

Nature-Inspired Soil Technologies: Micro Zonificación Geotécnica Superficial Del Cantón Rumiñahui - Ecuador.

Lenin Arcos Ribadeneira ^a; Eddy Fernando-Sanchez ^{a,b,*} and Jorge Albuja-Sánchez ^{a,b,*}

^aFaculty of Engineering, Laboratory of Materials Resistance, Soil Mechanics, Pavements and Geotechnics, Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE), Quito 170143, Ecuador. email: ventas@arconsultores.org

^b International Faculty of Innovation PUCE-Icam, Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE), Quito 170143, Ecuador. email: jdalbuja@puce.edu.ec

*Correspondence: jdalbuja@puce.edu.ec

Abstract

Este estudio presenta una microzonificación geotécnica superficial del cantón Rumiñahui (Ecuador), orientada a la caracterización de suelos para el diseño de cimentaciones y la planificación territorial. Se realizaron 80 sondeos entre 6 y 10 m de profundidad, aplicando el Ensayo de Penetración Estándar (SPT, ASTM D1586-18) y ensayos de laboratorio complementarios (granulometría, límites de Atterberg, contenido de humedad, densidad natural, resistencia al corte y clasificación SUCS). Los resultados revelan una marcada heterogeneidad asociada a la geología volcánica y depósitos laharíticos del Volcán Cotopaxi, identificándose suelos que varían de consistencia muy blanda hasta dura. El análisis estadístico del N SPT evidenció una correlación con la profundidad y la resistencia relativa (ρ de Spearman = 0.632, $p < 0.001$), mientras que las pruebas de Chi-cuadrado ($X^2 = 511.96$) y Razón de Verosimilitud ($G^2 = 549.41$) confirmaron la asociación ($p < 0.001$). La modelación espacial mediante SIG con el empleo de interpolación TIN permitió elaborar mapas de distribución de N60-SPT en un área de 5,060.6 ha. Los hallazgos muestran que la rigidez del suelo aumenta con la profundidad, lo que respalda el uso de correlaciones empíricas en la estimación preliminar de parámetros geotécnicos. La microzonificación propuesta constituye una herramienta práctica y costo-eficiente para estudios de ingeniería y la gestión de riesgos en un territorio altamente influenciado por la dinámica volcánica del Cotopaxi.

Keywords

PARÁMETROS GEOTÉCNICOS, SPT, RUMIÑAHUI, GIS

1. Introducción

La caracterización geotécnica del subsuelo es una etapa fundamental en el desarrollo de proyectos de ingeniería civil, ya que permite conocer las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que conforman el terreno, esenciales para el diseño seguro y eficiente de cimentaciones (Torres et al., 2025). Entre los parámetros más relevantes se encuentra la capacidad portante del suelo, la cual influye directamente en la estabilidad estructural de edificaciones e infraestructuras (Patwardhan & Metya, 2021).

De acuerdo con la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2014), el análisis de capacidad portante debe abordarse mediante dos estados límite: el estado límite último, que considera la resistencia al corte del suelo, y el estado límite de servicio, basado en los posibles asentamientos admisibles. Además, la NEC clasifica como estructuras de riesgo bajo aquellas edificaciones de hasta tres plantas con cargas de servicio inferiores a 800 kN, limitando la obligatoriedad de estudios geotécnicos para este tipo de construcciones (MIDUVI, 2014)

En el contexto urbano del cantón Rumiñahui, el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) establece que aproximadamente el 29,94 % del área urbana está destinada a construcciones de hasta tres pisos, lo cual resalta la importancia de contar con información geotécnica básica en este tipo de zonas (GAMUR, 2025)

La presente investigación contempla una caracterización geotécnica integral del suelo mediante el Ensayo de Penetración Estándar (SPT), técnica ampliamente utilizada por su simplicidad y capacidad de correlación con propiedades mecánicas del terreno. Las perforaciones se realizaron a profundidades entre 1 y 10 metros, permitiendo definir perfiles representativos del área. Las muestras obtenidas se sometieron a ensayos de laboratorio normalizados para determinar propiedades como la distribución granulométrica, límites de Atterberg, contenido de humedad, densidad natural y resistencia al corte por el ensayo de corte directo (Jarushi et al., 2025).

Estudios previos realizados en la zona, como el de Cando (Cando et al., 2024), han demostrado una correlación significativa entre los valores de SPT y parámetros geotécnicos clave, con un coeficiente de Pearson de hasta $r=0.78$, lo que valida su uso como herramienta predictiva en suelos de características similares. Estos antecedentes refuerzan la pertinencia de aplicar metodologías prácticas y costo-eficientes para estudios preliminares en áreas urbanas con crecimiento sostenido.

2. Materiales and Métodos

2.1. Locación

La Tabla 1 y la Tabla 2 presentan las coordenadas de las perforaciones realizadas en el área de estudio. En total, se ejecutaron 80 sondeos, alcanzando una profundidad acumulada de exploración de 510 metros, con profundidades individuales que varían entre 1 y 10 metros. Los ensayos fueron realizados conforme a la norma ASTM D1586-18 [8] y estuvieron a cargo del laboratorio de control de calidad Arcos & Ribadeneira Consultores, durante el período comprendido entre 2022 y 2024.

Tabla 1.- Coordenadas de los Diferentes Pozos de Análisis.							
Perforación	Coordenada Norte	Coordenada Este	Profundidad	Perforación	Coordenada Norte	Coordenada Este	Profundidad
1	783485	9964089	6	21	782957	9960308	6
2	783485	9964077	6	22	781179	9967225	8
3	783489	9964082	6	23	781180	9967222	7
4	783343	9968673	7	24	781187	9967223	8
5	783362	9968662	7	25	783866	9959107	6
6	783358	9968645	7	26	783864	9959108	6
7	788513	9963428	6	27	783857	9959114	6
8	788526	9963414	6	28	780990	9965227	6
9	788528	9963441	6	29	780989	9965218	6
10	782158	9965498	6	30	780983	9965210	6
11	782150	9965488	6	31	783519	9964070	6
12	782164	9965487	6	32	783503	9964082	6
13	786587	9963850	6	33	783523	9964090	6
14	786594	9962858	6	34	785003	9964542	6
15	786580	9962864	6	35	785016	9964562	6
16	785672	9963131	6	36	785003	9964564	6
17	785680	9963130	6	37	782102	9964616	6
18	785687	9963138	6	38	782108	9964613	6
19	782982	9960298	6	39	784876	9964586	6
20	782973	9960304	6	40	784886	9964582	6

Tabla 1. Coordenadas de los Diferentes Pozos de Análisis.

Tabla 2.- Coordenadas de los Diferentes Pozos de Análisis.							
Perforación	Coordenada Norte	Coordenada Este	Profundidad	Perforación	Coordenada Norte	Coordenada Este	Profundidad
41	784896	9964588	6	61	779342	9962206	6
42	783276	9961678	6	62	779352	9962194	6
43	783277	9961707	6	63	779344	9962192	6
44	783290	9961690	6	64	785908	9960354	6
45	782654	9967006	6	65	785890	9960349	6
46	782650	9967001	6	66	785414	9963702	6
47	781297	9966357	8	67	785408	9963710	6
48	781304	9966357	8	68	785415	9963712	6
49	781310	9966336	8	69	783002	9966582	6
50	781312	9966334	8	70	783005	9966597	6
51	788651	9963069	6	71	783015	9966601	6
52	788620	9963042	6	72	787043	9962916	6
53	788603	9963053	6	73	787038	9962912	6
54	788615	9963071	6	74	785080	9963375	6
55	782578	9963543	6	75	785085	9963366	6
56	782564	9963551	6	76	784502	9963180	10
57	782570	9963541	6	77	784508	9963187	10
58	784160	9961586	6	78	784510	9963198	10
59	784170	9961578	6	79	783444	9962739	6
60	784145	9961577	8	80	783458	9962761	6

Tabla 2. Coordenadas de los Diferentes Pozos de Análisis.

En la figura 1 se muestra las perforaciones realizadas para el área de estudio a las diferentes profundidades de sondeo.

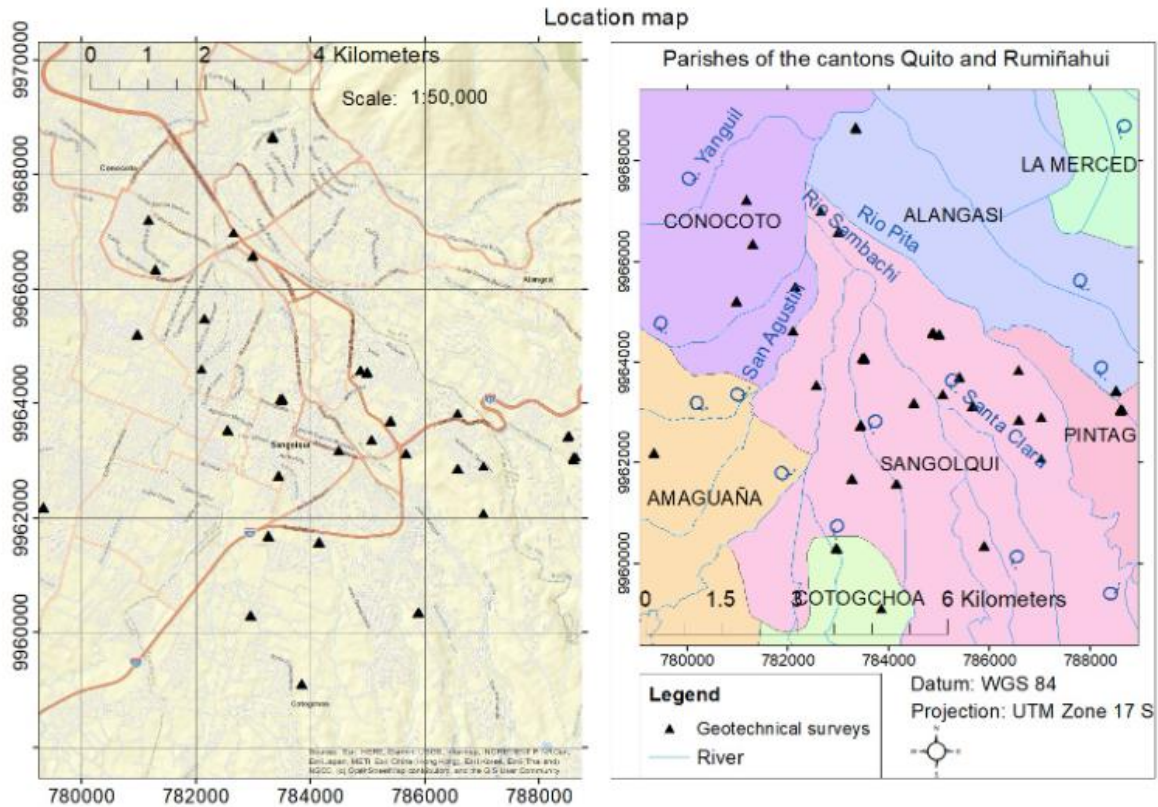


Figure 1.- Área de estudio (Coordinate system: Datum WGS 84)

2.2. Geología

El área de estudio se localiza en el basamento del Valle Interandino, dentro de un segmento de origen volcánico-tectónico comprendido entre los volcanes Pasochoa e Ilaló (GADMUR, 2019). Desde el punto de vista geológico, se identifican las siguientes unidades litológicas:

- Unidad volcánica Pasochoa: compuesta principalmente por andesitas y depósitos piroclásticos, resultado de episodios eruptivos intermedios.
- Unidad volcánica Sincholagua: conformada por lavas de composición intermedia a ácida, acompañadas de depósitos piroclásticos asociados.
- Formación Chiche: caracterizada por la presencia de micro-conglomerados con matriz limo-arenosa y niveles de areniscas, que indican ambientes de sedimentación fluvial antiguos.

