

**Estudio estadístico de las Propiedades Mecánicas del subsuelo de la Zona  
Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT)**

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Presenta

**Martín Plata Arias**

Director: **Maestro Ángel Albíter Rodríguez**

Codirector: **Doctor Eusebio Cárdenas Gutiérrez**

**Toluca, México**

**2019**

# Resumen

---

Este documento pretende dar una pauta tanto de los tipos de suelo como de su resistencia, en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), buscando que sea una herramienta de consulta para el Ingeniero Civil, o cualquier profesionalista afín a los estudios geotécnicos, para tener un documento de referencia o de consulta en trabajos de diseño de cimentaciones o estudios geotécnicos, principalmente. Sin embargo, se hace hincapié en que es deber de quien emplee esta herramienta realizar los estudios pertinentes debido a que los materiales del subsuelo no tienen un comportamiento uniforme y se pueden tener diferentes estratos y cambios repentinos de estratos en un área de estudio relativamente pequeña.

Para ello, se analizaron datos geotécnicos del subsuelo de la ZMVT, uno de los factores externos necesarios para el diseño geotécnico de obras de infraestructura y equipamiento. Dichos datos se obtuvieron como resultado de la recopilación en varias fuentes, destacadamente el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de esta Universidad (FIUAEMéx), así como dependencias gubernamentales y empresas privadas, consistentes en información de más de cuatrocientos sondeos superficiales y profundos realizados en la ZMVT, de los que se obtuvieron casi 1400 mediciones de variables del suelo que permiten tanto identificar los materiales geotécnicos muestreados, como conocer su comportamiento mecánico.

Se analizaron datos de mediciones de las variables del suelo mencionadas arriba para buscar patrones estadísticos en poblaciones definidas a partir de la agrupación de dichos datos usando las siguientes tres formas: 1) Una zonificación cartesiana; 2) Los límites Municipales y 3) Las profundidades a las que se obtuvieron las muestras. Para cada forma se obtuvieron los parámetros estadísticos usuales; tales como media, desviación estándar y moda según aplicaran, en cada una de las siguientes poblaciones: a) La identificación de suelos conforme al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); b) La resistencia a la compresión simple; c) Una medición de los módulos de elasticidad y d) Una estimación del coeficiente de permeabilidad.

Como conclusiones, aquí se muestran los patrones encontrados mediante las herramientas estadísticas empleadas, tales como tablas de frecuencias y ANOVA, buscando ser un punto de partida para cualquier investigación que pretenda conocer el comportamiento del suelo en la ZMVT.

# Índice General

---

Resumen.....	2
Agradecimientos.....	3
Índice General.....	4
Índice de Tablas.....	6
Índice de Figuras.....	7
1. Introducción.....	8
1.1. Antecedentes.....	8
1.2. Justificación.....	9
1.3. Hipótesis.....	11
1.4. Objetivos.....	12
1.4.1 Objetivos específicos.....	12
1.5. Metodología.....	12
2. Análisis de datos.....	16
2.1. Clasificación del suelo (S.U.C.S.).....	16
2.1.1. Tabla de Frecuencias de la identificación conforme al SUCS.....	17
2.2. Resistencia a la Compresión Simple.....	18
2.2.1. Tabla de Frecuencias de las mediciones de la Resistencia a la Compresión Simple.....	19
2.2.2. Subdivisión Cartesiana.....	21
2.2.3. Subdivisiones Cartesiana y Municipal.....	24
2.2.4. Subdivisiones Cartesiana, Municipal y por profundidades.....	25
2.3. Tablas Cruzadas para los resultados SUCS-RCS.....	33
2.4. Módulo de Elasticidad.....	42
2.5. Permeabilidad.....	43
3. Interpretación de Resultados del Análisis.....	45
3.1. Identificación SUCS:.....	45
3.2. Resistencia a la Compresión Simple.....	45
4. Herramienta Informática para recuperación de datos.....	47
5. Conclusiones y Recomendaciones.....	52
3. Referencias.....	55

Anexo 1 ..... 56  
Anexo 3 .....  
Anexo 4 .....

# Índice de Tablas

---

Tabla 1. Tabla de frecuencias para los tipos de suelo (SUCS) encontrados en los sondeos.....	17
Tabla 2: Tipos de suelo con más de 30 elementos, en los que el análisis estadístico es aplicable .....	33
Tabla 3: Intervalos de confianza de la RCS para cada tipo de suelo. ....	35
Tabla 4: Resultados de ANOVA al comparar combinaciones de cada tipo de suelo SUCS. ....	37
Tabla 5: Representación de tipos de suelo con un comportamiento similar de su RCS.....	38
Tabla 6: Intervalos de confianza y comportamiento de RCS para combinaciones de tipos de suelo detectadas a partir del ANOVA. ....	39
Tabla 7: Resultados de ANOVA al comparar 7 Grupos de tipos de suelo. ....	41
Tabla 8: Intervalos de confianza para los casos dominantes. ....	41
Tabla 9: Intervalos de confianza para patrón encontrado .....	41

# Índice de Figuras

---

Figura 1 Población de algunos municipios de la ZMVT.....	9
Figura 2 Crecimiento poblacional de la ZMVT.....	9
Figura 3 <i>Falla por capacidad de carga (esfuerzo cortante) de un terraplén en Lerma en 2010.</i> .....	10
Figura 4 Zona Metropolitana del Valle de Toluca.....	14
Figura 5 Ejemplo de gráfica.....	16
Figura 6 Distribución de datos de Identificación del tipo de suelo conforme al SUCS, en la ZMVT.....	18
Figura 7 Histograma de datos de Resistencia a la compresión simple (Ton/m <sup>2</sup> ) ..	19
Figura 8 Propuesta de división Cartesiana.....	21
Figura 9 Grafica de barras para las Tablas Cruzadas RCS-SUCS .....	34
Figura 10 Valores de las medias de la RCS para cada tipo de Suelo SUCS. ....	38
Figura 11 Histograma del Módulo de elasticidad.....	42
Figura: 12 Curvas granulométricas asociadas a un Coeficiente k.....	43
Figura 13. Mapa de Sondeos en la ZMVT.....	48
Figura 14 Perfil Estratigráfico .....	49
Figura 15 Perfil estratigráfico seleccionando un tipo de suelo.....	50
Figura 16 Sondeo Profundo .....	51

# 1. Introducción

---

## 1.1. Antecedentes

El suelo es el material de construcción más abundante y en muchas zonas constituye el único material disponible. Se ha usado para monumentos, tumbas, viviendas, vías de comunicación y estructuras de retención de agua entre otros. Cuando se usan de material de construcción, se deben seleccionar sus tipos adecuados así como el método y el control de su colocación en obra. (Lambe & Whitman, 1991)

Cualquier proyecto de Ingeniería Civil debe incorporar el conocimiento de los suelos con los que vaya a estar en contacto. Para ello, la Geotecnia ha desarrollado procedimientos consistentes en hacer exploraciones del suelo localizado en el sitio del proyecto, con el fin de obtener muestras del mismo que permitan primero, identificarlo conforme a las normas existentes y después, conocer su comportamiento mecánico. Para lograr que estos procedimientos sean más eficientes, es importante contar con información previa de los suelos del sitio. Es por ello que, desde hace varias décadas los geotécnicos se dieron a la tarea de recopilar la información del subsuelo obtenida de los sondeos y de las muestras de ellos, sobre todo de zonas urbanas del país.

Para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), un primer trabajo de este tipo fue publicado en 1976, por parte de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS), actualmente Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG). En 2006, esta Facultad inició trabajos para actualizar esa información, dando como resultado un Manual que se ha venido publicando anualmente desde 2008. (Albiter Rodriguez, 2017)

Sin embargo, la información recopilada todavía no se ha interpretado con herramientas estadísticas que posibiliten enriquecer y hacer más riguroso su aprovechamiento. Igualmente, tampoco se han desarrollado todavía, aplicaciones computacionales que permitan aprovecharla de manera más amigable.

Por lo anterior, se considera importante tener una referencia en la que se puedan consultar datos previos acerca de la identificación y del comportamiento mecánico del suelo de la ZMVT, aprovechando la capacidad predictiva de la estadística. Es lo que este trabajo pretende: Presentar información geotécnica previa que sea de utilidad al Ingeniero Civil para sus labores, haciendo gran hincapié en que ello no le exime de la responsabilidad de realizar los estudios geotécnicos pertinentes en las zonas en donde se planea construir.

## 1.2. Justificación

La ZMVT ha crecido en forma prácticamente exponencial en las décadas recientes (Figura 1) y, como resultado de la puesta en operación del tren rápido México – Toluca, se tiene estimado un crecimiento adicional de un cincuenta por ciento más de su población actual, que ya de por sí es la cuarta más grande a nivel Nacional.

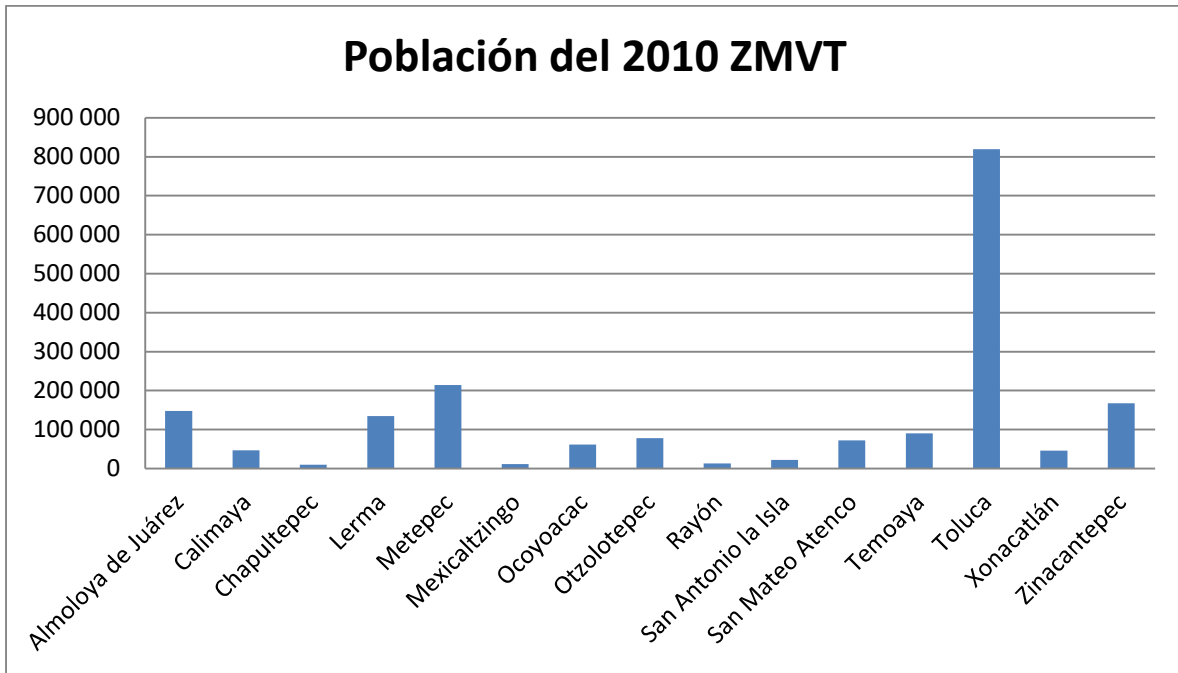


Figura 1 Población de algunos municipios de la ZMVT

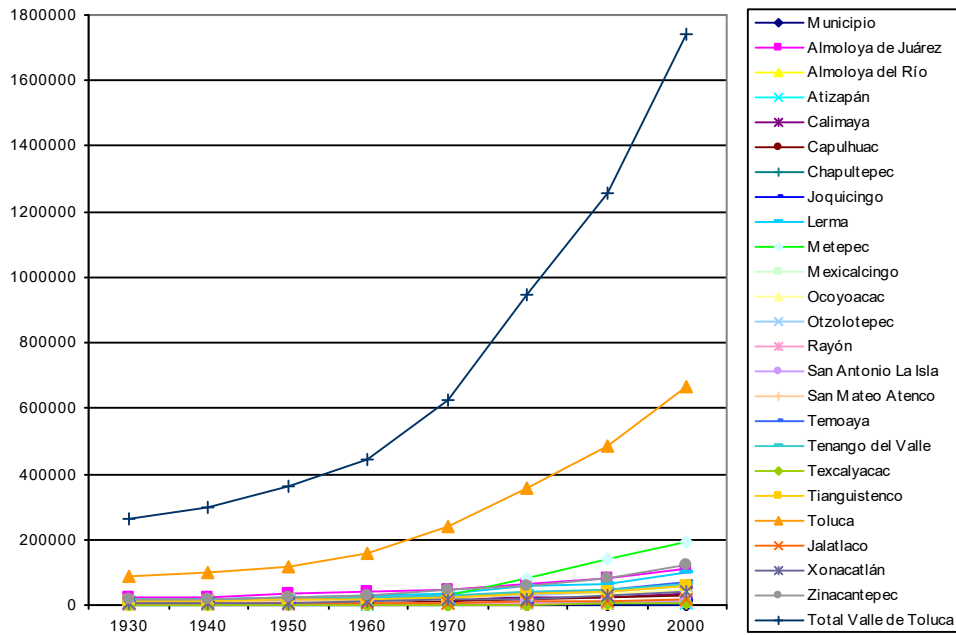


Figura 2 Crecimiento poblacional de la ZMVT



En la figura 1 se muestra el crecimiento poblacional a lo largo de los años en número de habitantes por década de los municipios pertenecientes a la ZMVT desde el año 1930 al 2000. Por otro lado, en la figura 2 se muestra la cantidad de habitantes en algunos de los municipios, en el 2010 tomados en base a los censos de vivienda y población del mismo año.

