

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DE UN AFLORAMIENTO DE LA FORMACIÓN ANDALIÉN, COMUNA DE PENCO, REGIÓN DEL BIO BÍO, CHILE.

Victor Salinas Andía¹, Robert King St-Onge² y José Montenegro Cooper³

RESUMEN: La importancia de contar con información actualizada respecto a características geológicas y geotécnicas de formaciones rocosas, recae en disminuir lo más posible el grado de incertidumbre en la toma de decisiones en proyectos inmobiliarios, ingenieriles y estudios de planificación territorial, entre otros. La Formación Andalién cuenta con muy poca información publicada en lo que respecta a su geología y parámetros resistentes, siendo la principal problemática la heterogeneidad que presenta en sus componentes y los diferentes niveles de meteorización que se encuentran sometidos los estratos. La base de la formación presenta una alta resistencia debido a sus grandes clastos presentes en su conglomerado basal. A medida que se aumenta la altura en el afloramiento se observan estratos con conglomerados cada vez mas descompuestos pasando por fases saprolítica, hasta llegar a comportarse totalmente como un suelo, debido al estado disgregado de sus clastos. El suelo de fundación se clasifica como una arcilla limosa o limo arcilloso (CL) de plasticidad media a baja, con ángulo de fricción interna cercano a los 24° y una cohesión 29 kPa, sin embargo, dentro de la Formación Andalién se identificó una variación de suelos finos a gruesos.

PALABRAS CLAVES: meteorización, parámetros resistentes, heterogeneidad.

ABSTRACT: The importance of having updated information on geological and geotechnical characteristics of rock formations, lies in reducing as much as possible the degree of uncertainty in decision making in real estate projects, engineering and land planning studies, among others. The Andalién Formation has very little published information regarding its geology and resistant parameters, the main problem being the heterogeneity of its components and the different levels of weathering to which the strata are subjected. The base of the formation presents a high resistance due to its large clasts present in its basal conglomerate. As the height of the outcrop increases, stratas with increasingly decomposed conglomerates are observed, passing through saprolitic faces, until it behaves completely as a soil, due to the disintegrated state of its clasts. The foundation soil is classified as a silty clay or clayey silt (CL) of medium to low plasticity, with an angle of internal friction close to 24° and a cohesion of 29 kPa, however, within the Andalién Formation a variation of fine to coarse soils was identified.

KEYWORDS: weathering, resistant parameters, heterogeneity.

¹ Estudiante, Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, vsalinas@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Depto. Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rking@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Depto. Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, jmontenegro@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

En la planificación territorial es de gran importancia contar con información base lo más completa y actualizada posible. Dentro de la región del Bio bío se identifican una gran variedad de formaciones geológica y suelos. Una de las formaciones que se encuentra poco estudiada es la Formación Andalién presente en las serranías costeras de la ciudad de Penco que tiene como origen un ambiente sedimentario torrencial (Galli, 1967).

La Formación Andalién está dominada por materiales provenientes del miembro de los granitoides del Batolito Costero sur, que consiste de granodioritas, tonalitas principalmente meteorizadas y con sus feldspatos descompuestos (Vivallos y otros, 2010). La Formación Andalién cuenta con muy poca información bibliográfica, siendo la principal fuente geológica lo descrito por Galli (1967) y en cuanto a características geotécnicas es nula su información publicada.

El principal afloramiento rocosa de la formación se emplaza en un lugar donde actualmente se está expandiendo la población de la comuna de Penco. Entre los proyectos más importantes, se destacan las construcciones de conjuntos habitacionales como Montahue y Mavidahue (Figura 1) que albergan a unas 1900 familias. Estos proyectos fueron terminados durante los años 2016-2018, además hoy en día existen proyectos en desarrollo como Los Álamos de Penco y Puertas de Penco (Figura 1). La continua expansión de la población tarde o temprano hará desaparecer este afloramiento de la Formación Andalién, aquí recae la importancia de su pronto estudio.

El presente trabajo entrega información base actualizada sobre la Formación Andalién, a través de la caracterización geológica y geotécnica de un afloramiento emplazado en la comuna de Penco. Se utiliza el reconocimiento visual de la unidad rocosa y muestras, determinando grados de meteorización, identificando minerales, rocas y ambiente al que se encuentran asociados. Además, se realiza un análisis estadístico de ensayos realizados a muestras en laboratorio de geotecnia, en conjunto con estudios de mecánica de suelo antiguos, para definir parámetros resistentes orientativos para la Formación Andalién.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Ubicación área de estudio

La zona de estudio se emplaza en la comuna de Penco (Figura 1) perteneciente a la provincia de Concepción, región del Bio bío, que se sitúa a unos 425 km al sur de Santiago, capital de Chile. Penco limita geográficamente al sur con Concepción, donde el río Andalién marca el contacto de las dos comunas, por otro lado, Penco limita al norte con la comuna de Tomé y al este con Florida.

La mayor parte de la zona de estudio corresponde a sectores residenciales y de construcción de nuevos conjuntos habitacionales, con una previa deforestación de árboles y vegetación en el área. En el sector se identifican obras importantes como son la carretera interportuaria ubicada en la parte sur y que tiene tránsito activo de camiones de servicios de transporte de productos marítimos y forestales del sector.

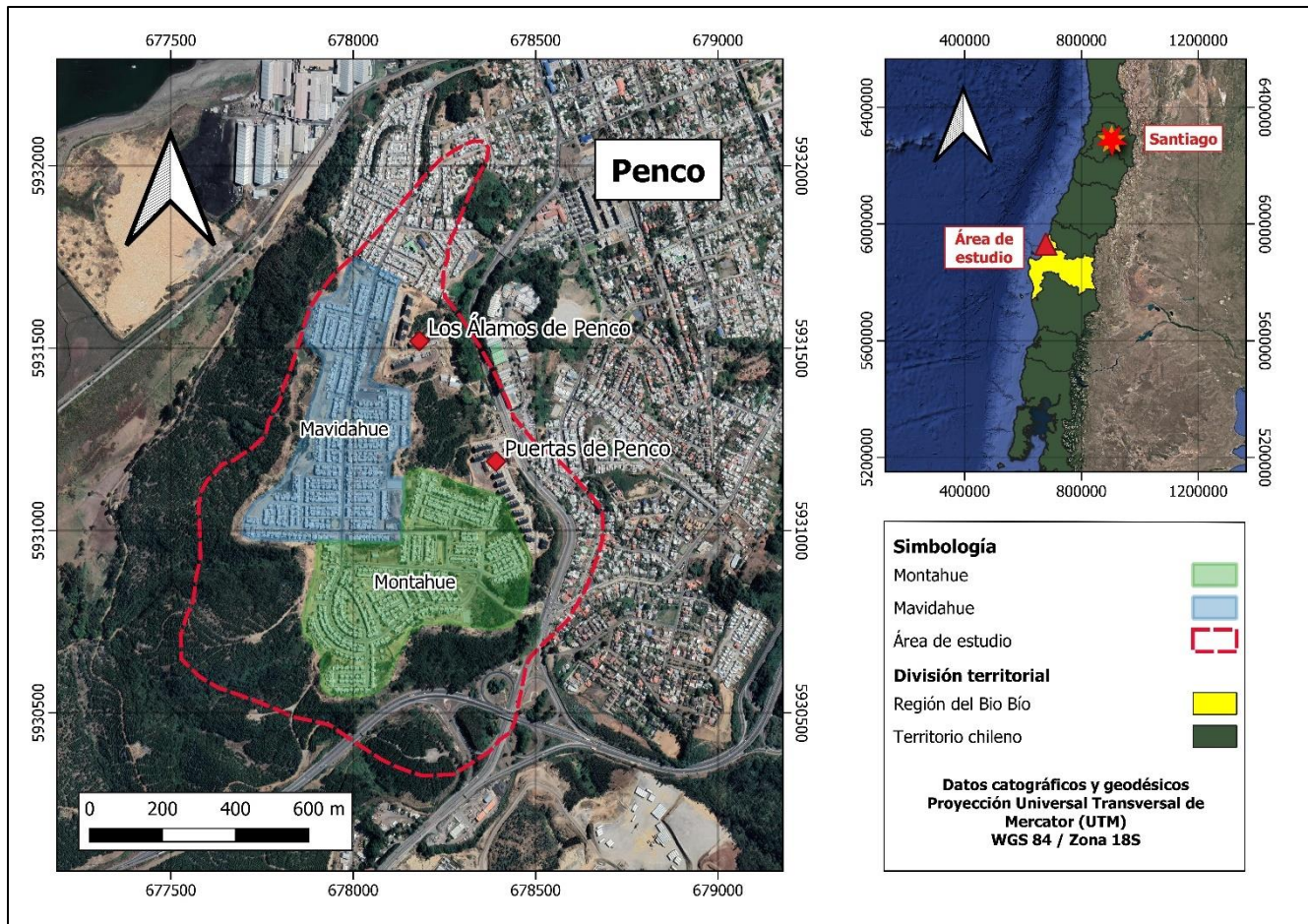


Figura 1.- Ubicación geográfica de la zona de estudio (Modificado de Google Earth Pro v7.3).

2.2 Geomorfología

La región del Biobío al igual que la mayoría de Chile presenta una geomorfología muy variada, que según Börgel (1983) está conformada por 4 macro formas de relieve, las cuales de Oeste a Este serían las Planicies Litorales, Cordillera de la Costa, Depresión Intermedia y la Cordillera de los Andes. Dicho relieve es modelado producto del margen tectónico del Cinturón de Fuego, debido a la subducción de la Placa de Nazca con la Placa Sudamericana.

Principalmente el área de estudio se enmarca en el sector de Planicies Marinas (Figura 2), sin embargo, en sus alrededores se encuentran otras unidades geomorfológicas como La Cordillera de la Costa y Llanos con sedimentación fluvial y/o aluvial.