- Formación Cangahua: integrada por tobas andesíticas de color café y capas de ceniza, depositadas durante eventos volcánicos cuaternarios.
- Depósitos superficiales recientes: se reconocen depósitos coluviales, coluvio-aluviales y fluvio-lacustres, reflejo de la dinámica geomorfológica activa en la región (GAMUR, 2025).

Asimismo, se identifican depósitos laharíticos derivados de erupciones históricas del volcán Cotopaxi, transportados a través de diversos sistemas de drenaje secundarias como son la quebradas Sindipamba, Víctor Punina, zonas nororientales y orientales que convergen en la cuenca del río Pita (Andrade et al., 2022a).

La Figura 2 presenta el mapa geológico del área de estudio, elaborado por el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IGEMI, 1983) ,donde se evidencian las principales unidades mencionadas.

Desde el punto de vista geomorfológico, se observa una distribución espacial diferenciada de los materiales: los depósitos aluviales y coluviales predominan en las zonas bajas y en los márgenes fluviales, evidenciando procesos actuales de transporte y acumulación de sedimentos. En contraste, los materiales volcánicos particularmente andesitas y depósitos piroclásticos se encuentran en zonas elevadas, en concordancia con la influencia volcánica que ha modelado la topografía regional.

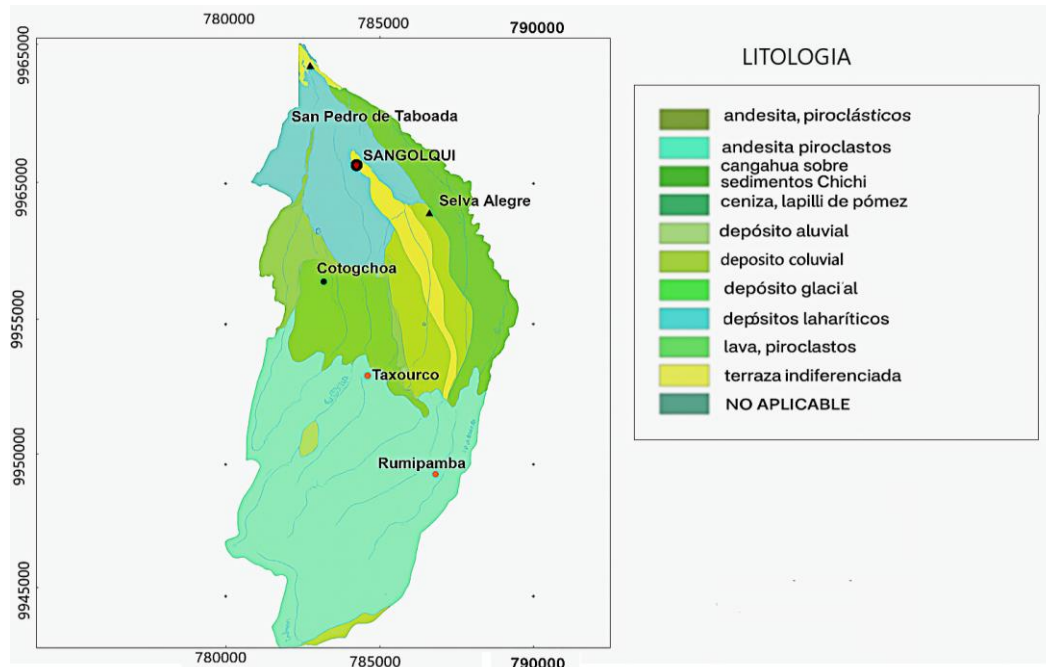


Figure 2.- Mapa Geológico Cantón Rumiñahui (Coordinate system: Datum WGS 84)(IGEMI, 1983)

2.3. Influencia Volcánica del Cotopaxi y dinámica de lahares

El volcán Cotopaxi es un estratovolcán activo situado en la Cordillera Oriental de los Andes ecuatorianos. Se encuentra aproximadamente a 40 km al sureste de la ciudad de Sangolquí y está compuesto por estratos alternos de lava solidificada, ceniza volcánica y materiales piroclásticos (Troncoso et al., 2017). El volcán Cotopaxi Presenta un casquete glacial con una superficie aproximada de 11 km² (Sierra et al., 2019) ,y alcanza una altitud de 5.897 m.s.n.m., lo que lo convierte en uno de los volcanes activos más relevantes del país, tanto por su tamaño como por el alto potencial destructivo en caso de una erupción significativa (Andrade et al., 2022b).

Durante eventos eruptivos, el Cotopaxi puede generar lahares primarios, flujos volcánicos densos compuestos por una mezcla de agua (fase líquida) y material volcánico (fase sólida), incluyendo bloques, ceniza, fragmentos de roca, árboles y objetos de origen antrópico, movilizados por la acción de la gravedad a través de drenajes naturales (Ordóñez et al., 2013).

En el flanco norte del volcán, al menos seis cárcavas drenan hacia la llanura de la quebrada Chilcahuaycu, la cual desemboca en la base del cerro Ingoloma. A su vez, las quebradas Yanasacha y Yanashaco cruzan esta llanura, y todas estas corrientes convergen para formar el río El Salto, principal afluente del río Pita (Andrade et al., 2022b) .Se estima que el volumen de material movilizado durante un evento eruptivo puede superar los 60×10^6 m³ de depósitos

laharíticos (Aguilera et al., 2004) . Estos sedimentos son principalmente depositados en los márgenes norte del Cotopaxi, afectando directamente al cauce de los ríos Pita y El Salto. Debido a la morfología del canal en el sector conocido como La Caldera en Rumipamba, parte del flujo puede desviarse y desbordarse hacia el río Santa Clara.

Los lahares depositados sobre los ríos Pita y Santa Clara son posteriormente transportados hacia zonas densamente pobladas del cantón Rumiñahui, como Selva Alegre, El Triángulo y Sangolquí (Aguilera et al., 2004) , generando un alto riesgo para la población e infraestructura.

Los registros históricos indican que la última gran erupción del Cotopaxi ocurrió en 1877, precedida por tres meses de disturbios sísmicos y erupciones menores (Andrade et al., 2022b). Los principales depósitos generados durante este evento incluyeron caída de tefra, flujos piroclásticos con presencia de bombas volcánicas y lahares primarios (Andrade et al., 2022b).

Según el Plan de Ordenamiento Territorial del cantón Rumiñahui para el año 2025, se estima que al menos 368 hectáreas del territorio presentan riesgo alto de amenaza por lahares (GAMUR, 2025) .Para esta investigación, se realizaron estudios geotécnicos y sondeos en los sectores denominados como La Colina, El Triángulo y El Choclo, áreas que evidencian influencia directa de depósitos laharíticos.

En la Figura 3 se ilustran las principales zonas afectadas por lahares, de acuerdo con los estudios realizados por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional en 2018 (Sierra et al., 2019)

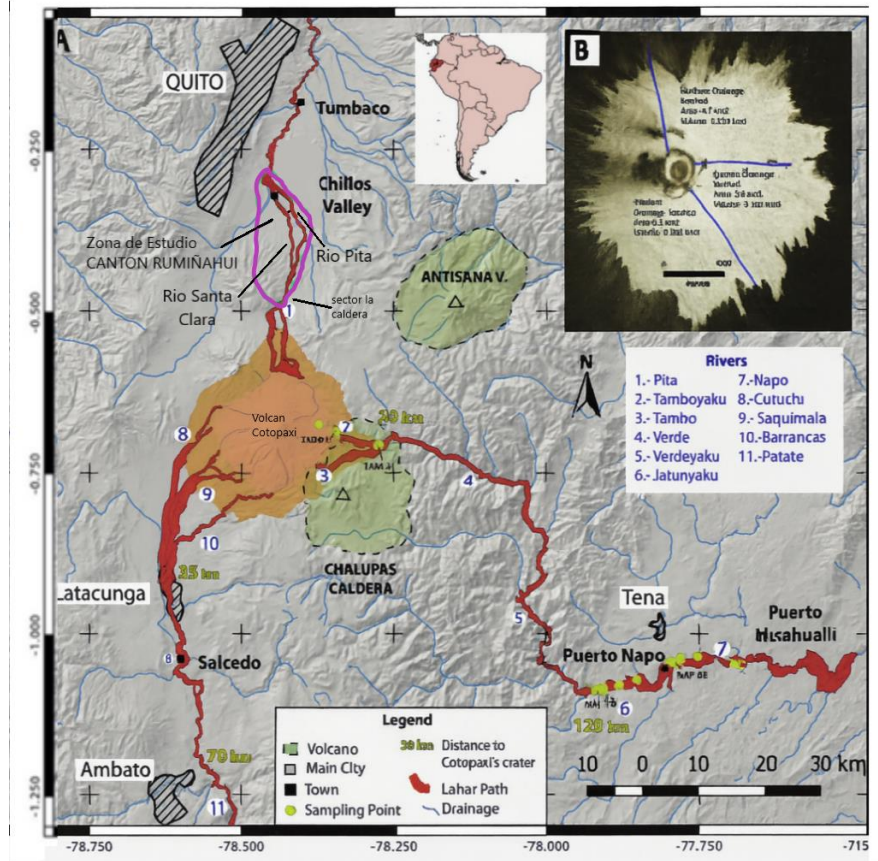


Figure 3.- Afluentes de flujo lahar volcán Cotopaxi, (Coordinate system: Datum WGS 84)(Sierra et al., 2019)



Figure 4.1- Material tipo pómez encontrado a una profundidad de 2.50m para el sondeo #45 782654 m N y 9967006 m E zona de influencia de lahar., (Coordinate system: Datum WGS 84)



Figure 4.2- Sitio de sonde #45 782654 m N y 9967006 m E zona de influencia de lahar, (Coordinate system: Datum WGS 84)

2.4. Clima

En las Tablas 3 y 4 se presentan las variables climáticas obtenidas de la estación pluviométrica M0113 Uyumbicho (Latitud: 0.39° S, Longitud: 78.52° W), ubicada aproximadamente a 10 km al sur de Sangolquí. Para el análisis climatológico, se utilizaron adicionalmente los datos de la estación meteorológica M0024 IÑAQUITO del INAMHI (Latitud: 0.17° S, Longitud: 78.48° W), localizada a unos 15 km del área de estudio. Estas estaciones representan las más cercanas al sitio de análisis y proporcionan información confiable para la caracterización climática regional (INAMHI, 2017).

El procesamiento y cálculo de los distintos parámetros climáticos se realizó mediante el software especializado CropWat 8.0 el mismo que calcula las necesidades hídricas basándose en datos edafológicos y climáticos, desarrollado por la FAO para estimaciones hidrológicas y de balance hídrico en condiciones agrícolas. (CropWat | Tierras y Aguas | Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura | Land & Water | Food and Agriculture Organization of the United Nations, n.d.)

