profundidad de cimentación debe ser de 1.20m, para considerar el cambio de volumen del suelo, debido al efecto del hielo y deshielo.

Normas Peruanas de Estructuras, se especifica que debe ser de 0.80 m, y si se usa albañilería portante con losa de concreto armada en dos sentidos, y viga perimetral que sea de 0.40 m.

Carlos Crespo Villalaz da una ecuación para determinar la profundidad de cimentación D_f , en función del índice plástico (IP).” (Rodríguez S, 2020)

2.1.9 PERFIL DEL TERRENO NEC 2015

Para el diseño sísmico de estructuras la normativa ecuatoriana de construcción NEC define 6 tipos de suelos, esta clasificación se basa en las velocidades de onda provenientes de los ensayos por refracción sísmica.

La refracción sísmica entrega velocidades de las ondas S (secundarias) son ondas transversales o de corte que se propagan a través de sólidos, lo que significa que el suelo es desplazado perpendicularmente a la dirección de propagación, alternadamente hacia un lado y hacia el otro. La velocidad de estas ondas es alrededor del 58% del valor de una onda P para cualquier material sólido. Las ondas S tienen mayor amplitud que la P y se sienten más fuerte que ésta. Los líquidos no pueden soportar esfuerzos de corte, por lo que las ondas S solo pueden viajar a través de sólidos. Esto es importante y es utilizado para seleccionar el coeficiente del suelo para los diseños sísmicos de estructuras.

Tabla 4. Tipos de perfiles de suelos para el diseño sísmico

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500 \text{ m/s}$
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > V_s \geq 760 \text{ m/s}$
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50.0$ $S_u \geq 100 \text{ Kpa}$
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ $100 \text{ kPa} > S_u \geq 50 \text{ kPa}$
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$V_s < 180 \text{ m/s}$

	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	IP > 20 w ≥ 40% Su < 50 kPa
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. 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 > 3m 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 > 30m)	
	F5—Suelos con contrastes de impedancia α ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de ondas de corte.	
	F6—Rellenos colocados sin control ingenieril.	

Nota. Fuente: (NEC, 2015)

2.2 Sistemas de información geográfica (SIG)

Un SIG debe posibilitar la realización de las siguientes operaciones: lectura, edición, almacenamiento y, de manera general es la gestión de datos espaciales. También se encarga del análisis de dichos datos, lo cual abarca desde consultas sencillas hasta la creación de modelos complejos, tanto en términos espaciales (la ubicación de cada valor o elemento) como en términos temáticos (el valor o elemento en sí). Además, es capaz de generar resultados como mapas, informes, gráficos, entre otros. Los análisis más característicos que se pueden realizar dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG) son aquellos que aprovechan la forma en que el sistema maneja las distintas capas de información. Por ejemplo, la superposición de capas o el análisis combinado de varios factores pueden ser herramientas útiles para la toma de decisiones. En este contexto, los SIG deben considerarse como herramientas que permiten formular de manera más efectiva cuestiones geográficas y también ayudan en la búsqueda de respuestas (Olaya, 2020).

2.2.1 Tipos de análisis con SIG

Consulta Espacial: Este análisis es básico utilizado en la cartografía tradicional, y nos brinda información inmediata a través de una simple observación de los datos. La característica principal que utilizamos es la ubicación de cada elemento geográfico, además, da respuestas a preguntas; ¿Qué tipo de suelo encontramos en una coordenada (x, y) dada? ¿Dónde se encuentra la localidad x?, este análisis se puede resolver simplemente «mirando» al mapa que contiene la información de partida, y por ello constituyen la forma más sencilla de análisis espacial.

Análisis topológico: Las consultas hechas a las capas de datos espaciales pueden tener relación no solo con su posición sino con la relación con otros elementos de la misma capa. La existencia de topología puede emplearse para la realización de consultas que respondan a cuestiones como, entre otras, las siguientes: ¿Cómo llegar desde mi posición actual hasta una coordenada concreta por la red viaria existente? ¿Qué comunidades autónomas comparten límite con Madrid?

Medición: El hecho de que cada uno de los elementos con los que trabajamos en el análisis de un Sistema de Información Geográfica (SIG) tenga una referencia espacial nos permite medir diversos parámetros espaciales. El parámetro más fundamental es la distancia, que puede ser una simple distancia entre dos puntos específicos o una distancia entre elementos más complejos, como polígonos o líneas, o incluso combinaciones de ellos. Además de la distancia podemos medir otras propiedades tales como: área, perímetro, longitud de un recorrido no lineal, factores de formas, entre otros.

Combinación: Un proceso común y característico dentro del uso del (SIG) es la combinación de varias capas de información. La forma en que la información geográfica se organiza en capas facilita este procedimiento. Antes de la existencia de

los SIG, la combinación de capas implicaba la utilización de mapas en transparencias o acetatos, lo cual era complicado y poco adecuado para el análisis. Sin embargo, en un SIG existen metodologías para integrar la información de varias capas de diferentes formas, y las nuevas capas resultantes pueden ser fácilmente analizadas y visualizadas, independientemente de su origen. La estructura de las bases de datos geográficas es ideal para integrar toda la información disponible sobre una región geográfica específica, y las diferentes capas que la componen pueden ser combinadas de manera sencilla tanto para su análisis como para su visualización.

Análisis de superficies: El análisis de superficies en un (SIG) es una herramienta muy poderosa. Permite examinar parámetros como la pendiente, orientación y características morfométricas específicas. También incluye herramientas de análisis hidrológico. Aunque este análisis se centra en la superficie terrestre, muchas de las operaciones pueden aplicarse a cualquier otra superficie en sentido matemático. Por ejemplo, la pendiente indica la tasa de variación y puede aplicarse a diferentes capas con valores como temperaturas, densidades, entre otros. En resumen, el análisis de superficies en un SIG ofrece una amplia gama de operaciones para comprender la superficie y sus características.

Estadística descriptiva: La estadística clásica se aplica también a los datos espaciales, permitiéndonos analizar de manera cuantitativa la información con la que trabajamos. Esto incluye aspectos como la media y la dispersión, así como el estudio de la dependencia espacial y los patrones espaciales. Estos conceptos se pueden utilizar para contrastar hipótesis que tengan una componente espacial.

Toma de decisiones y optimización: El estudio con la superposición de capas, combinación de información y más factores puede ser una herramienta clave para tomar decisiones relativas a la actividad sobre la que ejercen su influencia. Así, los

procedimientos de análisis espacial nos sirven para responder a cuestiones como, por ejemplo, ¿Cuál es el mejor lugar para emplazar una nueva construcción en función de su impacto sobre el medio? ¿Por qué trazado es más conveniente construir una nueva carretera? ¿Dónde situar un nuevo hospital para que el servicio en la comarca mejore lo máximo posible? Dentro de estos análisis, muchos de ellos tratan de maximizar o minimizar alguna función objetivo dependiente de los factores implicados, que pueden ser tanto variables recogidas en distintas capas como parámetros espaciales tales como distancias.

Modelización: La creación de modelos espaciales en un (SIG) es una tarea que aún requiere un desarrollo considerable. Sin embargo, existen numerosos modelos en diversos campos y la arquitectura de datos y los procesos de los SIG son adecuados para la implementación de nuevos modelos. Por ejemplo, los modelos hidrológicos son comunes en los SIG más populares, gracias a la estructura de datos tipo ráster utilizada en ellos, lo cual facilita el análisis e implementación de modelos distribuidos. Y todos estos tipos de análisis no son independientes entre sí, y la verdadera potencia de un SIG radica en la elaboración de metodologías que los combinen (Olaya, 2020).

2.2.2 Sistemas de información geográfica y ordenamiento territorial

Varios autores coinciden en que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ofrecen herramientas poderosas de análisis espacial, como la sobreposición de datos espaciales. Según la ONU, una de las principales características de los SIG es su capacidad para integrar diferentes fuentes de datos, ya sean cartográficos o temáticos, utilizando la ubicación geográfica como único vínculo. Esto permite representar la información geográfica en capas gráficas multitemáticas, que se pueden superponer y analizar conjuntamente para identificar relaciones, crear nuevas capas de información o verificar el cumplimiento de normativas y

restricciones. En el caso de Planes de Ordenamiento Territorial (POT) se utilizan una gran cantidad de información geográfica multitemática y restricciones espaciales. Los POT son mecanismos para la planificación física del territorio y los componentes básicos incluyen la cartografía base rural y urbana, donde, la información geográfica que se utiliza en forma de mapas temáticos, muestra información para la gestión del suelo, riesgos de desastre, amenazas, usos de suelo, cobertura de suelo, elevación, cuencas hidrográficas, redes de servicios públicos, redes viales, áreas de protección, entre otros (Sepulveda Millán, 2021).

El uso de los SIG en la gestión, ordenamiento y planificación territorial ofrece varios beneficios, y entre esos el uso del SIG con información de geología y geotecnia, integra datos geospaciales relacionados con la composición del suelo, riesgos geológicos y condiciones geotécnicas, que es esencial para el diseño de proyectos de construcción, la planificación de infraestructuras y la gestión de riesgos, ya que ayuda a evaluar la viabilidad y seguridad de las actividades en determinadas áreas. Además, la información geográfica es vital en la toma de decisiones sobre dónde construir. Mediante el análisis espacial que ofrecen los SIG, es posible evaluar múltiples factores como accesibilidad, servicios básicos, impacto ambiental y socioeconómico antes de determinar los lugares más adecuados para la construcción de infraestructuras, viviendas u otros proyectos. Esto permite optimizar los recursos, minimizar los impactos negativos y asegurar un desarrollo sostenible y equitativo.

2.3 ArcGIS

Es un poderoso Software que se puede utilizar en varios campos, incluida la ingeniería civil, en particular, ArcGIS se puede utilizar para generar mapas temáticos de datos geotécnicos y geológicos. Aquí hay algunas formas en que ArcGIS puede ayudar en la ingeniería civil:

Planificación del uso de la tierra: Los mapas geológicos son elementos fundamentales para informar las decisiones de política de las agencias federales, estatales y locales. Los mapas geológicos mejorados y más detallados brindan datos más precisos, lo que lleva a conclusiones

más confiables. Los mapas geológicos se utilizan en la planificación del uso de la tierra (Clark et al., 2017).

Peligros geológicos: Los mapas geológicos se utilizan para identificar y prepararse para peligros naturales tales como terremotos, erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra, sumideros, suelos hinchados colapsables y hundimiento de la tierra. Los mapas geológicos mejoran nuestra capacidad para identificar peligros para la salud (Sociedad geológica de América, 2022).

Eliminación de desechos: Los mapas se utilizan para ubicar de manera segura las instalaciones de eliminación de desechos sólidos y peligrosos (Pando et al., 2022).

Infraestructura: Los mapas geológicos y geotécnicos se utilizan para ubicar y construir la infraestructura nacional de caminos y carreteras, ferrocarriles, tuberías, servicios públicos, represas y esclusas, edificios, etc. y con ArcGIS se puede utilizar para desarrollar un sistema geotécnico basado en SIG diseñado para enfrentar los desafíos del tipo del suelo en proyectos de construcción (Pando et al., 2022).

2.4 Leapfrog Geo | Software de modelado 3D

El software Leapfrog Geo es una herramienta ampliamente utilizada en geología, especialmente en la industria minera. Su principal función es generar modelos geológicos tridimensionales basados en información de sondajes. Estos modelos se crean mediante ecuaciones matemáticas que siguen las reglas geológicas, permitiendo la creación de diferentes escenarios y la identificación de tendencias geológicas y estructurales.

Es importante tener en cuenta que estos modelos se basan en información limitada y son una representación simplificada de la realidad. Por lo tanto, es necesario integrar distintos enfoques, como litología, estructura, geoquímica y geofísica, para reducir la incertidumbre del modelo final. A pesar de estas limitaciones, Leapfrog Geo es una herramienta muy útil en la toma de

decisiones en proyectos económicos, facilita la planificación y diseño de proyectos de construcción, la gestión de recursos naturales y el análisis de riesgos geológicos. Además, el software es intuitivo y fácil de usar, lo que permite a los geólogos e ingenieros trabajar en equipo y tomar decisiones fundamentales gracias a procesos simplificados y herramientas visuales.

Leapfrog Geo emplea datos geológicos y geotécnicos con el fin de construir modelos tridimensionales del subsuelo, esta herramienta permite a los usuarios observar y analizar de manera interactiva los datos, lo que simplifica la interpretación y comprensión, con ello se pueden llevar a cabo una evaluación y caracterización más precisa de las estructuras geológicas, los depósitos minerales y los recursos naturales.

Dentro de las funciones y capacidades que ofrece Leapfrog Geo se encuentran las siguientes características:

1. Importación de datos: Posibilita la carga de información geológica y geotécnica procedente de diversas fuentes, tales como sondeos, muestras, imágenes de satélite y modelos geofísicos.
2. Modelado 3D: Facilita la creación de modelos interactivos y pormenorizados en tres dimensiones del subsuelo, basados en los datos importados. Estos modelos pueden incorporar estratos geológicos, estructuras, vetas, fallas y otros elementos relevantes.
3. Análisis y representación gráfica: Proporciona herramientas para el análisis y la representación visual de los datos geológicos en el contexto del modelo tridimensional. Esto contribuye a la identificación de patrones, correlaciones y posibles zonas de interés para actividades de exploración o planificación minera.

4. Interpretación geológica: Permite a los usuarios interpretar los datos y agregar información geológica adicional al modelo, como límites de unidades geológicas, propiedades de las rocas y áreas de alteración. (Geocontacto, 2023)

El enfoque de interpolación es mediante el uso de funciones de base radial (RBF) que modela de manera implícita superficies geológicas continuas en tres dimensiones a partir de datos escasos y multivariantes relacionados con la estructura. Estos interpolantes generalizados tienen la capacidad de incorporar múltiples tipos de restricciones geológicas independientes, obteniendo funciones linealmente independientes para cada una de ellas. El método de interpolación que se realiza es el Kriging, esta es una técnica de interpolación geoespacial que se basa en la estadística y la teoría de la geoestadística. Funciona al estimar valores desconocidos en función de los valores conocidos en ubicaciones cercanas y utiliza información sobre la variabilidad espacial de los datos para hacer estas estimaciones de manera más precisa (Hillier et al., 2014).