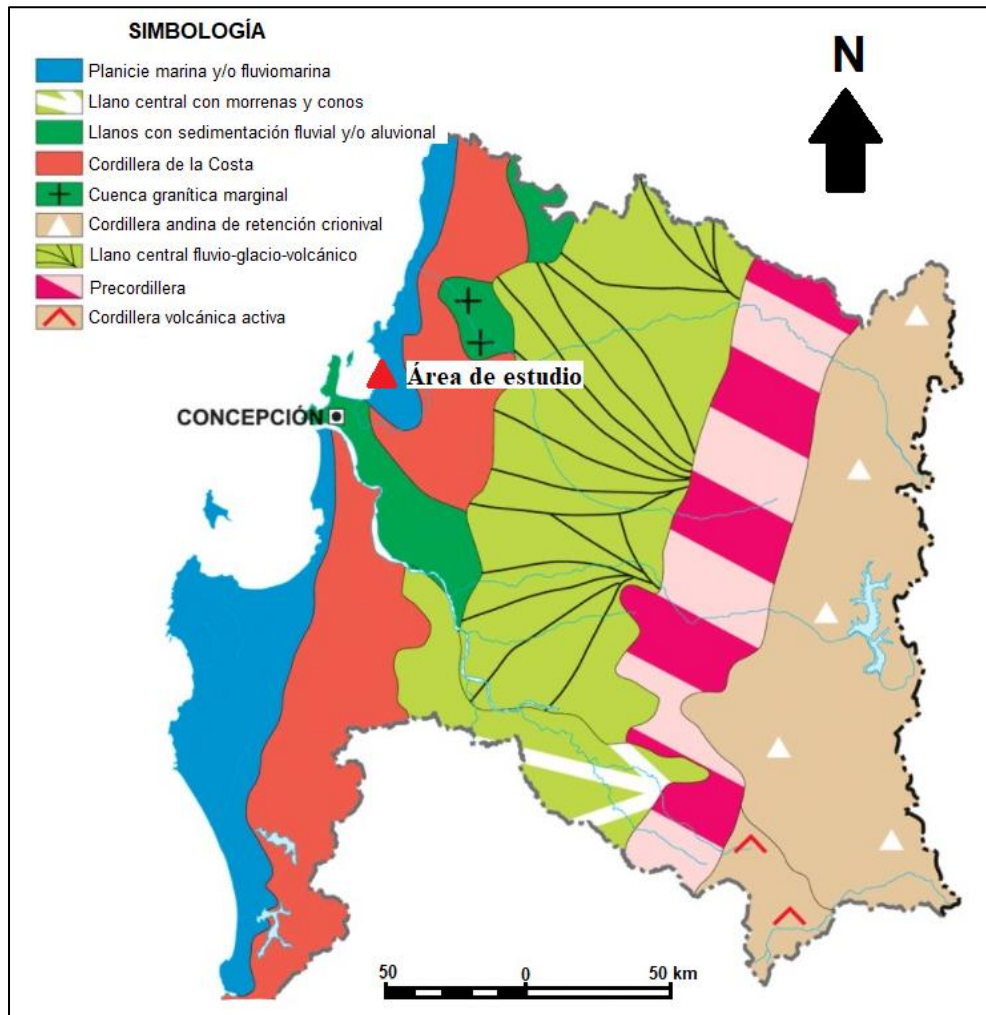


Figura 2.- Mapa geomorfológico de la 8va región (Tomado de Börgel, 1983)

Cercano al área de estudio se destacan tres de las nueve macro-zonas descritas por Börgel (1983) las que corresponden:

Planicies marinas y/o fluvio marinas: Faja costera constituidas por planicies de abrasión producto de la acción erosiva del mar sobre las rocas, así como la sedimentación marina y/o fluvio-marina debido a la depositación del material de origen tectónico (Guiñez, 2016). Parte de la depositación es debido al material erosionado de la Cordillera de la Costa que se organiza en formas lacustres, de marismas y torrencial como es el caso de la Formación Andalién (Tta).

Llanos con sedimentación fluvial y/o aluvional: Se distribuyen en lugares aledaños al curso del río Bio bío y cercano a su desembocadura. Corresponden a llanos de sedimentación fluvial de arenas negras provenientes de la actividad del volcán Antuco, que finalmente se depositan en las riberas y playas norte del río por deriva litoral. Por otro lado, en la zona sur del río Bio bío las arenas son de tonalidades blancas debido a la alteración del intrusivo granítico de la costa (Estudio Hidrogeológico Cuencas del Bio bío e Itata, 2011).

Cordillera de la Costa: Macizo rocoso altamente meteorizado por acción del viento y el agua, debido lluvias frontales y redes de drenaje presente. Las cuencas graníticas se encuentran desintegradas y descompuestas localmente, generando un suelo residual conocido como “Maicillo” formado en la Cordillera de la Costa desde Valparaíso hasta la Cordillera de Nahuelbuta.

2.3 Geología

Basado en el mapa del Estudio de Campo II (2008) correspondiente a la Figura 3, aquí se identifican 7 unidades geológicas dentro de los límites urbanos de Penco:

2.3.1 Serie Oriental (Pza):

Corresponde al Cinturón Metamórfico pareado presente en la Cordillera de la Costa, que está constituido principalmente por filitas, esquistos, pizarras, rocas córneas, metagrauvas, y subordinadamente gneises migmáticos que se asocian a granitoides y rocas calcosilicatadas (Aguirre y otros, 1972). Dentro de las rocas mayoritariamente presentes en la comuna de Penco se encuentran las filitas que poseen una textura lepidoporfidoblástica y su mineralogía consiste en cuarzo, mica blanca, sericita, clorita y biotita (Cartes, 2004). Estas rocas metamórficas a lo largo de la bahía de Concepción se encuentran muy meteorizadas presentando colores amarillos rojizos y muy arcillosos con mantos alterados de hasta 2 a 4 m de espesor (Galli, 1967). De acuerdo con Willner y otros (2008) se estiman edades para la serie comprendida entre el Devónico superior y Missisippiano medio.

2.3.2 Batolito Costero Sur (Pzgp):

En las cercanías a la comuna aflora el miembro llamado Granitoides de Concepción, correspondiente principalmente a granodioritas, tonalitas y granitos subordinados que intruyen las rocas metamórficas de la Serie Oriental (Figura 3). Estas rocas están en su mayoría altamente meteorizados y con sus feldespatos descompuestos (Vivallos y otros, 2010). Producto de esta meteorización se genera un material genéricamente llamado en Chile como “Maicillo” que posee distintos grados de cohesión y propiedades difíciles de analizar. El manto de alteración puede llegar hasta unos 100m de potencia en algunos sectores (Quezada, 1996). Para los granitoides se han determinado edades K/Ar de 310 ± 20 Ma (Nishimura, 1971) y 294 ± 2 Ma mediante isótopos de Rb-Sr (Hervé, 1988), por lo tanto, se deduce una edad de Carbonífero-Pérmico para esta unidad.

2.3.3 Formación Quiriquina (Krq):

La Formación Quiriquina se presenta como islas tectónicas a lo largo de la comuna (Figura 3) y sobreyace en disconformidad a las unidades anteriormente descritas según Sylvester y Sangüesa (en Veyl, 1961). La Formación Quiriquina principalmente está formada por un conglomerado basal de clastos redondeados a angulares de esquistos, metaareniscas y cuarcita que subyace a niveles de areniscas pardas de grano fino, con concreciones fosilíferas, como Baculites, Trigonía y Pelecípodos (Quezada, 1996). Sobre las areniscas pardas, se encuentra areniscas finas de tonalidades verdes sin concreciones, ni fósiles (Quezada, 1996). Las rocas se encuentran meteorizadas, argilizadas localmente y muestran oxidación de minerales ferrosos, observando bandas rojizas en los niveles más superficiales (Guiñez, 2016). Según Salazar (2004) debido al contenido fosilífero de la unidad define que esta pertenece al Maastrichtiano superior.