Las nuevas obras de infraestructura y equipamiento que serán necesarias para dar servicios adecuados a esa creciente población y que son responsabilidad de los ingenieros civiles, hacen necesario contar con información geotécnica que posibilite reducir riesgos de fallas como las que ya se han presentado en esta región, precisamente por desatender este aspecto específico. Destacadas empresas constructoras han tenido que cubrir, a veces importantes, gastos adicionales por desconocer información geotécnica que ya se tiene disponible. Además de remediar fallas relativamente sencillas, como asentamientos en edificaciones y terraplenes, también se podrán evitar riesgos de nuevas fallas por esfuerzo cortante, como la muy significativa ocurrida en 2010 al norte de la ciudad de Lerma (Figura 3) obtenida de la referencia 1, atendiendo esta información como paso inicial del diseño geotécnico de obras en esta zona.



*Figura 3 Falla por capacidad de carga (esfuerzo cortante) de un terraplén en Lerma en 2010.*

Por otro lado, el importante incremento en la demanda de agua de la ZMVT, hace cada vez más necesaria la construcción de obras que permitan recuperar y conservar ese recurso. Para ello, otra vez, es necesario contar con información geotécnica, en este caso acerca de la permeabilidad de los materiales, con la cual realizar el diseño y construcción de tales obras.

Específicamente, los suelos tienen características que originan complicaciones debido a que:

- 1) El suelo no posee una relación lineal o única de esfuerzo deformación;
- 2) El comportamiento del suelo depende de la presión, tiempo y del medio físico;
- 3) El suelo es prácticamente diferente en cada lugar;
- 4) En casi todos los casos la masa de suelo que interviene, está bajo la superficie y no puede observarse en su totalidad y se estudia a partir de pequeñas muestras obtenidas;
- 5) La mayoría de los suelos son susceptibles a alterarse debido a la toma de muestras, por lo que el comportamiento medido en pruebas de laboratorio puede ser diferente al estudio In Situ. (Lambe & Whitman, 1991)

En esas condiciones, contar con una base de datos geotécnicos interpretada con herramientas estadísticas y con aplicaciones computacionales que permitan un acceso más amigable, permitirá abordar de mejor manera el proyecto, la construcción, la operación y el mantenimiento de obras civiles, mediante las cuales se puedan conservar o incluso mejorar las condiciones de vida de los habitantes de esta Zona.

### **1.3. Hipótesis**

Al aplicar herramientas estadísticas para interpretar los datos de identificación de los suelos de la ZMVT, así como las tres componentes de su comportamiento mecánico: Resistencia al esfuerzo cortante, Deformabilidad y Permeabilidad, se podrá identificar al menos un patrón sustentado por la estadística en al menos uno de los siguientes aspectos: a) Su clasificación SUCS; b) Su resistencia al esfuerzo cortante; c) Su módulo de elasticidad o d) Su coeficiente de permeabilidad.

## 1.4. Objetivos

Analizar y sintetizar información, previamente recopilada de estudios geotécnicos hechos en la ZMVT, usando procedimientos estadísticos tales como tablas de frecuencias y análisis de varianza, en la búsqueda de patrones que posibiliten una interpretación integral de las propiedades índices y mecánicas de los suelos de esa Zona, basada en sus valores medidos, obtenidos y estimados. Cabe mencionar que todos los datos son históricos.

### 1.4.1 Objetivos específicos

Aplicar procedimientos estadísticos a la información recopilada de estudios geotécnicos realizados en la ZMVT para hacer una interpretación integral de las siguientes propiedades referidas a toda esa Zona, incluyendo la búsqueda de patrones que puedan existir en ellas: a) La identificación de suelos; b) La medición de la resistencia al esfuerzo cortante; c) La determinación de la deformabilidad y d) La estimación de la permeabilidad.

Explorar la existencia de patrones que permitan predecir valores de alguna de sus propiedades, podría facilitar una zonificación preliminar del subsuelo de la ZMVT.

Proponer recomendaciones para el diseño preliminar de pavimentos permeables para la ZMVT, a partir de la estimación de la permeabilidad de los suelos regionales.

## 1.5. Metodología

**DESCRIPCIÓN DE DATOS.** En una primera etapa se retomó información sobre resultados de estudios de mecánica de suelos en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), así como la ubicación en la que se realizaron (Albíter, 2017). Estos datos fueron los empleados para realizar un análisis estadístico, buscando aproximarse a un valor de la resistencia a compresión simple del suelo basado en su ubicación, además de obtener estadísticas cualitativas sobre la clasificación del suelo conforme al S.U.C.S. Usando curvas granulométricas obtenidas de estos mismos estudios, se hizo una estimación del coeficiente de permeabilidad del suelo, como dato para usarse por quienes se interesen en el estudio de infiltración de agua mediante productos novedosos, tales como los pavimentos permeables.

A partir de la información obtenida de la referencia mencionada, consistente en resultados de trabajos de campo y de laboratorio, se rescataron un total de 1,379 datos de la Resistencia a la Compresión Simple (RCS) del suelo.

**AGRUPACIÓN DE DATOS.** La intención enunciada de identificar patrones en esa propiedad, se exploró agrupando provisionalmente los resultados obtenidos, en las formas siguientes, dos de ellas sólo con argumentos geográficos: Cartesiana y Municipal, y una con sustento propiamente geotécnico, la Profundidad. Como se verá más adelante, estas agrupaciones arbitrarias funcionaron bien, pues efectivamente permitieron identificar la existencia de patrones en valores de la RCS.

La agrupación Cartesiana de esos valores supone la división de la ZMVT en cuadrantes, con origen propuesto en el cruce de las avenidas Miguel Hidalgo y Benito Juárez, siendo la primera el eje aproximado de abscisas y la segunda, de ordenadas.

La agrupación municipal obedece a la Región definida por el Acuerdo publicado en la Gaceta de Gobierno del Estado de México el 26 de marzo de 2010, en el cual se describe que la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) está integrada por los veintidós municipios indicados enseguida: Almoloya de Juárez, Almoloya del Río, Atizapán, Calimaya, Capulhuac, Chapultepec, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Otzolotepec, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Rayón, Temoaya, Tenango del Valle, Texcalyacac, Tianguistenco, Toluca, Xalatlaco, Xonacatlán y Zinacantepec. La figura 4 muestra esta Zona.

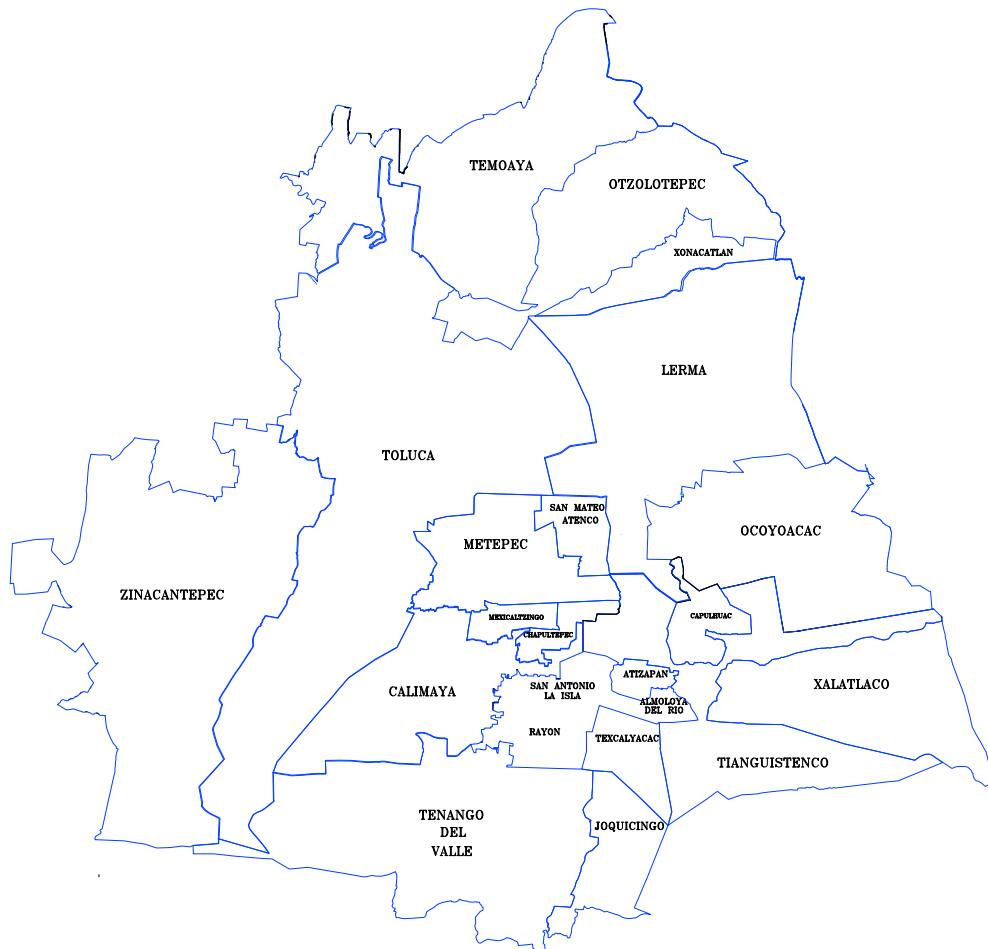


Figura 4 Zona Metropolitana del Valle de Toluca

Finalmente, la agrupación con base en la profundidad se hizo definiendo tres niveles: de 0 a 1 m; de 1 a 2 m, y mayor a 2 m.

**HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS EMPLEADAS.** Se emplearon herramientas tales como Excel, auto CAD y SPSS, para el análisis de los datos y poder revisar y proponer nuevas regiones de estudio, con la finalidad de presentar una regionalización que incluya alguna posible distribución de la resistencia del suelo en esta Zona, además de presentar la información recabada de cada sondeo.

El análisis de varianza (ANOVA) es una prueba de hipótesis especial que se aplica únicamente a poblaciones de tipo cuantitativo, para determinar si pueden considerarse semejantes, o no. En este tipo de pruebas no se utilizan los

parámetros poblacionales típicos (media, desviaciones estándar, proporciones, etc.), sino que se utiliza directamente la variabilidad de los valores de los elementos muestrales, mediante la obtención de varianzas estimadas de la varianza total de las poblaciones, generando un estadístico conocido como razón F, que es el cociente de las varianzas estimadas. Este estadístico tiene una distribución F de Fisher, con  $v_1$  y  $v_2$  grados de libertad.

Donde la hipótesis nula  $H_0$  considera que las medias de las poblaciones en estudio son semejantes, mientras que la hipótesis alternativa  $H_1$ , dice que al menos dos medias de las poblaciones en estudio, son diferentes entre sí.

Para calcular la razón F, la cual se nombrará con las letras  $F_{std}$ , en los cálculos que se mostrarán a lo largo de este documento, se emplea la suma de cuadrados:

$$\text{Razon F} = \frac{\text{MCG}}{\text{MCD}}$$

MCG=media de cuadrados entre grupos

MCD= media de cuadrados dentro de los grupos

$$MCG = \frac{SCG}{K - 1} \quad MCD = \frac{SCD}{n - K}$$

Donde k es el número de poblaciones en estudio, y n el tamaño de la muestra

SCG= Suma de cuadrados entre grupos

SCD=Suma de cuadrados dentro de los grupos

$$SCD = SC_1 + SC_2 + \dots + SC_K = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$$

$$SCG = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2$$

Después se calcula el valor de F crítico con (k-1) y (n-k) grados de libertad.

