UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAÍSO, CHILE

“CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL MAICILLO DE LA QUINTA REGIÓN”

CRISTÓBAL SEBASTIÁN CEA SEPÚLVEDA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PROFESOR GUÍA: MATÍAS SILVA

MARZO – 2022

AGRADECIMIENTOS

A mis gatitos
que estuvieron allí
para ronronearme
para amasarme.

A mi familia
que estuvieron allí
para apoyarme
para cuidarme.

A mis amigos
que estuvieron allí
para soportarme
para hacerme reír.

A mis maestros
que estuvieron allí
para enseñarme
o intentarlo.

A mi persona
que estuve siempre conmigo
perseverando
incluso cuando ya no se podía.

A todos y todo
que ayudaron de alguna forma
…
que estuvieron allí…

-Cristobal Cea Sepúlveda

Menciones especiales a mi profesor guía Matías Silva y a Jaime Musso, de LEMCO, sin ellos esta memoria no habría sido posible.

Resumen Ejecutivo

El documento presente tiene por objetivo el análisis de las características del maicillo de la V Región, lo cual permitirá generar una base de información y proponer ecuaciones y modelos que permitan describir, proyectar y predecir el comportamiento del maicillo y sus cualidades.

Para comenzar, se hace una revisión de la literatura, presentando qué es el maicillo, su proceso de formación y sus cualidades más importantes que lo diferencian de otros tipos de suelos.

También se presentan resultados obtenidos de otros estudios sobre el maicillo en Chile, permitiendo tener una idea de lo que es el maicillo en cuanto a caracterización.

El estudio involucra sólo maicillo de la Región de Valparaíso, principalmente del Área Metropolitana de Valparaíso, por lo que los resultados obtenidos no son aplicables a otras zonas del país ni localidades fuera del estudio.

El análisis contempla la recolección de datos de ensayos realizados in situ y en laboratorio, considerando principalmente ensayos de caracterización, además de sondajes de Cono Dinámico, SPT, Triaxial, Proctor Modificado, por nombrar algunos.

La información registrada en los distintos informes se estudia a nivel general, prestando énfasis a su distribución, buscando patrones en sus resultados y ecuaciones que puedan describir distintas propiedades, siempre pensando en la caracterización de un maicillo representante de la zona en estudio.

A pesar de la gran cantidad de muestras analizadas, la cantidad de información para algunos ensayos no fue suficiente, como es el caso del ensayo de Compresión Triaxial, donde la ausencia de la presión de poros imposibilito obtener más información desde los ensayos UU, así como la imposibilidad de comparar resultados de ensayos Triaxial con los de SPT por faltas de muestras en común.

Aún con los obstáculos mencionados, fue posible llegar a ecuaciones y valores, mediante los cuales se logra representar al 50% de las muestras, las cuales representan el maicillo más típico encontrado en la región en estudio: un suelo clasificado como SM, con fracción de gravas-arenas-finos de 10-70-20%, no plástico, no compresible, Gs de 2,73 [T/m^3], CBR en torno al 26%, ángulo de fricción de 40°, cohesión de 0,16 [kgf/cm^2] y un módulo de Young de sobre los 20 [MPa] dependiendo del confinamiento.

Observando estos resultados, algunos indican que el maicillo se puede tener el comportamiento desde arenas con finos poco denso hasta arena limpia sobre consolidada, indicando que en realidad el maicillo es mucho más que sólo arena mezclada con finos, por lo que muchos modelos y factores de los demás suelos granulares debiesen actualizarse y estudiarse en más profundidad para considerar modelaciones más precisas en torno al maicillo.

Abstract

The objective of the present document is to analyze the maicillo's characteristics of the V Region, which will allow to generate an information base and propose equations and models that allow describing, projecting and predicting the behavior of the maicillo and its qualities.

To begin, a review of the literature is made, presenting what maicillo is, its formation process and its most important qualities that differentiate it from other types of soils.

Results obtained from other studies on maicillo in Chile are also presented, allowing to have an idea of what maicillo is in terms of characterization.

The study involves only maicillo from the Valparaíso Region, mainly from the Valparaíso's Metropolitan Area, so the results obtained are not applicable to other areas of the country or locations outside the study.

The analysis contemplates the collection of data from tests carried out in situ and in the laboratory, mainly considering characterization tests, in addition to Dynamic Cone, SPT, Triaxial, Modified Proctor drillings, to name a few.

The information recorded in the different reports is studied at a general view, emphasizing its distribution, looking for patterns in its results and equations that can describe the different properties, always thinking about the characterization of a maicillo representative of the area under study.

Despite the large number of samples analyzed, the amount of information for some tests was not sufficient, as is the case of the Triaxial Compression test, where the absence of pore pressure made it impossible to obtain more information from the UU tests, as well as the impossibility of comparing Triaxial test results with those of SPT due to lack of samples in common.

Even with the obstacles mentioned, it was possible to arrive at equations and values, through which it is possible to represent 50% of the samples, which represent the most typical maicillo found in the region under study: a soil classified as SM, with a fraction gravel-sand-fines 10-70-20%, non-plastic, non-compressible, 2,73 [T/m^3] in Gs, CBR around 26%, 40° for friction angle, 0,16 [kgf/cm^2] for cohesion and a Young's modulus over 20 [MPa] depending on the confinement.

Observing these results, some indicate that the maicillo can have the behavior from sands with fines and low density to clean over consolidated sand, indicating that in reality the maicillo is more than just sand mixed with fines, so many models and factors of the other granular soils should be updated and studied in more depth to consider more precise modeling around the maicillo.

INDICE

AGRADECIMIENTOS 2
Resumen Ejecutivo 3
Abstract 4
1. INTROUCCIÓN 8
2. OBJETIVOS Y ALCANCES DEL ESTUDIO 9
1.1- Objetivos 9
1.2- Alcances 9
3. REVISIÓN DE ANTECEDENTES 10
3.1- MAICILLO EN CHILE 11
4. MAICILLO EN LA V REGION 15
4.1- Estratigrafía 18
4.2- Granulometría 20
4.3- Plasticidad 22
4.4- Clasificación 23
4.5- Densidad Natural y Gravedad Específica 25
4.6- Humedad Natural 26
4.7- Ensayo Proctor Modificado 27
4.8- Determinación CBR 29
4.9- Ensayo de Compresión Triaxial 34
4.10- Sondaje de Cono Dinámico 45
4.11- SPT 47
5. CONCLUSIONES DE ANÁLISIS 55
REFERENCIAS 59
Anexo 1.- Estratigrafía 61
Anexo 2.- Relación entre Densidad Natural y Gs 66
Anexo 3.- Relaciones derivadas del Proctor Modificado 69
Anexo 4.- CBR 72
Anexo 4.- Triaxial 81

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Izquierda, tonalita de biotita; a la derecha, grado de meteorización (V) en suelos del Km.100 [3]. 10
Figura 2: Esquema general de una ladera en suelo residual de granito [7]. 11
Figura 3: Bloques de suelo extraídos para ensayos de laboratorio. [15] 14
Figura 4: Maicillo granítico tamizado en laboratorio. [15] 14
Figura 5: Ubicación de las muestras de maicillo en la V Región. 16
Figura 6: Método de extracción de muestras. 18
Figura 7: Análisis estadístico de la composición de gravas, arenas y finos de las muestras de maicillo. 19
Figura 8: Curva Granulométrica de muestras de maicillo. 20
Figura 9: Bandas Granulométricas y valores estadísticos. 21
Figura 10: Granulometría (% que pasa) v/s Profundidad. 22
Figura 11:Plasticidad de las muestras de maicillo. 23
Figura 12: Carta de Plasticidad de los maicillos. Colores indican muestras distintas. 23
Figura 13: Clasificación U.S.C.S. 24
Figura 14: Clasificación AASHTO (HRB). 24
Figura 15: Densidad Natural - Diagrama de Caja y Bigote. 25
Figura 16: Gravedad Específica - Diagrama de Caja y Bigote. 26
Figura 17: Humedad Natural - Diagrama de Caja y Bigote 27
Figura 18: Proctor - Densidad Máxima Compactada, Diagrama de Caja y Bigote. 27
Figura 19: Proctor - Humedad Óptima, Diagrama de Caja y Bigote. 28
Figura 20: Relación entre las densidades máximas compactadas y la humedad óptima. 29
Figura 21: Diferencia entre humedad óptima medida y estimada. 29
Figura 22: CBR - Densidad seca antes de inmersión, Diagrama de Caja y Bigote. 30
Figura 23: CBR - Densidad seca después de inmersión, Diagrama de Caja y Bigote. 30
Figura 24: CBR - Humedad promedio en moldes de 56 golpes, antes y después de la compactación y después de inmersión en agua. 31
Figura 25: CBR - Razón de soporte a 0,2". 32
Figura 26: CBR - Razón de soporte, según los 0,2" superiores, a 95% del Proctor Modificado, Diag. de Caja y Bigote. 32
Figura 27: Triaxial - Probetas ensayadas por cada tipo de ensayo. 34
Figura 28: Triaxial CID – Compresión v/s Deformación. 35
Figura 29: Triaxial UU - Compresión v/s Deformación 36
Figura 30: Triaxial - Análisis de ensayos CID. 37
Figura 31: Triaxial - Análisis de ensayos UU. 37
Figura 32: Bandas de compresión vs deformación para Triaxial CID. 38
Figura 33: Bandas de compresión vs deformación para Triaxial UU. 38
Figura 34: Triaxial - Ángulo de Fricción y Cohesión, diagrama de Caja y Bigote. 39
Figura 35: Ángulo de fricción v/s Cohesión, datos de laboratorio. 40
Figura 36: Triaxial – Comparación del Ángulo de Fricción según el tipo de ensayo ejecutado. 40
Figura 37: Triaxial - Comparación del Ángulo de Fricción según el tipo de falla. 41
Figura 38: Triaxial - Comparación del valor de la cohesión según el tipo de falla. 41

Figura 39: Peaks de Trayectorias de Tensiones - Triaxial CID. 42
Figura 40: Comparación de resultados de Ángulo Phi, Triaxial CID. 43
Figura 41: Comparación de resultados de Cohesión C, Triaxial CID. 43
Figura 42: Ángulo de fricción v/s Cohesión, datos de Trayectoria de Tensiones. 43
Figura 43: Sondaje Cono Dinámico - Totalidad de sondajes 45
Figura 44: Sondaje Cono Dinámico - Ajuste logarítmico. 46
Figura 45: Sondaje Cono Dinámico - Sólo maicillo. 46
Figura 46: Sondaje Cono Dinámico - Ajuste logarítmico, sólo maicillo. 47
Figura 47: Sondaje SPT – Totalidad de Sondajes. 48
Figura 48: Sondaje SPT – Dispersión de los datos. 48
Figura 49: Sondaje SPT - Sólo maicillo. 49
Figura 50: Sondaje SPT – Dispersión de los datos, solo maicillo. 49
Figura 51: Elasticidad y ángulo de fricción para cada maicillo hallado en SPT. 50
Figura 52: N1(60) v/s Profundidad - Cuartiles metro a metro. 51
Figura 53: Elasticidad v/s Profundidad - Cuartiles metro a metro. 51
Figura 54: Ángulo de fricción v/s Profundidad – Cuartiles metro a metro. 52
Figura 55: Elasticidad y Ángulo de Fricción - Sólo maicillo, cuartiles metro a metro. 53

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estructuras encontradas en maicillos. 12
Tabla 2: Algunas características asociadas a los saprolitos graníticos [3]. 12
Tabla 3: Parámetros obtenidos para suelos de maicillo. 13
Tabla 4: Muestras de suelo por ciudad. 15
Tabla 5: Cantidad de ensayos realizados 16
Tabla 6: Cantidad y tipos de Triaxial ejecutados. 17
Tabla 7: Parámetros de ajuste logarítmico de curvas granulométricas. 21
Tabla 8: Valores típicos del ensayo de CBR. 33
Tabla 9: E50, en MPa para s3=0,5 y 1 [kgf/cm2] 37
Tabla 10: E50, en MPa para s3=2 [kgf/cm2]. 37
Tabla 11: Rango de valores del Ángulo de fricción y Cohesión, según informes de ensayos Triaxial. 39
Tabla 12: Valores de Phi y C obtenidos mediante un análisis de Trayectoria de Tensiones para Triaxial CID. 42
Tabla 13: Valores parámetros de ajustes de correlación para Phi y C según Triaxial CID. 44
Tabla 14: Comparación de resultados entre Triaxial y SPT. 53
Tabla 15: Resumen de propiedades del maicillo de la V Región. 55

1. INTROUCCIÓN

Chile es uno de los países de América Latina que ha gozado de mayor crecimiento económico durante las últimas décadas [1], lo que se ve reflejado en una mayor cantidad de proyectos de construcción, ya sea de infraestructura pública o conjuntos habitacionales, por dar un par de ejemplos [2].

Ante esto, uno de los materiales más utilizados en este tipo de proyectos es el maicillo, el cual es conocido por su abundancia, facilidad de obtención y buenas propiedades desde un punto de vista ingenieril, siendo usado principalmente como material de relleno.

El problema con el maicillo es que es un suelo de tipo residual, lo que en palabras simples es un intermedio entre roca fracturada y suelo granular, por lo que su comportamiento y propiedades geotécnicas no son fáciles de establecer debido a que dependen de la roca que lo origina y de su nivel de meteorización, por lo que la palabra "maicillo" en realidad engloba una gran cantidad de tipos de suelos muy variables entre sí, aunque posean ciertas características en común.

Es por esto que, en la literatura, existen pocos estudios (algunos de los cuales son referenciados en el numeral 3) o bases de datos sobre el maicillo y su caracterización, debido a la complejidad que significa encasillar al maicillo dentro de propiedades geotécnicas específicas.

El presente estudio tiene por finalidad aportar una caracterización del maicillo y así contar con un perfil conciso de las propiedades de este material, cuya validez corresponde a la Región de Valparaíso en Chile.

2. OBJETIVOS Y ALCANCES DEL ESTUDIO

1.1- Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo de titulación es caracterizar geotécnicamente los suelos tipo maicillo presentes en la V región, es decir, hallar valores típicos que permitan describir las propiedades del maicillo en la zona en estudio.

Como objetivo secundario está la creación de ecuaciones que permitan correlacionar distintos parámetros geotécnicos del maicillo entre sí, y así poder predecir resultados de ensayos según una caracterización previa de la muestra.

1.2- Alcances

Los resultados y estudios del presente informe corresponden a informes de mecánica de suelos y datos de laboratorios de la V región de Valparaíso. Solo se consideró bases de datos del Laboratorio de Ensaye de Materiales, LEMCO, la cual incluye ensayos en terreno y laboratorio, sin la realización de ensayos propios o exclusivos para la redacción de esta memoria.

Dentro de los ensayos recopilados no se cuenta con mediciones geofísicas.

Los resultados presentados más adelante tienen carácter de guía para los fines necesarios, pero no son predictivos en cuanto a las propiedades y comportamientos de suelos nuevos a estudiar, y de ninguna forma reemplazan el quehacer de un laboratorio ni la realización de ensayos de caracterización: es decir, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la institución.

3. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

La palabra maicillo se utiliza en Chile para denominar a un suelo residual tipo arena gruesa (arcillosa en superficie y limosa en profundidad), generalmente de colores claros [3], la cual puede estar disgregada o en cúmulos. El maicillo es el producto de la meteorización (descomposición física y/o química) de rocas graníticas del batolito costero [4], y se encuentra en torno a la cordillera de la costa, siendo uno de los suelos más comunes y abundantes en Chile, principalmente desde la IV-V región hacia el sur. Presenta gran cohesión y puede considerarse en general como un suelo de fundación seguro [3].

En la Figura 1 se puede apreciar una muestra de maicillo, según el trabajo de Toro, 2007 [3]. Corresponde a una tonalita de biotita, holocristalina inequigranular, panidiomórfica fanerítica, perteneciente al afloramiento de la Unidad Peñuelas. La roca meteorizada se observa rica en biotitas, con algunas transformándose a muscovita, siendo disgregable con la mano. En este ejemplo, se puede evidenciar distintas apariencias para un maicillo con el mismo grado de meteorización.

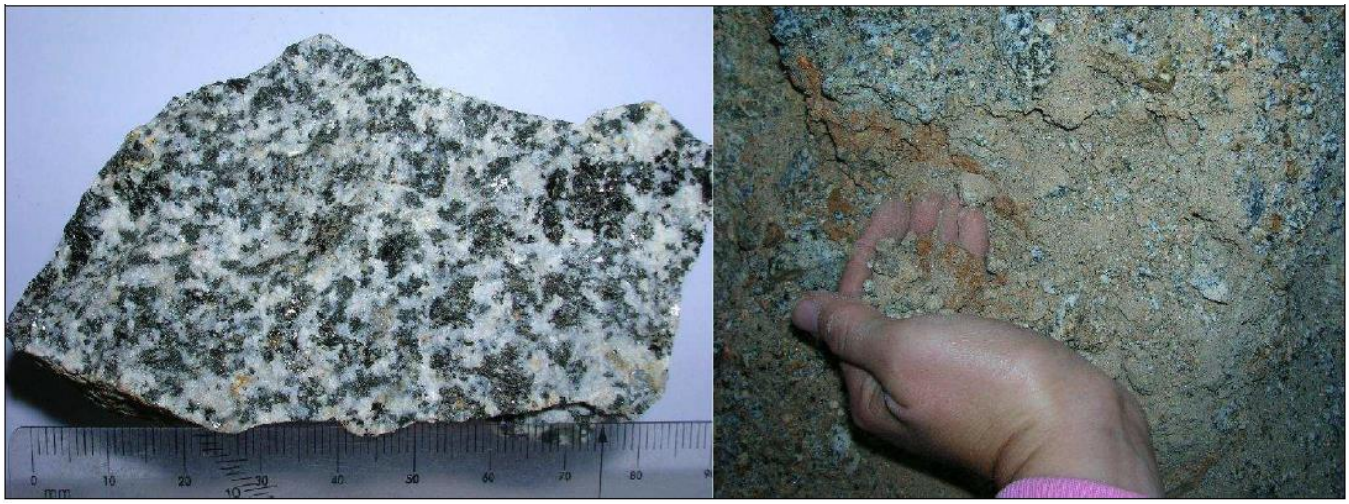


Figura 1: Izquierda, tonalita de biotita; a la derecha, grado de meteorización (V) en suelos del Km.100 [3].

Un batolito es un conjunto de granitoides (1 o más) que abarca una gran superficie (>100 km^2) [5], formando una gran masa de roca intrusiva, de edades paleozoicas y mesozoicas, formadas en paralelo a la zona de subducción.

Los suelos se originan por procesos de alteración y disgregación de las rocas sedimentarias, ígneas o metamórficas dados por procesos geológicos externos y fenómenos climáticos. El resultado es un perfil compuesto por materiales muy heterogéneos que van desde la roca sana pasando por rocas meteorizadas o “Saprolitos”, hasta el "suelo" o material completamente meteorizado [6] y a coluviones, como se puede apreciar en la Figura 2 [7]. Se habla de suelos residuales cuando el producto de la descomposición de la roca permanece en el lugar de origen, cuyo aspecto varía entre arena gruesa limosa o arcillosa y roca descompuesta de origen principalmente cuarzosa.

Como características de los suelos residuales pueden mencionarse las siguientes [7]:

1. No pueden considerarse aislados del perfil de meteorización, sino como parte de un todo que funciona en conjunto, ya que son solamente una parte componente. Para definir su comportamiento y la posibilidad de ocurrencia de deslizamientos, pueden ser más importantes las características del perfil completo que las propiedades del material o estrato en sí.

2. Son generalmente muy heterogéneos (por su tamaño de partículas variable, distribución de "clusters", grado de meteorización), por lo que son difíciles de muestrear y ensayar.

3. Es común encontrar suelos residuales en zonas de climas templados, húmedos y tropicales, donde el proceso de meteorización tanto físico como químico permite el desarrollo de este tipo de suelos. De esta forma, es común que se encuentren en estado húmedo no saturado, lo cual representa una dificultad para evaluar algunas de sus propiedades, como su resistencia al corte.

4. Por lo general, el suelo posee zonas de gran permeabilidad, lo que permite la ocurrencia de cambios rápidos de humedad y saturación.

5. La idea tradicional de grano de suelo o tamaño de partícula no es aplicable a muchos suelos residuales, esto debido a que las partículas de suelo residual generalmente consisten en agregados ("clusters") o cristales de mineral meteorizado que se rompen o disgregan y se vuelven progresivamente más finos si el suelo es manipulado. [8]

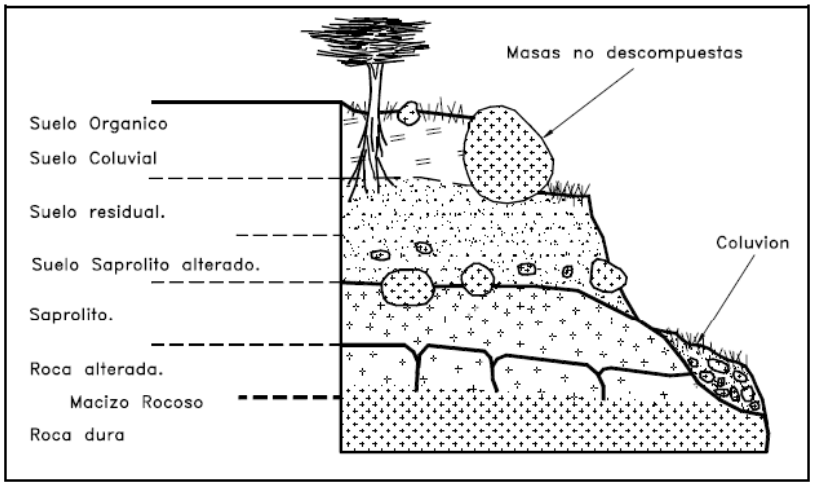


Figura 2: Esquema general de una ladera en suelo residual de granito [7].

3.1- MAICILLO EN CHILE

El término maicillo es muy utilizado en Chile, pero corresponde en rigor a un Arenosols. Según la clasificación de la FAO (2006), Arenosols comprende a los suelos arenosos, incluyendo también los suelos desarrollados en arenas residuales después de la meteorización in situ de sedimentos ricos en cuarzo o roca, y suelos desarrollados en depósitos de arenas desarrolladas recientemente como las dunas y playas [3].

Al maicillo se le conoce también con el nombre de saprolito granítico, y al proceso de generación de arenas desde los cuerpos graníticos como arenización. El término de saprolito granítico, proviene de la mecánica de suelos donde se denomina saprolito, o regolito, al macizo rocoso meteorizado que conserva aún la estructura rocosa, aunque la composición de la roca matriz se haya alterado y tenga menor resistencia que la roca sana, pudiendo presentar las discontinuidades originales del macizo u otros planos de debilidad por alteración preferencial [3].

En la Tabla 1 se resumen algunas estructuras del macizo rocoso que se encuentran potencialmente en el maicillo [3].

Tabla 1: Estructuras encontradas en maicillos.

Estructura	**Observaciones**
Diaclasas o juntas	Tienden a estar más abiertas en superficie que en profundidad, actuando como canales de agua, lo que potencia la meteorización al transportar y generar partículas finas. Con varias familias de diaclasas se puede formar bloques deslizantes
Foliaciones	Foliaciones, lineaciones, etc. Son producto de la orientación de los cristales dada las fuerzas compresivas. Son superficies de baja cohesión, y similar a las diaclasas, pueden inducir el desmoronamiento de los suelos.
Fallas	Son zonas de debilidad de hasta varios cientos de metros. Pueden estar rellenos de arcillas o material completamente meteorizados, formando superficies débiles y peligrosas, generando problemas de estabilidad de taludes, por ejemplo.
Intrusiones	La intrusión de materiales más permeables puede generar problemas de deslizamientos.

El maicillo es un material ampliamente utilizado en obras civiles como material de relleno (fundaciones de edificaciones, rellenos para pavimentos viales, etc.) debido a la facilidad de su obtención, trabajabilidad y propiedades de resistencia: buena capacidad de soporte, y no son susceptibles a los cambios de humedad ni a la acción de las heladas, aunque requieren un buen confinamiento, al igual que todos los materiales granulares convencionales [9]. Algunas de las propiedades de los saprolitos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Algunas características asociadas a los saprolitos graníticos [3].

Características	**Observaciones**
Minerales	Se encuentran: cuarzo, feldespato, piroxeno, hornblenda, olivino y mica. En los informes estudiadas, se mencionan los dos primeros.
Densidad seca [Tn/m^3]	2,54-2,69 (roca fresca)
	1,94-2,65 (roca meteorizada)
	1,33-2,25 (saprolito granítico)

En el sistema U.S.C.S. (Unified Soil Classification System por sus siglas en inglés) el maicillo clasifica como una arena limosa, SM, sin plasticidad [10], aunque esto varía según el grado de meteorización de la muestra, así como del horizonte en que se encuentre [4]. En general presenta una composición compleja que imposibilita establecer si su comportamiento se asemeja más a una roca meteorizada, a un material granular tipo arena o a un material de transición. Además, debido a que proviene de rocas ígneas intrusivas, altas en cuarzo [4] (e.g. el granito), y a su formación en perfiles profundos, se encuentra junto a un contenido de fino que puede ser de importancia.

La Tabla 3 resume algunas de las propiedades índice del maicillo encontradas en la literatura, cuyas mediciones de dichas propiedades índice ([11], [12] y [13]) corresponden a maicillos encontrados tanto en Valparaíso como en las cercanías de Concepción, donde se puede apreciar la variabilidad de los resultados obtenidos.

Tabla 3: Parámetros obtenidos para suelos de maicillo.

Parámetro	**Finos [%]**	**Humedad [%]**	**IP [-]**	**D.N.S. [Tn/m³]**	**Gs [-]**	**Phi [°]**	**C [Tn/m2]**	**γ [Tn/m3]**
Max	48	54	23	2,8	2,84	40	2,5	2,2
Min	0,664	0,92	3	2,7	2,51	35	2	2

Otros autores [13] indican que puede alcanzar ángulos de fricción interna de 45 a 60°, y hasta 75° para maicillos más gruesos (roca fracturada). Esta gran aleatoriedad en las propiedades implica que un mismo material puede presentar una alta variabilidad a corta distancia, incluso dentro de formaciones geológicas uniformes. Otros datos provenientes de 24 muestras de suelo residual granítico del batolito costero del sur de Chile muestran que los ángulos de fricción efectivos varían entre 23,5° y 38,5°, con una cohesión efectiva entre 4 y 24 [Tn/m2] [14], valores que, si se comparan con la Tabla 3, indican las grandes discrepancias que pueden presentar distintas muestras de maicillo en cuanto a las mediciones de sus propiedades.

En la Figura 3 y Figura 4 se puede apreciar otras muestras de maicillo, donde se observa mediante la inspección en terreno, que el material que conforma el talud se trata de una roca intrusiva altamente meteorizada. Su aspecto corresponde a un suelo de grano grueso con bloques o estructuras de roca original, los que presentan discontinuidades (fallas o diaclasas) que pueden provocar serios problemas en la estabilidad del terreno cuando es sometido a solicitaciones [15].

Estas razones exponen la variabilidad de las propiedades del maicillo, y sumado a la limitada información bibliográfica, surge la necesidad de estudiar el maicillo más a fondo, entender su comportamiento y buscar tendencias en los resultados de los ensayos que se suelen aplicar a este material, lo que justamente es parte de la presente memoria.

Figura 3: Bloques de suelo extraídos para ensayos de laboratorio. [15]

Figura 4: Maicillo granítico tamizado en laboratorio. [15]

4. MAICILLO EN LA V REGION

Los resultados que se presentan en la presente memoria fueron obtenidos a través de los ensayos realizados por LEMCO (Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obra), perteneciente al Departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María. Al momento de la recopilación de información, se tuvo acceso a data desde 1970 (aproximadamente) hasta el año 2018 (por razones de fuerza mayor, solo se consideró información hasta 2008). Considerando la calidad de la información presente se utilizó solo la información desde el año 2000, obteniendo una muestra proveniente de 157 informes geotécnicos.

La información recopilada incluyó descripción de las muestras, resultados de ensayos de laboratorio, así como la ubicación geográfica del lugar de obtención de la muestra. No se incluye datos directos relacionados al cliente o a la obra en ejecución, ya que esta información es de carácter confidencial en la relación empresa-cliente que entrega LEMCO para con sus asociados.

Los puntos de análisis se encuentran en su totalidad en la Región de Valparaíso, mayoritariamente de las comunas de Concón, Quilpué, Valparaíso, Villa Alemana y Viña del Mar. Una muestra es de interés para el análisis si presenta maicillo de forma predominante y es natural del lugar de la obra.

En la Tabla 4 se puede ver la cantidad de muestras asociada a cada ciudad, y el tipo de ellas, y en la Figura 5 la ubicación geográfica de las muestras.

Tabla 4: Muestras de suelo por ciudad.

Ciudad	**n° de muestras**	**Tipo de muestra**		
		Natural	**Relleno**	**s/i**
Algarrobo	2	2	0	0
Casablanca	2	2	0	0
Concón	10	10	0	0
Hijuelas	2	2	0	0
La Ligua	1	1	0	0
Peñablanca	1	1	0	0
Puchuncaví	1	1	0	0
Quillota	1	1	0	0
Quilpué	18	18	0	0
Quintero	3	3	0	0
San Antonio	1	1	0	0
Valparaíso	128	127	0	1
Villa Alemana	4	4	0	0
Viña del Mar	143	143	0	0
Zapallar	1	1	0	0
Total:	318	317	0	1

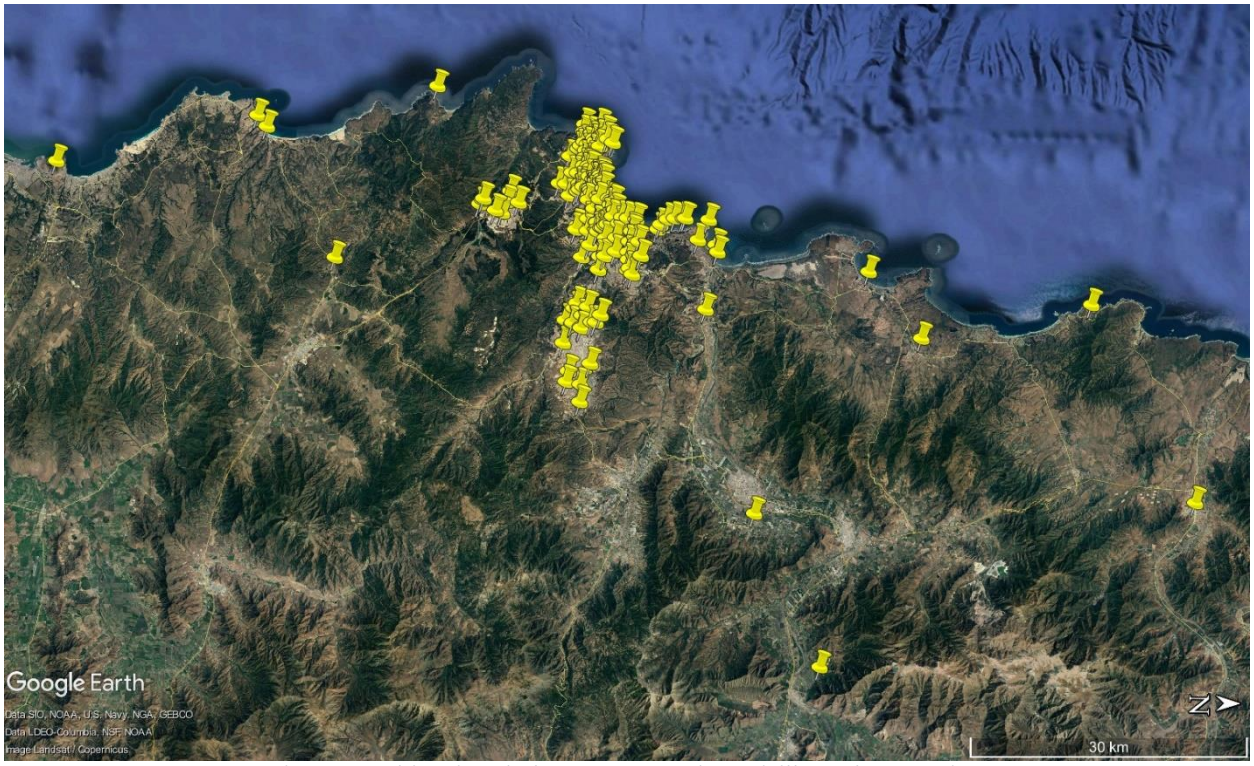


Figura 5: Ubicación de las muestras de maicillo en la V Región.

La base de datos analizada consideró registros estratigráficos, y ensayos de infiltración en terreno, como trabajo en laboratorio; granulometría, análisis de plasticidad, clasificación, densidad, humedad, Proctor, C.B.R, triaxial, sondajes SPT y Cono Dinámico. Los ensayos o información que se tendrán en cuenta al momento de los análisis, dada su cantidad, se presentan en la Tabla 5, junto con el porcentaje respecto al total de muestras. En la Tabla 6 se presenta el tipo de ensayo Triaxial ejecutado y la cantidad de muestras involucradas en dichos ensayos. No se cuenta con información de ensayos de permeabilidad.

Tabla 5: Cantidad de ensayos realizados

Ensayos	**N° de muestras sobre el total**	**Porcentaje [%] sobre el total de muestras**
Estratigrafía	256	80,5
Granulometría	229	72,0
Plasticidad	250	78,6
Clasificación	289	90,9
Densidades	78	24,5
Gs	88	27,7
Humedad Natural	142	44,7
Proctor	92	28,9
CBR	57	17,9
Triaxial	49	15,4
Cono Dinámico	31	9,7
SPT	78	24,5
Total de muestras	318	--

Tabla 6: Cantidad y tipos de Triaxial ejecutados.

Tipos de Triaxial	**N° Ensayos**
CID Total	32
CIU Total	1
UU Total	16

Casi la totalidad de los informes presentan una descripción estratigráfica del lugar estudiado, ya sea a través de calicatas o sondajes (SPT), por lo que es posible comparar diferentes informes y obtener conclusiones de dicha información. De las descripciones estratigráficas se extrajo la siguiente información relevante:

- Nombre.
- Profundidad de la muestra.
- Porcentaje de grava-arena-finos.
- Color de la muestra, Graduación granulométrica, Presencia de pedruscos.
- Dilatancia de los finos, plasticidad de la muestra.
- Olor.
- Grado de cementación.
- Salinidad.
- Compacidad.
- Resistencia seca y húmeda.
- Resistencia al impacto.
- Geometría de los granos.
- Origen de muestras.
- Humedad natural.
- Estructura.
- Trabajabilidad.
- Textura.
- Grado de organicidad.
- Clasificación (U.S.C.S, SENDOS, MINVU).