TABLA 3.- Variables Climáticas, Estación M0024 INAMHI IÑAQUITO Latitud: 0.17 S, Longitud:78.48 W							
Month	Min Temp	Max Temp	Humidity	Wind	Sun	Rad	ETo
	°C	°C	%	km/day	hours	MJ/m²/day	mm/day
January	10.9	22.9	73	55	6.4	18.7	3.44
February	10.8	20.1	78	41	3.0	14.1	2.68
March	10.0	21.7	74	46	4.8	17.1	3.13
April	10.9	22.0	72	48	4.3	15.8	2.99
May	11.1	20.8	78	43	4.0	14.5	2.65
June	10.5	22.8	65	60	6.5	17.4	3.17
July	10.6	22.4	62	72	6.8	18.0	3.32
August	10.7	22.7	66	67	6.5	18.7	3.44
September	10.5	23.5	65	70	6.2	18.9	3.61
October	10.4	22.0	75	50	4.7	16.6	3.12
November	9.9	21.6	77	46	4.6	16.1	2.96
December	10.5	21.6	76	60	5.9	17.7	3.16
Average	10.6	22.0	72	55	5.3	17.0	3.14

Tabla 3. Variables climáticas, Estación M0024 INAMHI IÑAQUITO Latitud: 0.17 S, Longitud:78.48 W

(INAMHI, 2017)

TABLA 4.- Variables Pluviométricas, Estación M0113 UYUMBICHO Latitud: 0.39 S, Longitud:78.52		
Mes	Rain	Eff rain
	mm	mm
January	101.1	84.7
February	244.0	148.7
March	120.7	97.4
April	95.3	80.8
May	268.9	151.9
June	6.2	6.1
July	9.6	9.5
August	60.4	54.6
September	28.8	27.5
October	151.7	114.9
November	71.9	63.6
December	68.6	61.1
Total	1227.2	900.7

Tabla 4. Variables pluviométricas, estación M0113 UYUMBICHO Latitud: 0.39 S, Longitud:78.52

2.5. Hidrología

El Cantón Rumiñahui se encuentra dentro de las microcuencas de los ríos Capelo, El Salto, San Nicolás, Santa Clara, El Pedregal entre otros drenajes menores.(GADMUR, 2019)

En la tabla 5 se indica la longitud y área de influencia de los principales ríos del cantón Rumiñahui. (GADMUR, 2019) (SUAREZ, 2022), en la tabla 6 se indica el cálculo de los caudales temporales de las principales microcuencas esto mediante la ecuación racional del Kuichling (*Kuichling, E. (1889) The Relation between the Rainfall and the Discharge of Sewers in Populous Districts. Transactions of ASCE, 20, 1-60. - References - Scientific Research Publishing, n.d.*)

$$Qp = 0.278 * CiA$$

En donde (C) es el coeficiente de escorrentía, (A) área de la cuenca expresa en Km², (i) es la intensidad de la lluvia de diseño en función del tiempo de concentración y el periodo de retorno, los cálculos están considerado un periodo de retorno de 100 años

$$tc = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

En donde (tc) es el tiempo de concentración , (L) longitud del río , (S) pendiente de la cuenca

Tabla5. Área Y Longitud de Influencia de los Principales Ríos del Cantón Rumiñahui		
Micro Cuenca	AREA km2	LONGITUD km
Rio Santa Clara	49,32	21,71
Rio San Nicolás	26,25	16,88
Rio Capelo	3,48	2,51
Rio Salto	9,07	1,46

Tabla 5. Área y longitud de influencia de los principales ríos del cantón Rumiñahui(SUAREZ, 2022)

(GADMUR, 2019)

Tabla 6. Caudales Temporales Principales Microcuencas del Cantón Rumiñahui.		
Microcuenca	Área (km²)	Caudal temporal (m³/s)
Río Santa Clara	49.32	2.20
Río San Nicolás	26.25	1.17
Río Capelo	3.48	0.155
Río Salto	9.07	0.404

Tabla 6. Caudales temporales principales microcuencas del cantón Rumiñahui.

3. PRUEBAS EN SITIO

En la tabla 2 se observa las coordenadas de los pozos de análisis realizados, la obtención de muestra tipo alterada se realizó mediante muestreador de cuchara partida tipo SPT en cambio para la obtención de muestras inalteradas se realizó mediante muestreo tipo Shelby (ASTM, 2015) y tipo calicata, las muestras tipo Shelby fueron almacenadas manteniendo la verticalidad del sentido de toma a fin de garantizar que no exista perturbaciones en los resultados de laboratorio. (Lim et al., 2019)

Para los cálculos correspondientes se empleará los valores de N60 corregidos de los valores recopilados en campo en función del tipo de martinete, tipo de muestreador, diámetro de varilla y para el caso de los materiales granulares por sobre carga efectiva (Coduto et al., 2016), para la presente investigación; se realizó sondeos mediante un muestreo

aleatorio simple para verificar y validar los valores obtenidos en los planos generados en GIS, dichos pozos de perforación no se indica en las coordenadas de ubicación por realizarse posterior a la modelado inicial.

A continuación, en la tabla 7 se indica las coordenadas y los valores N60 del ensayo SPT para los sondeos de verificación realizados

Tabla 7. Coordenadas y profundidad de pozos de verificación de modelado GIS				
PERFORACION	COORDENADA NORTE	CORDENADA ESTE	PROFUNDIDAD mt	SECTOR
1	782551	9957359	6,00	Cotogchoa
2	785157	9960577	6,00	Cotogchoa
3	784447	9965884	6,00	San Rafael
4	781681	9969658	6,00	Conocoto
5	785268	9962566	6,00	Selva alegre
6	781742	9965563	6,00	Fajardo

Tabla 7. Coordenadas y profundidad de pozos de verificación de modelado GIS



Figura 5. Muestreo tipo calicata sondeo #55 782578 m N y 9963543 m E Sector de Fajardo. (Coordinate system: Datum WGS 84)

4. PRUEBAS DE LABORATORIO

Las pruebas de laboratorio se realizaron en el laboratorio de suelos Arcos & Ribadeneira Consultores. En la tabla 8 se presenta las pruebas de laboratorio realizadas a las muestras obtenidas en campo tanto para las muestras alteradas y no alteradas, en la tabla 10 se indica los resultados del ensayo de resistencia al corte se realizó con esfuerzos efectivos situación a largo plazo (consolidado y drenado) con muestra inalterada, el total de muestras de análisis para clasificación SUCS fue de 500 ensayos los resultados se indica en la tabla 10.

Tabla 8. Ensayos de Laboratorio Para Muestras Alteradas e Inalteradas		
PRUEBA DE LABORATORIO	PARAMETRO	REFERENCIA
Contenido de humedad	w%	(ASTM, 2019)
Granulometría	Clasificación partículas	(ASTM, 2006)
Limites de Atterberg	LL.LP.IP (%)	(ASTM, 2017b)
Clasificación sucs	clasificación del suelo	(ASTM, 2017c)
Peso unitario	γ	(ASTM, 2021)
Corte directo	c' , ϕ'	(ASTM, 2017a)

Tabla 8 Ensayos de laboratorio para muestras alteradas e inalteradas.

5. RESULTADOS

5.1. Resultados del ensayo SPT

A continuación figura 6 , se indica los valores N del ensayo SPT para el segundo y tercer incremento para una profundidad de hinchado de 30 cm, no se reporta los valores del primer incremento N de los primeros 15cm de perforación por tratarse de la penetración de asiento (ASTM, 2017c), Para el grafico 7 se indica la dispersión de los números del N SPT para cada metro de análisis



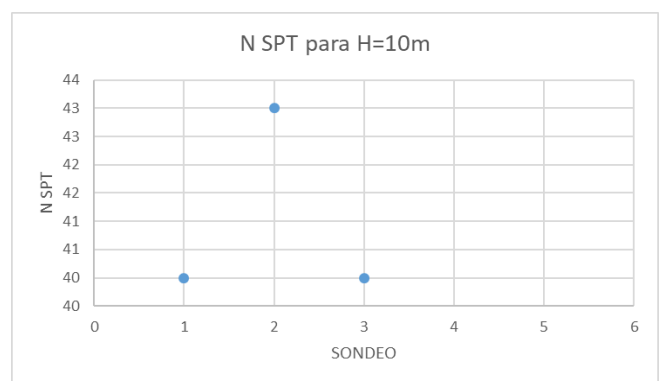
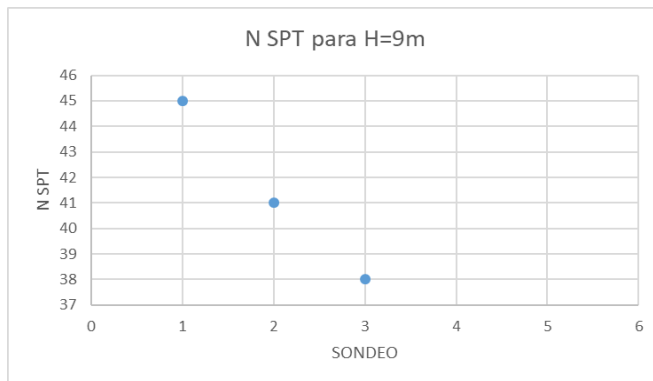
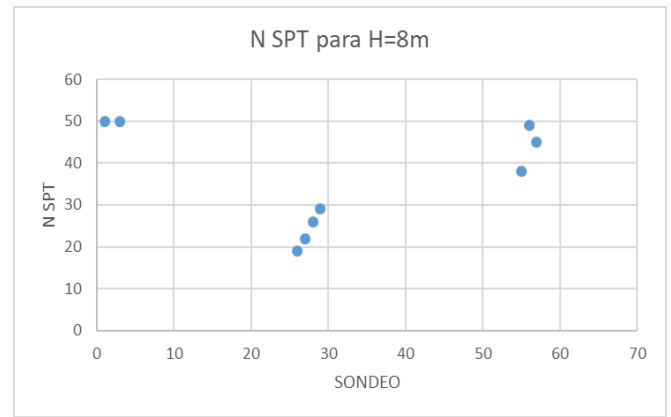
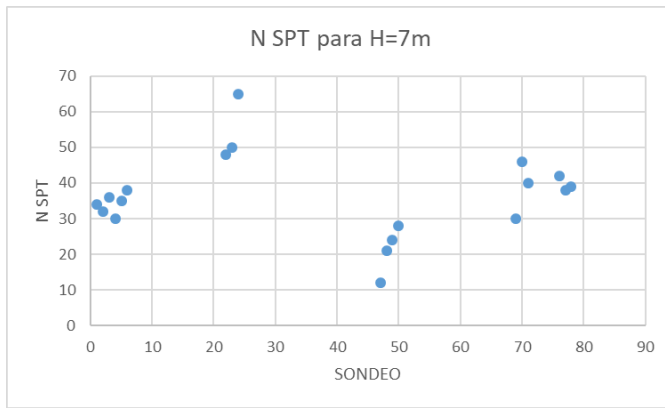


Figure 6.- Valores del Valores de N SPT para segundo y tercer incremento en función de la profundidad.

