



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO FRENTE A LA
VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y SU IMPACTO EN LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS DEL SUELO EN EL SECTOR ROSAS DEL CANTÓN NABÓN**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Civil

AUTORES: ESTEFANÍA ELIZABETH GONZÁLEZ GARCÍA
JOSÉ LUIS QUIZHPI PAUTA
TUTOR: ING. CRISTIAN DANILO BUSTOS CABRERA, MSc.

Cuenca - Ecuador
2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Estefanía Elizabeth González García con documento de identificación N° 0705178895 y José Luis Quizhpi Pauta con documento de identificación N° 0106761182; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 1 de agosto del 2025

Atentamente,

Estefanía Elizabeth González García

0705178895

José Luis Quizhpi Pauta

0106761182

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Estefanía Elizabeth González García con documento de identificación N° 0705178895 y José Luis Quizhpi Pauta con documento de identificación N° 0106761182, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto de investigación: “Análisis del comportamiento del nivel freático frente a la variabilidad climática y su impacto en las propiedades mecánicas del suelo en el sector Rosas del cantón Nabón”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 1 de agosto del 2025

Atentamente,



Estefanía Elizabeth González García

0705178895



José Luis Quizhpi Pauta

0106761182

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Cristian Danilo Bustos Cabrera con documento de identificación N° 0301288262 docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO FRENTE A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y SU IMPACTO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO EN EL SECTOR ROSAS DEL CANTÓN NABÓN, realizado por Estefanía Elizabeth González García con documento de identificación N° 0705178895 y por José Luis Quizhpi Pauta con documento de identificación N° 0106761182, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto de investigación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 1 de agosto del 2025

Atentamente,



Ing. Cristian Danilo Bustos Cabrera MSc.
0301288262

Dedicatoria

A mis padres, Freddy Luzbel González Vicker y Yajaira Elizabeth García Sánchez, por ser mi fuerza constante, por su amor constante, sus sacrificios silenciosos y su fe inquebrantable en mí. Gracias por mostrarme que los sueños se logran con dedicación y persistencia. A mis hermanos, Freddy David y Victoria Elizabeth, por acompañarme en cada paso, por sus palabras de ánimo y su apoyo genuino, que me impulsaron a seguir adelante aun en los momentos difíciles.

A mis tías y primos/as que se encuentran en Italia, con quienes la distancia nunca fue obstáculo para sentir su cariño y respaldo. Esta meta también es de ustedes.

Mención especial a mi tía Betty, quien me ayudó inmensamente y siempre ha estado pendiente de mí con amor, generosidad y cuidado. Gracias por estar incluso en los momentos más difíciles.

A mi adorada abuelita, Mami Chela, a quien amo profundamente, por su ternura, oraciones y cariño inmenso que siempre me han reconfortado.

A mis abuelitos, Papito Freddy y Mami Livia, por sus sabios consejos, por creer en mí y por ser ejemplo de fortaleza y dedicación.

Y a toda mi familia en general, que ha sido mi pilar fundamental, por no dejarme caer, por levantarme cada vez que lo necesité y por demostrarme que el amor familiar es el motor más grande para no rendirse jamás.

Y a ti Mateo, gracias por tanto.

Con todo mi corazón, este logro también es de ustedes.

- **Estefanía Elizabeth González García**

Este proyecto va dedicado a mis padres Geovanny Quizhpi y Emma Pauta, por ser el pilar fundamental de mi vida. Gracias por su amor incondicional, por enseñarme el valor del esfuerzo, la humildad y la perseverancia. Cada sacrificio que hicieron, cada palabra de aliento y cada gesto de apoyo fueron esenciales para que hoy cumpla esta meta. Este logro también es suyo.

A mis hermanos Pablo Quizhpi, Andrea Quizhpi y Gabriela Quizhpi, y a mi enamorada Jenny Morocho, por ser parte fundamental de esta etapa. A mis hermanos, por su compañía, comprensión y ánimo en cada paso. A ti, mi amor, gracias por estar a mi lado, por tu paciencia, tus palabras de aliento y por ser una fuente constante de motivación y esperanza. Cada uno, con su presencia, ha sido parte esencial de este logro.

- **José Luis Quizhpi Pauta**

Agradecimiento

En primer lugar, agradezco a Dios, por iluminar siempre mi camino. En cada momento de dificultad, Él supo cómo y cuándo auxiliarme, y nunca dejó de abrir puertas cuando más lo necesitaba. Su presencia fue mi guía constante a lo largo de este proceso.

A todos mis amigos de la universidad, gracias por caminar a mi lado en esta etapa tan importante de mi vida. Su compañía, apoyo, consejos y risas hicieron de esta experiencia algo inolvidable. Cada uno de ustedes, con su forma única de ser, aportó un valioso grano de arena para que yo no me rindiera y pudiera llegar hasta aquí.

Gracias por guiarme, por sostenerme en los momentos difíciles y por celebrar conmigo cada pequeño logro. Les deseo lo mejor en su camino profesional y personal, y espero que la vida los recompense con grandes éxitos, porque se los merecen.

Con especial gratitud, quiero reconocer al Ing. Msc Danilo Bustos, mi tutor de tesis, por su guía constante, su paciencia y su compromiso con nuestro proyecto. Su apoyo fue fundamental en cada etapa del proceso, y su calidad humana, profesionalismo y comprensión hicieron que este camino sea más claro y llevadero.

Gracias por ser un excelente ingeniero y por brindarnos siempre su tiempo y conocimiento con disposición.

- **Estefanía Elizabeth González García**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Dios, por brindarme la fortaleza, la salud y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi vida. Sin su guía y bendición, nada de esto habría sido posible.

A mis padres Geovanny Quizhpi Pauta, por su amor incondicional y por ser mi mayor ejemplo de esfuerzo y dedicación. Gracias por enseñarme a luchar por mis sueños y por apoyarme en cada decisión que he tomado. A mis hermanos, por su constante compañía, por estar siempre presentes y por brindarme palabras de aliento en los momentos más difíciles.

A mis hermanos Pablo Quizhpi, Andrea Quizhpi, Gabriela Quizhpi, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida. Gracias por su cariño sincero, por cada palabra de aliento y por su apoyo constante, tanto en los momentos buenos como en los difíciles. Su presencia, comprensión y compañía han sido una fuente inmensa de fuerza y motivación. Han sido no solo mi familia, sino también mis mejores amigos y consejeros a lo largo de este proceso.

Agradezco de manera muy especial a mi tutor de tesis, Ing. Msc Danilo Bustos por su orientación constante, su paciencia, y su valioso acompañamiento durante todo el desarrollo de este trabajo. Su guía académica y humana fue clave para lograr un resultado sólido y significativo. Gracias por compartir su conocimiento, por corregirme con criterio y por motivarme a dar lo mejor de mí.

- **José Luis Quizhpi Pauta**

Resumen

En esta investigación, se trató el tema de cómo la variabilidad climática (precipitación) impacta la variación del comportamiento del nivel freático y las características físicas del suelo en el sector de Rosas del cantón Nabón, provincia de Azuay. En un entorno andino caracterizado por una topografía accidentada y suelos residuales provenientes de material volcánico o coluvial, las fluctuaciones en el nivel freático pueden generar una notable inestabilidad geotécnica significativa, afectando directamente la infraestructura y poniendo en riesgo la seguridad de la población. Cuando el nivel freático sube debido a lluvias intensas, se incrementa la presión de poros en el suelo, lo cual disminuye tanto la resistencia al corte como el esfuerzo efectivo. El aumento del nivel freático con eventos de lluvias intensas incrementa la presión de poros en el suelo y, como resultado, reduce el esfuerzo efectivo y la resistencia al corte. Esto da lugar a deslizamientos de tierra y otros asentamientos desiguales. Sin embargo, la sequía prolongada puede resultar en el desarrollo de grietas de retracción, que a su vez sirven como caminos de infiltración preferenciales durante el próximo evento de lluvia, conduciendo a fallas súbitas del terreno. Estos dos casos apoyan que las características mecánicas del suelo dependen en gran medida de la profundidad y actividades del nivel freático. La utilidad de estos resultados es esencial para aumentar la seguridad de las comunidades del sector de Rosas y desencadenar una respuesta oportuna ante futuros impactos del cambio climático en el entorno físico.

Abstract

This research addressed how climate variability (precipitation) affects fluctuations in the groundwater level and the mechanical properties of the soil in the Rosas sector of the Nabón canton, Azuay province. In this type of Andean environment, characterized by rugged topography and residual soils of volcanic or colluvial origin, fluctuations in the groundwater level can lead to significant geotechnical instability, with a direct impact on infrastructure and the safety of the population. The rise of the water table during intense rainfall events increases pore pressure in the soil, thereby reducing effective stress and shear strength. This results in landslides and other forms of uneven settlement. On the other hand, prolonged drought can cause shrinkage cracks, which then act as preferential infiltration paths during the next rainfall event, leading to sudden ground failures. These two scenarios support the idea that the mechanical characteristics of the soil (cohesion, internal friction, stiffness) largely depend on the depth and behavior of the groundwater level. The usefulness of these findings is essential for increasing the safety of communities in the Rosas sector and enabling a timely response to future impacts of climate change on the physical environment.

Índice General

Introducción.....	16
1. Problema	20
1.1 Antecedentes	20
1.2 Descripción del problema.....	21
1.3 Importancia y alcances.....	23
1.4 Delimitación.....	24
2. Objetivos.....	26
2.1 Objetivo general.....	26
2.2 Objetivos específicos	26
3 Marco teórico	27
3.1 Conceptos fundamentales de los suelos	27
3.1.1 Granulometría: La composición por tamaño de partículas y sus aplicaciones	27
3.1.2 Esfuerzo Total (σ): La carga bruta sobre la matriz del suelo.....	32
3.1.3 Presión de poros (u): La presión del agua y su papel en la estabilidad	33
3.1.4 Esfuerzo efectivo (σ'): El pilar fundamental de la mecánica de suelos.....	35
4 Marco metodológico.....	38
4.1 Enfoque y tipo de investigación.....	38
4.2 Área de estudio: Sector Rosas, Cantón Nabón, Provincia de Azuay, Ecuador.....	40
4.3 Fases de investigación	41
4.3.1 Fase I: Recopilación y Análisis de información climática	41
4.3.2 Fase II: Monitoreo hidrogeológico del nivel freático.....	43
4.3.3 Fase III: Muestra geotécnico de campo y ensayos de laboratorio de suelos	45
4.3.4 Fase IV: Análisis de Datos, Correlación e Impacto Geotécnico.....	47
4.4 Población y Muestra.....	49
4.5 Instrumentos y Materiales	49
5 Resultados	50

5.1	Cálculos de Datos Recopilados y Análisis de Correlación de la variabilidad climática y el nivel freático durante los meses de estudio.....	51
5.2	Ensayos de Humedad del Suelo.....	60
5.3	Ensayos de Granulometría:	62
5.4	Ensayo Límite Líquido y Plástico.....	67
6	Conclusiones	74
7	Recomendaciones.....	77
8	Referencias Bibliográficas.....	78
9	Anexos	87

Índice de Tablas

Tabla 1: Comparación de Escalas Temporales de Precipitación	48
Tabla 2: Precipitación media diaria, nivel freático, cota del nivel freático y variación del nivel freático durante los meses de estudio del Pozo 1 (julio a septiembre).....	56
Tabla 3: Precipitación media diaria, nivel freático, cota del nivel freático y variación del nivel freático durante los meses de estudio del Pozo 2 (julio a septiembre).....	58
Tabla 4: Granulometría, material Pozo 1	63
Tabla 5: Granulometría, material Pozo 2	66
Tabla 6: Datos calculados de Límite Líquido, límite plástico e índice de plasticidad para Pozo 1	68
Tabla 7: Datos calculados de Límite Líquido, límite plástico e índice de plasticidad para Pozo 2.....	71
Tabla 8: Cálculo de Esfuerzo Efectivo y su variación del Nivel Freático del Pozo 1.....	73
Tabla 9: Cálculo de Esfuerzo Efectivo y su variación del Nivel Freático del Pozo 2.....	74

Índice de Figuras

Ilustración 1: Ubicación de pozos en el cantón Nabón, provincia del Azuay.....	25
Ilustración 2: Gráfico de Precipitación Acumulada Parcial y Cota del Nivel Freático del Pozo 1 del mes de Julio a Septiembre	52
Ilustración 3: Gráfico de Precipitación Media Diaria y Cota del Nivel Freático del Pozo 1 del mes de Julio a Septiembre	52
Ilustración 4: Gráfico de Precipitación Acumulada Parcial y Cota del Nivel Freático del Pozo 2 del mes de Julio a Septiembre	54
Ilustración 5: Gráfico de Precipitación Media Diaria y Cota del Nivel Freático del Pozo 2 del mes de Julio a Septiembre	55
Ilustración 6: Gráfico de Precipitación Media Diaria y Variación del Nivel Freático del Pozo 1 del mes de Julio a Septiembre	56
Ilustración 7: Gráfico de Precipitación Media Diaria y Variación del Nivel Freático del mes de Julio a Septiembre (3 días Posteriores).....	57
Ilustración 8: Gráfico de Precipitación Media Diaria y Variación del Nivel Freático del mes de Julio a Septiembre.....	58
Ilustración 9: Gráfico de Precipitación Media Diaria y Variación del Nivel Freático del mes de Julio a Septiembre (3 días Posteriores).....	59

Ilustración 10: Gráficas de Contenido de Humedad de Cada Pozo de Estudio.....	61
Ilustración 11: Gráfica de Curva Granulométrica de muestras del Pozo 1.....	64
Ilustración 12: Gráfica de Curva Granulométrica de muestras del Pozo 2.....	66
Ilustración 13: Gráfica de Límite Plástico de la muestra de Pozo 1.....	68
Ilustración 14: Clasificación SUCS en el Pozo 1	69
Ilustración 15: Gráfica de Límite Plástico de la muestra de Pozo 2.....	70
Ilustración 16: Clasificación SUCS en el Pozo 2	71

Introducción

En las últimas décadas, la Tierra ha atravesado transformaciones significativas en su dinámica, transformaciones profundas y aceleradas que han puesto en el centro del debate científico y social los conceptos de variabilidad y cambio climáticos (IPCC, 2021). No es meramente una cuestión de fluctuaciones naturales; nos encontramos ante un patrón de alteración discernible en los ciclos atmosféricos e hidrológicos, impulsado en gran medida por actividades humanas. Este cambio se manifiesta en fenómenos palpables: el ascenso ininterrumpido de las temperaturas globales, la intensificación y alteración de los patrones de precipitación que conllevan tanto a sequías prolongadas como a eventos de lluvia de intensidad y frecuencia sin precedentes, y la consecuente modificación de los regímenes hidrológicos tanto superficiales como subterráneos (Trenberth, 2011). Estas alteraciones no solo perturban la delicada homeostasis de los ecosistemas naturales y amenazan la biodiversidad, sino que también ejercen una presión creciente y a menudo destructiva sobre los sistemas socioeconómicos y las infraestructuras críticas que sustentan la vida moderna. La resiliencia de nuestras ciudades, la estabilidad de nuestras redes de comunicación y transporte, y la seguridad de las comunidades humanas, dependen cada vez más de una comprensión exhaustiva de cómo estos nuevos escenarios climáticos interactúan con el entorno natural, particularmente con el suelo, que es el pilar fundamental sobre el que se erige la inmensa mayoría de nuestras construcciones y actividades productivas.

Dentro de estas interacciones, la ingeniería geotécnica y la hidrogeología emergen como disciplinas interconectadas de vital importancia. El suelo, más allá de ser un simple soporte, es un material de ingeniería cuyo comportamiento mecánico es inherentemente sensible y directamente modulado por su contenido de humedad y el estado tensional efectivo en su matriz porosa. En este sentido, la presencia, profundidad y fluctuación del nivel freático —definido como la superficie superior de la zona del subsuelo donde todos los poros están completamente saturados de agua— no son meros datos auxiliares, sino factores determinantes que controlan la resistencia al corte, la capacidad portante, la compresibilidad y, en última instancia, la estabilidad global de cualquier masa de suelo. Por ejemplo, un ascenso significativo del nivel freático, resultado de una recarga hídrica abundante, implica un aumento de la presión de poros. De acuerdo con el principio de esfuerzos efectivos, fundamental en la mecánica de suelos (Terzaghi, 1943), este incremento en la presión de poros reduce los esfuerzos efectivos y, consecuentemente, disminuye de forma drástica la resistencia al corte del suelo, lo que puede precipitar fallas en taludes o generar problemas de asentamiento en cimentaciones. Por el contrario, periodos prolongados de descenso del nivel freático pueden inducir la contracción de suelos finos cohesivos, provocando la formación de grietas y fisuras que, aunque inicialmente parezcan benignas, pueden convertirse en conductos preferenciales para una infiltración masiva y rápida de agua durante eventos de precipitación posteriores. Esta infiltración súbita lleva a una rápida saturación y ablandamiento del suelo, lo que puede resultar en una pérdida catastrófica de resistencia y estabilidad (Fredlund & Rahardjo, 1993; Rahardjo et al., 2008).

La variabilidad climática contemporánea, al alterar la frecuencia, intensidad y duración de las precipitaciones, ejerce una influencia directa y profunda sobre la dinámica del nivel freático. Esta relación intrínseca y de retroalimentación entre el clima, la hidrología del subsuelo y la respuesta geotécnica crea un bucle complejo que, puede llevar a subestimaciones

significativas de riesgo y a un diseño de ingeniería inadecuado. La capacidad de prever cómo los cambios en los regímenes de precipitación se traducen en ascensos o descensos del nivel freático, y cómo estas variaciones hidrológicas, a su vez, alteran las propiedades geotécnicas intrínsecas del suelo, es una pieza insustituible para la resiliencia territorial y la seguridad de las infraestructuras.

Las regiones montañosas, por su naturaleza orográfica y geológica, son particularmente sensibles a esta compleja interacción. En entornos como la Cordillera de los Andes, donde se combinan pendientes pronunciadas, geologías complejas (frecuentemente dominadas por formaciones volcánicas, suelos residuales derivados de la meteorización in situ y depósitos coluviales transportados), y regímenes hidrológicos estacionales marcados, los sistemas de laderas son intrínsecamente propensos a fenómenos de inestabilidad geotécnica. Estos incluyen deslizamientos de tierra de diversas tipologías y asentamientos diferenciales que afectan la estabilidad de las construcciones. En el caso específico de Ecuador, un país caracterizado por su geografía andina y su alta actividad sísmica, la provincia de Azuay es un claro ejemplo de una región que ha sido, y lamentablemente sigue siendo, escenario recurrente de múltiples eventos de movimientos en masa.

Dentro de la provincia de Azuay, el Cantón Nabón se destaca por su particular susceptibilidad a esta problemática. A lo largo de su historia reciente, el cantón ha experimentado de manera recurrente episodios severos de inestabilidad de laderas y problemas estructurales en cimentaciones, los cuales han sido consistentemente asociados con periodos de alta pluviosidad y la consiguiente saturación del subsuelo (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2024). Los reportes detallados de afectaciones en zonas habitadas, infraestructuras críticas y vías de comunicación, particularmente en el sector Rosas, indican una relación causal clara y

directa con las condiciones hídricas del subsuelo, determinadas por la variabilidad del nivel freático.