Una vez clasificada la información relacionada al maicillo según los distintos ensayos, se procede a realizar un análisis estadístico de los valores asociados y características de cada muestra, dando como resultado una serie de gráficos, los que se expondrán y explicarán a continuación.

Con un total de 318 muestras de maicillo, repartidas en 157 informes geotécnicos, donde la gran mayoría se encuentran ubicados en la denominada Área Metropolitana de Valparaíso, lo cual involucra proyectos de envergadura suficiente para presentar una cantidad considerable de ensayos, suficientes para un análisis contundente. En cuanto al origen de las muestras, en el Figura 6 se puede ver que la mayoría son obtenidas mediante calicatas.

En los apartados siguientes se muestran resultados directos del ordenamiento y clasificación de la información obtenida desde los informes y ensayos ejecutados, además del análisis correspondiente a cada ensayo.

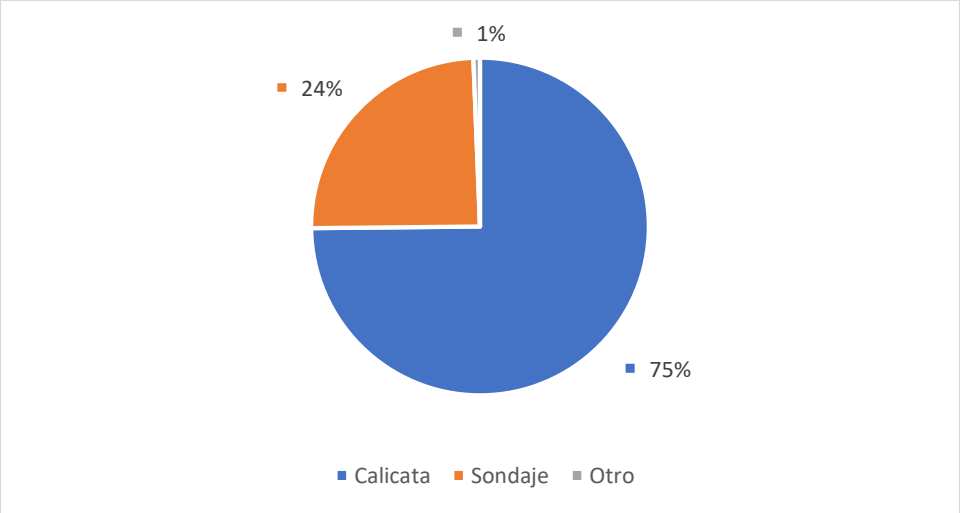


Figura 6: Método de extracción de muestras.

4.1- Estratigrafía

La información recopilada de la descripción estratigráfica, tanto de calicata como sondajes, representada como gráficos, se encuentra disponible en el Anexo 1.- Estratigrafía.

Del total de muestras, solo 256 muestras (80,5%) cuentan con algún tipo de descripción estratigráfica. Se puede apreciar que la mayoría de las muestras tienen una profundidad que no superan los 5 [m] de profundidad, mientras que hay casos de muestras que se encuentran entre los 20 y 25 [m] de profundidad. Esto se debe al modo de recolección de las muestras, donde las más profundas corresponden a sondajes SPT, los que a su vez son más escasos que las muestras de calicata, donde no se puede lograr tanta profundidad de exploración.

Del total de muestras, 232 tienen información de inicio y fin del estrato, dejando fuera de análisis algunos maicillos que presentaban solo un valor como información de profundidad.

En cuanto a las fracciones que componen el maicillo, la mayoría de las muestras poseen una fracción de arena mucho mayor que de grava o partículas finas, aunque existen ciertos casos que contradicen el nombre de maicillo dado inicialmente, los cuales tienen una mayor cantidad de gravas o finos, lo que se ve reflejado posteriormente en la clasificación de la muestra.

A pesar de la gran variabilidad aparente de las fracciones aportantes a las composiciones de los maicillos recolectados, la mayoría de los casos se concentran en una pequeña banda, tal como se ve en la Figura 7, para 171 muestras de las 318 disponibles. Si se considera como datos representantes al 50% central de la muestra (es decir, los cuartiles 2 y 3, representados entre las líneas Q1 y Q3), se tiene que la fracción de grava suele ser entre 5 y 15%, la de arena entre 65 y 80%, y la de las partículas finas entre 10 y 25%.

En general es común encontrar muestras con colores opacos, es decir, más cercanos a los grises, con pocos casos del tipo gris puro o similar. De las muestras con color, son pocas las que tienen una pigmentación más brillante que el resto, y en general el color predominante es el amarillo o café claro, con algunas pocas que tienden a ser más naranjas, rojizas o verdosas. Existen 233 anotaciones de color observado.

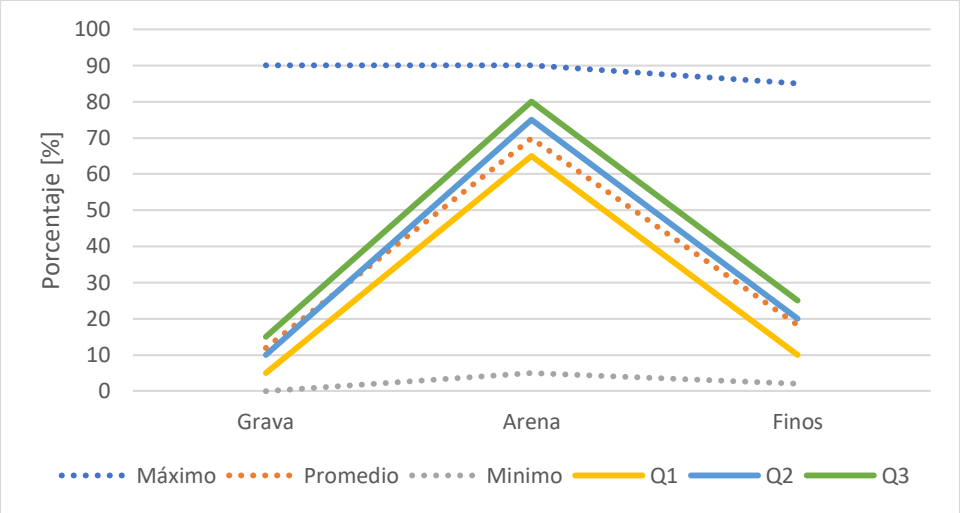


Figura 7: Análisis estadístico de la composición de gravas, arenas y finos de las muestras de maicillo.

De la graduación se puede ver que la mayoría de las muestras son descritas con una mala graduación. Se cuenta con información de 102 muestras de las 318 disponibles.

En general, se puede decir que la mayoría de los casos tienen nada o poca presencia de pedruscos (72), y una menor parte (65) tienen mucho o "mediana" presencia de guijarros o partículas de sobretamaño.

El comportamiento de los finos, en cuanto a la dilatancia y plasticidad, muestran que las partículas finas tienen un comportamiento poco plástico en general: 75% de las muestras presentan una dilatancia rápida o superior, mientras que un 90% indican una plasticidad intermedia o menor. Esto quiere decir que las partículas finas de los maicillos en general tienen poca influencia en el comportamiento del suelo, a diferencia de, por ejemplo, un suelo con alto contenido de arcilla.

De la compacidad observada en las muestras, un 74% son calificadas como semi firme o superior, lo que significa que en general, el maicillo de forma natural tiende a ser un suelo bastante firme.

En cuanto a la resistencia seca de las muestras, un 73% presentan resistencia baja o nula, lo cual indica un bajo valor de cohesión de las partículas, esto relacionado a la poca presencia y plasticidad de los finos. Similarmente, en la resistencia húmeda se limita a indicar "facilidad de disgregación".

Los registros de la geometría de los granos indican que un 86% de ellas tienen granos del tipo angular o anguloso, característica que contribuye a la firmeza del suelo.

Respecto a la resistencia al impacto, un 91% de las muestras son calificadas con una resistencia baja (también aparecen calificativos como quebradizo o disgregable).

La información dada en cuanto al origen de los maicillos está en general separada en dos tipos: el primero indica que maicillo encontrado es producto de la meteorización in situ y no proveniente de otro lugar; y en segundo lugar la mayoría del maicillo es de origen cuarzo-feldespato y granítico.

En cuanto a la humedad natural de las muestras, el 77% de ellas tienen característica de "húmeda" o "muy húmeda", mientras que 19% de ellas son "poco húmedas" o "secas".

En características propias de los estratos, la mayoría de las muestras de maicillo provienen de estratos homogéneos (69,5%), y en cuanto a la trabajabilidad de las muestras o sus estratos, la mayoría es calificada como "estable" (77,8%).

La información relacionada a la textura de los maicillos extraídos, indica que la mayoría es calificada como granular, aludiendo al tamaño de grano; luego hay más muestras de tipo jabonosas que pegajosas; y finalmente hay más muestras calificadas como ásperas que suaves. En total, se tiene sólo 84 datos de textura a lo largo de la estratigrafía recolectada, con muestras con una o más cualidades asignadas no excluyentes entre sí.

De la organicidad de las muestras, la mayoría de ellas no presenta material orgánico (77,7%).

De la clasificación U.S.C.S., con 137 datos en total, se tiene que el 93% de las muestras son clasificadas como arena "S" en primer lugar, un 57,7% tienen la clasificación "SM" (arena limosa) de manera principal o secundaria, mientras que un 26% de muestras tienen clasificación "SC" (arena arcillosa), tal como se indicaba en la sección 3.

4.2- Granulometría

De las 318 muestras de maicillo, 229 (72%) fueron tamizadas para obtener su curva granulométrica, lo que se muestra en la Figura 8, donde se aprecia además en líneas rojas los límites de arena y finos. Como se puede ver en este gráfico, existe una gran variabilidad de curvas granulométricas, donde cada color indica una muestra de maicillo distinto.

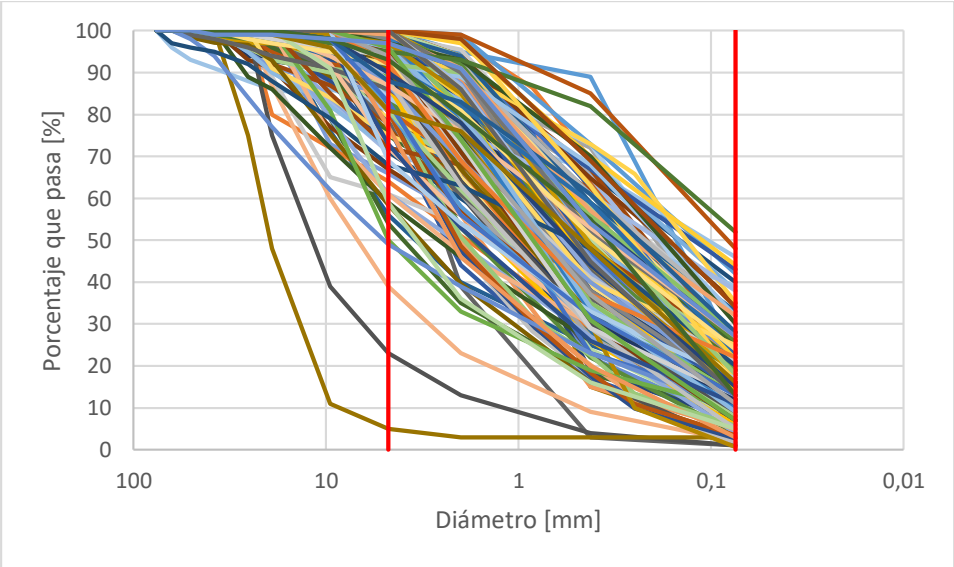


Figura 8: Curva Granulométrica de muestras de maicillo.

Para tener una mejor comprensión de la granulometría, se elaboran bandas granulométricas que ayuden a entender la distribución de las curvas, como se ve en la Figura 9, donde se tiene en primer lugar las curvas con valores máximos, promedio y mínimo (líneas punteadas, en

color verde, azul y naranja). En segundo lugar, se tiene el valor de los cuartiles, los que separan los datos en cuatro partes iguales: la línea Q1, de color gris, muestra el 25% menor de los datos; Q2, de color amarillo, muestra la mitad de los datos (como se puede ver, cercana al promedio, pero no igual); y la línea Q3, de color celeste, muestra el límite entre el tercer y cuarto cuartil de los datos. La información de los cuartiles es importante ya que permite mostrar la distribución del tamaño de grano considerando todas las curvas granulométricas y no solo valores extremos: de la Figura 9 resalta la concentración del 50% central de datos que se muestra, así como la "lejanía" de las curvas de máximo y mínimo respecto a dicho centro.

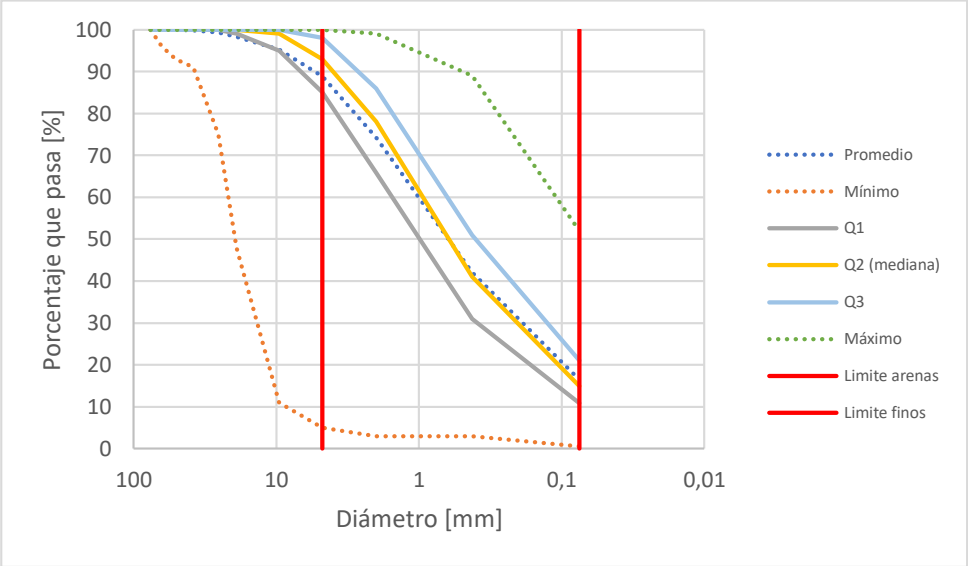


Figura 9: Bandas Granulométricas y valores estadísticos.

En la Tabla 7 se presentan los parámetros que modelan las bandas granulométricas presentadas, según un ajuste de tipo logarítmico. Se puede notar en primera instancia que el ajuste es bueno, dado el valor de R^2, y además que es peor para los valores extremos, es decir, máximo y mínimo, lo cual también indica que dichas curvas no serían suficientes por sí solas para obtener conclusiones contundentes.

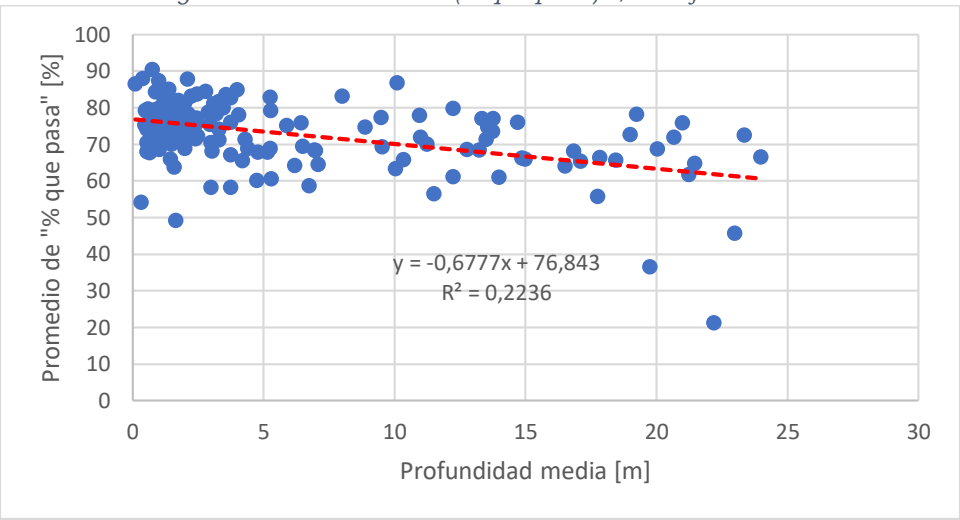
Tabla 7: Parámetros de ajuste logarítmico de curvas granulométricas.

y=m*ln(x)+b	**m**	**b**	**R^2**
Promedio	12,1	57,5	0,91
Mínimo	16,6	12,6	0,72
Q1	13,6	51,8	0,93
Q2 (mediana)	12,2	58,3	0,88
Q3	10,8	64,1	0,85
Máximo	5,2	83,5	0,65

Finalmente, se estudió una relación entre la profundidad de las muestras y su granulometría. Para ello se realizó un análisis en base al promedio de las mediciones de "% que pasa": si dicho valor es mayor, significa que el maicillo es más fino (ya que cada tamiz deja pasar más material, lo que incrementa dicho valor registrado).

En la Figura 10 se muestra el gráfico de dicho promedio de "% que pasa" (considerando datos desde el tamiz de 1" hacia los más finos) versus la profundidad media de cada estrato. Se puede apreciar que existe una relación levemente marcada donde el maicillo tiende a ser más grueso a medida que éste se encuentra más profundo, pero no es algo que siempre se cumpla. Al considerar tamices más gruesos dentro del análisis, la relación es menos marcada, pero aún notoria.

Figura 10: Granulometría (% que pasa) v/s Profundidad.



4.3- Plasticidad

Con el análisis de plasticidad de las 250 muestras con información (78,6%) se puede elaborar las Figura 11 y Figura 12.

La Figura 11 muestra el porcentaje de muestras plásticas y no plásticas (59 y 191 muestras, respectivamente). Si se toma en cuenta además la estratigrafía como un complemento, se tiene que la cantidad de muestras plásticas sube a 62, lo que genera un margen de error de un 1,6%.

La Figura 12 muestra la Carta de Plasticidad elaborada para las muestras plásticas cuyos Límites de Atterberg fueron determinados, donde se puede ver que la variabilidad de valores es bastante limitada, donde los valores de Límite Líquido varían entre 19 y 39, y los de Índice de Plasticidad entre 1 y 16.

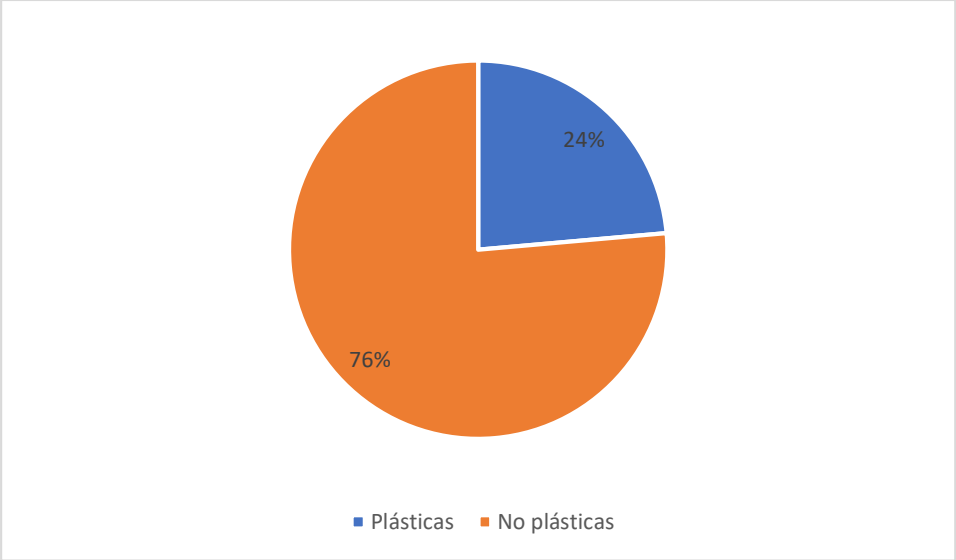


Figura 11:Plasticidad de las muestras de maicillo.

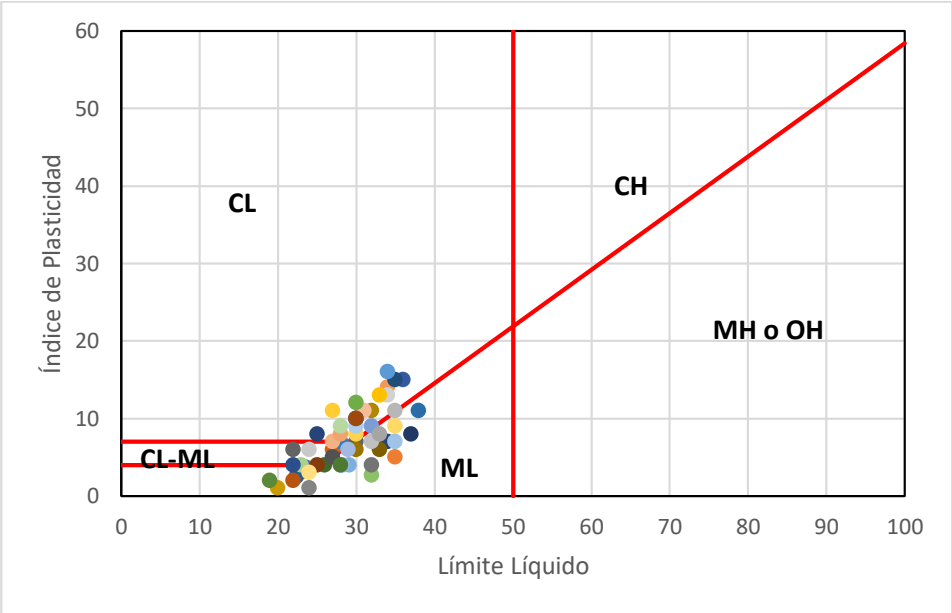


Figura 12: Carta de Plasticidad de los maicillos. Colores indican muestras distintas.

La gran mayoría de las muestras son consideradas como no plásticas, y de la Carta de Plasticidad se puede ver que todos los casos de maicillo plástico encontrado caen en la categoría de CL, CL-ML o ML, los cuales corresponden a suelos limosos o arcillosos en general, pero en ningún caso a suelos de alta compresibilidad.

4.4- Clasificación

En cuanto a la clasificación de las muestras, se usa principalmente el sistema U.S.C.S. y AASHTO, tal como se muestra en la Figura 13 y Figura 14. De acuerdo con la Figura 13, se puede ver que la gran mayoría de muestras son clasificadas como SM con 143 muestras (49,5%), cifra que sube a 223 muestras (77,2%) si se considera a otras clasificaciones con “SM” en el nombre.

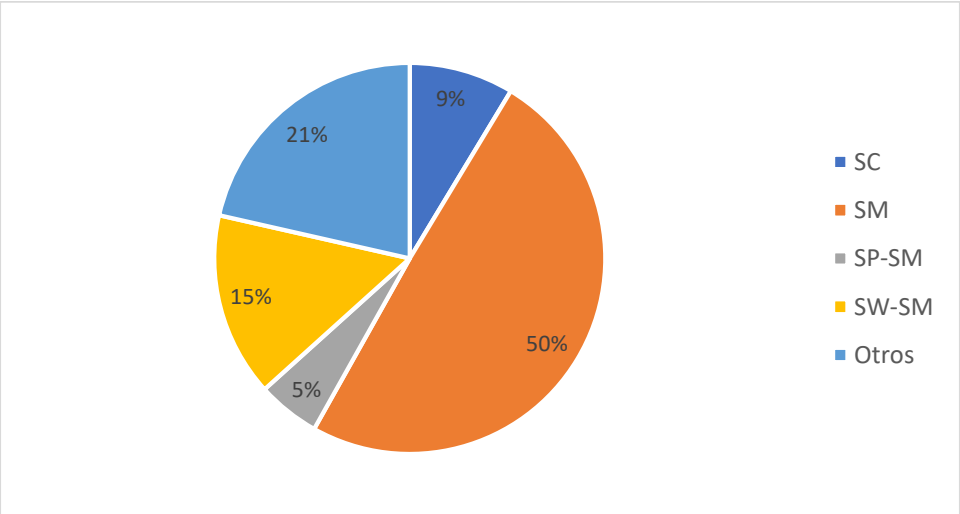


Figura 13: Clasificación U.S.C.S.

De esto se concluye que, si bien se puede decir que el maicillo en general se clasifica como SM en el sistema U.S.C.S., es algo que puede quedar corto para describir todas las opciones y variables que puede englobar este tipo de suelo, existiendo en la realidad muchos tipos de maicillo.

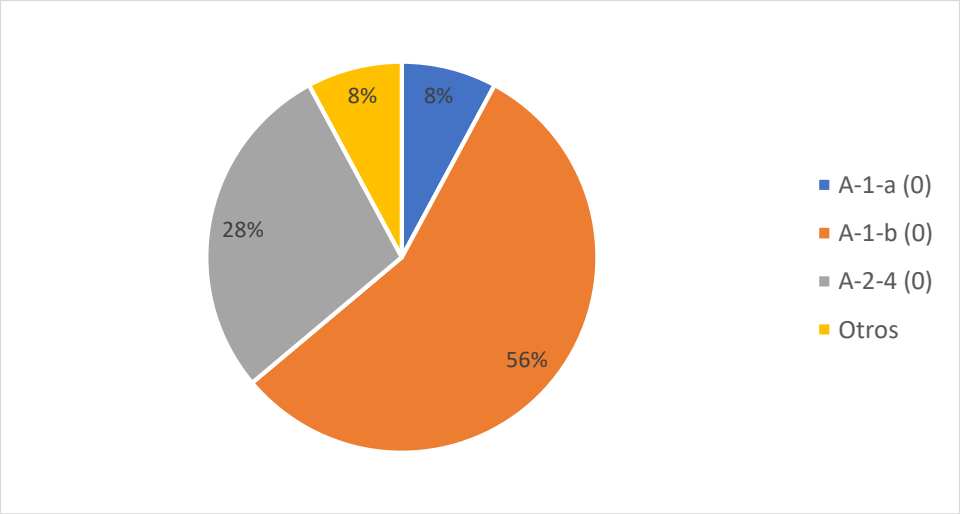


Figura 14: Clasificación AASHTO (HRB).

En cuanto a la clasificación HRB o AASHTO, mostrado en la Figura 14, la mayoría de las muestras son clasificadas como suelos granulares gruesos tipo A-1 (138 muestras, 63,9%), otro grupo menor como suelos granulares con finos tipo A-2 (69 muestras, 31,9%), mientras que solo 9 muestras fueron clasificadas como suelos arcillas o limos (4,2%), números que concuerdan con el análisis de la clasificación U.S.C.S. Del grupo A-1, la mayoría de las muestras son A-1-b (0), clasificación usada para denominar suelos granulares, constituidos por fragmentos de rocas, gravas y arenas, y con un comportamiento como subrasante excelente a bueno.

4.5- Densidad Natural y Gravedad Específica

Para la densidad natural se tienen 78 determinaciones, sólo un 24,5% del total de muestras identificadas como maicillo. Existe cierta variabilidad en cuanto a la relación entre densidad natural húmeda y seca, con muestras que cambian poco sus valores y otras que cambian mucho, sin importar la magnitud de las densidades en sí.

En la Figura 15 se muestras los cuartiles que describen la distribución de los datos (el 50% central representado por la caja), la media de estos (representado por la cruz) y datos identificados como extremos alómalos (en este caso, los puntos superiores en el gráfico). Se puede ver que el 50% central de los datos presenta poca variabilidad, teniendo valores entre 2 y 2,24 [T/m3] para densidad húmeda y 1,84 y 2,07 [T/m3] para densidad seca. Además, el promedio en ambos casos es ligeramente superior a la mediana (la línea central de la caja), lo que muestra que existe una mayor variabilidad hacia los valores más altos de las densidades de las muestras, y eso explica también los valores extremos identificados, así como también la diferencia de tamaño del 2° y 3° cuartil.

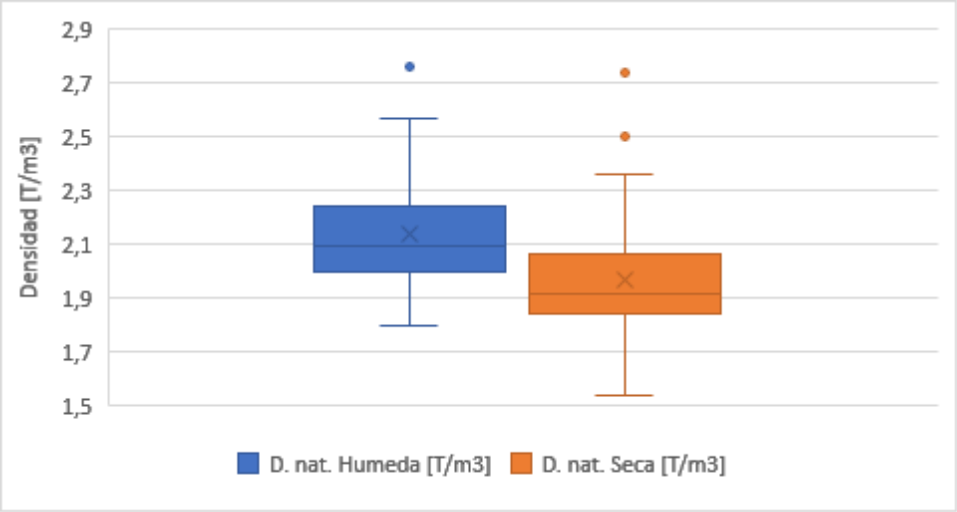


Figura 15: Densidad Natural - Diagrama de Caja y Bigote.

Es necesario indicar que los gráficos de caja y bigote utilizados en el presente estudio, para definir los "outliers", y por ende, la ubicación de los bigotes, utilizan el criterio de 1,5 veces el rango Inter cuartil, lo cual básicamente es un rango, obtenido de la propia variabilidad y estadística de los datos analizados, que se utiliza para identificar datos anormales.

Este análisis se realizó de igual manera para los resultados de la Gravedad Específica, el cual se muestra en la Figura 16. Se puede ver que tienen una variabilidad similar a la de la densidad, donde se tiene sólo 88 (27,7%) con gravedad específica determinada, 10 muestras más ensayadas con respecto a la densidad natural.

En general se tienen datos con un comportamiento muy similar al de la densidad natural, con algunos valores extremos, promedio sobre la mediana y cuartil 3 con mayor amplitud que el 2, indicadores de que la variabilidad de los datos se incrementa con el aumento del valor de la gravedad específica en sí.

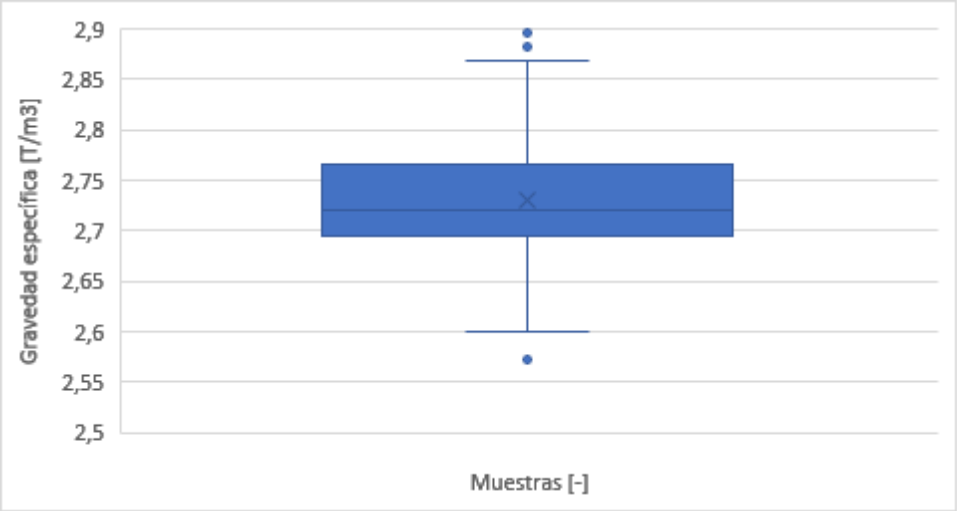


Figura 16: Gravedad Específica - Diagrama de Caja y Bigote.

Ahora bien, dada la existencia de casos en donde no se tiene a la vez, valores de densidad natural y gravedad específica, se propone buscar una relación entre ellos. En la base de datos se tiene 61 muestras con información de ambos aspectos, a partir de las cuales se construyó una ecuación descriptiva, procedimiento que se indica en Anexo 2.- Relación entre Densidad Natural y Gs.

Finalmente, el modelo que describe la relación de la gravedad específica Gs con las densidades naturales húmedas y secas, sólo valido para los maicillos de la zona en estudio, es presentado por la ecuación (1):

$$Gs = \frac{D.N.H}{D.N.S} * \left(-2{,}766 * \frac{D.N.H}{D.N.S} + 4{,}9902\right) \qquad (1)$$

4.6- Humedad Natural

La cantidad de muestras con determinación de su Humedad Natural es 142 (44,7%), las cuales permiten generar la Figura 17, donde se muestran los cuartiles que componen la muestra de datos y algunos valores extremos. Como se puede ver en primera instancia, tiene gran variabilidad, con valores mínimos cercanos al 1% y valores máximos que se acercan al 30%.

Se puede indicar la poca variabilidad del 50% central de los datos, con una amplitud de solo un 6,9% de humedad. Los datos extremos corresponden a maicillos arenosos limosos y/o arcillosos, es decir, maicillos con un porcentaje de partículas finas no menor, lo que explicaría la humedad registrada.

Hay que tener en cuenta que el factor del clima puede ser bastante influyente en la humedad del suelo en estudio, así como otros factores locales y de profundidad, pero parece ser más influyente la presencia de partículas finas, puesto que muestras provenientes del mismo lugar que los maicillos con humedades extremas tienen valores mucho más pequeños, y la diferencia es precisamente la presencia o ausencia de material fino.