Finalmente se comparan los valores de F, para llegar a una conclusión acerca de los datos, de la siguiente manera: Si F crítica ( $F_c$ ) es mayor que la razón F calculada, se considera que la hipótesis nula es verdadera y por lo tanto se puede concluir que las poblaciones tienen la misma media. (Walpole, Myers, & Myers, 2012)

Además del ANOVA, se usaron otras herramientas estadísticas para analizar los datos disponibles. Por ejemplo, las pruebas de laboratorio practicadas a las muestras de suelo que permiten obtener su clasificación conforme al SUCS, arrojan como resultado una variable cualitativa. En este caso no es posible usar

análisis estadísticos complejos y sólo se pueden obtener tablas de frecuencias y representaciones gráficas como se describirá en el siguiente capítulo.

Finalmente, a partir del análisis de los resultados obtenidos usando esta metodología, se obtendrán las conclusiones, a partir de las cuales quedará definido si son o no son válidas las hipótesis planteadas.

## 2. Análisis de datos

### 2.1. Clasificación del suelo (S.U.C.S.)

Para analizar estos resultados, se cuantificó el número de veces que se repite un tipo de suelo localizado en cada uno de los sondeos, con lo que se estructura una tabla y con base en ella se construye una gráfica a color, mostrando en rojo el valor más repetido y a un lado un gráfico de barras de los tipos de suelo (Figura 5).

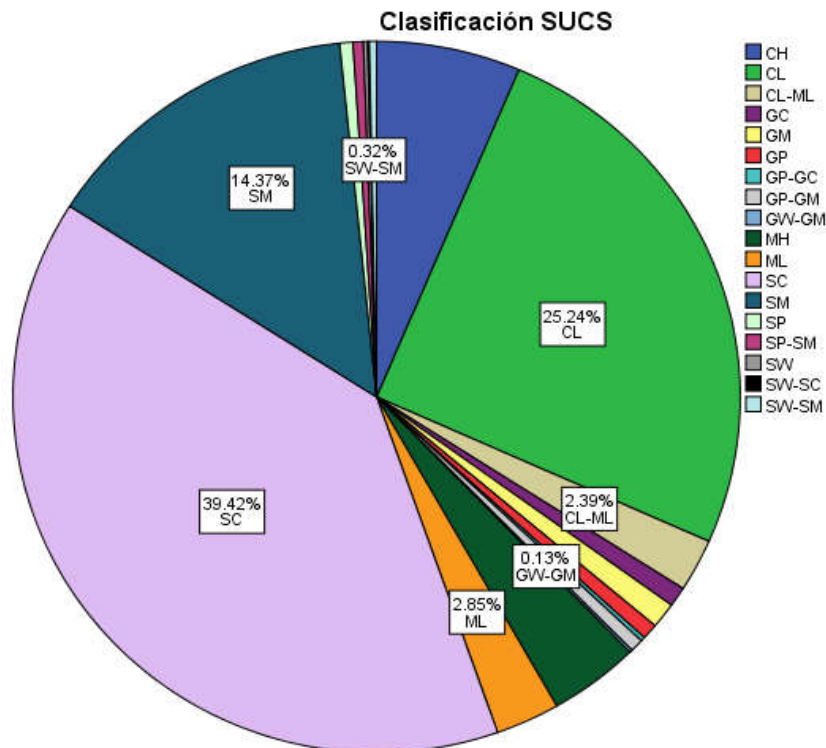


Figura 5 Ejemplo de gráfica

## 2.1.1. Tabla de Frecuencias de la identificación conforme al SUCS.

Los 1,545 datos recopilados sobre la identificación del tipo de suelo, se sometieron a un análisis cualitativo estadístico en el cual se cuantificó el número de veces en que cada tipo de suelo se localizó, para cada uno de los sitios que fueron estudiados mediante sondeos dentro de la ZMVT. Desde luego, los tipos de suelo se identificaron conforme al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). En la Tabla 1 se muestran los tipos de suelos que aparecen en esa Zona, concluyéndose que los suelos predominantes en ella son los tipos SC y CL, puesto que la suma de ambos tipos abarca más del 60 por ciento del total, como se puede observar en la Tabla 1 y en la Figura 6.

		Frecuencia	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Válido	CH	99	6.4	6.4
	CL	390	25.2	31.7
	CL-ML	37	2.4	34.0
	GC	14	.9	35.0
	GM	18	1.2	36.1
	GP	11	.7	36.8
	GP-GC	3	.2	37.0
	GP-GM	9	.6	37.6
	GW-GM	2	.1	37.7
	MH	62	4.0	41.7
	ML	44	2.8	44.6
	SC	609	39.4	84.0
	SM	222	14.4	98.4
	SP	9	.6	99.0
	SP-SM	7	.5	99.4
	SW	3	.2	99.6
	SW-SC	1	.1	99.7
	SW-SM	5	.3	100.0
	Total	1545	100.0	

Tabla 1. Tabla de frecuencias para los tipos de suelo (SUCS) encontrados en los sondeos



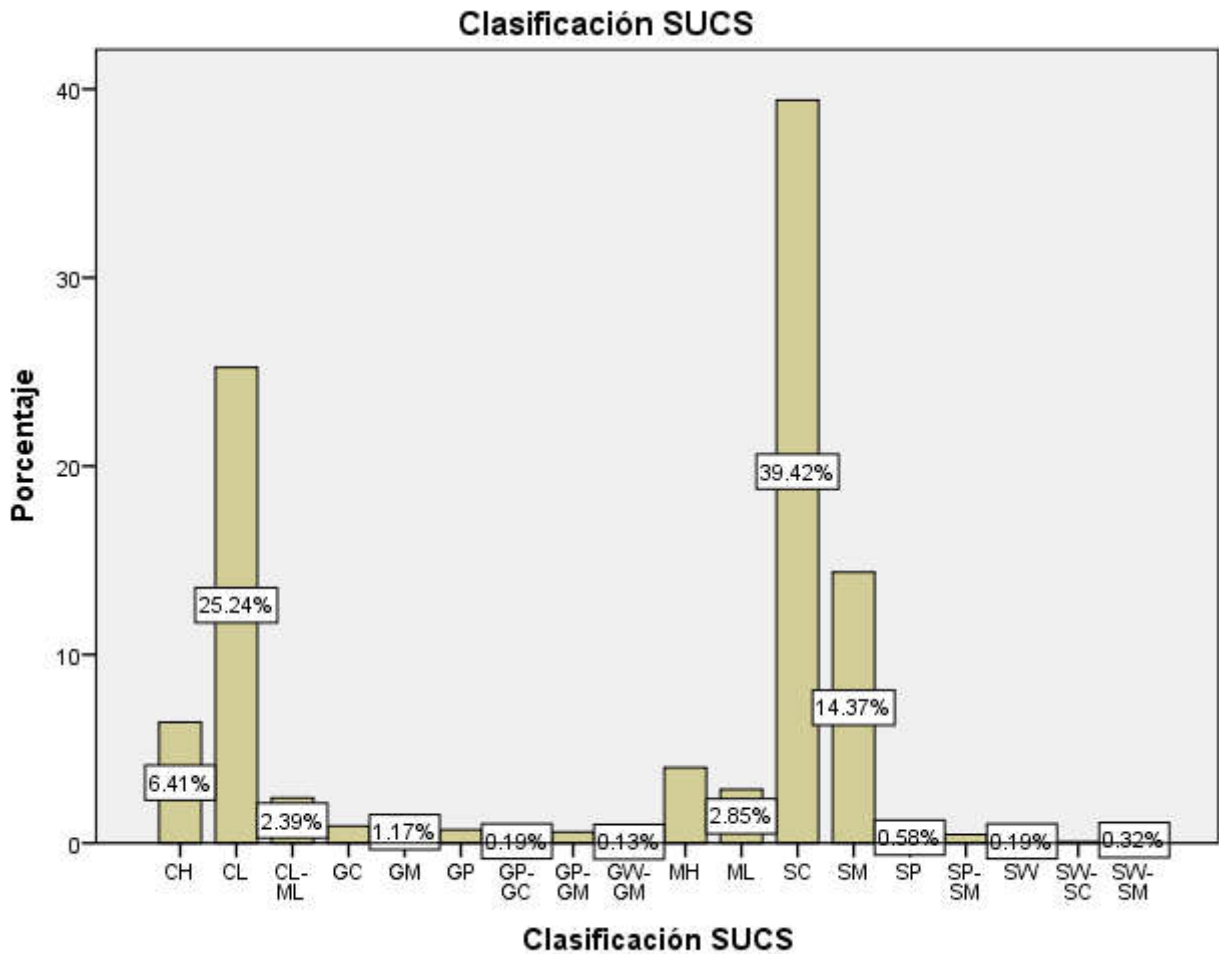


Figura 6 Distribución de datos de Identificación del tipo de suelo conforme al SUCS, en la ZMVT.

## 2.2. Resistencia a la Compresión Simple

La medición de la Resistencia a la Compresión Simple (RCS) en suelos de la ZMVT, se ha convertido en la forma más aceptada por los usuarios, para contar con el dato de su Resistencia al Esfuerzo Cortante, valor indispensable en el cálculo de la capacidad de carga del suelo, el modo de falla de cimentaciones al que la práctica de la ingeniería civil en dicha zona le ha dado más relevancia. Esta es la razón por la cual, en los datos obtenidos del laboratorio, es la medición más abundante, porque es la más solicitada por los usuarios.

Revisando los resultados obtenidos en el punto 2.1, se entiende porqué esta prueba funciona correctamente para los fines deseados: La casi totalidad de los suelos estudiados son suelos finos o suelos gruesos con un alto contenido de finos. Eso posibilita el labrado y el ensaye de los especímenes en la prueba de resistencia a la compresión simple, así como el empleo de ese resultado en los modelos matemáticos válidos para ese tipo de suelos.

### 2.2.1. Tabla de Frecuencias de las mediciones de la Resistencia a la Compresión Simple

Esta variable fue sometida a un análisis estadístico cuantitativo porque sus resultados sí son numéricos y están valorados en unidades de esfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>). En total se consideraron 1,377 mediciones, de las que se calcularon sus estadísticos tales como media y desviación estándar y se obtuvo el histograma de este conjunto de datos mostrados en la figura 7.

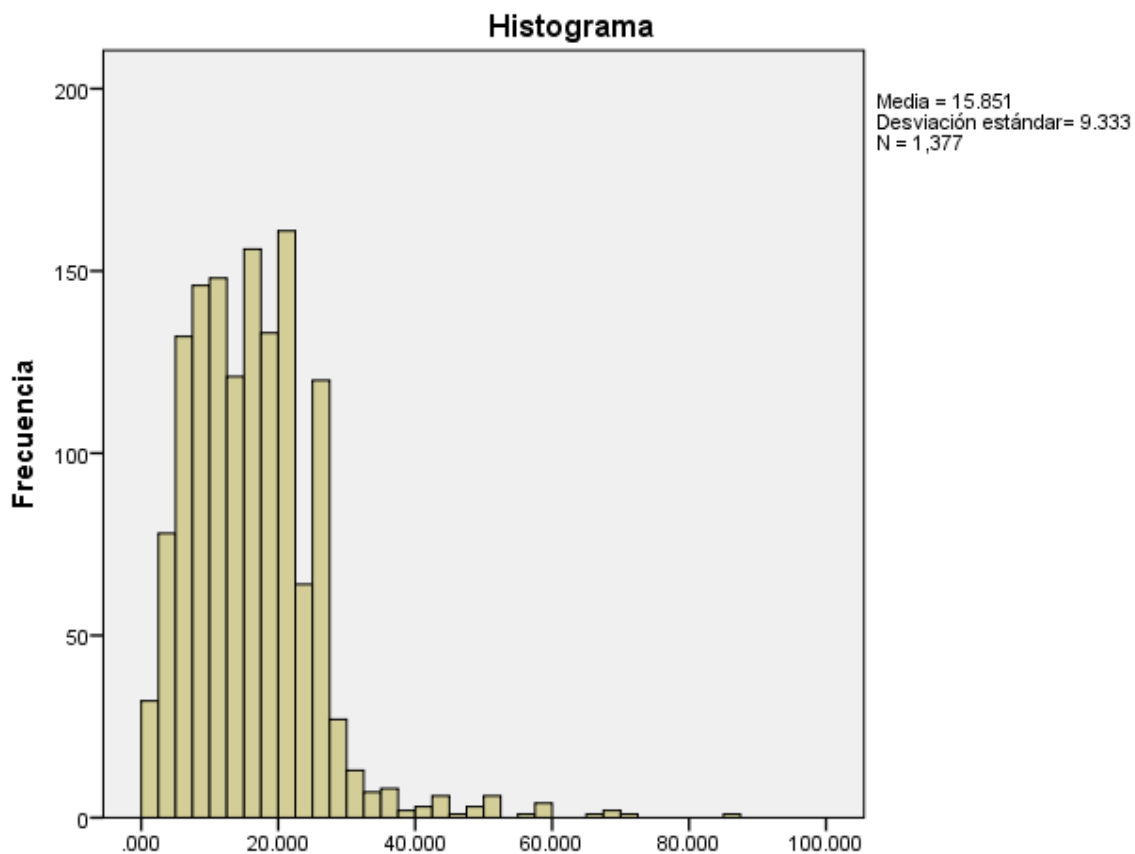


Figura 7 Histograma de datos de Resistencia a la compresión simple (Ton/m<sup>2</sup>)

Se observa que el conjunto de datos tiene una tendencia normal sesgada a la derecha, además se aprecia que el comportamiento no es completamente normal, esto se atribuye al origen de los datos y al comportamiento que tiene el suelo, el cual está estratificado y existen grandes variaciones en pequeñas áreas, el comportamiento del suelo como ha sido mencionado anteriormente no es constante, la curva normal tiende a describir de manera aproximada muchos fenómenos que ocurren en la naturaleza, la industria y la investigación. Debido a las características del suelo mencionadas con anterioridad en este documento, se recurre al análisis ANOVA, el cual trabaja con la varianza de los datos en lugar de la media, la cual dará conclusiones más aproximadas a la realidad.