No se dispone de estudios detallados y sistemáticos a largo plazo que midan con precisión cómo responde el nivel freático a la variabilidad climática específica observada en el sector de Rosas, Nabón, ni que determinen el efecto directo y medible de estas variaciones hídricas sobre las propiedades mecánicas fundamentales de los suelos predominantes en esta zona. Los análisis existentes son a menudo de carácter exploratorio, se centran en el estudio post-facto de eventos específicos o carecen de un monitoreo in situ prolongado que permita capturar la compleja dinámica hidrológica del subsuelo. La falta de datos detallados, específicos y cuantificables restringe significativamente la capacidad de las autoridades locales, los planificadores territoriales y los ingenieros geotécnicos para realizar evaluaciones de riesgo precisas, diseñar obras de infraestructura resilientes y formular estrategias de planificación y mitigación que se adapten de manera efectiva a las condiciones hidrológicas cambiantes del subsuelo bajo un escenario de clima dinámico.

Es precisamente en este contexto de una necesidad urgente de conocimiento aplicado y una brecha de información crucial de esta tesis. El objetivo de esta investigación es analizar y tratar de manera profunda y sistemática esta compleja relación, no solo describiendo el problema, sino también cuantificando y analizando en profundidad la interacción multifacética entre los factores climáticos, el comportamiento hidrológico del nivel freático y las propiedades geotécnicas del suelo en el sector Rosas. Mediante la integración de un análisis robusto de datos climático, un programa de monitoreo detallado, se busca generar una base de conocimiento empírica y teórica que sea de utilidad directa y aplicada.

1. Problema

1.1 Antecedentes

La ingeniería geotécnica, que comenzó con los estudios pioneros de Coulomb (1776) y Rankine (1857) sobre la presión de tierras, ha evolucionado para comprender a fondo el impacto profundo e inevitable de la humedad en el comportamiento mecánico del suelo. La base de esto debe basarse en la interpretación del desarrollo de la tensión efectiva en los suelos. Sin embargo, fue solo con la introducción del concepto de tensión efectiva por Karl Terzaghi en 1925, y su consolidación con su obra "Mecánica Teórica de Suelos" en 1943, el incremento del nivel freático afecta directamente las propiedades mecánicas del suelo, ya que una mayor saturación provoca un aumento en la presión de poros. Este concepto revolucionario mostró que un aumento en la presión de poros (que generalmente resulta de un aumento del nivel freático) disminuye directamente las tensiones efectivas y, por lo tanto, tanto la capacidad de carga como la estabilidad del suelo (México, 2010).

Un gran flujo de agua durante tales eventos extremos genera un aumento igualmente rápido en el nivel freático, con la consecuencia de que el perfil del suelo se vuelve prácticamente completamente saturado y pierde la mayor parte de su resistencia al corte.

La discusión sobre la estabilidad en el plan geotécnico en esta región, especialmente en el área andina (Sudamérica), es a largo plazo y alterada por episodios de cambios climáticos. En países como Colombia, Perú y Ecuador, los deslizamientos de tierra, deslizamientos y las inundaciones torrenciales son un evento importante y de alta frecuencia que ocurre durante las temporadas de lluvias (Villagómez, 2015).

Nabón Chusig(2005) La provincia de Azuay, como es el caso del cantón Nabón, donde ocurrió el desastre, está geográficamente situada en un lugar donde la vulnerabilidad andina es muy clara. Las autoridades locales y nacionales han registrado la repetición de deslizamientos de tierra y problemas de asentamiento, siendo estos desastres importantes que han estado afectando a comunidades enteras e infraestructura física primordial como carreteras, puentes y redes de servicios básicos (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2024; GAD Municipal Nabón, 2019). Tales ocurrencias han resultado en daños económicos considerables, interrupciones a largo plazo de carreteras y servicios, y, trágicamente, pérdida de vidas, demostrando claramente un vínculo mórbido entre eventos de lluvia extrema e inestabilidad del suelo. Sin embargo, tales manifestaciones, que se experimentan en el sector, y el alto grado de vulnerabilidad que presenta la zona están respaldados y directamente relacionados, según las investigaciones de los autores, por una falta de estudios técnicos y medidos que detallen el coeficiente, tanto específico, de las variabilidades climáticas observadas en el sector de Rosas del Cantón Nabón, comportamientos hidrológicos registrados de su nivel freático, y la cuantificación del impacto específico en los parámetros mecánicos propios del suelo predominante de la zona. La gran mayoría de los estudios existentes son regionales, estudios de casos de eventos singulares, o carecen de un monitoreo extendido in-situ sobre el cual modelar y predecir la respuesta del suelo a un clima cambiante.

1.2 Descripción del problema

El sitio, situado en las estribaciones andinas en el área de Rosas del Cantón Nabón, es extremadamente complejo en términos geomorfológicos y topográficos accidentados. Los suelos que cubren esta área son principalmente residuales, como consecuencia de la meteorización in situ de rocas ígneas y metamórficas, importadores y coluvión constituidos por material transportado por gravedad desde las cabeceras Inter montañas. Estos suelos naturales, a menudo presentados con una estructura metaestable y una distribución heterogénea del tamaño de grano (que puede ir desde limos y arcillas hasta gravas y cantos rodados), son fundamentalmente sensibles y reactivos frente a variaciones del contenido de agua y, por lo tanto, de las modificaciones resultantes de sus propiedades geotécnicas. La existencia de arcillas expansivas o colapsables en algunas partes, aunque no siempre, puede contribuir a la susceptibilidad al cambio volumétrico.

Climáticamente, la región interandina de Ecuador, y específicamente en el Cantón Nabón, se caracteriza por un patrón de precipitación. Hay evidencia que muestra un aumento en la ocurrencia de eventos de precipitación más frecuentes, intensos y extremos que resultan en grandes volúmenes de lluvia en períodos muy cortos, a menudo superando la capacidad de infiltración natural de los suelos. Al mismo tiempo, se han reportado sequías más prolongadas y severas de lo normal, lo que lleva a períodos más largos de déficit hídrico y somete aún más al suelo a ciclos de secado más frecuentes y severos. Esta situación es congruente con las proyecciones climáticas para la región andina, que predicen una variación más notable y eventos extremos (CEPAL, 2014; CONDESAN, 2020).

Esta variación atípica y creciente en el clima también enfatiza y se refleja directamente en la variación en los niveles del curso de agua subterránea en profundidad en el subsector Rosas; es irregular e impredecible en ciertos casos.

El problema se agrava exponencialmente dada la falta de monitoreo regular y a largo plazo del nivel de agua subterránea y la resolución temporal en el sector Rosas. Aunque los datos meteorológicos generales pueden contabilizarse a escala regional a través de entidades como el INAMHI.

Por lo tanto, las decisiones de planificación territorial, la proyección de nuevas infraestructuras civiles y la definición de medidas para evitar el riesgo se basan en estimaciones generales, bases de datos de otras regiones o en análisis históricos que no representan correctamente la situación real del subsuelo en el pasado y futuro para un cambio global y un evento excepcional, situación que por derecho propio aumenta la vulnerabilidad de la población y el patrimonio del sector Rosas. La falta de comprensión de esta interdependencia limita fundamentalmente la capacidad de diseñar políticas de ingeniería y públicas que sean genuinamente resilientes y adaptativas.

1.3 Importancia y alcances

El alcance de esta tesis es bastante limitado, pero, al mismo tiempo, sistemático desde la recopilación de datos primarios hasta la creación de la recomendación estratégica:

1.3.1 Análisis profundo y multidimensional del clima: Se realizará un análisis exhaustivo de una serie para la precipitación (diaria, mensual) en el sector de Rosas, tanto representativas como cercanas al área de interés. Esto implicará no solo el análisis de promedios y variaciones estacionales, sino que también se manejará información utilizando métodos estadísticos.

1.3.2 Se realizará monitoreo del nivel freático en diferentes ubicaciones para capturar tanto niveles altos como bajos de agua que podrían aumentar la presurización del agua en los poros y se implementará mediante puntos de

pozo u observación en el área de Rosas para caracterizar las diversas condiciones geotécnicas e hidrogeológicas. El objetivo es poder monitorear continuamente para capturar la dinámica de la fluctuación del nivel freático, incluyendo la observación de la respuesta detallada del nivel freático a eventos de recarga de precipitación y procesos de descarga. La frecuencia de medición será suficiente para registrar cambios importantes y subsecuentes en los niveles de agua subterránea.

1.3.3 Caracterización geotécnica exhaustiva y representativa bajo condiciones de humedad variadas: Las pruebas se realizarán en laboratorio de acuerdo con normas nacionales e internacionales (por ejemplo, ASTM, NTE INEN) e incluirán: propiedades índices (distribución del tamaño de partículas por tamizado y límites de Atterberg, contenido de humedad natural).

1.3.4 Desarrollo de recomendaciones aplicables y estratégicas para la gestión del riesgo: Estas recomendaciones serán para el GAD Municipal de Nabón, profesionales de la ingeniería (diseñadores y constructores), planificadores territoriales y la comunidad local en el sector de Rosas del Cantón Nabón. Estas últimas se centrarán en avanzar significativamente en la gestión del riesgo geotécnico, destacando en particular los roles decisivos que juegan la variabilidad climática y el comportamiento dinámico del nivel freático en la determinación de la estabilidad del suelo.

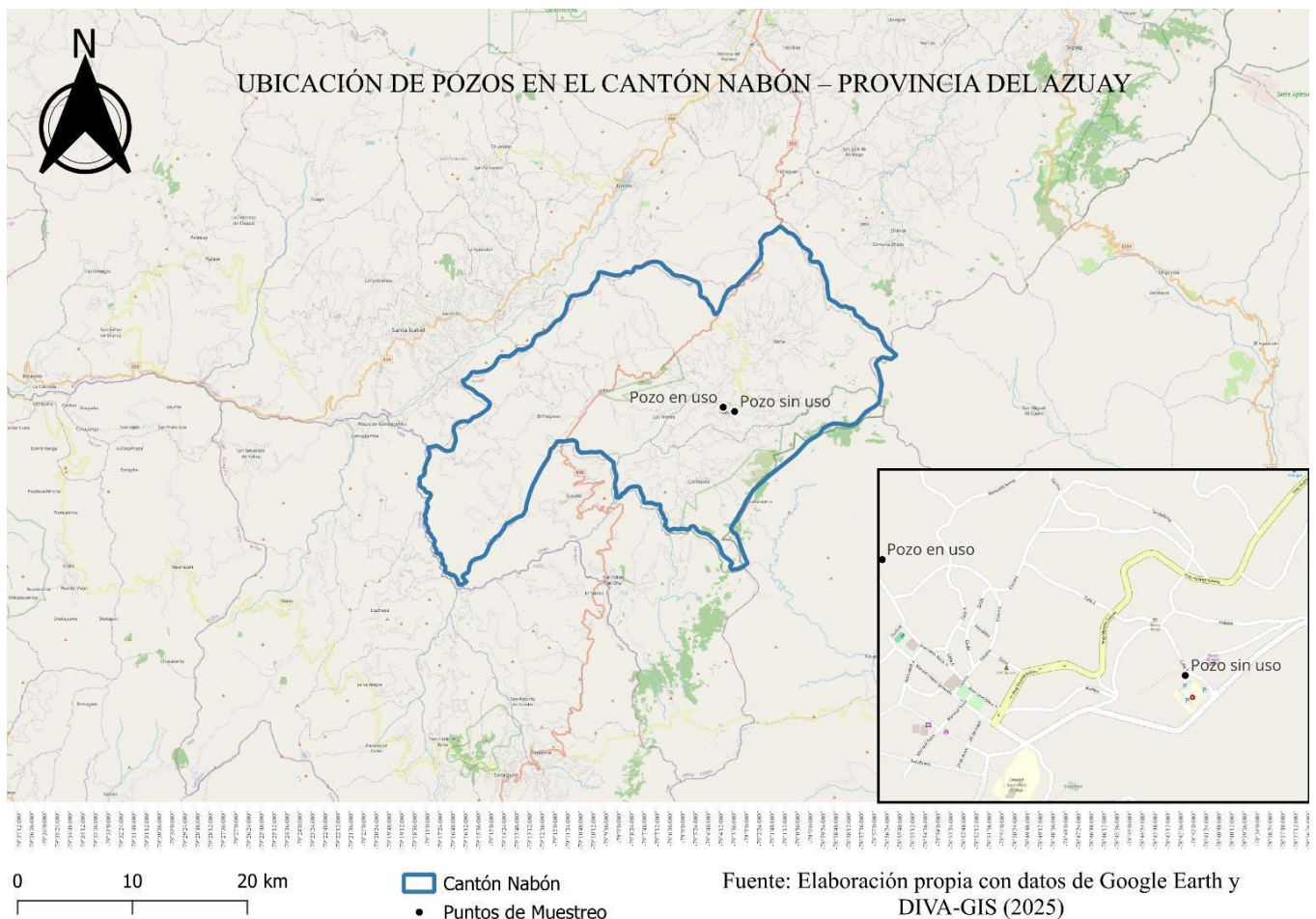
1.4 Delimitación

Delimitación geográfica (espacial): Se considera el sector Rosas del cantón Nabón.

Delimitación Temporal: La investigación se desarrolló a inicios del mes de Marzo hasta finales del mes de Junio en el año 2025.

Delimitación Sectorial: Para los tramos elegidos para la extracción de muestras de suelo y medición del nivel freático fueron escogidos las calles Ramada - Nabón y la 24 de mayo.

Ilustración 1: Ubicación de pozos en el cantón Nabón, provincia del Azuay.



Fuente: Elaboración propia con datos de Google Earth y DIVA-GIS (2025).

El mapa fue elaborado utilizando el software QGIS, integrando información geoespacial proveniente de fuentes abiertas como Google Earth y DIVA-GIS (2025). Se delimita de forma precisa el cantón Nabón, en la provincia del Azuay, mediante un polígono azul que destaca su extensión territorial. Se han georreferenciado los puntos de muestreo

correspondientes a pozos en uso y sin uso, representados mediante simbología clara y diferenciada. El mapa incluye una escala gráfica expresada en kilómetros, coordenadas geográficas en los márgenes y un recuadro ampliado que permite visualizar con mayor detalle el área urbana del cantón y ubicación de los pozos de estudio. Además, se incorporaron elementos cartográficos esenciales como la rosa de orientación, la leyenda interpretativa y la fuente de los datos utilizados. Este mapa cumple una función clave al contextualizar geográficamente el área de investigación.

Delimitación institucional: La investigación está dirigida a la toma de muestra de suelo para a continuación con su respectivo ensayo en el laboratorio, y la toma del nivel freático de dicho sector.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar como las fluctuaciones del nivel freático, en función de la variabilidad climática, afectan las propiedades mecánicas del suelo y su relación con la estabilidad del terreno en el sector Rosas del cantón Nabón.

2.2 Objetivos específicos

- Evaluar las variaciones del nivel freático en el sector Rosas y su relación con los patrones climáticos, considerando como la humedad y saturación del suelo impacta sus propiedades.
- Analiza como las fluctuaciones del nivel freático influyen en la estabilidad del terreno y contribuyen a los deslizamientos de tierra.

- Proponer estrategias para la gestión del riesgo y la planificación territorial en la región, considerando como la capacidad del suelo para soportar diversas condiciones climáticas afectan a las infraestructuras locales.

3 Marco teórico

3.1 Conceptos fundamentales de los suelos

El suelo es un medio inherentemente complejo y multifásico que consiste en una elaborada estructura de partículas sólidas (generalmente minerales, pero también materia orgánica), una capa de agua que, en cierta medida o completamente, llena los espacios entre ellas, y una capa de aire que podría estar presente en los espacios potencialmente vacíos.

La proporción de estos tres componentes sólidos, agua y aire es relativa, y su interacción controla dinámicamente un gran número de las propiedades ingenieriles del suelo, lo que incluye la resistencia al corte, la permeabilidad del suelo y, en última instancia, su estabilidad frente a diversas cargas (Lambe y Whitman, 1969; Das, 2008).

Una comprensión exhaustiva de las características y relaciones mutuas de estas fases es esencial para cualquier análisis fundamental en geotecnia y la toma de decisiones constructivas en varias obras de ingeniería.

3.1.1 Granulometría: La composición por tamaño de partículas y sus aplicaciones

El análisis granulométrico es una propiedad física fundamental de los suelos, ya que determina la distribución porcentual de las partículas sólidas de diferentes tamaños que componen el suelo. Esta distribución no solo es útil para clasificar los suelos de manera

preliminar, sino que también impacta de manera significativa en diversas características esenciales de ingeniería, como la permeabilidad (es decir, cuán fácilmente se mueve el agua a través de un suelo), la compresibilidad (cuán fácilmente se deforma un suelo bajo carga), la resistencia al corte (si una fuerza aplicada al material tiende a deformarlo o cortarlo) y su respuesta bajo compactación (Holtz & Kovacs, 1981).

La granulometría se cuantifica utilizando los siguientes procesos estándar dependiendo del rango de tamaño de las partículas:

La granulometría (según ASTM D422; NTE INEN 696) es la técnica utilizada principalmente para analizar las partículas más gruesas, como gravas y arenas. Este proceso consiste en pasar una muestra de suelo secado y triturado a través de un conjunto de tamices con aberturas de tamaño conocido, dispuestos en orden descendente. El tamiz con la malla más grande se coloca al fondo, mientras que el de la malla más pequeña queda en la parte superior. Luego de agitar la muestra mecánicamente, se pesa la fracción que queda en cada tamiz. Con estos pesos, se calcula el porcentaje de material más fino que pasa a través de cada tamiz, permitiendo determinar la distribución de tamaños de las fracciones gruesas. Se emplean tamices de uso común, como el No. 4, 10, 40 y 200 (equivalentes a 4.75 mm, 2.00 mm, 0.425 mm y 0.075 mm, respectivamente), siendo el tamiz No. 200 el que establece la separación clásica entre suelos finos y gruesos.

El análisis con hidrómetro (según ASTM D422, NTE INEN 696) se emplea para medir la distribución del tamaño de partículas finas, como limo y arcilla, especialmente aquellas que no pueden ser adecuadamente medidas por tamizado. Los resultados de ambos métodos se combinan y se representan en una curva granulométrica, donde el porcentaje de material más fino que pasa por cada tamiz se coloca en el eje vertical (en escala aritmética) y el diámetro de

las partículas en el eje horizontal (en escala logarítmica). Esta curva permite obtener parámetros esenciales para la clasificación y caracterización de los suelos.

D_{10} (*Diámetro Efectivo*): Es el diámetro para el cual el 10% de la muestra es más fina. Es un indicador de la permeabilidad del suelo.

D_{30} : Es el diámetro para el cual el 30% de la muestra es más fina.

D_{60} : Es el diámetro para el cual el 60% de la muestra es más fina.

Con estos valores, se calcula el Coeficiente de Uniformidad (C_u) y el Coeficiente de Curvatura (C_c):

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

C_u representa la uniformidad del tamaño de las partículas (bajo indica un suelo más uniforme) y C_c representa la curvatura de la distribución. Ambos son importantes para calcular si un suelo está bien graduado (lo cual es bueno, mejor compactación y resistencia) o mal graduado (uniforme, o hay un vacío en los tamaños), los resultados están directamente vinculados con las propiedades geotécnicas del suelo y su clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (ASTM D2487).

"Límites de Atterberg: indicadores de consistencia, plasticidad y actividad arcillosa"

Estos son una serie estándar de pruebas empíricas utilizadas para clasificar el grano fino según su contenido de humedad. Desarrollados por el científico sueco Albert Atterberg, y estandarizados y perfeccionados por Arthur Casagrande en la década de 1930, estos límites demarcan convenientemente puntos en los que un suelo de textura fina cambiará de un estado

a otro (por ejemplo, de semisólido a plástico) y se utilizan para clasificar las propiedades litológicas de un suelo: sólido, semisólido, plástico y líquido (Casagrande, 1932; ASTM D4318; NTE INEN 706, 707).