2.5 MAPAS

Los mapas son herramientas útiles para la selección y estudio de un sitio adecuado para la construcción. Estos mapas contienen información necesaria para el trabajo específico, como datos demográficos, topografía, relieve, hidrografía, geología, geotecnia entre otros. Los mapas temáticos permiten visualizar la distribución espacial de las propiedades físicas de los suelos y su comportamiento geotécnico en diferentes profundidades. Además, los mapas topográficos proporcionan información detallada sobre el relieve y la hidrografía de la superficie terrestre, lo que es fundamental para la planificación y diseño de proyectos de construcción. Por otro lado, también ayudan a prepararse

Por otro lado, los mapas también proporcionan información que es fundamental para la planificación y diseño de proyectos de construcción, estos ayuda a anticipar los ensayos

necesarios que se deben realizar en el suelo, así como los desafíos y problemas a los que probablemente nos enfrentaremos, y el costo probable, además de eso, se pueden identificar áreas con propiedades favorables para la construcción y áreas que pueden presentar desafíos o riesgos. Esto ayuda a tomar decisiones informadas y a planificar adecuadamente los recursos y el presupuesto necesario para el proyecto de construcción. Los mapas también pueden ser utilizados para comunicar de manera efectiva la información a los diferentes equipos y partes interesadas involucradas en el proyecto. En resumen, los mapas son herramientas valiosas que garantizan una visión completa y detallada de un sitio, lo que facilita la toma de decisiones y la planificación en la construcción.

2.5.1 Mapa Geológico

Este mapa tiene un doble objetivo, científico y económico, científico porque es la base indispensable para investigar cualquier problema científico que se presente en las diferentes ciencias geológicas. Por otro lado, el objetivo económico es que el mapa geológico es la vía que se utiliza para la búsqueda y exploración de yacimientos minerales, agua, petróleo, materiales de construcción, investigaciones ingeniero geológico e hidrogeológico. En resumen, el mapa geológico es importante tanto para la investigación científica como para la exploración económica de recursos naturales (Macías Loor et al., 2018).

2.5.2 Mapa Geotécnico

El diseño estructural y de cimentaciones debe tener en cuenta el tipo de suelo donde se asentará. Cuando estos tipos de suelo se representan en un mapa, se denomina mapa geotécnico. Los suelos se clasifican en gravas (G), arenas (S), limos (M) y arcillas (S); además, existen combinaciones entre ellos, como arenas bien gradadas (SW), arenas mal gradadas (SP), arenas limosas (SM), arenas arcillosas (SC), gravas limosas (GM) y gravas arcillosas (GC).

La ubicación del proyecto y el conocimiento del suelo subyacente de la estructura determinan la problemática geotécnica que la estructura enfrentará. Por ejemplo, si la estructura se encuentra sobre un suelo arcilloso, es probable que experimente problemas de expansibilidad y asentamientos. Si se asienta en un suelo arenoso con nivel freático, podría estar sujeta a licuación del suelo. Además, si el suelo es blando, la estructura podría verse afectada por la amplificación sísmica, a diferencia de si se apoya sobre un terreno rígido o rocoso. Dependiendo del tipo de suelo, se deben tomar medidas para reducir o evitar los efectos mencionados.

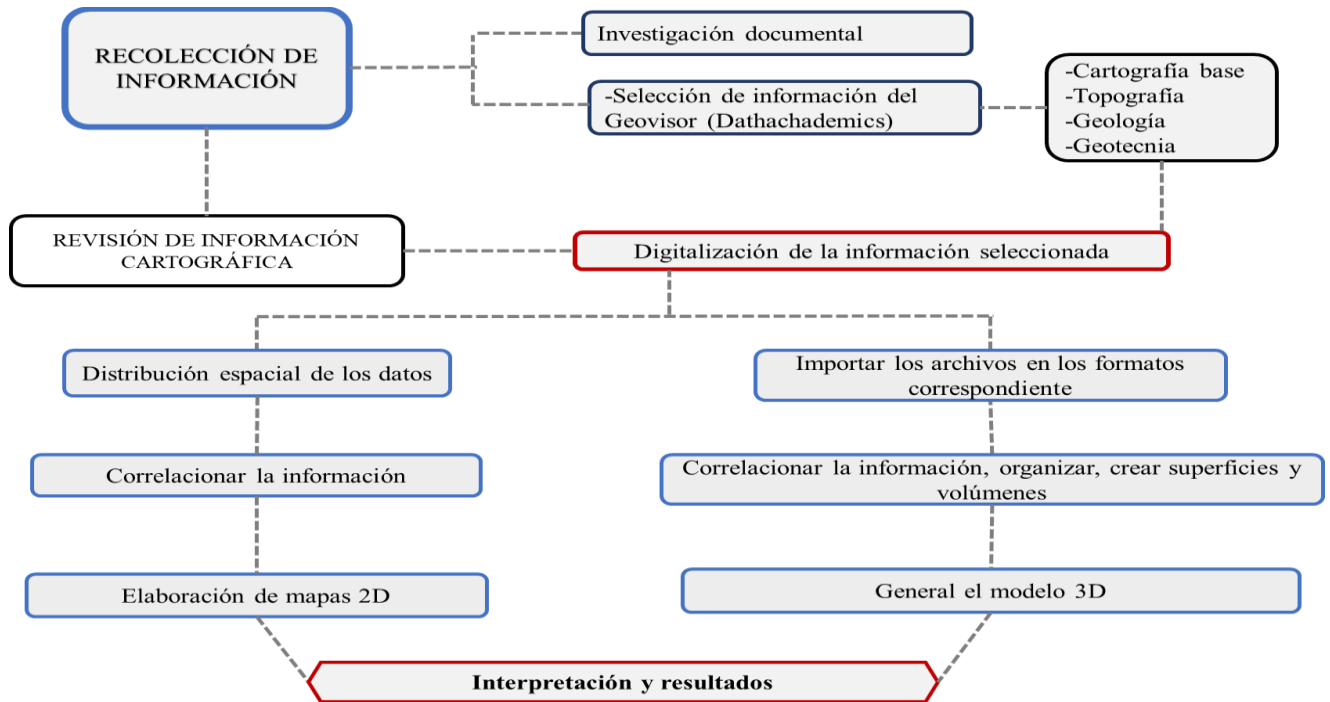
Al diseñar una edificación, es crucial considerar no solo las fuerzas que actúan sobre ella, sino también diversas variables que afectan el diseño de las cimentaciones. Algunos ejemplos de estas variables son el tipo de suelo (cohesivo, granular, granular con finos, de alta o baja plasticidad), la variación de estratos, la consistencia (media, blanda, dura), las propiedades físicas y mecánicas (cohesión, ángulo de fricción interna, índice de compresión), la ubicación del nivel freático, la profundidad de la cimentación, la capacidad portante por resistencia y por asentamiento, el esfuerzo neto, los asentamientos diferenciales y totales, así como la presencia de agentes agresivos y el posible ataque químico de suelos y aguas subterráneas (sales, cloruros, sulfatos). También se debe considerar la expansibilidad y fuerza expansiva del suelo, la estabilidad del talud de la excavación y las especificaciones de los reglamentos de edificaciones, entre otros (Rodríguez S, 2020).

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

Con el fin de cumplir los objetivos establecidos en el proyecto, se ha desarrollado una metodología específica, adaptada a la información disponible, a las herramientas y programas

que se utilizarán. Esta metodología se ha diseñado para incorporar de manera completa la información geológica-geotécnica obtenida a través de los ensayos realizados en el área de estudio.

Figura 22. Metodología establecida.



Nota. Fuente: Elaboración propia

3.1 Selección de información del GEOVISOR (DATHACHADEMICS)

Para lograr los objetivos del proyecto se identificó el área de estudio en el Geo-visor del laboratorio de Dathachademics de la Universidad Católica de Cuenca. De esta área se seleccionó información topográfica, geológica y geotécnica para crear un modelo 3D. La información seleccionada incluye la topografía del área de estudio, así como exploraciones SPT, pozos de prueba y datos de refracción sísmica. Estas exploraciones proporcionaron la información necesaria para crear el modelo 3D del subsuelo. De la información desplegada en el Geo-visor para cada exploración, se obtuvieron las coordenadas UTM, el tipo de exploración, la profundidad, la estratigrafía, la clasificación SUCS y AASHTO en la mayoría de los puntos, los límites de Atterberg, las pruebas de hinchamiento y la clasificación NEC del suelo.

3.2 Digitalización de la información seleccionada

Antes de proceder a la distribución espacial de los datos del suelo para realizar el modelo geológico-geotécnico 3D, fue necesario llevar a cabo la digitalización de la información seleccionada. Este proceso consistió en pasar los datos de las exploraciones de suelo del geovisor en un formato digital, específicamente en una hoja de cálculo de Excel. La digitalización permitió organizar y estructurar los datos de manera más eficiente, facilitando su posterior análisis y manejo en el software ArcGIS y Leapfrog Geo. Esta etapa es fundamental para garantizar la precisión y la integridad de los datos utilizados en el modelo 3D. También en este punto se realizó un control de calidad y aseguramiento para validar y corregir los datos. Este proceso se llevó a cabo siguiendo la norma INEN de Ecuador, que proporciona un sistema de gestión de calidad integral para garantizar la precisión y la integridad de los datos utilizados en el modelo geológico-geotécnico 3D. El control de calidad y aseguramiento se enfocó en verificar la consistencia de los datos digitales con los datos físicos originales, así como en corregir cualquier error o inconsistencia que pudiera afectar la precisión del modelo.

3.3 Distribución espacial de los datos

Para realizar la distribución espacial de los datos del suelo, se llevó a cabo un proceso en el software ArcGIS. El proceso se dividió en tres etapas principales:

- Se cargó el ráster para obtener la topografía del área de estudio.
- Se recortó de forma regular el área donde se iba a trabajar para facilitar el análisis y la manipulación de los datos.
- Se cargaron los datos digitalizados en formato Excel y se realizaron mapas temáticos, incluyendo mapa de pendientes, mapa de clima, mapa geológico y mapas geotécnicos a diferentes profundidades con las propiedades físico-mecánicas del suelo.

Durante este proceso, se utilizaron diversas herramientas para el análisis y manejo de archivos formato ráster y shapefile, con el objetivo de crear de mapas temáticos donde se permita visualizar la distribución espacial de las propiedades físico-mecánicas del suelo a diferentes profundidades, lo que facilitó la interpretación y el análisis de los datos. La generación de mapas temáticos adicionales, como el mapa de pendientes y el mapa de clima, permitió una mejor comprensión del área de estudio y su influencia sobre las propiedades del suelo.

3.4 Correlación de las propiedades físicas-mecánicas de los suelos para la creación de Mapas

La creación de mapas en ArcGIS es una herramienta muy útil para visualizar y analizar esta información. A través de la utilización de distintas capas de datos (imágenes satelitales, topografía, geología, clasificación de suelos, hinchamiento, expansión), se pueden representar de forma gráfica las propiedades físicas del suelo, asignando diferentes colores o símbolos a cada categoría o rango de valores, la sobreposición de cada capa permite correlacionar esta información para la interpretación de esta información.

Al generar estos mapas, se puede identificar patrones espaciales y determinar áreas que presenten características favorables para la construcción. Por ejemplo, si se busca construir una edificación que requiera un suelo con buenas características geotécnicas, se puede analizar la estratigrafía y sus características en este caso a profundidades de (0 a 3m, 3 a 6m, 6 a 9m, 9 a 12m y 12 a 34m), además, la correlación entre las propiedades del suelo y la generación de mapas en ArcGIS posibilita obtener información espacial sobre las particularidades del suelo en una zona específica.

Este conocimiento resulta fundamental para evaluar si el suelo es apto para la construcción de diferentes proyectos, así como para buscar soluciones que garanticen la seguridad de las edificaciones. Además, ofrece una visión de los desafíos económicos que podrían surgir.

3.5 Elaboración de Mapas 2D

Los mapas generados en ArcGIS muestran la clasificación de los suelos a diferentes profundidades, utilizando los límites de Atterberg. Además, se ha considerado el grado de expansión del suelo en función del Índice de Plasticidad según la clasificación de Holtz. Asimismo, para proporcionar una visión más completa, se ha incorporado el grado de hinchamiento del suelo determinado a través de ensayos, y también se ha añadido la información sobre el nivel freático en algunos puntos.

Los mapas se realizaron en el software ArcGIS, siguiendo los siguientes pasos:

- Exportación de la topografía y la data a diferentes profundidades
- Recortar y seleccionar el área de estudio
- Configurar las propiedades de las capas
- Organizar las capas, seleccionar y configurar la simbología
- Diseñar y personalizar cada mapa
- Guardar y exportar

3.6 Digitalización de datos para Leapfrog Geo

El proceso para trabajar con los datos en el programa "Leapfrog Geo" comienza por cargar los archivos en formato CSV (delimitado por comas) que contienen la información de los sondajes. Estos archivos se dividen en tres categorías: "Geology", "Collar" y "Survey".

El archivo "Geology" contiene los datos relacionados con el número de sondaje, la profundidad, la estratigrafía y la clasificación SUCS. Por su parte, el archivo "Collar" incluye las coordenadas de cada sondaje, la elevación y la máxima profundidad alcanzada. Finalmente, el archivo "Survey" contiene información sobre el número de sondaje y el ángulo de orientación de la perforación.

Estos tres archivos en formato CSV delimitado por comas son detectados automáticamente por el programa al cargar cualquiera de ellos. Una vez cargados, el programa permite acceder y manipular los datos de los sondeos de manera eficiente para realizar análisis, visualizaciones y cualquier otro tipo de procesamiento que sea necesario.

Para incluir la información respecto a la expansividad, hinchamiento, puntos de clasificación NEC, topografía y geología, se exportaron y se subieron en formato GIS para sobreponer en el mapa

Para incorporar datos relacionados con la expansividad del suelo, su hinchamiento, los puntos de clasificación NEC, así como información sobre la topografía y geología, se llevó a cabo de la siguiente manera: los datos mencionados fueron exportados en un formato (GIS), la clasificación NEC, el hinchamiento y la expansividad se representaron como puntos en el mapa, y la información geológica y topográfica se integró como capas, lo que permitió una representación de estas características.