Una vez que se obtuvieron estos valores estadísticos básicos, fue que se decidió subdividir en grupos a esta población de valores de la RCS. Esta decisión se basó en el propósito de buscar si dentro de ella existía algún patrón, porque al subdividirla en grupos, resulta viable aplicar el Análisis de Varianza (ANOVA) para identificar si, al comparar los valores de la RCS medidas al interior de esos grupos, son semejantes o no a los valores medidos dentro de otros grupos, para poder sustentar de forma estadística algún posible patrón encontrado.

Se hicieron 2 subdivisiones auxiliares con argumentos geográficos: Cartesiana y Municipal, y una con sustento propiamente geotécnico; la Profundidad.

## 2.2.2. Subdivisión Cartesiana.

Para la agrupación Cartesiana se supuso la división de la ZMCT en cuadrantes, proponiendo su origen en el cruce de las avenidas Miguel Hidalgo y Benito Juárez, con la primera como eje aproximado de abscisas y la segunda de ordenadas. A los cuadrantes o zonas se les denominó indistintamente de la manera usual, del 1 al 4 (Figura 8).

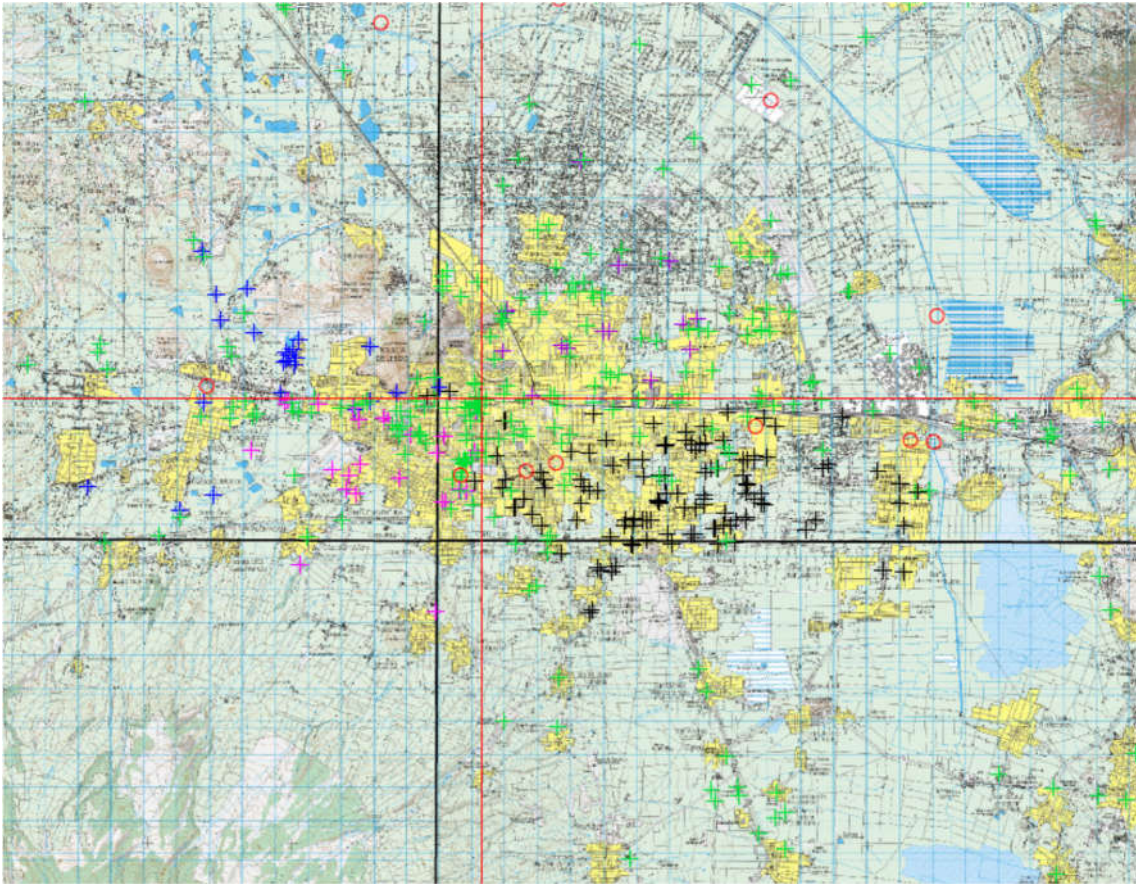


Figura 8 Propuesta de división Cartesiana

Usando como base esta subdivisión, se realizaron varias aplicaciones del proceso del ANOVA. Se juzga innecesario describir cada una de esas aplicaciones, sobre todo las que no llevaron a alguna identificación de patrones, por lo que se describe a continuación sólo la primera de ellas, la cual consistió en la siguiente prueba de hipótesis:

H<sub>0</sub>: La media de la RCS no es significativamente diferente en las 4 Zonas (ZMVT).

H<sub>1</sub>: La media de la RCS de las 4 zonas es diferente en al menos una de ellas.

Se obtuvieron los siguientes resultados, *(para visualizar los datos y cálculos correspondientes revisar la hoja de cálculo en el: [ANEXO 2](#) para tener acceso a la base de datos completa y a los sondeos que tienen reporte).*

Por zona		Datos	SCD
Media	15.9967665	1379	149883.944
Desviación Estándar	10.4292469	Varianza	108.76919

Zona 1		Datos	SCD
Media	16.6822249	418	28237.5024
Desviación estándar	8.22896307		

Zona 2		Datos	SCD
Media	15.82	178	10618.5686
Desviación estándar	7.74544467		

Zona 3		Datos	SCD
Media	19.8039409	203	63394.4832
Desviación estándar	17.7153627		

Zona 4		Datos	SCD
Media	14.22495	580	42668.124
Desviación estándar	8.58445034		

En la tabla anterior se pueden apreciar los estadísticos de cada zona; como lo son la media, desviación estándar y varianza; así como el valor de la suma de cuadrados dentro de los grupos (SCD), y en la siguiente tabla se muestra a manera de resumen el valor de SCD y el de suma de cuadrados entre grupos (SCG), acerca de los cuales se mostró anteriormente cómo calcularlos:

ANOVA		
Media Total		15.9967665
K	SCD	SCG
1	28237.5024	196.398635
2	10618.5686	5.6541566
3	63394.4832	2942.3991
4	42668.124	1820.81355
$\Sigma$	144918.678	4965.26543

Finalmente se muestran los valores de la media de cuadrados entre grupos (MCG) y Media de Cuadrados dentro de los grupos (MCD), a partir de los cuales se calcula nuestra razón F ( $F_{std}$ ), la cual se comparará contra el valor crítico de F ( $F_c$ ) obtenida de tablas.

MCD	MCG
105.395402	1655.08848

Fstd	15.7036117
Fc	3.79588132

A	v1	v2
0.01	3	1375

Como  $F_c < F_{std}$  se rechaza la hipótesis nula, por lo que se concluye que la media de la resistencia a la compresión simple es diferente al menos entre dos de las zonas de la ZMVT.

**Nota:** Este proceso se repite en tablas siguientes por lo que, como se mencionó antes, en adelante se omite la explicación de cada una de esas tablas, exceptuando aquellas en las que se haya identificado algún patrón.

### 2.2.3. Subdivisiones Cartesiana y Municipal.

Como en el análisis por cuadrantes definidos en la agrupación cartesiana no se identificó patrón alguno, se procedió a superponer dos formas de agrupación: la cartesiana y la municipal, conforme se describe enseguida.

Para empezar, en tablas posteriores de ANOVA y en los anexos en los que se muestran los análisis ANOVA de la manera descrita anteriormente, el valor k representa los municipios pertenecientes a cada una de las zonas. Debido a la división cartesiana que se realizó, algunos municipios pertenecen a más de una zona: Para revisar los municipios incluidos en cada una de las agrupaciones, se puede revisar el Anexo 2

El siguiente procedimiento se aplicó para comprobar la media de la RCS de los municipios dentro de cada zona. Es el primer resultado relevante, porque se tradujo en identificar un patrón, y fue el obtenido en la zona dos, como se describe a continuación:

1.  $H_0$ : La media de la RCS no es significativamente diferente en todos los municipios de la Zona 2 (NO).

$H_1$ : La media de la RCS de los municipios de la Zona 2 (Noroeste) es diferente, al menos entre dos de ellos.

Se obtuvieron los siguientes resultados, *(para visualizar los datos y cálculos correspondientes revisar la hoja de cálculo en el siguiente hipervínculo: ANEXO 2 y revisar la pestaña Zona 2).*

ANOVA					
Media Total		15.82			
K	SCD	SCG	MCD	MCG	
1	222.8	0.00171853	60.0983489	57.407044	
2	484.353521	272.534098			
3	486.128889	3.32072132	Fstd	0.95521832	
4	543.520083	74.0523823	Fc	2.74603634	
5	580.5	4.02003977			
6	2658.85513	12.4645228	a	v1	v2
7	4631.01169	7.4567E-05	0.01	7	170
8	609.55	35.4557505			
Σ	10216.7193	401.849308			

Como  $F_c > F_{std}$  se acepta la hipótesis nula, por lo que se concluye que la media de la resistencia a la compresión simple no es significativamente diferente para todos los municipios de la Zona 2.

Debido a lo anterior se calculó un intervalo de confianza para estimar la media global de los municipios de esta Zona 2, obteniéndose el siguiente resultado, usando la distribución normal y un nivel de confianza del 95% y 99%.

<b>Intervalo de confianza para zona 2</b>				
		0.05		
<b>Nivel de significancia</b>		0.975		
<b>z</b>	1.96			
<b>Media global</b>		14.681	,	16.956
		0.010		
<b>Nivel de significancia</b>		0.995		
<b>z</b>	2.58			
<b>Media global</b>		14.323	,	17.314

Con la descripción de las operaciones hechas para las dos zonas anteriores, se juzga innecesario presentar aquí las correspondientes a las tres zonas restantes que, de cualquier manera, se pueden consultar en los anexos de este trabajo.

## 2.2.4. Subdivisiones Cartesiana, Municipal y por profundidades.

En busca de un patrón un tanto más preciso se agregó la variable de profundidad a las dos subdivisiones previas: de 0 a 1 m., de 1 a 2 m. y mayor a 2 m. De acuerdo con los resultados obtenidos al aplicar el ANOVA para esta superposición de las tres agrupaciones, se identificaron nuevos patrones. En las páginas siguientes se presentan las conclusiones del ANOVA para los casos en los que se presentó esa condición.

1.  $H_0$ : La RCS de los municipios de la Zona 1 (Noreste), no es significativamente diferente a una profundidad de entre 1 y 2 metros.  
 $H_1$ : La RCS de los municipios de la Zona 1 es diferente, al menos entre dos de ellos a una profundidad de entre 1 y 2 metros.



ANOVA					
Media Total		16.6903077			
k	SCD	SCG	MCG	MCD	
1	977.481095	0.1241486	92.4536031	51.5135751	
2	52.1666667	18.3970613			
3	93.04	137.682287	Fstd	1.79474251	
4	487.059375	11.4665588	Fc	1.94073203	
5	124	36.1887774	a	v1	v2
6	987.525263	0.21387556	0.01	22	172
7	160.38	0.16845363			
8	178.96875	77.9846784			
9	0	28.1928324			
10	0	110.046555			
11	0	75.5214478			
12	0	21.9989862			
13	91.44	3.69425105			
14	446.716	40.4133702			
15	173.333333	6.2870457			
16	18	79.624434			
17	1091.54015	96.7000824			
18	2695.84009	984.07201			
19	323.941588	0.01688557			
20	0	75.5214478			
21	629.769231	108.023129			
22	263.008373	97.9695158			
23	66.125	23.671434			
$\Sigma$	8860.33491	2033.97927			

Como  $F_c > F_{std}$  se acepta la hipótesis nula, por lo que se concluye que la media de la resistencia a la compresión simple no es significativamente diferente para los municipios en estudio en la Zona 1 (Noreste) a una profundidad de entre 1 y 2 metros.