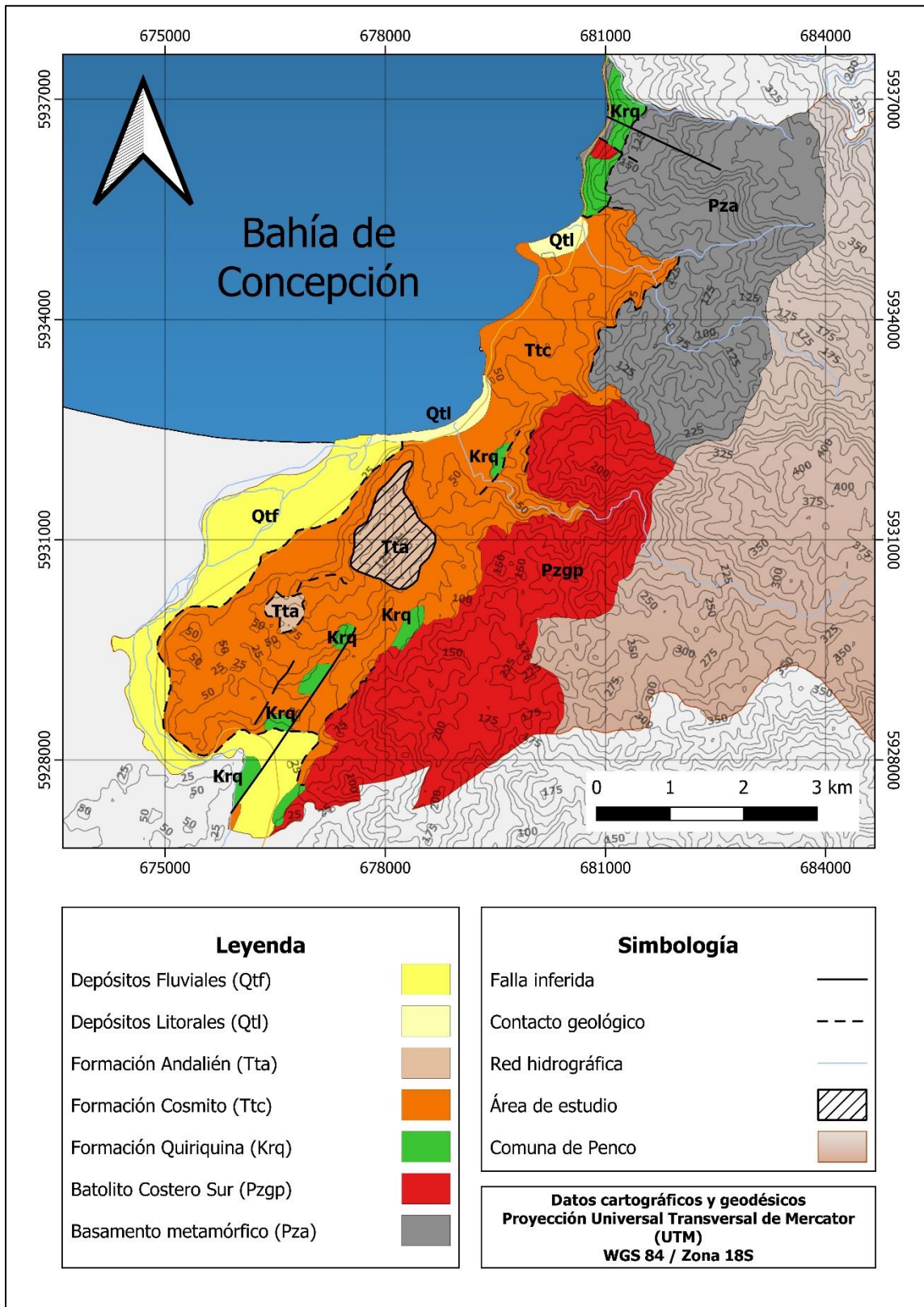


Figura 3.- Mapa geológico de la ciudad de Penco (Modificado de Geología de Campo II, 2008).

2.3.4 Formación Cosmito (Ttc):

El área tipo de esta formación es definida por Galli (1967) en la antigua Estación de ferrocarril de Cosmito ubicada en Penco a 5 km al norte de Concepción. Se dispone concordante sobre la Formación Quiriquina e infrayace en discordancia angular a la Formación Andalién. Su litología corresponde a lutitas, areniscas pardas con granulometrías variadas y con una estratificación cruzada, además de mantos de conglomerados y carbón. Las lutitas y areniscas predominan y se puede observar que en la mayor parte de los afloramientos se encuentran muy alteradas, con un color amarillento rojizo que las caracteriza. Su depositación corresponde a ambientes lagunares y costeros asociados a pantanos y ambientes de baja energía. La formación es correlacionada por Galli (1967) con la Formación Curanilahue definida en la provincia de Arauco que es datada en el Eoceno inferior.

2.3.5 Formación Andalién (Tta):

Esta unidad fue definida por Galli (1967) en el sector donde el río Andalién bordea por el NE la ciudad de Concepción (Figura 3). Consiste principalmente en una secuencia de conglomerados polimícticos descompuestos, arcillolitas conglomerádicas con clastos de filitas, esquistos micáceos, cuarcitas, rocas graníticas y areniscas (Galli, 1967; Quezada, 1996; García, 2004; Vivallos y otros, 2010). La depositación de la formación corresponde a un ambiente torrencial, que debido a su distribución marginal a la Cordillera de la Costa se sugiere que derivaron de una zona en proceso tectónicamente inestable y de erosión, compuesta por rocas metamórficas y graníticas (Galli, 1967).

Esta formación se encuentra expuesta en una franja SO-NE de forma discontinua de afloramientos en las serranías bajas entre los cerros Verde al O de Concepción y Bellavista al NO de Penco (Erices J, 2018). Galli (1967) propone una potencia de alrededor de los 30 m para la formación, en cambio García (2004) señala que algunos afloramientos observados en Penco pueden llegar a los 70 m. Ya que no se han encontrado restos fósiles en la Formación Andalién Galli (1967) y basándose principalmente en relaciones estratigráficas con las Formaciones Tubul y Huachipato aledañas a la zona, propone tentativamente para la Formación Andalién una edad Pliocena a Pleistocena.

2.3.6 Depósitos Litorales (Qtl):

Los cordones litorales que se encuentran bordeando a la bahía de Penco y Lírquen están formados principalmente por arenas de color pardo amarillentas debido al alto contenido de clastos de cuarzo y feldespato sobre los minerales máficos (Erices J, 2018). La edad máxima de los depósitos litorales tentativamente se asigna al Pleistoceno temprano, ya que serían el resultado de interacciones tectónicas y variaciones glacioeustáticas del nivel del mar (Erices J, 2018).

2.3.7 Depósitos Fluviales (Qtf):

Son depósitos asociados al presente río Andalién y se encuentran en el lecho de dicho río. Su litología corresponde a arenas y materiales finos de color castaño amarillento compuesto principalmente por cuarzo, feldespatos y líticos plutónicos (Galli, 1967). Principalmente estos sedimentos son consecuencia de la erosión de secuencias más antiguas de rocas, asignándosele una edad máxima en el Pleistoceno (Inostroza A, 2018).

2.4 Clima

El clima de Penco y el área de estudio corresponde a un clima de tipo Mediterráneo Oceánico con veranos relativamente secos, clasificado como Csbn según la clasificación de Köppen. Esto quiere decir que la temperatura del mes más frío fluctúa entre los -3°C y 18°C . Además, en el área de estudio, las precipitaciones se concentran principalmente entre los meses de mayo y septiembre, siendo el mes de junio el más lluvioso con 221 mm de precipitación promedio acumulada (Dirección General de Aguas, 2022). Al analizar la estación pluviométrica Andalién entre los años 2011-2020 se da cuenta que el 26 de junio del 2019 se registraron 125 mm de precipitación máxima en 24 horas y una precipitación acumulada de 425 mm para el mismo mes (Dirección General de Aguas, 2022).

Se define como temporada templada entre los meses de diciembre y marzo con una temperatura promedio de 17°C . Los meses entre mayo y septiembre corresponden a la temporada invernal del año con una temperatura promedio que fluctúa en los 10°C según datos históricos entre 2011-2020 de la Dirección General de Aguas (2022). Además, a través de la DGA se obtienen datos de precipitación promedio acumulada para los meses invernales de 801 mm y 76 mm en los meses más templados según los últimos 10 años.

Lo analizado en la DGA concuerda con lo descrito por Köppen (1983), quedando en evidencia que el área de estudio corresponde a una zona muy húmeda casi en la totalidad del año, siendo la época invernal un periodo de gran concentración e intensidad de lluvias, tal que este es el agente erosivo principal que afecta a las litologías de la comuna de Penco y alrededores. Esto conlleva a un suelo en constante humedad y por largos periodos de tiempo produciendo un cambio constante en el relieve y los minerales que se encuentran en las formaciones, poniendo en riesgo la estabilidad de las laderas, taludes y suelos de fundación.

2.5 Meteorización

La meteorización se define como la acción de desintegración y/o descomposición de los materiales geológicos en superficie. Este término incluye todas las alteraciones de tipo físico o química que modifican las características y propiedades de los materiales afectados. Estos procesos de meteorización de las rocas dan como resultado la formación de suelos, los cuales pueden permanecer sobre la roca madre (suelos residuales) o bien pueden ser transportados como sedimentos para luego litificarse y formar nuevamente rocas o suelos transportados como lo son los aluviales, eólicos, glaciares, coluviales, entre otros (González de Vallejo y otros, 2002).

Los procesos de meteorización están controlados principalmente por las condiciones climáticas y todo lo que conlleva sus variables, como: la temperatura, precipitaciones, humedad, régimen de vientos, infiltraciones en rocas y suelos, etc. Estos determinan el tipo y que tan intensa son las transformaciones físicas y químicas que afectan a los afloramientos rocosos.

En la Figura 4 se muestra un gráfico para la alteración química, física y fisicoquímica que reflejan la relación que tiene el clima con los procesos de meteorización propuesta por Ollier (1984) Además, en estos gráficos se da cuenta de los periodos climáticos principales de Penco con un punto de color azul (temporada invernal) y un punto de color rojo (temporada templada).

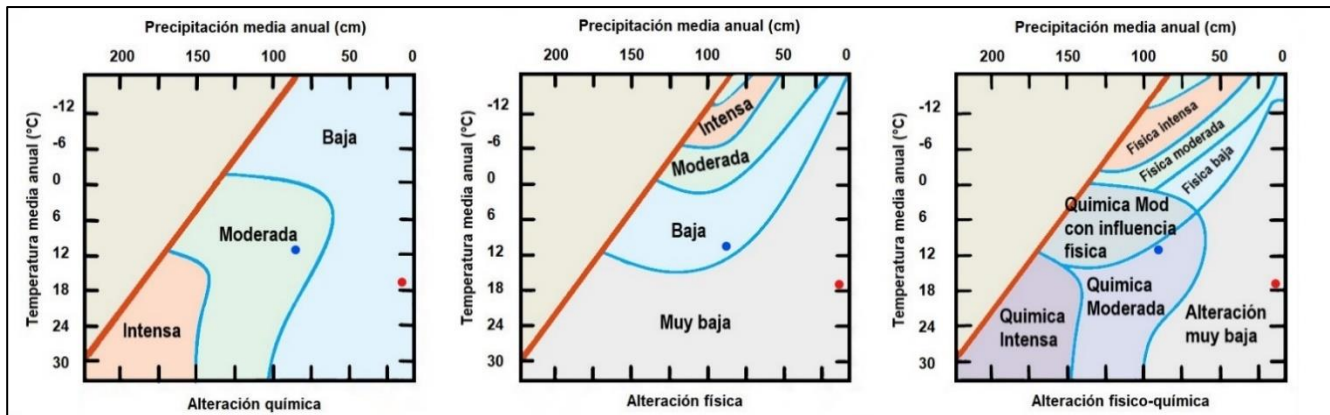


Figura 4.- Relación entre clima y los procesos de meteorización, donde el punto azul y rojo representa las épocas invernales y estivales según corresponda (Modificado de Ollier, 1984)

Según la Figura 4 se puede inferir que en la zona de estudio se encuentra actuando una alteración química moderada principalmente en los meses invernales, siendo esta de menor intensidad en los meses más cálidos. Por otro lado, se da cuenta de una alteración física baja a muy baja para los dos periodos y una alteración fisicoquímica moderada dejando en claro que la mayor parte de la meteorización se ejecuta entre los meses de mayo a septiembre, donde se presentan las mayores precipitaciones y humedades acumuladas en el año, sin embargo, debido a la humedad presente durante todo el año, es en épocas cálidas donde las reacciones químicas presentan más radio y estas se ponen en marcha.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de este estudio se dividió en 3 etapas principales, primero partió por una recopilación de datos y visitas a terreno que sirvieron como método de exploración y toma de muestras de la Formación Andalién. En segundo lugar, se hizo un procesamiento de la información recopilada, para que finalmente se realizaran trabajos de laboratorio con las descripciones geológicas y análisis geotécnicos de los materiales extraídos.