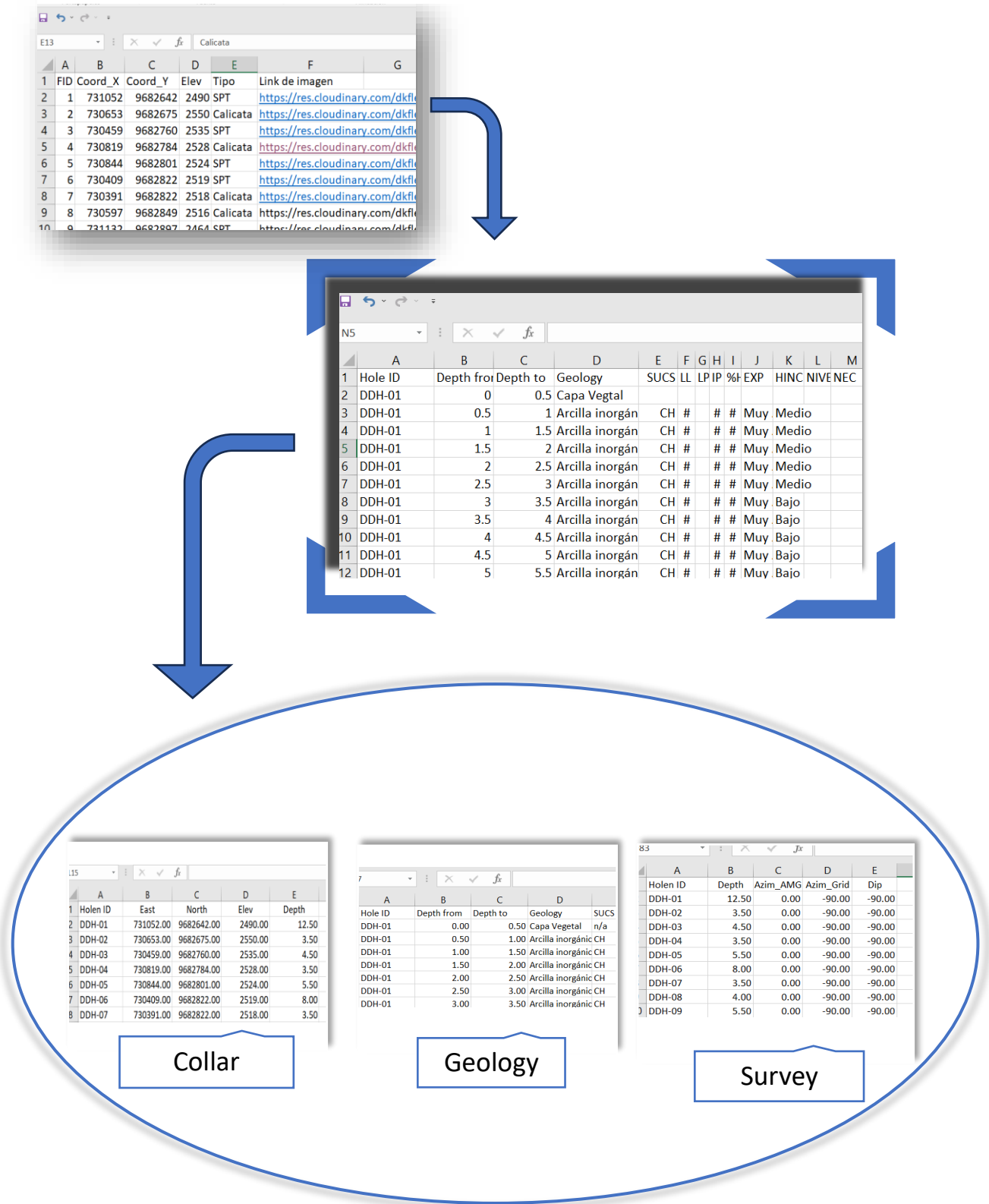
3.7 Modelo geológico-geotécnico 3D

Para realizar un modelo geológico-geotécnico en Leapfrog Geo, se hizo de la siguiente manera:

Crear modelo: Establecer los parámetros iniciales, como la escala y la ubicación geográfica del modelo.

Importar los datos: Cargar los datos, la topografía, los archivos con la información de todos los sondeos del área de estudio (geology, collar y survey) en el software Leapfrog Geo.

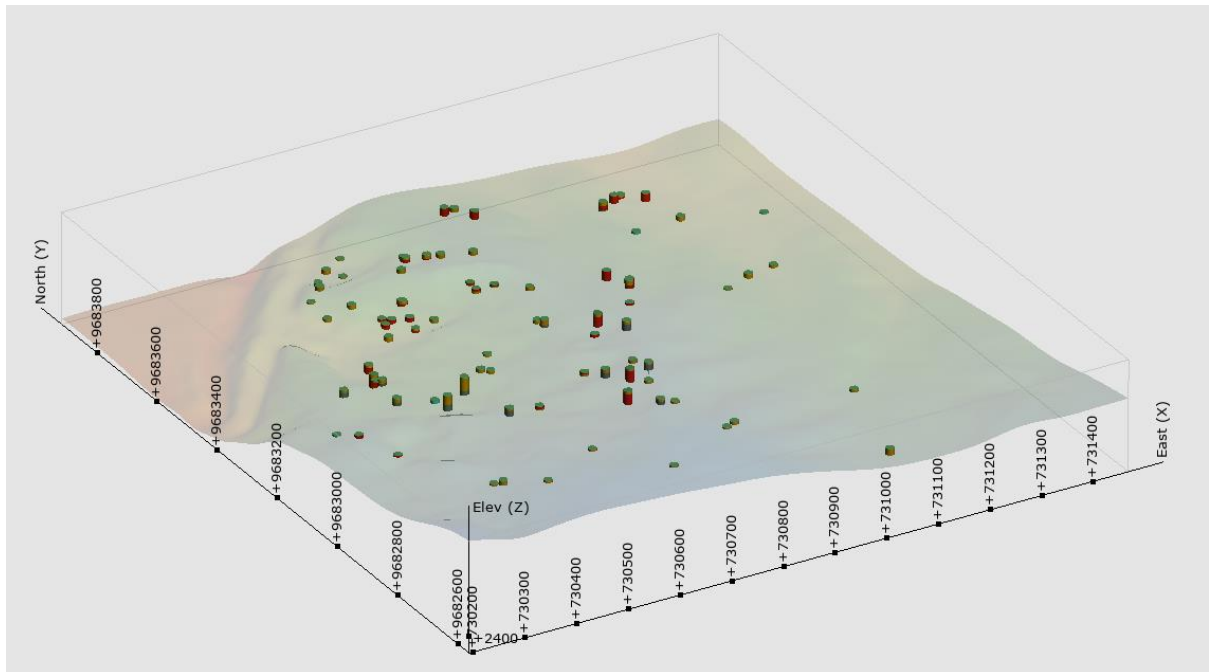
Figura 23. Data general y formatos de los sondajes para el modelado



Nota. Fuente: Elaboración propia

Organizar los datos: Organizar y estructurar los datos importados en el software. Esto puede incluir la creación de diferentes capas o grupos para los diferentes tipos de datos.

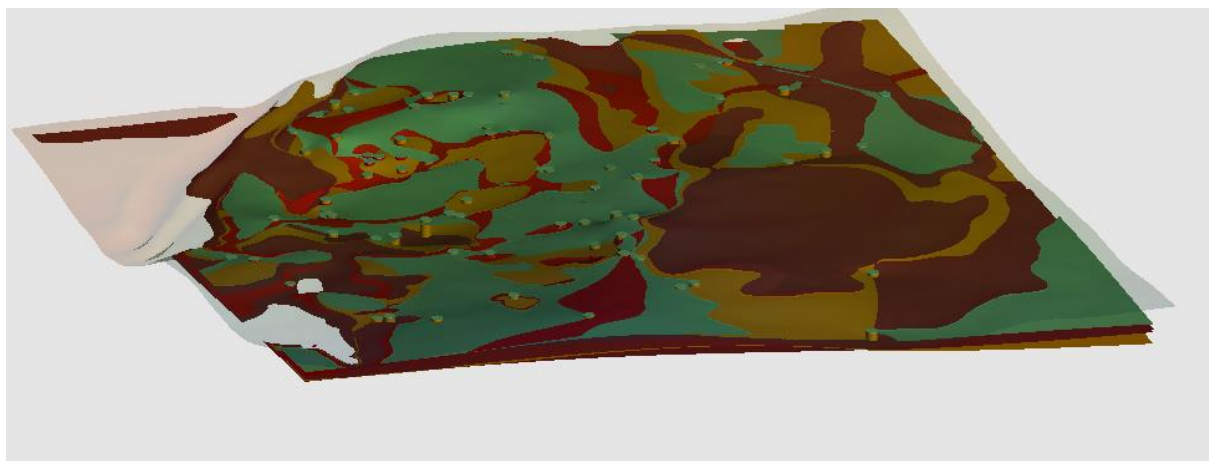
Figura 24. Importación de datos.



Nota. Fuente: Elaboración propia

Crear superficies: Utilizando las herramientas de Leapfrog Geo, se procede a crear superficies con cada estrato de suelo, el programa realiza una interpolación implícita basada en el método kriging, para estimar valores en puntos desconocidos en función de puntos de datos conocidos.

Figura 25. Superficies y capas generadas por interpolación.



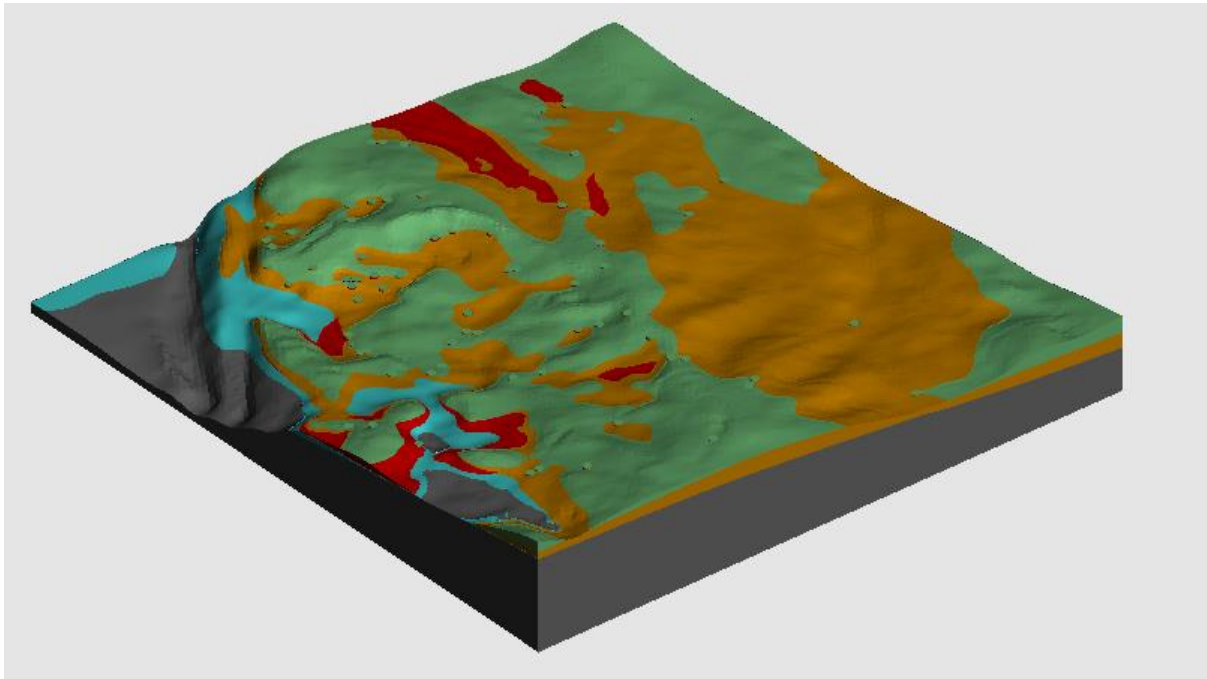
Nota. Fuente: Elaboración propia

Generar volúmenes: Utilizando las herramientas de Leapfrog Geo, se procede a generar volúmenes en función a cada superficie creada a partir de la estratigrafía o tipo de suelo.

Asignar propiedades geotécnicas: Se asignan las propiedades geotécnicas que existen hasta una profundidad de 3m, ya que la mayoría de los datos en esa profundidad tienen sus características geotécnicas completas.

Generar el modelo: Utilizar las herramientas de Leapfrog Geo para generar resultados y analizar el subsuelo a partir de la visualización de perfiles y vista 3D.

Figura 26. Volúmenes y modelo 3D.



Nota. Fuente: Elaboración propia

Documentar y presentar: Documentar el proceso y los resultados obtenidos en el modelo geológico-geotécnico.