Las arcillas se consideran propiedades índice importantes debido a su estructura mineralógica laminar y su alta superficie específica, a diferencia de los suelos granulares como arenas y gravas. Esta característica les otorga una notable capacidad para absorber y retener agua. Su interacción con el agua tiene un impacto considerable en el volumen del material arcilloso y en sus propiedades mecánicas, siendo su comportamiento fuertemente influenciado por el contenido de humedad.

Límite líquido (LL o wL): Es el contenido mínimo de agua necesario para que un suelo fino adquiera fluidez. Si el contenido de humedad excede este límite, el suelo pierde su capacidad de resistir el corte y soportar cargas se determina en el laboratorio utilizando la Copa de Casagrande para medir el Límite Líquido (LL). Se coloca una muestra de suelo con consistencia similar a una pasta de concreto en la copa, se realiza un agujero en el centro de la muestra y se somete a golpes controlados (generalmente 2 caídas por segundo) hasta que el agujero se cierra completamente distancia de 12.7 mm (0.5 pulgadas) después de 25 golpes. El Límite Plástico se determina registrando el número de golpes (25) necesarios para llenar la ranura. Valores altos de LL (> 50%) indican que los suelos son altamente plásticos, capaces de retener grandes cantidades de agua, lo que los hace más compresibles y expansivos, lo cual representa un desafío en ingeniería.

Límite Plástico (LP o WP): El límite plástico (LP) es el contenido máximo de humedad en el que un suelo de partículas finas sigue comportándose como un material plástico. Cuando la deformación (ϵ_2) es menor que la deformación límite (ϵ), el suelo pasa a un estado semisólido, volviéndose quebradizo y perdiendo su plasticidad. En la prueba, se amasa una

pequeña muestra de suelo para formar un cilindro delgado de aproximadamente 3.2 mm (1/8 de pulgada) de diámetro. El LP se determina cuando el cilindro comienza a romperse o agrietarse (sin una reducción visible en su tamaño) a este diámetro, lo que marca el límite inferior de la zona plástica del suelo (Romero, 2021).

Índice de Plasticidad (PI): Es la diferencia numérica entre el Límite Líquido y el Límite Plástico ($PI = LL - PL$). Este índice refleja el rango de contenido de humedad en el que los suelos mantienen un comportamiento plástico. Un PI elevado indica que el suelo es altamente plástico, lo cual es característico de suelos arcillosos con una gran cantidad de minerales de arcilla activos o una alta superficie específica. Esto significa que debería ser posible lograr deformaciones muy grandes en el suelo sin que se rompa, en un rango considerable de humedad, por un lado, pero, por otro lado, gran cohesión cuando está seco, baja resistencia al corte cuando está completamente húmedo y un potencial sustancial para el cambio volumétrico (expansión cuando está húmedo, contracción cuando está seco) con condiciones de humedad cambiantes. En contraste, los limos y las arenas, que muestran baja o nula plasticidad respectivamente, tienen un PI bajo o cero. El PI es clave para evaluar la tendencia de un suelo a experimentar cambios volumétricos y su respuesta durante los ciclos de humedad y sequedad, los cuales son frecuentes en áreas afectadas por variabilidad climática (Romero, 2021).

Los Límites de Atterberg junto con el porcentaje de partículas finas (aquellas que pasan por el tamiz No. 200) son fundamentales para clasificar los suelos finos de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Esta clasificación no solo permite identificar de manera general el tipo de suelo (por ejemplo, MH para limo de alta plasticidad, CH para arcilla de alta plasticidad), sino que también ofrece una estimación preliminar de sus propiedades ingenieriles, como su capacidad de licuación (en suelos de limo no plástico), compresibilidad, resistencia y/o su tendencia a

causar problemas de expansión o colapso en cimientos o taludes, particularmente si se ve influenciada por cambios en la humedad o el nivel freático. En las regiones andinas, donde predominan suelos con alto contenido de finos y suelos residuales o coluviales, la medición de los Límites de Atterberg es fundamental para evaluar cómo las variaciones en las condiciones hidrológicas afectan el comportamiento del suelo.

3.1.2 Esfuerzo Total (σ): La carga bruta sobre la matriz del suelo

El esfuerzo total (σ) en un punto específico dentro de una masa de suelo: Es la presión o carga por unidad de área en ese punto, a lo largo de un plano determinado. Teóricamente, se calcula como el peso de los materiales situados por encima de ese nivel, tomando en cuenta el peso de las partículas sólidas del suelo, el volumen de agua intersticial (tanto en condiciones saturadas como no saturadas) y el volumen de aire en los poros. La fórmula básica para calcular el esfuerzo total a una profundidad z en una masa de suelo considerada homogénea y de extensión infinita (lo que permite simplificar las condiciones a deformación plana y suponer presiones hidrostáticas) es:

$$\sigma_z = \gamma_{total} \times z$$

σ_z representa el esfuerzo total vertical que actúa a la profundidad z .

γ_{total} representa el peso unitario de la masa de suelo, que incluye el peso de las partículas sólidas del suelo, el peso del agua en los poros y el peso del aire (si está presente en los vacíos), aunque este último suele ser desestimado debido a su baja magnitud. Los valores de peso unitario seco y saturado pueden ser muy variables. Por lo tanto, el peso unitario natural o húmedo ($\gamma_{natural}$ o $\gamma_{húmedo}$) es el que se utiliza por encima del nivel freático. Por debajo del nivel freático, cuando el suelo está completamente saturado, se emplea el peso unitario saturado (γ_{sat}).

Z es la profundidad vertical medida desde la superficie del suelo hasta el punto específico donde se desea calcular el esfuerzo.

Cuando la masa del suelo no es uniforme, es decir, se compone de varios estratos o capas con distintas características (como diferentes pesos unitarios, contenidos de humedad o tipos de suelo), el cálculo del esfuerzo total a una profundidad determinada se lleva a cabo como la sumatoria de las aportaciones de cada capa subterránea hasta dicha profundidad:

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^n (\gamma_{total, i} \times H_i)$$

Donde:

$\gamma_{total, i}$ es el peso unitario total de la i-ésima capa de suelo.

H_i es el espesor vertical de la i-ésima capa de suelo.

n es el número total de capas de suelo que se encuentran por encima de la profundidad.

Es muy importante señalar que el esfuerzo total es una indicación de la presión total o bruta, resistida por el suelo. Sin embargo, por sí solo no diferencia entre la parte de esta presión que es soportada y transmitida por el esqueleto sólido de las partículas del suelo y la parte que lo es por el agua intersticial, que llena los vacíos. Esta diferencia es fundamentalmente importante para la comprensión de la respuesta mecánica real del suelo, ya que nos lleva al examen de la presión de poros, así como a los conceptos de esfuerzo efectivo. El gradiente en el momento total, por ejemplo, por la presencia de un relleno, tendrá implicaciones geotécnicas, pero sus consecuencias están fundamentalmente mediadas por la física del agua.

3.1.3 Presión de poros (u): La presión del agua y su papel en la estabilidad.

La presión de poros (u) es la presión causada por la presencia de agua (y , en menor medida, aire en suelo no saturado) en los vacíos del suelo.

Esta presión, aplicada de manera isotrópica (en todas las direcciones) sobre las partículas sólidas y las paredes de los poros, es un factor clave de tensión en el suelo. Es importante señalar que, a diferencia de la tensión efectiva, la presión de poros no contribuye a la resistencia del suelo frente al esfuerzo cortante. En cambio, su aumento provoca una reducción de la presión efectiva entre las partículas del suelo, lo que disminuye su capacidad para transmitir y resistir esfuerzos cortantes (Terzaghi, 1943; Holtz & Kovacs, 1981). En términos sencillos, la presión del agua en los poros actúa para "levantar" o hacer flotar las partículas del suelo, reduciendo así la fricción y la cohesión. El tipo y cálculo de la presión de poros varían según el estado de saturación del suelo y su relación con el nivel freático. En suelos saturados (con el nivel freático por debajo de la superficie), los vacíos del suelo están completamente llenos de agua, y la presión de poros es positiva (hidrostática). Esta presión se define por la distancia del punto de interés por debajo del nivel freático.

$$u = \gamma_w \times h_w$$

Donde:

γ_w es el peso unitario del agua (aproximadamente 9.81 kN/ m^3 o 62.4 lb/ft^3 a condiciones estándar de temperatura y presión).

h_w es la profundidad vertical del punto de interés medida desde el nivel freático hacia abajo.

Cuando el nivel freático asciende, asociado a períodos de alta presión, se incrementa la altura del agua (h_w) en un punto específico, lo que aumenta significativamente la presión de poros en las áreas sumergidas de la masa del suelo. Este aumento de la presión de poros es una

de las principales causas de la inestabilidad en taludes y fallos en cimentaciones.

En suelos no saturados (por encima del nivel freático), el área entre la superficie del suelo y el nivel freático está compuesta por vacíos llenos tanto de agua como de aire. La presión del agua en los poros en esta zona es generalmente negativa en comparación con la presión atmosférica, y se conoce como succión matricial ($u_a - u_w$, donde u_a es la presión del aire en los poros y u_w es la presión del agua en los poros).

En suelos sueltos, la presión de aire en los poros (u_a) generalmente puede considerarse casi igual a la presión atmosférica (es decir, $u_a \approx 0$) para fines de ingeniería, aunque un cambio en la presión de aire en los poros debe tenerse en cuenta en un análisis más sofisticado.

El parámetro de presión de poros es altamente variable, y su magnitud depende directamente de la humedad del suelo, el tipo de suelo y la profundidad. Las fluctuaciones en el nivel freático, influenciadas por el patrón de precipitación, tienen un impacto directo y crucial en la magnitud de la presión de poros, que es un factor clave para la estabilidad geotécnica y una de las principales causas de problemas en este ámbito, especialmente en suelos finos y en formaciones de laderas susceptibles a deslizamientos. Es fundamental monitorear este parámetro para poder interpretar la mecánica del suelo en el lugar.

3.1.4 Esfuerzo efectivo (σ'): El pilar fundamental de la mecánica de suelos

La (García Sánchez y Álvarez Gulién, 2008) tensión efectiva (σ') es, posiblemente, el concepto más trascendental, profundo o significativo de toda la mecánica de suelos; la columna vertebral para entender la respuesta mecánica de este material. Fue desarrollada por el ingeniero civil y geólogo austriaco Karl Terzaghi (1883, 1963), un brillante pionero, quien la formuló por primera vez en la década de 1920, la desarrolló más y finalmente la consolidó en su obra magna, *Mecánica Teórica de Suelos, (1943, reimpresa en 1960).

Terzaghi demostró que la respuesta mecánica del suelo, es decir, la resistencia al corte, la compresibilidad, la rigidez y, en términos generales, la deformación bajo la tensión aplicada no estaba determinada por la tensión total aplicada al suelo, sino solo por la tensión intergranular transferida al esqueleto o matriz del suelo.

Esta presión efectiva es lo que realmente impulsa deformaciones volumétricas significativas y la movilización de la resistencia al corte. Las fuerzas de poro de cualquier signo no otorgan resistencia, sino que solo la modulan modificando la fuerza de contacto entre las partículas.

La fórmula básica que describe el esfuerzo efectivo en un suelo completamente saturado es la ecuación de esfuerzo efectivo de Terzaghi:

$$\sigma' = \sigma - u$$

Donde:

σ' es la tensión efectiva. Es la tensión que soporta el esqueleto sólido entre las partículas del suelo. Es la presión que las partículas "experimentan" entre sí.

σ es la tensión total. Es la presión bruta total de todo lo que está por encima del punto de medición (el peso del material suprayacente (s), agua, aire y cualquier otra cosa que pueda afectar la estabilidad de la pendiente).

u es la presión de poro. Es la presión del agua que se llena en los vacíos del suelo y actúa en todas las direcciones.

Ninguna de estas ecuaciones sustituirá la fórmula de Terzaghi como la base del análisis geotécnico, ya que esta expresa un concepto fundamental: un aumento en la presión de poros (u) provoca una reducción en el esfuerzo efectivo (σ') para un esfuerzo total (σ) constante.

Esta simple presentación ilustra claramente por qué el suelo que es sólido y capaz cuando está seco, o cuando hay un nivel freático elevado, puede volverse repentinamente inseguro o fallar desastrosamente cuando hay un aumento significativo en el nivel freático, cuando el perfil del suelo está cerca de estar lleno de agua. Cuando aumenta la presión de poros, el contacto intergranular entre ellos se reduciría, y las partículas del suelo "flotan" (separándose efectivamente) bajo la influencia de la presión del agua, lo que reduciría la fricción efectiva del cuerpo sólido y reduciría la fuerza de unión efectiva del cuerpo. Este es el concepto base de varios ejemplos de inestabilidad de taludes, licuefacción sísmica de suelos granulares y fallas de cimentaciones bajo, por ejemplo, lluvia o inundación.

Por otro lado, una caída del nivel freático reduce la presión de poros (u) cuando aumenta el esfuerzo efectivo (σ') y, en consecuencia, la resistencia y rigidez del suelo en general. En suelos no saturados, dado que los vacíos están parcialmente llenos de agua y aire, la definición anterior de esfuerzo efectivo se generaliza para tener en cuenta la influencia de la succión matricial. La ecuación general de suelos no saturados de Fredlund y Morgenstern (1977) presentada anteriormente por Fredlund y Rahardjo (1993) es:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$$

Donde:

u_a es la presión de poros del aire. En la mayoría de los casos de interés práctico, con el aire conectado a la atmósfera, u_a puede considerarse como cero (que es la presión atmosférica de referencia).

u_w es la presión de poros del agua, la cual es negativa con respecto a la presión atmosférica en suelos no saturados (conocida como succión matricial, $u_a - u_w$).

χ es un factor de la función de esfuerzo efectivo, una variable que depende del grado de saturación del suelo (o succión matricial) y varía de 0 (para suelo completamente seco) a 1 (para suelo completamente saturado), respectivamente.

Para el propósito de evaluaciones de estabilidad práctica de suelos no saturados, comúnmente se considera $u_a \approx 0$ (presión atmosférica de referencia), resultando en que la succión matricial ($u_a - u_w$) sea un componente positivo del esfuerzo efectivo y, por lo tanto, de la resistencia del suelo. Sin embargo, cuando un suelo no saturado se humedece y satura, el proceso hace que la succión matricial sea cero ($\chi \rightarrow 1$), y la ecuación se simplifica a la ecuación clásica de Terzaghi para suelos saturados. Esto es importante y explica el "colapso" de resistencia que se puede observar en suelos secos durante un rápido humedecimiento por infiltración de agua, un fenómeno de gran interés práctico en el comportamiento de taludes sometidos a ciclos de sequía y lluvias intensas. Con la pérdida de succión matricial, el esfuerzo efectivo disminuye sustancialmente y la resistencia al corte cae.

Es fundamental entender cómo las fluctuaciones en el nivel freático y la posición de la tabla de agua afectan la presión de poros, así como la evolución de esta presión y su impacto en el esfuerzo efectivo. Este conocimiento es crucial para analizar cómo la variabilidad climática influye en la estabilidad geotécnica de los taludes y la capacidad portante de las infraestructuras en el sector Rosas del Cantón Nabón. Al monitorear de cerca las variaciones en el nivel del agua y analizar las propiedades del suelo en diferentes niveles de saturación (saturado y no saturado), se pueden cuantificar los cambios en el esfuerzo efectivo y, de esta manera, realizar evaluaciones predictivas sobre la estabilidad del terreno.

4 Marco metodológico

4.1 Enfoque y tipo de investigación

Dada la complejidad inherente de un tema así, que involucra aspectos climatológicos, hidrológicos y geotécnicos, se buscó un enfoque que pretendiera abordar el problema de manera integral. Por lo tanto, este estudio sería un estudio de método mixto, que se atrevería a cuestionar la dialéctica del proceso cualitativo y cuantitativo. Esta estrategia híbrida es la más adecuada ya que permitirá cuantificar con precisión variables clave (incluyendo precipitación, temperatura, niveles freáticos de aguas subterráneas, resistencia del suelo) y desarrollar relaciones estadísticas robustas. Pero también porque este enfoque permitirá profundizar el conocimiento sobre los mecanismos de interacción y procesos subyacentes, así como sobre las especificidades del contexto del sector de Rosas.

Con respecto a la naturaleza de la investigación, se utilizará un diseño que incorpore e integre las siguientes características básicas:

Descriptivo: La descripción detallada y sistemática de las variables será una parte central de la investigación. Se trata de la recopilación, procesamiento y provisión de informaciones que muestren el comportamiento de la variabilidad climática en el sector (evolución de la precipitación), sobre el comportamiento temporal del nivel de agua subterránea, así como de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos predominantes en el área.

Correlacional: El objetivo será identificar y medir la relación y fuerza de asociación entre las diversas variables de interés. Esto implica primero establecer la relación entre variables climáticas y los niveles y desviaciones de la profundidad y altura del agua subterránea. En segundo lugar, se investigarán patrones de relaciones entre el nivel de agua subterránea (filtración variable debido a la variación en la presión de poros y los cambios asociados en las características mecánicas del suelo).

Explicativo: El diseño del estudio será principalmente no experimental. Esto se debe al hecho de que las características climáticas (precipitación, temperatura) y las condiciones hidrológicas son fenómenos naturales y no pueden ser controlados directamente por el investigador a escala de campo.

4.2 Área de estudio: Sector Rosas, Cantón Nabón, Provincia de Azuay, Ecuador

Este estudio se llevará a cabo en el sector de Rosas, que es una comunidad en el cantón Nabón de la provincia de Azuay en la parte sur de la Sierra ecuatoriana. La elección estratégica de esta área de trabajo de campo se debe a un conjunto de premisas fundamentales que la convierten en un caso de estudio bastante pertinente y representativo para el tema propuesto por esta tesis:

- La configuración geográfica del sector Rosas es típica de la zona interandina de Ecuador, que tiene una topografía compleja de laderas con variedad de pendientes, desde suaves en los valles hasta muy empinadas en las partes altas. Geológicamente, Nabón presenta un relieve montañoso compuesto mayoritariamente por rocas ígneas y sedimentarias, con evidencias de procesos de meteorización física y erosión laminar. (INIGEMM, 2022). Estos suelos son heterogéneos y muy sensibles a las variaciones de las propiedades mecánicas con el contenido de humedad. Estos suelos son representativos de una amplia gama de laderas andinas en la región. Estudios realizados en Nabón identifican suelos de tipo franco arcilloso, con alto contenido de humedad y moderada susceptibilidad a deslizamientos en pendientes superiores al 30%. (Nabón, 2021)

- Clima Andino bajo la Influencia de la Variabilidad Climática a Gran Escala: El Cantón Nabón, y el sector Rosas en un sentido más amplio, pertenece a una zona climática andina con un régimen de precipitación bimodal. Según el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), el cantón Nabón se encuentra dentro de un régimen climático húmedo templado, con precipitaciones que oscilan entre 500 y 1000 mm anuales y una temperatura media de 13,2 °C. (INAMHI, 2021)

4.3 Fases de investigación

Cada fase tendrá objetivos, metodologías, herramientas y entregables separados, lo que garantizará un tratamiento sistémico, coherente y consistente del asunto. Este enfoque basado en etapas permitirá una mejora continua de la calidad y una utilización efectiva de los recursos.

4.3.1 Fase I: Recopilación y Análisis de información climática

Este trabajo y el análisis detallado de los datos existentes es esencial para conocer el marco climático a largo plazo del sector de Rosas y para identificar conjuntos de variabilidad que pueden afectar la dinámica del nivel freático y la estabilidad del suelo.