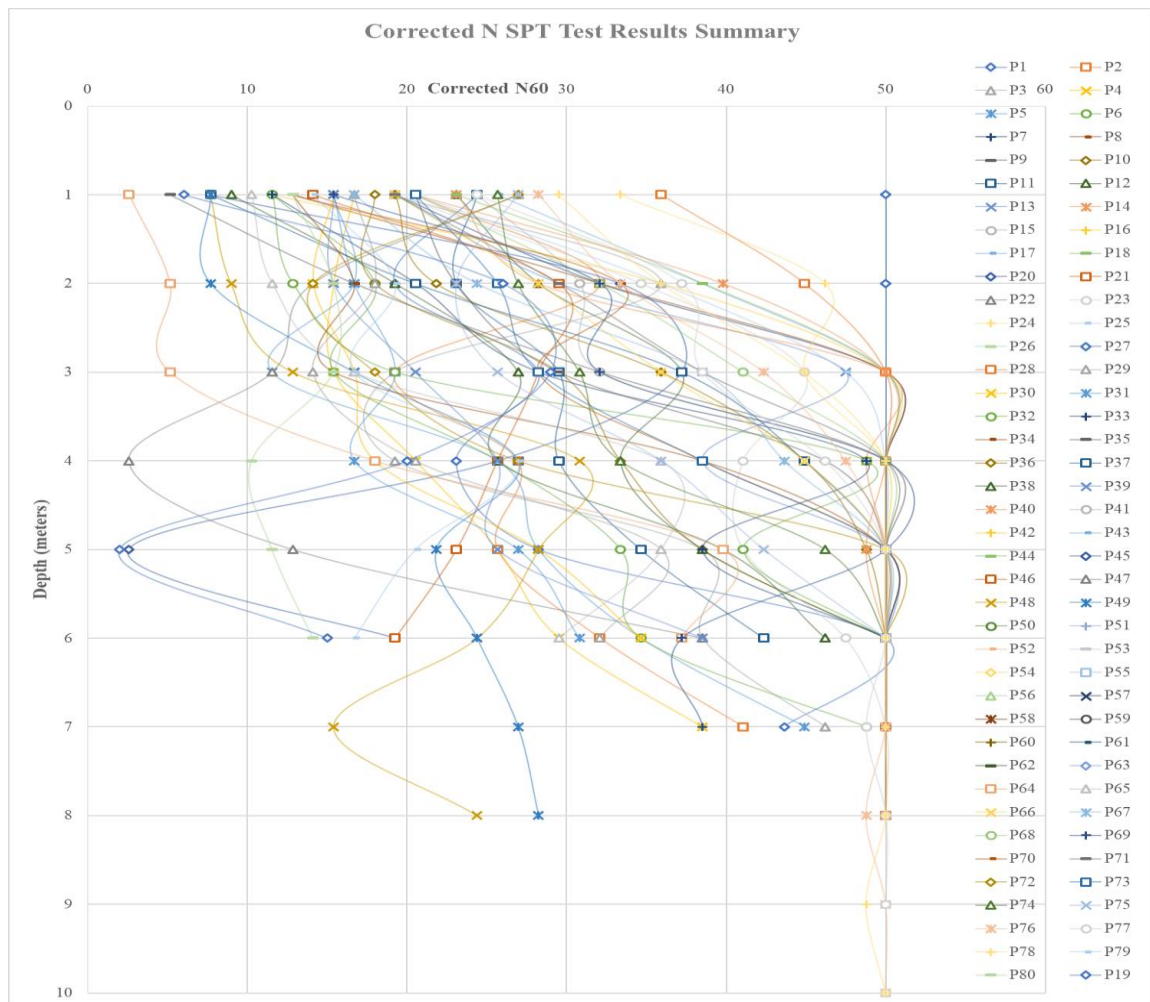


Figure 7. Dispersión de los números del N SPT corregidos para cada metro de análisis.

5.2. Peso unitario del suelo

En la tabla 9 y figura 8 se indica los resultados obtenidos para el ensayo de peso unitario (ASTM, 2021) para las muestras inalteradas, la profundidad de auscultación comprendida de 2.00 m.

Tabla 9. Valores de Densidad Bulk para Muestras Inalteradas. (Coordinate system: Datum WGS 84)									
SONDEO	COORDENADAS		DENSIDAD SUELO TON/M3	PROFUNDIDAD m	SONDEO	COORDENADAS		DENSIDAD SUELOS TON/M3	PROFUNDIDAD m
2	783485	9964089	1,61	1,5	46	782654	9967006	1,51	2
5	783343	9968673	1,51	2	48	781297	9966357	1,59	2,5
8	788513	9963428	1,42	1,6	50	781310	9966336	1,47	2
11	782158	9965498	1,52	2	52	788651	9963069	1,46	1,5
14	786587	9963850	1,42	1,5	56	782578	9963543	1,67	2
17	785672	9963131	1,43	2	59	784160	9961586	1,67	2,5
20	782982	9960298	1,52	2	62	779342	9962206	1,56	2
23	781179	9967225	1,65	2,5	65	785908	9960354	1,42	1,5
26	783866	9959107	1,61	2	67	785414	9963702	1,43	2
29	780990	9965227	1,52	2	70	783002	9966582	1,58	2
32	783519	9964070	1,46	1,5	73	787043	9962916	1,53	2,5
35	785003	9964542	1,5	1,6	75	785080	9963375	1,48	2
38	782102	9964616	1,52	1,8	77	784502	9963180	1,62	1,5
40	784876	9964586	1,48	2	80	783444	9962739	1,47	2
43	783276	9961678	1,5	2					

Tabla 9.- Valores de densidad Bulk para muestras inalteradas. (Coordinate system: Datum WGS 84)

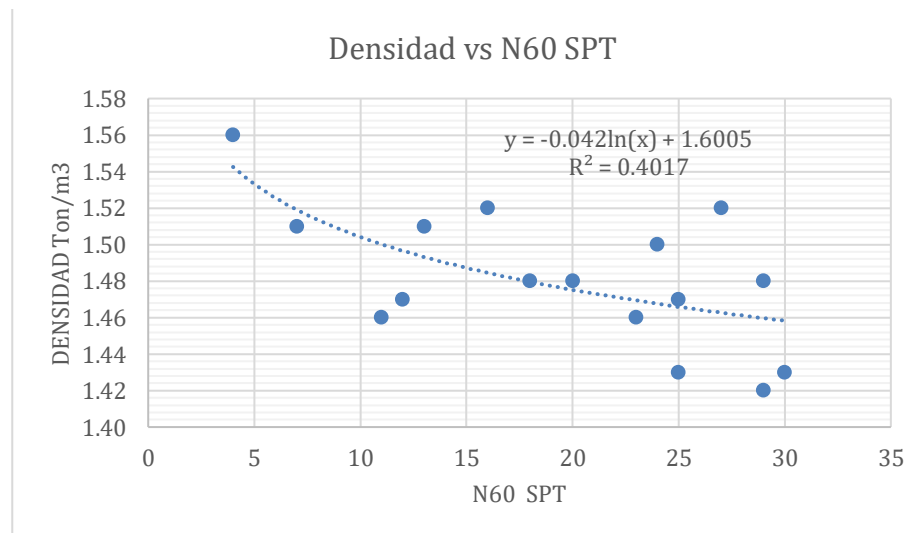


Figura 8.- Valores de densidad en función de la profundidad

5.3. Valores de resistencia al corte

En la tabla 10 se indica los parámetros de resistencia al corte efectivos, obtenidos para el ensayo de corte directo (ASTM, 2017a) en condición a la largo plazo consolidado y drenado, para las muestras inalteradas, la profundidad de auscultación está comprendida entre 1.00 m y 2.00 m.

Tabla 10. Valores de Cohesión y Angulo de Fricción.				
Sondeo	Coordenadas		Cohesión Kg/Cm ²	Angulo de Fricción
22	781179	9967225	0,17	30,39
51	788651	9963069	0,13	14
58	784160	9961586	0,16	27,2
64	785908	9960354	0,28	17,15

Tabla 10. Valores de cohesión y Angulo de fricción. (Coordinate system: Datum WGS 84)

5.4. Clasificación SUCS

En la tabla 11 se indica la clasificación mediante el sistema unificado de clasificación de suelos SUCS (ASTM, 2017c) para los diferentes sondeos de ensayo, la profundidad está comprendida en 6 y 10 metros.

Tabla 11 Clasificación SUCS. (Coordinate system: Datum WGS 84)										
Sondeo	COORDENADAS		1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m
1	783485	9964089	ML	ML	ML	SM	SM	SM	SM	
2	783485	9964077	ML	ML	ML	ML	ML	ML	ML	
3	783489	9964082	ML	ML	ML	ML	ML	ML	ML	
4	783343	9968673	ML	ML	ML	SM	SM	SM	SM	
5	783362	9968662	ML	SM	SM	SM	SM	SM	SM	
6	783358	9968645	ML	ML	SM	SM	SM	SM	SM	
7	788513	9963428	ML	ML	ML	ML				
8	788526	9963414	ML	ML	ML	ML				
9	788528	9963441	ML	ML	ML	ML				
10	782158	9965498	SM	SM	SM	SM	SM	SM		
11	782150	9965488	SM	SM	SM	SM	SM	SM		
12	782164	9965487	SM	SM	SM	SM	SM	SM		
13	786587	9963850	SM	SM	SM	SM	SM	ML		
14	786594	9962858	SM	SM	SM	SM	SM	SM		
15	786580	9962864	SM	SM	SM	SM	SM	ML		
16	785672	9963131	SM	SM	SM	SM				

17	785680	9963130	SM	SM	ML	ML				
18	785687	9963138	ML	ML	ML	ML				
19	782982	9960298	ML	SM	SM	SM	SM	SM		
20	782973	9960304	ML	SM	SM	SM	SM	SM		
21	782957	9960308	GM	GM	GM	SM	SM	SM		
22	781179	9967225	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM
23	781180	9967222	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	
24	781187	9967223	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM
25	783866	9959107	ML	ML	ML	ML	ML	ML		
26	783864	9959108	ML	ML	ML	ML	ML	ML		
27	783857	9959114	ML	ML	ML	ML	ML	ML		
28	780990	9965227	SM	SM	SM	SM	SM	SM		
29	780989	9965218	SM	SM	SM	SM	SM	SM		
30	780983	9965210	SM	SM	SM	SM	SM	SM		
31	783519	9964070	SM	SM	SM	SM	SM	0		
32	783503	9964082	SM	SM	SM	SM	SM	0		
33	783523	9964090	SM	SM	SM	SM	SM	SM		
34	785003	9964542	SM	ML	ML	ML	ML	ML		
35	785016	9964562	ML	SM – ML	ML	ML	ML	ML		
36	785003	9964564	SM	SM	ML	ML	ML	ML		
37	782102	9964616	ML	ML	SM	SM	SM	SM		
38	782108	9964613	ML	ML	ML	SM	SM	SM		
39	784876	9964586	ML	SM	ML	ML				
40	784886	9964582	ML	SM	ML	ML	ML			
41	784896	9964588	ML	ML	ML – SM	ML	ML			
42	783276	9961678	ML	ML	SM	SM	SM			
43	783277	9961707	ML	ML	ML	SM	SM	SM	SM	
44	783290	9961690	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	
45	782654	9967006	SM	SM	SM	SM	SM	SM		
46	782650	9967001	SM	SM	SM	SM	SM	SM		
47	781297	9966357	SM	SM	SM	ML	ML	ML	ML	ML
48	781304	9966357	SM	SM	ML	SM	ML	ML	ML	ML
49	781310	9966336	SM	SM	ML	ML	ML	ML	ML	SM

Tabla 11 Clasificación SUCS. (Coordinate system: Datum WGS 84)										
Sondeo	COORDENADAS		1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m
50	781312	9966334	SM	ML	ML	ML	ML	ML	ML	ML
51	788651	9963069	ML	ML	ML	ML	ML	ML		
52	788620	9963042	ML	ML	ML	ML	ML			
53	788603	9963053	ML	ML	ML	ML	ML	ML		
54	788615	9963071	ML	ML	ML	ML	ML			
55	782578	9963543	SM	SM	SM	SM				
56	782564	9963551	SM	SM	SM	SM	SM	SM		
57	782570	9963541	SM	SM	SM	SM	SM	SM		
58	784160	9961586	ML	ML	ML	ML	ML	ML		
59	784170	9961578	ML	ML	ML	ML	ML	ML		
60	784145	9961577	ML	ML	ML	ML	ML	ML		
61	779342	9962206	SM	SM	SM	SM	ML	ML		
62	779352	9962194	SM	SM	SM	SM	SM	SM		
63	779344	9962192	SM	SM	SM	SM	SM	ML		
64	785908	9960354	ML	ML	ML	ML	ML	ML		
65	785890	9960349	ML	ML	ML	ML	ML	ML		
66	785414	9963702	SM	SM - GM	SM	SM	SM	SM		
67	785408	9963710	SM	SM	SM	GM	GM	GM		
68	785415	9963712	SM	SM	SM	GM	GM	GM		
69	783002	9966582	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	
70	783005	9966597	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	
71	783015	9966601	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	
72	787043	9962916	SM	SM	SM	SM	SM	SM		
73	787038	9962912	SM	SM	SM	SM	SM	SM		
74	785080	9963375	SM	SM	SM	SM	SM	SM		
75	785085	9963366	SM	SM	SM	SM	SM	SM		
76	784502	9963180	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM
77	784508	9963187	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM
78	784510	9963198	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM
79	783444	9962739	SM	SM	SM	SM	SM	SM		
80	783458	9962761	SM	SM	SM	SM	SM	SM		

Tabla 11.- Clasificación SUCS. (Coordinate system: Datum WGS 84)

5.5. Porcentaje de Humedad

En la figura 9 se indica los valores obtenidos de humedad (ASTM, 2019) en función de la profundidad para los diferentes pozos de análisis.