Es importante tener en cuenta que estos pasos pueden variar dependiendo de la naturaleza del proyecto, el tipo y la cantidad de datos disponibles. Además, es recomendable consultar la documentación y recursos específicos de Leapfrog Geo para obtener instrucciones detalladas sobre el uso del software.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Mapas geológico-geotécnico

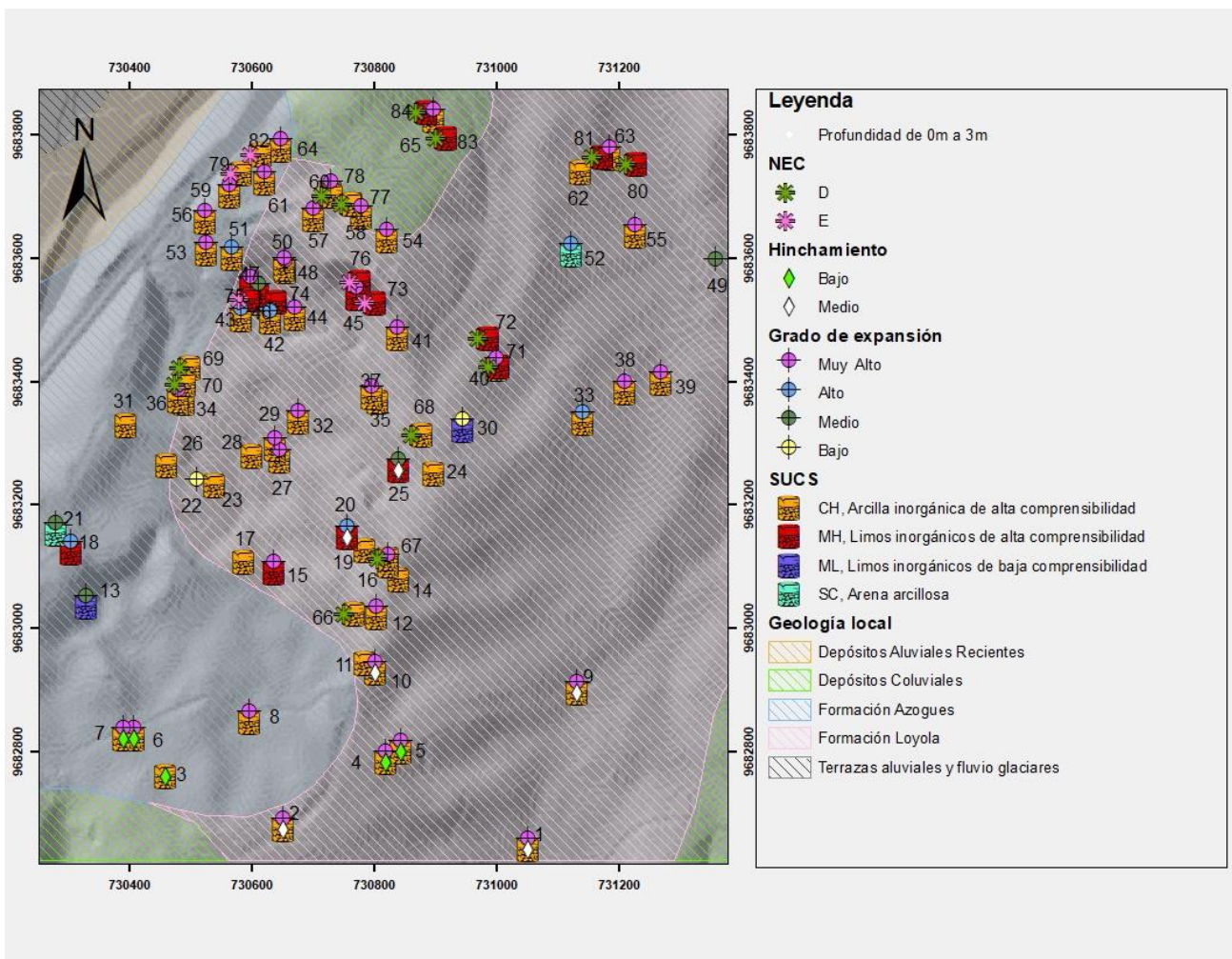
4.1 Análisis en la profundidad de 0 a 3m

- Composición geológica área de estudio: Se observa que las formaciones Loyola y Azogues ocupan la mayor parte del área y son las zonas donde se han realizado la mayoría de los sondeos.
- Resultado del tipo de suelo a profundidad de 0 a 3 metros: De los 84 datos obtenidos a partir de SPT, calicatas y refracción sísmica, se puede determinar que los suelos predominantes en la primera capa son las arcillas, representando el 61% de los datos. Este 61% son arcillas de alta compresibilidad, el 20% son limos inorgánicos de alta compresibilidad, el 5% son arenas arcillosas y el 2% corresponde a limos inorgánicos de alta compresibilidad.
- Grado de expansión del suelo: Aplicando la fórmula de Holtz para determinar el grado de expansividad del suelo respecto al IP, se observa que, en la mayoría de los datos, el grado de expansión es clasificado como de "Muy alta expansividad". Algunos datos no cuentan con este resultado debido a que no se ha realizado el ensayo de límite de Atterberg.
- Resultados de refracción sísmica: En ciertos puntos de la zona de estudio, los resultados de refracción sísmica indican la presencia de suelos de tipo D y E. Los suelos tipo D corresponden a perfiles de suelos rígidos que cumplen con el criterio de velocidad de la onda de cortante, mientras que los suelos tipo E presentan un espesor total H mayor de 3 m de arcillas, lo que muestra una relación con los resultados de los sondeos.
- Hinchamiento libre del suelo: Algunos sondeos han proporcionado resultados sobre el ensayo de hinchamiento libre del suelo. Estos resultados indican la existencia de riesgo de hinchamiento en ciertos puntos, variando entre medio y bajo. Es importante

mencionar que el ensayo de hinchamiento libre se ha realizado únicamente en el 13% de los datos, por lo que se debe considerar esta limitación en la interpretación de los resultados.

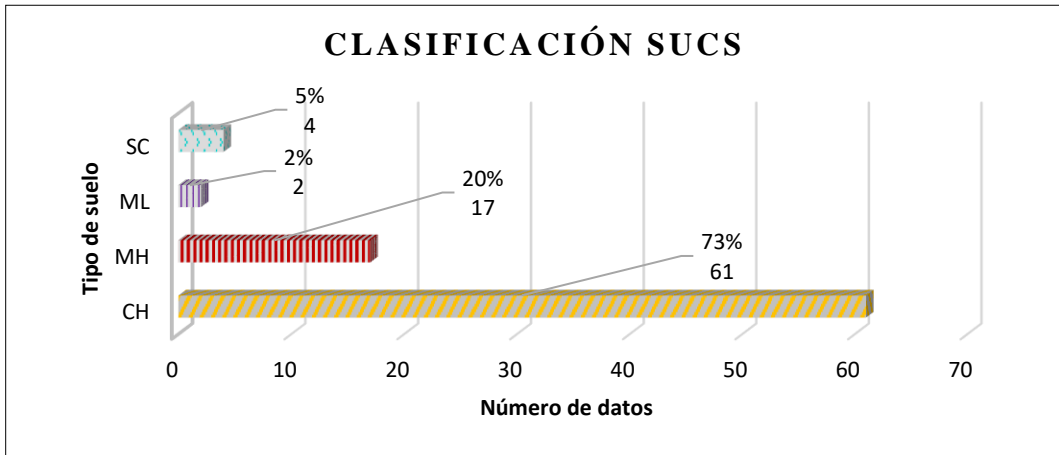
En resumen, a esta profundidad los resultados presentan un reto para la construcción, debido a la presencia predominante de arcillas y limos con alta comprensibilidad. La construcción en esta área requerirá un tipo de cimentación adecuada o mejorar el suelo ya que construir sobre este tipo de suelos no es lo correcto, lo que implica que el costo de construcción incrementará. El desafío significativo en esta área es que son suelos propensos a asentamientos diferenciales, expansión y contracción en respuesta a los cambios de humedad, lo que podría afectar la estabilidad y durabilidad de la estructura.

Figura 27. Mapa geológico-geotécnico profundidad 0-3m



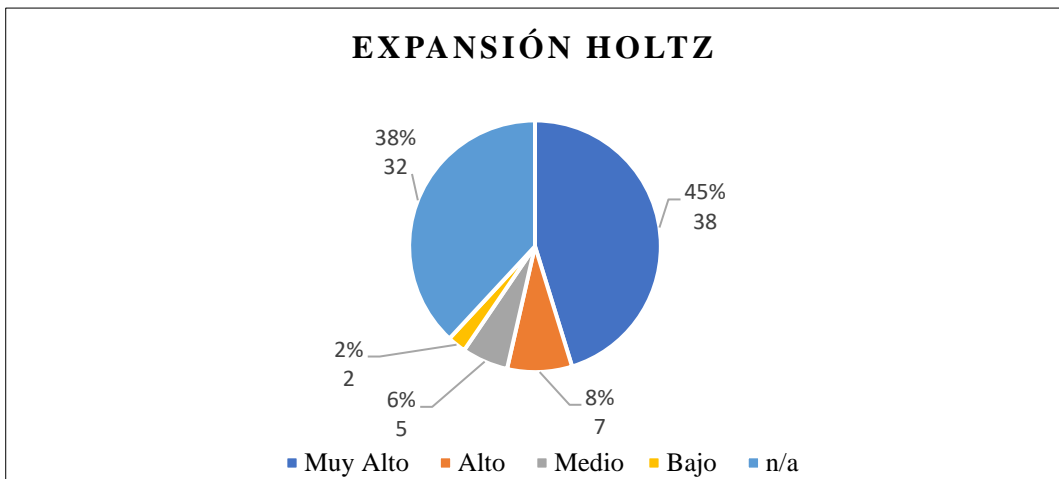
Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Gráfica de barras respecto a la clasificación SUCS de 0 a 3m



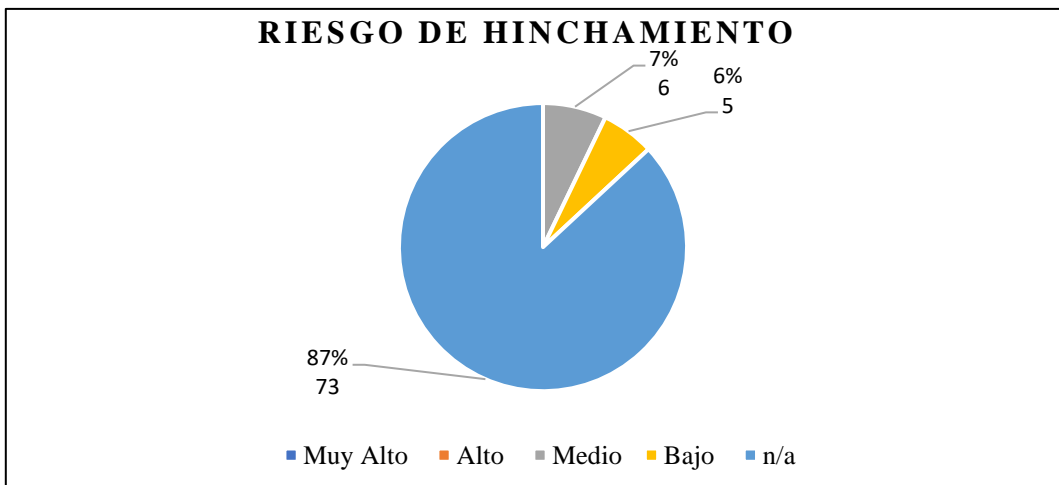
Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 30. Gráfica de expansión respecto al IP de 0 a 3m



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 31. Gráfica del riesgo de hinchamiento respecto al ensayo realizado 0 a 3m



Nota. Fuente: Elaboración propia

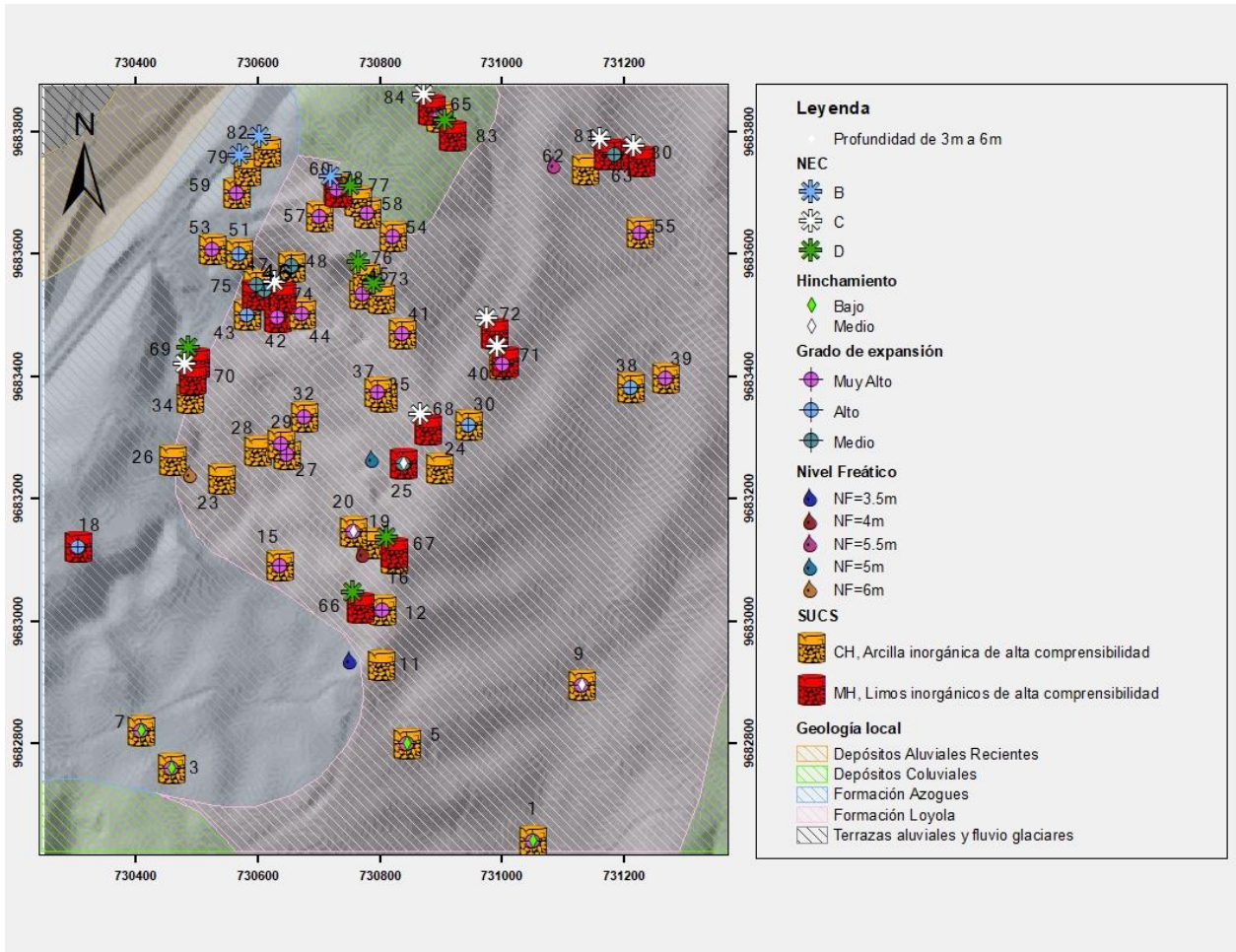
4.2 Análisis en la profundidad de 3 a 6m

- Tipo de suelo a profundidad de 3 a 6 metros: Se sigue identificado que las arcillas son el tipo de suelo predominante en esta profundidad. Del 100% de datos, el 51% corresponde a arcillas de alta compresibilidad, el 23% son limos inorgánicos de alta compresibilidad y el resto, 26% n/a (no existe información a esa profundidad).
- Grado de expansión del suelo: El análisis mediante la fórmula de Holtz muestra que la expansividad del suelo está entre "Muy alta, alto y media expansividad", lo que significa que a esa profundidad se sigue manteniendo un IP alto.
- Resultados de refracción sísmica: En ciertos puntos de la zona de estudio, los resultados de refracción sísmica indican la presencia de diferentes tipos de suelo, tales como suelo tipo B, D y C.
- Hinchamiento libre del suelo: En ciertos puntos sigue existiendo un riesgo de hinchamiento, variando entre medio y bajo, es preocupante que siga existiendo unas malas características geotécnicas, sin embargo, se debe considerar que este ensayo solo se ha realizado en un 9% de los datos y no se puede generalizar en toda el área.
- Presencia del nivel freático: A esta profundidad en ciertos puntos ya se evidencia la presencia de agua subterránea, no se puede generalizar que exista la presencia en más puntos, pero sí se debe tener cuidado y considerar este problema en puntos cercanos a estos.