4.3.1.1. Parámetros Climáticos Para Recopilar y sus Períodos

- Precipitación: Se informarán los registros diarios de precipitación (mm).
- Temperatura: Se informarán los registros diarios de temperatura (°C).

Período de Estudio: El estudio se desarrolló entre los meses de marzo a septiembre de 2025.

La recopilación y análisis de información climática se llevó a cabo mediante dos fuentes principales: Del software meteorológico “Windy” y el portal oficial del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

En el caso del software “Windy”, se optó por el modelo ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), debido a su alta resolución espacial y precisión en zonas andinas. Se realizó una toma de datos diarios disponibles para la región de Nabón, utilizando las capas de visualización de precipitación, humedad relativa y temperatura para el periodo de estudio. Esta información fue utilizada para correlacionar eventos meteorológicos con las variaciones del nivel freático. Estas capas permitieron observar tendencias recientes en los meses de estudio, facilitando el análisis de las variables climáticas relevantes para el comportamiento del nivel freático.

La información climática de Windy fue complementada con los reportes básicos emitidos por el INAMHI, en los cuales se analizaron valores históricos de precipitación y temperatura correspondientes a estaciones cercanas a la zona de estudio.

El análisis consistió en tabular los datos de precipitación, temperatura y humedad relacionándolos con las variaciones observadas en el nivel freático. Se utilizó para ello una hoja de cálculo en Excel, donde se graficaron tendencias y se identificaron correlaciones visuales preliminares.

Este enfoque dual permitió un análisis más integral y actual de las condiciones climáticas locales que influyen directamente en las características hidrogeológicas del suelo.

Determinación de la muestra:

La selección de la muestra se realizó considerando tres factores claves: accesibilidad y disponibilidad de datos históricos por parte del Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD)

de Nabón y continuidad temporal de las mediciones al menos durante el período de estudio. Esta selección garantiza que la muestra sea adecuada para el análisis del comportamiento espacial y temporal del nivel freático en relación con las condiciones climáticas.

4.3.1.2. Preprocesamiento y Análisis de Datos Climáticos:

- En este estudio se utilizaron métodos de imputación como la interpolación lineal para completar pocos registros de precipitación de datos faltantes. Este método se aplicó exclusivamente a datos climáticos diarios descargados desde las plataformas Windy y del INAMHI, en los casos donde existían vacíos temporales breves (máximo 3 días consecutivos). La interpolación lineal facilitó la estimación puntual entre registros válidos en estudios similares a nivel regional y local, asegurando la consistencia de las series temporales utilizadas en el posterior análisis de variabilidad climática.
- Análisis Descriptivo y de Tendencias: Se determinarán estadísticas descriptivas con respecto a las series de precipitación y temperatura.

4.3.2 Fase II: Monitoreo hidrogeológico del nivel freático

Esta fase es esencial, ya que ofrece datos de primera mano e inmediatos sobre la dinámica real del nivel de la capa freática, no solo en el sector de Rosas, sino también para fijar su respuesta particular al régimen de lluvias, y preparar el análisis de su efecto en el suelo.

- Son 4 puntos de monitoreo ubicados en el sector Rosas, correspondientes a pozos construidos por el GAD Municipal de Nabón, en los cuales se pueden realizar el control de la variación del Nivel Freático.

- Vulnerabilidad Reconocida: Ubicaciones cercanas a áreas pasadas de problemas de inestabilidad, como deslizamientos de tierra o asentamientos, o en las cercanías de estructuras críticas (carreteras, viviendas) que se ven influenciadas por cambios en el contenido de humedad.

Métodos e Instrumentos de Medición del Nivel Freático:

- Sondeas de Nivel de Agua Manual: Las mediciones se realizarán desde una línea de referencia fija y bien definida en la boca del pozo.

4.3.2.1 Frecuencia y Duración del Monitoreo:

Se establecerá una frecuencia de medición relativamente alta para monitorear el comportamiento dinámico del nivel freático y constatar sus variaciones temporales.

La frecuencia de monitoreo utilizada en este estudio fue semanal, durante los meses de abril, mayo, junio y semanal parcial para julio, agosto y septiembre. Esta periodicidad se definió considerando la disponibilidad de acceso al sitio y la estabilidad temporal esperada de la capa freática en la zona de estudio.

Según la Guía Técnica de Monitoreo de Aguas Subterráneas del INAMHI (2020), para estudios hidrogeológicos locales y de escala media, una frecuencia parcial es adecuada para observar variaciones relevantes en el comportamiento del nivel freático, especialmente en épocas de transición climática.

4.3.2.2 Tratamiento e Interpretación de Datos

Base de Datos utilizadas:

La base de datos utilizada para este estudio se conformó por registros de nivel freático y datos como la precipitación, humedad relativa y temperatura, registrados diariamente en los meses de estudio. Los datos de precipitación, humedad y temperatura fueron obtenidos desde la plataforma WINDY (www.windy.com), mientras que la información de referencia climática general provino del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI). Los datos de nivel freático fueron recolectados in situ mediante lecturas parciales en los pozos definidos en la zona de estudio. Toda la información fue organizada en una hoja de cálculo tipo Excel, estructurada por semanas y variables, para facilitar su análisis comparativo y gráfico.

- Creación de Series Temporales: Desarrollar un gráfico de series con el tiempo en un eje y la elevación del nivel freático en el otro.
- Hidrogramas de Respuesta: Generación de hidrogramas compuestos (precipitación vs. elevación del nivel freático) para mostrar el movimiento preciso del nivel del agua.

4.3.3 Fase III: Muestra geotécnico de campo y ensayos de laboratorio de suelos

Esta etapa es crucial porque hará posible obtener una caracterización física y mecánica detallada de los suelos de Rosas, así como ver experimentalmente cómo cambian estas propiedades comunes con el contenido de humedad y la altura del nivel freático.

4.3.3.1 Diseño de Muestreo Geotécnico de Campo

- Profundidad de las muestras de suelo: Se tomarán muestras de suelo superficiales a fin de identificar el grado de humedad y la capacidad de infiltración del agua en el suelo en función de la precipitación.

- Tipo y Almacenamiento de Muestras: Se recogerán dos muestras diferentes para pruebas de laboratorio, con la preservación adecuada:
 - Muestras de Condiciones Iniciales: Son las más significativas para definir las características mecánicas reales del suelo. Se tomarán muestras a 1 metro de la estructura natural del suelo y al contenido de humedad natural.
- Número y Representación de Muestras: Muestras para el tipo de suelo dominante (considerando tanto el suelo seco como húmedo y sus condiciones de humedad) que hará que la comparación y los resultados derivados sean estadísticamente representativos.

4.3.3.2 Programa de Pruebas de Laboratorio (En cumplimiento con las Normas)

Todas las pruebas de laboratorio y/o con la organización de estándares ecuatorianos vigente (NTE INEN - Norma Técnica Ecuatoriana). Esto garantiza la fiabilidad, la comparabilidad y la integridad científica de los datos obtenidos.

- Propiedades de Clasificación e Identificación del Índice
 - Contenido de Agua Natural (W_n): (ASTM D2216; NTE INEN 690). Es decir, la muestra de suelo en su estado in situ cuando se toma se caracteriza por tener x% de contenido de humedad por medición exacta. Es importante para determinar cambios de fase.
 - Análisis Granulométrico (Tamiz): (ASTM D422; NTE INEN 696). Proporciona la distribución del tamaño de grano por peso.
 - Límites de Atterberg (liquidez, plasticidad) (límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad): (ASTM D4318; NTE INEN 706, 707). Estas pruebas son

necesarias para la clasificación de suelos de grano fino y para estimar la plasticidad.

- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS): Basado en el análisis del tamaño de grano y los resultados de los límites de Atterberg, las muestras de suelo se clasifican de acuerdo con el sistema de clasificación de suelos SUCS, que es una identificación estandarizada que describe las características de un suelo de ingeniería.

4.3.4 Fase IV: Análisis de Datos, Correlación e Impacto Geotécnico

Para establecer una relación coherente entre las variables climáticas y el comportamiento del nivel freático, se utilizó precipitación diaria acumulada (mm/día), ya que el registro del nivel freático se obtiene mediante lecturas instantáneas o puntuales. Esta correspondencia temporal permite identificar de manera más precisa los efectos inmediatos de eventos de lluvia sobre el ascenso o descenso del nivel del agua subterránea.

Adicionalmente, se consideró la precipitación acumulada semanal como un parámetro complementario que permite observar tendencias más generales de saturación del suelo y condiciones antecedentes de humedad, las cuales también influyen en la respuesta geotécnica del terreno. Esta dualidad de escalas temporales (diaria) se aplicó para mejorar la comprensión tanto del efecto directo como del efecto acumulado de la precipitación sobre la dinámica del nivel freático.

Esta fase contempla el análisis de las variables climáticas para evaluar su comportamiento conjunto y su posible impacto en las condiciones geotécnicas del suelo. Se procederá de la siguiente manera:

4.3.4.1 Análisis estadístico descriptivo: Se calcularán medidas de tendencia de las variables de precipitación, temperatura, humedad relativa y nivel freático. Este análisis permitirá identificar patrones generales y detectar valores atípicos. Para ello, se utilizará Microsoft Excel.

4.3.4.2 Visualización de tendencias: Se elaborarán gráficos de líneas, diagramas de caja y gráficos de dispersión para observar la evolución temporal de las variables durante los meses analizados. Esto permitirá evidenciar la estacionalidad y posibles correlaciones visuales entre variables.

4.3.4.3 Evaluación del impacto geotécnico: A partir de los resultados de correlación, se analizará el comportamiento del suelo frente a los cambios climáticos estacionales. Se interpretarán los datos del nivel freático en función de las características geológicas del área, estimando el riesgo de inestabilidad o saturación en el terreno. Para este análisis se tomará como referencia la metodología propuesta por Terzaghi (1996).

Tabla 1: Comparación de Escalas Temporales de Precipitación

Variable Analizada	Escala Temporal	Tipo de Análisis	Ventajas	Aplicación en la Tesis
Precipitación Diaria	Día a Día	Correlación Directa con lecturas instantáneas del nivel freático	Permite detectar efectos inmediatos	Usada para correlacionar con cada medición puntual del nivel freático
Precipitación Semanal Parcial	Cada 3 días	Tendencia general de saturación del suelo y análisis complementario	Permite analizar condiciones antecedentes del suelo	Usada como apoyo para interpretar tendencias prolongadas

Fuente: Elaboración Propia (2025)

4.4 Población y Muestra

4.4.1 Población: Se realizarán toma de muestras de suelos superficiales, mientras que de suelos subsuperficiales se tomará información de estudios desarrollados por el GAD Municipal.

4.4.2 Muestra: La muestra consistirá en muestras de suelo del área de estudio representativas basadas los diversos estratos del suelo presentes.

4.5 Instrumentos y Materiales

La validez de los resultados obtenidos en esta investigación dependerá directamente de la calidad y calibración adecuada tanto de los instrumentos como de los materiales para su uso en las diversas etapas de la investigación.

4.5.1 Para la Recolección de Datos Climáticos

- Medición electrónica: Windy, plataforma (sitio web y app móvil) para visualizar y consultar datos meteorológicos en forma de mapa interactivo con múltiples capas (lluvia/precipitación, temperatura, humedad).

4.5.2 Para el Monitoreo del Nivel del Agua.

- Cinta métrica de acero: Para tomar medidas de referencia de la longitud y altura del pozo.

4.5.3 Para los Ensayos de Laboratorio de Suelos

- Equipos de pesaje y medición: Balanzas analíticas (0.01 g), básculas, vasos de precipitados, probetas graduadas, cilindros de sedimentación, calibradores vernier.

- Juegos de tamices: Completos, con aberturas estandarizadas según ASTM/ISO para relleno suelto y agitador de tamices.
- Aparato de Casagrande: Con contador de golpes y herramienta de ranurado para el Límite Líquido.
- Placas de vidrio: Para la prueba de Límite Plástico.
- Material auxiliar: Espátula, morteros, tamices manuales, bandejas de secado, vasos de laboratorio, agua destilada.

5 Resultados

En el contexto de la investigación actual, se llevaron a cabo varias pruebas de caracterización del suelo en el pozo de estudio, con el fin de determinar el comportamiento mecánico del suelo y su relación con la fluctuación del nivel freático y la variabilidad climática. Los ensayos incluyeron pruebas de granulometría, contenido de humedad, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, clasificación SUCS.

Las pruebas de granulometría revelaron que, en general, los suelos son del tipo materiales granulares (suelos gruesos), y los materiales que pasan por el tamiz 200 oscilaron desde el 12% hacia abajo. Esto significa que son arenas con finos y arenas sin finos según SUCS. También se encontraron diferencias en la distribución granulométrica entre pozos operativos y no operativos, debido al avance de la humedad natural.

En cuanto al contenido de humedad, se observaron valores variables durante los cuatro meses, con más humedad en los pozos operativos, debido al nivel freático y la infiltración de agua en el área estudiada. Las pruebas de límite líquido y límite plástico en los materiales finos recuperados proporcionaron valores típicos de suelos de baja a media plasticidad. Los índices

de plasticidad estimados indican materiales mayormente no cohesivos, lo cual es característico de suelos arenosos con bajo contenido de finos plásticos.

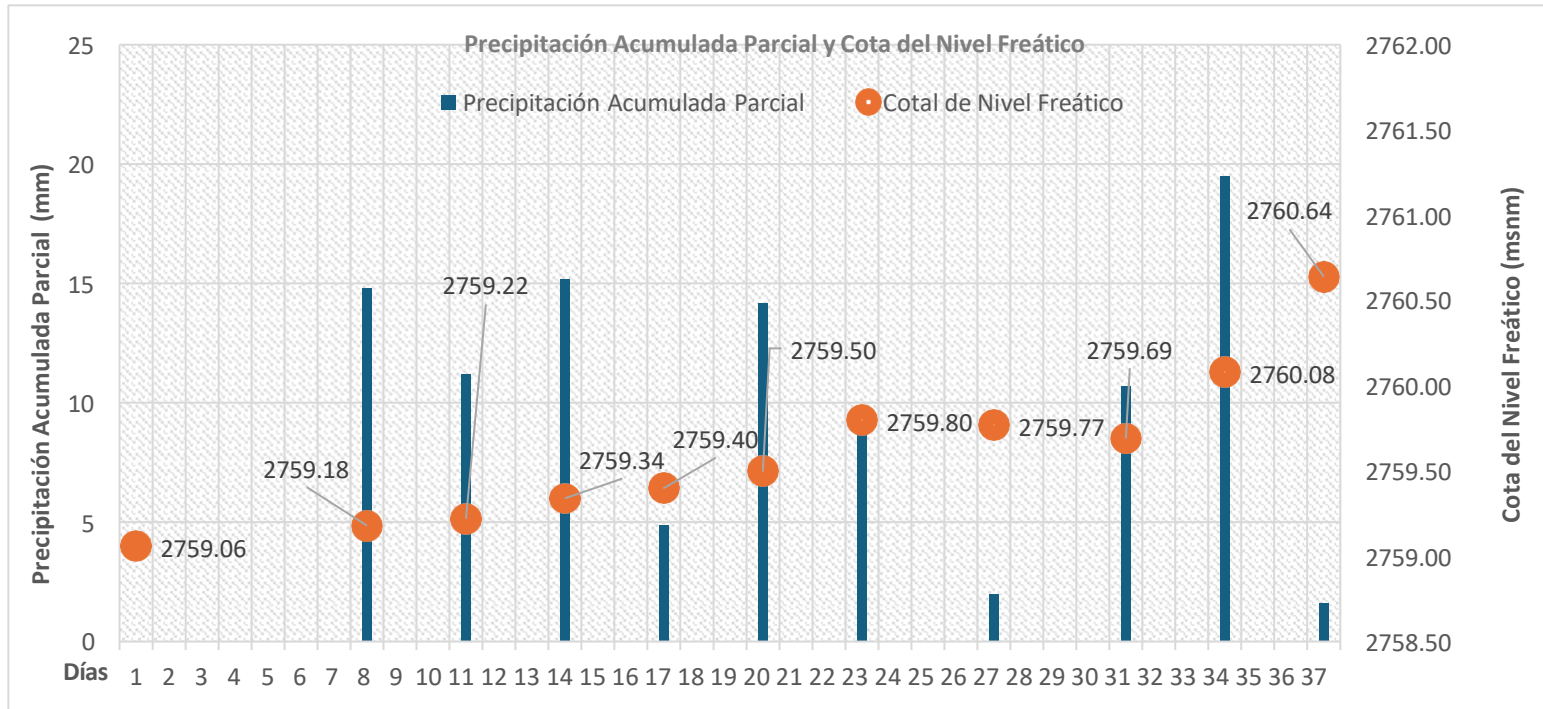
Por lo tanto, la clasificación SUCS de los materiales estudiados revelan que, con la excepción de algunas regiones, los suelos más comunes en la zona de estudio son arenas mal graduadas o arenas con finos limosos o arcillosos de baja cohesión. Estos resultados están en buena concordancia con la geología y el clima del sector Las Rosas y colaboran para proporcionar conocimiento sobre el comportamiento geotécnico del terreno ante variaciones climáticas.

5.1 Cálculos de Datos Recopilados y Análisis de Correlación de la variabilidad climática y el nivel freático durante los meses de estudio.

En los meses de estudio abril, mayo y junio se presentó dificultades en la toma de registros de información en campo, por lo que se tuvo que tomar nuevos registros en meses posteriores los cuales son: Julio, agosto y septiembre.

Con los datos recopilados del Pozo 1 se calcula la precipitación acumulada parcial y su toma de nivel freático (cada 3 días), por lo cual se observará su comportamiento en los días de estudio.

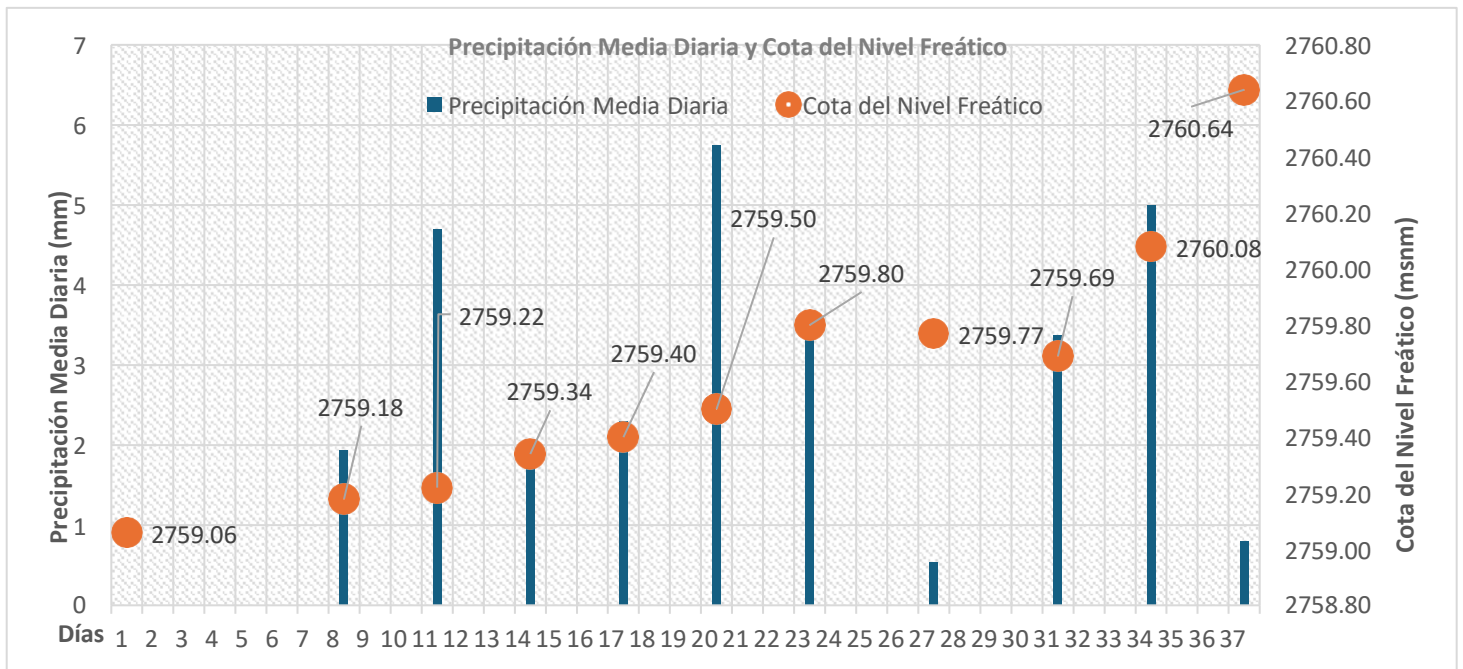
Ilustración 2: Gráfico de Precipitación Acumulada Parcial y Cota del Nivel Freático del Pozo 1 del mes de Julio a Septiembre



Fuente: Elaboración Propia (2025)

Ahora se procede a analizar la precipitación media diaria y la toma de nivel freático, para demostrar su comportamiento del Pozo 1.