Debido a lo anterior se calculó un intervalo de confianza para estimar la media global de los municipios de esta Zona 1, obteniéndose el siguiente resultado, usando la distribución normal y un nivel de confianza del 95% y 99%.

<b>Intervalo de confianza para zona 1</b>				
		0.05		
<b>Nivel de significancia</b>		0.975		
<b>z</b>	1.96			
<b>Media global</b>	15.639	,		17.742
		0.010		
<b>Nivel de significancia</b>		0.995		
<b>z</b>	2.58			
<b>Media global</b>	15.308	,		18.073

2.  $H_0$ : La RCS de los municipios de la Zona 1 (Noreste), no es significativamente diferente a una profundidad mayor a 2 metros.

$H_1$ : La RCS de los municipios de la Zona 1 es diferente, al menos entre dos de ellos a una profundidad mayor a 2 metros.

ANOVA					
Media Total		16.99375			
k	SCD	SCG	MCG	MCD	
1	1172.10881	140.630807	93.4444248	69.7248793	
2	3.92	259.635078			
3	315.372083	53.835126	Fstd	1.34018769	
4	315.477143	109.959381	Fc	2.18408037	
5	0	8.96253906	a	v1	v2
6	0	64.1000391	0.01	19	68
7	0	56.1562891			
8	60.75	72.4626562			
9	1162.05312	8.87445031			
10	112.5	0.51257812			
11	0	15.9500391			
12	24.2286	483.75907			
13	20.6666667	5.28345052			
14	988.226692	141.182516			
15	60.5	24.5875781			
16	45.125	1.14382812			
17	98	0.00011719			
18	23.12	176.485078			
19	239.872	147.628195			
20	99.371675	4.29525625			
?	4741.29179	1775.44407			

Como  $F_c > F_{std}$  se acepta la hipótesis nula, por lo que se concluye que la media de la resistencia a la compresión simple no es significativamente diferente para los municipios en estudio en la Zona 1 (Noreste) a una profundidad mayor a 2 metros.

Debido a lo anterior se calculó un intervalo de confianza para estimar la media global de los municipios de esta Zona 1, obteniéndose el siguiente resultado, usando la distribución normal y un nivel de confianza del 95% y 99%.

Intervalo de confianza para zona 1				
		0.05		
Nivel de significancia		0.975		
z	1.96			
Media global		15.185	,	18.802
		0.010		
Nivel de significancia		0.995		
z	2.58			
Media global		14.617	,	19.370

3.  $H_0$ : La RCS de los municipios de la Zona 2 (Noroeste), no es significativamente diferente a una profundidad entre 0 y 1 metros.

$H_1$ : La RCS de los municipios de la Zona 2 es diferente, al menos entre dos de ellos a una profundidad entre 0 y 1 metros.

ANOVA					
Media Total		13.71			
K	SCD	SCG	MCD	MCG	
1	78	118.814261	62.1712936	54.0668594	
2	216.75	8.48870637			
3	245.48	51.6452294	Fstd	0.86964347	
4	1165.79205	16.7110842	Fc	3.34465433	
5	1744.20928	72.9044185			
6	217.875	1.77059801	a	v1	v2
$\Sigma$	3668.10632	270.334297	0.01	5	59

Como  $F_c > F_{std}$  se acepta la hipótesis nula, por lo que se concluye que la media de la resistencia a la compresión simple no es significativamente diferente para los municipios en estudio en la Zona 2 (Noroeste) a una profundidad entre 0 y 1 metros.

Debido a lo anterior se calculó un intervalo de confianza para estimar la media global de los municipios de esta Zona 2, obteniéndose el siguiente resultado, usando la distribución normal y un nivel de confianza del 95% y 99%.

Intervalo de confianza para zona 2			
Nivel de significancia		0.05	
z	1.96	0.975	
Media global	11.800	,	15.614
Nivel de significancia		0.01	
z	2.58	0.995	
Media global	11.200	,	16.213

4.  $H_0$ : La RCS de los municipios de la Zona 2 (Noroeste), no es significativamente diferente a una profundidad entre 1 y 2 metros.

$H_1$ : La RCS de los municipios de la Zona 2 es diferente, al menos entre dos de ellos a una profundidad entre 1 y 2 metros.

ANOVA					
Media Total		17.06			
K	SCD	SCG	MCD	MCG	
1	12.5	114.205163	55.9453497	68.23863	
2	223.252371	152.815281			
3	209.232	61.833257	Fstd	1.2197373	
4	242	18.6859128	Fc	2.89826957	
5	386.5	15.1068256			
6	1071.61072	0.08251525	a	v1	v2
7	1742.97009	109.511973	0.01	7	72
8	140	5.42948252			
$\Sigma$	4028.06518	477.67041			

Como  $F_c > F_{std}$  se acepta la hipótesis nula, por lo que se concluye que la media de la resistencia a la compresión simple no es significativamente diferente para los municipios en estudio en la Zona 2 (Noroeste) a una profundidad entre 1 y 2 metros.

Debido a lo anterior se calculó un intervalo de confianza para estimar la media global de los municipios de esta Zona 2, obteniéndose el siguiente resultado, usando la distribución normal y un nivel de confianza del 95% y 99%.

<b>Intervalo de confianza para zona 2</b>				
		0.05		
<b>Nivel de significancia</b>		0.975		
<b>z</b>	1.96			
<b>Media global</b>	15.402	,		18.712
		0.010		
<b>Nivel de significancia</b>		0.995		
<b>z</b>	2.58			
<b>Media global</b>	14.882	,		19.232

5.  $H_0$ : La RCS de los municipios de la Zona 3 (Suroeste), no es significativamente diferente a una profundidad entre 1 y 2 metros.

$H_1$ : La RCS de los municipios de la Zona 3 es diferente, al menos entre dos de ellos a una profundidad entre 1 y 2 metros.

ANOVA					
Media Total		16.106875	MCD	MCG	
K	SCD	SCG	80.865513	180.66895	
1	4041.2347	176.861896			
2	200.27	209.851439			
3	265.320267	71.6507505	Fstd	2.23419036	
4	44.0266667	80.2966001	Fc	2.62071807	
5	21.78	109.723595			
6	10.532	678.248486	a	v1	v2
7	1859.13809	45.6802076	0.01	9	86
8	88.3	174.455861			
9	45	27.1831891			
10	378.8324	52.0685215			
$\Sigma$	6954.43412	1626.02055			

Como  $F_c > F_{std}$  se acepta la hipótesis nula, por lo que se concluye que la media de la resistencia a la compresión simple no es significativamente diferente para los municipios en estudio en la Zona 3 (Suroeste) a una profundidad entre 1 y 2 metros.

Debido a lo anterior se calculó un intervalo de confianza para estimar la media global de los municipios de esta Zona 3, obteniéndose el siguiente resultado, usando la distribución normal y un nivel de confianza del 95% y 99%.

Intervalo de confianza para zona 3			
Nivel de significancia		0.05	
z	1.96	0.975	
Media global	12.522	,	19.692
Nivel de significancia		0.01	
z	2.58	0.995	
Media global	11.396	,	20.818

Como se mencionó antes, se considera innecesario presentar aquí los análisis correspondientes a las 11 agrupaciones restantes, porque en ellas no se identificó patrón alguno y se presentan sólo en el Anexo 2.

### 2.3. Tablas Cruzadas para los resultados SUCS-RCS

Para concluir con estos análisis estadísticos, se revisó si existe algún patrón al relacionar dos de los resultados ya específicamente obtenidos en este trabajo: Los correspondientes a la identificación SUCS y a la determinación de la RCS. Para ello, al conjunto de ambos grupos se les aplicó la herramienta conocida como Tablas Cruzadas.

Como operación previa antes de aplicarlas, se verificó que los grupos de suelo identificados conforme al SUCS, tuvieran más de 30 elementos, condición básica del muestreo para que los análisis estadísticos posteriores tengan validez. Por esa limitante, para este análisis se conservaron sólo siete de los dieciocho grupos de suelo localizados en la ZMVT (Tabla 2).

Clasificación SUCS	Cantidad de datos
CH	95
CL	368
CL-ML	35
MH	58
ML	41
SC	531
SM	149

Tabla 2: Tipos de suelo con más de 30 elementos, en los que el análisis estadístico es aplicable

Una vez hecha esa depuración, se aplicaron las Tablas Cruzadas, cuyos primeros resultados son las gráficas que se ilustran en la Figura 9.



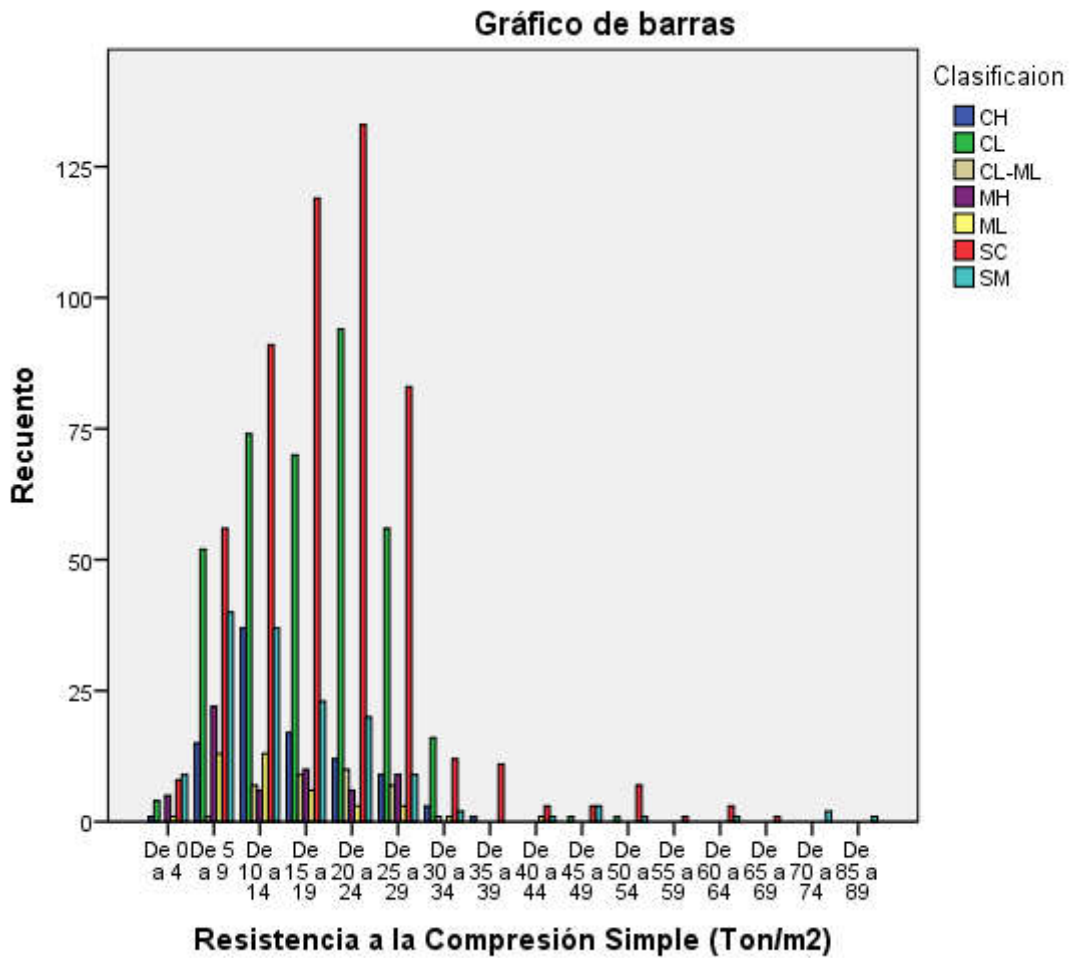


Figura 9 Grafica de barras para las Tablas Cruzadas RCS-SUCS

En la figura 9 se puede observar el recuento de datos de cada tipo de suelo, en el intervalo de RCS, agrupados de 5 en 5.

El siguiente paso consistió en obtener la media de la RCS para cada uno de los grupos de suelo, así como los intervalos de confianza correspondientes, con los resultados mostrados en la Tabla 3.

Clasificación SUCS	Media	Desviación Estándar	Intervalo de Confianza al 95%	
			Inferior	Superior
CH	13.467	6.946	12.052	14.882
CL	15.974	7.485	15.206	16.741
CL-ML	16.959	6.123	14.856	19.062
MH	11.489	7.909	9.410	13.569
ML	12.068	8.226	9.471	14.664
SC	17.503	9.481	16.695	18.312
SM	14.098	13.204	11.960	16.236

Tabla 3: Intervalos de confianza de la RCS para cada tipo de suelo.