En resumen, sigue predominando los suelos problemáticos para la construcción, seguir teniendo a esa profundidad la presencia de arcillas de alta compresibilidad y limos inorgánicos de alta compresibilidad indica que los suelos en esta zona son potencialmente problemáticos en términos de asentamientos y cambios volumétricos. La presencia de expansividad, el riesgo de hinchamiento también es un grave problema que va a afectar negativamente la estabilidad

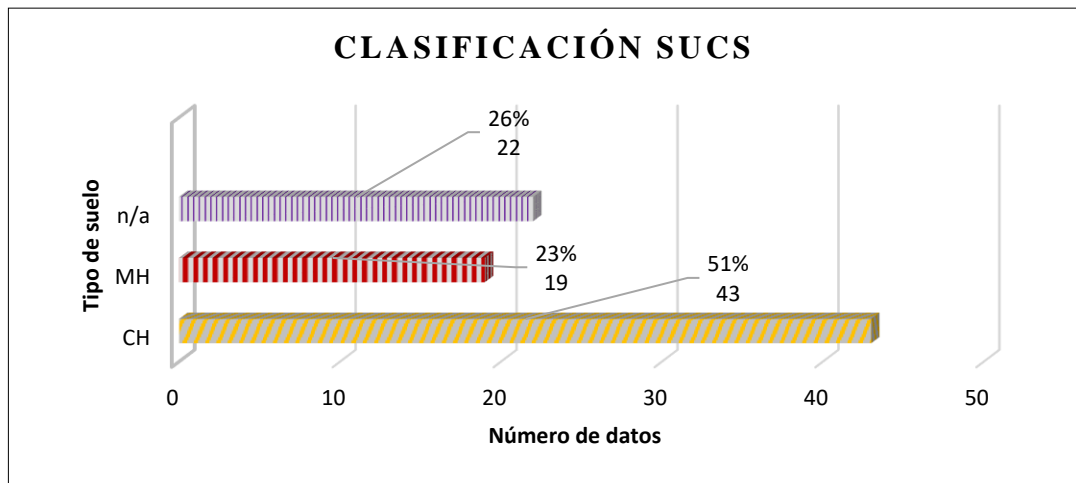
y seguridad de cualquier edificación, además, es muy importante y se debe tener mucha precaución en los puntos con presencia de nivel freático y los puntos cercanos a estos.

Figura 32. Mapa geológico-geotécnico profundidad 3-6m



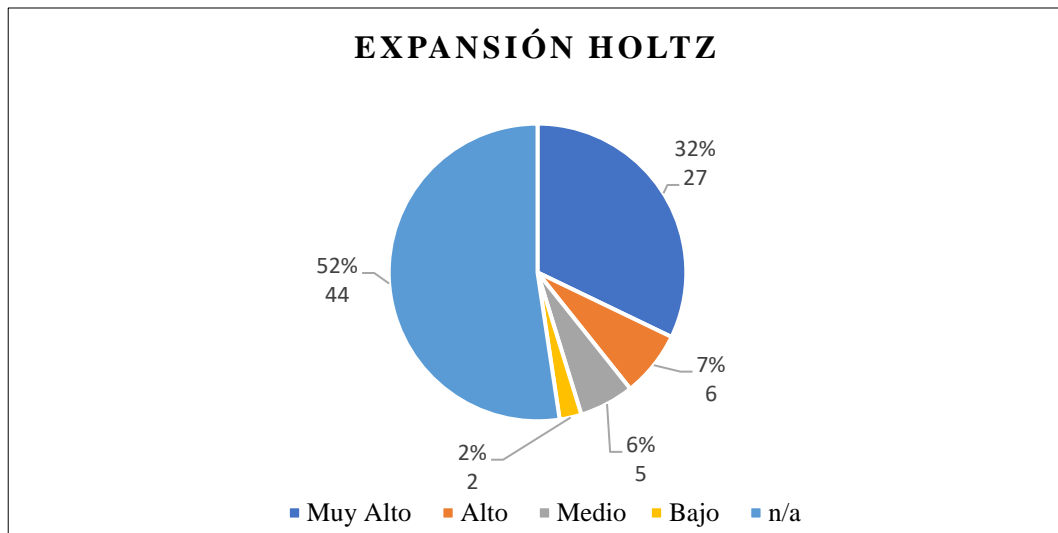
Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 34. Gráfica de barras respecto a la clasificación SUCS de 3 a 6m



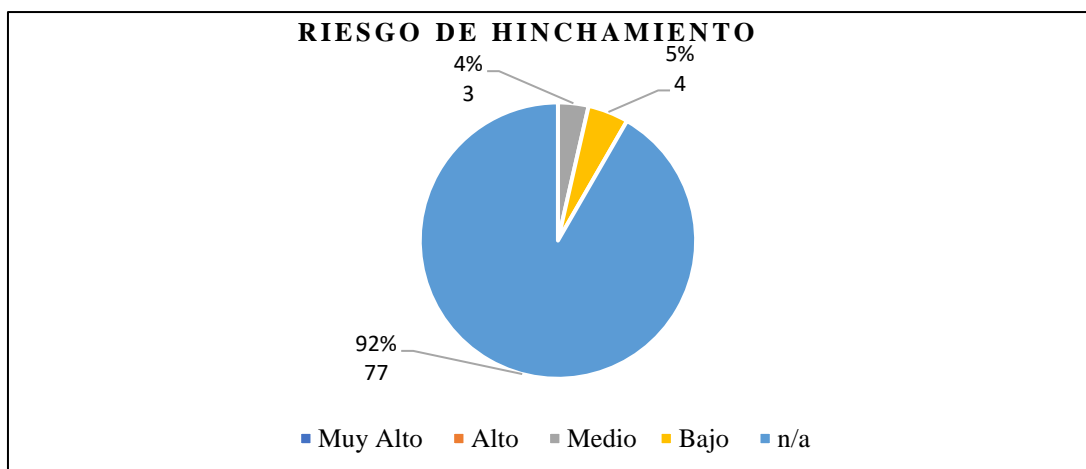
Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 35. Gráfica de expansión respecto al IP de 3 a 6m



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 36. Gráfica del riesgo de hinchamiento respecto al ensayo realizado 3 a 6m



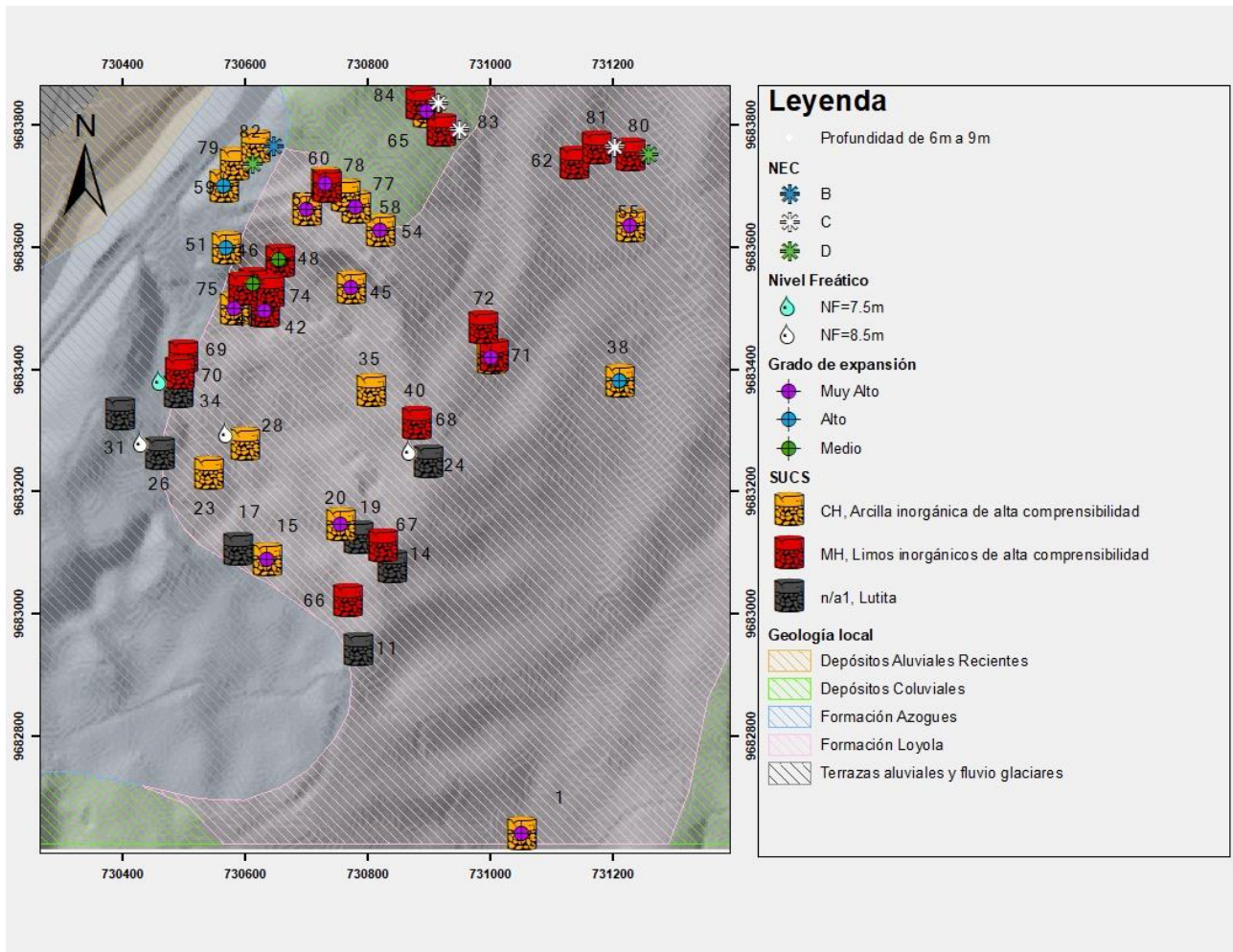
Nota. Fuente: Elaboración propia

4.3 Análisis en la profundidad de 6 a 9m

- Tipo de suelo a profundidad de 6 a 9 metros: A esta profundidad, los resultados muestran predominando las arcillas en la mayoría de datos. Aunque en ciertos puntos se encuentra suelo consolidado como lutita, aún persisten suelos problemáticos, representando el 25% de los datos a arcillas de alta comprensibilidad, el 21% son limos inorgánicos de alta comprensibilidad, y un 10% pertenece a la lutita, este suelo ya es consolidado, sin embargo, predominan los suelos expansivos y potencialmente problemáticos para la construcción.
- Grado de expansión del suelo: En ciertos puntos, el grado de expansividad se sigue manteniendo y varía entre "Muy alta", "Alta" y "Media". Esto representa un grave problema, ya que indica que el IP sigue siendo significativo.
- Resultados de refracción sísmica: Los resultados de refracción sísmica indican la presencia de diferentes tipos de suelo en ciertos puntos, clasificados como suelo tipo B, D y C. Estos diferentes tipos de suelo pueden tener comportamientos y propiedades geotécnicas distintas, lo que puede afectar el diseño y la construcción de las estructuras.
- Presencia del nivel freático: Aunque en muy pocos puntos se ha identificado la presencia del nivel freático, esto sigue siendo un factor relevante a tener en cuenta, ya que puede afectar la estabilidad del suelo y tener impacto en la construcción subterránea.

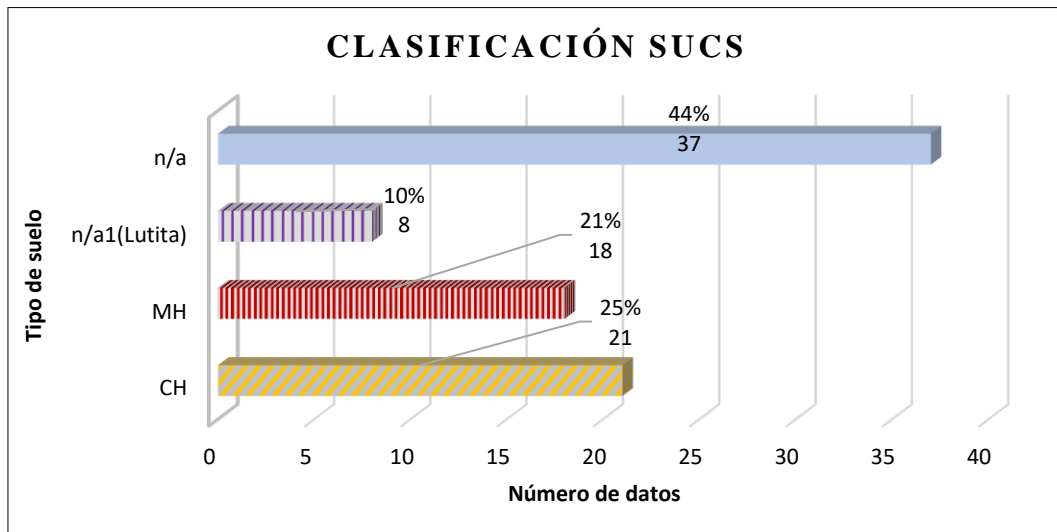
En resumen, la presencia de suelos con malas características geotécnicas a profundidades de 6 a 9 metros representa un desafío significativo para la construcción. Los suelos expansivos como las arcillas y los limos inorgánicos de alta comprensibilidad siguen predominando, por lo que estos puntos son críticos, difíciles y económicamente graves de tratar, ya que son suelos problemáticos.