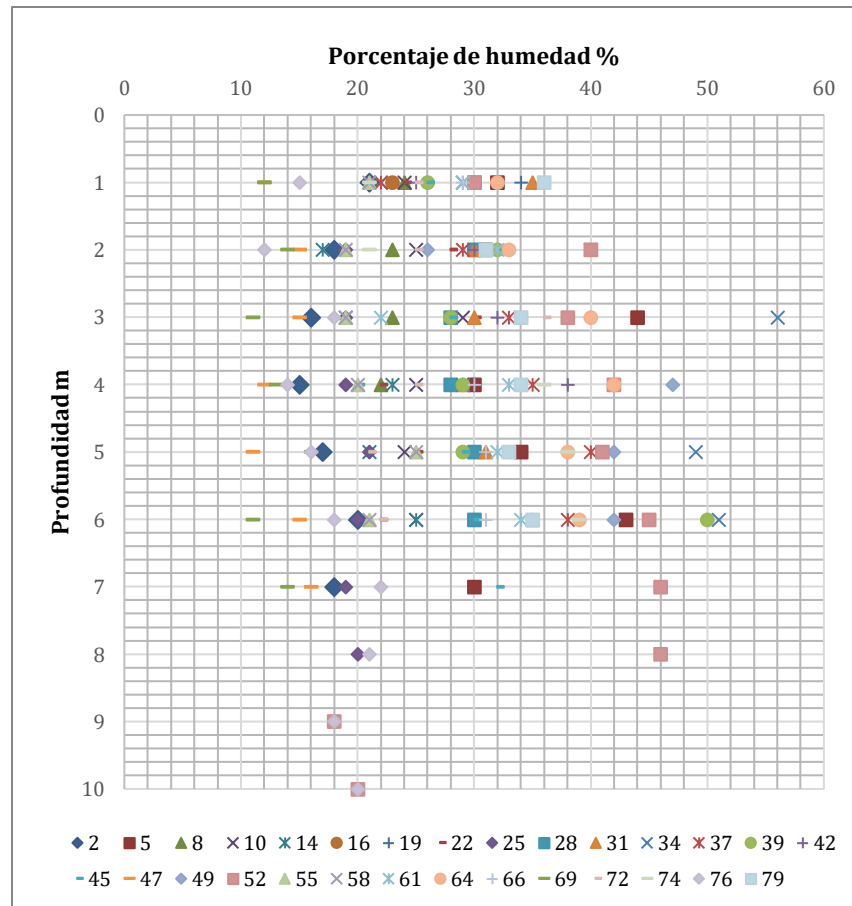
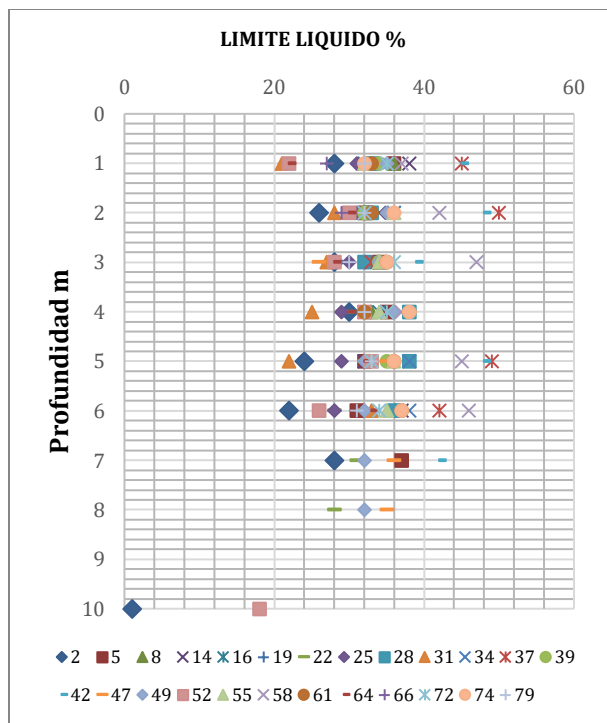


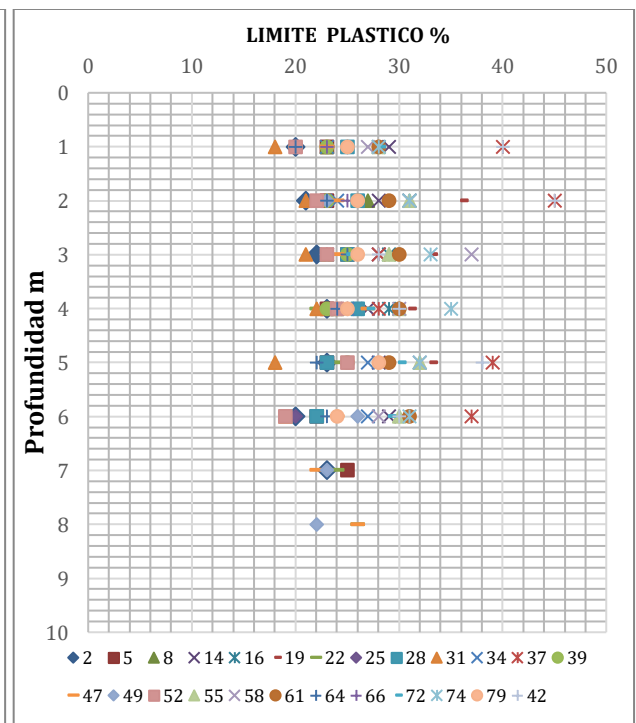
Figura 9. Porcentaje de humedad en función de la profundidad

5.6. Límites de plasticidad

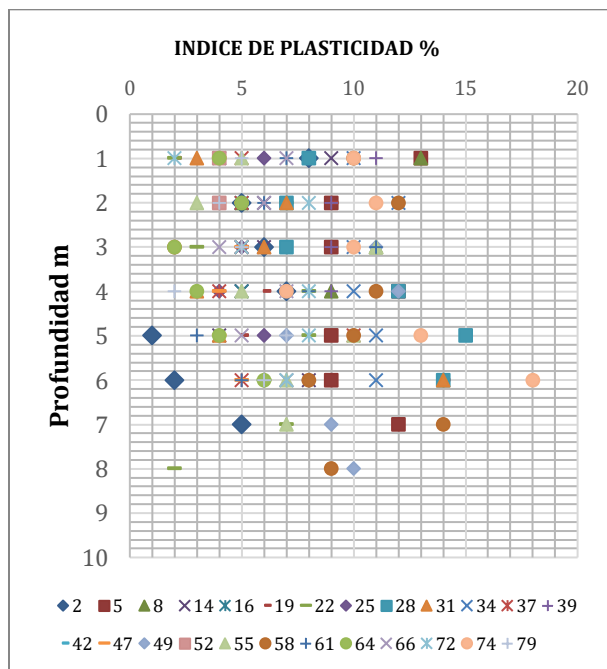
En la figura 10 se indica los valores obtenidos para el ensayo de limite líquido, Limite plástico y índice de plasticidad (ASTM, 2017b) en función de la profundidad para los diferentes pozos de análisis.



(a)



(b)



(c)

Figura 10. Límites de plasticidad en función de la profundidad. (a) limite liquido en función de la profundidad, (b) limite plástico en función de la profundidad, (c) índice de plasticidad en función de la profundidad, para los diferentes pozos de análisis.

6. DISCUSSION

6.1. Resultados de análisis estadístico.

El análisis de regresión estadística para los diferentes parámetros geotécnicos se evaluó mediante correlaciones lineales como pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov, Shapiro Wilk presentando un nivel de significancia superior a $p > 0.05$ únicamente para el estrato comprendido de 2.00m representado que sigue una distribución normal entre el número del SPT y la profundidad de este estrato únicamente, para la evaluación no paramétrica se empleó la correlación de Spearman obteniendo un coeficiente de correlación de 0.632 indicando una correlación positiva, el valor de significancia bilateral estimado p fue menor a 0.001 evidenciando que esta correlación estadísticamente es significativa. (Othman et al., 2023)

El análisis de Chi cuadrado permitió verificar una correlación estadística significativa entre el comportamiento del número de golpes y la profundidad con un coeficiente Pearson $p = 511.9$ con una razón de verosimilitud $p < 0.001$ (Kim et al., 2012)

6.2. Análisis por profundidad distribución normal

El análisis de interpretación de pruebas de normalidad se basa en Kolmogorov-Smirnov (K-S) que compara la función de distribución acumulada CDF de los datos con la CDF teórica normal en la cual la sensibilidad se presenta en las colas de la distribución (Robert Tomšik, 2019) adicional se realizó el análisis mediante la distribución de Shapiro Wilk (S-W) esta prueba evalúa que tan alineados están los datos con lo esperado con una distribución normal, dicha prueba muestra más sensibilidad al centro de la distribución en donde un nivel de significancia $p > 0.05$ indica que el dato se ajusta a una distribución normal. (Mishra et al., 2019), para los datos de análisis se pudo observar que los datos nos obedecen una distribución normal por tanto no es recomendable utilizar pruebas paramétricas como T-Test o Anova porque estas asumen varianzas homogéneas. (DOUGLAS C. MONTGOMERY, 2011)

Tabla 12. Resultados de Prueba de Normalidad (K-S) y (S-W)						
Profundidad	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	p	Estadístico	gl	p
1	0,14	80	<0,001	0,918	80	<0,001
2	0,075	80	0,2	0,982	80	0,332
3	0,102	80	0,037	0,948	80	0,003
4	0,191	80	<0,001	0,855	80	<0,001
5	0,279	80	<0,001	0,758	80	<0,001
6	0,361	80	<0,001	0,681	80	<0,001
7	0,288	25	<0,001	0,7	25	<0,001
8	0,383	13	<0,001	0,675	13	<0,001
9	0,385	3	.	0,75	3	<0,001
10	.	3	.	.	3	.

Nivel de significancia (p-value):

Si $p > 0,05$ los datos se ajustan a una distribución normal.

Si $p < 0,05$ los datos no siguen una distribución normal.