3.1 Obtención de información y muestreo

Se realizaron 3 visitas a terreno en el mes de octubre del año 2021 con el fin de encontrar afloramientos representativos de la Formación Andalién basado en el mapa geológico disponible. Se definieron 3 puntos de muestreos correspondientes a C-1, C-2 y C-3 (Figura 5) ubicados en Mavidahue II y cercano al conjunto habitacional. A través de los 3 puntos de muestreo, se buscó analizar información actualizada en los ámbitos geológicos y geotécnicos, para ser complementada con los estudios previamente hechos en el afloramiento.



Figura 5.- Fotografías de los puntos de extracción de muestras C-1, C-2 y C-3 obtenidos en terreno.

En las ubicaciones seleccionadas (Tabla 1) se procedió a extraer muestras de 5 kilos para el caso de C-1 y C-2. Para el caso de C-3, con el fin de tener un buen análisis granulométrico, se realizó la extracción de cerca de 15 kilos de muestra, ya que su tamaño de grano alcanzaba los 140 mm como se puede apreciar en la Figura 5.

Tabla 1.- Muestras tomadas en terreno con sus respectivas ubicaciones geográficas.

Muestra	Ubicación
C-1	678175 - 5931471
C-2	678082 - 5931556
C-3	677856 - 5931230

Nota. Datos de ubicación entregados en sistema de coordenadas WGS 84 / UTM Zona 18S

Adicionalmente en el sitio de muestreo en C-3 se intentó determinar la densidad IN-SITU a través del ensayo de cono de arena según la Norma NCh 1516 of. 2010. Esto no pudo ocurrir debido al tamaño de algunos granos en el lugar y la gran cantidad de muestra a ensayar. Sin embargo, se determinó la densidad aproximada del material tratando de simular el volumen real de muestra extraída con nylon (Figura 6) y agua, con esto se espera obtener un valor sobrevalorado del peso específico debido a que se simula un volumen de material un poco menor al real.



Figura 6.- Determinación de densidad *in-situ* a través de medición de volumen de suelo retirado (Elaboración propia, 2022).

3.2 Caracterización geológica

El método realizado para la caracterización geológica se basó principalmente en un análisis de reconocimiento visual en terreno y laboratorio identificando los tipos de clastos de rocas presentes en la formación, así como sus grados de meteorización. También se describió las características sedimentarias del afloramiento para deducir el ambiente geomorfológico que corresponde en conjunto con su posible origen. Además, se procedió a extraer las partículas de tamaño arena de las muestras C-1, C-2 y C-3 post lavado y tamizado, para ser sometidas al reconocimiento visual con un microscopio estereoscópico LEICA EZ4, con el fin de determinar los componentes principales de esta fracción.

3.3 Caracterización geotécnica

Se reunió información de un total de 85 calicatas y 1 sondaje como antecedentes para este estudio, correspondientes a informes entregados para la construcción de los conjuntos habitacionales de Mavidahue II, Villa Montahue y Montahue II, en la comuna de Penco. Dentro de los informes se contó con datos correspondientes a ensayos granulométricos, límites de consistencia, densidad *in-situ* densidad máxima compactada seca, densidad de

partículas sólidas, humedad natural, compresión simple y corte directo realizados bajo las especificaciones del Manual de Carreteras Vol. 8 Sección 8.102.1 (LNV105) y normas NCh 1517, ASTM D6938-08, NCh 1534/1-00 y NCh 1534/2-80, NCh 1532, ASTM D2166-06 y ASTM D3080-04 según corresponda.

Para las muestras C1, C2 Y C3 obtenidas en terreno, cada una fue sometida a ensayos de caracterización en el Laboratorio de Geotecnia de la UCSC, correspondiente a granulometría, hidrómetro, límites de consistencia y densidad de partículas sólidas (Figura 7) en base a las normas anterior nombradas, agregando la norma ASTM D422 para el ensayo de granulometría por hidrómetro (Figura 7B).

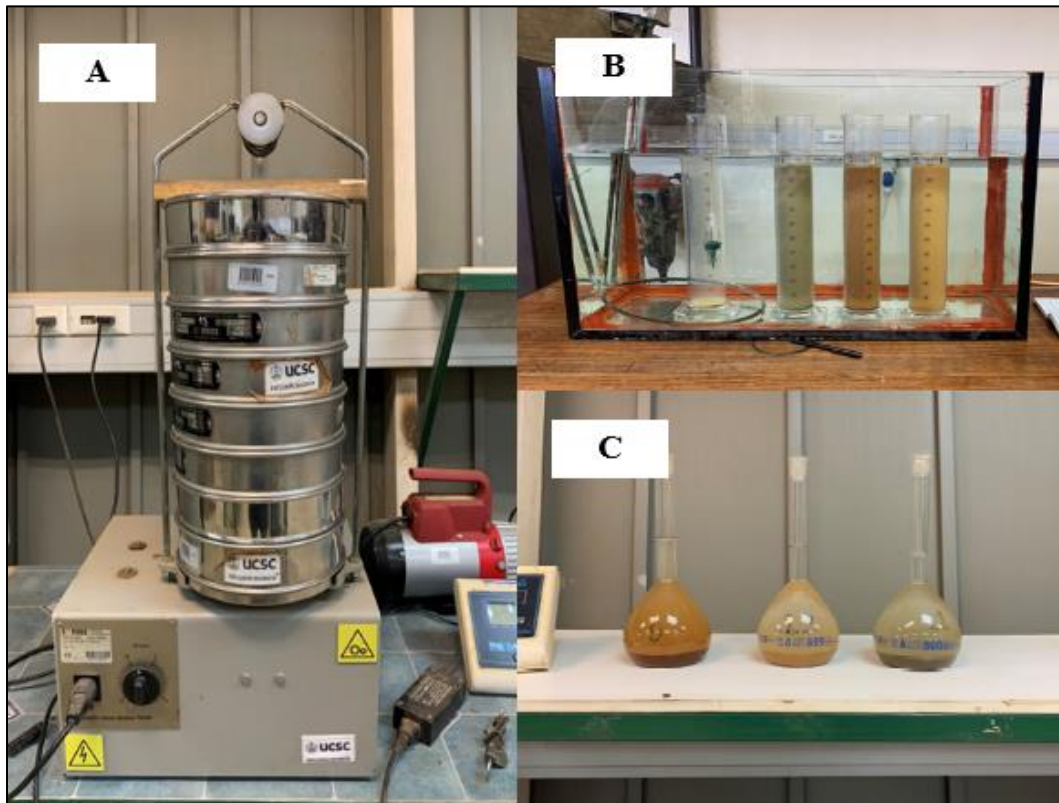


Figura 7.- Ensayos realizados en laboratorio, donde: A.- Ensayo granulométrico; B.- Granulometría de finos (Hidrómetro); C.- Pícnómetros con muestras extraídas (Elaboración propia, 2022).

Los datos se organizaron y ubicaron dentro de la zona de estudio (Figura 8) en conjunto a las calicatas que sirvieron como correlación a los antecedentes tanto geotécnicos como geológicos. La metodología ocupada para el análisis fue incorporar esta información a Excel, aquí se determinaron medidas estadísticas básicas correspondientes a la media, desviación estándar, mínimos y máximos, para la totalidad de los valores disponibles con el fin de tener una visión general de Formación Andalién. Además, se realizó una tabla de atributos en Qgis para cada una de las calicatas presentadas, como base de datos futuros.