Estos datos solo son para tener un parámetro de debido a que, como se mencionó anteriormente el comportamiento de los datos tiene un sesgo. Estas tablas se verán posteriormente con la misma finalidad.

A continuación, se aplicó el ANOVA comparando cada uno de los tipos de suelo con sus correspondientes pares, uno a uno, obteniéndose los resultados que se indican en la Tabla 5. Aquí se estableció como condición para aceptar que dos cualesquiera de estos grupos, tuvieran la misma media de la RCS, que la confianza fuera mayor a 0.95.

(I) Clasificación	(J) Clasificación	Sig.
CH	CL	.206
	CL-ML	.459
	MH	.853
	ML	.983
	SC	.002
	SM	.998
	CL	.206
CL	CH	.206
	CL-ML	.997
	MH	.010
	ML	.128
	SC	.172
	SM	.345
	CL-ML	.459
CL-ML	CH	.459
	CL	.997
	MH	.077
	ML	.233
	SC	1.000
	SM	.639
	MH	.853
MH	CH	.853
	CL	.010
	CL-ML	.077
	ML	1.000
	SC	.000
	SM	.518
	ML	.983

	CL	.128
	CL-ML	.233
	MH	1.000
	SC	.005
	SM	.870
SC	CH	.002
	CL	.172
	CL-ML	1.000
	MH	.000
	ML	.005
	SM	.001
SM	CH	.998
	CL	.345
	CL-ML	.639
	MH	.518
	ML	.870
	SC	.001

Tabla 4: Resultados de ANOVA al comparar combinaciones de cada tipo de suelo SUCS.

Debe aclararse que esta aplicación del ANOVA a cada uno de los tipos de suelo con sus correspondientes pares, uno a uno, se realizó usando el software estadístico SPSS, el cual no muestra los valores de “F estandarizado” y “F crítico”, como en los casos descritos antes. En vez de ello, muestra los niveles de confianza para la similitud, obteniéndose los resultados indicados en la Tabla 4.

Usando los resultados de esa Tabla 4 se construye la Figura 10, que muestra las medias de la RCS para cada tipo de suelo, así como su comportamiento.

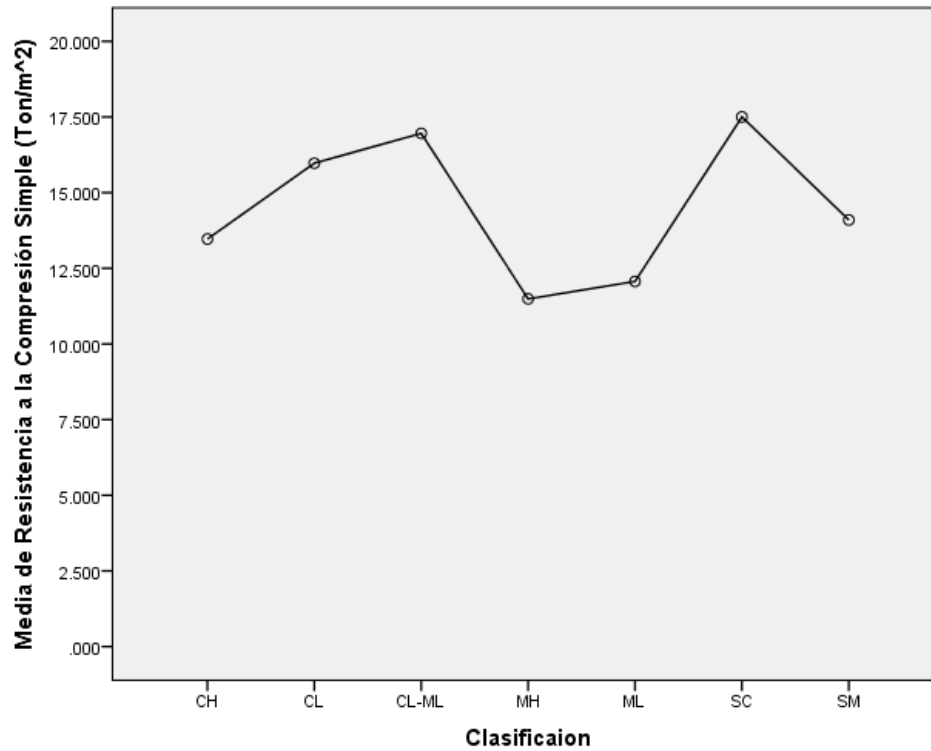


Figura 10 Valores de las medias de la RCS para cada tipo de Suelo SUCS.

En la figura 10 se muestra la respuesta gráfica del ANOVA aplicado, mostrando la dispersión de los tipos de suelo con respecto a los demás.

Con el fin de mostrar en cuáles combinaciones de tipos de suelo de todas las anteriores, es que se cumple la condición de similitud de la RCS, se usan los datos de la Tabla 4.

Clasificación ANOVA	CH	CL	CL-ML	MH	ML	SC	SM
Clasificación							
CH	Black				Green		Green
CL		Black	Green				
CL-ML		Green	Black			Green	
MH				Black	Green		
ML	Green			Green	Black		
SC			Green			Black	
SM	Green						Black

Tabla 5: Representación de tipos de suelo con un comportamiento similar de su RCS.

En esta Tabla 5, las marcas verdes muestran para cuáles filas y columnas el ANOVA cumple con la hipótesis nula y, por tanto, para cuáles combinaciones de tipo de suelo se cumple la condición de tener una RCS que no es significativamente diferente. Enseguida se enlistan las combinaciones indicadas.

1. Intervalo de confianza juntando los valores de RCS de CH con ML y con SM
2. Intervalo de confianza juntando los valores de RCS de CL con CL-ML
3. Intervalo de confianza juntando los valores de RCS de CL-ML con CL y con SC
4. Intervalo de confianza juntando los valores de RCS de MH con ML
5. Intervalo de confianza juntando los valores de RCS de ML con CH y con MH
6. Intervalo de confianza juntando los valores de RCS de SC con CL-ML
7. Intervalo de confianza juntando los valores de RCS de SM y CH

La Tabla 6 muestra la media de la RCS de estos 7 grupos, así como su intervalo de confianza.

Grupos de suelos SUCS	Media	Desviación Estándar	Intervalo de Confianza al 95%	
			Inferior	Superior
1	13.596	10.809	12.335	14.856
2	16.059	7.376	15.337	16.782
3	16.880	8.661	16.324	17.436
4	11.729	8.005	10.132	13.326
5	12.580	7.537	11.513	13.647
6	17.470	9.306	16.701	18.238
7	13.852	11.178	12.443	15.262

Tabla 6: Intervalos de confianza y comportamiento de RCS para combinaciones de tipos de suelo detectadas a partir del ANOVA.

Aquí debe resaltarse que las agrupaciones de tipos de suelo para los que se identificaron comportamientos semejantes de la RCS, no guardan consistencia geotécnica, por lo que se decidió hacer una nueva aplicación del ANOVA a los siete casos definidos en la tabla 6, obteniéndose los resultados que se presentan en la Tabla 7.

(I) ANOVA	(J) ANOVA	Sig.
Grupo 1	Grupo 2	.008
	Grupo 3	.000
	Grupo 4	.567
	Grupo 5	.891
	Grupo 6	.000
	Grupo 7	1.000
	Grupo 2	Grupo 1
Grupo 3		.729
Grupo 4		.000
Grupo 5		.000
Grupo 6		.200
Grupo 7		.042
Grupo 3		Grupo 1
	Grupo 2	.729
	Grupo 4	.000
	Grupo 5	.000
	Grupo 6	.884
	Grupo 7	.000
	Grupo 4	Grupo 1
Grupo 2		.000
Grupo 3		.000
Grupo 5		.988
Grupo 6		.000
Grupo 7		.432
Grupo 5		Grupo 1
	Grupo 2	.000
	Grupo 3	.000
	Grupo 4	.988
	Grupo 6	.000
	Grupo 7	.766
	Grupo 6	Grupo 1
Grupo 2		.200

	Grupo 3	.884
	Grupo 4	.000
	Grupo 5	.000
	Grupo 7	.000
Grupo 7	Grupo 1	1.000
	Grupo 2	.042
	Grupo 3	.000
	Grupo 4	.432
	Grupo 5	.766
	Grupo 6	.000

Tabla 7: Resultados de ANOVA al comparar 7 Grupos de tipos de suelo.

En esta Tabla 7 se observa que los grupos 1 y 7 y los grupos 4 y 5, tienen un comportamiento similar, información que se aprovecha para construir la Tabla 8, con esos dos posibles patrones.

Grupos de suelos SUCS	Media	Desviación Estándar	Intervalo de Confianza al 95%	
			Inferior	Superior
CH ML SM	13.467	6.946	12.052	14.882
CH ML MH	16.959	6.123	14.856	19.062

Tabla 8: Intervalos de confianza para los casos dominantes.

Como en la Tabla 9 se observa que hay tipos de suelo muy similares, se decidió realizar una nueva aplicación del ANOVA, en este caso para dos grupos, cuyo resultado fue negativo. De hecho, en ese análisis se concluye que son los tipos de suelo SM y MH, los que afectan significativamente el comportamiento de las medias.

Por todos los antecedentes indicados, se concluye que el único patrón identificado es el relativo a que los tipos de suelo CH y ML tienen un comportamiento el cual se considera que no es significativamente diferente: Su RCS es igual a 13 Ton/m<sup>2</sup>, como se resume en la Tabla 9, en la que también se indica el intervalo de confianza correspondiente

Clasificación SUCS	Media	Desviación Estándar	Intervalo de Confianza al 95%	
			Inferior	Superior
CH ML	13.045	7.352518	11.798	14.292

Tabla 9: Intervalos de confianza para patrón encontrado



## 2.4 Módulo de Elasticidad.

Esta variable se sometió a análisis estadístico cuantitativo obteniendo el valor de su media y desviación estándar y el histograma correspondiente. En este caso, la población es de 33 mediciones, debido a que no es un estudio que se solicite con frecuencia en el Laboratorio de Materiales, y se cuentan con muy pocos reportes con la curva esfuerzo-deformación ( $\sigma - \varepsilon$ ). En el Anexo 4 se presentan los reportes y Módulos de Elasticidad calculados a partir de ellos para llegar al histograma mostrado en la Figura 11, estos datos tienen una media de 1,211 ton/m<sup>2</sup> y una desviación estándar de 514 ton/m<sup>2</sup>. Como este número de mediciones es tan reducido, no se aplicó interpretación estadística alguna. Lo anterior además del comportamiento de los datos en estratos, lo que lleva a tener una gran dispersión y sesgo.