Ilustración 3: Gráfico de Precipitación Media Diaria y Cota del Nivel Freático del Pozo 1 del mes de Julio a Septiembre

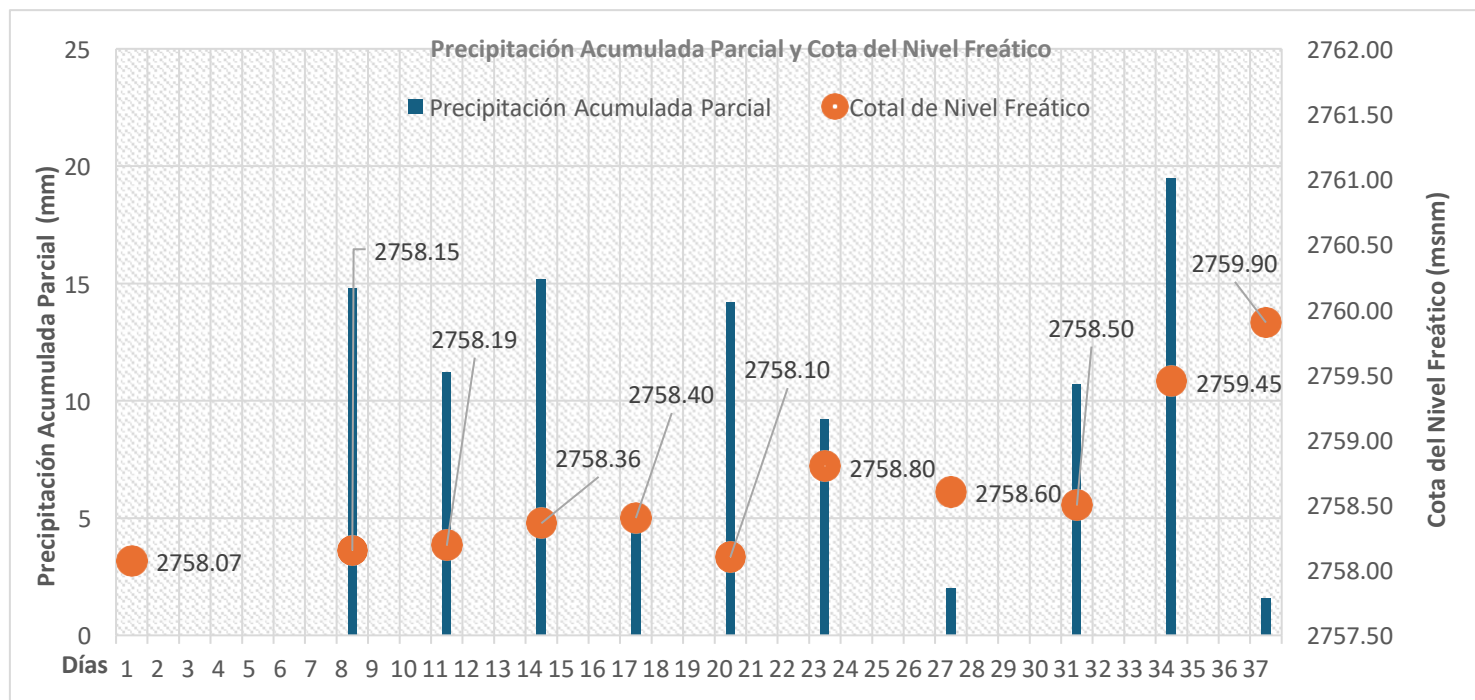


Fuente: Elaboración Propia (2025)

- La gráficas evidencian una relación de cuando hay precipitaciones, días después el nivel freático muestra un aumento.

Con los datos recopilados del Pozo 2 se calcula la precipitación acumulada parcial y su toma de nivel freático (cada 3 días), por lo cual se observará su comportamiento en los días de estudio.

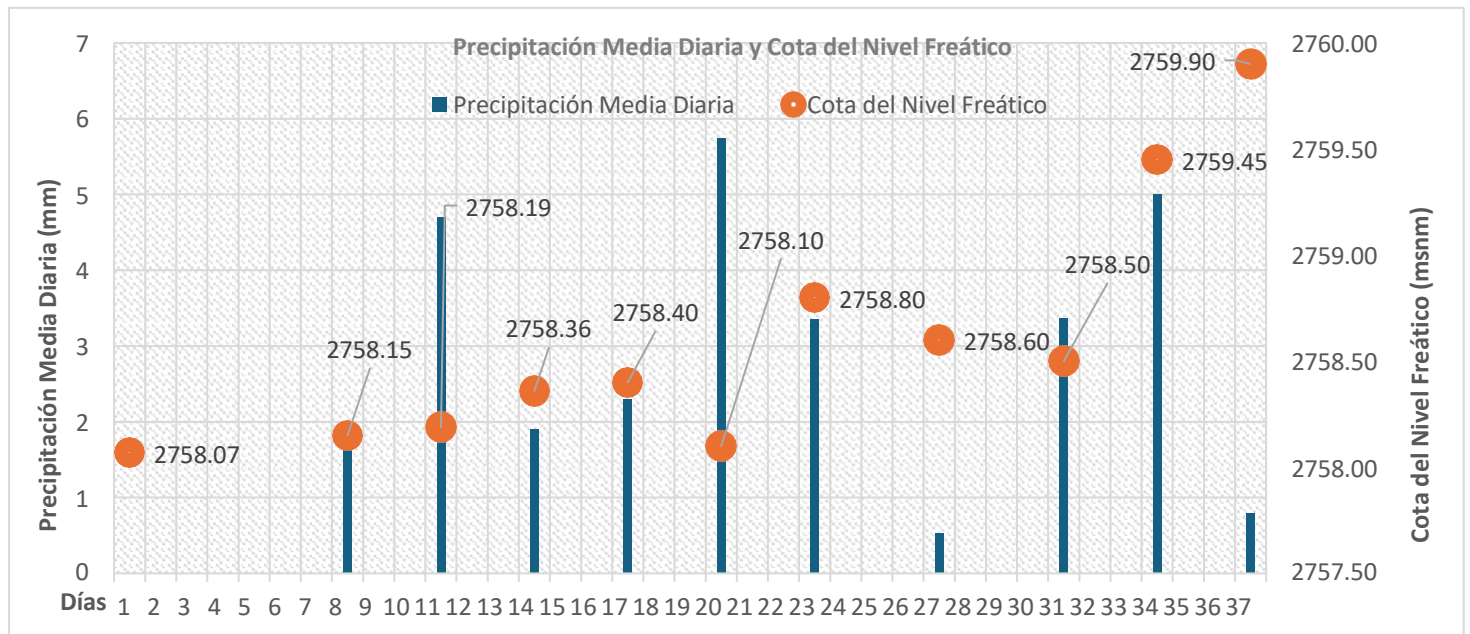
Ilustración 4: Gráfico de Precipitación Acumulada Parcial y Cota del Nivel Freático del Pozo 2 del mes de Julio a Septiembre



Fuente: Elaboración Propia (2025)

Ahora se procede a analizar la precipitación media diaria y la toma de nivel freático, para demostrar su comportamiento del Pozo 2.

Ilustración 5: Gráfico de Precipitación Media Diaria y Cota del Nivel Freático del Pozo 2 del mes de Julio a Septiembre



Fuente: Elaboración Propia (2025)

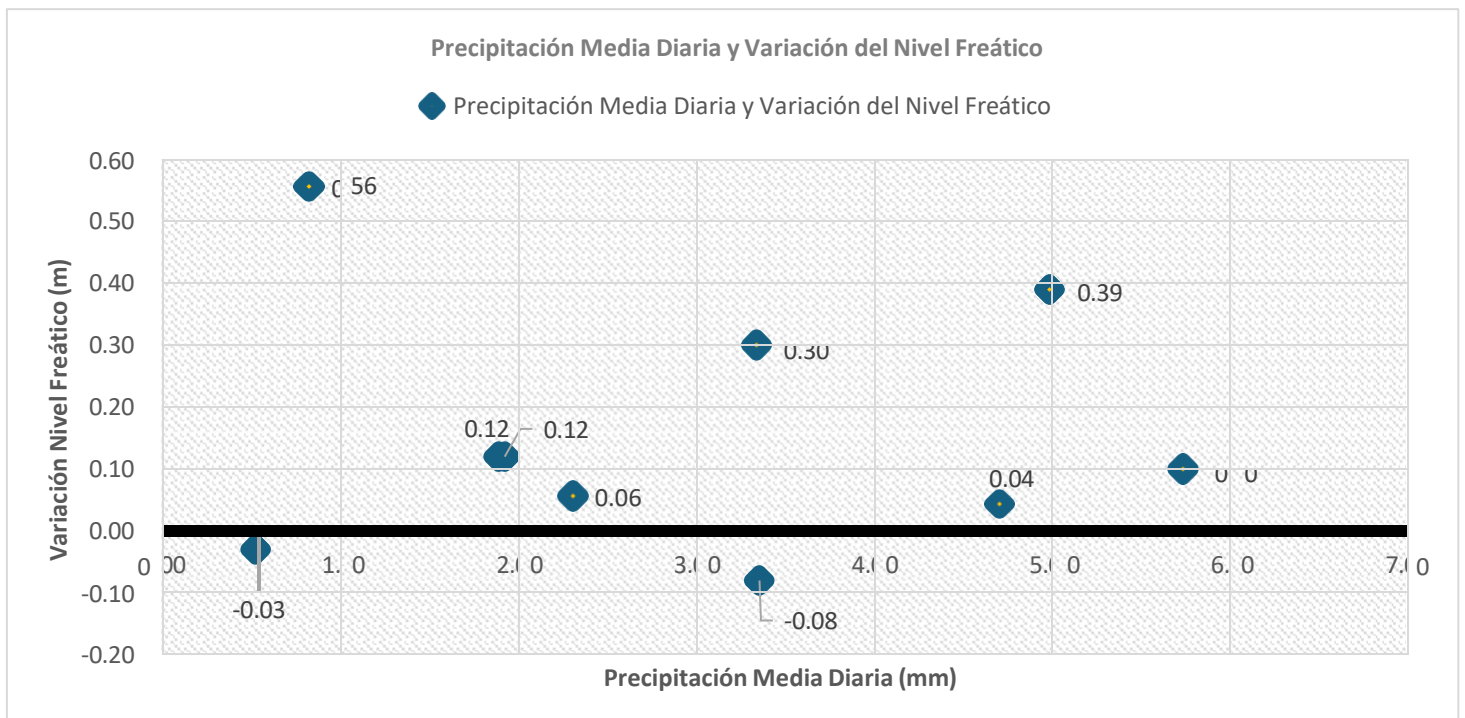
- La gráficas evidencian una relación de cuando hay precipitaciones, días después el nivel freático muestra un aumento, así mismo como se comporta en el Pozo 1.

Tabla 2: Precipitación media diaria, nivel freático, cota del nivel freático y variación del nivel freático durante los meses de estudio del Pozo 1 (julio a septiembre)

Precipitación Media Diaria (mm)	Medición del Nivel Freático (m)	Cota del Nivel freático (m)	Variación del nivel freático (m)
1.93	5.82	2759.18	0.12
4.70	5.78	2759.22	0.04
1.90	5.66	2759.34	0.12
2.30	5.60	2759.40	0.06
5.75	5.50	2759.50	0.10
3.35	5.20	2759.80	0.30
0.53	5.23	2759.77	-0.03
3.37	5.31	2759.69	-0.08
5.00	4.92	2760.08	0.39
0.80	4.36	2760.64	0.56

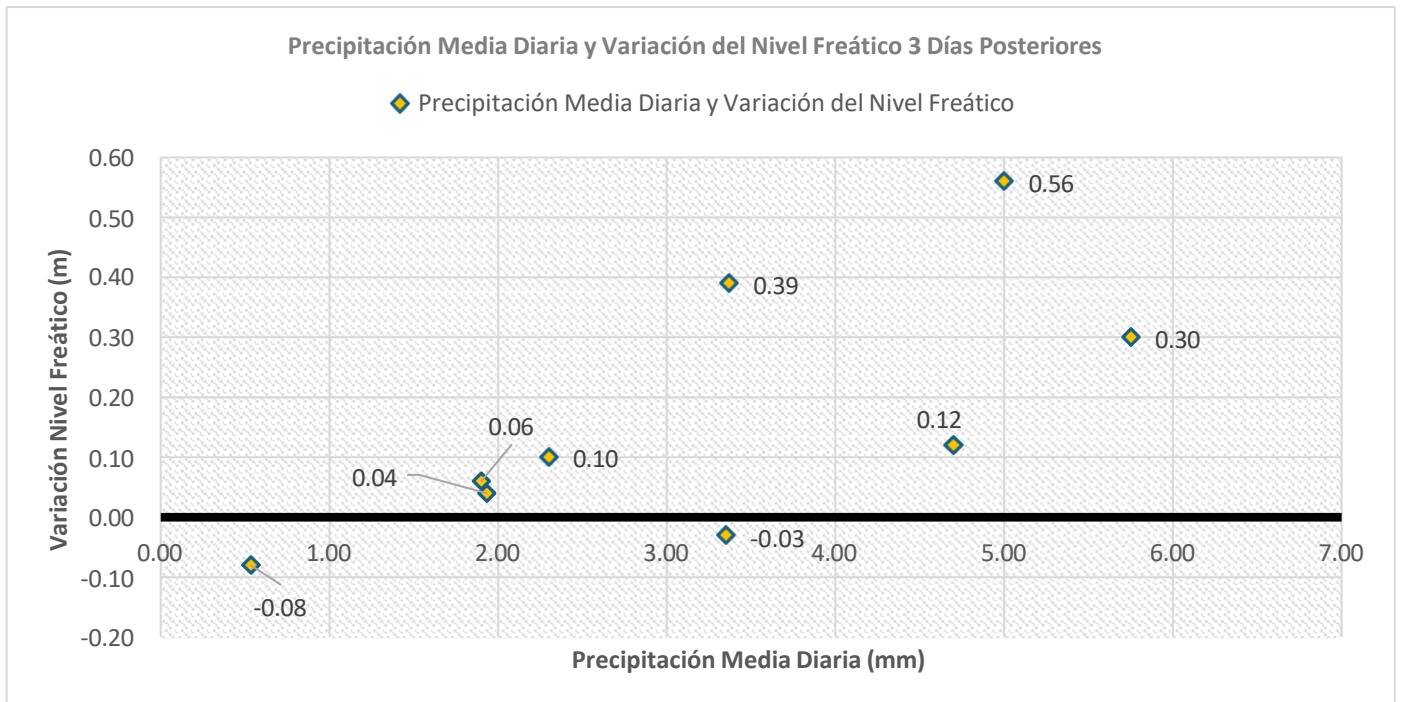
Fuente: Elaboración Propia (2025)

Ilustración 6: Gráfico de Precipitación Media Diaria y Variación del Nivel Freático del Pozo 1 del mes de Julio a Septiembre



Fuente: Elaboración Propia (2025)

Ilustración 7: Gráfico de Precipitación Media Diaria y Variación del Nivel Freático del mes de Julio a Septiembre (3 días Posteriores)



Fuente: Elaboración Propia (2025)

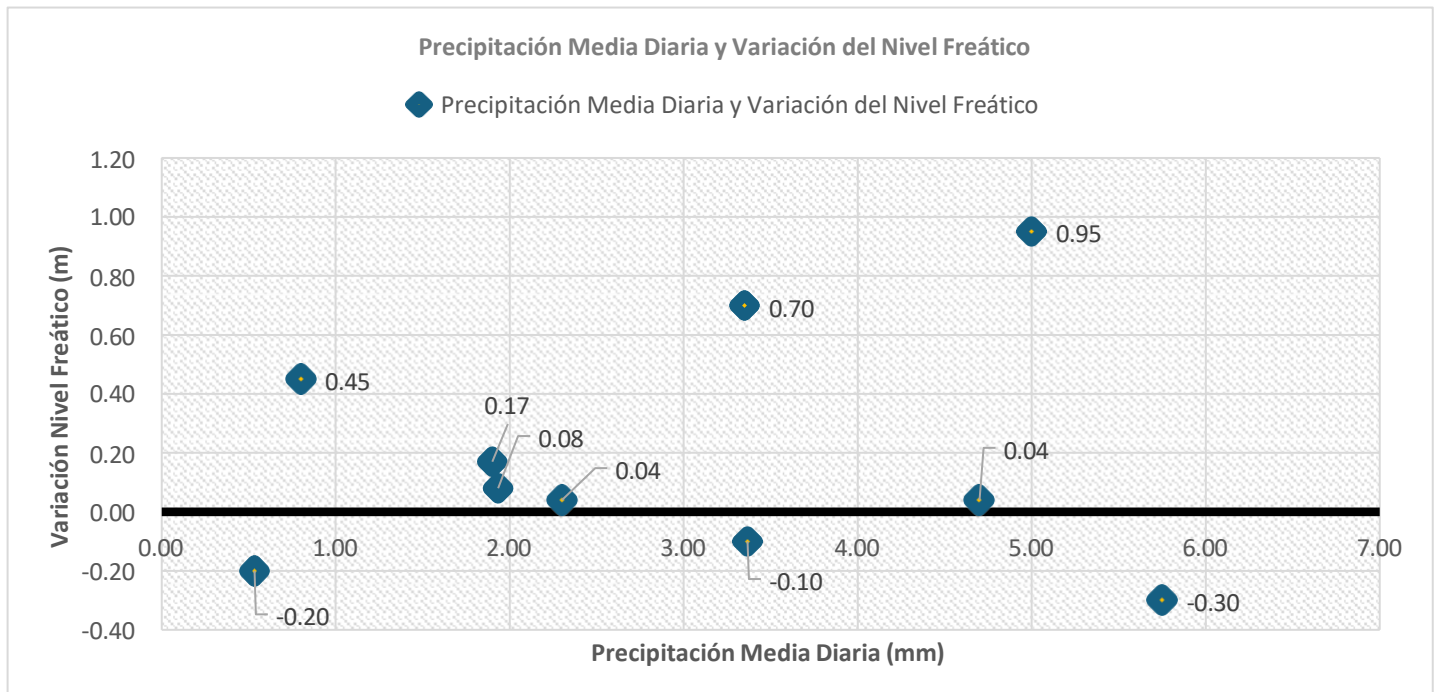
- Relación entre ambas gráficas muestran que mayores precipitaciones se correlacionan con mayores variaciones en el nivel freático.
- Tiempo de respuesta: En el gráfico con tres días de desfase, la variación del nivel freático es más evidente, lo que sugiere que el nivel freático responde con mayor retraso a las precipitaciones.