Figura 37. Mapa geológico-geotécnico profundidad 6-9m



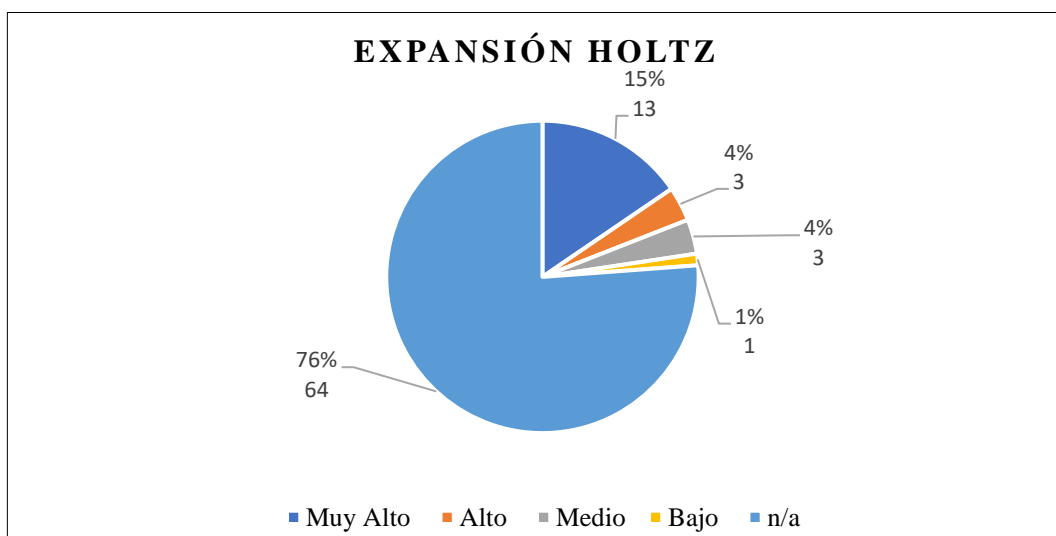
Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 39. Gráfica de barras respecto a la clasificación SUCS de 6 a 9m



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 40. Gráfica de expansión respecto al IP de 6 a 9m



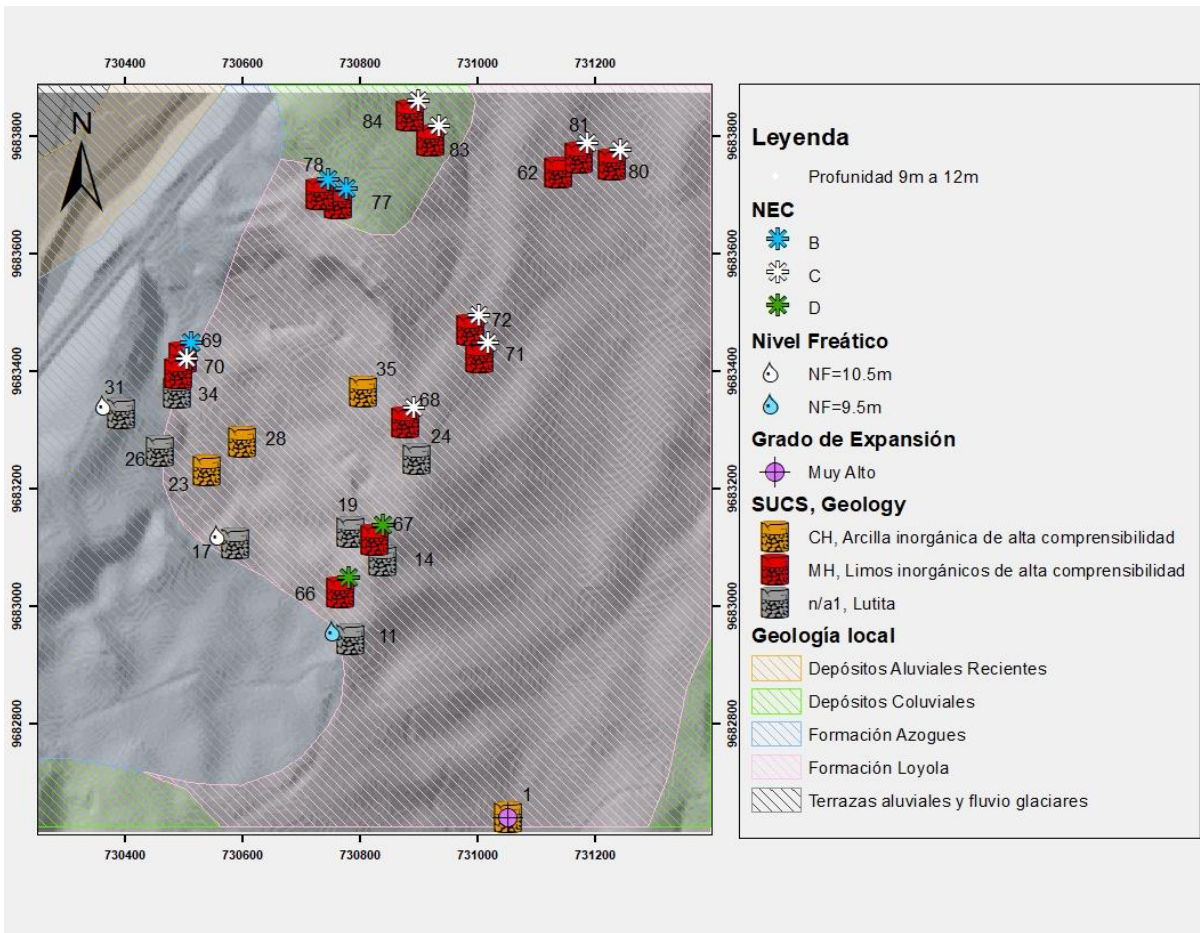
Nota. Fuente: Elaboración propia

4.4 Análisis en la profundidad de 9 a 12m

- Tipo de suelo a profundidad de 9 a 12 metros: A esta profundidad, se observa una disminución en la presencia de arcillas, representando solo el 5% de los datos. Sin embargo, sigue siendo preocupante encontrar arcillas en algunos puntos a esa profundidad, ya que son suelos expansivos que pueden causar problemas geotécnicos. Los limos inorgánicos de alta comprensibilidad constituyen el 17% de los datos, y también se encuentra suelo consolidado, lutita, en un 10% de los datos.
- Resultados de refracción sísmica: Los resultados de refracción sísmica indican la presencia de diferentes tipos de suelo en ciertos puntos, clasificados como suelo tipo B, D y C.
- Presencia del nivel freático: Algunos sondeos confirman la existencia del nivel freático a esta profundidad, la presencia del nivel freático puede afectar al comportamiento del suelo, lo que es relevante para la construcción.

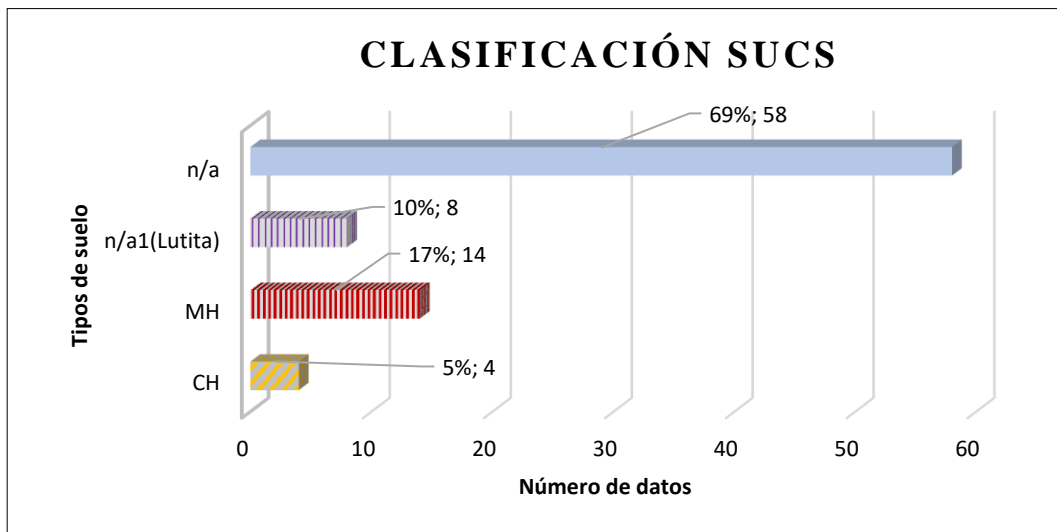
En resumen, se debe tener en cuenta que la presencia de arcillas de alta comprensibilidad a esa profundidad es un asunto preocupante y desafiante desde el punto de vista geotécnico, lo que hace que sea económicamente una desventaja llegar a construir o intentar mejorar el suelo en esos puntos y cercanos a estos.

Figura 41. Mapa geológico-geotécnico profundidad 9-12m



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 42. Gráfica de barras respecto a la clasificación SUCS de 9 a 12m



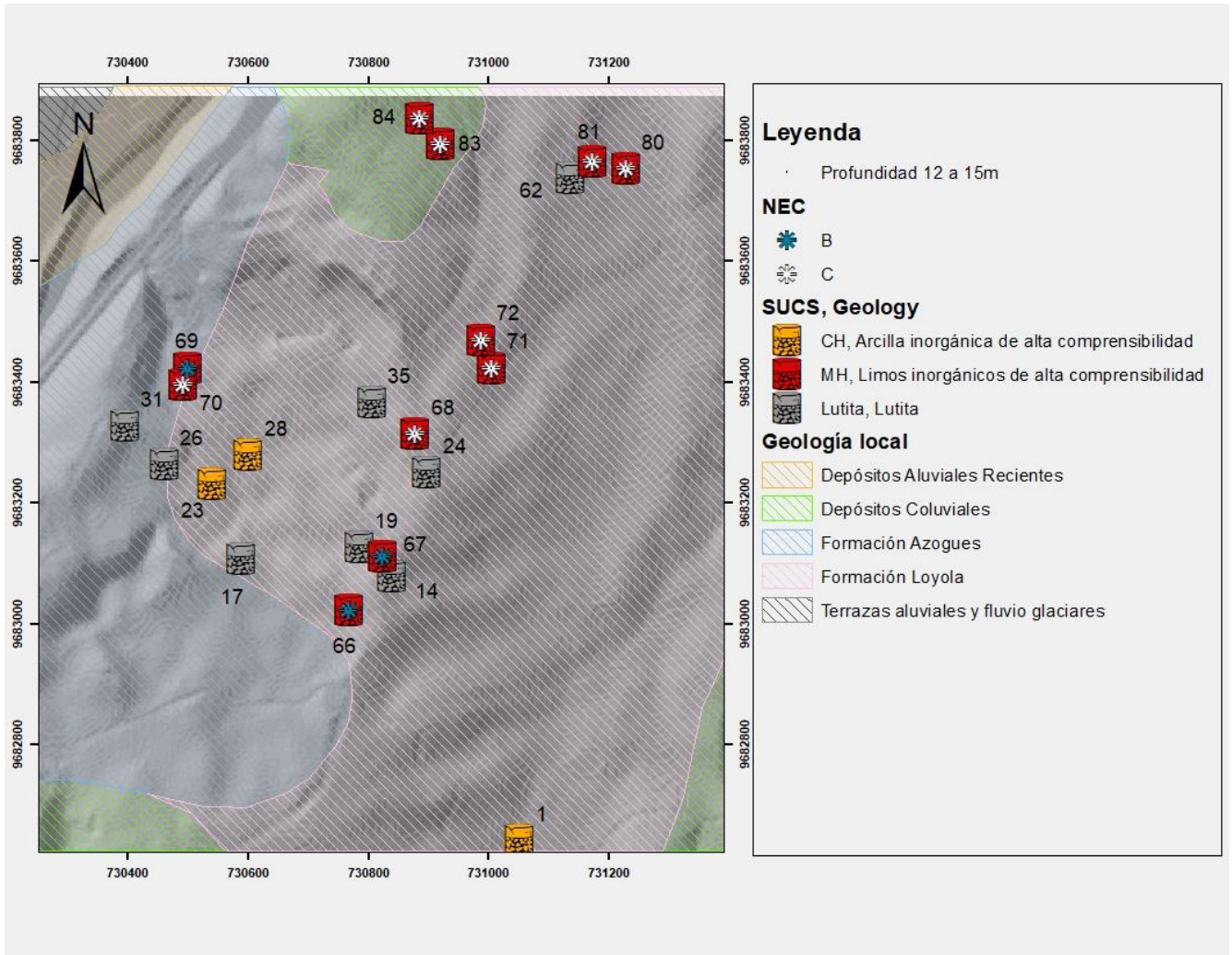
Nota. Fuente: Elaboración propia

4.5 Análisis en la profundidad de 12 a 15m

- Tipo de suelo a profundidad de 12 a 15 metros: A esta profundidad, la presencia de arcillas, representa solo el 4% de los datos. Sin embargo, sigue siendo preocupante encontrar arcillas a esa profundidad, por lo que se debe tener cuidado en esos puntos y cercanos a esos, ya que son suelos expansivos que pueden causar problemas geotécnicos. Los limos inorgánicos de alta compresibilidad constituyen el 13% de los datos, y también se encuentra suelo consolidado, lutita, en un 10% de los datos.
- Resultados de refracción sísmica: Los resultados de refracción sísmica indican la presencia de diferentes tipos de suelo en ciertos puntos, clasificados como suelo tipo B y C.
- Presencia del nivel freático: A esa profundidad y en esos datos no se ha encontrado presencia de nivel freático.