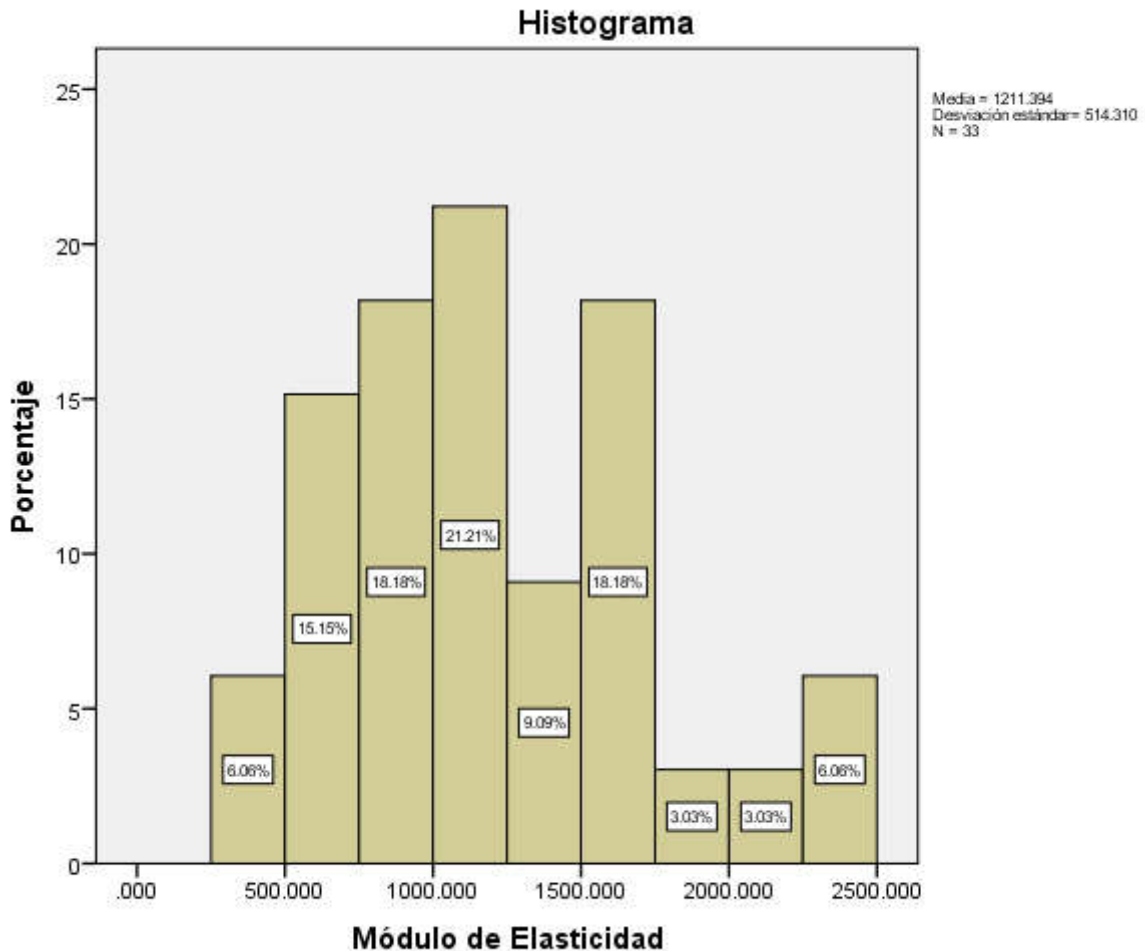


Figura 11 Histograma del Módulo de elasticidad

## 2.5 Permeabilidad

Con la intención de obtener una estimación de la permeabilidad de los suelos, se recuperaron las curvas granulométricas disponibles en la información recopilada. Lo anterior con el fin de compararlas con otras curvas granulométricas de suelos, a las que se ha podido asociar una relación consistente con el valor de su coeficiente de permeabilidad como se muestra en la Figura 12 (Rico y del Castillo, 2008):

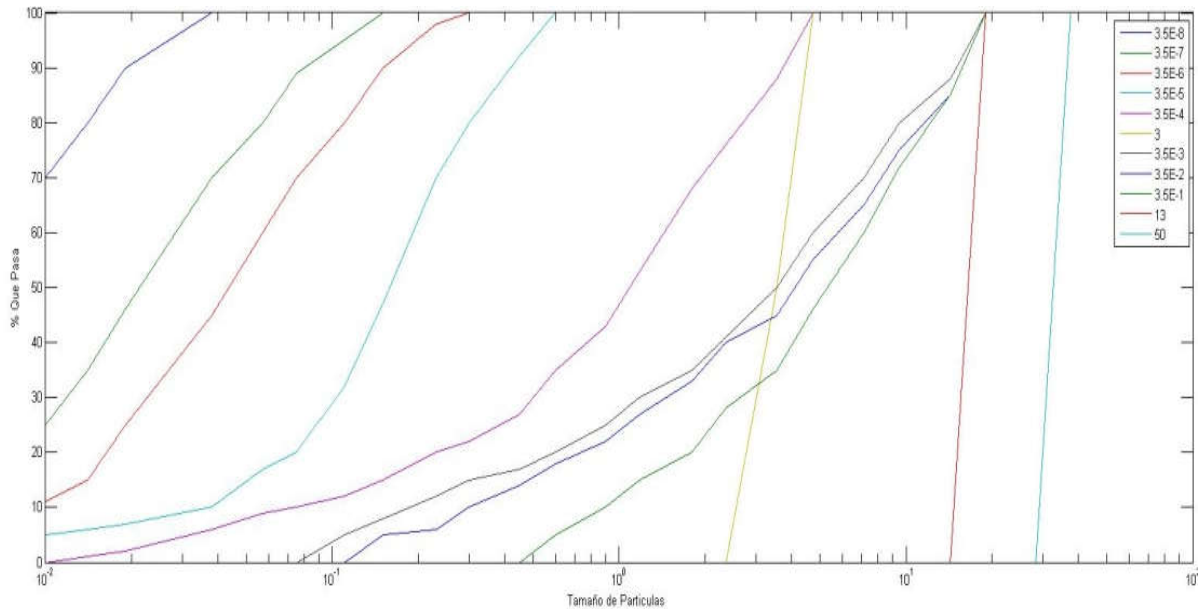


Figura: 12 Curvas granulométricas asociadas a un Coeficiente k

Complementariamente se ensayó otro procedimiento para estimar la permeabilidad, también basado en el uso de esas curvas granulométricas: El método indirecto planteado por Allen Hazen (1892) y reproducido en la referencia (Juárez y Rico, 2002) conforme a la fórmula:

$$k = CD_{10}^2 \left( \frac{cm}{s} \right)$$

En donde k es el coeficiente de permeabilidad buscado y  $D_{10}$  el diámetro efectivo de Hazen, que es el diámetro tal que el 10 % de las partículas del suelo estudiado es menor que dicho diámetro, referido al peso total del suelo. Hazen obtuvo esta fórmula a partir de la experimentación en arenas y suele aceptarse el valor de  $C=116$  como un promedio para sus experiencias. De esta manera se intentó llegar

a alguna conclusión acerca de la relación entre el valor del coeficiente de permeabilidad y la curva granulométrica del suelo.

Estos procedimientos para estimar el coeficiente de permeabilidad debieron usarse, porque dentro de la información fuente de este trabajo, no se tienen resultados de mediciones directas de ese coeficiente.

Las estimaciones del coeficiente  $k$ , se hicieron a partir de resultados de pruebas de granulometría y su número es aún menor al del párrafo previo, porque se usó el Criterio de Hazen, el cual requiere de  $D_{10}$ , su diámetro efectivo. De las 1,545 muestras a las que se realizó la prueba de granulometría, sólo en diez se pudo definir  $D_{10}$ . Se encontró que el valor promedio de  $k$  es de  $3.3 \times 10^{-2}$  cm/seg, con una desviación estándar de  $1.8 \times 10^{-2}$  cm/seg. Cabía esperar un resultado así, a la luz de los resultados de la identificación de suelos, los que mostraron que casi el 98% de los suelos de la ZMVT tienen un porcentaje de finos mayor al 12 %.

Se cuenta con las curvas granulométricas “estándar” asociadas a un coeficiente de permeabilidad  $k$ , mostradas en la Figura 12 (Rico y del Castillo, 2008).

En el Anexo 4 se pueden encontrar todos los sondeos a los que se le comparó con estas curvas asociadas, además de los reportes de los sondeos empleados.

Por ello, sólo queda un ejercicio cualitativo de comparar curvas de distribución granulométrica, obtenidas de setenta muestras de suelo, con curvas disponibles en referencias, para asumir un valor de  $k$  del orden de  $10^{-5}$  cm/seg (**Patrón identificado-estimado**). Aun con esas limitaciones, este es un resultado útil en el diseño preliminar de obras civiles para movilidad sustentable, que modifica el paradigma de alta-resistencia/baja-permeabilidad, sobre el que se basan los criterios de diseño de pavimentos convencionales. El uso generalizado de pavimentos permeables en la ZMVT requiere del valor de  $k$ , especialmente de los estratos superficiales, como es el caso de estos resultados.

Si se quieren revisar los reportes seleccionados y la comparación cualitativa que se realizó se puede revisar el Anexo 4 donde se encontraran las curvas Granulométricas dibujadas a un lado de las curvas “estándar” mostradas en la Figura 12. Además del procedimiento seguido para calcular la permeabilidad a partir del Criterio de Hazen.

## 3. Interpretación de Resultados del Análisis

---

### 3.1. Identificación SUCS:

Los resultados de la identificación SUCS evidencian que menos del 2% de los suelos muestreados en la ZMVT, a profundidades de entre 0 y 3 m, pertenecen a grupos de suelos que no son finos o no se ven afectados por fracciones significativas de suelos finos. Dicho de otra manera, prácticamente la totalidad, más del 98%, de esa población pertenece a grupos de suelos finos, o suelos gruesos cuya fracción fina es tan abundante, que gobierna el comportamiento mecánico de la mezcla (**patrón identificado**), lo cual justifica y explica el uso que se hace, al menos desde la década de los 1970's, de la RCS para medir su resistencia al esfuerzo cortante.

Una ventaja para los fines de construcción de obras de infraestructura y equipamiento en esta Zona, es que se trata de suelos finos de baja compresibilidad, que no ocasionan problemas al usarse como material de apoyo. Esta conclusión general es válida sólo en casos que no signifiquen aplicar cargas importantes, para los cuales será necesario realizar sondeos a mayor profundidad que los 3.0 m abarcados con el grupo de sondeos descritos en este trabajo. Esta recomendación es particularmente válida para sitios en la zona de Lerma, donde está documentada la existencia de materiales de alta compresibilidad y baja resistencia al esfuerzo cortante, incluso a partir de 2.0 m de profundidad.

En su caso, algunos de los tipos de suelos identificados podrían usarse hasta como material de construcción, conforme a las condiciones granulométricas establecidas para esa finalidad.

### 3.2. Resistencia a la Compresión Simple

En cuanto a la población integrada por las mediciones de la Resistencia a la Compresión Simple (RCS), la aplicación de herramientas estadísticas, incluyendo la Tabla de Frecuencia, permite llegar a que el valor de su media es de 15.9 ton/m<sup>2</sup>, con una desviación estándar de 9.3 ton/m<sup>2</sup>. En los párrafos siguientes se hace una discusión detallada del comportamiento de esta variable, pero se adelanta que sus valores extremos, cuyas mediciones aquí se presentan, evidencian cierta uniformidad en su comportamiento, para el rango de profundidades revisado.

Se identificaron patrones en el comportamiento de esta variable usando el procedimiento de subdividir su población en grupos, como se mencionó y describió en el apartado anterior: Cartesiana, Municipal y Profundidad. A las poblaciones

así agrupadas se les aplicó el Análisis de Varianza (ANOVA), obteniéndose que las medias del valor de la RCS son todas diferentes entre sí para: a) Cada cuadrante; b) Cada uno de los municipios de la ZMVT y c) Cada rango de profundidad supuesto.

El paso siguiente del análisis consistió en superponer el efecto simultáneo de dos de esas tres agrupaciones. A los tres grupos así definidos se les aplicó el ANOVA, obteniéndose los resultados siguientes:

Superponiendo las agrupaciones Cartesiana y Municipal se obtuvo que: 1) Las medias del valor de la RCS de los municipios de los cuadrantes 1, 3 y 4 son todas diferentes entre sí y 2) Aunque el valor de la media de la RCS para el cuadrante 2, es la misma en los 8 municipios integrados a él, al superponer el efecto de la profundidad, este Patrón ya no se incluyó.

Al superponer las agrupaciones Municipal y Profundidad y aplicar el ANOVA, se concluye que las medias del valor de la RCS de los municipios de la ZMCT, cuando se separan en cada uno de los tres estratos considerados, son todas diferentes entre sí.

Combinando las agrupaciones Cartesiana y Profundidad, se identificó que las medias de la RCS son semejantes: 1) En el cuadrante 1 de la ZMVT, en los estratos de 1 a 2 m y de 2 a 3 m; 2) En el cuadrante 2 de la ZMVT, en los estratos de 0 a 1 m y de 1 a 2 m y 3) En el cuadrante 3 de la ZMVT en el estrato de 1 a 2 m (**Tres patrones identificados**). Para el cuadrante 4, las medias de la RCS son todas diferentes entre sí, para los tres estratos supuestos.

Por último, los resultados del ejercicio de combinar las variables SUCS con RCS, cuyo comportamiento ya fue producto del desarrollo de este trabajo, permiten concluir que sí hay un patrón estadístico en esa combinación, el cual se identifica al conjuntar los tipos de suelo CH y ML, cuya RCS es similar e igual a 13 ton/m<sup>2</sup> (**Patrón identificado**)


## 4. Herramienta Informática para recuperación de datos

---

### SONDEOS SUPERFICIALES.

Además del tratamiento de la información de los sondeos superficiales (entre 1 y 3 m de profundidad), obtenida de la referencia mencionada, procesada en la forma descrita en los capítulos 2, 3 y 4 y a partir de la cual se obtuvieron las conclusiones mostradas en el capítulo 5, enseguida se presenta una aportación adicional de este trabajo. Consiste en una herramienta informática amigable, mediante la cual se posibilita un fácil acceso a los datos de la estratigrafía del suelo de la ZMVT, para cada uno de los sitios en que se localizó un sondeo, presentando los resultados capturados directamente de los reportes originales del laboratorio, conforme se obtuvieron de la referencia (Albíter, 2017).

La herramienta mencionada consiste en lo siguiente: En el mapa de esa Zona se marca cada uno de los sitios estudiados, mediante uno o más sondeos, con un

elemento así:  .