Tabla 3: Precipitación media diaria, nivel freático, cota del nivel freático y variación del nivel freático durante los meses de estudio del Pozo 2 (julio a septiembre)

Precipitación Media Diaria (mm)	Medición del Nivel Freático (m)	Cota del Nivel freático (m)	Variación del nivel freático (m)
1.93	6.85	2758.15	0.06
4.70	6.81	2758.19	0.04
1.90	6.64	2758.36	0.17
2.30	6.60	2758.40	0.04
5.75	6.90	2758.10	-0.30
3.35	6.20	2758.80	0.70
0.53	6.40	2758.60	-0.20
3.37	6.50	2758.50	-0.10
5	5.55	2759.45	0.95
0.80	5.1	2759.90	0.45

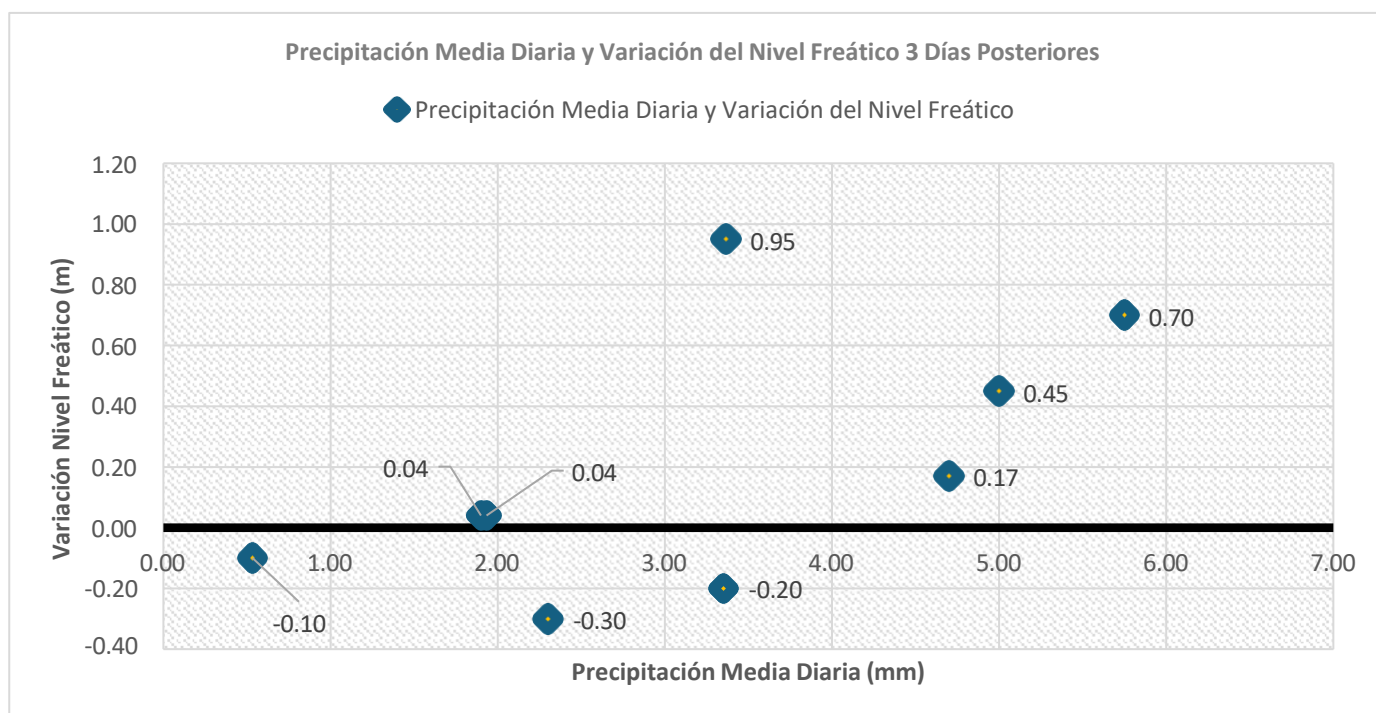
Fuente: Elaboración Propia (2025)

Ilustración 8: Gráfico de Precipitación Media Diaria y Variación del Nivel Freático del mes de Julio a Septiembre



Fuente: Elaboración Propia (2025)

Ilustración 9: Gráfico de Precipitación Media Diaria y Variación del Nivel Freático del mes de Julio a Septiembre (3 días Posteriores)



Fuente: Elaboración Propia (2025)

- Las precipitaciones más altas (0.7 mm y más) tienen un efecto más notorio en el nivel freático, reflejándose en aumentos significativos.
- Para precipitaciones pequeñas (alrededor de 1 mm o menos), se observa una variación negativa (descenso en el nivel freático), lo que puede ser atribuible a otros factores como la evaporación o la absorción del agua por el suelo.

En cuanto a las propiedades mecánicas del suelo en Rosas del Cantón Nabón en la provincia de Azuay, la búsqueda de información específica ha generado resultados que indican que no hay información detallada basada en este tipo de investigación en esa zona. Sin embargo, en investigaciones realizadas en la provincia de Azuay, como la caracterización físico-mecánica de las arcillas de Loja y Azuay para impermeabilización, se ha determinado

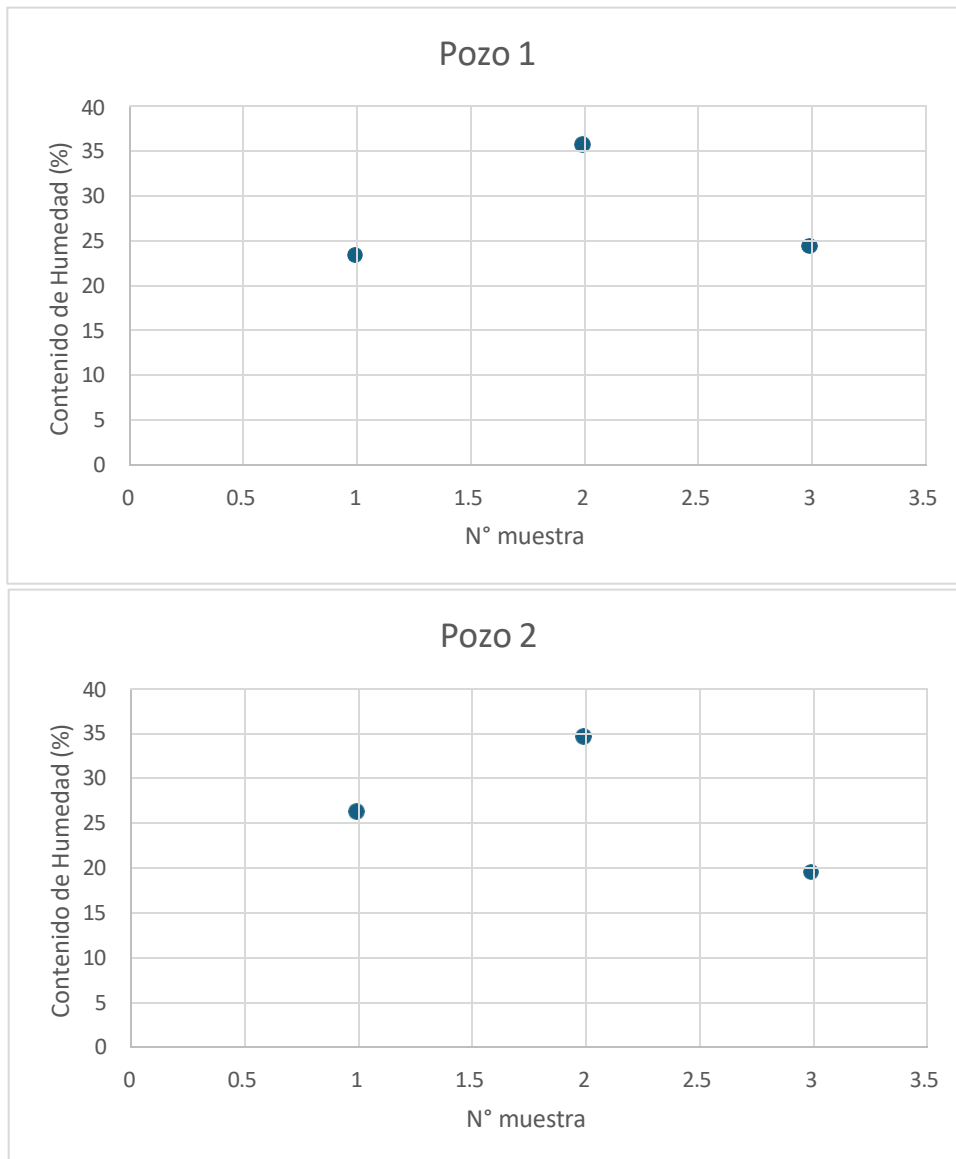
que los suelos con presencia de arcillas tienen características físico-mecánicas adecuadas para prevenir escapes de fluidos.

Aunque no es posible establecer una relación directa con los datos sobre precipitación y nivel de agua subterránea del pozo ubicado en Rosas del Cantón Nabón (falta de estudios específicos sobre el suelo en ese lugar), la existencia de suelos con características de sellado en la región podría afectar la dinámica del nivel de agua subterránea. Estas posibilidades del tipo de suelo deben tenerse en cuenta en la interpretación de los datos del pozo a nivel regional, aunque se recomienda la aplicación adicional de investigaciones geotécnicas específicas para Rosas del Cantón Nabón con el fin de obtener una evaluación integral de sus propiedades mecánicas del suelo y su interacción con el nivel freático.

5.2 Ensayos de Humedad del Suelo

En la prueba de humedad se determinó el contenido de agua de los pozos de monitoreo. El procedimiento consistió en adquirir y analizar las muestras de suelo utilizando una serie temporal de cuatro semanas consecutivas. Esto permitió determinar la evolución del contenido de humedad en el tiempo y su relación con las fluctuaciones del nivel freático y el clima predominante, en el área de Las Rosas. Los resultados obtenidos permitieron descubrir tendencias y diferencias en la humedad del suelo, de acuerdo con el estado operativo de los pozos y las condiciones ambientales durante el período de investigación.

Ilustración 10: Gráficas de Contenido de Humedad de Cada Pozo de Estudio



Fuente: Elaboración propia (2025)

- Pozo 1: El contenido de humedad de las muestras osciló entre 23.46% y 35.75%, revelando que el comportamiento de la humedad es relativamente alto.
- Pozo 2: Los valores oscilaron entre 19.52% y 34.65%. Al igual que en el Pozo 1, hay un patrón de aumento de la humedad promedio.

Los gráficos y resultados también muestran que, viene un suelo con mayor contenido de agua y más variación en esos resultados, lo que significa también una mayor variación en el nivel freático.

5.3 Ensayos de Granulometría:

Esta prueba determinará el tamaño de los sedimentos en el suelo y categorizará el material por porcentaje de grava, arena, limo y arcilla.

Los resultados permitirán resumir la textura y las características granulométricas del suelo en los diferentes pozos, respondiendo a una de las preguntas relevantes para poder entender el comportamiento hidromecánico y la respuesta del suelo con la capa freática en la zona de estudio.

Pozo 1:

Partículas gruesas (grava y arena gruesa):

- La mayoría del material fue retenido en los tamices de tamaños grandes y medianos (No. 4: 4.75 mm, No. 8: 2.36 mm).
- Un 8.93% retenido en el No. 8, para un total retenido de 41.56%.
- Partículas finas (arenas finas y limo):
 - Comenzando en el tamiz No. 16 (1.18 mm) y tamaños más pequeños se observa un aumento gradual en el agua
 - No. 16: 12.53% retenido (acumulado 54.10%)
 - No. 30: 14.60% retenido (acumulado 68.70%)

- No. 50: 15.60% retenido (acumulado 84.30%)
- No. 100: 9.60% retenido (acumulado 93.90%)
- Material que pasa por el tamiz No. 200 (75 μm):
- El material que pasa por el tamiz No. 200 es 2.13%, lo que indica un bajo contenido de finos (limo y arcilla).

Clasificación:

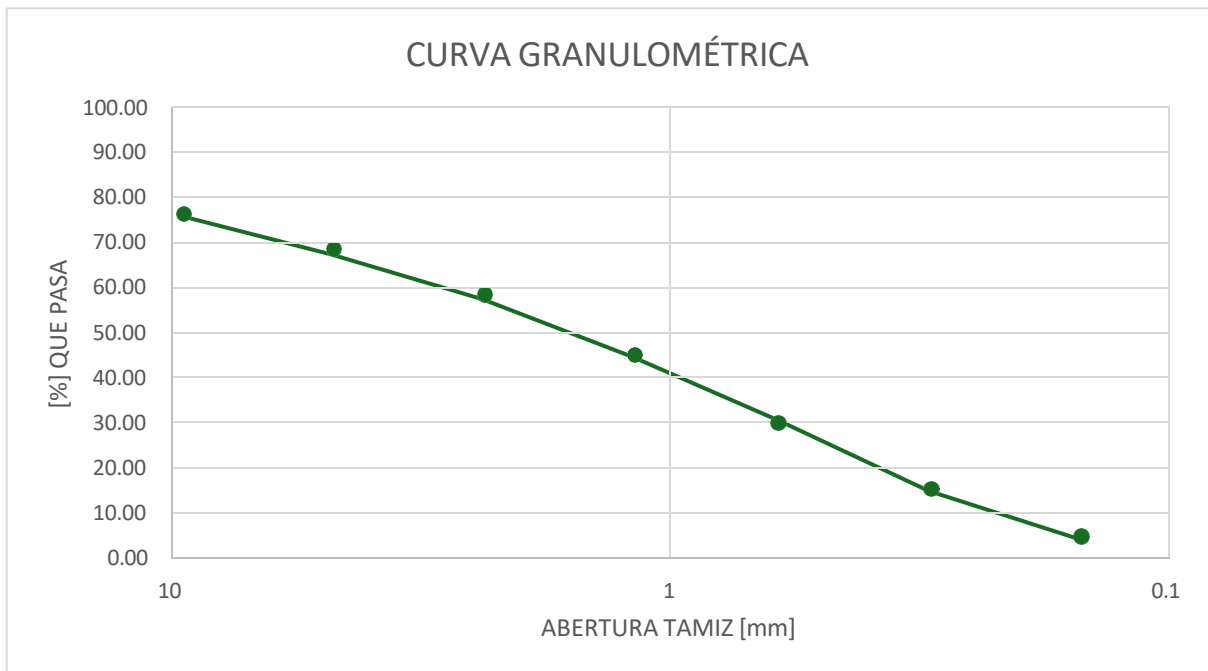
- % pasando no. 200 = 2.13%
- Lo que significa que el suelo es principalmente arenoso o gravoso, y contiene pocos finos (limo o arcilla).
- Tal suelo suele tener baja plasticidad y alta permeabilidad.

Tabla 4: Granulometría, material Pozo 1

Medidas del Tamiz		Pasante Acumulado (%)
Pulgadas	mm	
3/8 "	9.50 mm	75.88
N° 4	4.75 mm	67.37
N° 8	2.36 mm	57.44
N° 16	1.18 mm	44.68
N° 30	600.0 μm	30.50
N° 50	300.0 μm	14.90
N° 100	150.0 μm	4.26

Fuente: Elaboración Propia (2025)

Ilustración 11: Gráfica de Curva Granulométrica de muestras del Pozo 1



Fuente: Elaboración propia (2025)

El material analizado es un suelo arenoso, gravoso y limoso (con baja cantidad de finos: 2.13 % pasando el No. 200). La curva de tamaño de grano muestra un material mal graduado (SP: arena mal graduada), que se caracteriza por una distribución incompleta del rango de tamaño de partículas (el material no se distribuye uniformemente en todos los tamaños intermedios).

Este tipo de suelo es:

- Baja cohesión
- Alta permeabilidad

Ecuación para Cálculo de Modulo de Finura

$$MF = \frac{\Sigma(\% \text{ retenido acum. : } 6'' + 3'' + 1\frac{1}{2}'' + \frac{3}{4}'' + \frac{3}{8}'' + N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + N^{\circ}30 + N^{\circ}50 + N^{\circ}100)}{100}$$

Cálculo de Modulo de Finura:

El MF es igual 4.20, significa que el material es una arena gruesa o mezclas que contienen una alta proporción de partículas más grandes. Se puede ver que este valor indica una granulometría más cercana a la de un agregado grueso que a la de una arena fina.

Pozo 2

- Con un porcentaje de paso del 76,80% en el tamiz de 3/8" (9,50 mm), la mayoría de las partículas son más finas que este tamaño.
- El porcentaje que pasa por los tamices No. 4 (4,75 mm) y No. 8 (2,36 mm) en combinación es del 68,80% y 53,31% respectivamente, lo que revela la presencia de una fracción de arena-grava dominada.
- Los porcentajes de material que pasa por los tamices finos (No. 50 y 100) son 20,53% y 8,31%, representando un bajo contenido de finos.
- La masa que pasa por el tamiz de 3/8" (9,50 mm) es del 76,80%, lo que indica que la mayoría de las partículas son más pequeñas que 3/8".
- La suma del porcentaje de paso de las pantallas No. 4 (4,75 mm) y No. 8 (2,36 mm) es del 68,80% y 53,31% respectivamente, lo que indica la predominancia de la fracción de arena-grava.

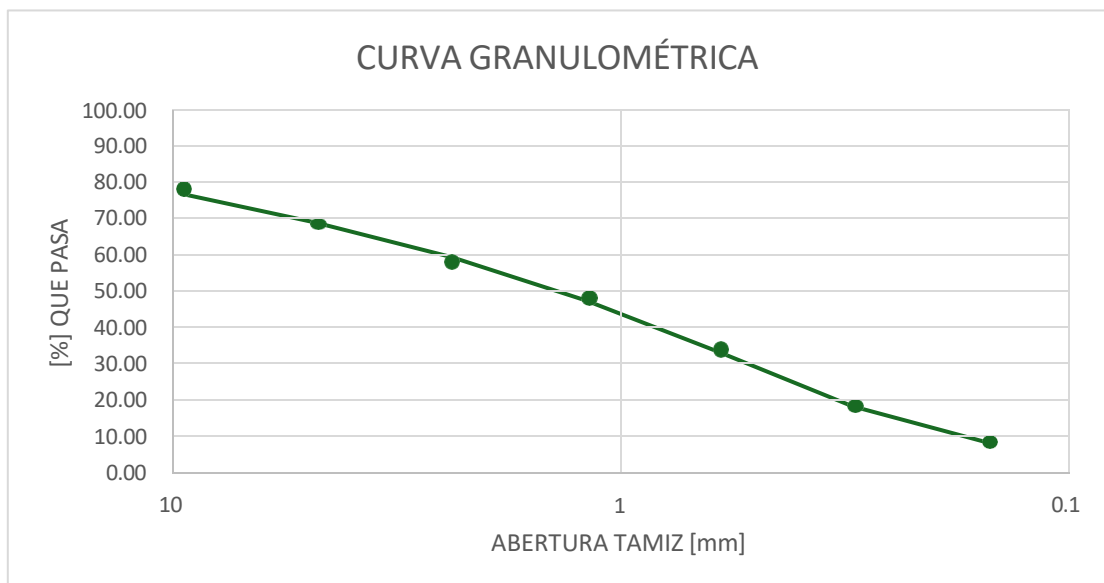
- El paso a través de los tamices finos (No. 50 y No. 100) es del 20,53% y 8,31% respectivamente, por lo que los finos son realmente bajos.