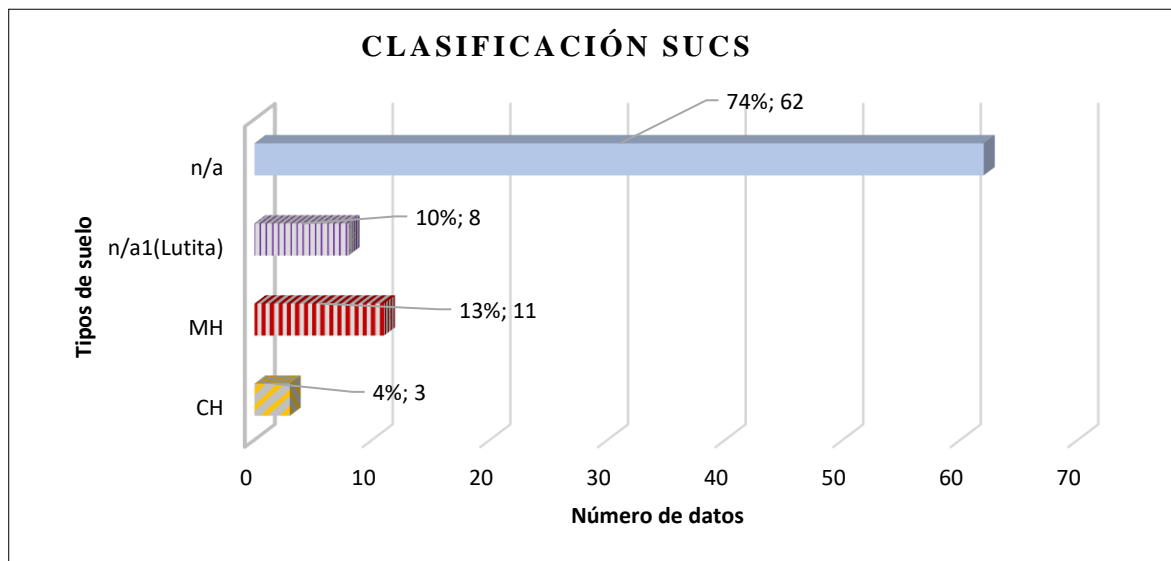
En resumen, se debe seguir teniendo en cuenta lo grave que es tener la presencia de arcillas de alta compresibilidad aún a esa profundidad.

Figura 43. Mapa geológico-geotécnico profundidad 12-15m



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 44. Gráfica de barras respecto a la clasificación SUCS de 12 a 15m



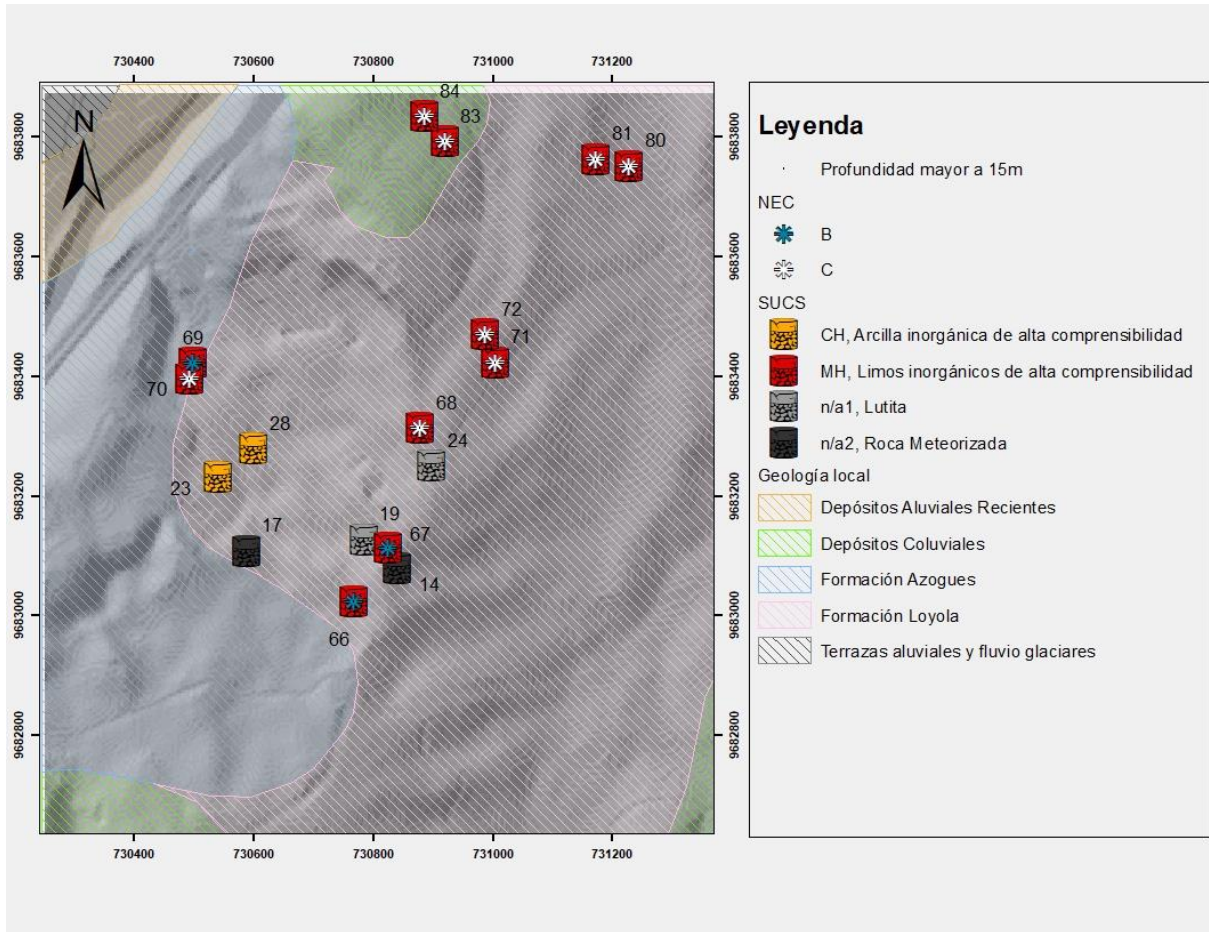
Nota. Fuente: Elaboración propia

4.6 Análisis en la profundidad mayor a 15m

- Tipo de suelo a profundidad mayor a 15 metros: A esta profundidad, la presencia de arcillas, representa solo el 4% de los datos. Sin embargo, sigue siendo preocupante encontrar arcillas a esa profundidad, por lo que se debe tener cuidado en esos puntos y cercanos a esos, ya que son suelos expansivos que pueden causar problemas geotécnicos. Los limos inorgánicos de alta comprensibilidad constituyen el 13% de los datos, y también se encuentra suelo consolidado, lutita roca meteorizada.
- Resultados de refracción sísmica: Los resultados de refracción sísmica indican la presencia de diferentes tipos de suelo en ciertos puntos, clasificados como suelo tipo B y C.
- Presencia del nivel freático: A esa profundidad y en esos datos no se ha encontrado presencia de nivel freático.

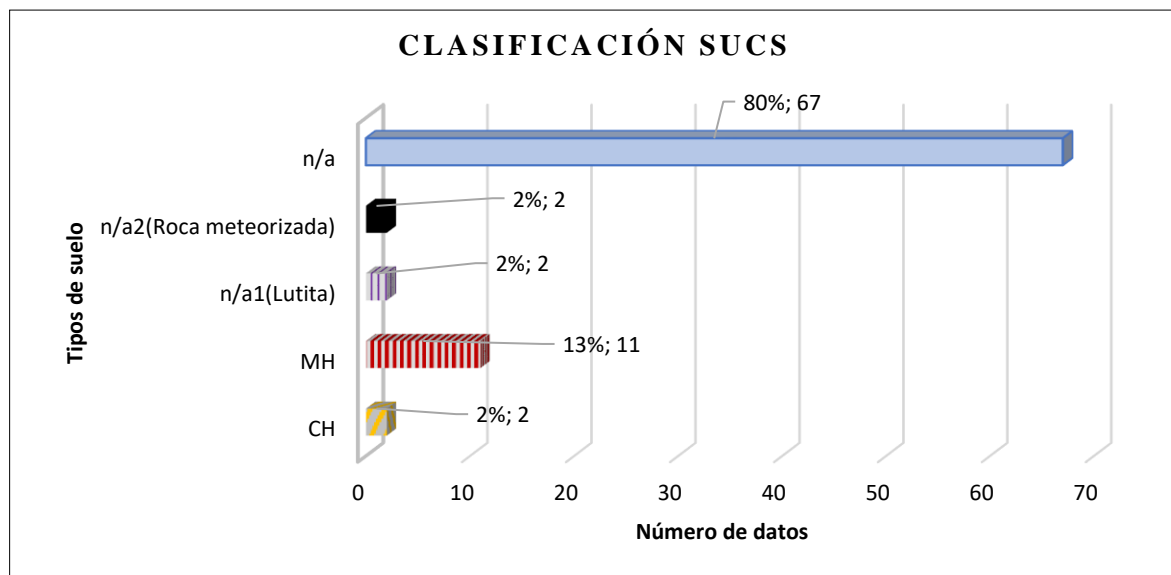
En resumen, se debe seguir teniendo en cuenta lo grave que es tener la presencia de arcillas de alta comprensibilidad aún a esa profundidad.

Figura 45. Mapa geológico-geotécnico profundidad mayor a 15m



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 46. Gráfica de barras respecto a la clasificación SUCS mayor a 15m



Nota. Fuente: Elaboración propia

4.7 Análisis del Modelo 3D Geológico-Geotécnico

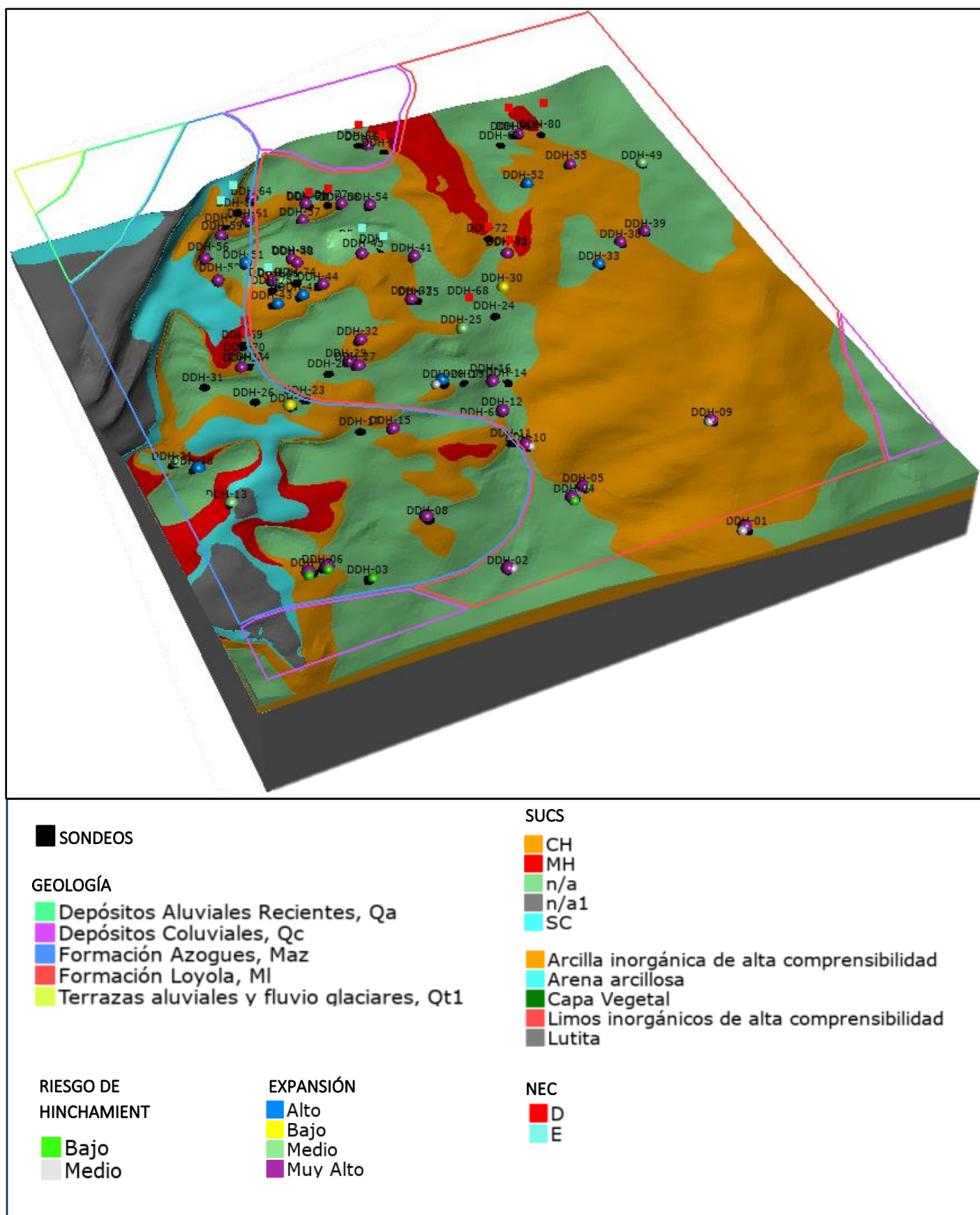
El modelo tridimensional geológico-geotécnico presenta una ilustración detallada de la composición y características del subsuelo de toda el área de estudio. A continuación, se describen la información:

- **Distribución geológica:** El modelo permite una clara visualización de la distribución geológica en el área. Se puede observar que la mayoría de los sondeos se concentran en las formaciones geológicas de Azogues y Loyola. Estas formaciones ocupan una parte significativa del área de estudio y son de particular interés en el análisis geotécnico.
- **Estratificación del subsuelo:** El modelo 3D presenta una estratificación del subsuelo en capas distintas. La primera capa corresponde a la vegetación superficial, con una profundidad típica de 0.5 metros. A continuación, la segunda capa muestra la presencia de arcillas inorgánicas de alta compresibilidad (CH), que es el suelo predominante y abarca toda la extensión del área. Esta capa es de importancia debido a las características geotécnicas problemáticas de las arcillas expansivas. El modelo también revela la presencia de otros tipos de suelos en capas subyacentes. Los limos inorgánicos de alta compresibilidad (MH) están presentes en ciertos puntos del área, mientras que la arena arcillosa (SC) se observa en una pequeña parte, finalmente, la cuarta capa muestra el suelo consolidado, en este caso, la lutita.
- **Grado de expansión y riesgo de hinchamiento:** El modelo muestra puntos que varían en tamaño y color. Los puntos más grandes representan el grado de expansión del suelo, lo que indica las áreas donde los suelos son más propensos a experimentar cambios volumétricos significativos debido a la presencia de agua. Los puntos más pequeños cercanos a los puntos grandes indican el riesgo de hinchamiento, señalando las áreas donde las propiedades expansivas son más pronunciadas y representan un desafío para la construcción.