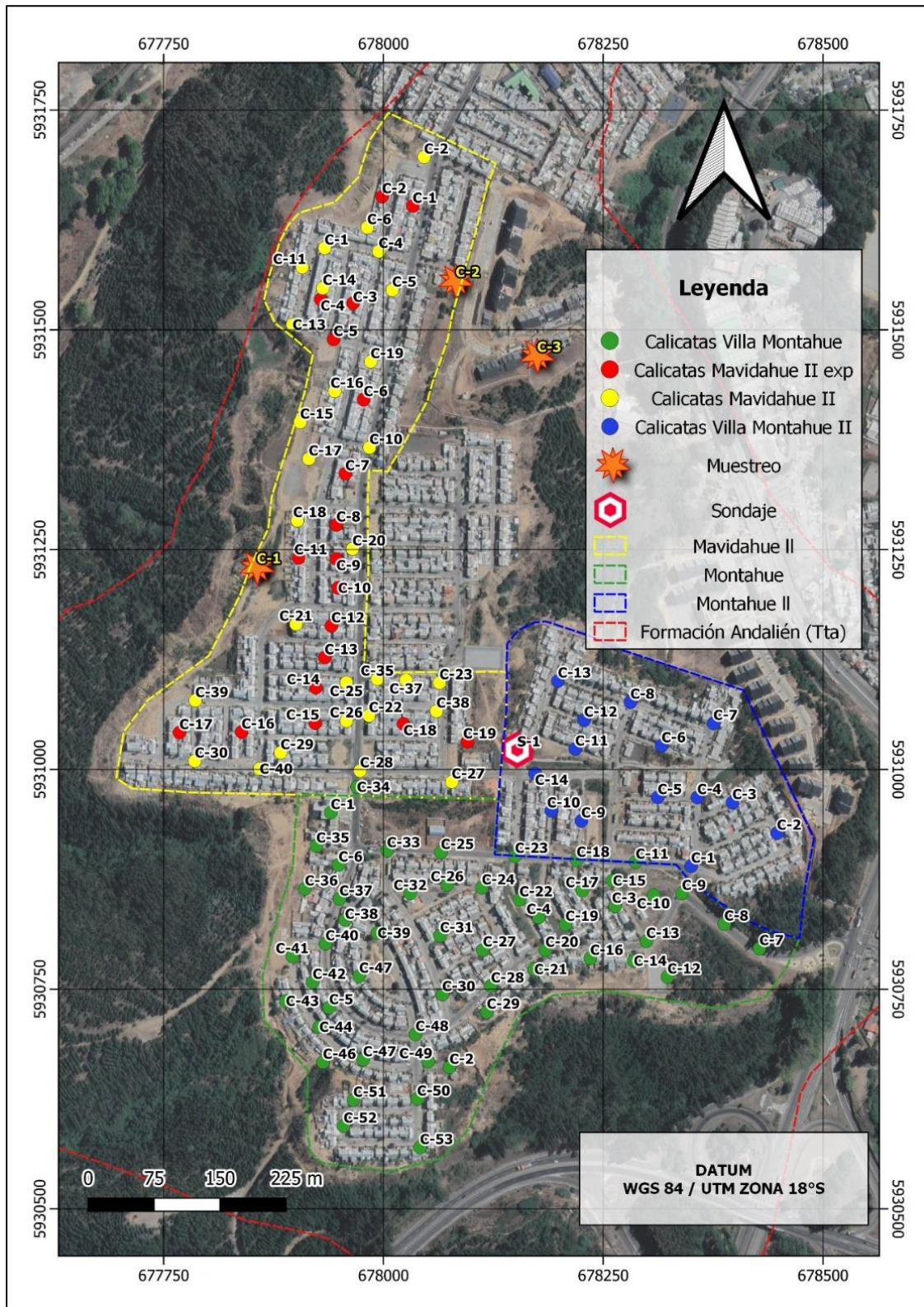


Figura 8.- Ubicación de sitios de muestreo, calicatas y sondaje (Elaboración propia, 2022).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización geológica

En el sector de muestreo C-1 (Figura 9) correspondiente al punto más alto de la Formación Andalién ubicado a unos 65 m s.n.m. La unidad rocosa aflora como un conglomerado soportado por su matriz fina y con clastos de tonalidades marrones claras a oscuras y tamaños de hasta 8 cm, identificándose entre ellos algunos granitos y filitas., Esta unidad en el sector se encuentra en un estado altamente meteorizado, que genera que sus clastos se presenten en un estado totalmente disgregable, a tal punto de comportarse como suelo y no como roca.



Figura 9.- Afloramiento de la Formación Andalién en el sector de muestreo C-1

La muestra C-1 (Figura 10) presenta una tonalidad Se aprecia principalmente una abundancia de granos de cuarzo, algunos minerales micáceos como muscovita, biotita y feldespatos provenientes de restos de rocas graníticas. En cuanto a los feldespatos observados, se identifican diferentes etapas de seritización, siendo el color amarillento el indicador principal de ella., Se observan tonos marrones rojizos recubriendo algunos granos de cuarzos, producto de la oxidación de minerales más ferrosos generando hematitas alrededor de los granos, Cabe destacar que la presencia de biotitas es notoria, aunque debido a sus planos de foliación estos se encuentran algo disgregadas y erosionadas, además se observan minerales traza correspondiente a hornblenda, epidotas y granates.

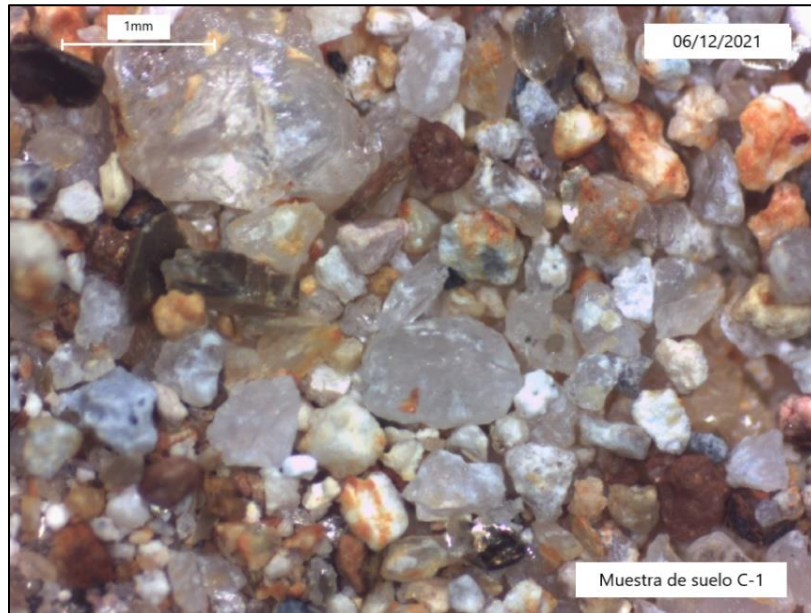


Figura 10.- Partículas tamaño arena de la muestra de suelo C-1

En el lugar de muestreo C-2 (Figura 11) se encuentra a 64 m s.n.m. y se puede apreciar la Formación Andalién como un conglomerado de matriz soportada con tonalidades rojizas soportando clastos de filitas, cuarzo y algunos granitos de tamaño máximo 10 cm. En el estrato se puede apreciar nuevamente una activa meteorización, generando las tonalidades rojizas en la roca que son provenientes de la oxidación de minerales ferrosos pertenecientes a la formación. Sin embargo, a diferencia del lugar de muestreo C-1, aquí se observan algunos clastos aún resistentes a la meteorización y no se encuentran en un estado disgregado, generando mayor resistencia de la unidad y a su vez logra que esta se comporte como una fase saprolítica o de transición entre roca y suelo.



Figura 11.- Afloramiento de la Formación Andalién en el sector de muestreo C-2.

La muestra C-2 (Figura 12) presenta tonos más marrones y rojizos con granos angulares a subredondeadas moderadamente seleccionadas. La mayoría de sus clastos corresponde a filitas muy meteorizadas generando óxidos de hierro como lo son las hematitas, siendo este factor el determinante en la coloración de la muestra. Al igual que en C-1, se observan clastos de cuarzo de diferentes tamaños y algunos son recubiertos por hematitas. En esta muestra se observa menor cantidad de feldespatos siendo estos afectados por la seritización a niveles altos y las biotitas se encuentran menos meteorizadas que el miembro superior. Se cuenta con la presencia de clastos provenientes de ilmenitas y granates más bien redondeados, producto del transporte sufrido. Se hallaron pequeños minerales metálicos correspondientes a pirita y arsenopirita los cuales sobrevivieron al transporte y no se meteorizaron, indicando una posible fuente de sedimentos cercana al sector que puede corresponder a vetas de mineralización.

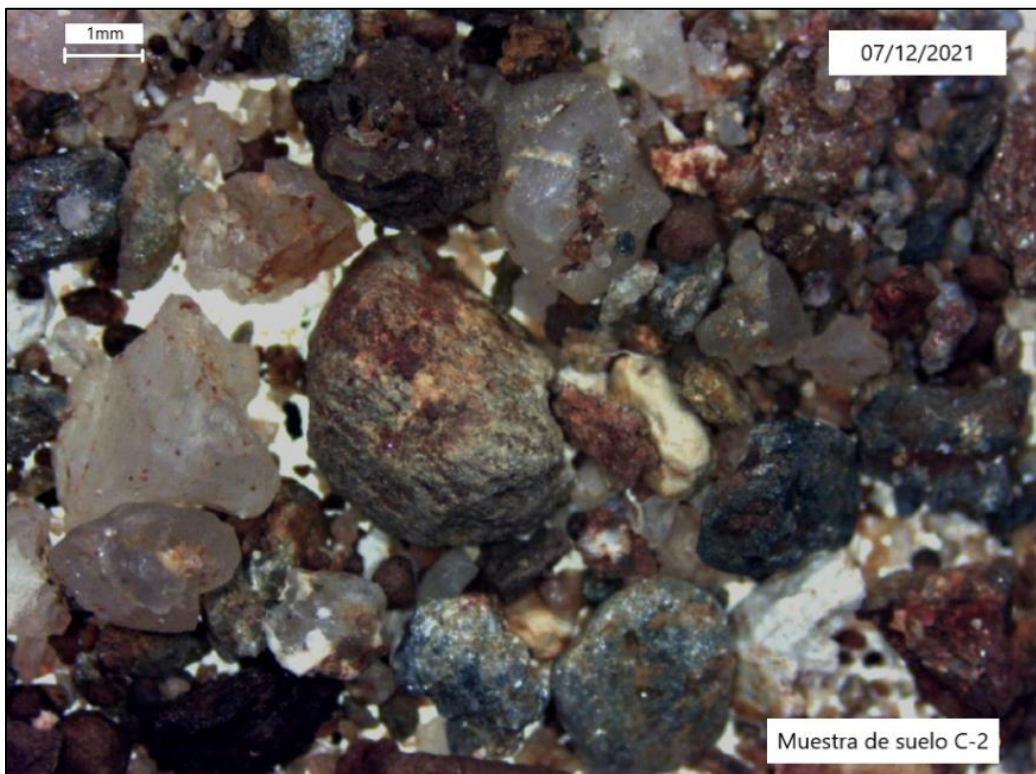


Figura 12.- Partículas tamaño arena de la muestra de suelo C-2

En el lugar de muestreo C-3 (Figura 13) ubicado a 43 m s.n.m. principalmente se aprecia el conglomerado basal clasto soportado característico de la Formación Andalién, presentando tonalidades grisáceas y marrones. Se encuentra formado en su mayoría por rocas metamórficas (filitas) y graníticas (granodiorita) de unos 14 cm promedio insertos en una matriz fina. Los clastos de granodiorita se encuentran en un estado meteorizado y disgregable, siendo los mayores afectados los minerales de feldespato presentes en la roca, en cambio, los clastos de filita se presentan en un estado firme y afectadas muy poco por la meteorización.