Tabla 11. Resultados de prueba de normalidad (K-S) y (S-W)

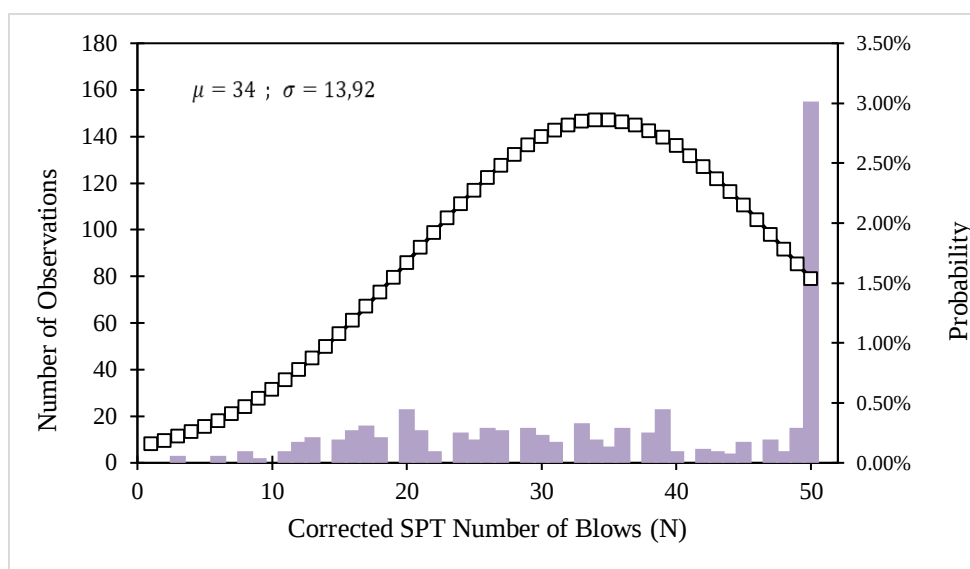


Figura 11. Distribución Normal N60 Spt vs Probabilidad

6.3. Análisis por profundidad distribución exponencial.

Para el análisis de distribución exponencial de Poisson se evaluó la densidad de probabilidad de cada pozo SPT en relación al N60, en la cual se identificó una alta probabilidad de ocurrencia en valores pequeños de N y un decaimiento rápido conforme se aumenta N, esto indica que la mayoría de eventos ocurre con pocos golpes.

De acuerdo al análisis se identificó que existe una mayor probabilidad de ocurrencia para suelos blandos, a medida que N aumenta el caso de suelos densos la probabilidad disminuye. (Kissell, 2021)

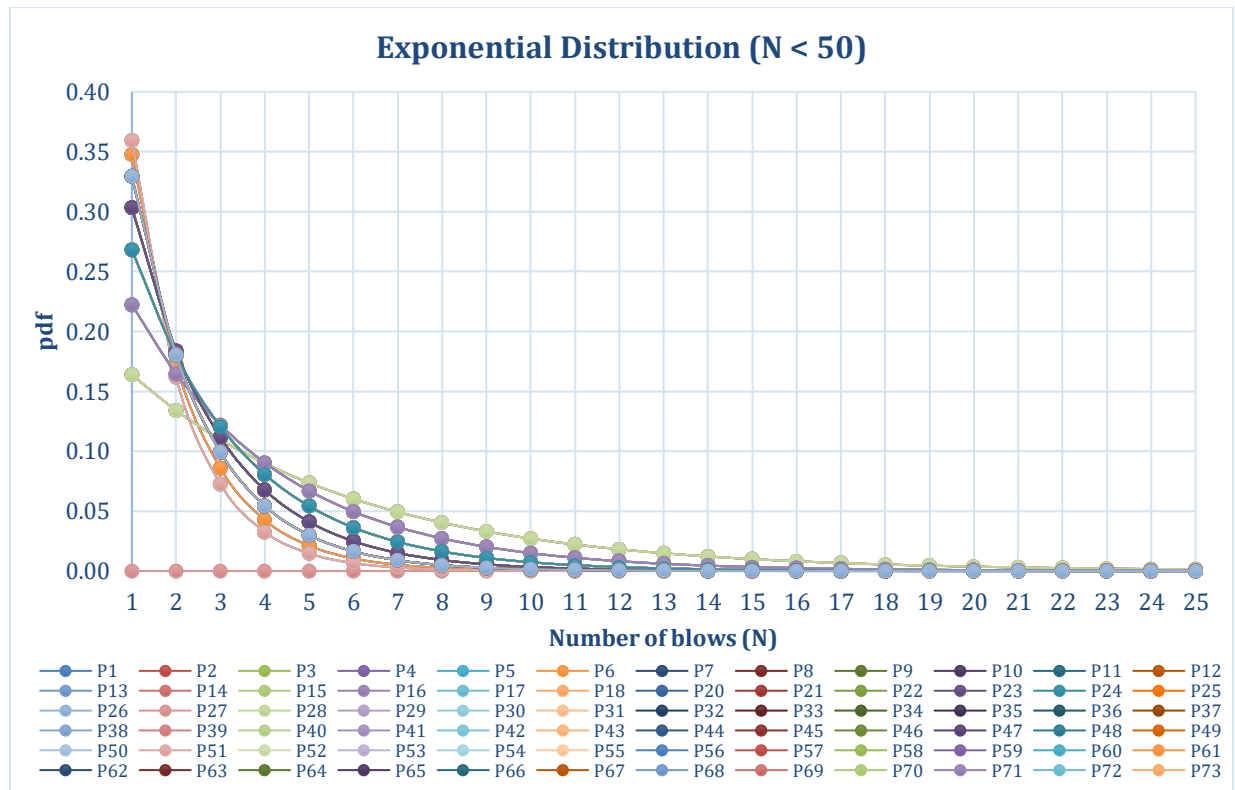


Figura 12. Distribución Normal N60 Spt vs Probabilidad

6.4. Análisis por profundidad coeficiente Spearman

Para el análisis no paramétrico se evaluó el coeficiente Spearman medida que se realiza mediante rangos o datos no lineales, (Zhang & Wang, 2023) obteniendo un valor de 0.632 indicando una correlación positiva a moderada entre la profundidad de ensayo y los golpes N60, la significancia bilateral alcanza un nivel del 1% de probabilidad de error, de acuerdo a los datos de análisis se representa que a medida que se aumenta la profundidad de sondeo el número de N60 tiende a aumentar, eso es consistente al aumentar la densidad o su Resistencia relativa.

Tabla 13. Resultados coeficiente SPEARMAN para profundidad y N60			
PARAMETROS DE EVALUACION.		NUMERO	PROFUNDIDAD
		GOLPES SPT	
NUMERO	Coeficiente de correlación	1	0,632
GOLPES N60 SPT	Sig. (bilateral)	.	<0,001
	N	524	524
PROFUNDIDAD	Coeficiente de correlación	0,632	1
	Sig. (bilateral)	<0,001	.
	N	524	524

Tabla 13. Resultados coeficiente SPEARMAN para profundidad y N60

6.5. Análisis por profundidad pruebas X2 Y G2

Para el análisis estadístico de prueba de hipótesis y análisis de tablas de contingencia se evaluó mediante Chi cuadrado X^2 , que es un método comúnmente utilizado para determinar si existe una asociación significativa entre dos variables (Aslam & Smarandache, 2023) para el caso de estudio se definió 369 grados de libertad (gl) para evaluar dos tipos de variables la profundidad y N60, el valor de X^2 obtenido fue de 511.96 para 413 casillas el nivel de significancia estimado fue del 5% para reducir la tasa de falsos positivos a niveles considerables (Benjamin et al., 2017), el valor crítico para el nivel de significancia establecido es X^2_c 413.7, por tanto la hipótesis nula se rechaza.

Los resultados muestran que la relación estadística es significativa lo que indica que a medida que aumenta la profundidad también cambia el comportamiento del suelo, los suelos más profundos se vuelven más compactos.

Para el análisis de razón de verosimilitud G^2 el mismo que se basa en logaritmos de probabilidad (JOHN WILEY, 2013), se obtuvo un valor G^2 de 549.41 entre la profundidad de análisis y el N60 para un nivel de significancia del 5% por tanto existe una asociación estadísticamente significativa entre la profundidad y el número de golpes del SPT.

Tabla 14. Resultados prueba X ² y G ² para profundidad y N60			
ESTADISTICO	Valor	gl	Significación asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	511,960	369	<0,001
Razón de verosimilitud	549,412	369	<0,001
N de casos válidos	524		

Tabla 14. Resultados prueba X² y G² para profundidad y N60

6.6. Análisis por profundidad pruebas R²

Para el análisis estadístico de prueba de Coeficiente de Determinación R² se planteó dos tipos de regresiones en función del N-SPT y la profundidad de auscultación, para los valores de la media del N SPT se empleó una distribución logarítmica alcanzando un valor de R²=0.98, para el caso de la desviación estándar por cada metro de auscultación se empleó una distribución polinómica alcanzando un valor de R²=0.84 como se observa en la figura 13

Los valores R² de las regresiones indican que ambos coeficientes superan el umbral de R²>0.80 que representan un ajuste muy fuerte (Hair et al., 2019), El modelo polinómico para la desviación estándar muestra una curvatura descendente lo que indica reducción sistemática de la dispersión de los datos con la profundidad (MONTGOMERY D, 2012)

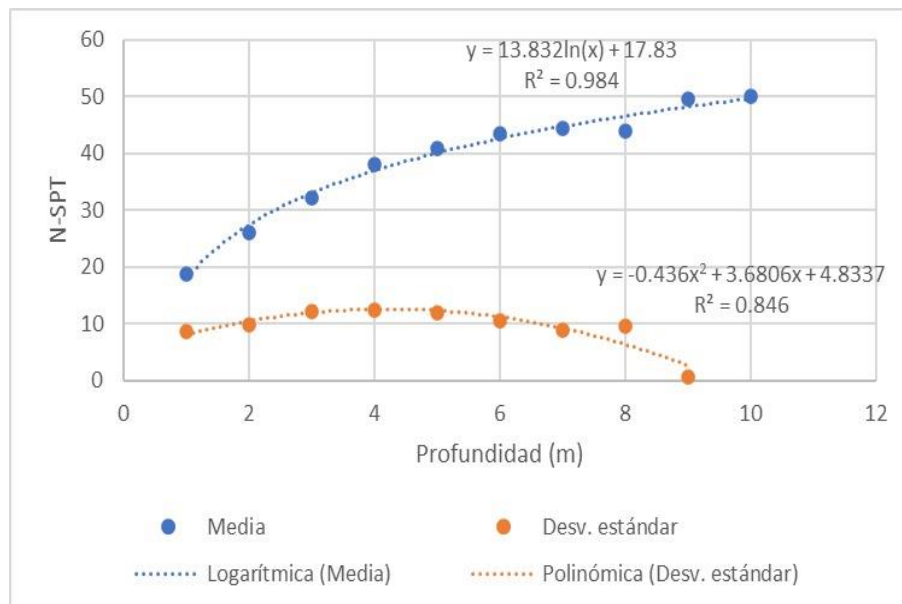
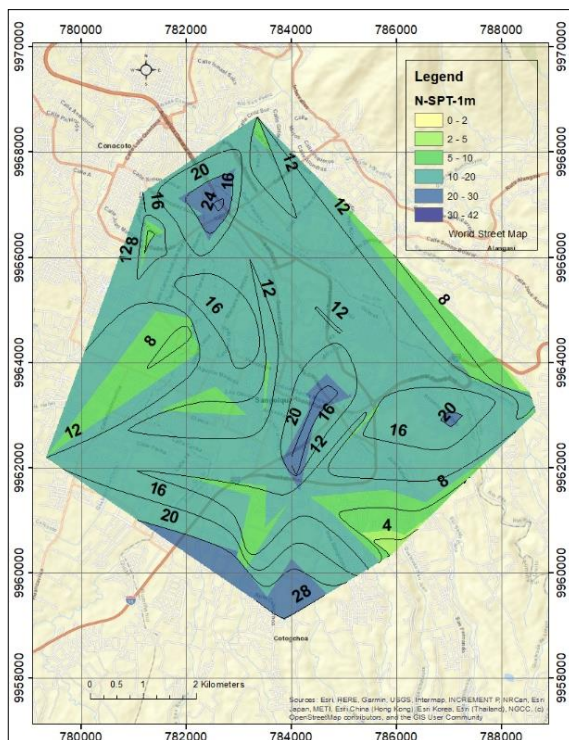