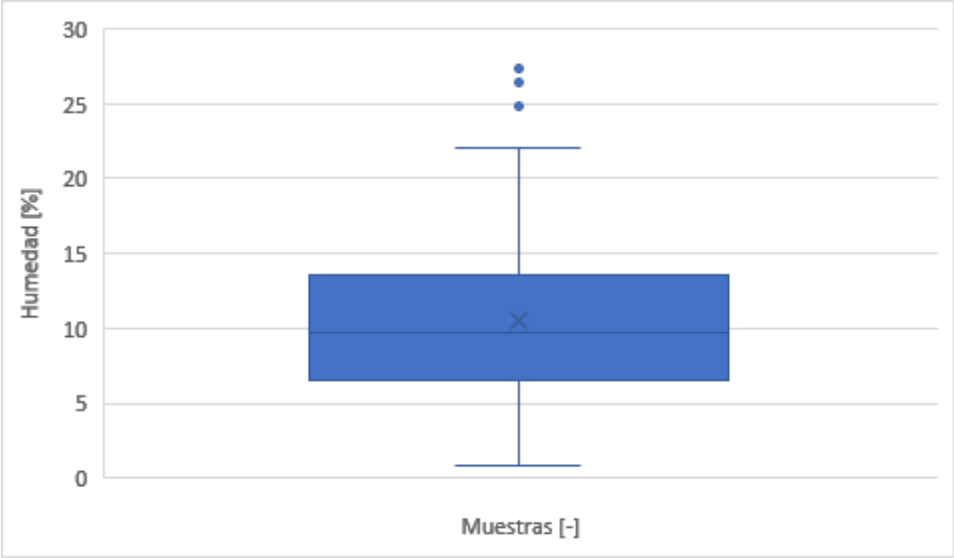


Figura 17: Humedad Natural - Diagrama de Caja y Bigote

4.7- Ensayo Proctor Modificado

Se tiene un total de 90 muestras de maicillo a las cuales se les realizo el ensayo de Proctor Modificado, un 28,3% del total. La distribución de densidades máximas compactadas húmeda y seca se muestran en la Figura 18.

Al obtener la información de los cuartiles de los datos de densidad, llama la atención que en ambos casos se tienen resultados similares: datos extremos superiores e inferiores, y un tamaño de cuartiles bastante similar, salvo que los datos de la densidad seca están ligeramente más distribuidos: la amplitud del 50% central de los resultados de la DMCH es de 0,06 [T/m^3] y el de la DMCS es de 0,09 [T/m^3].

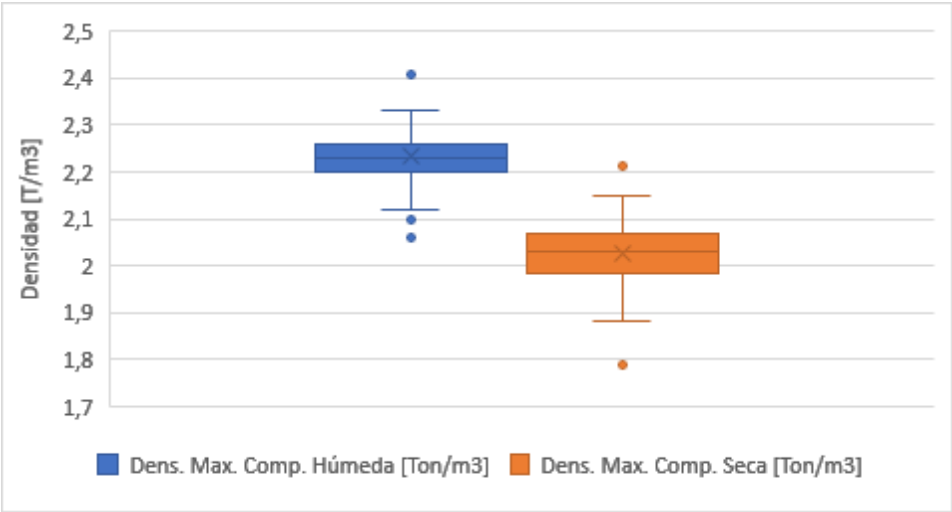


Figura 18: Proctor - Densidad Máxima Compactada, Diagrama de Caja y Bigote.

Similar distribución tiene la humedad óptima con respecto a la humedad natural al comparar la Figura 19 y Figura 17, aunque claro que con una variabilidad mucho menor al ser un parámetro controlado en laboratorio.

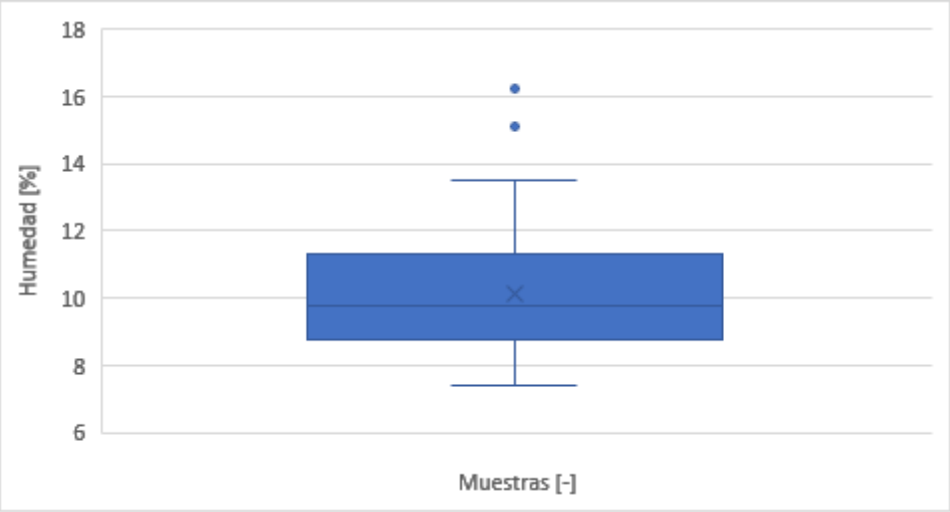


Figura 19: Proctor - Humedad Óptima, Diagrama de Caja y Bigote.

Finalmente, se realizó una serie de análisis basados en los resultados del Proctor, los que se muestran con mayor detalle en Anexo 3.- Relaciones derivadas del Proctor Modificado, cuyo principal resultado se muestra a continuación.

Un análisis realizado trata sobre la correlación entre la humedad óptima y las densidades máximas compactadas (DMCH/DMCS). El ensayo Proctor busca la humedad óptima en base a la construcción de una curva de saturación, donde se grafica la densidad seca versus la humedad del molde mediante varias iteraciones del método, para lo cual es necesario calcular densidades y humedades.

El análisis realizado propone la obtención de la humedad óptima utilizando directamente valores de densidades máximas, húmedas y secas, encontradas a través del proceso de ejecución del Proctor Modificado, sin pasar por el proceso gráfico de obtención para la humedad óptima como se suele hacer. Dicha relación de presenta en la Figura 20, donde el ajuste lineal encontrado es bastante bueno, con un R^2 de 0,98.

La ecuación que describe la relación entre las densidades máximas compactadas y la humedad óptima resultante, para los maicillos de la zona en estudio, es:

$$W_o = 98{,}686 * \frac{D.M.C.H.}{D.M.C.S.} - 98{,}525 \qquad (2)$$

Para probar el modelo, se comparó los valores de la humedad óptima entregada por el laboratorio mediante el procedimiento Proctor y la estimada mediante la ecuación (2), resultados que se muestran en la Figura 21. Se tiene en promedio una diferencia de 0,12% entre valores estimados y medidos en laboratorio (considerando el valor absoluto de dichas diferencias), con una diferencia mínima y máxima de 0,011 y 1,775% en los valores de las humedades óptimas.

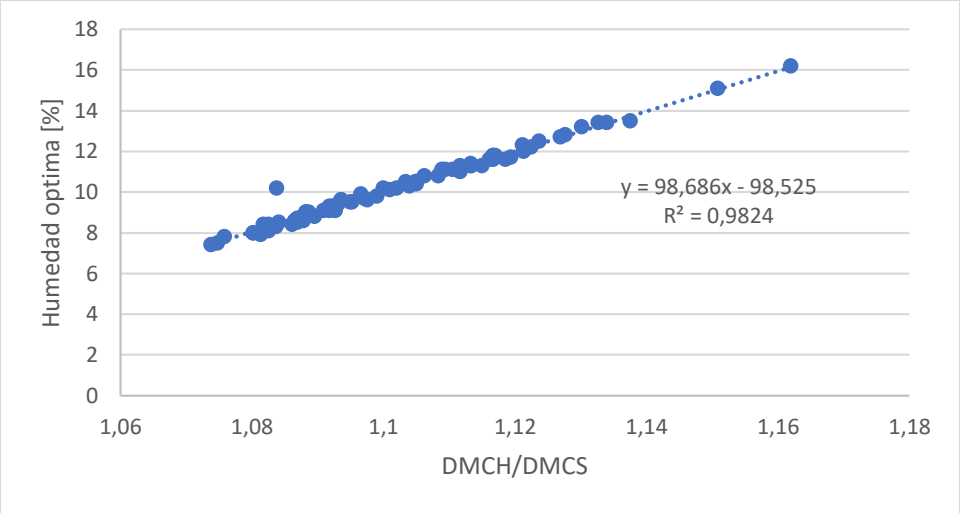


Figura 20: Relación entre las densidades máximas compactadas y la humedad óptima.

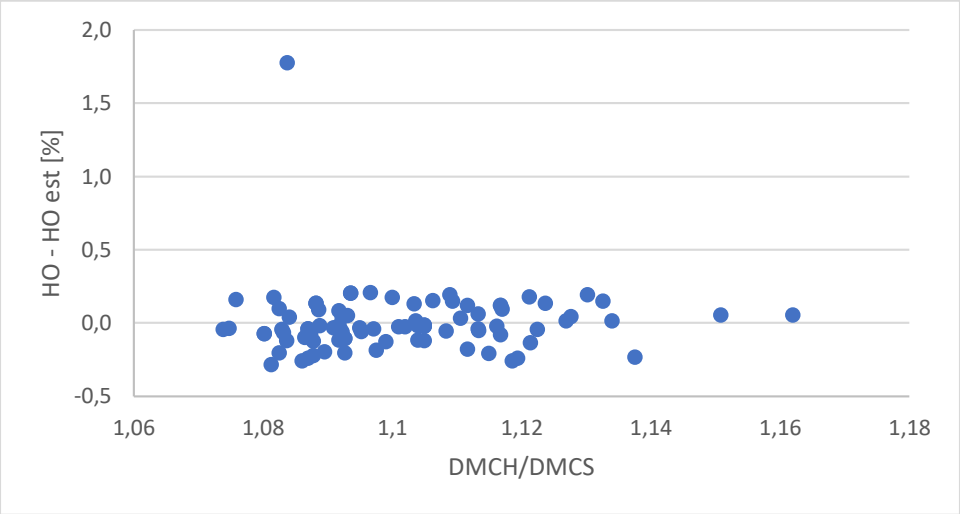


Figura 21: Diferencia entre humedad óptima medida y estimada.

Para terminar, se analizó la relación entre los resultados obtenidos y el método utilizado (A, B, C y D), donde se encontró que con el método C se llega a valores mayores de densidad (DMCH y DMCS) y humedad óptima, aunque ésta es una observación que puede no ser concluyente al contar con solo 5 ejecuciones con dicho método (Ver Anexo 4.- CBR).

4.8- Determinación CBR

Todos ensayos CBR fueron obtenidos con método sumergido, y la duración de la mayoría es de 96 horas (no todos los registros tienen esta última información, además de encontrar un caso con 102 horas de sumergimiento).

Ante una primera visualización de los resultados, llama la atención la aparente poca variabilidad de los valores de densidad, donde las muestras tienen el mismo comportamiento en general. En cuanto al análisis estadístico de las densidades secas pre y post inmersión, a partir de la Figura 22 y Figura 23 respectivamente, se puede ver que los datos tienen una distribución similar al analizar la amplitud de los diagramas, tanto para densidad seca previo

y posterior a la inmersión como entre los moldes de distintos golpes, además de que los valores de la densidad no varían tanto entre las situaciones previa y posterior a la inmersión.

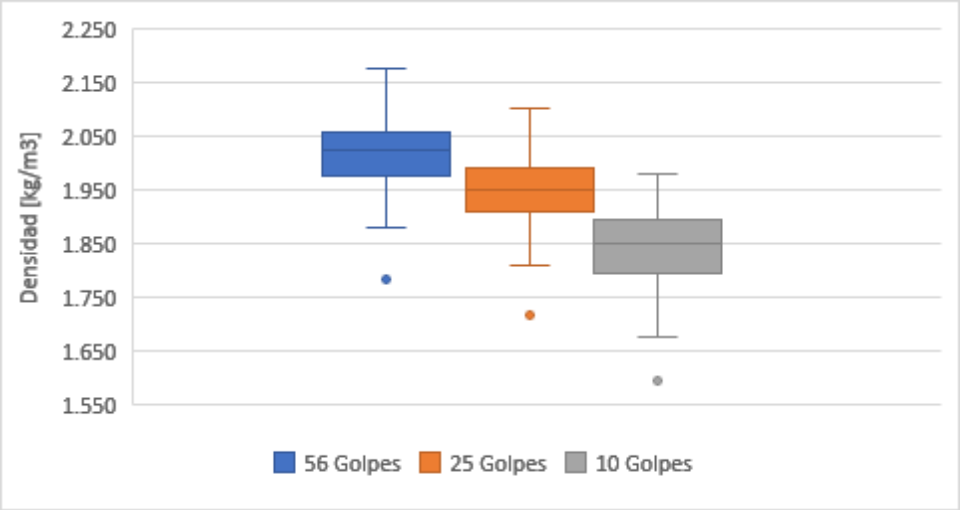


Figura 22: CBR - Densidad seca antes de inmersión, Diagrama de Caja y Bigote.

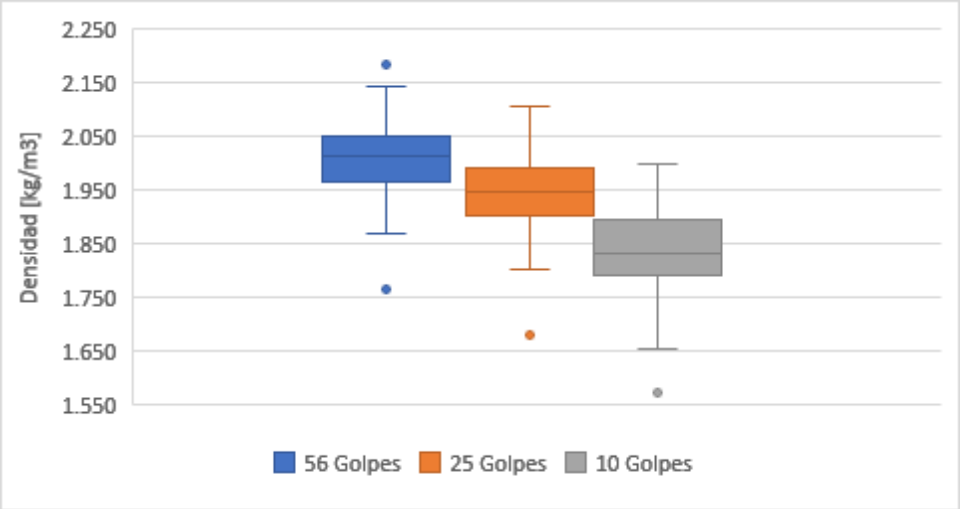


Figura 23: CBR - Densidad seca después de inmersión, Diagrama de Caja y Bigote.

De las humedades de compactación, se puede ver que sus valores post compactación cambian bastante comparados con su situación inicial (como se puede ver en el Anexo 4.- CBR), incrementándose no de la misma manera entre las distintas muestras de maicillo. Además, los valores post compactación son prácticamente invariantes entre los distintos moldes, como se puede ver en, es decir, previo a la inmersión, la humedad no depende en mayor medida del nivel de compactación.

En cuanto a la distribución de los valores posterior a la compactación, los valores de humedad se incrementan (como se puede ver en el Anexo 4.- CBR): los valores extremos identificados previo a la compactación desaparecen, y la variabilidad tiende a aumentar hacia los valores mayores de humedad, según se ve en la mayor amplitud de del cuarto cuartil, sin que esto signifique un aumento de los valores máximos; es más, los valores extremos superiores previo

a la compactación ahora entran al rango de valores normales (de hecho, estos disminuyen ligeramente).

Continuando con el análisis de la humedad de los moldes, la variación de los valores se muestra de mejor manera en la Figura 24 (donde se incluye además información de la humedad promedio posterior a la inmersión, valores que se muestran en Anexo 4.- CBR), donde se muestra, como ejemplo el caso de los moldes de 56 golpes, que las humedades tienden a subir ligeramente.

Los puntos que cambian su humedad en mayor medida son muestras con plasticidad variada: 3 de los puntos con humedad inicial más baja (5% aproximadamente) tienen plasticidad media, mientras que el restante fue clasificado como no plástico; es decir, la plasticidad de una muestra no es el principal factor influyente en el cambio de humedad previo y posterior a la compactación e inmersión, como se podría pensar.

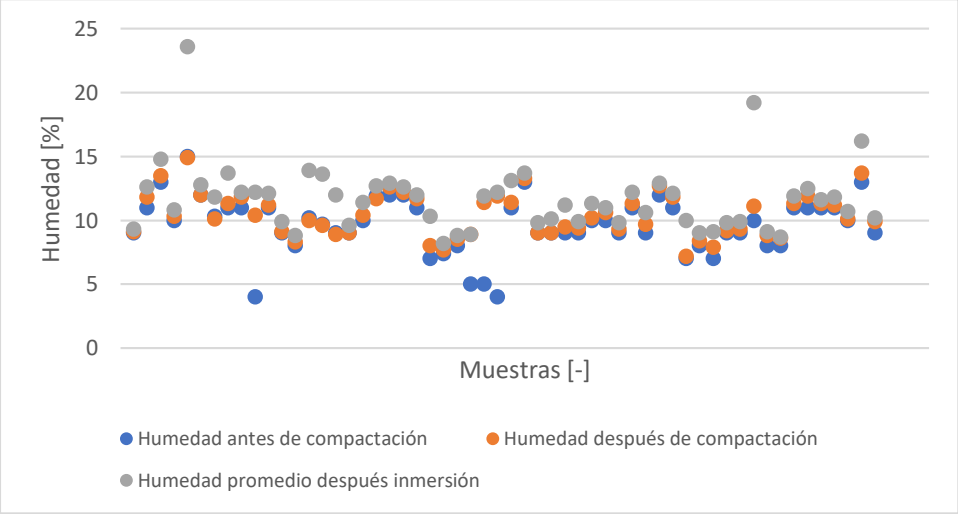


Figura 24: CBR - Humedad promedio en moldes de 56 golpes, antes y después de la compactación y después de inmersión en agua.

Respecto de la humedad posterior al proceso de inmersión de los moldes, en general se ve un incremento de la humedad según disminuye el nivel de compactación de los moldes. Esto se explica debido al espacio disponible que tiene el agua para ingresar a los moldes durante la inmersión: con menor compactación el espacio entre granos será mayor, por lo que el resultado es esperable, como se ve en el Anexo 4.- CBR.

Al comparar los tres grupos de datos en la Figura 24, llama la atención la variedad de casos visibles, donde la humedad en algunas muestras no parece variar mucho entre las distintas situaciones del ensayo, y otras donde varía entre la situación pre y post compactación o pre y post inmersión, por lo que intentar establecer una relación matemática que describa todas las situaciones es bastante difícil.

Ahora, al analizar la razón de soporte obtenida para cada molde en la Figura 25, se puede ver que existe una variabilidad mayor mientras mayor es el nivel de compactación, lo que indica que no todos los maicillos se comportarán de la misma manera para un mismo nivel de compactación.

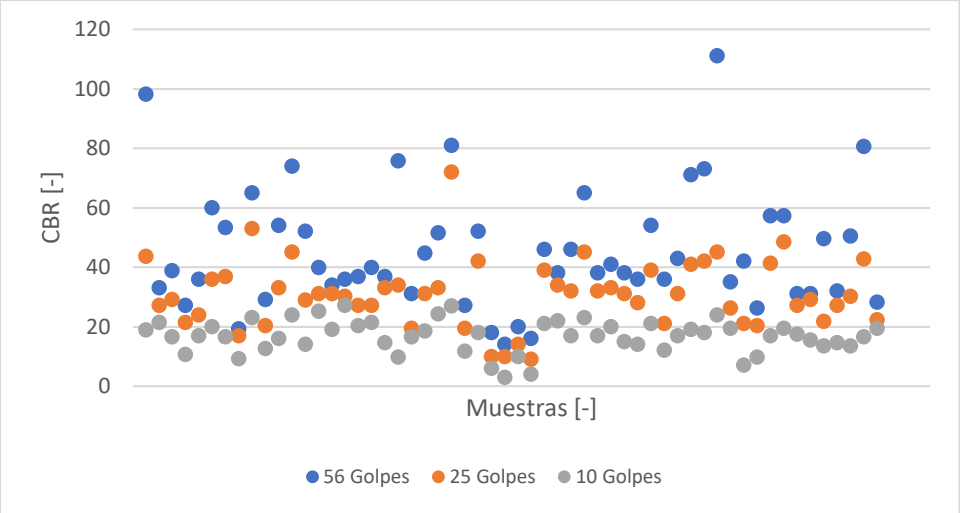


Figura 25: CBR - Razón de soporte a 0,2".

Los valores de CBR en aumentan a medida que aumenta la compactación, presentando un incremento mayor entre los 56 y 25 golpes que entre los 25 y 10 golpes, salvo en algunos maicillos donde la diferencia de incremento de CBR entre los moldes no responde a dicho comportamiento, por lo que obtener una ecuación que describa la totalidad de los casos no sería representativo.

Finalmente, analizando el valor de CBR obtenido a 95% de la DMCS del Proctor, cuya distribución de resultados se expone en la Figura 26, se puede decir que la variabilidad de la mayoría de los resultados es bastante menor, con un 50% central de la muestra con valores de CBR entre 20,5 y 30,95%, y un promedio de 26,3%, lo que es un rango bastante acotado para describir a la mayoría de los maicillos analizados.

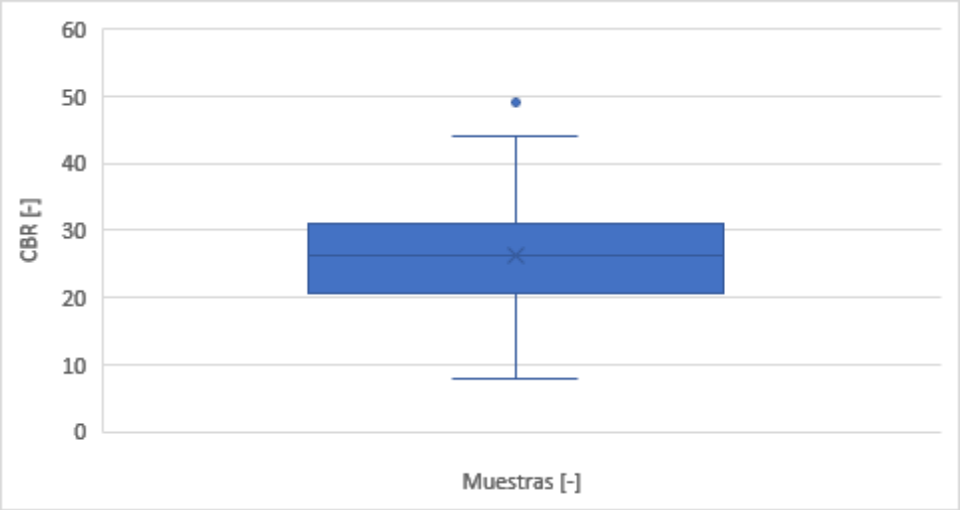


Figura 26: CBR - Razón de soporte, según los 0,2" superiores, a 95% del Proctor Modificado, Diag. de Caja y Bigote.

Como resumen de los valores esperables, según un análisis por cuartiles, para un ensayo de CBR de maicillo de la región en estudio, se presenta la Tabla 8.

Tabla 8: Valores típicos del ensayo de CBR.

Proctor Modificado		**Cuartiles**		
Parámetro	**Molde**	**Q1**	**Q2**	**Q3**
Densidad seca antes de inmersión [kg/m3]	56 Golpes	1975	2023,5	2056,75
	25 Golpes	1915,5	1951	1991
	10 Golpes	1797,25	1850,5	1893,25
Densidad seca después de inmersión [kg/m3]	56 Golpes	1967,5	2014,5	2049,5
	25 Golpes	1906,25	1945	1990,25
	10 Golpes	1790,75	1830,5	1893
Humedad antes de compactación [%]	56 Golpes	9	10	11
	25 Golpes	8,95	10	11
	10 Golpes	9	10	11
Humedad después de compactación [%]	56 Golpes	9,1	10,3	11,7
	25 Golpes	9,1	10,5	11,7
	10 Golpes	9,1	10,3	11,5
Humedad capa superior 25 mm. después inmersión [%]	56 Golpes	10,85	12,15	13,25
	25 Golpes	11,6	13,1	14,33
	10 Golpes	12,9	14,5	16,43
Humedad promedio después inmersión [%]	56 Golpes	9,9	11,7	12,6
	25 Golpes	10,6	12,05	13,25
	10 Golpes	11,98	12,95	14,45
Expansión (% altura inicial)	56 Golpes	0	0,1	0,4
	25 Golpes	0,1	0,2	0,5
	10 Golpes	0,1	0,2	0,5
Razón Soporte a 0.2" de cada molde [-]	56 Golpes	32,75	39,8	54
	25 Golpes	23,58	31,00	37,43
	10 Golpes	13,9	17	20,1
Razón Soporte a 0.2" a 95% DMCS del Proctor Mod.	[-]	20,5	26,3	30,9
Pesos sobrecargas utilizadas en los moldes [kg]	56 Golpes	5,093	5,156	5,424
	25 Golpes	5,088	5,119	5,235
	10 Golpes	5,089	5,186	5,336

Adicionalmente, se intenta establecer correlaciones que puedan predecir o describir el valor de CBR del maicillo según distintas características propias de cada muestra, las que se muestran en detalle en el Anexo 4.- CBR, los cuales se resumen a continuación.

La primera relación buscada es entre el CBR y el valor de la densidad seca post compactación, donde una posible influencia de los pesos anómalos de los moldes de 25 golpes, sumado a la gran variabilidad de lecturas, indica la inexistencia de una correlación.

En segundo lugar, se propuso una relación entre CBR y DMCS (información obtenida del ensayo Proctor Modificado), donde tampoco se llegó a ninguna correlación satisfactoria.

Finalmente se buscó una correlación entre CBR y valores relacionados a ensayos de caracterización de los maicillos mediante una regresión lineal múltiple, donde si bien hay casos externos donde esto ha dado resultados con buenas correlaciones [16], esta no fue la ocasión.

4.9- Ensayo de Compresión Triaxial

Del total de muestras recolectadas, sólo 49 fueron ensayadas en laboratorio (15,4%), con un total de 97 probetas (que se muestran en detalle en la Figura 27). Dichos ensayos a su vez se separan por tipo de Triaxial ejecutado, tal como se indicó en la Tabla 6 anteriormente.

Es necesario indicar además que no todos los ensayos presentan información respecto al tipo de falla, ángulo de fricción y cohesión, pero aun así hay suficientes datos en general para presentar un análisis, lo que se muestra más adelante en la Tabla 11.

Dada la poca cantidad de ensayos triaxial tipo CIU (Consolidado Isotrópico No Drenado), el análisis se enfocó mayormente tomando en cuenta los ensayos tipo CID (Consolidado Isotrópico Drenado) y UU (No Consolidado No Drenado).

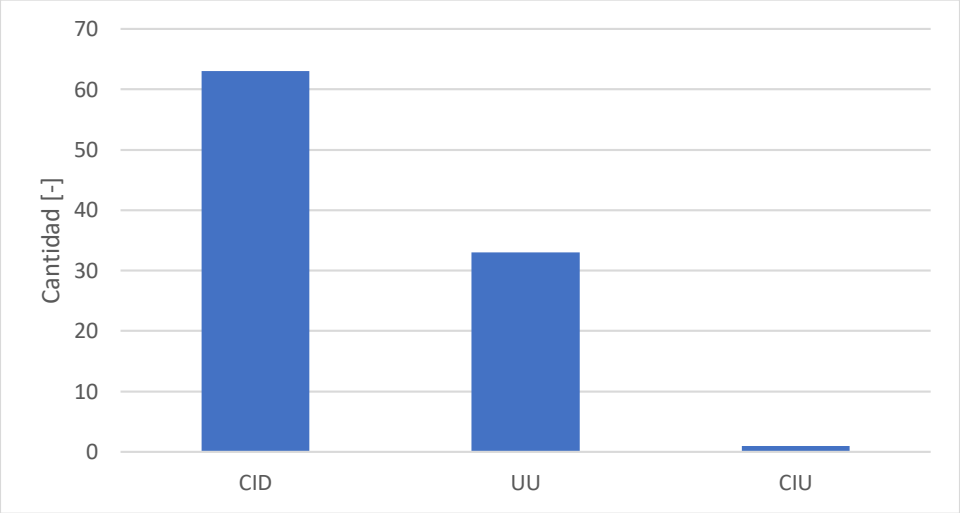


Figura 27: Triaxial - Probetas ensayadas por cada tipo de ensayo.

A su vez, existe gran variedad de presiones de cámara (s3) registradas en los diversos ensayos: existen casos de triaxiales realizados con solo una probeta o tres, mientras que la mayoría consta de dos probetas ensayadas. Para una simplicidad del análisis, y dado que es el caso que concentra la mayor cantidad de ensayos (77,6%), se da mayor énfasis de análisis a los ensayos con presión de cámara s3 de 0,5 y 1 [kgf/cm^2], además de incluir los dos ensayos CID que disponían de una s3 de 2 [kgf/ cm^2].

En general, se analizó el comportamiento de las muestras según los gráficos de compresión versus deformación separando por tipo de Triaxial, los que posteriormente fueron separados según la presión de cámara registrada, tal como se muestra en la Figura 28 y Figura 29.

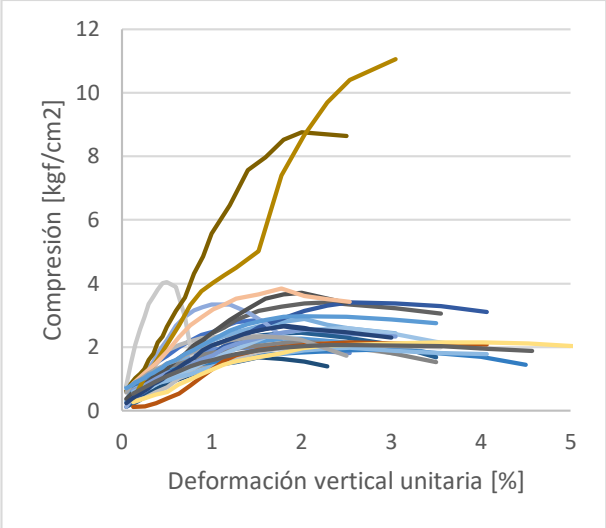


Figura 28 (a): s3=0,5 [kgf/cm2]

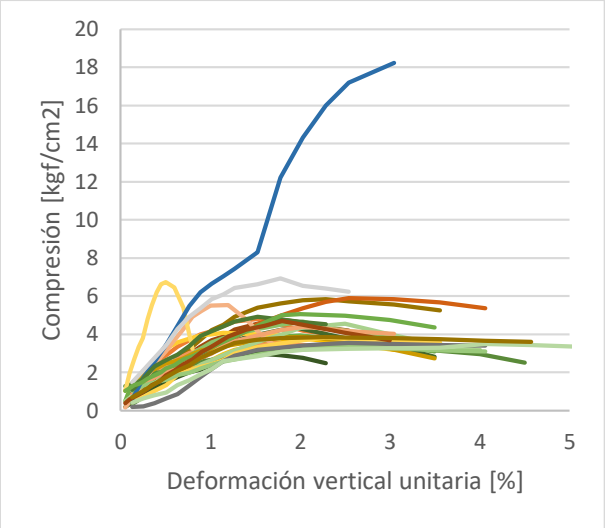


Figura 28 (b): s3=1 [kgf/cm2]

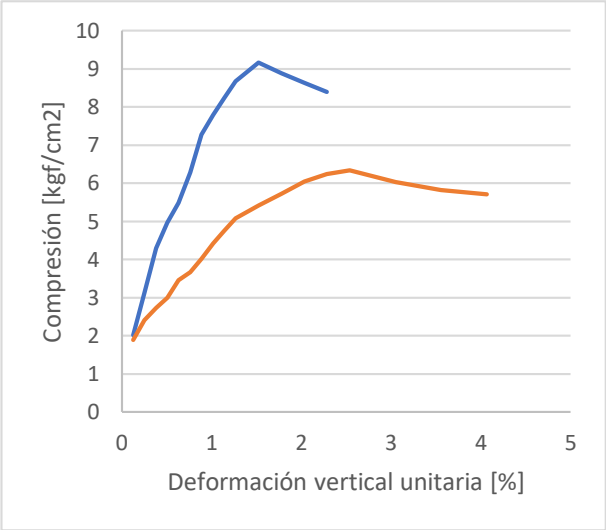


Figura 28 (c): s3=2 [kgf/cm2]

Figura 28: Triaxial CID – Compresión v/s Deformación.

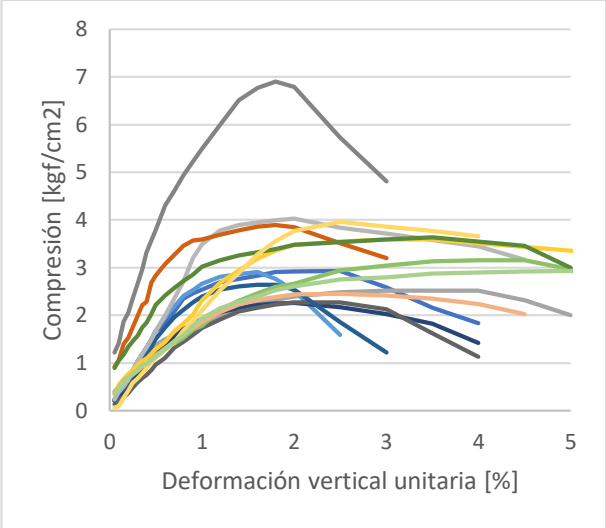


Figura 29 (a): s3=0,5 [kgf/cm2]

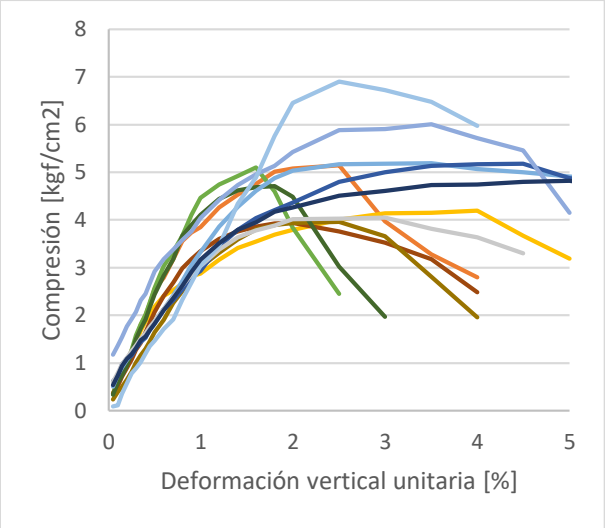


Figura 29 (b): s3=1 [kgf/cm2]

Figura 29: Triaxial UU - Compresión v/s Deformación

Respecto al Triaxial tipo CID, expuesto en la Figura 28, en primera instancia se puede apreciar que existe cierta concentración de los resultados y otros que se escapan al comportamiento habitual, presentando una mayor deformación o resistencia a la compresión (este último caso se trata de una probeta frágil). La mayoría de los ensayos no supera el 5% de deformación, por lo que los gráficos se representan hasta dicha deformación. Se puede ver además que existen ensayos que, con menor presión de cámara, obtienen mayores valores de compresión que otros (como es el caso de s3=1 [kgf/cm2] que supera los dos ensayos a s3=2 [kgf/cm2]), pero hay que tener en consideración que ese es sólo un ensayo de muchos, por lo que por sí solo no tiene mayor implicancia en los resultados de análisis, como se puede ver en la Figura 30.