Figura 13.- Afloramiento de la Formación Andalién en el sector de muestreo C-2.

La muestra C-3 (Figura 14) presenta mayormente tonalidades grisáceas, amarillentas y rojizas. Sus clastos principalmente son subredondeadas y mal seleccionadas. Presentando mayoritariamente clastos filitas más bien poco meteorizados y firmes, Además a diferencia de las otras muestras se puede observar granitos no meteorizados y sus respectivos minerales como el cuarzo, biotita, hornblenda y feldespatos, siendo estos últimos los más afectados por agentes externos, a tal punto de encontrar minerales arcillosos bien formados de caolinita. En la muestra se encuentra recurrentemente ciertos vestigios de carbón, que su procedencia recae en un posible próximo contacto de la Formación Andalién con la Cosmito, donde según estudio previo y mapa geológico (Figura 2) que define cercano al sector el contacto litológico entre las dos unidades.



Figura 14.- Partículas tamaño arena de la muestra de suelo C-3.

Con el fin de entender mejor el contexto geológico y los regímenes del antiguo Río Andalién, para deducir cómo influye este en la estratificación y litología de la Formación Andalién se presenta la Figura 13, en la cual observa dos imágenes de afloramientos (A y B) tomadas en el lugar de muestreo C-3. En A se distinguen 3 estratos en donde la base de color marrón grisáceo está formada por lo descrito en C-3, suprayacente a este se identifican colores marrones rojizos con granos arenosos y arcillosos en su mayoría pertenecientes a la alteración de hematitas con algunos clastos de filitas y granitos, y grandes clastos de cuarzo como se aprecia en B, Finalmente estos estratos se intercalan con tonalidades marrones amarillentas que en general corresponden a minerales arcillosos. En sí la Figura 15 muestra un régimen turbulento del flujo del Río Andalién que fue el principal formador del conglomerado basal de la formación debido al gran tamaño de sus granos, sin embargo, a lo largo del tiempo como se muestra en A y B este régimen del río fue cambiando y mostrando una variabilidad clara en los estratos marrones rojizos y amarillentos, además de los tamaños de granos presentes en la unidad que son muy variables y heterogéneos a la vez.

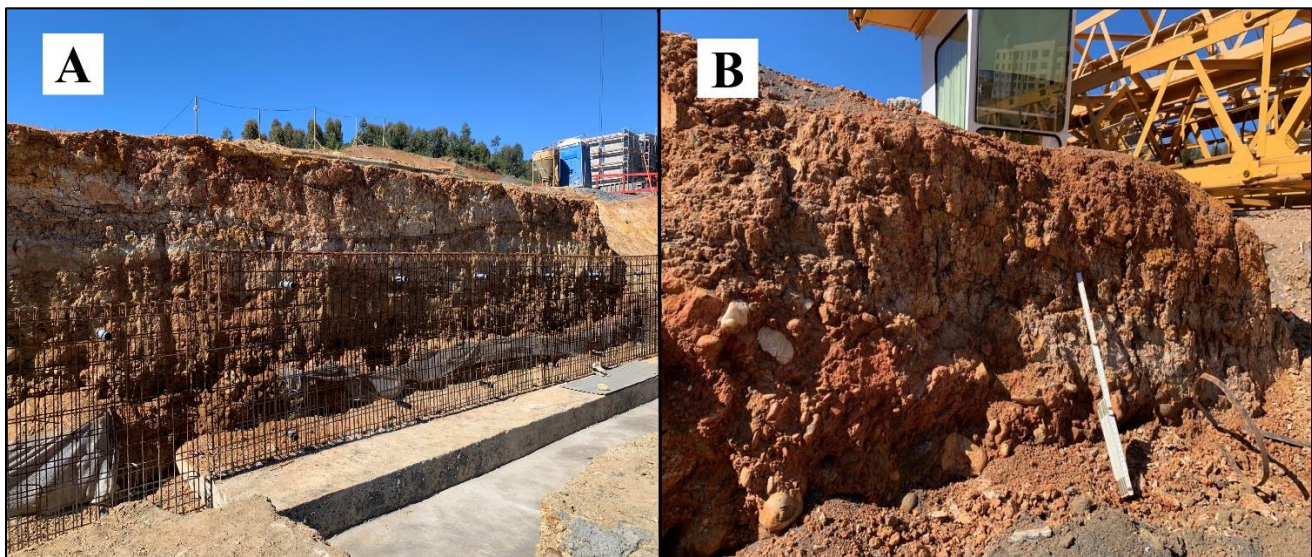


Figura 15.- Fotografías de afloramientos de la Formación Andalién en C-3 (Elaboración propia, 2022).

En la Figura 16 se encuentran muestras representativas de granitos y filita correspondiente a material encontrado en C-3. En la secuencia de las fotografías A-B-C se muestra claramente la acción que presenta el agua en el granito, donde en A una roca relativamente fresca se va meteorizando químicamente, afectando a los minerales de menor estabilidad como los feldespatos, que a través de procesos como la hidrólisis y reducción se generan minerales de arcilla como la caolinita. En B se observa una roca cada vez más decolorada e inestable producto de la meteorización, para que finalmente en C se convierta en una roca completamente diferente, compuesta totalmente de minerales arcillosos, este resultado de roca se observa en niveles centimétricos y clastos aislados en el afloramiento, pudiendo provocar planos de debilidad en el terreno. Por otro lado, en D se encuentra una filita de 14 cm correspondiente al clasto más abundante del conglomerado de la Formación Andalién, esta roca se encuentra fresca en los especímenes encontrados en la base de la formación y más meteorizados por oxidación en sus planos de debilidad en sectores con tonalidades pardo-rojizas.

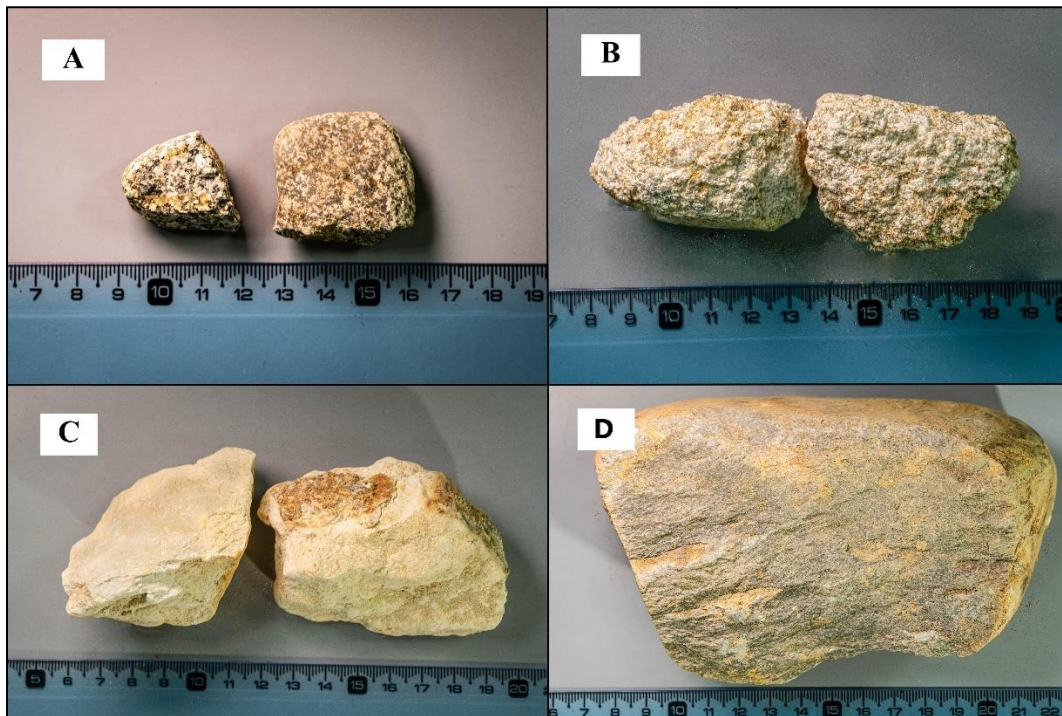


Figura 16.- Rocas representativas de lugar de muestreo C-3: A.- Granito fresco; B.- Granito decolorado; C.- Granito descompuesto; C.- Filita.

En resumen, la Formación Andalién corresponde a una secuencia de rocas sedimentarias clásticas, formada principalmente por conglomerados de matriz fina, cuyo origen se encuentra en la **Cordillera de la costa**. Los clastos fueron transportados por el antiguo río Andalién, que debido a la esfericidad de sus clastos se deduce una alternación entre regímenes del río con alta energía y periodos más cortos de baja energía. Cabe destacar la notoria argilización y oxidación que presentan los afloramientos, generando tonalidades rojizas-amarillentas en diferentes niveles de la formación.

4.2 Caracterización geotécnica

En base a las 88 calicatas y 1 sondaje disponible se procede a realizar un análisis de la Formación Andalién. De estos datos se obtienen valores claves para una clasificación del suelo y parámetros como su peso específico natural (Y_n), densidad máxima compactada seca (D.M.C.S), humedad óptima, humedad natural, gravedad específica de partículas sólidas (GS), ángulo de fricción interna (ϕ), cohesión (c) y resistencia a la compresión simple (q_u).

Los resultados de las granulometrías realizadas a las muestras C1, C2 y C3 se exponen en la Figura 17. En general se puede observar una buena graduación en las muestras, a excepción de C-1 que presenta una graduación más uniforme en cuanto a la distribución de sus granos. El material correspondiente a C-1 presenta granos de tamaño grava debido a la ubicación de extracción, ya que se infiere que en este lugar se presente el conglomerado basal de la formación como se mencionó anteriormente. Cabe destacar que el ensayo de hidrómetro entrega datos de alrededor del 30% de tamaño arcilla para C-1, 40% para C-2 y solo un 18% en C-3.