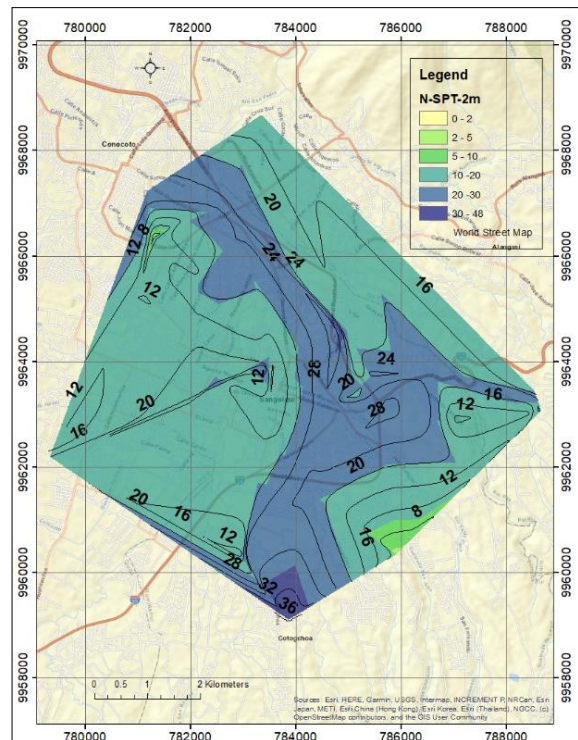
Figura 13. Regresión de distribución logarítmica y polinómica para N SPT y profundidad

7. RESULTADOS DE MODELACIÓN GIS PARA N SPT

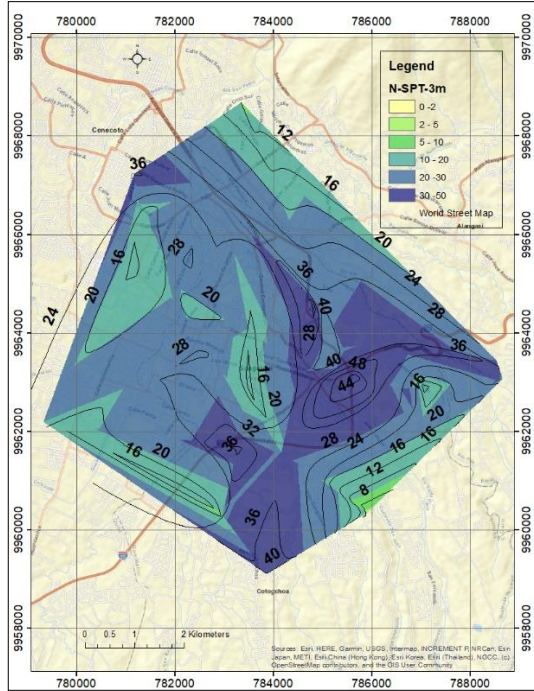
En la figura 13 y tabla 14 , se indica los diferentes planos cuantitativos obtenidos de la modelación GIS en función de la profundidad de auscultación y en número corregido N60 del spt , el análisis espacial se realizó mediante Interpolación TIN (De Smith et al., n.d.) la misma que divide la región de acuerdo a la influencia de puntos de control para el sitio de estudio representado por cada pozo spt en relación a un modelo probabilístico (Uzielli, 2008), los umbrales de medida se definió de acuerdo al criterio de consistencia del suelo identificando seis rangos de medida.(Das, 2011), el área total evaluada fue de 5060.6 Ha. Para el análisis no se considera los valores N60 del SPT de la profundidad mayor a 6 metros debido a que por la poca cantidad de datos obtenidos a partir de esa profundidad las pruebas estadísticas no son confiables(Mishra et al., 2019)



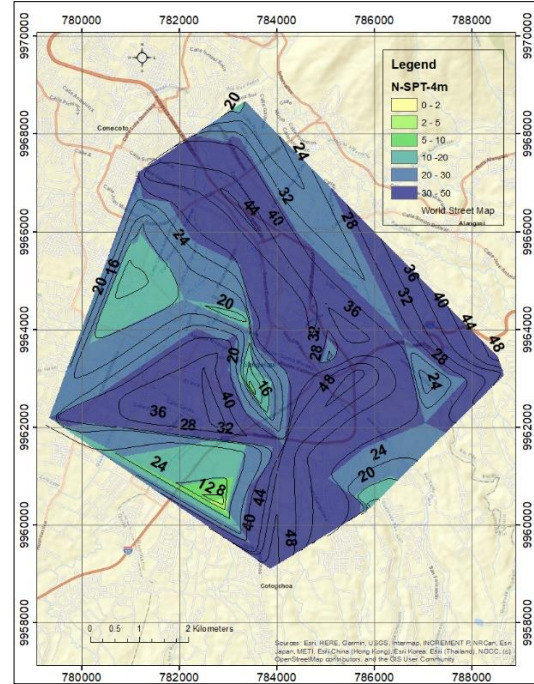
(a)



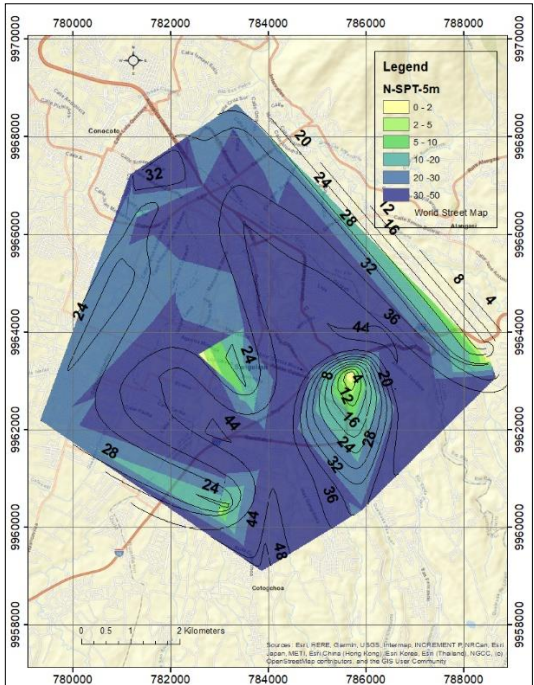
(b)



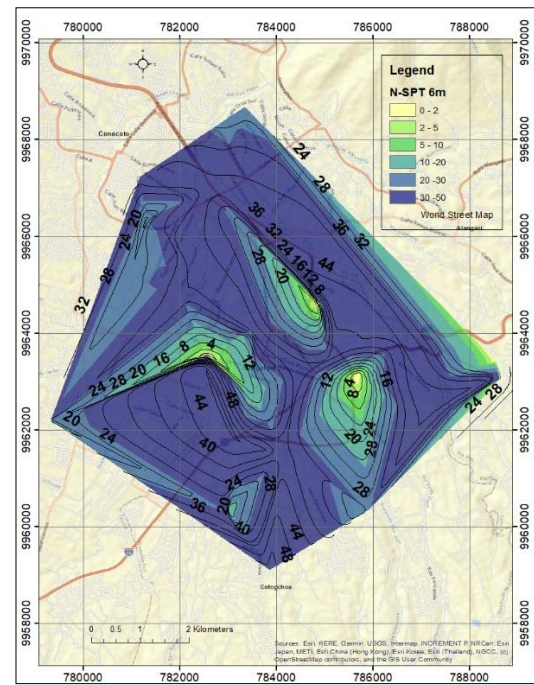
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 13. Planos de N60 SPT en función de la profundidad: (a) Plano N60 SPT para profundidad 1,00 m ; (b) Plano N60 SPT para profundidad 2,00 m ; (c) Plano N60 SPT para profundidad 3,00 m ; (d) Plano N60 SPT para profundidad 4,00 m ; (e) Plano N60 SPT para profundidad 5,00 m ; (f) Plano N60 SPT para profundidad 6,00 m

TABLA 15, Porcentaje de Territorio en Función de la Profundidad y la Consistencia del Suelo en Base a N-SPT							
Área Total Evaluada: 5060.6 HA.							
N60	Consistencia*	1m	2m	3m	4m	5m	6m
		%	%	%	%	%	%
0- 2	Muy Blanda	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04
2-5	Blanda	0.57	0.03	0.01	0.00	0.19	0.18
5-9	Rigidez Media	10.60	0.90	0.46	0.00	0.68	0.62
9-20	Rígida	82.74	64.66	13.21	5.49	2.69	2.49
20-30	Muy Rígida	6.08	33.22	62.82	37.19	29.73	22.73
>30	Dura	0.01	1.20	23.50	57.32	66.67	73.95
	Total (%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
*Das, 2015							

TABLA 15, % De territorio en función de la profundidad y la consistencia del suelo en base a N-SPT

8. CONCLUSIONES

El área de estudio se encuentra influenciado geológicamente por la dinámica del volcán Cotopaxi, que durante registros históricos de su actividad eruptiva a depositado flujos de lahar sobre los ríos pita y santa clara en zonas altamente pobladas como selva alegre, el triángulo y san Rafael con la presente investigación se realizó una caracterización geotécnica de estos sitios de influencia de lahar y de todo el cantón Rumiñahui en general, dicha información permitirá servir como una guía para la toma de decisiones a nivel de ordenamiento territorial.

1. El estudio confirmo una marcada variabilidad litológica y mecánica asociada a los depósitos volcánicos, laharíticos y coluviales, esta condición genera estratos de distinta consistencia y niveles de plasticidad, lo cual implica que la respuesta del suelo frente a cargas estructurales no se uniforme. En sitios como el triángulo, san Rafael selva alegre los estratos predominantes son arenas limosas no plásticas NP, con gravilla presencia de trazas de pómez, para el sector de Cotogchoa se identificó la formación cangahua integrado por tobas andesíticas y capas de cenizas depositados durante eventos volcánicos cuaternarios con valores promedio de limite liquido de 41%, limite plástico 26% e índice de plasticidad 15%
2. Los análisis de campo y laboratorio evidenciaron que los valores corregidos de N60-SPT aumentan significativamente con la profundidad, alcanzando correlaciones estadísticas robustas (ρ Spearman = 0.632; $p < 0.001$). Este comportamiento confirma que los estratos más profundos ofrecen mayores condiciones de rigidez y resistencia relativa, aspecto clave para definir la profundidad óptima de cimentaciones. Los

enfoques estadísticos no paramétricos con pruebas de normalidad mostraron que la mayoría de los datos no siguen una distribución normal, lo cual refuerza la pertinencia del uso de métodos no paramétricos como Spearman, X^2 , G^2 en lugar de enfoques paramétricos tradicionales. Esta elección metodológica garantiza mayor confiabilidad en la interpretación de correlaciones entre parámetros geotécnicos. El ajuste de los valores de SPT a una distribución exponencial tipo Poisson permitió identificar una alta frecuencia de valores bajos en los estratos superficiales, lo que indica predominio de suelos blandos a poco profundos. A mayor profundidad, la probabilidad de encontrar materiales densos y resistentes se incrementa, lo que respalda la zonificación en términos de rigidez.