En cuanto al Triaxial tipo UU, expuesto en la Figura 29, a diferencia del tipo CID, en este caso no se ve que existe una concentración de resultados, sino una dispersión generalizada del comportamiento al menos en lo que se refiere a la resistencia a la compresión. Al igual que en el caso de los CID, existen probetas que presentaron una compresión mayor para un confinamiento s3=0,5 [kgf/cm2] que otras muestras con confinamiento s3=1 [kgf/cm2], pero ese es un caso aislado (línea superior en la Figura 29 (a)) y no representa la tendencia del grupo, como se puede ver en la Figura 31.

Se realizó un análisis de cada tipo de triaxial, en el cual se buscó la generación de una curva representativa para cada tipo de triaxial (ver Figura 30 y Figura 31), y posteriormente se generó bandas de esfuerzo de compresión (similar a una banda granulométrica).

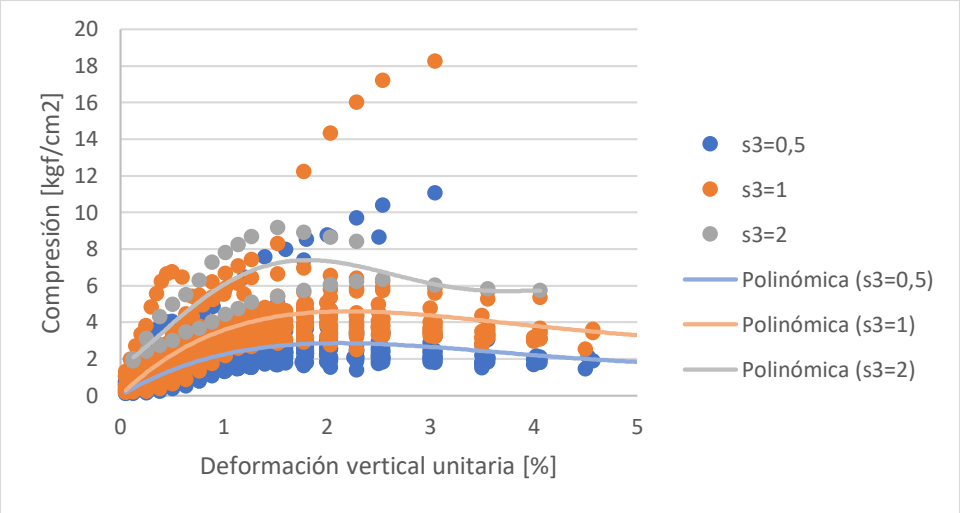


Figura 30: Triaxial - Análisis de ensayos CID.

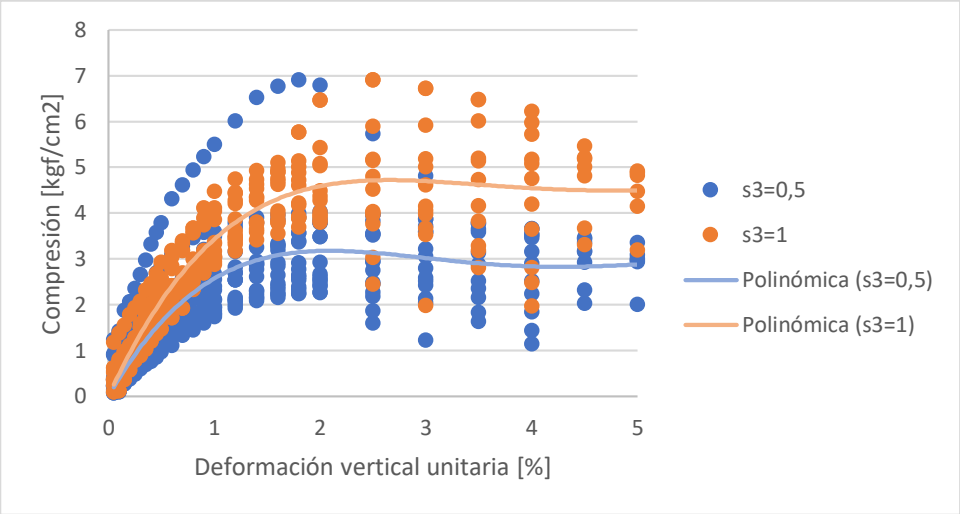


Figura 31: Triaxial - Análisis de ensayos UU.

A partir de los datos se estimó la elasticidad al 50% del valor máximo de carga (E50), resultados que se presentan en forma de cuartiles en la Tabla 9, expresados para cada tipo de triaxial en las presiones de cámara s3 de 0,5 y 1 [kgf/cm2] estudiadas, mientras que los dos resultados de s3=2 [kgf/cm2] se muestran en la Tabla 10.

Tabla 9: E50, en MPa para s3=0,5 y 1 [kgf/cm2]

Cuartil	CID		UU	
	s3=0,5	s3=1	s3=0,5	s3=1
Q3	37,226	57,210	33,075	48,694
Q2	24,725	39,327	25,668	36,182
Q1	17,818	31,220	20,936	32,246

Tabla 10: E50, en MPa para s3=2 [kgf/cm2].

CID	s3=2
Min	56,86
Max	105,51

Para el segundo análisis, se obtuvo bandas granulométricas representativas hasta el 5% de deformación unitaria, puesto que la mayoría de los ensayos no pasa de dicho valor. Dichas bandas, obtenidas mediante un análisis de cuartiles, tanto para una presión de cámara de 0,5 y 1 [kgf/cm2], se muestran en la Figura 32 y Figura 33, para los ensayos CID y UU, respectivamente.

Se puede ver que las bandas obtenidas para los triaxiales UU son menos estables debido a la poca cantidad de ensayos realizados, a diferencia de los CID, además de que la deformación máxima alcanzada, así como el punto final registrado en el ensayo, resultaron más variables.

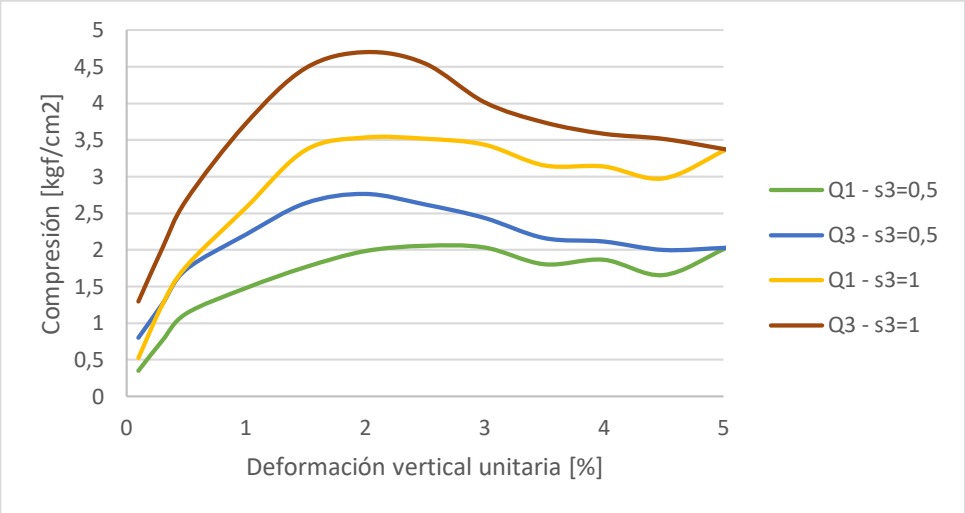


Figura 32: Bandas de compresión vs deformación para Triaxial CID.

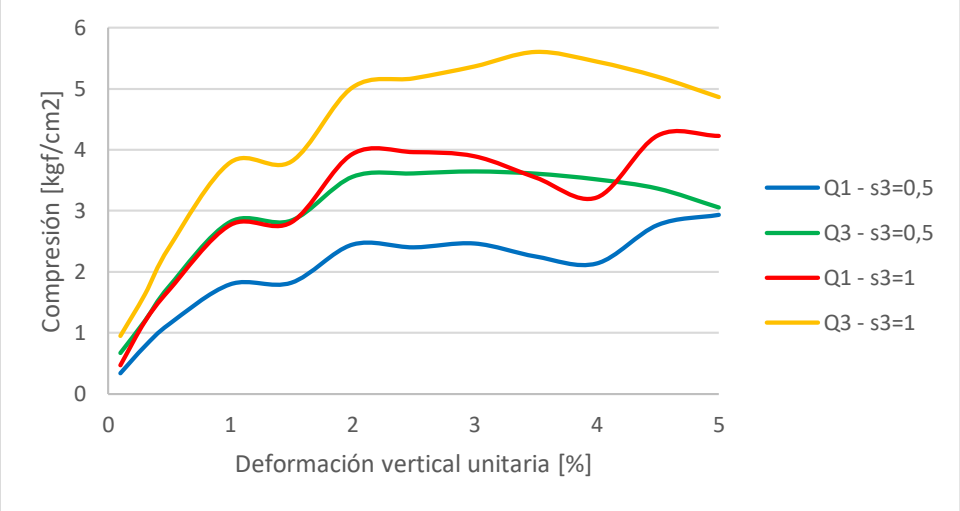


Figura 33: Bandas de compresión vs deformación para Triaxial UU.

En cuanto a las fallas de las probetas, existe registro en 46 ensayos, de los cuales 41 fueron catalogados como fallas Semi-plástica, 3 como falla plástica, 1 como frágil y 1 como semi-frágil.

Respecto a los valores del ángulo de fricción y cohesión, de los cuales sólo se tienen 20 y 13 datos del total de triaxiales respectivamente, sus valores característicos, correspondientes al 50% central de cada parámetro, se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11: Rango de valores del Ángulo de fricción y Cohesión, según informes de ensayos Triaxial.

Rango representativo	**Q1**	**Q3**
Ángulo de fricción [°]	39,98	45
Cohesión [kgf/cm2]	0,12	0,19

También se presenta un análisis de la distribución mediante un diagrama de caja y bigote de los valores de ángulo de fricción y cohesión, presentados en la Figura 34.

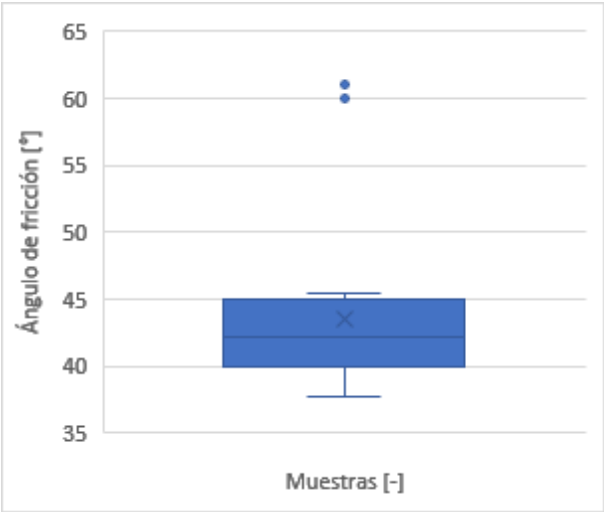


Figura 34 (a): Ángulo de Fricción

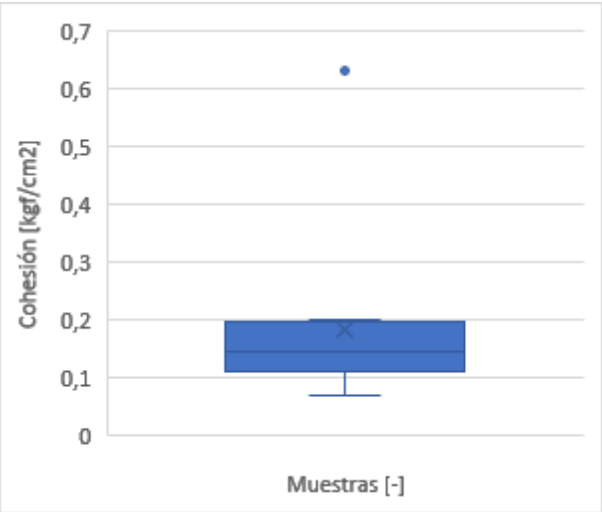


Figura 34 (b): Cohesión

Figura 34: Triaxial - Ángulo de Fricción y Cohesión, diagrama de Caja y Bigote.

Como se puede apreciar, existe claramente una concentración de datos menores, con algunos pocos casos de valores extremos (outliers), correspondientes a probetas frágiles.

En la Figura 35 se puede ver la relación entre dichos valores (los cuales son los indicados en los informes), donde se puede ver una relación bastante clara entre ellos, mostrando una relación de proporción.

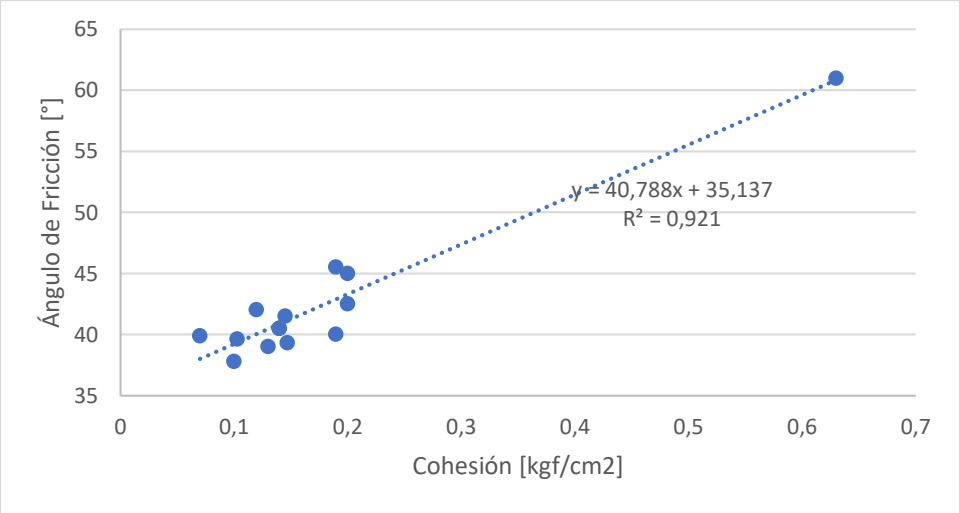


Figura 35: Ángulo de fricción v/s Cohesión, datos de laboratorio.

Adicionalmente se tiene una comparación de los valores de ángulo de fricción y cohesión según el tipo de ensayo y falla de la probeta. En cuanto al ángulo de fricción se tienen leves diferencias entre los ensayos tipo CID y UU, donde en el primer caso se tienen algunos valores menores, como se puede ver en la Figura 36; y respecto al tipo de falla, como es de esperar, el ángulo es mayor en las probetas con falla frágil, lo que se muestra en la Figura 37.

En cuanto a la cohesión, esta resultó ser bastante mayor en la probeta con falla frágil, como se muestra en la Figura 38. No hay una comparación de la cohesión según el tipo de ensayo, ya que todos los datos de cohesión pertenecen a ensayos tipo CID.

Finalizando con esta parte, se puede decir que llama la atención la poca cantidad de informes que, además de los datos de compresión versus deformación, entregan a la vez la información de cohesión y ángulo de fricción.

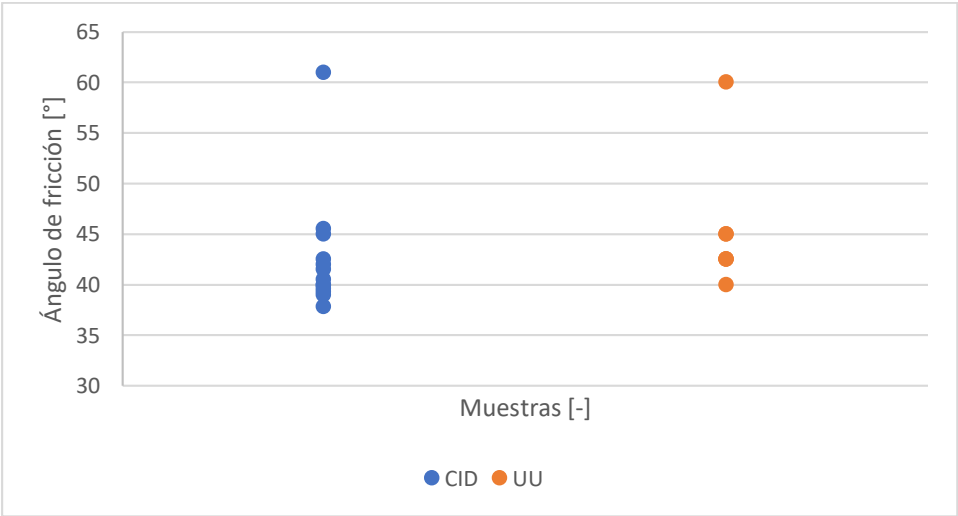


Figura 36: Triaxial – Comparación del Ángulo de Fricción según el tipo de ensayo ejecutado.

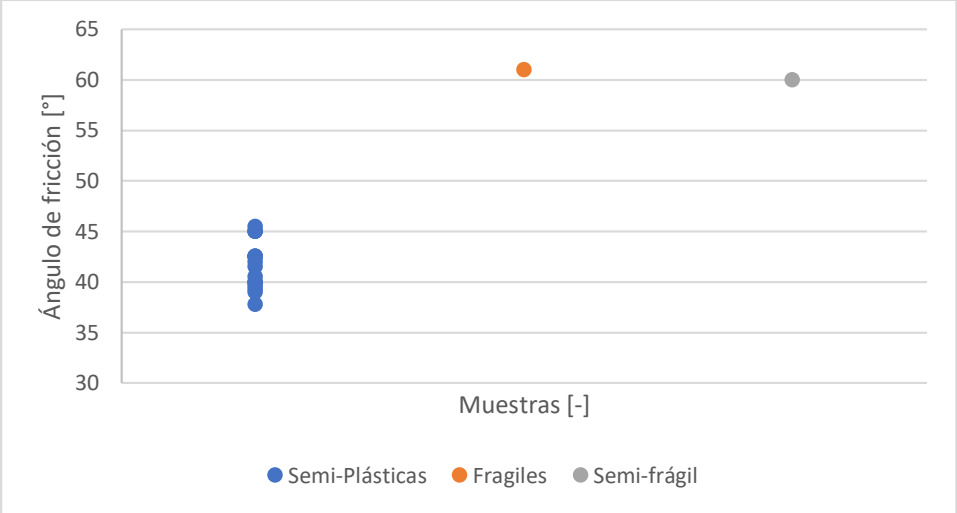


Figura 37: Triaxial - Comparación del Ángulo de Fricción según el tipo de falla.

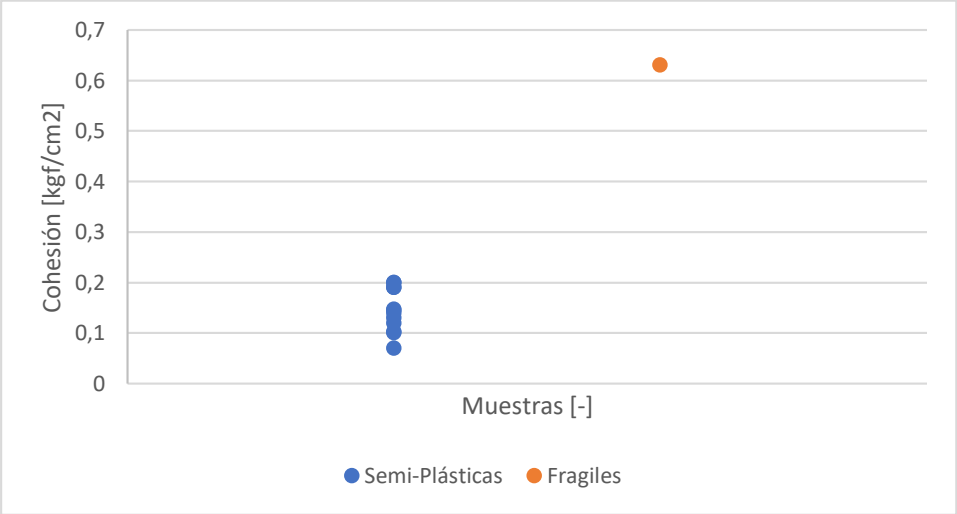


Figura 38: Triaxial - Comparación del valor de la cohesión según el tipo de falla.

Luego, se realizó un análisis de la trayectoria de tensiones mediante los parámetros tensionales de Lambe para obtener el ángulo de fricción, cuyos resultados se utilizaron para obtener la cohesión mediante un análisis por mohr. Para esto, los resultados de los ensayos triaxial fueron separados por tipo, además de considerar sólo los con ensayos con presión de cámara σ3 igual a 0,5 y 1 [kgf/cm^2].

Es necesario indicar que este análisis no fue realizado para los triaxiales UU ni CIU, debido a que no se tiene registro de la presión de poros medida durante la ejecución de dichos ensayos, por lo que el análisis de sus trayectorias de tensiones resultaría erróneo.

En la Figura 39 se muestran los valores peak de cada ensayo tipo CID, mediante el cual se obtiene una primera aproximación del ángulo de fricción de los maicillos ensayados. A su vez, en la Tabla 12 se muestran los resultados estadísticos del cálculo del ángulo Phi y Cohesión C para cada ensayo de triaxial.

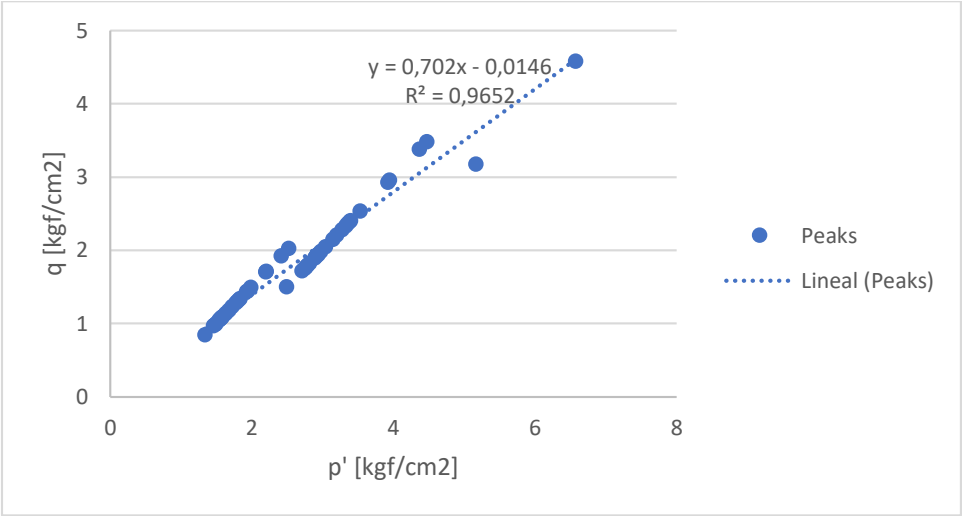


Figura 39: Peaks de Trayectorias de Tensiones - Triaxial CID.

Tabla 12: Valores de Phi y C obtenidos mediante un análisis de Trayectoria de Tensiones para Triaxial CID.

Pendiente Trayectorias		**Ángulo de fricción Phi [°]**		**Cohesión C [kgf/cm2]**	
M max	0,8779	phi max	61,39	C max	0,72
M prom	0,6589	phi prom	41,44	C prom	0,19
M min	0,5671	phi min	34,55	C min	0,05
M Q3	0,6777	phi Q3	42,66	C Q3	0,20
M Q2	0,6484	phi Q2	40,42	C Q2	0,14
M Q1	0,6284	phi Q1	38,93	C Q1	0,12
M graf	0,702	phi graf	44,59	-	-

Al comparar con los valores obtenidos en la Tabla 11, se ve que, en cuanto a los valores representativos dados por los cuartiles Q1 y Q3, los valores de Phi calculados son ligeramente menores que los hallados en los informes, mientras que la cohesión resulta ser más cercana.

Se realizó una comparación entre los resultados indicados en los informes con los obtenidos mediante el análisis de las trayectorias, los cuales se representan en la Figura 40 y Figura 41 (más detalles se muestran en Anexo 4.- Triaxial).

Se puede ver que la diferencia es mínima para el ángulo de fricción, pero para el valor de la cohesión la correlación no es tan buena, perdiéndose en parte la relación 1:1 que se logra en el caso de Phi (lo cual se debe mayormente al valor extremo, perteneciente a la probeta de falla frágil: sin este dato, la pendiente del conjunto de puntos restante es 1).

Según los resultados de Phi, se puede decir que el comportamiento del maicillo es similar a una arena densa (de grano angular, según la información estratigráfica obtenida) [17].

En la Figura 42 se puede ver la relación entre el ángulo de fricción y la cohesión, pero esta vez de los datos obtenidos a través del análisis de las Trayectorias de Tensiones. Al comparar con los datos medidos de laboratorio (Figura 35) se puede ver que la relación entre ellos es más dispersa, como se puede ver al comparar las líneas de tendencia de ambos casos.

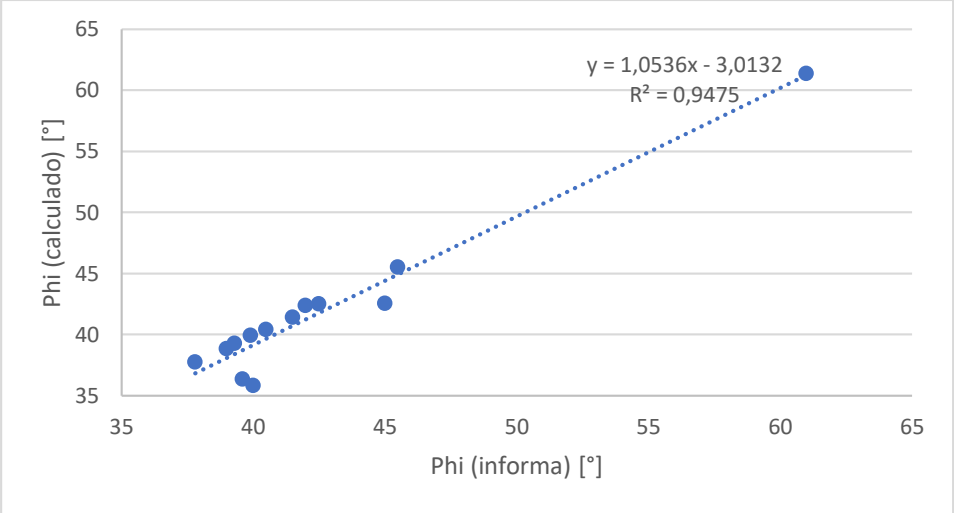


Figura 40: Comparación de resultados de Ángulo Phi, Triaxial CID.

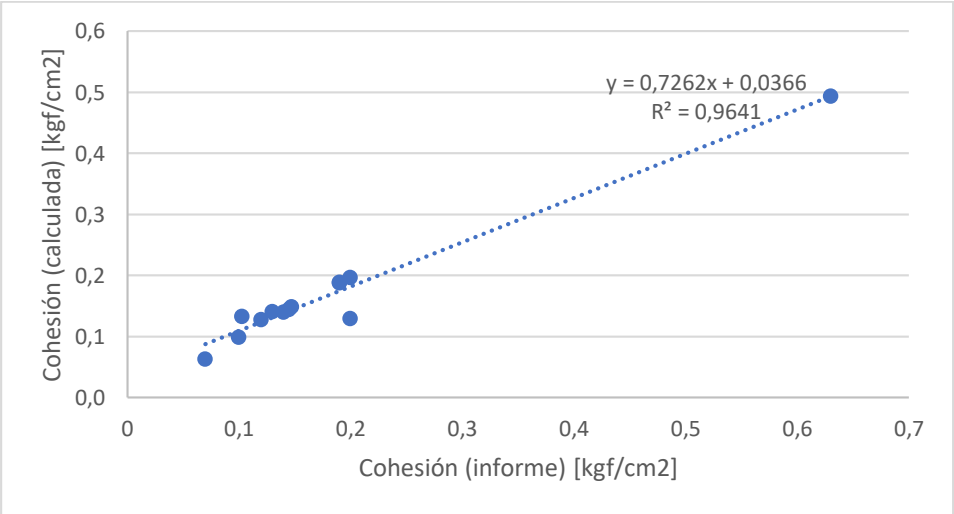


Figura 41: Comparación de resultados de Cohesión C, Triaxial CID.

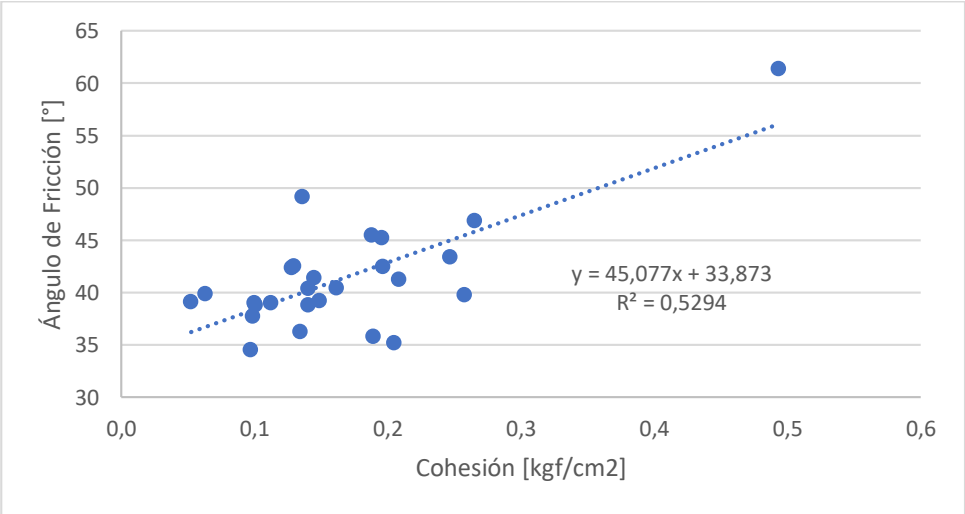


Figura 42: Ángulo de fricción v/s Cohesión, datos de Trayectoria de Tensiones.

Finalmente, se realizó un par de modelos mediante regresión lineal múltiple, en los cuales se correlacionan distintas propiedades características del maicillo, utilizando como base los resultados del análisis de tensiones (cuyos gráficos se muestran en Anexo 4.- Triaxial).

El primer modelo se realizó considerando granulometría, densidad natural (húmeda y seca) y Gs.

El segundo modelo considera, además de la granulometría, los límites de Atterberg, esto debido a la cualidad de "plasticidad" que puede tener la falla de la probeta durante el ensayo triaxial, por ende, este modelo no se aplica a muestras no plásticas.

Ambos modelos están descritos en la ecuación (3) y (4) respectivamente:

$$M1 = A * \%G + B * \%A + C * \%F + D * DNH + E * DNS + F * Gs \quad (3)$$

$$M2 = A * \%G + B * \%A + C * \%F + D * LL + E * LPS + F * IP \quad (4)$$

Donde:

-$\%G$: Porcentaje de grava, en [%].
-$\%A$: Porcentaje de arena, en [%].
-$\%F$: Porcentaje de finos, en [%].
-DNH: Densidad natural húmeda, en [Tn/m^3].
-DNS: Densidad natural seca, en [Tn/m^3].
-Gs: Gravedad específica, en [Tn/m^3].
-LL: Límite líquido.
-LP: Límite plástico.
-IP: Índice de plasticidad.

Los valores de los parámetros obtenidos mediante el ajuste de regresión lineal múltiple, tanto para calcular el ángulo de fricción como la cohesión, se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13: Valores parámetros de ajustes de correlación para Phi y C según Triaxial CID.

Valor parámetros	**Modelo 1**		**Modelo 2**	
	Phi	**C**	**Phi**	**C**
A	1,328	0,009	1,005	0,0086
B	0,902	0,0033	0,354	0,0035
C	1,027	0,0079	0,456	0,0016
D	39,276	0,014	-2,114	0,0001
E	-6,393	0,605	1,949	-0,008
F	-45,108	-0,548	2,382	-0,00993

Se intentó realizar un tercer modelo, el cual sólo incluía granulometría, pero sin obtener una buena correlación, lo cual se puede deber a que, aunque se tenga una mayor cantidad de datos (21) no fue posible encontrar un ajuste adecuado, simplemente dicha información (granulometría) no es suficiente para establecer una relación entre las variables, y por ende, describir los resultados de triaxial en cuanto a Phi y C; mientras que los dos modelos descritos, el ajuste fue realizado con menos datos (10 y 7 respectivamente), debido a que una menor cantidad de muestras tenía la información solicitada para elaborar cada modelo. Es necesario indicar que un ajuste con pocos datos es de menor significancia desde un punto de vista estadístico.

4.10- Sondaje de Cono Dinámico

Tal como se indicó en la Tabla 5, se tiene un total de 31 muestras relacionadas a sondajes de Cono Dinámico. En la Figura 43 se muestran los resultados de los sondajes, donde se grafica la cantidad de golpes necesarios para el avance según la profundidad.