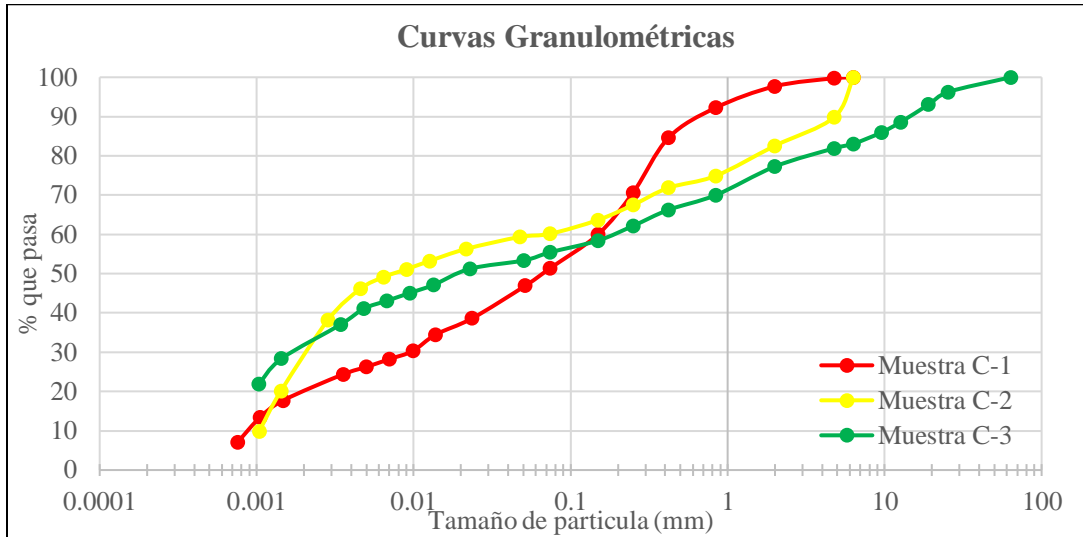


Figura 17.- Curvas granulométricas de ensayos realizados en laboratorio (Elaboración propia, 2022).

En la Figura 18 se muestra la Carta de plasticidad de Casagrande con los datos de los límites líquidos (LL) e índice de plasticidad (IP) correspondientes a 87 calicatas. De aquí se puede apreciar que la tendencia de los puntos a ubicarse es de forma paralela a la línea A y al lado izquierdo de la línea U, específicamente estos tienden a la zona marcada por un ovalo negro (Figura 18). Se determinó el promedio de los valores para el LL e IP que corresponde a 48.6% y 20.5%, también el grupo de datos presenta una desviación estándar de su LL e IP de 9.7% y 6.3%, lo que en base al promedio se asocia en general un suelo tipo arcilla limosa de mediana a alta plasticidad (CL), según el sistema de clasificación USCS. Además, en base a la Tabla 2 y variación de LL e IP se identifican zonas o capas con diferentes porcentajes de partículas de arcilla y limo correspondientes a ML, CH y MH, demostrando la clara presencia de suelos dominados por tamaños de granos más finos.

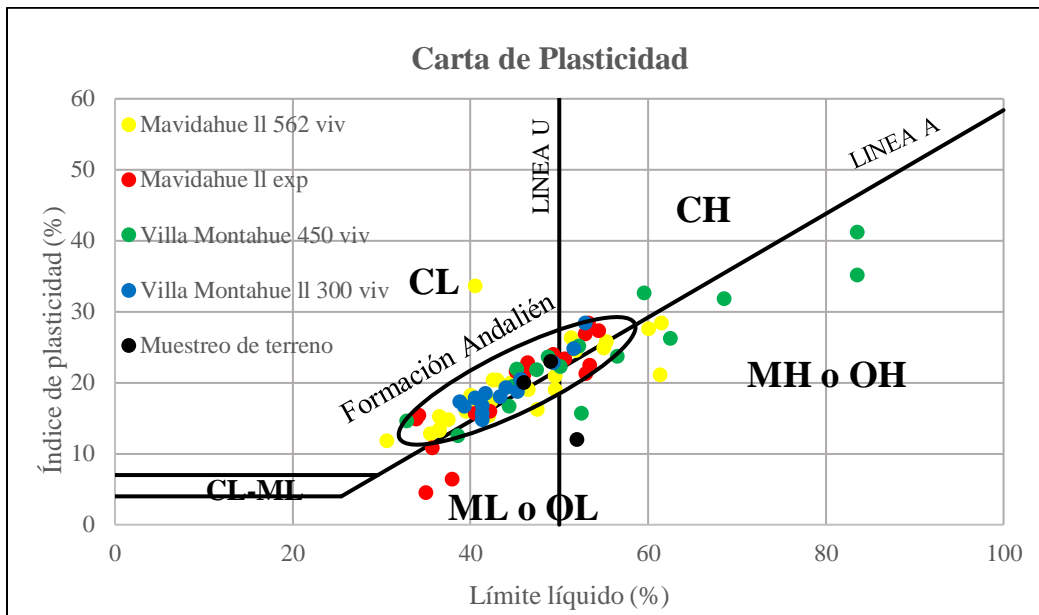


Figura 18.- Carta de plasticidad de Casagrande con 87 calicatas analizadas (Elaboración propia, 2022).

Se identifican 6 tipos de suelos (Tabla 2) en la zona de estudio en base a 76 ensayos granulométricos. De ellos se obtuvo un promedio de fracción fina bajo el tamiz N° 200 equivale al 64.4% de la muestra con una desviación estándar de 14.5%, siendo esta parte de suelo la más abundante en la Formación Andalién. Por otro lado, se identifica al tamaño de grano arena (#4-#200) ocupa la segunda mayoría después de las arcillas y limos, alcanzando un promedio de 31.7% y un máximo de 83.5% en muestras arenosas encontradas. Cabe destacar la presencia de 4 sectores donde se identificaron mayor cantidad de partículas tamaño grava, las cuales como se analizó en el apartado anterior corresponden a clastos que su mayoría son filitas y granitos.

Tabla 2.- Unidades encontradas en la formación Andalién (Elaboración propia a partir de antecedentes y ensayos).

Unidad	Muestras
GC	3
GM	1
SC	3
SM	1
CL	35
CH	11
ML	12
MH	12

Se analizaron 83 ensayos in-situ para la determinar la densidad del suelo. De ellos se obtienen valores que fluctúan alrededor de los 17.2 kN/m³ lo cual corresponde a un suelo relativamente liviano. Por otro lado, la densidad presenta una desviación estándar de 2 kN/m³ por ende, es necesario comprobar en próximos proyectos realizados en la zona y/o tomar una decisión adecuada de acuerdo con la necesidad de este. Adicional se determinó una D.M.C.S alrededor de 17kN/m³ con una humedad óptima de aproximadamente 18% este valor presenta una variación entorno al promedio de 0.9kN/m³.

Las partículas sólidas presentan una gravedad específica cercana a 2.61 de acuerdo con 83 ensayos efectuadas, donde este valor alcanzó un máximo de 2.97, mínimo de 2.49 y una desviación estándar de 0.09, No presenta grandes variaciones entre sus datos y estos se acercan a la media.

La humedad natural obtenida de 80 calicatas es cercano al 28%, excepto de 4 puntos atípicos que sobrepasan el 40% los cuales no presentan ningún patrón reconocible en el afloramiento estudiado. Cabe destacar que la mayoría de los datos corresponde al 25 de julio del 2008 con un 36.3% y la segunda mayoría a la fecha del 10 de octubre del 2015 con un 23.8%, En general estos meses son de diferentes climatologías, ya que julio corresponde a un mes invernal en la región y octubre un mes más estival.

Al analizar el sondaje S-1, se determina información valiosa en cuanto al espesor de la Formación Andalién en este sector. Se observa un espesor máximo de la capa de arcilla limosa con algunas intercalaciones de limos de unos 17.8 m de profundidad, siendo esta estratigrafía suprayacente a un estrato más duro de arenisca cementada

con lentes de carbón del cual se estima su relación directa con la Formación Cosmito. Cabe destacar que el sondaje fue realizado durante el mes de mayo en el año 2014 y a esa fecha no se detectó el nivel freático, al igual que las calicatas que fueron realizadas en los meses de octubre, septiembre y julio de los años 2008, 2011, 2012 y 2015. En conjunto al sondaje, se realiza un ensayo SPT del cual cabe destacar que N varía desde los 11 a 66 golpes en los 17 m de profundidad, indicando que el suelo presente va aumentando de una densidad media a dura con profundidad. Sin embargo, no se realizó mayor análisis al ensayo debido a la gran dispersión de datos que ocurre en suelos arcillosos y limosos, Debido a esto se basa el estudio mayormente en datos de ensayos en laboratorio.

En la Tabla 3 se exponen los valores de la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (Phi) que están asociados a 3 ensayos de corte directo realizados a muestras de suelo inalteradas en cajas de corte de sección cuadradas, sometidos a tensiones de 0.5, 1 y 2 kg/cm² y a una velocidad de 0.1 cm/min.

Tabla 3.- Valores del Phi y cohesión (Elaboración propia a partir de análisis de ensayos de corte directo).

Corte directo	1	2	3
Phi (ϕ)	25.2°	26.2°	19.8°
Cohesión (c)	27 kPa	36 kPa	23 kPa

Nota. Los ensayos analizados corresponden a 3 muestras de suelo clasificadas como CL.

Se aprecia en la Tabla 3 que Phi toma valores alrededor de 24° con un máximo y un mínimo de 26° y 20°, en cambio su cohesión promedio corresponde a 29 kPa con máximo y mínimo de 36 kPa y 23 kPa. Estos valores son típicos de arcillas blandas, los cuales si bien son solo 3 datos determinados, estos pueden ser comparables con futuros ensayos realizados en la Formación Andalién, con el fin de disminuir la incertidumbre en análisis de obras ingenieriles y generar una mejor planificación territorial.

Los ensayos de compresión no confinada se realizaron con una relación de esbeltez de 2 a 17 probetas constituidas con suelo perteneciente a Formación Andalién. Sus resultados arroja un valor promedio para la resistencia a compresión simple de 65.41kPa con una desviación estándar de 30.8 kPa definiendo así la consistencia de esta formación en niveles superficiales como media a blanda, sin olvidar que esta va a aumentar gradualmente en cuanto más profundo se encuentre el estrato.