Tabla 5: Granulometría, material Pozo 2

Medidas del Tamiz		Pasante Acumulado (%)
Pulgadas	mm	
3/8 "	9.50 mm	76.80
N° 4	4.75 mm	68.80
N° 8	2.36 mm	59.31
N° 16	1.18 mm	47.31
N° 30	600.0 µm	33.31
N° 50	300.0 µm	18.31
N° 100	150.0 µm	8.31

Fuente: Elaboración Propia (2025)

Ilustración 12: Gráfica de Curva Granulométrica de muestras del Pozo 2



Fuente: Elaboración propia (2025)

Cálculo del Módulo de Finura: La misma naturaleza gruesa de este material se expresa por el módulo de finura $MF = 4.02$ y está de acuerdo con los valores para arenas que contienen una cantidad considerable de partículas más grandes, o mezclas que incorporan grava fina.

5.4 Ensayo Límite Líquido y Plástico

Pozo 1:

Límite Líquido (LL):

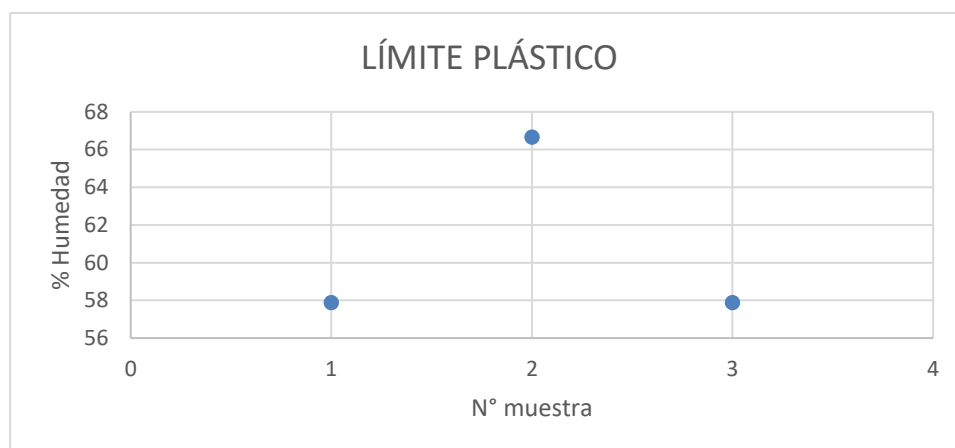
Se realizaron cuatro experimentos con un promedio resultante de 25.00%. Esto significa que el suelo evoluciona de un estado seco a un estado plástico con un contenido medio de agua.

Límite Plástico (PL):

También se recopiló información para tres selecciones separadas, dando un resultado promedio de 6.08%. Indica que el suelo comienza a exhibir un comportamiento plástico con un bajo contenido de agua.

La plasticidad es baja, porque el índice de plasticidad ($PI = LL - PL$) también puede ser bajo (aproximadamente 19%), siendo típico de materiales de baja cohesión y que tienen un comportamiento granular con finos plásticos limitados.

Ilustración 13: Gráfica de Límite Plástico de la muestra de Pozo 1



Fuente: Elaboración propia (2025)

El valor promedio del límite plástico es de aproximadamente 60% - 62%, lo que demuestra propiedades del suelo con un plástico relativamente alto.

Tabla 6: Datos calculados de Límite Líquido, límite plástico e índice de plasticidad para Pozo 1

Datos	Valor
Límite Líquido	55.25%
Límite Plástico	6.08%
Índice de plasticidad	49.17%

Fuente: Elaboración Propia (2025)

Ilustración 14: Clasificación SUCS en el Pozo 1

Parámetro	Valor	Clasificación SUCS
% que pasa por el tamiz N°4	88.79 %	Arena (porcentaje mayor al 50% pasa tamiz N°4)
% que pasa por el tamiz N°200	2.81%	Suelo Grueso (menos del 50% pasa tamiz N°200)
Límite Líquido (LL)	55.25%	LL mayor 50% (Suelo de alta plasticidad)
Índice de Plasticidad (IP)	49.17%	IP mayor a 7% (arcilla)

Fuente: Elaboración propia (2025)

Clasificación SUCS: CH (Arcilla de alta Plasticidad)

La clasificación del suelo, basada en pruebas de granulometría y límites de consistencia, se muestra a continuación en el sistema SUCS. Los datos muestran que el 88.79% del material se utiliza en el tamiz No. 4, lo que resulta en que el material se clasifique como arena (más del 50% del material pasa por el tamiz No. 4). Pero pasa por el tamiz No. 200 y se clasifica como suelo grueso ya que no tiene finos (porcentaje de contenido de finos < 50%). A pesar de ser bajo (el contenido de finos), los valores del límite líquido (55.255%) y del índice de plasticidad (49.173%) son altos y reflejan un suelo de alta plasticidad, clasificado como CH (arcilla de alta plasticidad) por SUCS. Esto es común en un suelo que generalmente es de naturaleza granular, pero con el poco material fino presente se comporta de manera muy plástica.

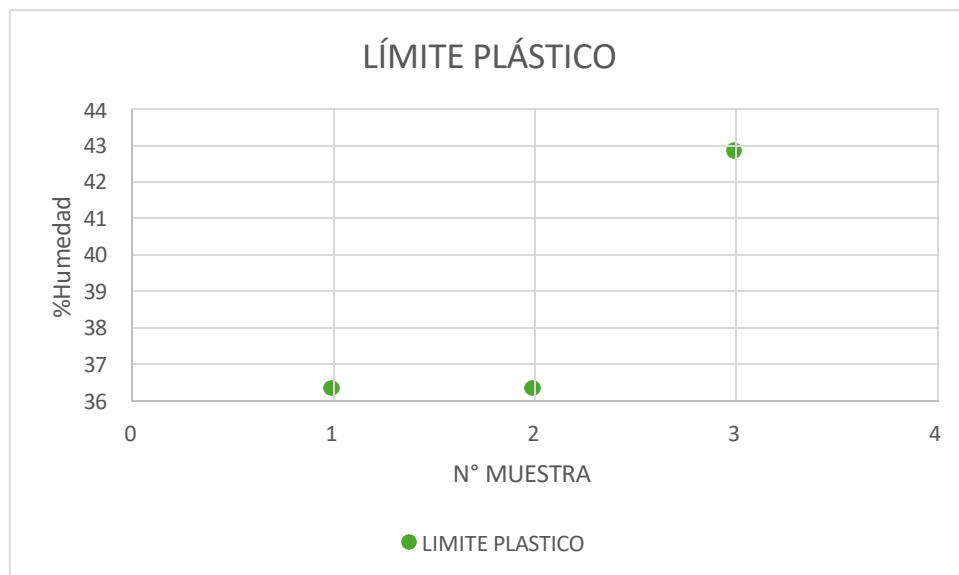
Pozo 2:

En el ensayo de límite líquido, realizado con el aparato de Casa Grande, los contenidos de humedad de las muestras variaron entre aproximadamente 24.75% y 53.33%, con un promedio de 24.75%, correspondiente al punto en el que la ranura de la muestra se cierra con un número determinado de golpes.

Por su parte, en el ensayo de límite plástico (Cuicas), se obtuvieron valores de humedad en las muestras que permitieron determinar un límite plástico promedio de 3.85%.

Estos valores permiten caracterizar el comportamiento plástico del suelo y constituyen un dato esencial para su clasificación y análisis de propiedades geotécnicas.

Ilustración 15: Gráfica de Límite Plástico de la muestra de Pozo 2



Fuente: Elaboración propia (2025)

El gráfico muestra el límite plástico en función del número de pruebas o mediciones realizadas. El eje X está representado con las diversas mediciones, y en el eje Y está el

contenido de agua (%) que corresponde al límite plástico de las muestras. La curva es ascendente con un punto de aumento pronunciado en el punto final, que muestra una diferencia en el contenido de humedad para cada muestra necesaria para alcanzar el límite plástico.

Tabla 7: Datos calculados de Límite Líquido, límite plástico e índice de plasticidad para Pozo 2

Datos	Valor
Límite Líquido	68.13%
Límite Plástico	3.85%
Índice de plasticidad	64.27%

Fuente: Elaboración Propia (2025)

Los índices de plasticidad están saturados al 68.132% y los valores de PI al 64.279%, todos los cuales son altos. Esto nos lleva a la clasificación CH (Arcilla de Alta Plasticidad) en el sistema SUCS, ya que el comportamiento plástico del material predomina sobre su granulometría arenosa, dado que las finas involucradas son arcillosas y tienen alta capacidad de retención de agua y deformación.

Ilustración 16: Clasificación SUCS en el Pozo 2

Parámetro	Valor	Clasificación SUCS
% que pasa por el tamiz N°4	89.59%	Arena (porcentaje mayor al 50% pasa tamiz N°4)
% que pasa por el tamiz N°200	6.92%	Suelo Grueso (menos del 50% pasa tamiz N°200)
Límite Líquido (LL)	68.13%	LL mayor 50% (Suelo de alta plasticidad)
Índice de Plasticidad (IP)	64.27%	IP mayor a 7% (Arcilla)

Fuente: Elaboración propia (2025)

Clasificación SUCS: CH (Arcilla de alta Plasticidad)

En la sección del límite líquido (Casagrande), los datos representan las masas de las cápsulas, las muestras húmedas y secas y el contenido de agua (%), así como el número de golpes para elaborar el LL (aparato de Casagrande). Los resultados del contenido de humedad se encuentran entre 24.50% y 40.00% y muestran un valor promedio de 27.00%, indicando un suelo de humedad media en la prueba de LL.

En la sección del límite plástico (Casagrande) se muestra el peso de la cápsula y las muestras, calculándose un límite plástico de 7.17%, que es de baja plasticidad, ya que los valores son menores al 10%.

Estos resultados permiten el cálculo del índice de plasticidad ($IP = LL - PL$) que representa el cuadrado de un valor para cuantificar la deformabilidad del suelo. Los datos representan un suelo de baja plasticidad, lo que significa que no es particularmente cohesivo y resulta en cambios volumétricos bajos al humedecerse.

A través de pruebas de humedad se notó que los pozos tenían contenidos de humedad más altos, porque estaban directamente en contacto con el nivel freático.

Los resultados de la prueba de consistencia límite indicaron que los suelos con un alto contenido de finos mostraron una plasticidad media a alta, ya que el valor del índice de plasticidad fue $> 12\%$. Esto confirma la existencia de fracciones de arcilla capaces de influir en el comportamiento del suelo.

En cuanto al módulo de finura, los valores obtenidos se situaron dentro de las arenas típicas de medianas a gruesas, lo que confirma la contribución significativa del material

arenoso en las muestras estudiadas. Estos valores son importantes para estimar el comportamiento general del suelo.

Al obtener los resultados de la clasificación del suelo, mediante la información recopilada de un estudio geológico y geotécnico en el Cantón Nabón proporcionado por el GAD Municipal, se analizó el peso específico del suelo de valor 17.95 Kn/m^3 , en la cual, se aplicó para los cálculos de esfuerzo efectivo y variación del nivel freático de cada pozo, por ende, se utilizó también el valor de 9.81 Kn/m^3 como peso específico del agua, teniendo estos datos, se hizo el análisis a 10 m de profundidad.

Pozo 1

Tabla 8: Cálculo de Esfuerzo Efectivo y su variación del Nivel Freático del Pozo 1

Esfuerzo Total (σ)		Altura de agua (h_w)	Presión de Poros (u)	Esfuerzo Efectivo (σ')	Variación	
179.54	kPa	0.00	0.00	179.54	0.00	0.00%
179.54	kPa	4.18	41.01	175.36	-4.18	-2.33%
179.54	kPa	4.22	41.40	175.32	-4.22	-2.35%
179.54	kPa	4.34	42.58	175.20	-4.34	-2.42%
179.54	kPa	4.40	43.16	175.14	-4.40	-2.45%
179.54	kPa	4.50	44.15	175.04	-4.50	-2.51%
179.54	kPa	4.80	47.09	174.74	-4.80	-2.67%
179.54	kPa	4.77	46.79	174.77	-4.77	-2.66%
179.54	kPa	4.69	46.01	174.85	-4.69	-2.61%
179.54	kPa	5.08	49.83	174.46	-5.08	-2.83%
179.54	kPa	5.64	55.33	173.90	-5.64	-3.14%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Pozo 2

Tabla 9: Cálculo de Esfuerzo Efectivo y su variación del Nivel Freático del Pozo 2

Esfuerzo Total (σ)		Altura de agua (h_w)	Presión de Poros (u)	Esfuerzo Efectivo (σ')	Variación	
179.54	kPa	0.00	0.00	179.54	0.00	0.00%
179.54	kPa	3.15	30.90	176.39	-3.15	-1.75%
179.54	kPa	3.19	31.29	176.35	-3.19	-1.78%
179.54	kPa	3.36	32.96	176.18	-3.36	-1.87%
179.54	kPa	3.40	33.35	176.14	-3.40	-1.89%
179.54	kPa	3.10	30.41	176.44	-3.10	-1.73%
179.54	kPa	3.80	37.28	175.74	-3.80	-2.12%
179.54	kPa	3.60	35.32	175.94	-3.60	-2.01%
179.54	kPa	3.50	34.34	176.04	-3.50	-1.95%
179.54	kPa	4.45	43.65	175.09	-4.45	-2.48%
179.54	kPa	4.90	48.07	174.64	-4.90	-2.73%

Fuente: Elaboración propia (2025)

6 Conclusiones

- Los análisis detallados realizados en la presente investigación permitieron describir el suelo en el área de estudio basándose en pruebas de granulometría, límites, contenidos de agua, módulo de finura. Los resultados obtenidos indican que el material predominante es de tipo arenoso con finos de arcilla en algunos casos. Esta asignación fue corroborada por los porcentajes retenidos en cada tamiz, el módulo de finura y los índices de plasticidad calculados.
- Las determinaciones de granulometría demuestran que estos suelos son predominantemente suelos mal graduados, lo que influye en su rendimiento como materiales en relación con la estabilidad.

- No se realizó un análisis de correlación entre las variables debido a la ausencia de datos suficientes que permitieran establecer relaciones estadísticas válidas. La limitación en la cantidad o calidad de la información disponible impidió aplicar técnicas cuantitativas que permitan identificar asociaciones significativas.
- El total de resultados presentado contribuye significativamente al conocimiento local de las propiedades del suelo en el área de estudio y se convierte en un valioso apoyo técnico para futuras intervenciones en el campo de las obras de construcción, así como en la planificación. Este trabajo concluye el análisis de las pruebas realizadas, cumpliendo con los objetivos propuestos y estableciendo pautas para futuros estudios en la relación entre el comportamiento del suelo y la fluctuación del nivel freático.
- Durante el periodo analizado en el sector Rosas del cantón Nabón, se identificó una variación de las condiciones climáticas como la precipitación, así como variaciones del nivel freático, en la que se identifica que en el patrón de la precipitación alta siempre resulta en un aumento positivo del nivel freático, con un efecto inmediato y un efecto acumulativo a los tres días. Bajas precipitaciones no tienen un impacto significativo en el nivel freático y, en algunos casos, causan descenso del nivel. Por último, el nivel freático responde de manera positiva a las precipitaciones, especialmente en magnitudes medianas a altas, mostrando un comportamiento tanto inmediato como retardado a tres días.
- El análisis de los datos de precipitación y nivel freático a lo largo de los meses de julio a septiembre muestra una relación estrecha entre las lluvias y el comportamiento del nivel freático, sin embargo, esta no es directa ya que se presenta una reacción tardía de las variaciones del nivel freático respecto a las precipitaciones registradas.

Pozo 1:

Comportamiento del esfuerzo efectivo: Cuando el nivel freático aumenta, el esfuerzo efectivo disminuye, originando que la capacidad de soporte del suelo a esfuerzo cortante se vea disminuida, ya que esta depende del esfuerzo efectivo. En este pozo se observa un incremento del Nivel Freático de hasta 0.56 m lo que ocasiona una reducción del esfuerzo efectivo de hasta un 3.14%, a una profundidad de 10m.

Pozo 2:

Comportamiento del esfuerzo efectivo: El incremento del Nivel Freático aumenta la presión en los poros del suelo, reduciendo el esfuerzo efectivo hasta en 179.54 Kpa, lo que representa una reducción del esfuerzo efectivo del 2.73%, a una profundidad de 10m.

- Este aumento en el nivel freático repercute directamente en las características mecánicas del suelo. A mayor saturación, se incrementa la presión de poros. En zonas inclinadas o con suelos de consistencia plástica, como las que predominan en Nabón, estas condiciones elevan el riesgo de inestabilidad del terreno e incluso posibles deslizamientos.
- En resumen, el comportamiento del nivel freático y su interacción con las precipitaciones afectan significativamente las propiedades mecánicas del suelo, alterando su resistencia y estabilidad. El estudio de estos parámetros es crucial para evaluar los riesgos geotécnicos y planificar medidas de prevención ante posibles deslizamientos.

7 Recomendaciones

- Monitoreo constante del nivel freático: Se recomienda implementar un sistema de seguimiento periódico del nivel freático en la zona de estudio, especialmente en los sectores con pozos en funcionamiento, para evaluar su variación en un tiempo mayor al realizado en el presente estudio.
- Incorporación de estudios hidrológicos complementarios: Sería oportuno integrar en investigaciones futuras un análisis hidrológico más detallado recopilando datos de una estación meteorológica instalada en las zonas aledañas al centro de Nabón y en especial al sector Rosas.
- Uso de los resultados para planificación territorial: Los resultados de esta tesis deben ser considerados como insumo técnico para las autoridades locales y entidades encargadas de la gestión territorial, con el fin de orientar decisiones sobre el uso del suelo, la localización de infraestructuras y la gestión de riesgos.

8 Referencias Bibliográficas

Ahrens, C. D., & Henson, R. (2021). *Meteorology today: An introduction to weather, climate, and the environment* (13th ed.). Cengage Learning.

Aguilar, E., Auer, I., Böhm, R., Mestre, O., Mitchell, T., Seidel, K., & Tas, I. (2011). *Guidelines on climate data homogenization*. World Meteorological Organization.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO Irrigation and drainage paper 56*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

ASTM D422. (2007). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. ASTM International. (Estándar: Método de prueba estándar para el análisis del tamaño de partículas de suelos)

ASTM D854. (2014). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. ASTM International. (Estándar: Métodos de prueba estándar para la gravedad específica de sólidos de suelo mediante picnómetro de agua)

ASTM D2216. (2019). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. ASTM International. (Estándar: Métodos de prueba estándar para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo y roca por masa)

ASTM D2434. (2006). *Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head) and Cohesive Soils (Falling Head)*. ASTM International. (Estándar: Método de prueba estándar para la permeabilidad de suelos granulares (carga constante) y suelos cohesivos (carga variable))

ASTM D2435. (2011). Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. ASTM International. (Estándar: Métodos de prueba estándar para las propiedades de consolidación unidimensional de suelos mediante carga incremental)

ASTM D2487. (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International. (Estándar: Práctica estándar para la clasificación de suelos con fines de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos))

ASTM D2850. (2015). Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. ASTM International. (Estándar: Método de prueba estándar para el ensayo de compresión triaxial no consolidado-no drenado en suelos cohesivos)

ASTM D2937. (2004). Standard Test Method for Density of Soil in Place by the Drive-Cylinder Method. ASTM International. (Estándar: Método de prueba estándar para la densidad de suelo in situ por el método del cilindro de hincado)

ASTM D3080. (2011). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. ASTM International. (Estándar: Método de prueba estándar para el ensayo de corte directo de suelos bajo condiciones drenadas consolidadas)

ASTM D4318. (2017). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM International. (Estándar: Métodos de prueba estándar para el Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad de suelos)

ASTM D4767. (2011). Standard Test Method for Consolidated-Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. ASTM International. (Estándar: Método de prueba estándar para el ensayo de compresión triaxial consolidado-no drenado para suelos cohesivos)

Ayala, A., Mulas, J., & Vera, R. (2012). Análisis de la estabilidad de taludes en suelos residuales de la Sierra Ecuatoriana. *Revista Politécnica*, 30(2), 17-26. (Translation: Analysis of slope stability in residual soils of the Ecuadorian Sierra)

Barry, R. G., & Carleton, A. M. (2001). *Synoptic climatology in environmental analysis*. Chapman & Hall/CRC.