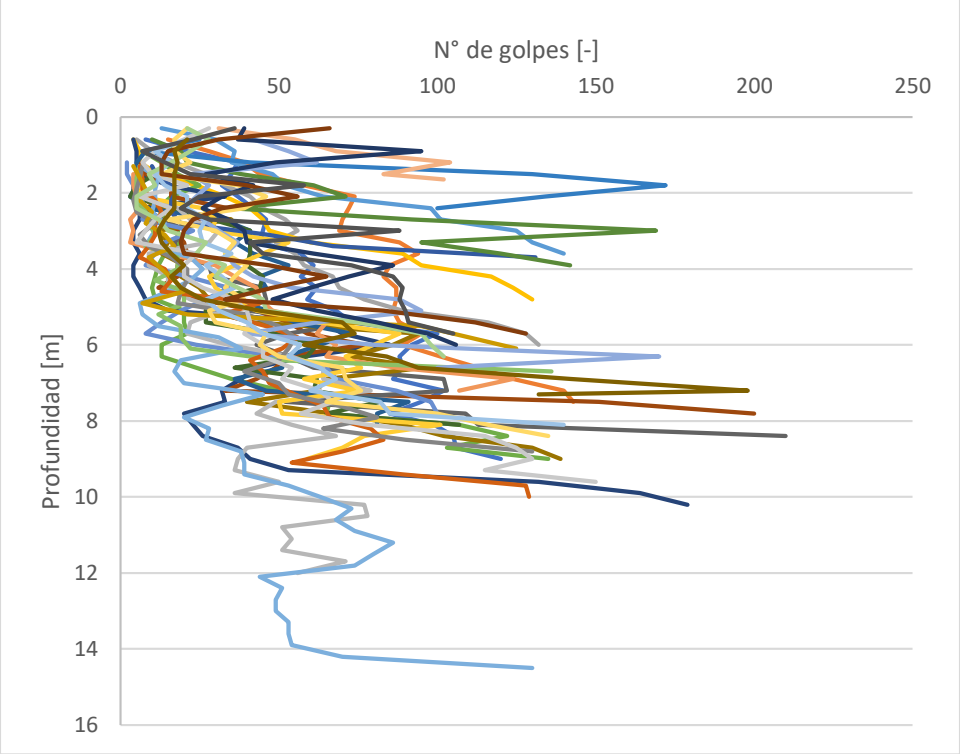


Figura 43: Sondaje Cono Dinámico - Totalidad de sondajes

En primera instancia se puede notar que existe una gran variabilidad en los resultados, tanto en cantidad de golpes para una misma profundidad como en los metros explorados entre los distintos sondajes.

Se realiza un ajuste de tipo logarítmico (el que presentó mejor ajuste) a los datos obtenidos, presentado en la Figura 44, obteniendo una relación entre la profundidad en el suelo y el número de golpes necesario para el avance, parámetro relacionado a la resistencia del suelo. Hay que tener en cuenta que también hay en el registro estratos que no contienen maicillo, lo que puede "ensuciar" el análisis realizado para el maicillo.

Se presenta en la Figura 45 el registro de número de golpes versus la profundidad, pero solo de los estratos maicillosos. Al comparar con la Figura 43 se puede ver que el grafico se limpia considerablemente, pero la variabilidad de los valores no parece disminuir.

En la Figura 46 se presenta nuevamente el ajuste logarítmico, pero sólo a los maicillos encontrados. Si bien la cantidad de datos es la misma, la variabilidad parece aumentar, esto indicado por el valor de R^2, por lo que no es posible establecer una ecuación que describa el comportamiento de un sondaje de Cono Dinámico para suelos maicillosos.

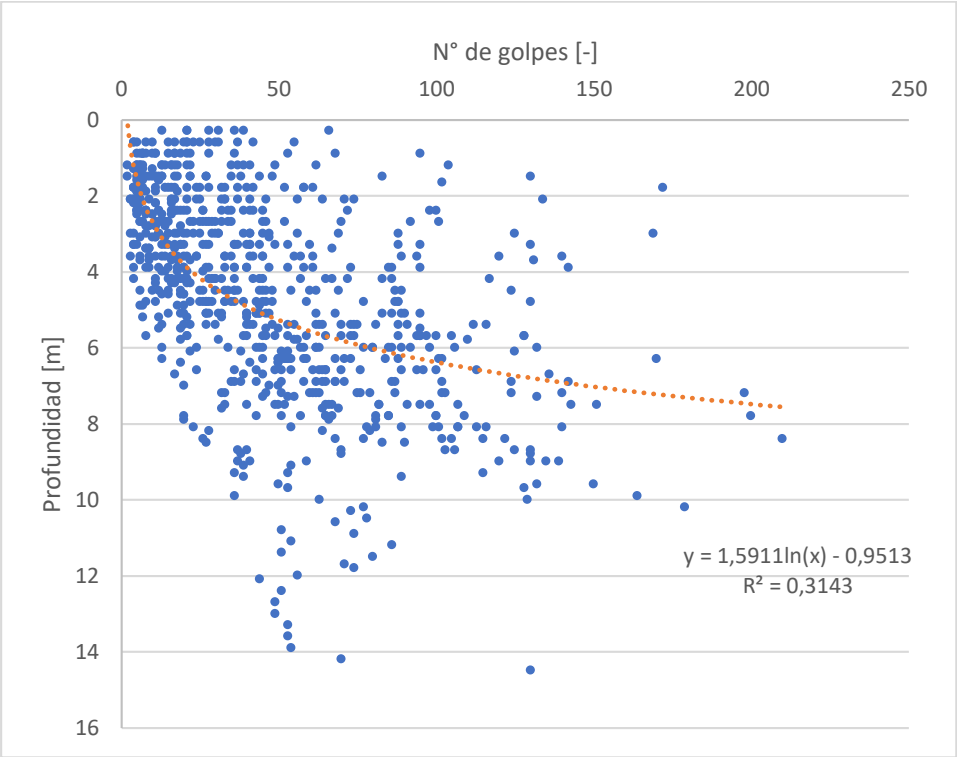


Figura 44: Sondaje Cono Dinámico - Ajuste logarítmico.

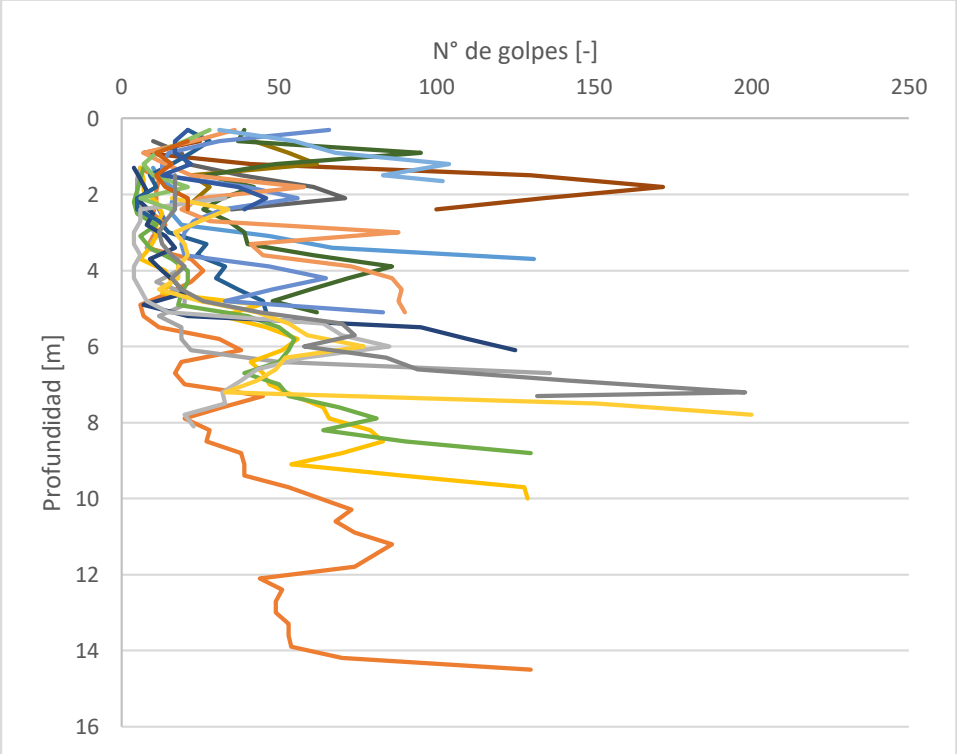


Figura 45: Sondaje Cono Dinámico - Sólo maicillo.

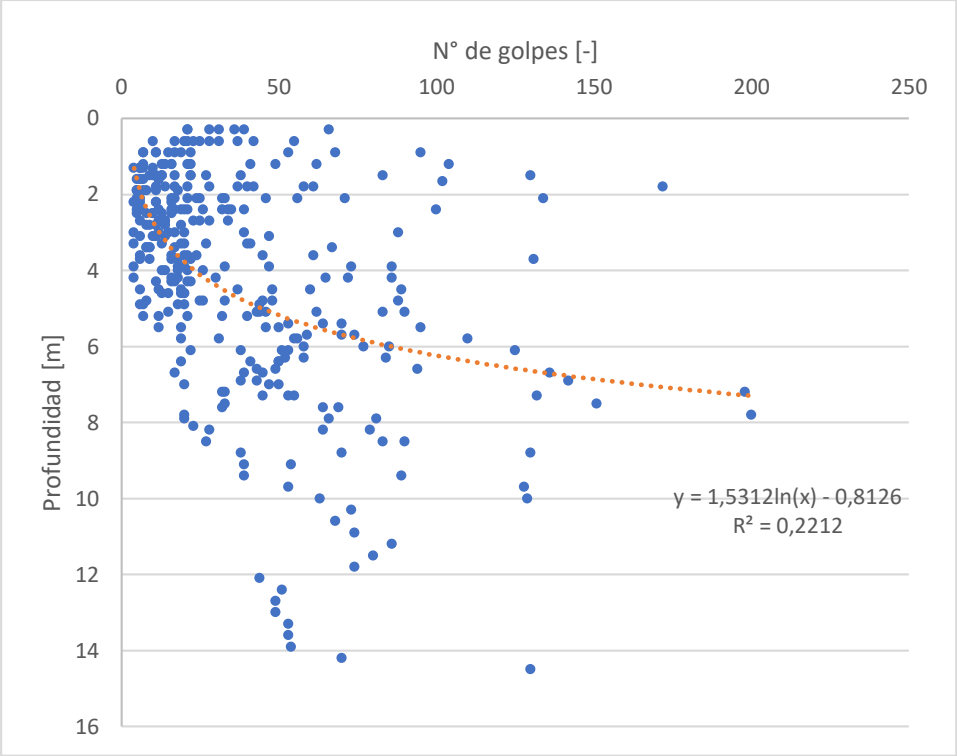


Figura 46: Sondaje Cono Dinámico - Ajuste logarítmico, sólo maicillo.

4.11- SPT

Tal como se muestra en la Tabla 5, se cuenta con 78 (24,5%) muestras extraídas mediante sondaje SPT. Los resultados de SPT corregidos (corrección por energía y confinamiento) se muestran en la Figura 47, donde se incluye la totalidad de cada sondaje.

Es necesario notar que no todos los sondajes contenían la información suficiente para su corrección (principalmente, datos de densidad natural), por lo que la información faltante se estimó en base a las densidades de maicillos conocidos y cercanos al lugar del sondaje en los casos necesarios.

Se elaboró la Figura 48 para poder analizar la totalidad de los datos, esta vez sin que estén ordenados o anexados a una muestra en específico. Lo primero que se puede ver es la gran dispersión de los puntos obtenidos, esto principalmente debido la variabilidad de los datos en los primeros metros de exploración de los sondajes, ya que se aprecia que, con los sondajes más profundos, el valor de los golpes NSPT (golpes corregidos) tiende a ser más estable.

Los estratos más superficiales suelen ser más heterogéneos, con presencia de organicidad, escombros, bolones o piedras, por lo que, al igual que en el análisis de sondaje de cono dinámico, se quitará del análisis a los suelos no maicillosos.

Estas causantes imposibilitan obtener una ecuación que describa de manera precisa los resultados de los SPT, por lo que el siguiente paso es considerar sólo los estratos de maicillo.

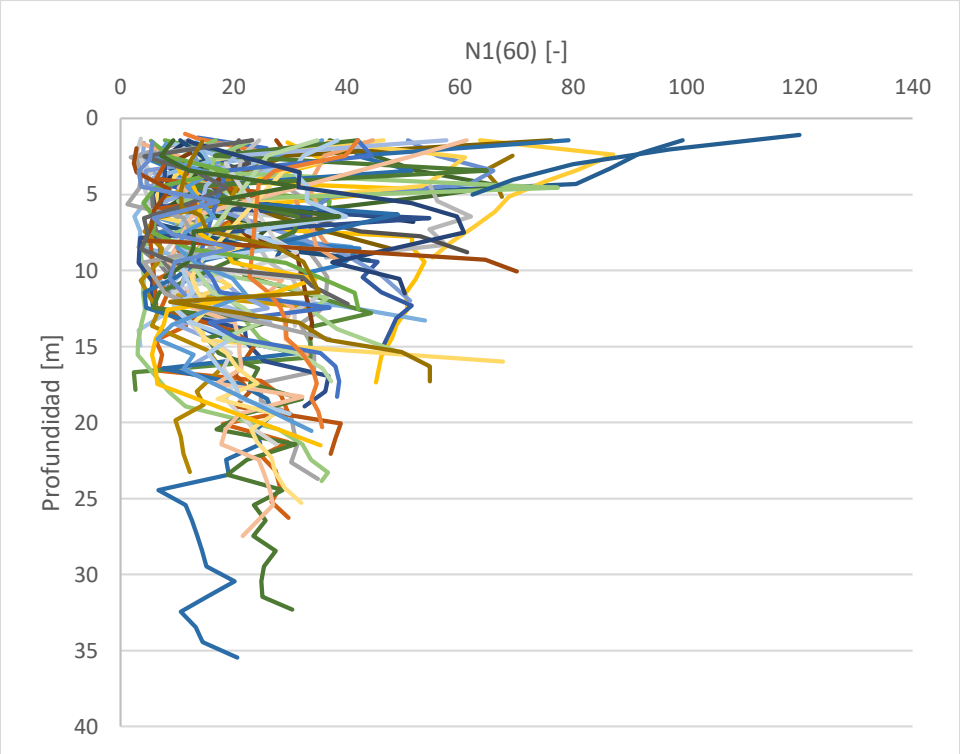


Figura 47: Sondaje SPT – Totalidad de Sondajes.

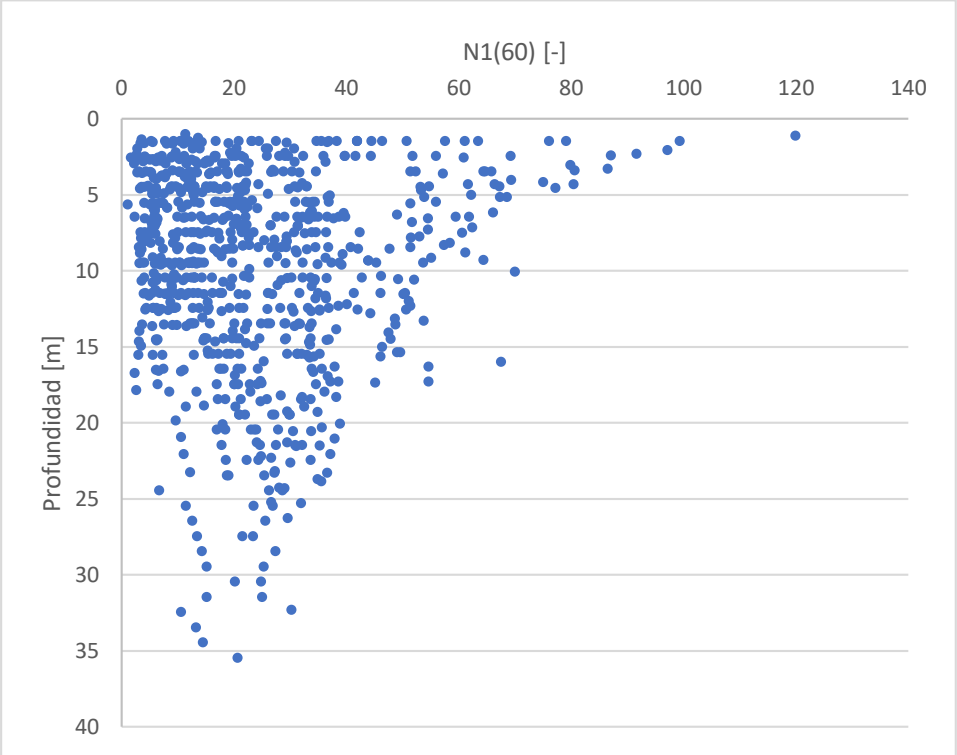


Figura 48: Sondaje SPT – Dispersión de los datos.

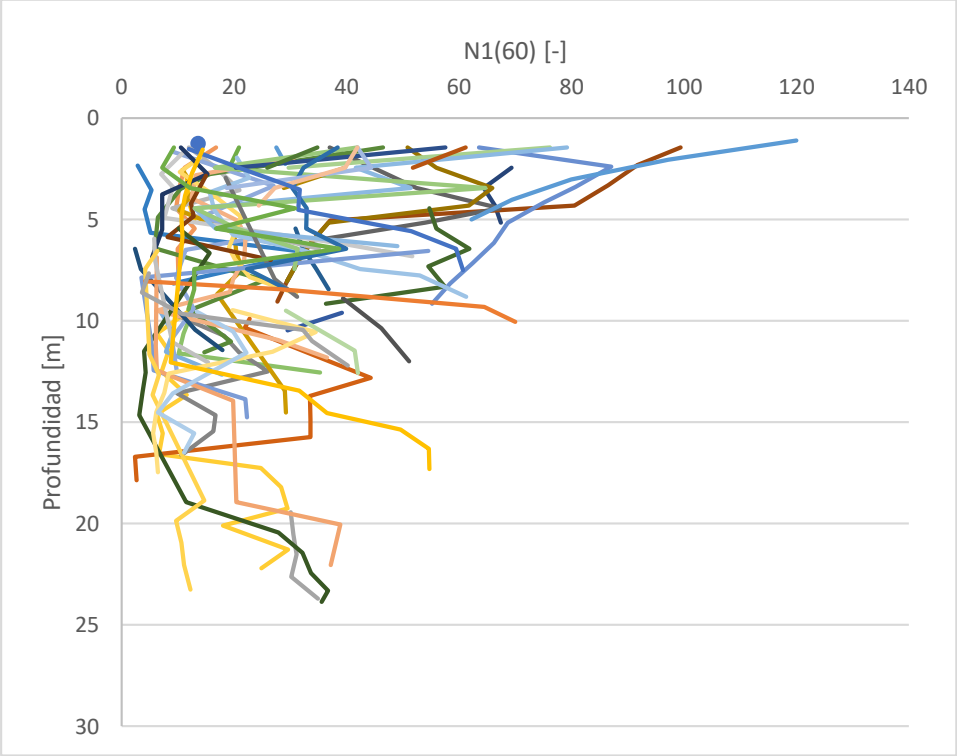


Figura 49: Sondaje SPT - Sólo maicillo.

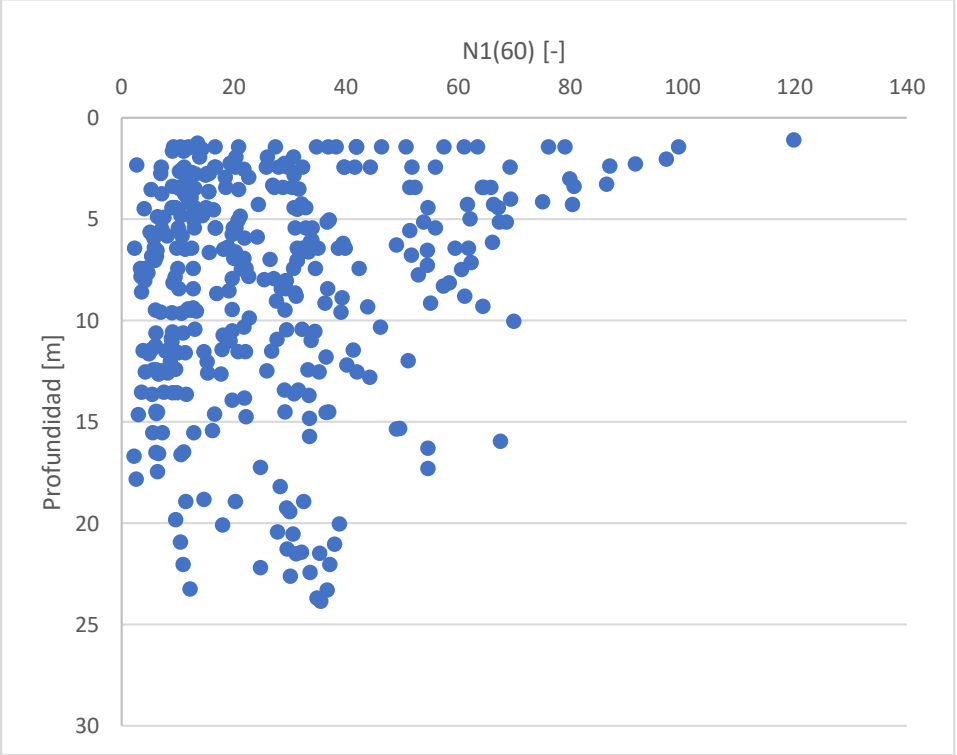


Figura 50: Sondaje SPT – Dispersión de los datos, solo maicillo.

En la Figura 49 se presenta nuevamente los resultados corregidos de los sondajes SPT, pero sólo de los estratos maicillosos. Se puede notar que se pierde algo de profundidad en los resultados, y que la variabilidad de los datos no se ve reducida. En la Figura 50 se presentan los puntos de manera individual, donde la variabilidad de los datos no se ve reducida.

Al calcular la elasticidad y ángulo de fricción de cada maicillo encontrado en los SPT, utilizando la ecuación de Kulhawy & Mayne (1990) (considerando las muestras como arenas con finos) para la elasticidad, y las fórmulas de Kulhawy & Maine (1990) y Wolff (1989) para el ángulo de fricción, se puede ver que la variabilidad de las lecturas interfiere con la posibilidad de obtener valores consistentes para una caracterización, como se puede ver en la Figura 51, por lo que es necesario encontrar valores que puedan representar a las muestras estudiadas.

Para ello, esta vez se simplifican las mediciones y se agrupan por metro en profundidad de los SPT completos para analizar por cuartiles, permitiendo obtener la Figura 52, donde se puede ver la variación de N1(60) con la profundidad. Aún se puede ver que existe cierta variabilidad en las mediciones, pero ahora se puede ver que, mediante un análisis de los cuartiles, existe un rango representativo de las mediciones: hasta los 12 metros, el N1(60) varía entre 9,8 y 31,7 y para rangos inferiores se ve que tiende a estabilizarse en un valor cercano a 26.

Algo similar ocurre con las estimaciones de la elasticidad, cuyos resultados, también por metro en profundidad, se pueden ver en la Figura 53, donde en los primeros metros varía entre 4,9 y 15,9 [MPa] y hacia los 25 [m] tiende a estabilizarse en los 13 [MPa] aproximadamente.

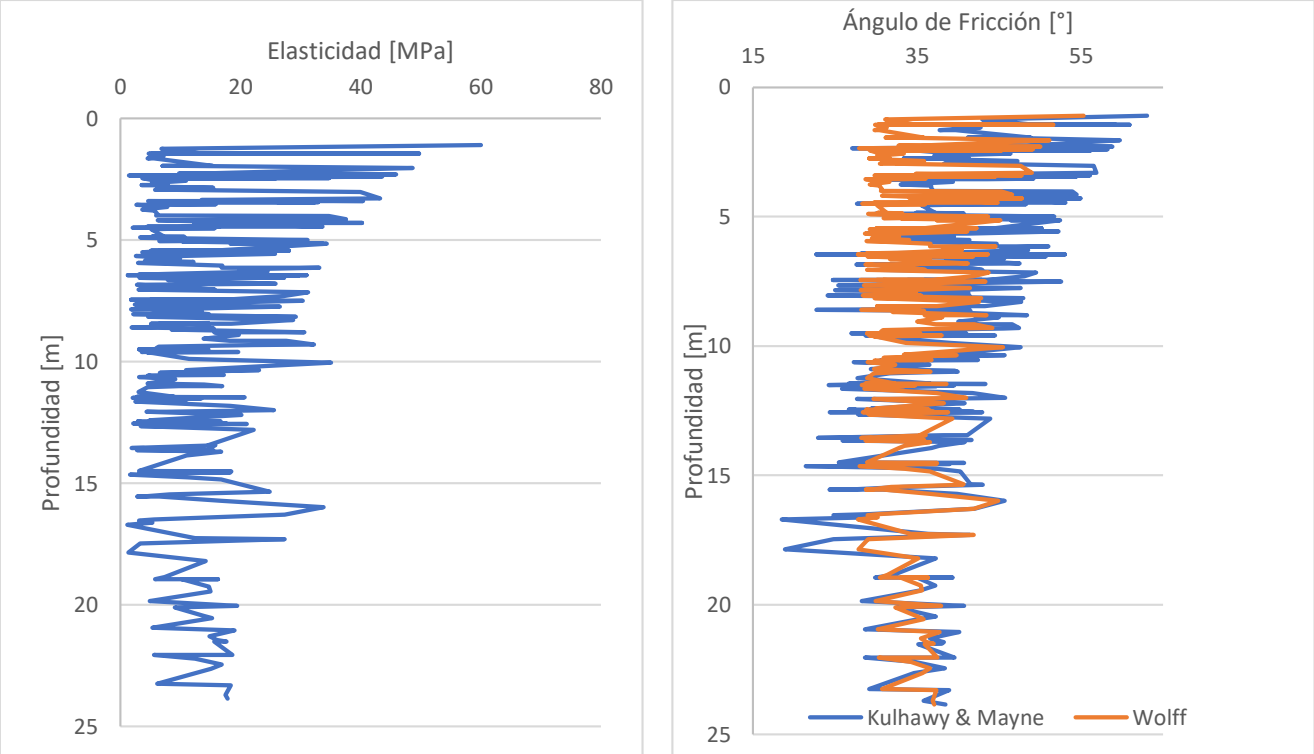


Figura 51: Elasticidad y ángulo de fricción para cada maicillo hallado en SPT.

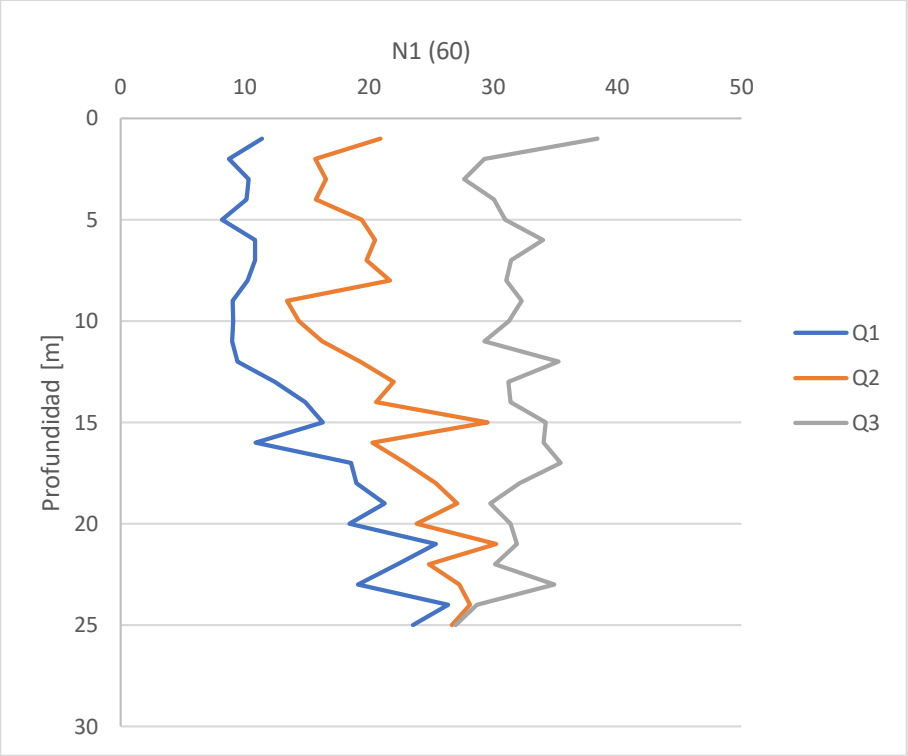


Figura 52: N1(60) v/s Profundidad - Cuartiles metro a metro.

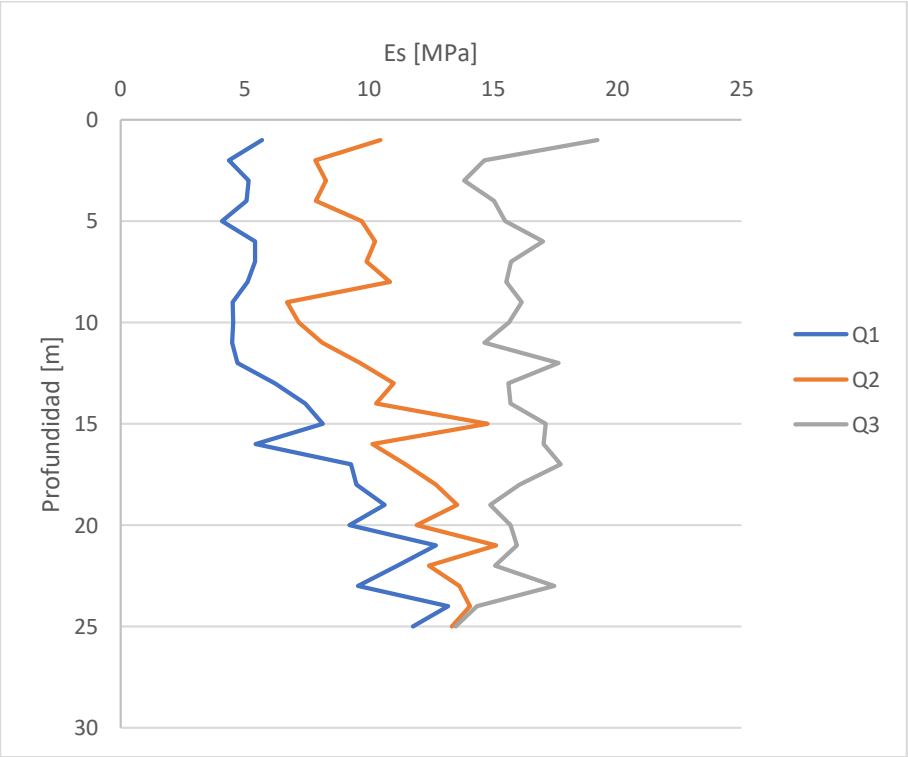


Figura 53: Elasticidad v/s Profundidad - Cuartiles metro a metro.

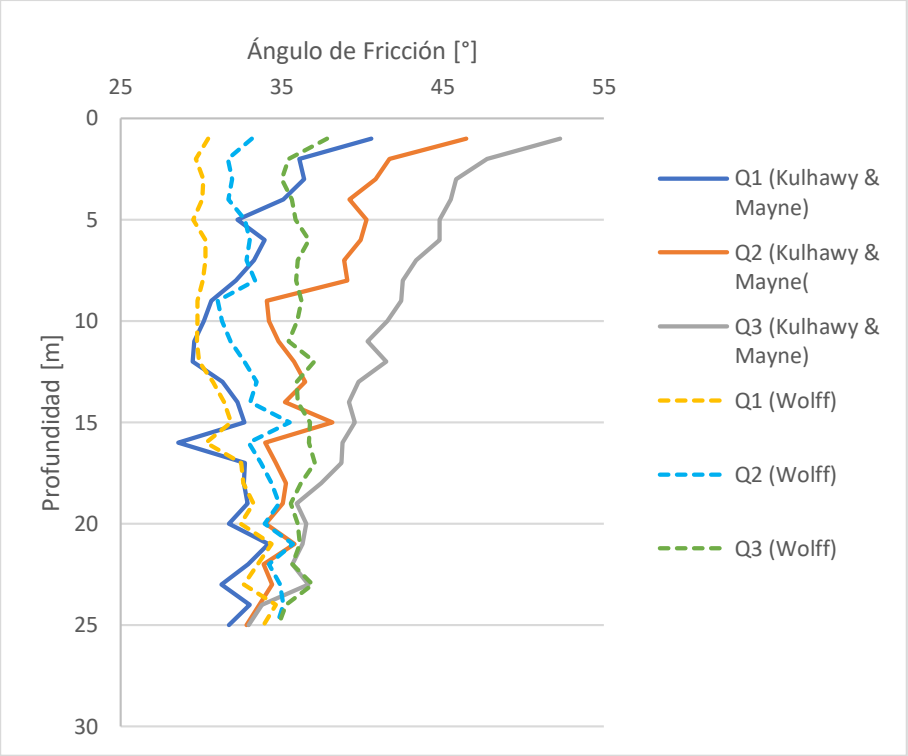


Figura 54: Ángulo de fricción v/s Profundidad – Cuartiles metro a metro.

En cuanto al ángulo de fricción, se realizó una estimación usando cuyos resultados se pueden ver en la Figura 54. Se puede ver que los resultados de Wolff son menos variables a lo largo de la prospección, variando entre 31 y 36°; mientras que Kulhawy dice que en los primeros metros los ángulos pueden llegar a ser muy grandes (sobre 50° para los casos más grandes), estabilizándose hacia los 20 [m] en 33°. Tener ángulos tan elevados para las muestras cercanas a la superficie es un indicio de una heterogeneidad notable en dichos estratos, por lo que deben ser vistos con cuidado.

Si el mismo análisis se realiza sólo a las muestras de maicillo, incluso metro a metro, la variabilidad crece demasiado, como se puede ver en la Figura 55. Para ambos parámetros, existe una discontinuidad apreciable posterior a los 15 [m] de profundidad, así como para los valores más grandes (cuartiles 2 y 3), lo que se puede explicar por la poca cantidad de sondajes (sobre todo a dicha profundidad de exploración) y a la presencia de partículas de sobretamaño que interfieren con las perforaciones.

A pesar de ello, los resultados son similares a considerar la totalidad de cada sondaje, pensando además que, como se dijo en el apartado 3, los suelos residuales no deberían considerarse aislados del resto del perfil explorado, considerando que SPT es un ensayo realizado in situ.