3. Los Parámetros efectivos de resistencia al corte en condición consolidado-drenado mostraron cohesiones efectivas bajas (0.13–0.28 kg/cm²) y ángulos de fricción entre 14° y 30°, confirmando que la resistencia al corte de los suelos está dominada por fricción interna y no por cohesión aparente. Estos resultados permiten estimar de manera confiable la capacidad portante y la estabilidad frente a cargas estáticas, dentro del análisis no se incluye estos datos debido a que únicamente se realizaron en sitio puntuales, la Clasificación SUCS reveló que los suelos predominantes corresponden a ML (limos de baja plasticidad) y SM (arenas limosas), con presencia puntual de gravas mal gradadas (GM). Esta distribución coincide con la génesis volcánica y ubicación del área, y determina las condiciones de deformabilidad y permeabilidad del subsuelo.
4. Para el análisis mediante GIS se empleó la triangulación mediante interpolación TIN que permitió representar espacialmente la variación de la resistencia relativa en 5,060.6 ha. Los resultados mostraron que los estratos superficiales son principalmente rígidos (N60 entre 10–20), mientras que los estratos intermedios y profundos presentan condiciones de muy rígidos a duros (N60 > 30). Esta cartografía constituye una herramienta de referencia para la planificación territorial del Cantón Rumiñahui. Para edificaciones de baja y mediana carga, la información obtenida permite diseñar cimentaciones superficiales con mayor seguridad, mientras que para estructuras críticas se recomienda la verificación con estudios específicos y la posible implementación de cimentaciones profundas. Los hallazgos complementan y refuerzan la aplicación de la NEC-2014, aunque evidencian la necesidad de incorporar criterios de variabilidad espacial en la normativa.

5. De acuerdo al análisis de la densidad específica in situ y el N SPT se puede evidenciar que la dispersión es alta y no son parámetros correlacionales esto se puede validar con los resultados obtenidos de la regresión logarítmica de (Cando et al., 2024) en la cual se obtuvo un R^2 de 0.34 y en comparación con los valores en la investigación que presenta un coeficiente de determinación R^2 de 0.40 , esto se puede atribuir a que existe diferente estratos de análisis dentro de la investigación.

9. Referencias.

- Aguilera, E., Pareschi, M. T., Rosi, M., & Zanchetta, G. (2004). Risk from lahars in the northern valleys of Cotopaxi volcano (Ecuador). *Natural Hazards*, 33(2), 161–189. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000037037.03155.23>
- Andrade, S. D., Saltos, E., Nogales, V., Cruz, S., Lee, G., & Barclay, J. (2022a). Detailed Cartography of Cotopaxi's 1877 Primary Lahar Deposits Obtained by Drone-Imagery and Field Surveys in the Proximal Northern Drainage. *Remote Sensing*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/rs14030631>
- Andrade, S. D., Saltos, E., Nogales, V., Cruz, S., Lee, G., & Barclay, J. (2022b). Detailed Cartography of Cotopaxi's 1877 Primary Lahar Deposits Obtained by Drone-Imagery and Field Surveys in the Proximal Northern Drainage. *Remote Sensing*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/rs14030631>
- Aslam, M., & Smarandache, F. (2023). Chi-square test for imprecise data in consistency table. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, 9, 1279638. <https://doi.org/10.3389/FAMS.2023.1279638/BIBTEX>
- ASTM. (2006). *Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de áridos finos y gruesos - ASTM C136-06*. <https://doi.org/10.1520/C0136-06>
- ASTM. (2015). *Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Fine-Grained Soils for Geotechnical Purposes*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D1587_D1587M-15
- ASTM. (2017a). *ASTM D3080 Método de prueba estándar para la prueba de corte directo simple no drenado consolidado de suelos de grano fino*. <https://doi.org/10.1520/D6528-17>
- ASTM. (2017b). *Métodos de prueba estándar para el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos*. <https://doi.org/10.1520/D4318-17E01>

- ASTM. (2017c). *Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)* SUCS. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2487-17E01>
- ASTM. (2019). *ASTM D2216-19 DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE SUELO*. <https://doi.org/10.1520/D2216-19>
- ASTM. (2021). *Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D7263-21>
- Benjamin, D. J., Berger, J. O., Johannesson, M., Nosek, B. A., Wagenmakers, E., Berk, R., Bollen, K. A., Brembs, B., Brown, L., Camerer, C., Cesarini, D., Chambers, C. D., Clyde, M., Cook, T. D., De Boeck, P., Dienes, Z., Dreber, A., Easwaran, K., Efferson, C., ... Johnson, V. E. (2017). *Redefine statistical significance Strength of evidence from P values*. <https://doi.org/10.1038/s41562-017-0189-z>
- Cando, W., Bucheli, J., Cando, C., & Leon, M. (2024). SOIL CHARACTERIZATION: INTEGRATING IN-SITU TEST, LABORATORY ANALYSIS, AND TERRAIN PARAMETERS. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, 11(1). [https://doi.org/10.14455/ISEC.2024.11\(1\).GFE-05](https://doi.org/10.14455/ISEC.2024.11(1).GFE-05)
- Coduto, D. P. ., Kitch, W. A. ., & Yeung, M. Ronald. (2016). *Foundation design : principles and practices*. Pearson.
- CropWat | Tierras y Aguas | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura | Land & Water | Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). Retrieved October 2, 2025, from <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/es/>
- Das, B. M. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones Séptima edición*.
- De Smith, M. J., Goodchild, M. F., Longley, P. A., & Associates, &. (n.d.). *Geospatial Analysis A Comprehensive Guide to Principles Techniques and Software Tools 7th edition*.
- DOUGLAS C. MONTGOMERY. (2011). *Applied Statistics and Probability for Engineers - Douglas C. Montgomery, George C. Runger - Google Libros* (JOHN WILEY & SONS, Ed.; 7th ed., Vol. 7). ARIZONA STATE UNIVERSITY. https://books.google.com.ec/books?id=_f4KrEcNAfEC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summar_y_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

- GADMUR. (2019). *PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL CANTON RUMIÑAHUI 2012-2025 ACTUALIZACION 2014-2019*.
- GAMUR. (2025). *PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL CANTON RUMIÑAHUI 2012-2025 ACTUALIZACION 2020-2025*.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *MULTIVARIATE DATA ANALYSIS EIGHTH EDITION*. www.cengage.com/highered
- IGEMI. (1983). *CARTA GEOLOGICA ECUADOR*.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA. (2017). *REPUBLICA DEL ECUADOR INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA ANUARIO METEOROLÓGICO*.
- Jarushi, F., Hasan, M., Hammouda, S. S., & Kenshel, O. (2025). Comparison of Soil Properties obtained from In-Situ Tests and Laboratory: Case Study of shallow Foundation. *World Congress on Civil Structural and Environmental Engineering*. <https://doi.org/10.11159/icgre25.160>
- JOHN WILEY. (2013). *Applied Logistic Regression - David W. Hosmer, Jr., Stanley Lemeshow, Rodney X. Sturdivant* - Google Libros. JOHN WILEY. https://books.google.com.ec/books?id=64JYAwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Kim, D., Kim, K. S., Ko, S., Choi, Y., & Lee, W. (2012). Assessment of geotechnical variability of Songdo silty clay. *Engineering Geology*, 133–134, 1–8. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2012.02.009>
- Kissell, R. L. (2021). Probability and Statistics. *Algorithmic Trading Methods*, 129–150. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815630-8.00005-3>
- Kuichling, E. (1889) *The Relation between the Rainfall and the Discharge of Sewers in Populous Districts. Transactions of ASCE*, 20, 1-60. - References - Scientific Research Publishing. (n.d.). Retrieved July 30, 2025, from <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1789553>
- Lim, G. T., Pineda, J., Boukpeti, N., Carraro, J. A. H., & Fourie, A. (2019). Effects of sampling disturbance in geotechnical design. *Canadian Geotechnical Journal*, 56(2), 275–289. <https://doi.org/10.1139/CGJ-2018-0016>

- MIDUVI. (2014). *NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCION NEC - SE- GC GEOTÉCNIA Y CIMENTACIONES*.
- Mishra, P., Pandey, C. M., Singh, U., Gupta, A., Sahu, C., & Keshri, A. (2019). Descriptive statistics and normality tests for statistical data. *Annals of Cardiac Anaesthesia*, 22(1), 67–72. https://doi.org/10.4103/ACA.ACA_157_18
- MONTGOMERY D, P. E. G. G. (2012). *INTRODUCTION TO LINEAR REGRESSION ANALYSIS*.
- Ordóñez, J., Samaniego, P., Mothes, P., & Schilling, S. (2013). *LAS POTENCIALES ZONAS DE INUNDACIÓN POR LAHARES EN EL VOLCÁN COTOPAXI*.
- Othman, M. M., Hen-Jones, R., Zapata, C., Jiménez, E., De Luca, F., Holcombe, E. A., & Vardanega, P. J. (2023). Geotechnical variability of the soils of Quito, Ecuador: a geodatabase study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(11). <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03438-3>
- Patwardhan, K., & Metya, S. (2021). A Comparative Study on Commonly Used Methods for Calculating Bearing Capacity in Shallow Foundation. In *Lecture Notes in Civil Engineering: Vol. 124 LNCE*. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4590-4_17
- Robert Tomšik. (2019). *Power Comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov and Jarque-Bera Tests*. https://www.researchgate.net/publication/333133367_Power_Comparisons_of_Shapiro-Wilk_Kolmogorov-Smirnov_and_Jarque-Bera_Tests
- Sierra, D., Vasconez, F., Andrade, S. D., Almeida, M., & Mothes, P. (2019). Historical Distal Lahar Deposits on the Remote Eastern-Drainage of Cotopaxi Volcano, Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102251>
- SUAREZ. (2022). *DETERMINACION DEL ICA HIDROLOGICO DEL CANTON RUMIÑAHUI, EN UN PERIODO COMPRENDIDO ENTRE EL 2017 - 2021*.
- Torres, J. L. C., Zhang, K., Tugen, F., & Castillo, D. M. C. (2025). Generation of a Susceptibility Map with Geomechanical Soil Data in the Southwestern Zone of Loja Ecuador. *World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering*. <https://doi.org/10.11159/icgre25.210>

- Troncoso, L., Bustillos, J., Romero, J. E., Guevara, A., Carrillo, J., Montalvo, E., & Izquierdo, T. (2017). Hydrovolcanic ash emission between August 14 and 24, 2015 at Cotopaxi volcano (Ecuador): Characterization and eruption mechanisms. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 341, 228–241. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.05.032>
- Uzielli, M. (2008). Statistical analysis of geotechnical data. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization - Proceedings of the 3rd International Conference on Site Characterization, ISC'3*, 173–193. <https://doi.org/10.1201/9780203883198.CH10>
- Zhang, L., & Wang, L. (2023). Optimization of site investigation program for reliability assessment of undrained slope using Spearman rank correlation coefficient. *Computers and Geotechnics*, 155, 105208. <https://doi.org/10.1016/J.COMPGEO.2022.105208>

10. Statement and Declarations

Authors' contributions

Conceptualization: Jorge Albuja-Sánchez and Eddy Fernando-Sanchez

Formal analysis: Lenin Arcos - Ribadeneira

Investigation: Lenin Arcos - Ribadeneira

Resources: Lenin Arcos - Ribadeneira

Supervision: Jorge Albuja-Sánchez and; Eddy Fernando-Sanchez

Writing – original draft: Lenin Arcos - Ribadeneira

Writing – review & editing: Jorge Albuja-Sánchez and Eddy Fernando-Sanchez

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

Funding

This research received no external funding.

Ethics approval and consent to participate

Not applicable

Data availability

Not applicable

Declaration of generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

In preparing this manuscript, the authors employed Paperpal solely to assist with academic English refinement, and used Semantic Scholar and Scopus AI to support the identification of relevant scholarly literature. All content generated or suggested by these tools was subsequently reviewed, revised, and fully adapted by the authors. The authors take complete responsibility for the accuracy, originality, and integrity of the final submission.