Bendixen, J. L., B. K. R. M., & Kaser, G. (2019). The current status of Andean glacier retreat. *Frontiers in Earth Science*, 7, 239.

Bishop, A. W. (1959). The principle of effective stress. *Teknisk Ukeblad*, 106(39), 859-863.

Bowles, J. E. (1996). *Engineering properties of soils and their measurement* (4th ed.). McGraw-Hill.

Bromhead, E. N. (1992). *The stability of slopes* (2nd ed.). Blackie Academic & Professional.

Buytaert, W., Célleri, R., & Espinosa, A. (2017). *Impact of climate change on water resources in the Andean páramos*. Springer.

Caine, N. (1980). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 62(1-2), 23-27.

Cai, W., Wang, G., Gan, B., Neelin, L. D., Yamagata, P. A., Santoso, A., ... & Meehl, G. A. (2015). Increased frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 5(2), 132-137.

Casagrande, A. (1932). Research on the Atterberg limits of soils. *Public Roads*, 13(8), 121-130.

CEPAL. (2014). La economía del cambio climático en Ecuador: Síntesis. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (Translation: The economics of climate change in Ecuador: Synthesis)

CONDESAN. (2020). El cambio climático en los Andes: Evidencia y perspectivas. Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina. (Translation: Climate change in the Andes: Evidence and perspectives)

Coulomb, C. A. (1776). Essai sur une application des règles de maximis & minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture. Mémoires de Mathématique et de Physique, présentés à l'Académie Royale des Sciences, par divers savans, & lus dans ses Assemblées, 7, 343-382. (Translation: Essay on an application of the rules of maxima & minima to some problems of statics, related to architecture)

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2017). Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (5th ed.). Sage Publications.

Das, B. M. (2008). Advanced soil mechanics (3rd ed.). CRC Press.

Fredlund, D. G., & Morgenstern, N. R. (1977). Stress state variables for unsaturated soils. Journal of Geotechnical Engineering Division, 103(GT5), 447-466.

Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons.

GAD Municipal Nabón. (2019). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Nabón 2019-2023. Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Nabón. (Translation: Territorial Development and Planning Plan of Nabón Canton 2019-2023)

Glantz, M. H. (2001). Currents of change: Impacts of El Niño and La Niña on climate and society (2nd ed.). Cambridge University Press.

González-Ferrer, A., & Benavides-Benítez, J. (2019). Efectos del cambio climático en la ocurrencia de movimientos en masa en la zona interandina del Ecuador. *Geología y Minas*, 3(1), 45-56. (Translation: Effects of climate change on the occurrence of mass movements in the inter-Andean zone of Ecuador)

Head, K. H., & Epps, R. J. (2014). *Manual of soil laboratory testing, Volume 1: Soil classification and compaction tests* (4th ed.). Whittles Publishing.

Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, M. P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta ed.). McGraw-Hill Education. (Translation: Research methodology)

Hirsch, R. M., & Slack, J. R. (1984). A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*, 20(6), 727-732.

Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice-Hall.

INAMHI. (2024). *Reportes Climáticos Anuales y Datos Históricos de Estaciones Meteorológicas para la Región Sur de Ecuador*. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (Datos internos o publicaciones anuales hipotéticas). (Translation: Annual Climate Reports and Historical Meteorological Station Data for the Southern Region of Ecuador)

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Keefer, D. K. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 95(4), 406-421.

Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). *Soil mechanics*. John Wiley & Sons.

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245-259.

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eighth Conference on Applied Climatology*, 179-184.

Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2016). *Attribution of extreme weather events in the context of climate change*. The National Academies Press.

Nobre, P., & Shukla, J. (1996). Variations of sea surface temperature, rainfall, and atmospheric circulation over the Amazon region and the equatorial Pacific. *Journal of Climate*, 9(10), 2414-2432.

NTE INEN 690. (2011). *Suelos. Determinación del contenido de humedad*. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (Translation: Soils. Determination of moisture content)

NTE INEN 692. (2011). *Suelos. Determinación de la gravedad específica de los sólidos*. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (Translation: Soils. Determination of the specific gravity of solids)

NTE INEN 696. (2011). *Suelos. Análisis granulométrico por tamizado e hidrómetro*. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (Translation: Soils. Particle size analysis by sieving and hydrometer)

NTE INEN 697. (2011). *Suelos. Determinación del coeficiente de permeabilidad de suelos granulares y cohesivos*. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (Translation: Soils. Determination of the coefficient of permeability of granular and cohesive soils)

NTE INEN 700. (2011). Suelos. Ensayo de corte directo consolidado drenado. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (Translation: Soils. Consolidated drained direct shear test)

NTE INEN 704. (2011). Suelos. Ensayo de consolidación unidimensional. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (Translation: Soils. One-dimensional consolidation test)

NTE INEN 706. (2011). Suelos. Determinación del límite líquido. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (Translation: Soils. Determination of the liquid limit)

NTE INEN 707. (2011). Suelos. Determinación del límite plástico. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (Translation: Soils. Determination of the plastic limit)

Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought (Research Paper No. 45). U.S. Weather Bureau.

Peixoto, J. P., & Oort, A. H. (1992). Physics of climate. American Institute of Physics.

Philander, S. G. (1990). El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. Academic Press.

Rankine, W. J. M. (1857). On the stability of loose earth. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 147, 9-27.

Rahardjo, H., Leong, E. C., & Rezaur, R. B. (2008). Effect of antecedent rainfall on slope stability. International Journal of Geomechanics, 8(2), 163-171.

Secretaría de Gestión de Riesgos. (2024). Informe anual de eventos peligrosos y atención de emergencias en el Cantón Nabón. Secretaría de Gestión de Riesgos (SGR), Ecuador. (Informe hipotético). (Translation: Annual report of hazardous events and emergency response in Nabón Canton)

Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389.

Skempton, A. W. (1954). The pore-pressure coefficients A and B. *Géotechnique*, 4(4), 143-147.

Takahashi, M., Murakami, T., & Matsuno, T. (1984). El Niño Southern Oscillation and tropical convection. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 62(6), 949-960.

Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. John Wiley & Sons.

Tobar, V., Carrión, D., & Mite, L. (2017). Geotechnical properties of volcanic soils in the Andean region of Ecuador: A review. *Journal of South American Earth Sciences*, 78, 289-301.

Toll, D. G. (2007). The state of the art in unsaturated soil mechanics. *Engineering Geology*, 93(3-4), 1-22.

Trenberth, K. E. (1997). The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12), 2771-2777.

Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1-2), 123-138.

Vicuña, S., & Garreaud, R. D. (2018). Climate change and hydrological impacts in the Andes of central Chile (30–35° S): An analysis of changes in daily precipitation and streamflow. *Climate Dynamics*, 50(5-6), 2097-2114.

Villagómez, A. (2015). Análisis de movimientos en masa en la cuenca del Río Machángara, provincia de Pichincha, Ecuador. (Tesis de maestría inédita). Universidad Central

del Ecuador. (Translation: Analysis of mass movements in the Machángara River basin, Pichincha province, Ecuador)

Waylen, P. R., & Caviedes, C. N. (1990). Annual and seasonal precipitation fluctuations in the Chilean central valley and their relationship with the Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 3(11), 1259-1267.

World Meteorological Organization. (2017). Guide to climatological practices (WMO-No. 100). World Meteorological Organization.

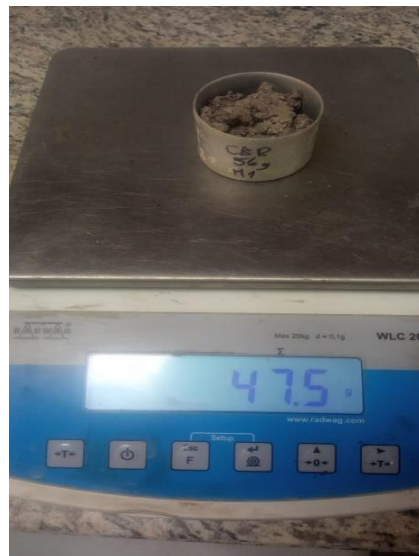
Yeh, S. W., Kim, J. Y., & Compo, G. P. (2018). Intensification of the ENSO teleconnection to the extratropical North Pacific in recent decades. *Journal of Climate*, 31(12), 4887-4903.

9 Anexos

Anexo A. Toma de Muestra Para Ensayo de Humedad Pozo 1



Anexo B. Toma de Muestra Para Ensayo de Humedad Pozo 2



Anexo C. Toma de Muestra Para Ensayo de Granulometría Pozo 1



Anexo D. Toma de Muestra Para Ensayo de Granulometría Pozo 2



Anexo E. Ensayo de Granulometría de Muestras



Anexo F. Muestras al secado natural y previas a Ensayo de Granulometría



Anexo G. Muestras Ensayadas en Límite Líquido y Plástico



Anexo H. Ensayo Casa Grande



Anexo I. Granulometría de Pozo 1

"Pozo 1"					
PESO INICIAL DE LA MUESTRA = 3000g					
TAMIZ		PESO RETENIDO [gr]	PESO RETENIDO [%]	RETENIDO ACUMULADO [%]	PASANTE ACUMULADO [%]
PULGADAS	Abertura(mm)				
6 "	150.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
5 "	125.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
4 1/2 "	112.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
4 "	110.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
3 1/2 "	90.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
3 "	75.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
2 "	50.80 mm	42.60	1.42	1.42	98.58
1 1/2 "	37.50 mm	63.90	2.13	3.55	96.45
1 "	26.50 mm	106.50	3.55	7.10	92.90
3/4 "	19.00 mm	127.80	4.26	11.36	88.64
1/2 "	13.20 mm	170.10	5.67	17.03	82.97
3/8 "	9.50 mm	212.70	7.09	24.12	75.88
N° 4	4.75 mm	255.30	8.51	32.63	67.37
N° 8	2.36 mm	297.90	9.93	42.56	57.44
N° 10	2.00 mm	0.00	0.00	42.56	57.44
N° 16	1.18 mm	383.10	12.77	55.32	44.68
N° 30	600.0 µm	425.40	14.18	69.50	30.50
N° 40	425.0 µm	0.00	0.00	69.50	30.50
N° 50	300.0 µm	468.00	15.60	85.10	14.90
N° 100	150.0 µm	319.20	10.64	95.74	4.26
N° 200	75.0 µm	63.90	2.13	97.87	2.13
FONDO		63.90	2.13	100.00	0.00
TOTAL [g]		3000.00	100.00		

Anexo J. Granulometría de Pozo 2

"Pozo 2"					
PESO INICIAL DE LA MUESTRA = 3000g					
TAMIZ		PESO RETENIDO [gr]	PESO RETENIDO [%]	RETENIDO ACUMULADO [%]	PASANTE ACUMULADO [%]
PULGADAS	Abertura(mm)				
6 "	150.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
5 "	125.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
4 1/2 "	112.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
4 "	110.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
3 1/2 "	90.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
3 "	75.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
2 "	50.80 mm	36.00	1.20	1.20	98.80
1 1/2 "	37.50 mm	60.00	2.00	3.20	96.80
1 "	26.50 mm	105.00	3.50	6.70	93.30
3/4 "	19.00 mm	120.00	4.00	10.70	89.30
1/2 "	13.20 mm	165.00	5.50	16.20	83.80
3/8 "	9.50 mm	210.00	7.00	23.20	76.80
N° 4	4.75 mm	240.00	8.00	31.20	68.80
N° 8	2.36 mm	285.00	9.50	40.69	59.31
N° 10	2.00 mm	0.00	0.00	40.69	59.31
N° 16	1.18 mm	360.00	12.00	52.69	47.31
N° 30	600.0 µm	420.00	14.00	66.69	33.31
N° 40	425.0 µm	0.00	0.00	66.69	33.31
N° 50	300.0 µm	450.00	15.00	81.69	18.31
N° 100	150.0 µm	300.00	10.00	91.69	8.31
N° 200	75.0 µm	90.00	3.00	94.69	5.31
FONDO		159.40	5.31	100.00	0.00
TOTAL [g]		3000.00	100.00		

Anexo K. Límite Líquido y Plástico Pozo 1

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO	LÍMITE PLÁSTICO	LÍMITE PLÁSTICO
	1	2	3	4			
No de ensayo	1	2	3	4	1	2	3
No de capsula	M1	M2	M3	M4	P1	P2	P3
Peso de la capsula (gr)	17.500	17.500	17.500	17.500	17.500	17.500	17.500
Peso de la capsula + muestra (gr)	29.500	29.500	26.500	29.875	20.500	20.500	20.500
Peso de la capsula + muestra seca (gr)	26.100	26.400	24.321	26.500	19.400	19.300	19.400
Peso de la muestra húmeda (gr)	12.000	12.000	9.000	12.375	3.000	3.000	3.000
Peso de la muestra seca (gr)	8.600	8.900	6.821	9.000	1.900	1.800	1.900
Peso del agua (gr)	3.400	3.100	2.179	3.375	1.100	1.200	1.100
Humedad (%)	39.535	34.831	31.945	37.500	57.895	66.667	57.895
No de Golpes	17	26	35	22	60.819		
PROMEDIO	25.000				6.082		

Anexo L. Límite Líquido y Plástico Pozo 2

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO	LÍMITE PLÁSTICO	LÍMITE PLÁSTICO
	1	2	3	4			
No de ensayo	1	2	3	4	1	2	3
No de capsula	M1	M2	M3	M4	P1	P2	P3
Peso de la capsula (gr)	17.500	17.500	17.500	17.500	17.500	17.500	17.500
Peso de la capsula + muestra (gr)	30.500	31.500	26.500	29.500	29.000	20.500	20.500
Peso de la capsula + muestra seca (gr)	26.300	27.700	24.321	26.100	25.000	19.300	19.400
Peso de la muestra húmeda (gr)	13.000	14.000	9.000	12.000	3.000	3.000	3.000
Peso de la muestra seca (gr)	8.800	10.200	6.821	8.600	2.20	1.800	1.900
Peso del agua (gr)	4.200	3.800	2.179	3.400	0.800	1.200	1.100
Humedad (%)	47.727	37.255	31.945	39.535	36.364	66.667	57.895
No de Golpes	16	25	35	20	38.528		
PROMEDIO	24.750				3.853		

Anexo M. Datos del Software Windy (Página web) Mes Julio



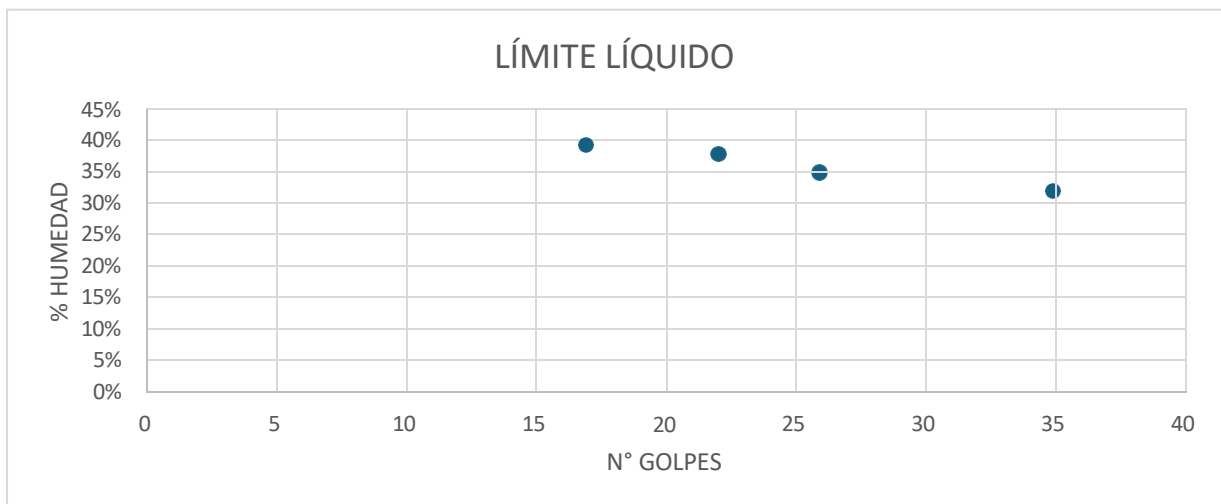
Anexo N. Datos del Software Windy (Página web) Mes Agosto



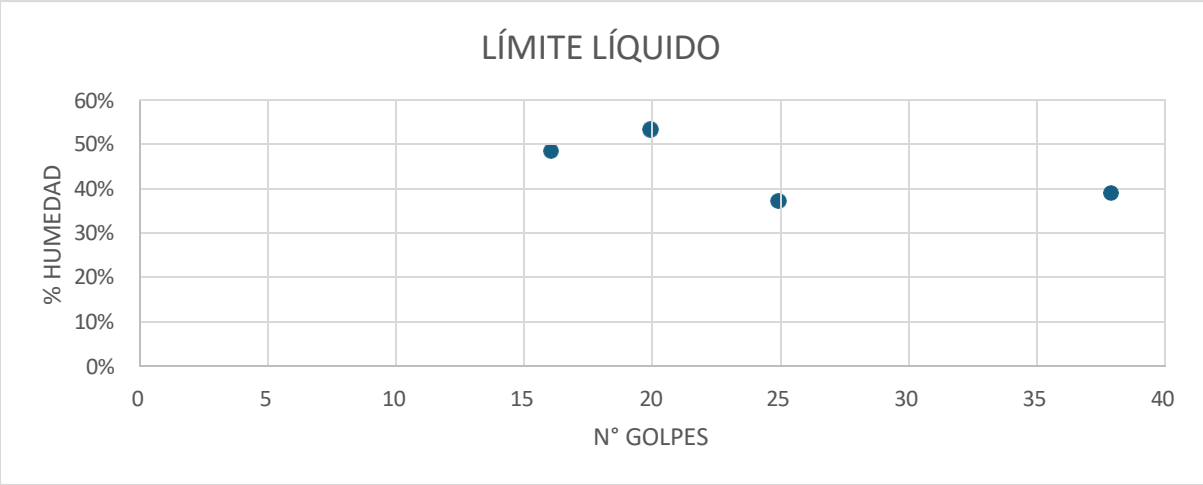
Anexo O. Datos del Software Windy (Página web) Mes Septiembre



Anexo P. Gráfica Límite Líquido de Pozo 1



Anexo Q. Gráfica Límite Líquido de Pozo 2



Anexo R. Toma de Medidas del Nivel Freático Pozo 1



Anexo S. Toma de Medidas del Nivel Freático Pozo 2