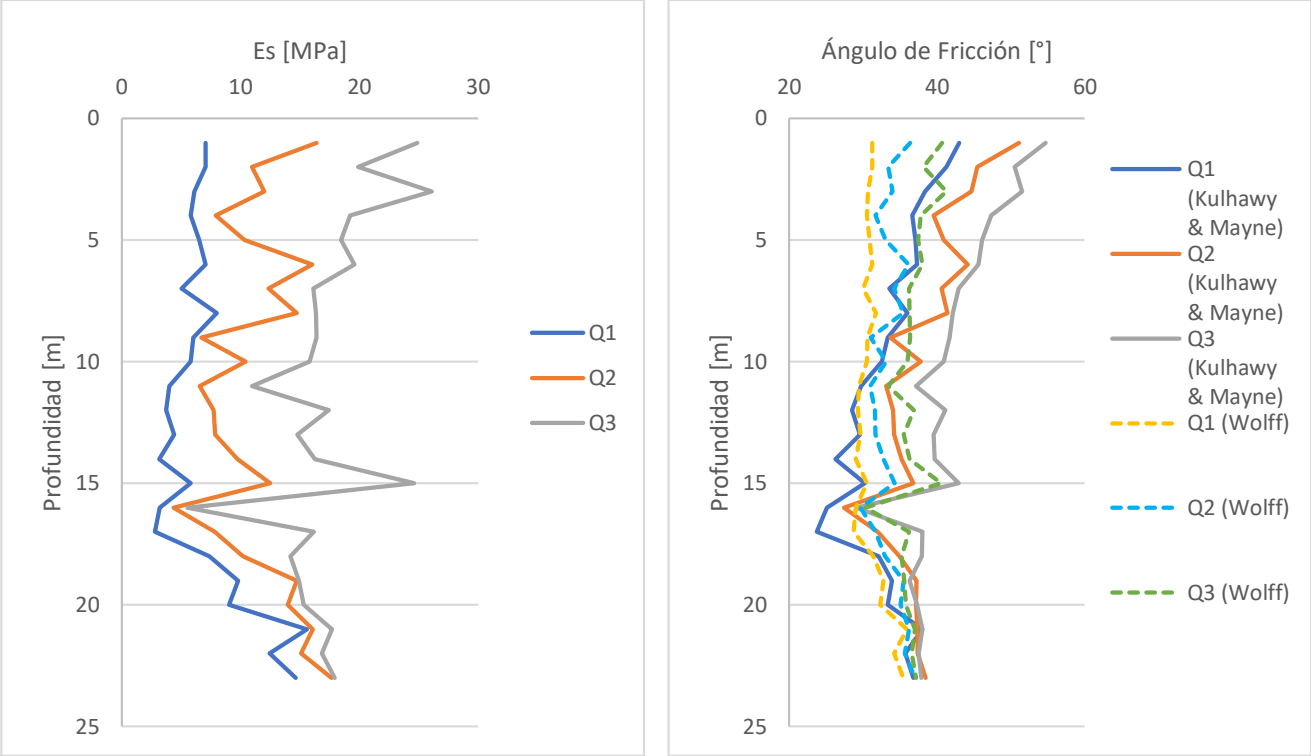


Figura 55: Elasticidad y Ángulo de Fricción - Sólo maicillo, cuartiles metro a metro.

Una comparación con los resultados de triaxial se muestra en la Tabla 14. Al analizar los resultados de la elasticidad del maicillo, el triaxial da mayores valores, lo cual puede deberse a varias razones, como la presión de confinamiento en los ensayos es mayor que la de los estratos, o el procedimiento de cálculo de la elasticidad mediante el SPT, basado una formula no pensada para maicillos, o inclusive el uso de los factores utilizados: se puede ver que al cambiar el valor de Ke en la fórmula de Kulhawy & Mayne, los valores de Es aumentan, llegando a valores comparables entre los de triaxial con s3=1 [kgf/cm2] con los de SPT calculados con Ke=10 y 15, valores utilizados para arenas limpias no consolidadas y sobre consolidadas, respectivamente, es decir, el maicillo no puede considerarse simplemente arena con finos.

En cuanto al ángulo de fricción, los valores de triaxial son ligeramente mayores que los del SPT, y las razones pueden ser las mismas que las mencionadas para la elasticidad: desde un confinamiento mayor en triaxial hasta las ecuaciones utilizadas (que en realidad están pensadas para arenas, componente principal en el maicillo promedio).

Tabla 14: Comparación de resultados entre Triaxial y SPT.

	Elasticidad [MPa]				**Ángulo de Fricción [°]**		
SPT	Ke	5	10	15		Q1	Q3
	Q1	7,3	14,6	21,9	Kulhawy	32,7	40,6
	Q3	15,9	31,8	47,6	Wolff	31,4	36,1
Triaxial		s3=0,5	s3=1	s3=2		Q1	Q3
	Q1	19,4	31,7	56,9	Medidos	39,6	42,5
	Q3	35,2	53,0	105,5	Calculados	38,9	42,7

El siguiente paso sería obtener nuevos valores para los modelos utilizados al calcular la elasticidad y el ángulo de fricción de los maicillos de SPT para poder predecir con mayor exactitud los valores obtenidos en laboratorio mediante Triaxial, pero entre la muestra de datos no se encontró ningún maicillo que tenga información tanto de Triaxial como de SPT, por lo que proponer valores en esta investigación sería extrapolar de manera poco confiable.

5. CONCLUSIONES DE ANÁLISIS

Como se ha podido ver a lo largo de los tópicos previos, el maicillo tiene características que son repetitivas y presentes en la gran mayoría de las muestras analizadas, pero hay casos donde no fue posible encontrar un patrón en sus cualidades.

Tabla 15: Resumen de propiedades del maicillo de la V Región.

Clasificación	U.S.C.S.	SM
	ASHTO	A-1-b (0)
Fracción Grava-Arena-Finos		
%G	%A	%F
15	80	25
5	65	10
Geometría granos	Angular	
Granulometría		
Malla	% que pasa	
1”	100	100
3/4"	99	100
3/8"	95	100
n°4	85	98
n°10	66	86
n°40	31	51
n°200	11	21
Plasticidad		
Maicillo No plástico		76%
Maicillo Plástico		24%
Límites de Atterberg		
LL	32	25
IP	10	4
Densidad		
D.N.H. [Tn/m3]	2,242	2,006
D.N.S. [Tn/m3]	2,066	1,841
Gs [Tn/m3]	2,765	2,696
Humedad Natural	13,5	6,6
Proctor Modificado		
DMCH [Tn/m3]	DMCS [Tn/m3]	Humedad óptima [%]
2,260	2,070	11,3
2,203	1,986	8,8
CBR		
95% Proctor Mod. [%]	30,9	20,5
Triaxial		
Phi [°]	42,7	38,9
C [kgf/cm2]	0,20	0,12
E50 [MPa]		s3 [kgf/cm2]
19,4	35,2	0,5
31,7	53,0	1
56,9	105,5	2
SPT		
E [Mpa]	14,6	31,8
Phi [°]	32,0	38,3

En la Tabla 15 se resumen las propiedades del maicillo, obtenidas mediante el análisis estadístico de cada ensayo. Notar que los valores entregados corresponden a los cuartiles 3 y 1 respectivamente, es decir, cada rango representa al 50% del maicillo más común encontrado.

De la estratigrafía se llega a que el maicillo promedio, obtenido de calicata, suele ser bastante común hasta los 2 o 3 [m] de profundidad, y para sondaje es posible encontrarlo hasta los 25 [m] de prospección. En composición de grava, arena y material fino que compone al maicillo, el aporte principal es arena, seguido de material fino.

La estructura de los estratos suele tener mala graduación, escasa presencia de pedruscos, y ser homogéneos. Los granos del maicillo son angulares en su gran mayoría, con textura de muestra granular y en ocasiones jabonosa (resbalosa). En cuanto a los finos presentes, estos suelen tener una dilatancia rápida, aunque por lo general el maicillo tendrá un nivel de plasticidad bajo o nulo.

La compacidad del maicillo es calificada como firme o muy firme, aunque la resistencia seca y húmeda a la disgregación es bastante pobre. El origen de las muestras, la gran mayoría es por meteorización in situ, además de ser formados a partir de rocas de tipo cuarzo, feldespato y granítica en general.

En otras características; el color suele ser café claro o amarillo grisáceo, sin presencia de cementación, sin salinidad, olor terreo. Suele existir una humedad no despreciable en las muestras, una capacidad de trabajabilidad estable, con poca o nula organicidad.

De la granulometría, fue posible encontrar una banda, bastante acotada, que representa a la mayoría del maicillo analizado, específicamente el 50% central de la muestra, tal como se mencionó en el apartado 4.2-.Los valores de la banda se muestran, nuevamente, en la Tabla 15, donde se muestra el porcentaje del material que pasa para cada tamiz.

De la plasticidad del maicillo, por regla general es un suelo no plástico, donde las muestras que no cumplen con ello son suelos clasificados como no compresibles. La compresibilidad del suelo suele derivar en deformaciones indeseadas del mismo en el mediano o largo plazo, lo cual es bastante difícil de prever y predecir, por lo que el hecho de que ninguna muestra esté en la zona de alta compresibilidad es un dato muy apreciable, que habla del buen comportamiento que posee el maicillo como material de relleno, por ejemplo, pese a la posibilidad de que la plasticidad sea considerable.

En cuanto a la clasificación U.S.C.S., el maicillo común es reconocido como SM, mientras que en el sistema AASHTO suele ser del tipo A-1 o A-2, es decir, un suelo con una calidad como subrasante entre buena y excelente.

De la densidad natural de las muestras, se tiene que no todos los maicillos varían su densidad, entre húmeda y seca, de la misma manera, aunque la variabilidad de los datos en general es poca, obteniendo como valores representativos los que se indican en la Tabla 15. para los valores de la Gravedad Específica o Gs ocurre lo mismo, los que se indican en la misma tabla.

Además, se llegó pudo obtener la ecuación (1) que relaciona las tres variables, capaz de calcular el valor de Gs de un maicillo a partir de los valores de sus densidades naturales, tal como se muestra en la sección 4.5-.

En cuanto a la humedad natural se tiene un rango de valores bastante acotado, a pesar de los factores identificados que introducen un grado importante en la variabilidad del parámetro, con valores entre 13,5 y 6,6%.

Respecto a los resultados del Proctor Modificado, se tiene que la mayoría de los ensayos son realizados con el método D, con un rango de valores de densidades máximas compactadas bastante acotadas, como se ve en la Tabla 15.

Lo mismo se puede establecer de la Humedad Óptima, la cual varía en un rango entre el 11,3 y 8,8%. Como se mostró en el análisis de los datos en el apartado 4.7-, no parece existir alguna relación entre la humedad natural y óptima de la muestra.

De igual manera, se comparó los valores de densidad natural y densidades máximas compactadas, para los casos húmedos y secos, donde se tampoco se encontró una relación de proporcionalidad convincente entre dichos valores, con valores de densidad compactada ligeramente mayores a los naturales.

Finalizando con el ensayo Proctor, se estableció una relación entre las densidades máximas compactadas y la humedad óptima, generando una ecuación capaz de describir los casos estudiados con una buena correlación. Dicha ecuación (5), válida para los maicillos de la V Región, se vuelve a presentar a continuación:

$$W_o[\%] = 98{,}686 * \frac{D.N.H}{D.N.S} - 98{,}525 \qquad (5)$$

En cuanto a la determinación de CBR, el 50% central de los datos obtuvo un CBR entre 20,5% y 31%, lo cual en la literatura [18] es clasificado como bueno, con un uso para base o sub-base.

Se intentó establecer una serie de relaciones entre distintos parámetros involucrados en el proceso, pero sin llegar a ningún resultado contundente. En resumen, se puede decir que buscar un modelo más elaborado y con más variables introduciría demasiadas incertidumbres, es decir, hay que manejar con cuidado en cuanto a la relación del valor final de CBR con los distintos parámetros que definen a cada suelo, ya que dicho valor no depende de un solo parámetro. Se elaboró un modelo que busca predecir el valor de CBR a partir de otras propiedades del maicillo, sin obtener resultados satisfactorios.

Respecto al ensayo de compresión Triaxial, los resultados de laboratorio indican que los valores de ángulo de fricción y cohesión se tiene un rango de valores entre 38,9° a 42,7° y 0,12 a 0,2 [kgf/cm2] respectivamente, mientras que el tipo de falla más usual es Semi plástica.

Además, se realizó un análisis de las trayectorias de tensiones, aunque sólo de los Triaxial tipo CID (los tipos UU y CIU no poseen información de la presión de poros, por lo que no se pueden obtener valores efectivos), llegando a valores de ángulo de fricción y cohesión iguales o muy similares a los obtenidos en laboratorio para la mayoría de los casos, los que se muestran en la Tabla 15, a partir de los cuales se puede inferir que el maicillo se comporta como arena densa al ser confinado [17].
Finalizando con el ensayo Triaxial, a partir de los valores obtenidos de las trayectorias de tensiones, se elaboró dos modelos para predecir los valores de Phi y C (ecuaciones (3) y (4), expuestas en el apartado 4.9-) según distinta información de los ensayos característicos, y

aunque se obtuvieron buenas correlaciones, se deben usar con precaución debido a la cantidad de muestras disponibles para su elaboración.

En cuanto a la elasticidad presentada en las probetas, se tiene una gran variedad de valores los cuales dependen de las distintas presiones de cámara, cuyos rangos se muestran en la Tabla 15, variando desde los 19,4 [MPa] con una presión de 0,5 [kgf/cm2] hasta 105,5 [MPa] a 2 [kgf/cm2].

Para los sondajes, ya sea de Cono Dinámico o SPT, se tiene la presencia de una gran variabilidad de registros, donde n° de golpes no está estrictamente relacionado a la profundidad, existiendo gran diversidad de valores, donde la presencia de suelos no maicillosos parece tener poca influencia en la variabilidad de los datos de los maicillos, si no que la variabilidad de valores registrados se debe exclusivamente a las propiedades mismas que puede presentar el maicillo en sí, además de factores externos o locales propios de cada medición en cada sondaje.

Simplificando las mediciones de los SPT se obtuvieron resultados de elasticidad y ángulo de fricción, los cuales se compararon con los de triaxial: en cuanto a los ángulos, en general las muestras in situ tienen valores algo menores que las probetas de laboratorio (6° menos), mientras que la elasticidad da bastante menor, siendo comparables con las de triaxial de 0,5 [kgf/cm2] (5 [MPa] menos), pero bastante alejado de los valores obtenidos con mayor presión: de esto se concluye que el maicillo no es sólo arena con finos, sino un producto más complejo que una simple combinación de material granular.

REFERENCIAS

[1] - https://www.bancomundial.org/es/country/chile

[2] - https://www.mop.cl/papel/descargables/JMSanchez.pdf

[3] - Toro, K. (2007). Influencia de las características geológicas en las propiedades geotécnicas de granitoides jurásicos y suelos asociados en la ruta 68. Memoria de Título para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

[4] – Rodriguez, P. (2015). Caracterización geomecánica y mineralógica del maicillo en la cordillera de Nahuelbuta. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción.

[5] - https://sociedadgeologica.cl/que-es-el-batolito/

[6] - BRAND, E.W. (1985). Predicting the performance of residual soil slopes. In Proc., 11th International conference on soil mechanics and foundation engineering, San Francisco, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, Vol. 5, pp. 2541-2578.

[7] - Suárez Díaz, Jaime. Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales © 1998, Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.

[8] – Jaime Suárez. Deslizamientos. Tomo 1: Análisis Geotécnico. Capítulo 10.

[9] - Poblete, M. (1980). Posibilidades de utilización de arenas-cemento en bases de pavimentos. Vol. 21(2), septiembre. Revista del Idiem.

[10] – Proyecto de recopilación de experiencias con suelos chilenos – Sochige

[11] - SOTO, J. E., 2000. Utilización del maicillo en la confección de terraplenes de gran altura. Memoria de Titulo. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.

[12] – Cabrera, T. (2007). Características geotécnicas de los suelos residuales del batolito de la cordillera de la costa. Memoria para optar al título de ingeniero civil. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

[13] - Castro, A. (2010). Técnicas de protección de taludes viales utilizadas en la zona central de Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

[14] - Fernández, W. (2018). Evaluación probabilística de la estabilidad de taludes en suelo residual de roca granítica mediante la simulación de Monte Carlo. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Geólogo y al grado de Magister en Ingeniería Geotécnica. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción.

[15] - Villalobos, S. (2011). Análisis y diseño de una excavación apernada en un suelo residual de Concepción. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción.

[16] – Araujo, W. (2014). Ecuaciones de correlación de CBR con propiedades índice de suelos para la ciudad de Piura. Tesis de pregrado no publicado en Ingeniería Civil. Universidad de Piura. Facultad Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.

[17] – Fundamentos de Ingeniería Geotécnica 4° Ed., Braja M. Das. Tabla 7.1 Valores típicos del ángulo de fricción drenado para arenas y limos.

[18] – Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil, Joshep E. Bowles, 1981.

Anexo 1.- Estratigrafía

Con la información extraída de la descripción estratigráfica disponible, tanto calicatas como sondajes, fue posible generar los gráficos del presente anexo.

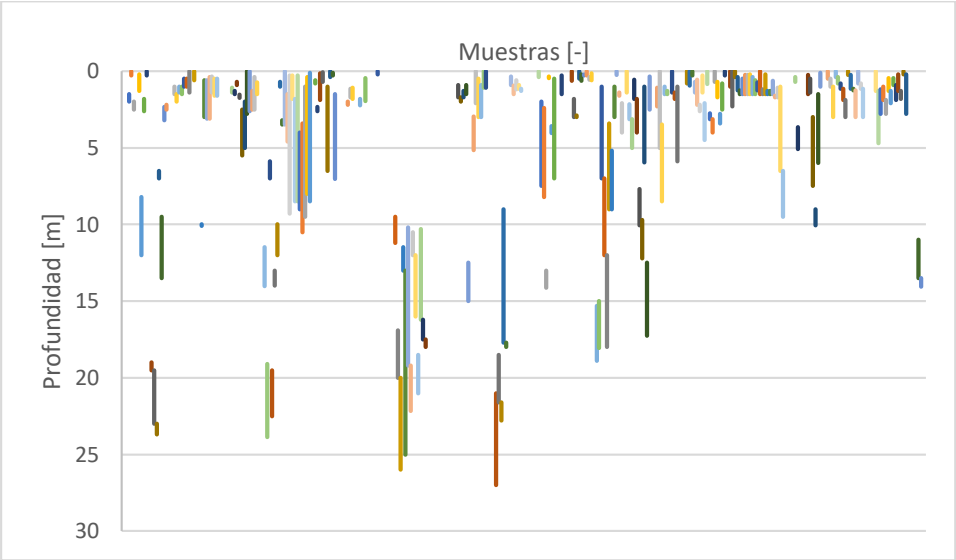


Figura 57: Profundidad de las muestras de maicillo.

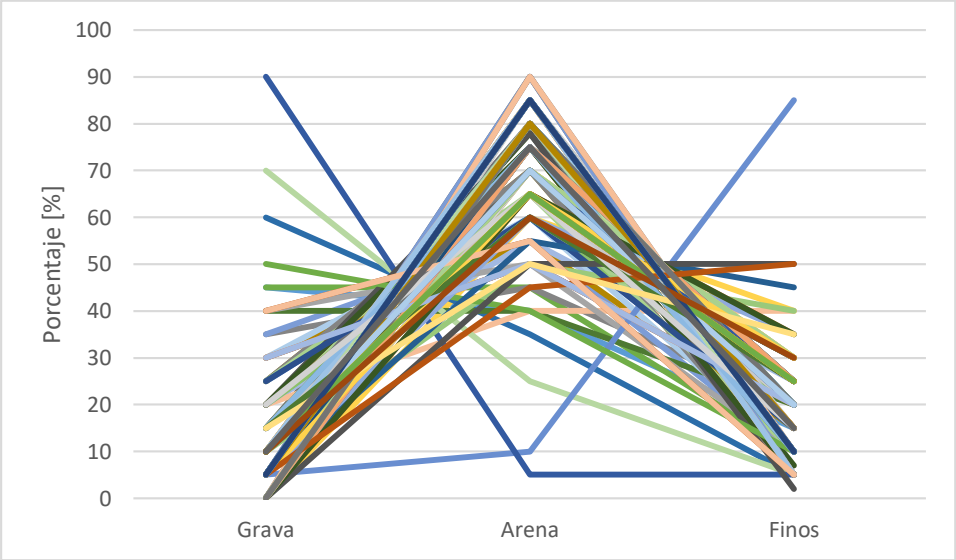


Figura 58: Composición de muestras de maicillo según fracción de arenas, gravas y partículas finas.

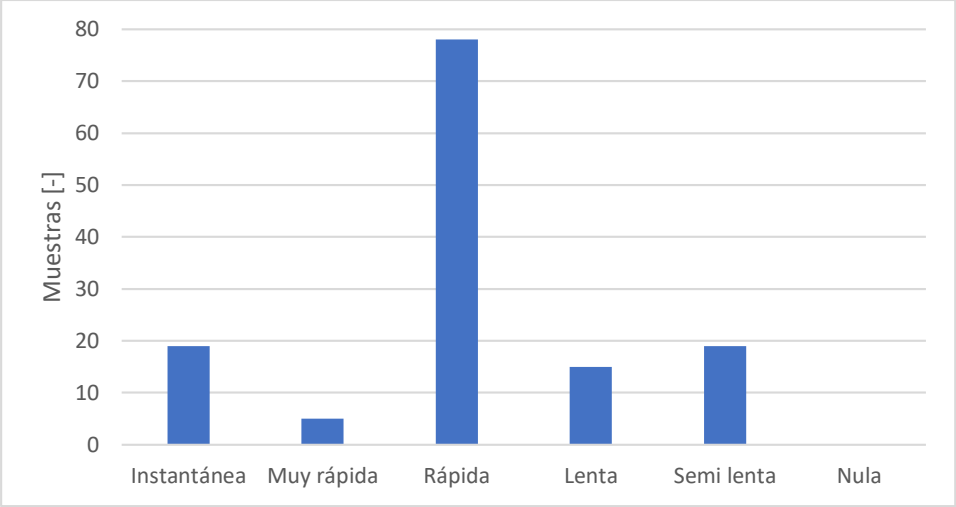


Figura 59: Dilatancia de los finos presentes en las muestras maicillosas.

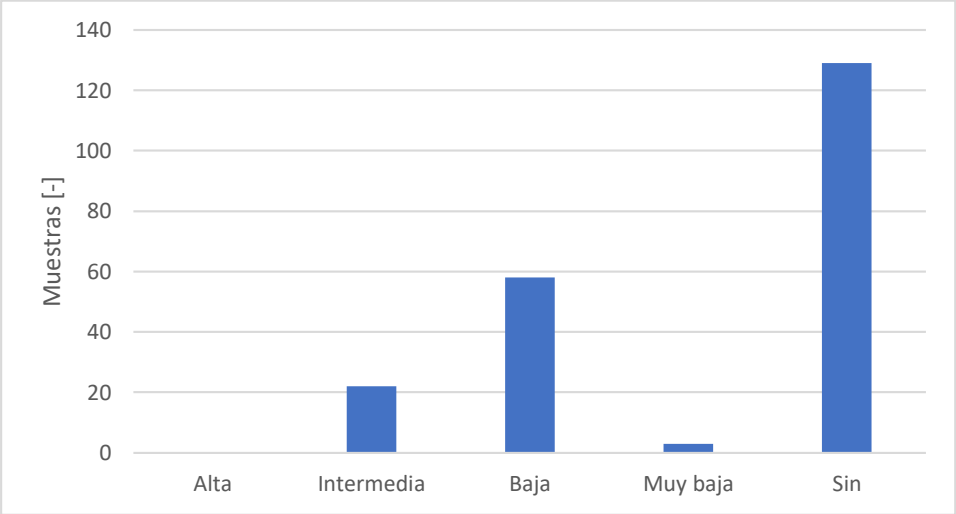


Figura 60: Plasticidad de los finos en las muestras maicillosas.

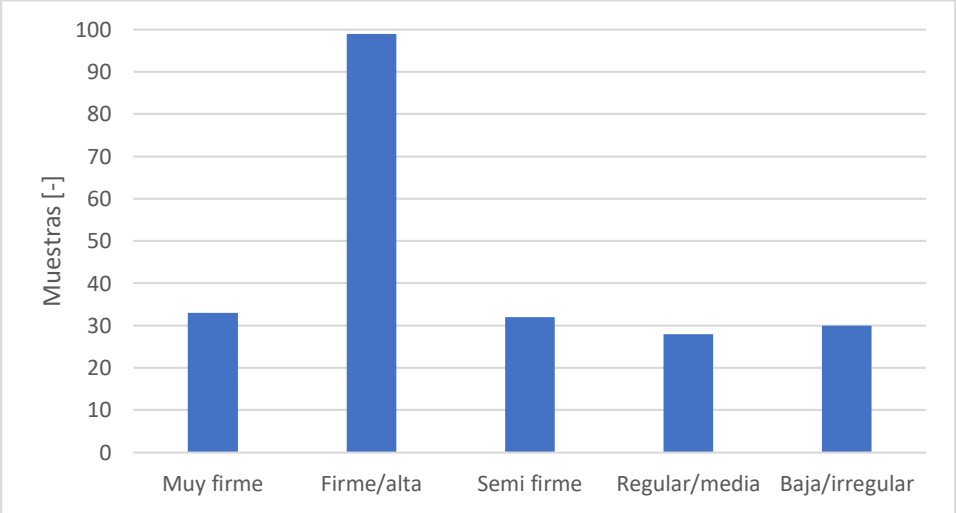


Figura 61: Compacidad observada en las muestras de maicillo.

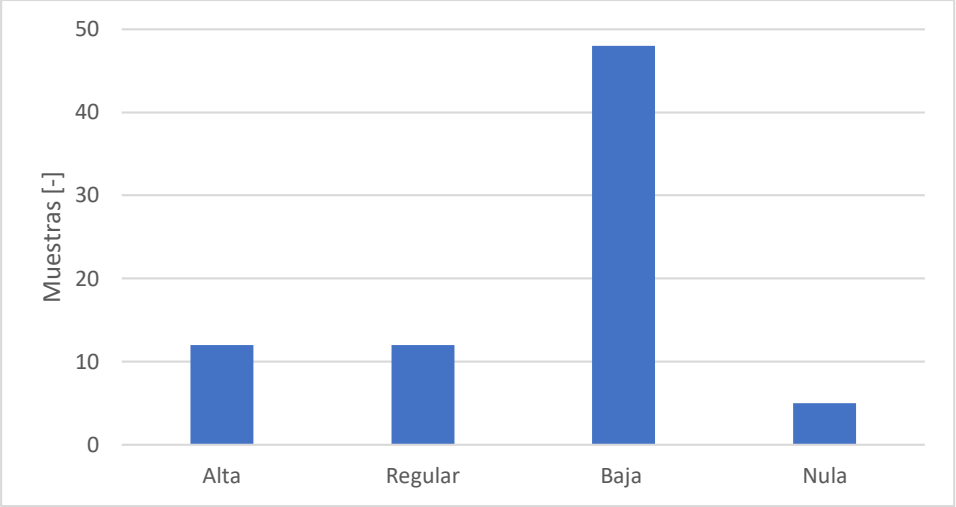


Figura 62: Resistencia de las muestras sin humedad.

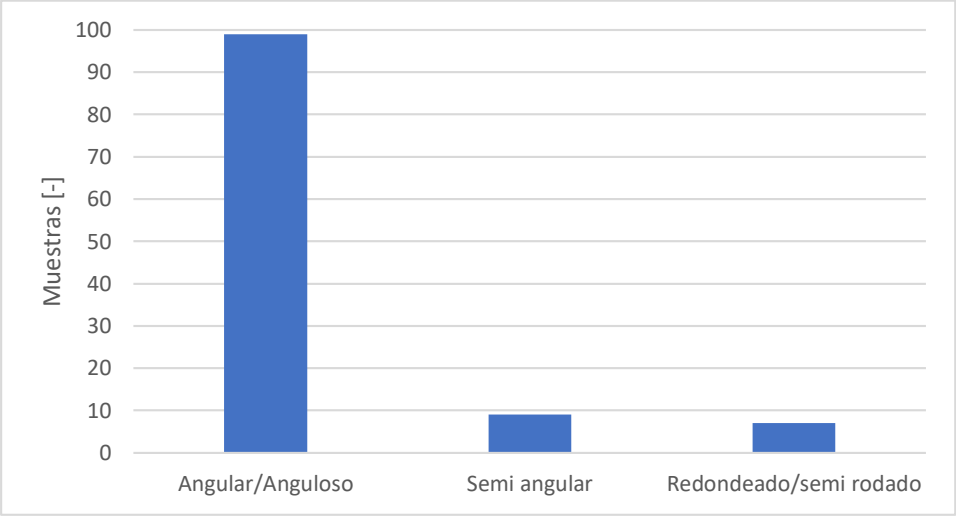


Figura 63: Geometría identificada en los granos.

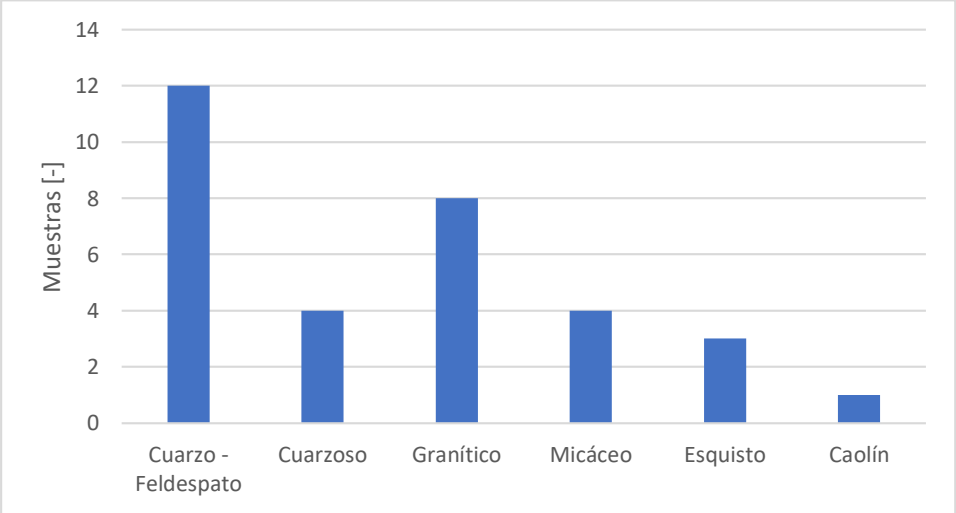


Figura 64: Origen de los maicillos en cuanto a tipo o composición de la roca.

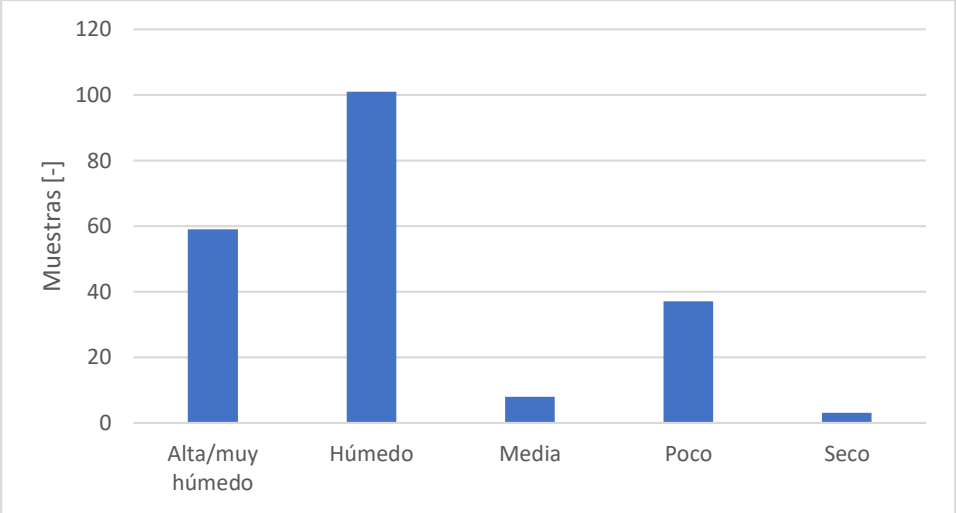


Figura 65: Humedad natural apreciada en las muestras.

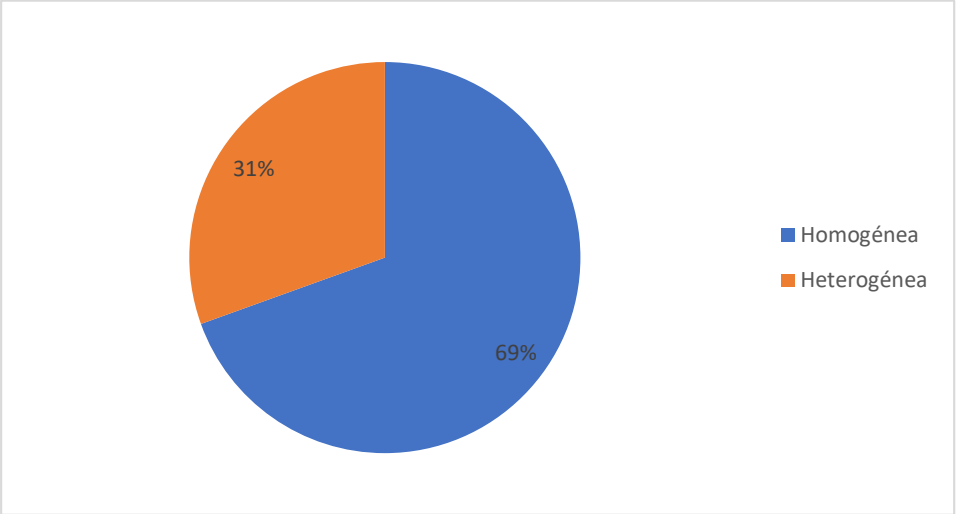


Figura 66: Tipo de estructura del maicillo o del horizonte al que pertenece.

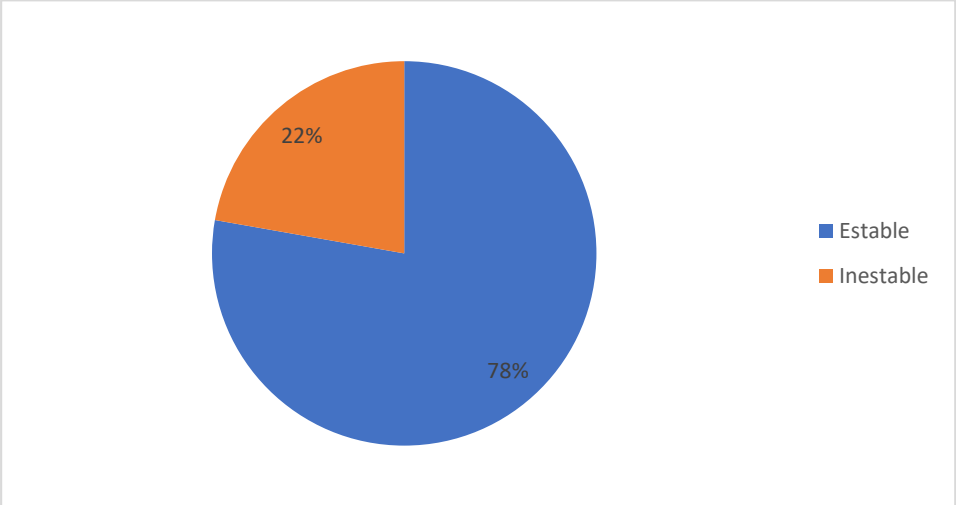


Figura 67: Trabajabilidad observada del maicillo o del horizonte al que pertenece.