En resumen, desde un punto de vista geotécnico, el suelo que conforma la Formación Andalién se puede unificar como: arcillas y limos arcillosos de tonalidades marrones rojizas y amarillentas que posee una humedad natural de 28% con un peso específico natural promedio de 17.2 kN/m³, una plasticidad media a alta, consistencia media y gravedad específica de sus partículas sólidas es de 2.61. Además, presenta una D.M.C.S promedio de 17 kPa con una humedad óptima de 18% y el valor promedio resistencia a la compresión es de 65.4 kPa. El suelo se clasifica en general como CL con algunas capas y sectores CH, ML y MH según el sistema USCS. En general presenta un ángulo de fricción interna cercano a 24° y una cohesión de 28 kPa. El espesor en el Sondaje S-1 alcanza los 17.84 m, y por otro lado, no se detecta el nivel freático en el sondaje ni en las calicatas realizadas hasta la fecha del 29 de octubre del 2021.

Se definieron parámetros orientativos para la Formación Andalién en base a la totalidad de datos geotécnicos adquiridos de ella, con esto se tiene una visión general de los materiales presentes. Se resumen esta serie de parámetros en la Tabla 4 con sus respectivas simbologías, donde se presentan los valores máximos y mínimos, así como su promedio y desviación estándar.

Tabla 4.- Parámetros referentes al afloramiento estudiado con sus respectivas medidas estadísticas (Elaboración propia a partir de análisis de antecedentes y ensayos de laboratorio).

Parámetro	Simbología	Medida	Mín.	Máx.	Desviación estándar	Media
Humedad natural	w	%	15.9	44.8	5.868	28.26
Límite líquido	LL	%	30.6	83.5	9.722	46.89
Límite plástico	LP	%	18.2	48.3	4.992	26.39
Índice de plasticidad	IP	%	4.5	41.2	6.302	20.49
Peso específico natural	γ_n	kN/m ³	13.6	22.2	1.960	17.20
Fracción de arena	#4 - #200	%	2.0	82.0	13.065	31.65
Fracción bajo Tamiz N° 200	#200	%	15.0	98.0	14.976	64.37
Ángulo de fricción interna	ϕ	°	19.8	26.2	3.443	23.73
Cohesión	c	kPa	23.0	36.0	6.658	28.67
Resistencia a la compresión simple	q_u	kPa	14.0	117.0	30.800	65.41
Humedad óptima	w_{opt}	%	11.3	30.4	3.438	18.08
Densidad máxima compactada seca	D.M.C.S.	kN/m ³	14.2	18.4	0.896	17.05
Gravedad específica G_s	G_s	-	2.49	2.97	0.088	2.61
Clasificación USCS	USCS	-	CL			

Nota. Los parámetros son netamente de carácter orientativo y consistentes con todos los suelos presentes en el afloramiento.

De acuerdo con los parámetros analizados de la tabla anterior, el suelo que conforma el afloramiento estudiado clasificado en general como **CL** se encuentra apto para la construcción y resiste cortes de suelo, lo que se encuentra reflejado en los conjuntos habitacionales construidos y proyectos que se están ejecutando actualmente. Sin embargo, medidas de prevención de deslizamientos y mejoramiento de suelos quedan a criterio del profesional a cargo de la construcción.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La Formación Andalién presenta una geología fiel a lo descrito por autores anteriores, y consiste en un claro conglomerado basal formado en su mayoría por clastos de filitas y granitos provenientes del Batolito Costero y Basamento Metamórfico. Se pudo apreciar el conglomerado basal en los distintos puntos de muestreo, y se encuentra depositado en forma relativamente horizontal, demostrando la heterogeneidad de los clastos que la conforman y una variabilidad notable en la vertical respecto a la intensidad de meteorización que la afecta, siendo los puntos más altos los más afectados por la acción química y física.

En el punto más alto de muestreo (C-1), se puede apreciar un conglomerado café amarillento matriz soportado, con sus clastos en un estado disgregable (muy meteorizado), generando que la unidad rocosa en este sector se comporte y resista como un suelo y no como roca. Por otro lado, se detectó en C-2 un conglomerado clasto soportado de color marrón rojizo que se encuentra oxidado por acción del agua principalmente en los planos de foliación de las filitas., , En este sector, la unidad se encuentra en un estado de transición entre roca y suelo (saproilito), manteniendo características resistentes del conglomerado fresco. Finalmente, en cuanto a la base de la formación (C-3) se presenta como un conglomerado grisáceo, clasto soportado, siendo los principales formadores filitas frescas y granitos muy meteorizados.

El subsuelo corresponde a una mezcla de secuencias de suelos transportados y residuales, siendo los más abundantes los suelos finos como arcillas y limos arcilloso, En general el 64% del material que forma el suelo corresponde a partículas finas, además, presentan una buena graduación y una plasticidad media a baja que varía según el lugar donde se encuentren. En promedio el afloramiento estudiado posee un ángulo de rozamiento de 24° dentro de un rango entre los 26° y 20° . Su cohesión promedio se encuentra alrededor de los 29 kPa alcanzando un mínimo de 23 kPa. Los parámetros orientativos entregan valores admisibles para construcción y corte de suelo, sin embargo, cabe destacar que la realización de ensayos de corte fue en base a probetas de suelo tipo CL, entregando valores referentes a esta clasificación, Debido a la heterogeneidad presente en el afloramiento, es recomendable realizar una caracterización local de los parámetros resistentes en áreas de estudio próximas.

Es de gran importancia que al momento de construcción se realicen estudios locales de la Formación Andalién, tanto en el ámbito geológico y geotécnico, tomando datos actuales del nivel freático el cual no fue detectado en este estudio. Se recomienda que, al momento del estudio de un talud, es importante realizar un modelo conceptual lo más cercano a la realidad, debido a la variabilidad del afloramiento en la vertical se puede presentar más de un tipo de estrato y diferentes tipos de meteorización que los afecta. Adicional, se recomienda la aplicación de ensayos geofísicos como MASW, con el fin de identificar estratos blandos de caolinita o sericita observados en la base del afloramiento, ya que estos afectan directamente a la resistencia del suelo, generando potenciales superficies de falla al momento de realizar un corte de terreno, siendo estos estratos los mas afectados por factores detonantes como las fuertes lluvias y sismos.

Debido a las lluvias torrenciales que afectan a la comuna de Penco, se recomienda una canalización de aguas lluvia en la totalidad de los cortes de suelo, aplicando cunetas y contra cunetas para desviar el agua a desagües definidos. Adicionalmente es óptimo la utilización de hidrosiembra, geosintéticos u hormigón proyectado en la pendiente, con el fin de evitar la formación de cárcavas por la acción del agua.

6. REFERENCIAS

AGUIRRE, L.; HERVÉ, F. & GODOY, E. 1972. Distribution of metamorphic facies in Chile. Krystalinikum, Vol. 9: 7-19. Praga.

BÖRGEL, R. 1983. Geografía de Chile, Tomo II, Geomorfología. Geografía de Chile, Ediciones Instituto Geográfico Militar, Santiago, 182 pp.

CARTES, N.I. 2004. Petrografía de ambiente de depositación de las metapelitas paleozoicas con huellas fósiles, entre Tomé y Lirquén, VIII Región del Biobío, Chile. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 115 pp. Concepción.

ERICES, J. 2018. Estratigrafía e icnología de los estratos de la Formación Quiriquina que aflora en el área costera de la provincia de Concepción, Región del Biobío, Chile: Evolución ecosedimentaria del sustrato. Universidad de Concepción. Concepción.

GALLI, C. 1967. Geología Urbana y suelo de fundación de Concepción y Talcahuano. Chile. Departamento de Geología y Mineralogía. Instituto Central de Química. Universidad de Concepción.

GARCÍA, Y. 2004. Aplicación de los métodos Círculos de Mohr y Programa ReActiva 2.4, en el análisis de stress en las estructuras mayores de la ciudad de Concepción, VIII Región del Biobío, Chile. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 119 pp. Concepción.

GATICA, H. 2011. Estudio hidrogeológico cuencas Bío bío e Itata. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas, Chile.

GEOLOGÍA DE CAMPO II. 2008. Geología del Sector Menque. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 283 pp. Concepción.

GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.I., FERRER, M., ORTUÑO, L., OTEO, C. (2002). Ingeniería geológica. Prentice Hall, Madrid.

GUIÑEZ, F. 2016. Estratificación y zonificación de los suelos de la comuna de Penco, mediante la aplicación de SIG. Departamento de ingeniería civil y ambiental. Universidad del Bío-bío, Chile.

HERVÉ, F. 1988. Late Paleozoic subduction and accretion in Southern Chile. Episodes N°3: 183-188.

INOSTROZA, A. 2018. Discusión estratigráfica de las formaciones Quiriquina, Pilpilco, Curanilahue, Cosmito y Cerro Alto de la provincia de Concepción y norte de la provincia de Arauco, Región del Biobío, Chile. Universidad de Concepción. Concepción.

NISHIMURA, T. 1971. On the geology of the Magellan geosyncline. Report of the Geological Survey of Hokkaido, Vol. 44: 45-53.

OLLIER, C. 1984. Weathering (2nd edition). Longman Group. Harlow, United Kingdom.

QUEZADA, J. 1996. Geología urbana y ambiental de la ciudad de Concepción. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 143 pp. Concepción.

VEYL, C. 1961. Contribución al conocimiento de la geología regional de la Provincia de Concepción. Minerales, N° 72: 51 pp. Santiago.

VIVALLOS, J.; RAMÍREZ, P. & FONSECA, A. 2010. Microzonificación sísmica de la ciudad de Concepción, Región del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental N° 12: 3 mapas en una hoja escala 1:20.000. Santiago.

WILLNER, A.P.; GERDES, A. & MASSONE, H.J. 2008. History of crustal growth and recycling at the Pacific convergent margin of South America at latitudes 29° - 36°S revealed by a U-Pb and Lu-Hf isotope study of detrital zircon from late Paleozoic accretionary systems. Chemical Geology, Vol. 253: 114-129.