- Clasificación NEC: El modelo también incluye la distribución de la clasificación del suelo según la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) en relación con la respuesta sísmica. Esto proporciona información adicional sobre cómo los diferentes tipos de suelos pueden reaccionar ante eventos sísmicos.

En resumen, el modelo tridimensional geológico-geotécnico brinda una representación visual completa de la distribución y características de los suelos en el área de estudio. Destaca la presencia predominante de arcillas inorgánicas de alta comprensibilidad, así como la estratificación de otras capas de suelo y la distribución de riesgos geotécnicos y clasificación sísmica. Este modelo es esencial para tomar decisiones informadas en el diseño y la construcción, ya que proporciona una comprensión profunda de la composición del subsuelo.

Figura 47. Modelo tridimensional geológico-geotécnico en un área definida entre las parroquias Cuenca-Nulti



Nota. Fuente: Elaboración propia

4.8 Análisis en perfil del Modelo 3D Geológico-Geotécnico

En el modelo tridimensional geológico-geotécnico, se han realizado 4 cortes que proporcionan una visión detallada en perfil de la composición del suelo:

Corte 1: En este corte, se observa que las arcillas inorgánicas de alta comprensibilidad (CH) están presentes de extremo a extremo, abarcando toda la sección. Esto indica una alta prevalencia de arcillas en esa profundidad específica.

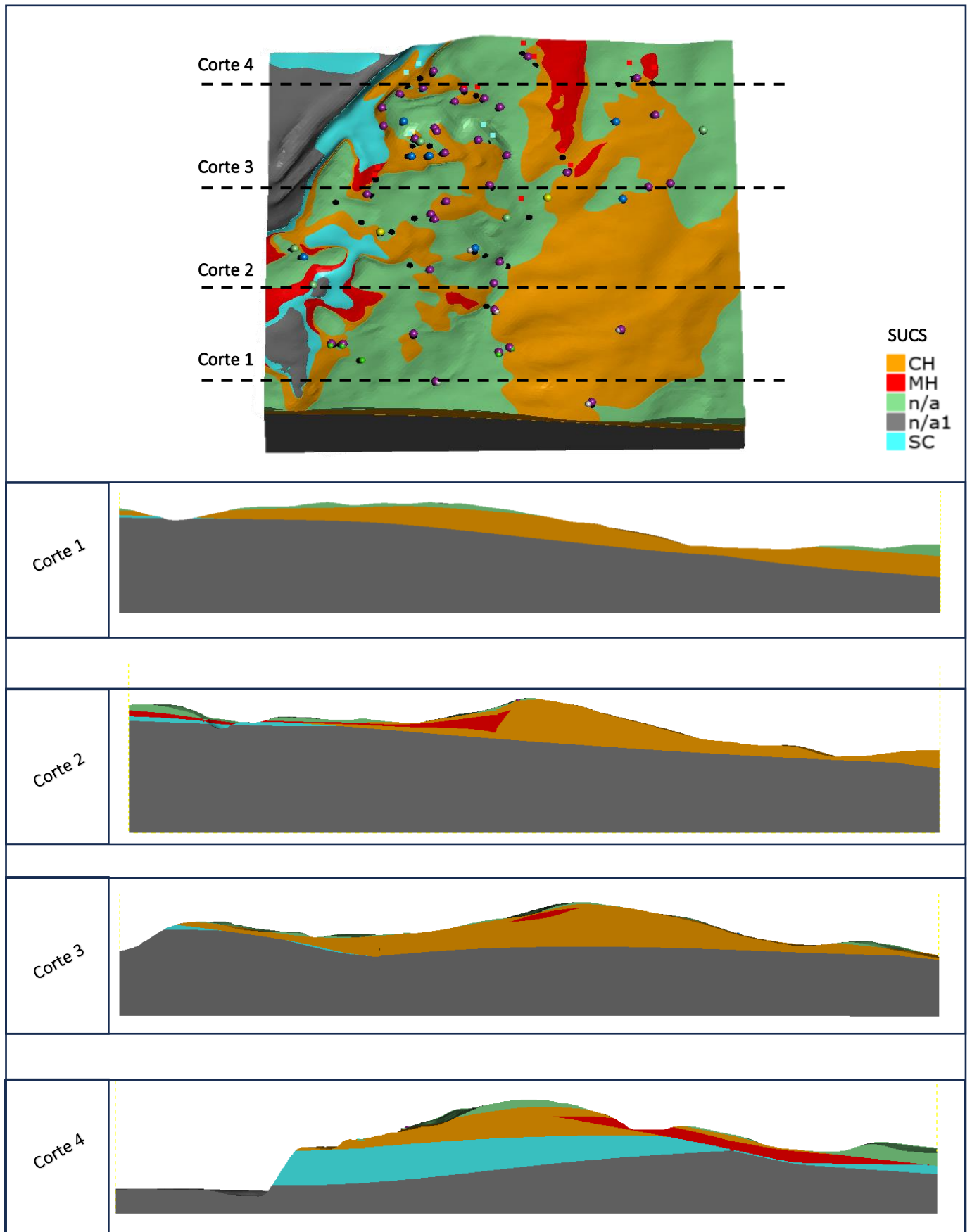
Corte 2: En el segundo corte, se empieza a notar la presencia de limos y arenas. Sin embargo, las arcillas siguen siendo dominantes en el perfil del suelo. Esto sugiere que aunque hay otros tipos de suelo presentes, las arcillas continúan siendo el componente principal.

Corte 3: En el tercer corte, se observa nuevamente una disminución en la presencia de limos y arenas. Las arcillas vuelven a ser el suelo dominante en esta profundidad. Esto indica una cierta consistencia en la composición del suelo a esa profundidad en la zona estudiada.

Corte 4: En el cuarto corte, se muestra una disminución en la presencia de arcillas. En su lugar, se observa la aparición de arenas arcillosas y limos. Este cambio en la composición sugiere una variación en la distribución de los tipos de suelo a esa profundidad específica.

Es importante destacar que los cortes realizados revelan cómo la composición del suelo varía en función de la profundidad y la ubicación. Además, se menciona que bajo las tres capas principales de suelo, la interpolación realizada por el programa muestra la presencia de lutita. La aparición de lutita en ciertos puntos está a partir de los 6, 9, y 12 metros esto indica que a esa profundidad ya existe la presencia de suelo consolidado.

Figura 48. Cortes en el Modelo tridimensional Geológico-Geotécnico



Nota. Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

- El suelo en esta ubicación, muestra claramente que en toda el área de estudio predominan las arcillas inorgánicas de alta comprensibilidad, existen puntos críticos donde se tienen arcillas a más de 9 y 15m, con un alta expansividad y riesgo de hinchamiento, por lo que construir en estos puntos o cercanos a estos implica tener un alto riesgo a cambios volumétricos, daños en la estructura como deformaciones y asentamientos diferenciales, lo que pondría en peligro la seguridad de las personas como también la estabilidad y durabilidad de la estructura. Además, construir sobre esos puntos críticos implica una desventaja económica ya que incrementaría el costo por las soluciones que se implementaría.
- La importación de la información ha enriquecido significativamente el análisis del suelo, como resultado, la clasificación SUCS permitió generar el perfil estratigráfico de la zona. Además, se logró representar el grado de hinchamiento, mediante los límites de Atterberg y la fórmula de Holtz 1959, se logró estimar la probable expansión en ciertos puntos. Asimismo, los datos obtenidos a través de la refracción sísmica han sido incorporados en el modelo tridimensional, proporcionando información esencial sobre el tipo de suelo para el análisis de resistencia sísmica de estructuras en dicho modelo."
- Los mapas realizados muestran información a diferentes profundidades, comprendiendo así la relación entre la topografía y las características geológicas-geotécnicas del terreno, además estos resultados respaldan la información del "Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Cuenca", que determina que esta zona tiene una amenaza media por la inestabilidad de los terrenos, limitando a construir viviendas solamente hasta 2 pisos.
- Finalmente, con el modelo tridimensional del subsuelo se determina que el área de estudio tiene características geotécnicas desfavorables, el suelo es inestable y desafiante

para la construcción porque existe la presencia de arcillas inorgánicas altamente comprensibles en toda el área a una profundidad de 3m, además existe un alto grado de expansión y riesgo de hinchamiento a esa profundidad. Asimismo, la presencia de nivel freático en algunos puntos, sin lugar a dudas dará lugar a problemas en la infraestructura. Con base a esto, puedo concluir que toda esta zona presenta un alto nivel de riesgo y es considerada crítica para la construcción poniendo en peligro la vida de las personas y pérdidas económicas por daños en la infraestructura, construir en esta zona conlleva considerablemente un elevado presupuesto para mejorar la capacidad la capacidad del suelo, su propiedades y características.

RECOMENDACIONES

- Para realizar el modelo tridimensional se sugiere disponer de una cantidad significativa de sondeos, ya que esto permitirá una interpolación más precisa y confiable.
- Este modelo tridimensional no implica que ya no debemos realizar más sondeos; más bien, representa una herramienta para resaltar la mala calidad del suelo y enfatizar la necesidad de realizar más estudios geotécnicos. Estos estudios son esenciales para obtener una comprensión más profunda del comportamiento del suelo y proporcionar una base sólida para futuras construcciones en esta área.
- Se sugiere también la creación de un portal abierto que facilite la carga de todos los sondeos y ensayos que se van realizando los profesionales, empresas o instituciones que se dedican a eso. Con el paso del tiempo esto fomentaría la acumulación de un conjunto cada vez más amplio de datos, permitiendo la construcción de modelos tridimensionales más precisos y alineados con la realidad del subsuelo.
- También recomiendo la generación de modelos tridimensionales geológico-geotécnicos en diversas áreas de la ciudad de Cuenca. Esto permitirá avanzar hacia la

creación de un completo modelo 3D del subsuelo de toda la ciudad en el futuro. Es importante que todos los ensayos realizados en distintas partes de la ciudad estén disponibles al público, de manera que los profesionales interesados en este campo puedan utilizar esta información para desarrollar modelos más precisos.

BIBLIOGRAFÍA

- Ayala, L. (2018, febrero 23). Litología y granulometría de los depósitos sedimentarios | Geología. *Explorock*. <https://www.explorock.com/litologia-y-granulometria-de-los-depositos-sedimentarios/>
- Clark, D. L., King, J. K., & Willis, G. (2017, mayo 2). *Practical Uses of Geologic Maps*. Utah Geological Survey. <https://geology.utah.gov/map-pub/survey-notes/practical-uses-geo-maps/>
- Das, B. (2011). *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, Séptima edición (7th ed)*. Cengage Learning.
- GAD NULTI. (2019). *Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Rural Nulti, Cantón Cuenca, Provincia del Azuay*. <https://gadpr-multi.gob.ec/>
- Geocontacto. (2023). *Leapfrog Geo 5.0*. Soluciones ambientales y geologicomineras. <https://geocontacto.com/download/leapfrog-geo-5-0/#page-content>
- Hillier, M. J., Schetselaar, E. M., De Kemp, E. A., & Perron, G. (2014). Three-Dimensional Modelling of Geological Surfaces Using Generalized Interpolation with Radial Basis Functions. *Mathematical Geosciences*, 46(8), 931-953. <https://doi.org/10.1007/s11004-014-9540-3>

- Macías Loor, A. O., Carvajal Rivadeneira, D. D., Cobos Lucio, D. A., Fienco Sánchez, B. E., Peralta Delgado, J. A., & Zambrano Acosta, J. M. (2018). *Mecánica de suelo. Tomo I* (1.ª ed.). Editorial Científica 3Ciencias. <https://doi.org/10.17993/IngyTec.2018.33>
- NEC. (2015). *Capítulos de la NEC (Norma Ecuatoriana de la Construcción) – MIDUVI – Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda*. MIDUVI. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>
- Olaya, V. (2020). *Sistemas de Información Geográfica*. Pdf. <https://volaya.github.io/libro-sig/>
- Pando, L., Flor-Blanco, G., & Llana-Fúnez, S. (2022). Urban geology from a GIS-based geotechnical system: A case study in a medium-sized city (Oviedo, NW Spain). *Environmental Earth Sciences*, 81(7), 193. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10287-y>
- Precupa, P. (1998). *Prevención de desastres naturales en la cuenca del Paute*. Cooperación Ecuador-Suiza. <https://es.scribd.com/document/506375500/PRECUPA-Geologia>
- Quinde, P., & Reinoso, E. (2016). Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la Ciudad de Cuenca. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 1-26. <https://doi.org/10.18867/ris.94.274>
- Rodríguez S, W. (2020). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Suelos y Cimentaciones*.
- Sepulveda Millán, F. N. (2021). *Sistemas de información geográfica y ordenamiento territorial en Colombia*. <http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/39674>
- Sociedad geológica de América. (2022, abril). *The Value of Geologic Mapping—GSA Position Statement 3*. <https://www.geosociety.org/GSA/gsa/positions/position3.aspx>

Solís, B., León, J., Tobar, J., & Coronel, O. (2022). *Léxico estratigráfico de las cuencas sedimentarias miocénicas del sur del Ecuador*.

ANEXOS

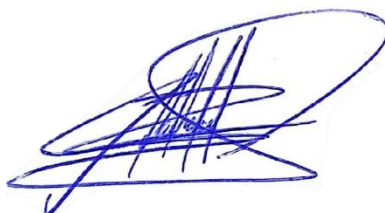
En el siguiente enlace, adjunto la información empleada en el proyecto de titulación. Esta información está disponible al público, con el propósito de que puedan utilizarla y mantenerla actualizada, de manera que dispongan de datos adicionales para realizar un modelado 3D más preciso.

https://drive.google.com/drive/folders/13WrZKxnszskFSNIA5DggGnPeuAHTGdX6?usp=drive_link

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

Yo, **Yomara Abigail Ramón Astudillo** portador de la cédula de ciudadanía N.º **1900817642**.
En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “**Modelo 3D geológico-geotécnico del subsuelo en una área definida entre las parroquias de Cuenca y Nulti utilizando datos existentes del suelo**” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 11 de octubre de 2023



F:

Yomara Abigail Ramón Astudillo

1900817642