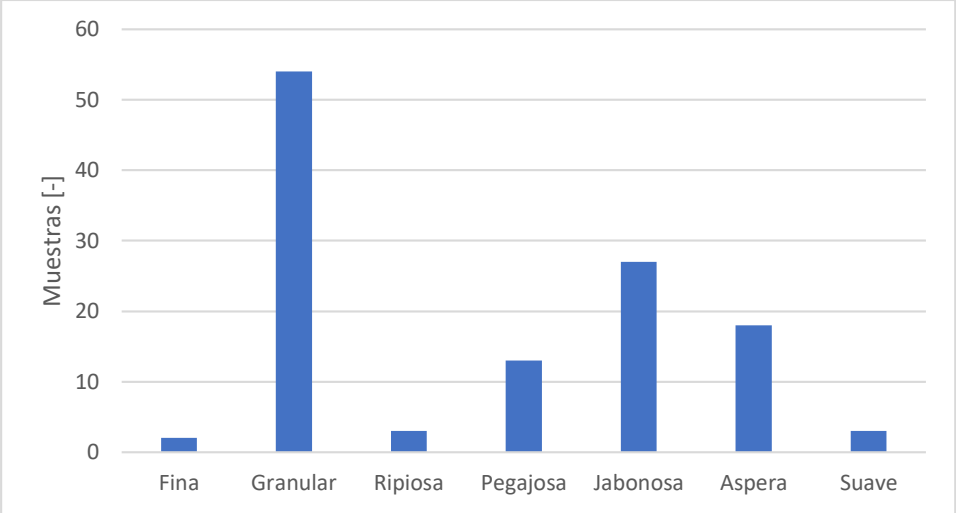


Figura 68: Texturas de las muestras.

Anexo 2.- Relación entre Densidad Natural y Gs

Dada la existencia de casos en donde no se tiene a la vez, valores de densidad natural y gravedad específica, se propone buscar una relación entre ellos. En la base de datos se tiene 61 muestras con información de ambos aspectos, a partir de las cuales se construyó una ecuación descriptiva, procedimiento que se indica a continuación.

Analizando datos de densidades naturales húmedas y secas, se notó que no todos los maicillos se comportan de la misma manera, no todos tienen la misma relación entre sus densidades, por lo que, si el valor de Gs depende de la densidad, debería hacerlo de ambos valores.

Se propone la existencia de una relación entre las densidades naturales y el valor de Gs, representada por la ecuación 7:

$$Gs = \frac{D.N.H}{D.N.S} * B \tag{7}$$

Donde:

- $D.N.H$: Densidad natural húmeda de la muestra
- $D.N.S$: Densidad natural seca de la muestra
- $B = B(D.N.S., D.N.H)$: Factor de proporción entre la razón de densidad natural y Gs.

A partir de los datos de los que se tiene registro, se puede despejar y obtener un valor de B para cada caso. Calculados los valores, se realiza un estudio estadístico de la distribución de los valores, lo que se muestra en la Figura 69 y Tabla 18.

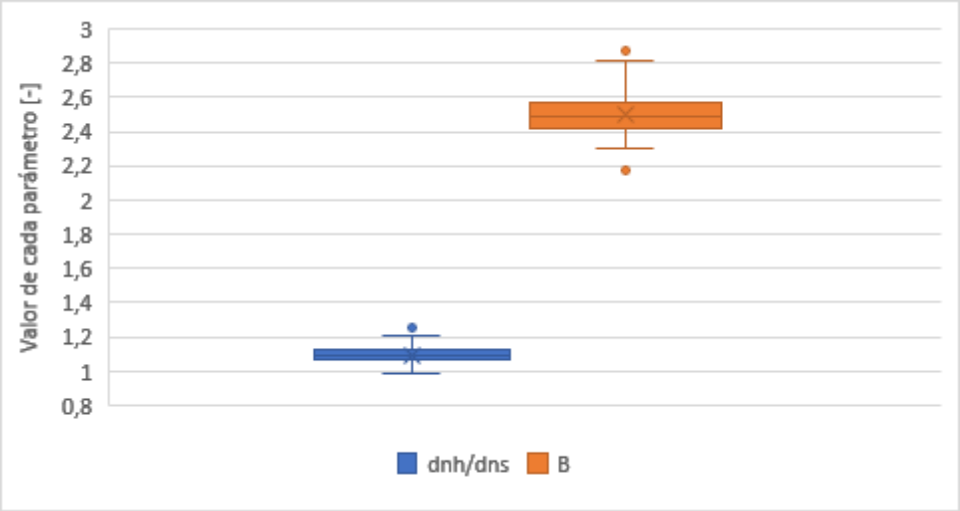


Figura 69: Valores de DNH/DNS y B - Diagrama de Caja y Bigote.

Como se puede ver, tienen una distribución similar a los datos que les dan origen. Dada la variabilidad de los valores de B, se entiende que éste también debe depender del tipo de suelo, específicamente de los valores de densidad natural, que es la base del presente modelo.

Tabla 18: Valores estadísticos de la distribución de parámetros DNH/DNS y B.

Valores parámetros	DNH/DNS	B
Max	1,2489	2,8729
Promedio	1,0930	2,5017
Min	0,9912	2,1764
Q3	1,1209	2,5746
Q2	1,0860	2,4891
Q1	1,0619	2,4168

Con los nuevos resultados, se busca una relación de dependencia del parámetro B con las densidades naturales, lo que se muestra en la Figura 70, donde se muestra también la ecuación de ajuste lineal de la relación, donde el valor de R^2 indica que es un buen ajuste, pero podría ser mejor.

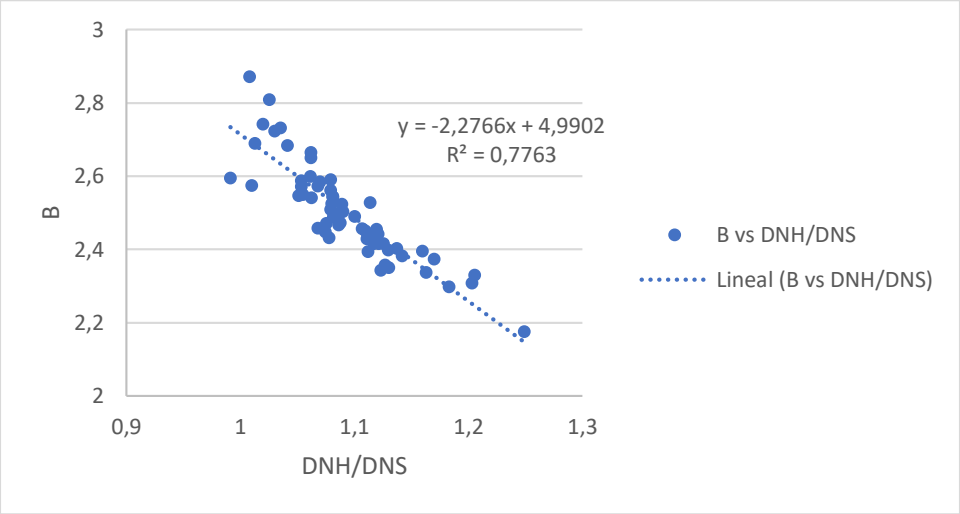


Figura 70: Relación entre las Densidades Naturales y parámetro B.

Una vez obtenidos los parámetros, se comprueban las ecuaciones: a partir de los valores de densidad natural medidos se puede obtener una estimación de B y posteriormente una estimación de Gs para cada caso. Luego se calculó la diferencia entre el Gs real y el estimado, lo que se muestra en la Figura 71.

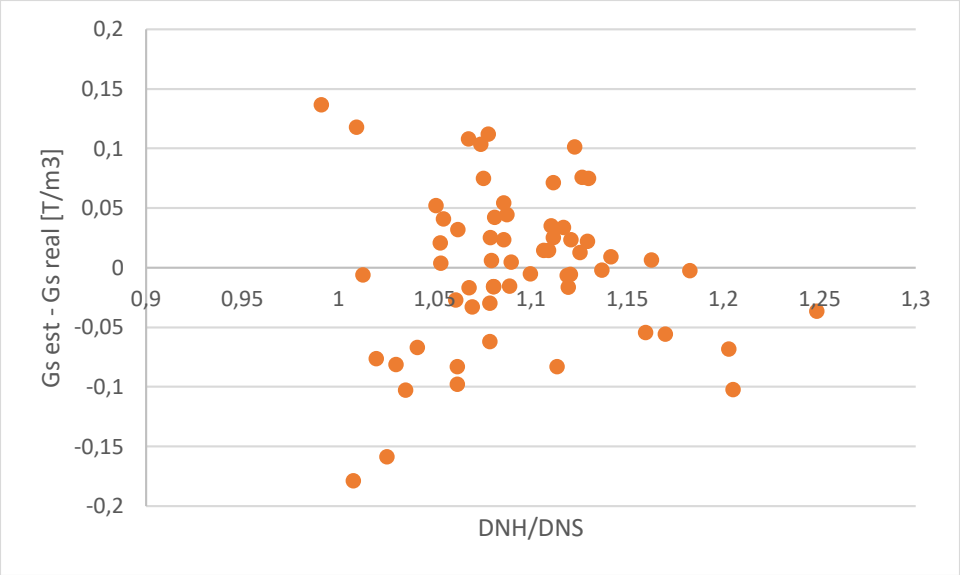


Figura 71: Diferencia entre los valores de Gs real y estimados.

Se puede ver que existe una variabilidad considerable en los valores, del orden de hasta 0,2 [T/m3], la cual parece ser más pequeña para valores de $\frac{D.N.H}{D.N.S}$ mayores. Una diferencia de 0,2 [T/m3], comparado con un valor de Gs del orden de 2,7 [T/m3] representa un error de un 7,4%, lo cual es relativamente pequeño para una estimación de este tipo.

Finalmente, el modelo que describe la relación de la gravedad específica Gs con las densidades naturales húmedas y secas, sólo valido para los maicillos de la zona en estudio, es la ecuación 8:

$$Gs = \frac{D.N.H}{D.N.S} * \left(-2{,}766 * \frac{D.N.H}{D.N.S} + 4{,}9902\right) \quad (8)$$

Anexo 3.- Relaciones derivadas del Proctor Modificado

Dada la similitud de la distribución de las humedades natural y óptima, se busca una relación entre ellas. De la base de datos, sólo se tiene 16 muestras con información de ambos parámetros, un 5% respecto al total del maicillo recolectado. Los datos se presentan en la Figura 72, donde se ve que el patrón de comportamiento parece indicar que la humedad óptima suele ser mayor que la natural, salvo algunos casos anómalos.

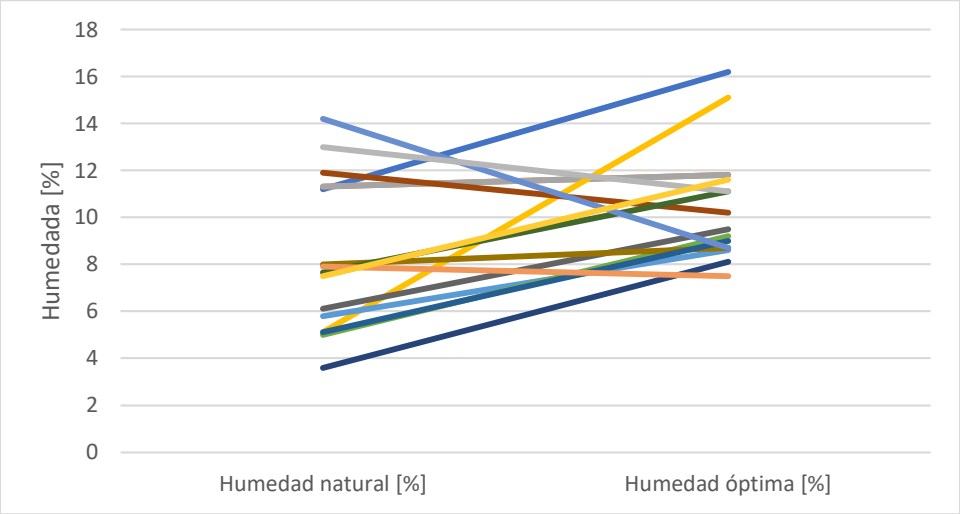


Figura 72: Relación entre Humedad Natural y Óptima.

Se intenta establecer una relación de linealidad entre ambos parámetros, lo cual se presenta en la Figura 73, donde se ve que, al forzar el cruce por el origen (línea naranja), se obtiene una correlación bastante decente entre ambas medidas, según se ve en el valor de R^2, pero que, sin forzar el paso por 0 (línea azul), la correlación es muy pobre.

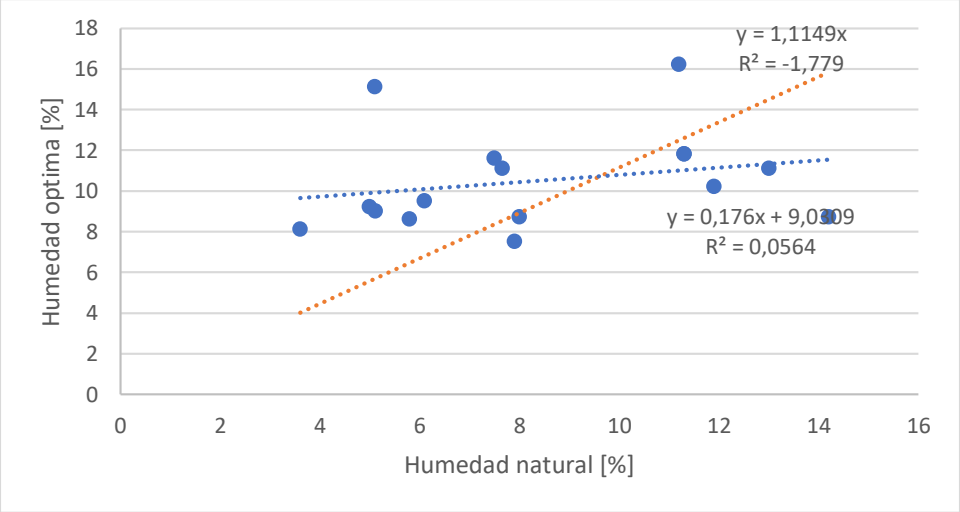


Figura 73: Relación de linealidad entre Humedad Natural y Óptima.

Visualmente, la dispersión de los datos es considerable. Una razón puede ser la poca cantidad de maicillos con la información requerida, muestras que pueden no ser representativas del

maicillo común, además de una evidente dispersión de los datos y sus relaciones, pero es muy pronto para establecer una relación al respecto.

Un segundo análisis es comparar los valores de las densidades naturales con las máximas compactadas, lo que se ve en la Figura 74. Con solo 13 muestras que tienen ambos parámetros medidos, y forzando el cruce por el origen, se obtienen resultados similares al análisis de las humedades, con una correlación aún mejor para ambos casos, húmedo y seco, pero que sin el forzamiento del cruce por el origen (líneas segmentadas) la correlación es pobre. Visualmente la variabilidad en torno a las ecuaciones propuestas es bastante notoria.

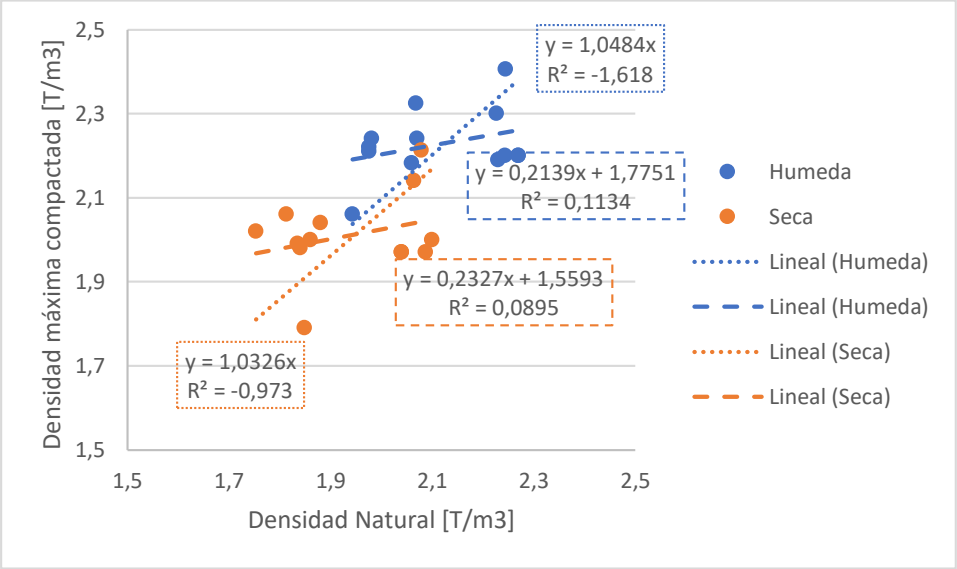


Figura 74: Relación de Linealidad entre densidad natural y máxima compactada, húmeda y seca.

Finalmente, queda analizar alguna relación entre los resultados del Proctor con el método utilizado. En la Figura 75 se puede ver como varía el promedio de los valores de densidad máxima compactada según el método de ensayo, y en la Figura 76 como varía la humedad óptima según el método de ensayo.

Llama la atención que los resultados de compactación puedan depender en parte del método de ejecución. Como se puede ver los valores, tanto de densidades máximas como de humedad óptima, tienden a ser mayores para el método C, aunque hay que tener en cuenta que de este método se tienen solo 5 ejecuciones, las cuales pueden corresponder a maicillos que tiendan a dar valores más altos que el resto, por lo que establecer conclusiones al respecto puede ser demasiado apresurado, pero sí es necesario prestar atención a este aspecto.

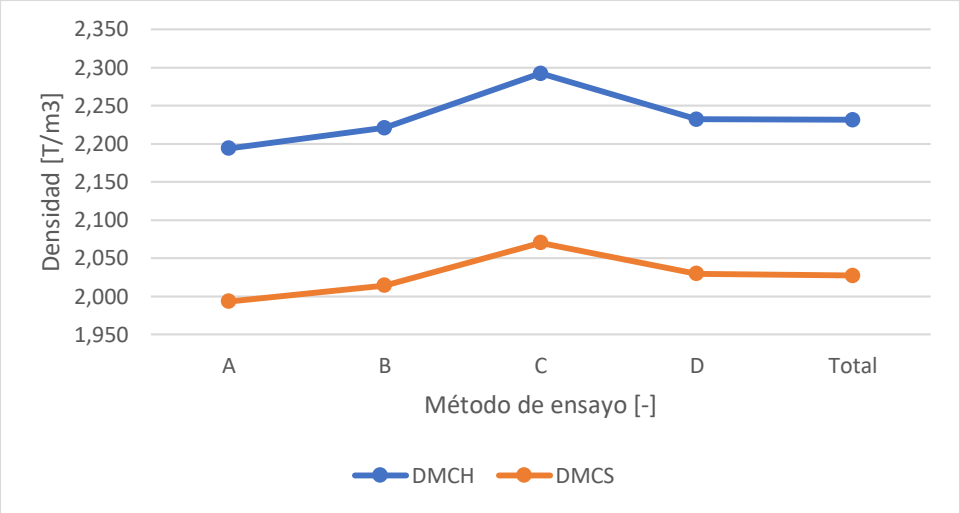


Figura 75: Proctor - relación entre las densidades máximas y el método de ejecución.

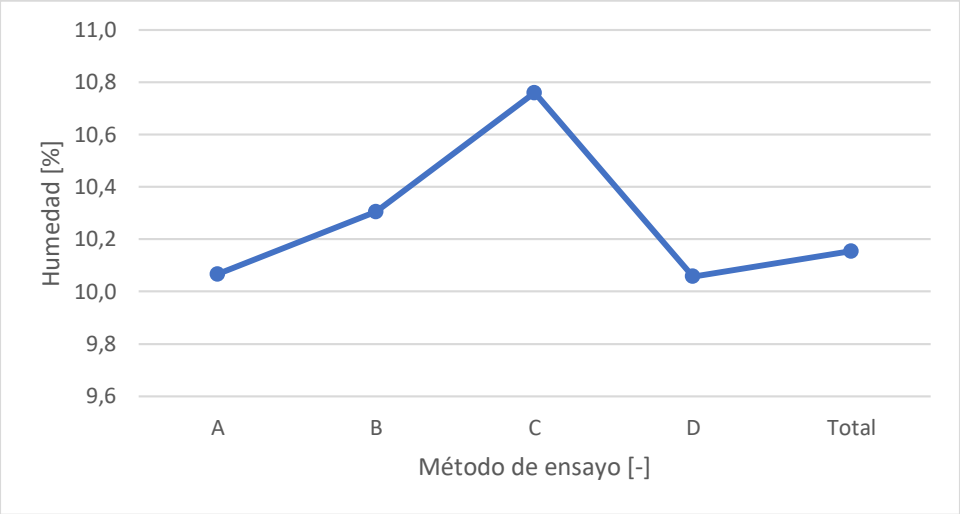


Figura 76: Proctor - Relación entre la humedad óptima y el método de ejecución.

Anexo 4.- CBR

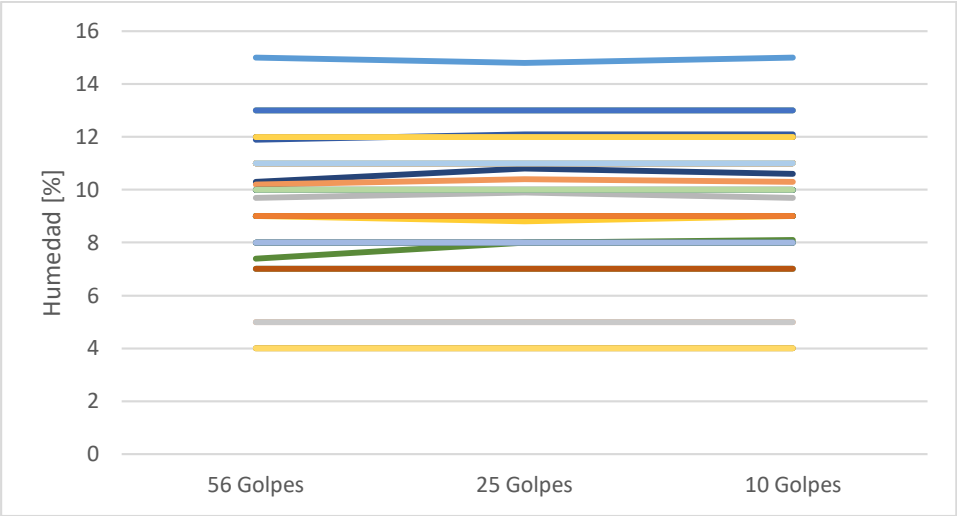


Figura 77: CBR - Humedad antes de compactación.

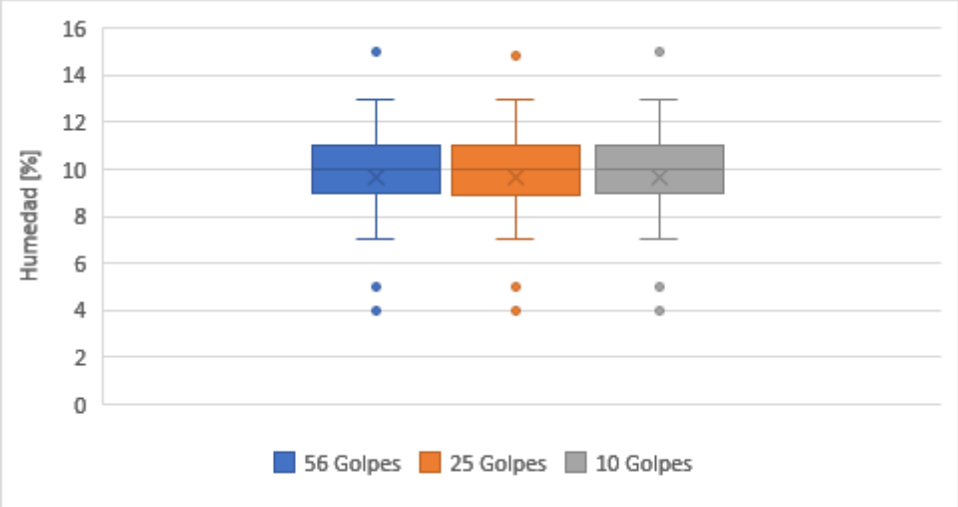


Figura 78: CBR - Humedad antes de compactación, Diagrama de Caja y Bigote.

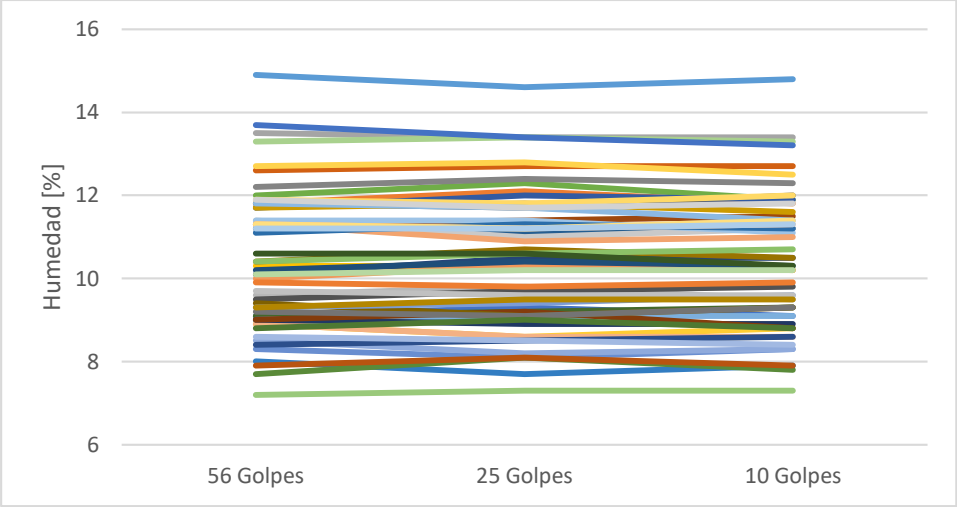


Figura 79: CBR -Humedad después de compactación.

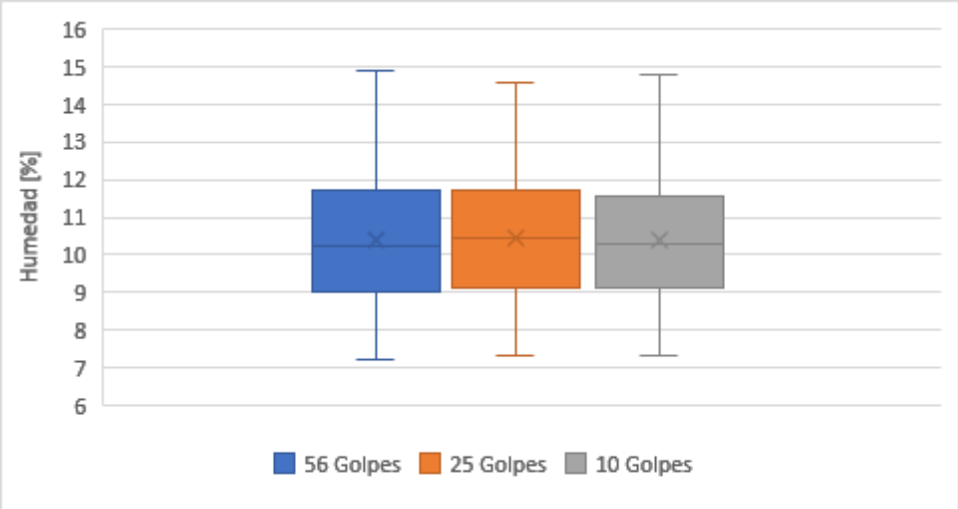


Figura 80: CBR - Humedad después de compactación, Diagrama de Caja y Bigote.

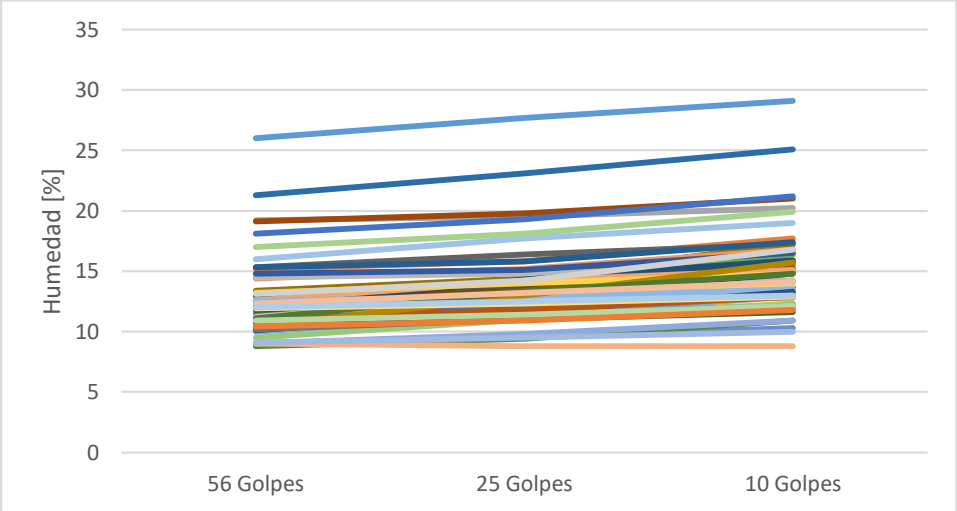


Figura 81: CBR - Humedad después de inmersión, en los 25 mm superiores del molde.

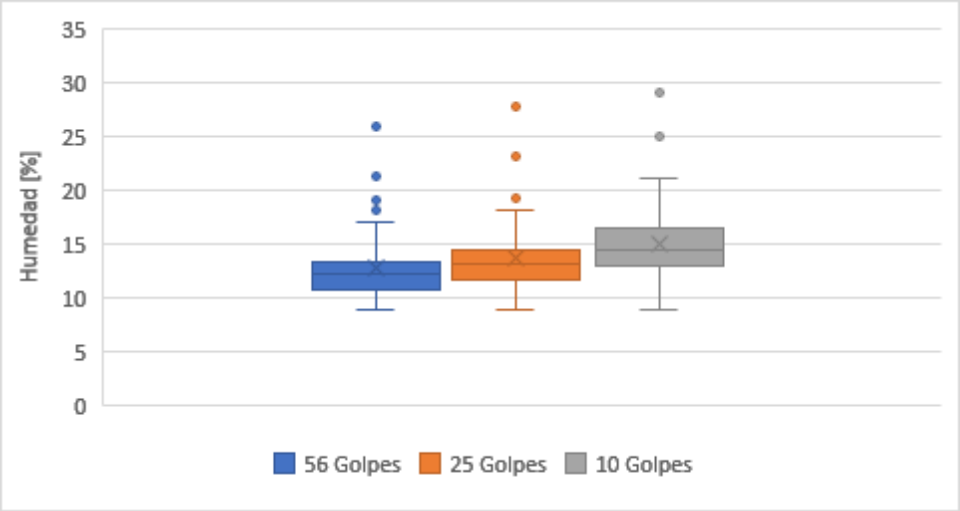


Figura 82: CBR - Humedad después de inmersión, en los 25 mm superiores del molde, Diagrama de Caja y Bigote.

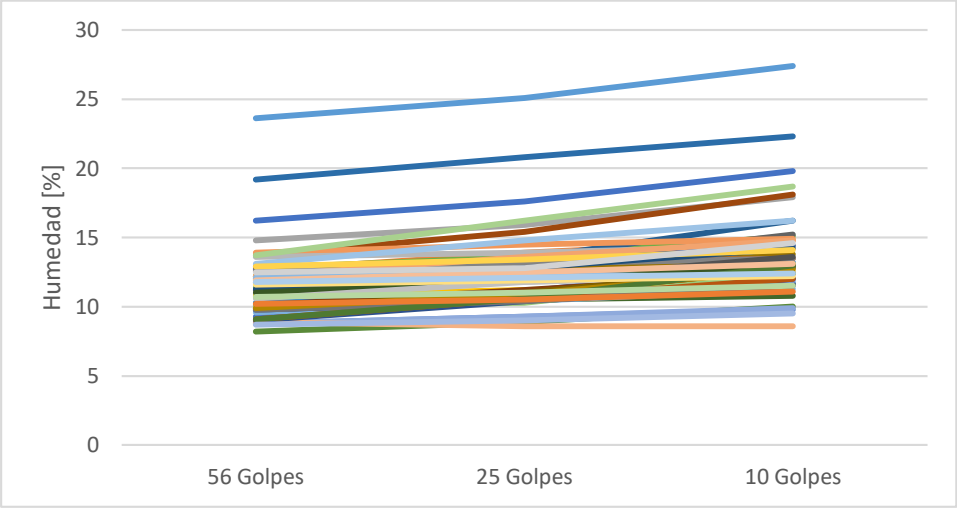


Figura 83: CBR - Humedad después de inmersión, promedio en todo el molde.

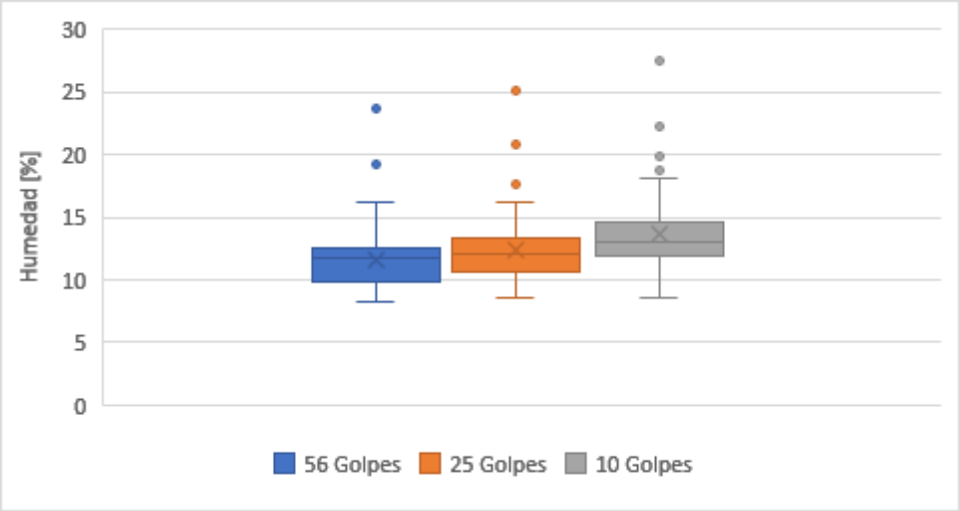


Figura 84: CBR - Humedad después de inmersión, promedio en todo el molde, Diagrama de Caja y Bigote.

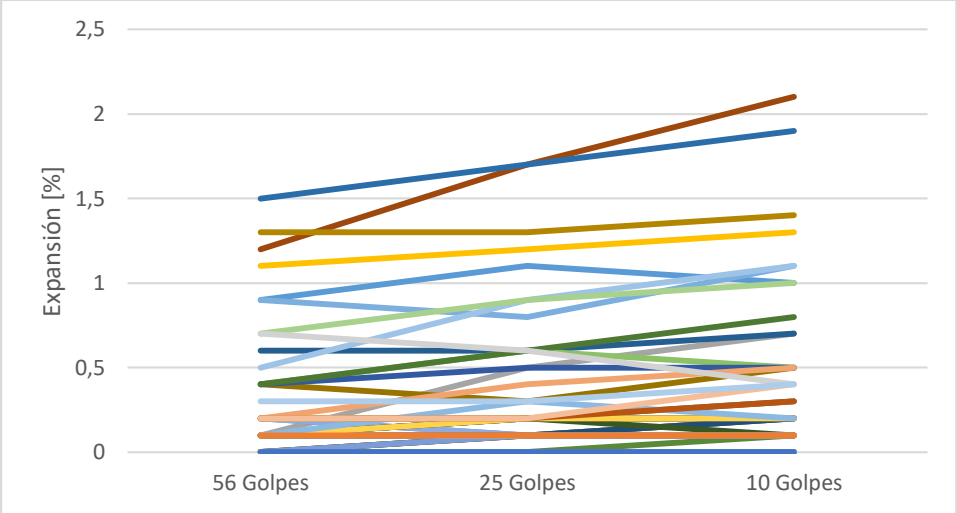


Figura 85: CBR - Expansión del molde.

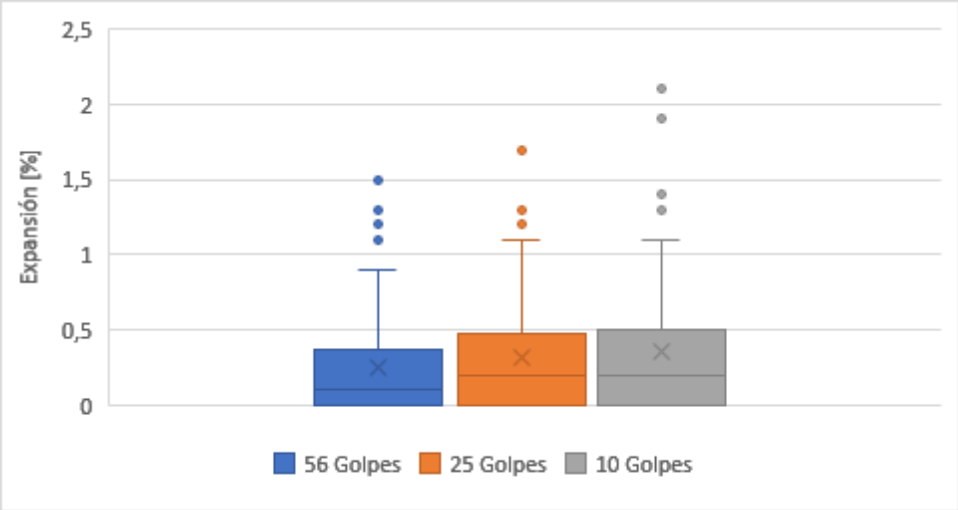


Figura 86: CBR - Expansión del molde, Diagrama de Caja y Bigote.

En cuanto a la expansión de las muestras, lo que se muestra en primera instancia en la Figura 85, ésta en general es mayor para moldes con menor compactación, lo cual es razonable, aunque hay casos donde esta regla no se respeta. Si se analiza su distribución, presentada en la Figura 86, el tamaño de los cuartiles pareciera seguir lo dicho previamente, la expansión, y por ende su variabilidad, será mayor a medida que la compactación es menor.

En la Figura 87 se muestra nuevamente la expansión de las muestras, esta vez la información dispuesta de otra forma. A lo largo de las distintas muestras, se puede ver que hay casos donde la expansión en moldes de 10 golpes es menor que en los otros dos moldes, a la vez que en general ducha expansión no parece responder a una proporcionalidad entre los valores: la diferencia de expansión es independiente de la magnitud de estas.

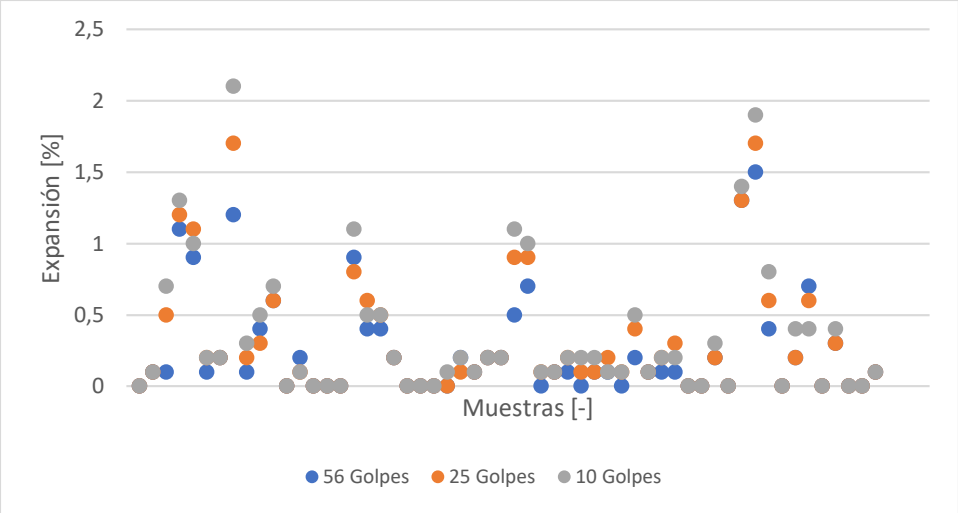


Figura 87: CBR - Expansión en moldes (% altura inicial).

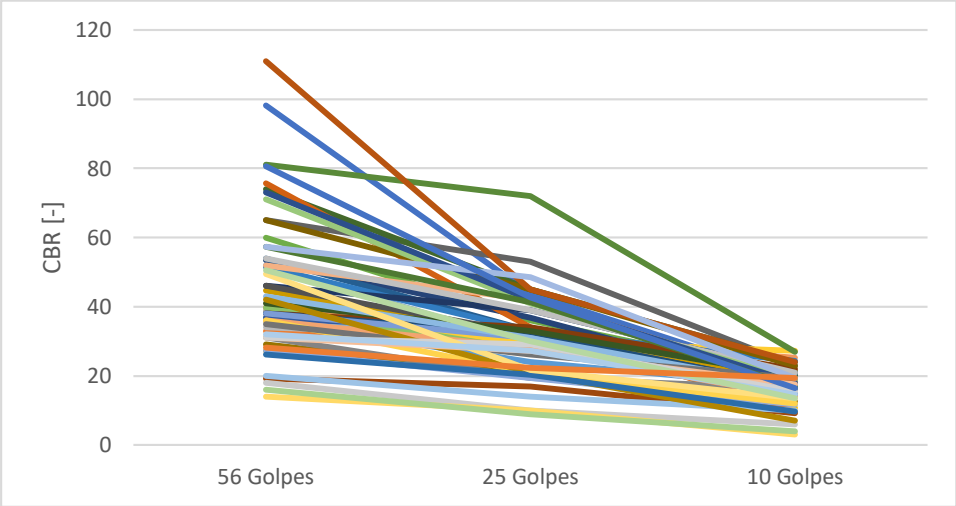


Figura 88: CBR - Razón de soporte en los 0,2" superiores del molde.

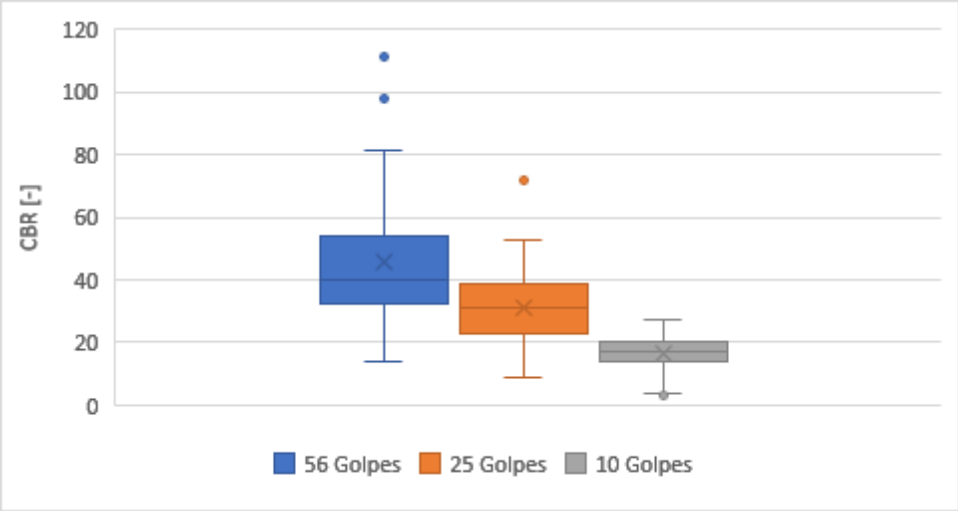


Figura 89: CBR - Razón de soporte en los 0,2" superiores del molde, Diagrama de Caja y Bigote.

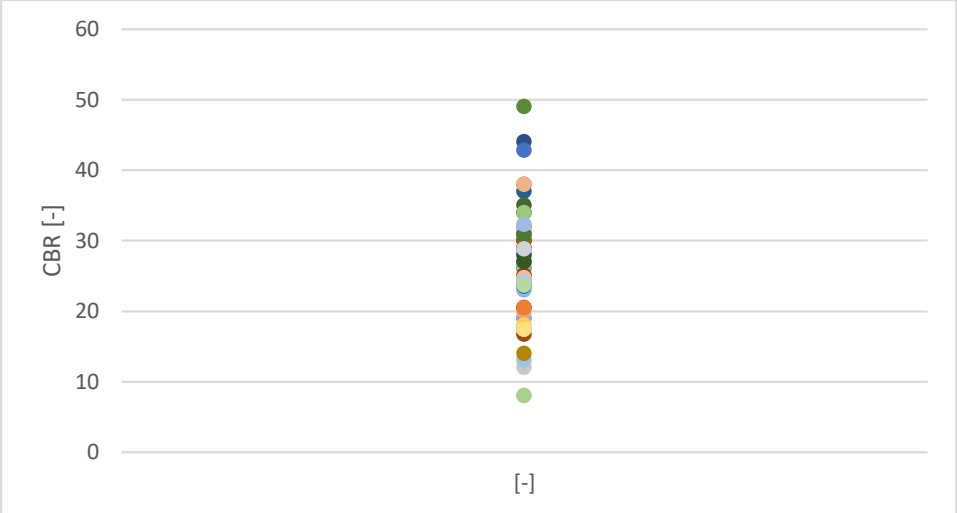


Figura 90: CBR - Razón de soporte, según los 0,2" superiores, a 95% del Proctor Modificado.

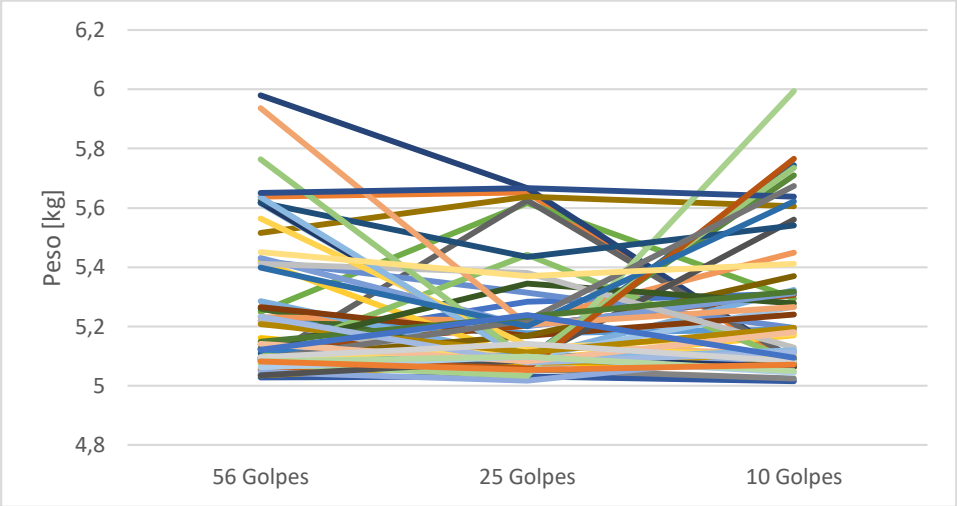


Figura 91: CBR - Sobrecargas utilizadas sobre los moldes.

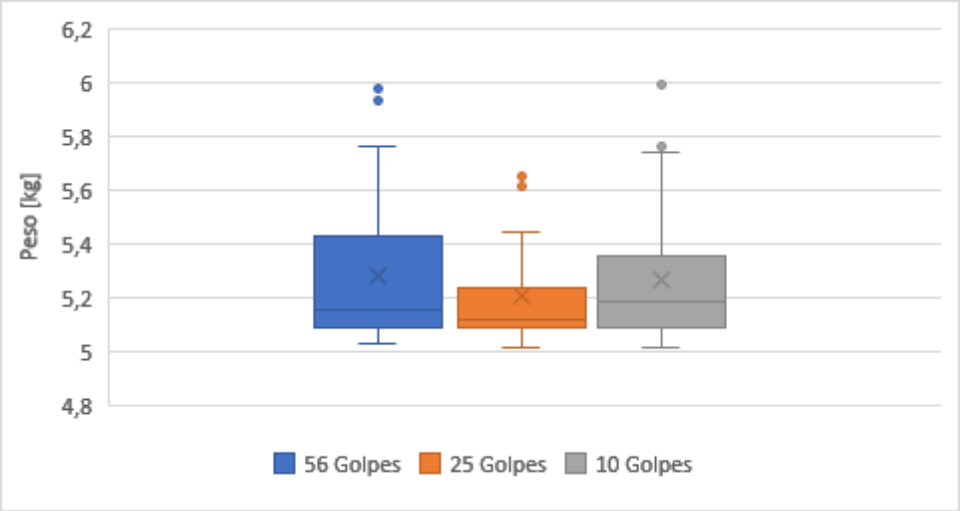


Figura 92: CBR - Sobrecargas utilizadas sobre los moldes, Diagrama de Caja y Bigote.

Antes de analizar posibles correlaciones derivadas del ensayo de CBR, podemos ver la información de sobrecargas utilizadas. En la Figura 91 se puede ver que existe una variabilidad gigantesca en el valor de los pesos utilizados entre las distintas ejecuciones, además de que en la Figura 92, al analizar su distribución, se ve que en general se utilizan pesos menores para los moldes de 25 golpes, lo cual puede inducir a alguna alteración indeseada en los resultados de CBR para estos moldes durante el proceso de inmersión, dada la cantidad de tiempo que el sobrepeso está ejerciendo presión en las muestras.

Para analizar efectivamente dicha influencia, se debería realizar el mismo proceso con la misma muestra de maicillo con varios valores de sobrecarga distintos, lo que se escapa del alcance de esta memoria.

Continuando con un análisis de los valores de CBR, se construye un gráfico de CBR v/s la densidad seca post compactación, lo que se muestra en la Figura 93, donde cada línea representa una muestra y cada punto de esta es uno de los moldes de 56, 25 y 10 golpes.

Del gráfico se desprende que la relación entre la densidad y el valor de CBR no es lineal, y que se ve influenciada por el grado de compactación durante la ejecución del ensayo. Esto podría estar relacionado por el hecho de que la mayoría de los moldes de 25 golpes recibieron un sobrepeso menor que sus contrapartes, lo cual puede derivar en, tal como se mencionó previamente, un CBR menor, reflejado en la concavidad de las curvas graficadas.

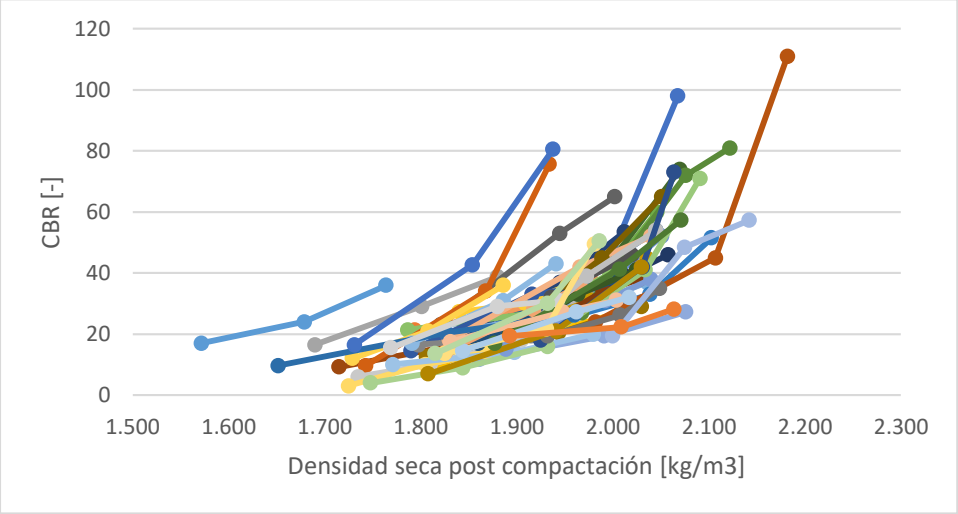


Figura 93: CBR versus Densidad seca posterior a la compactación, análisis por muestra.

En la Figura 94 se presenta un análisis similar, pero esta vez agrupando los resultados según cada molde. La variabilidad que se ve en la relación entre densidad, compactación y CBR, expuesto en la Figura 93, también se ve en la relación entre densidad y CBR para una compactación fija. Las ecuaciones que presentaron un mejor ajuste para describir dicha relación de parámetros son del tipo exponencial, pero dada la variabilidad de los casos, reflejado en los valores de R^2, dichas ecuaciones no bastan para describir a los resultados en general.

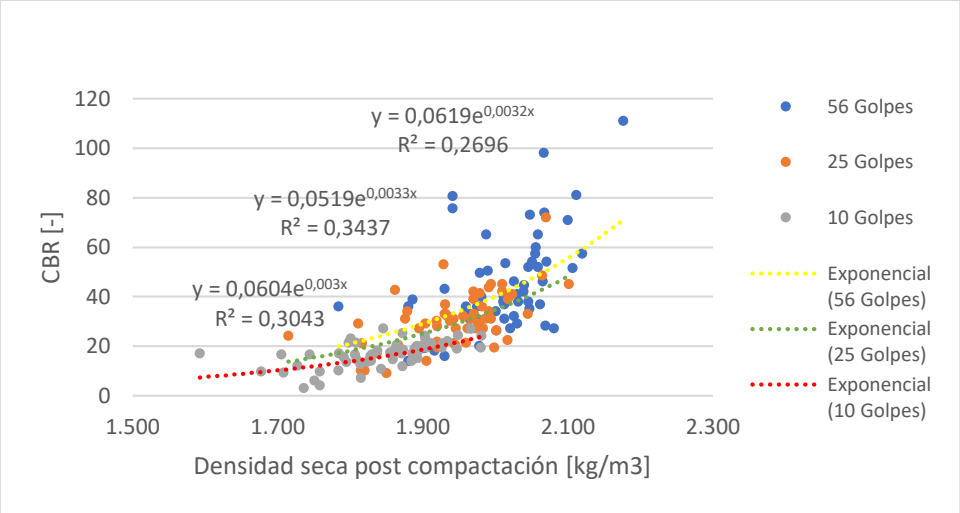


Figura 94: CBR – Curva CBR versus Densidad seca posterior a la compactación, análisis por moldes.

Luego, se busca una relación mediante un gráfico de CBR versus DMCS, obtenida por los ensayos de Proctor, la cual se muestra en la Figura 95. Como se puede apreciar, el mejor ajuste encontrado es del tipo exponencial, y al igual que en el gráfico anterior, el modelo obtenido no logra describir de buena manera todos los resultados: es decir, no se pudo encontrar una curva que pueda predecir o describir de forma correcta el valor de CBR de los maicillos en base a los parámetros descritos.

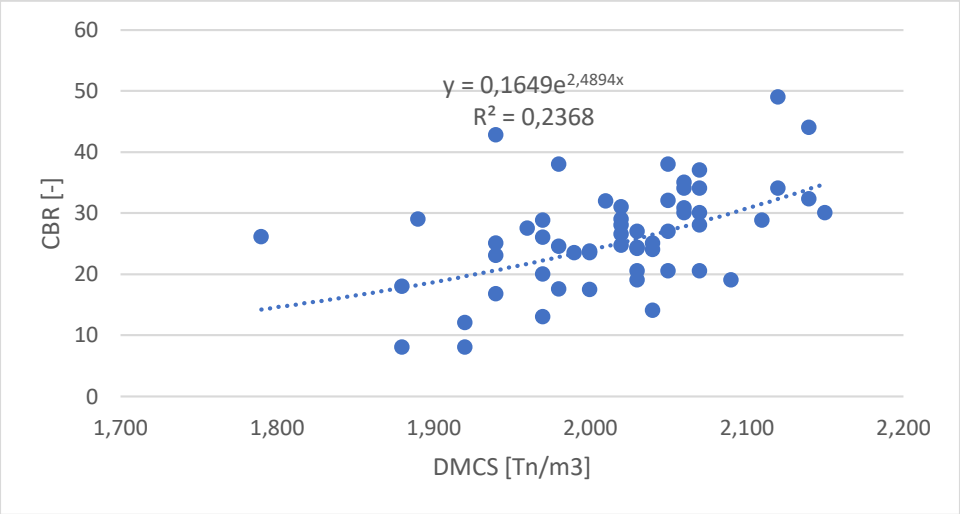


Figura 95: CBR - Curva CBR versus DMCS.

Como información adicional, en la literatura existe el análisis y construcción de un modelo para obtener el CBR en base a las propiedades índices de los suelos [16]. Dicho análisis es aplicado a las muestras recolectadas, tomando en cuenta las propiedades índices de los maicillos y los resultados del Proctor Modificado. No se considera propiedades de plasticidad, ya que la mayoría de los maicillos registrados son no plásticos, y la correlación analizada busca ser representativa para la todos los maicillos estudiados.

Mediante un análisis de regresión múltiple a un total de 30 muestras que tienen los valores necesarios, se llegó a la ecuación 9 la cual se muestra a continuación:

$$CBR_{est} = -1{,}629 * G - 2{,}051 * A - 2{,}721 * F + 101{,}716 * D + 3{,}667 * H \qquad (9)$$

Donde:

- G: Porcentaje de grava, en [%]
- A: Porcentaje de arena, en [%]
- F: Porcentaje de finos, en [%]
- D: Densidad máxima compactada seca (DMCS), en [T/m3]
- H: Humedad Óptima, en [%]

En la Figura 96 se presenta la comparación entre el CBR medido por laboratorio y el estimado por la ecuación (9), donde se ve que los resultados no son satisfactorios.

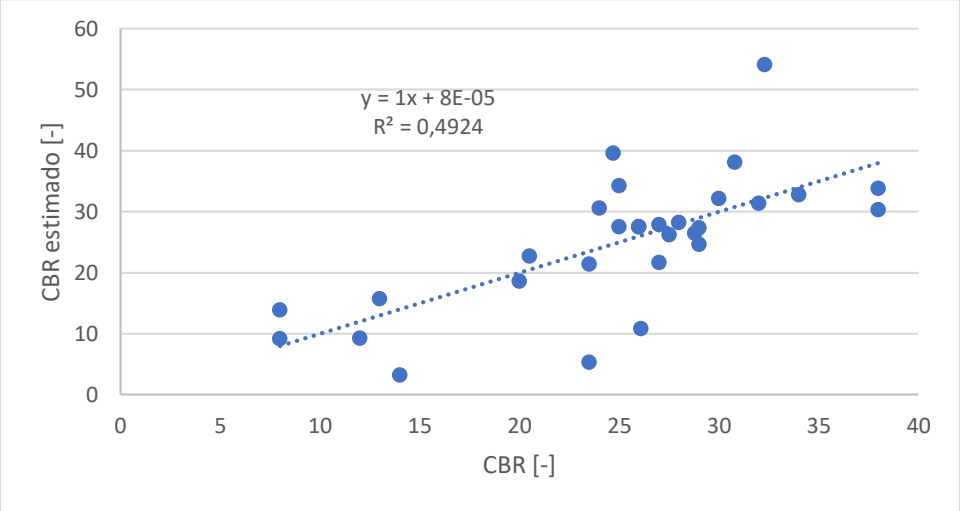


Figura 96: Comparación de CBR ensayado y CBR estimado.

Experimentos similares encontrados en la literatura [16] han arrojado buenas correlaciones entre las propiedades índice y el valor de CBR, con valores de R^2 superiores a 0,9. El análisis ejecutado no parece indicar la existencia de una relación clara para los maicillos de la V región, esto dado principalmente por la ubicación de las muestras y la composición en sí del maicillo, factores que otorgan gran variabilidad a los valores en general.

Anexo 4.- Triaxial

Tabla 19: Valores de banda representativa de compresión vs deformación, Triaxial CID.

Presión de Cámara s3	**0,5 [kgf/cm2]**		**1 [kgf/cm2]**	
Deformación [%]	**Compresión [kgf/cm2] - Q1**	**Compresión [kgf/cm2] - Q3**	**Compresión [kgf/cm2] - Q1**	**Compresión [kgf/cm2] - Q3**
4,5	1,658	2,000	2,973	3,515
4	1,867	2,115	3,136	3,585
3,5	1,806	2,163	3,151	3,740
3	2,035	2,438	3,434	4,016
2,5	2,058	2,623	3,515	4,545
2	1,985	2,766	3,532	4,698
1,5	1,767	2,640	3,359	4,479
1	1,480	2,210	2,571	3,723
0,5	1,132	1,733	1,770	2,678
0,3	0,762	1,259	1,245	2,021
0,1	0,351	0,800	0,520	1,298

Tabla 20: Valores de banda representativa de compresión vs deformación, Triaxial UU.

Presión de Cámara s3	**0,5**		**1**	
Deformación [%]	**Compresión [kgf/cm2] - Q1**	**Compresión [kgf/cm2] - Q3**	**Compresión [kgf/cm2] - Q1**	**Compresión [kgf/cm2] - Q3**
4,5	2,77	3,36725	4,234	5,1945
4	2,1375	3,518	3,2185	5,4435
3,5	2,2525	3,6125	3,5465	5,6015
3	2,4655	3,6485	3,8945	5,36425
2,5	2,4025	3,61625	3,962	5,169
2	2,447	3,56	3,931	5,02
1,5	1,8215	2,843	2,81275	3,8065
1	1,79625	2,821	2,77	3,792
0,5	1,143	1,764	1,707	2,405
0,3	0,778	1,194	1,186	1,6285
0,1	0,3355	0,66825	0,47225	0,95125

Tabla 21: Comparación de resultados de Phi y C entre informes y análisis de trayectorias, Triaxial CID.

Comparación resultados		Medidos		Calculados	
Nombre	**Tipo Falla**	**Phi**	**C**	**Phi**	**C**
Maicillo areno limoso	Semi-Plásticas	39,0	0,13	38,8	0,14
Maicillo areno limoso	Semi-Plásticas	45,0	0,2	42,6	0,13
Maicillo areno limoso	Semi-Plásticas	40,5	0,14	40,4	0,14
Maicillo	Semi-Plásticas	37,8	0,1	37,7	0,10
Maicillo	Semi-Plásticas	39,3	0,147	39,3	0,15
Maicillo areno poco limoso	Semi-Plásticas	45,5	0,19	45,5	0,19
Maicillo areno limoso	Semi-Plásticas	41,5	0,145	41,4	0,14
Maicillo areno limoso	Semi-Plásticas	39,6	0,103	36,3	0,13
Maicillo areno arcillo limoso	Semi-Plásticas	40,0	0,19	35,8	0,19
Maicillo areno limoso	Semi-Plásticas	42,5	0,2	42,5	0,20
Maicillo areno limoso	Semi-Plásticas	42,0	0,12	42,4	0,13
Maicillo fino	Semi-Plásticas	39,9	0,07	39,9	0,06
Maicillo areno limoso	Frágiles	61,0	0,63	61,4	0,49

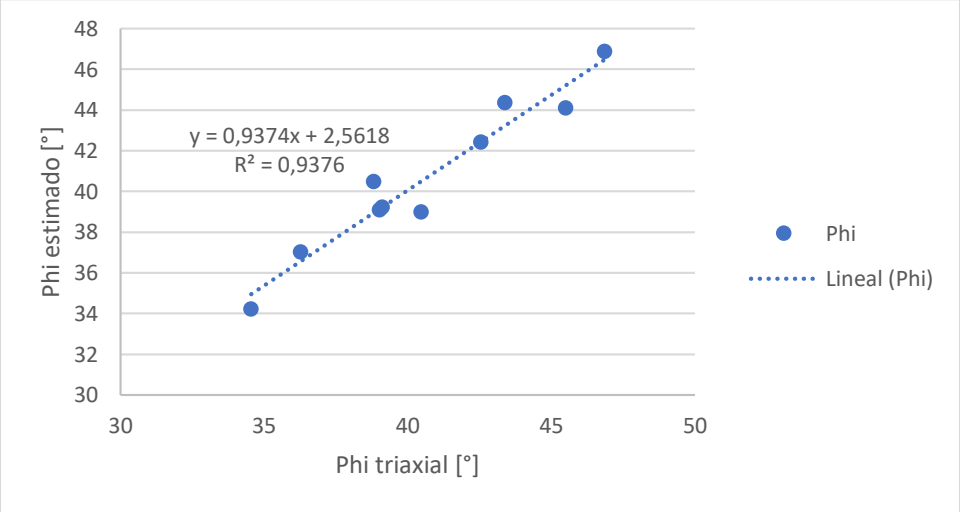


Figura 97: Ajuste para Phi según modelo 1 - Triaxial CID.

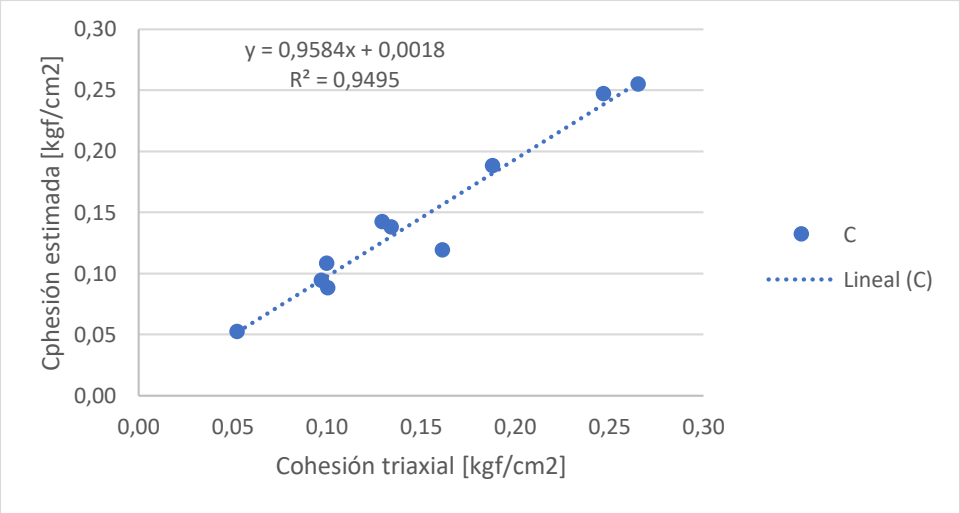


Figura 98: Ajuste para C según modelo 1 - Triaxial CID.

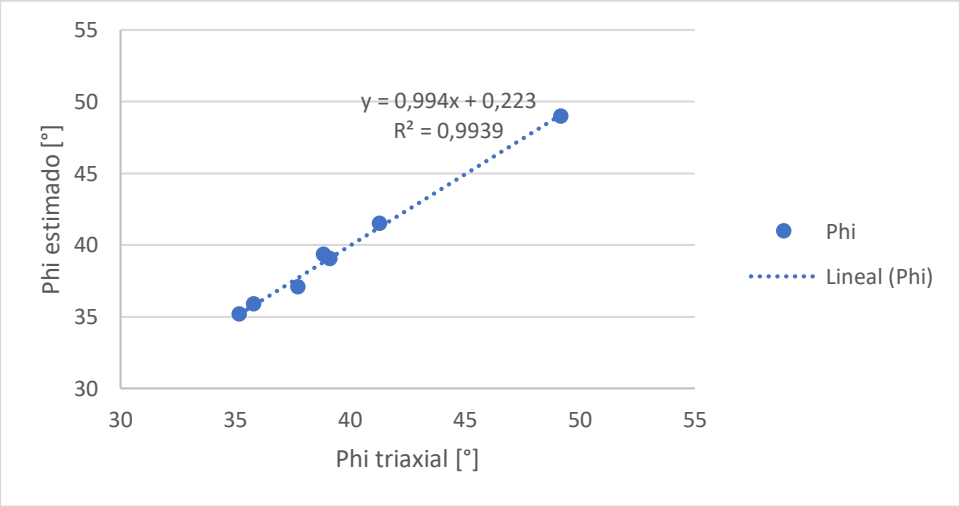


Figura 99: Ajuste para Phi según modelo 2 - Triaxial CID.

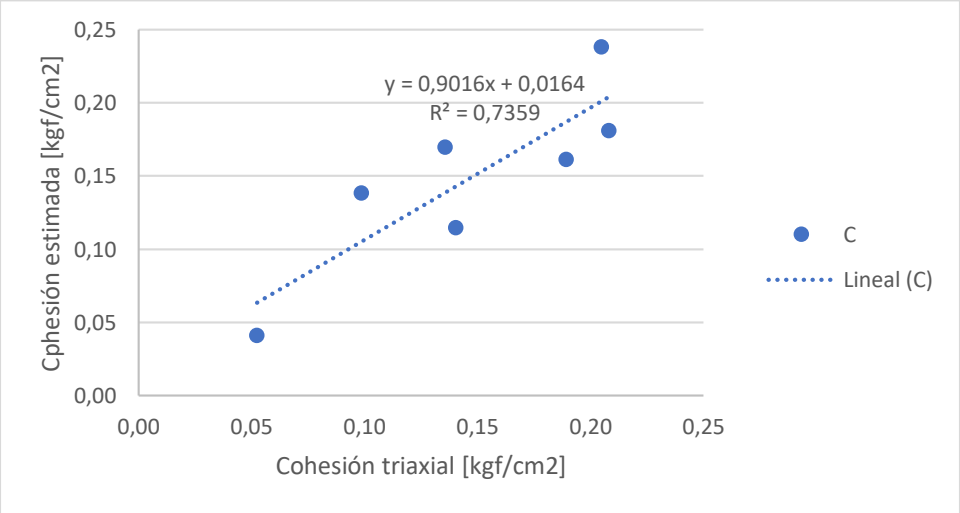


Figura 100: Ajuste para C según modelo 2 - Triaxial CID.