A cada uno de estos elementos, la herramienta le establece una liga con su correspondiente perfil estratigráfico, el cual se dibuja a partir de los resultados de los sondeos hechos en el sitio. Para observarlo, se pulsa la tecla Ctrl y se da clic sobre uno de ellos, con lo que se abre un archivo adicional, en el cual se puede apreciar dicho perfil. El color asignado a cada uno de estos elementos, sólo tiene el propósito de distinguir unos de otros, y no tiene un significado adicional que lo asocie a comportamiento específico alguno. A continuación, en la Figura 13 se muestra una captura del mapa empleado.

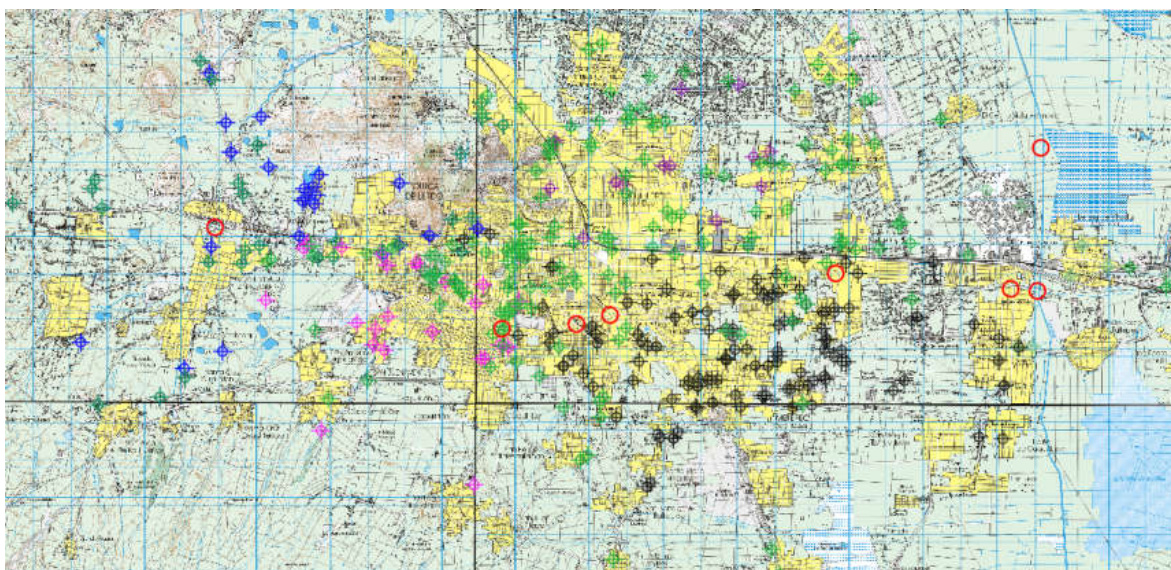


Figura 13. Mapa de Sondeos en la ZMVT

Para elaborar cada uno de los perfiles estratigráficos se usó una clave de color bastante sencilla, basada en el porcentaje de finos encontrado en cada muestra de suelo. Como se sabe, la presencia de suelos finos (mayor al 12%) (Partículas cuyo diámetro es menor al de la malla # 200) es, en términos generales, una mala señal en cuanto al comportamiento mecánico de la masa integral del suelo, porque esa fracción fina puede estar asociada a baja resistencia al esfuerzo cortante y/o a alta compresibilidad.

A partir de esos antecedentes, se usó el color **verde** para representar suelos con una cantidad pequeña de finos (del 0 al 12%); **amarillo**, para suelos con una cantidad de finos significativa, que haga recomendable tener precaución (del 12 al 50%); y **rojo** para suelos con elevado contenido de finos, sobre todo si son de alta compresibilidad (mayor al 50%).



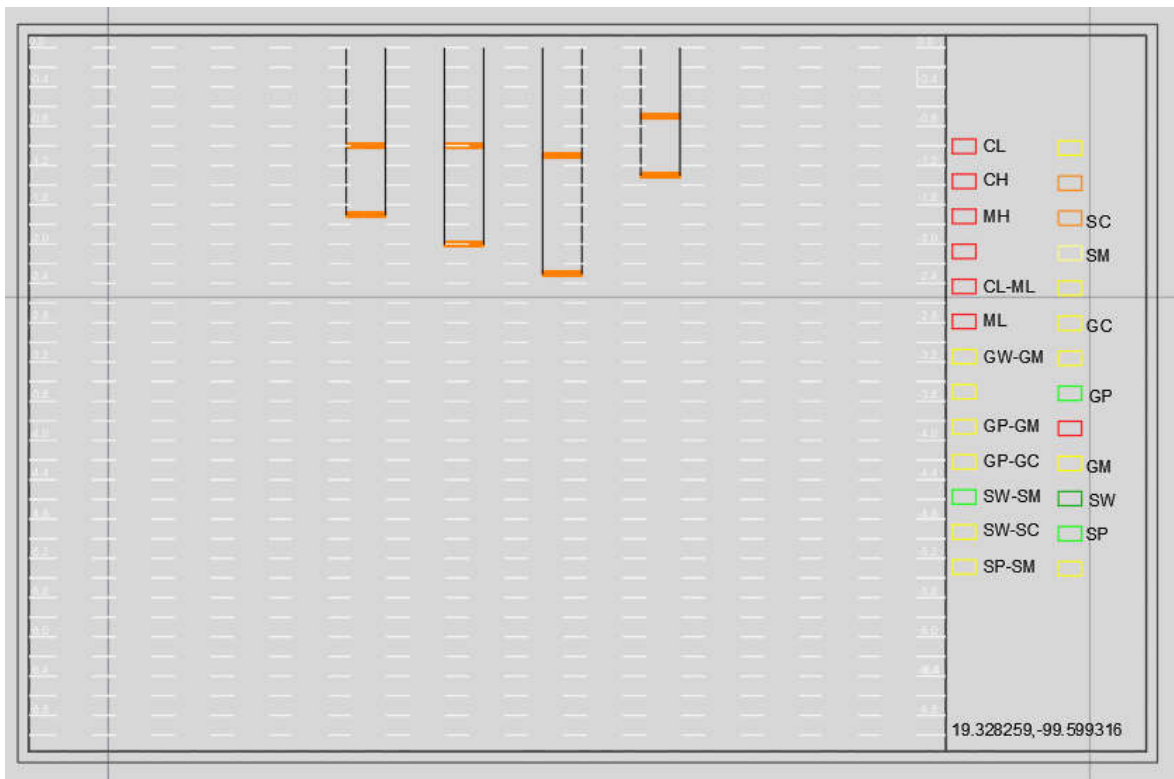


Figura 14 Perfil Estratigráfico

Ya se mencionó que la información mostrada en cada uno de los puntos que representan los sondeos, incluye las hojas de resultados de laboratorio escaneadas directamente de los reportes originales las cuales se pueden encontrar por medio de sus coordenadas y en la base de datos de Excel proporcionada en el ANEXO 1. Pero adicionalmente se agregó la figura mencionada del perfil estratigráfico, que constituye un resumen gráfico de los resultados de las exploraciones realizadas en algún sitio específico. Vale recordar que en un solo sitio explorado pueden tenerse resultados de más de un sondeo.

Para ilustrar el contenido de la información resumida en el perfil estratigráfico, en la Figura 14 se puede ver un ejemplo de ellos, elaborado a partir de los cuatro sondeos que se realizaron en el sitio. Cada elemento en blanco representa 0.2m de profundidad y en la parte inferior del costado derecho se muestran las coordenadas del sondeo mostrado, referidas al origen ubicado en el cruce de las avenidas Miguel Hidalgo y Benito Juárez. En el mismo costado derecho, pero en su parte superior, se encuentra la clave empleada para los tipos de suelo, que corresponden a los definidos por el SUCS. Los elementos de color y remarcados son la representación del tipo de suelo encontrado, para conocer el tipo de suelo exacto que se muestra, simplemente se debe dar clic encima del elemento y se desplegará el nombre del elemento seleccionado como se muestra a continuación en la Figura 15.



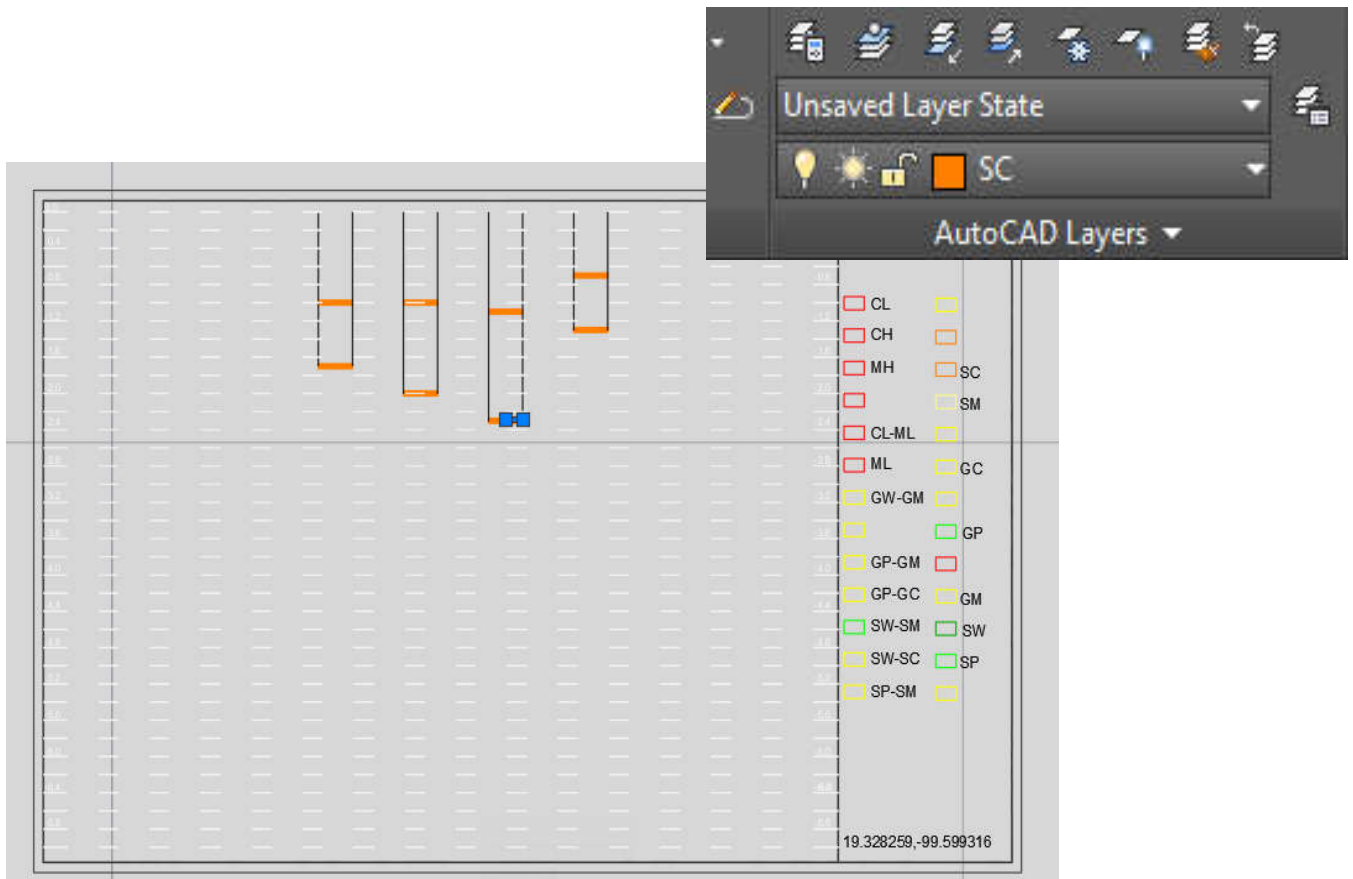


Figura 15 Perfil estratigráfico seleccionando un tipo de suelo.

## SONDEOS PROFUNDOS.

Finalmente, los puntos marcados con un círculo rojo en el mapa representan sondeos profundos. Aun cuando la información obtenida de este tipo de sondeos, no se integró a los datos que forman parte de las poblaciones analizadas en los capítulos iniciales de este trabajo, por sí sola es particularmente valiosa e incluye componentes de campo y de laboratorio, que se muestran al operar la herramienta informática en la forma ya descrita. Cuando se abre alguno de esos archivos, pulsando los controles antes mencionados, se recupera información como la presentada en la Figura 16. Como es usual en ese tipo de estudios, se representan resultados de ensayos de identificación de suelos, de determinaciones de contenido de agua y, sobre todo, de la resistencia a la penetración estándar (RPE-SPT), todo ello graficado con respecto a la profundidad.

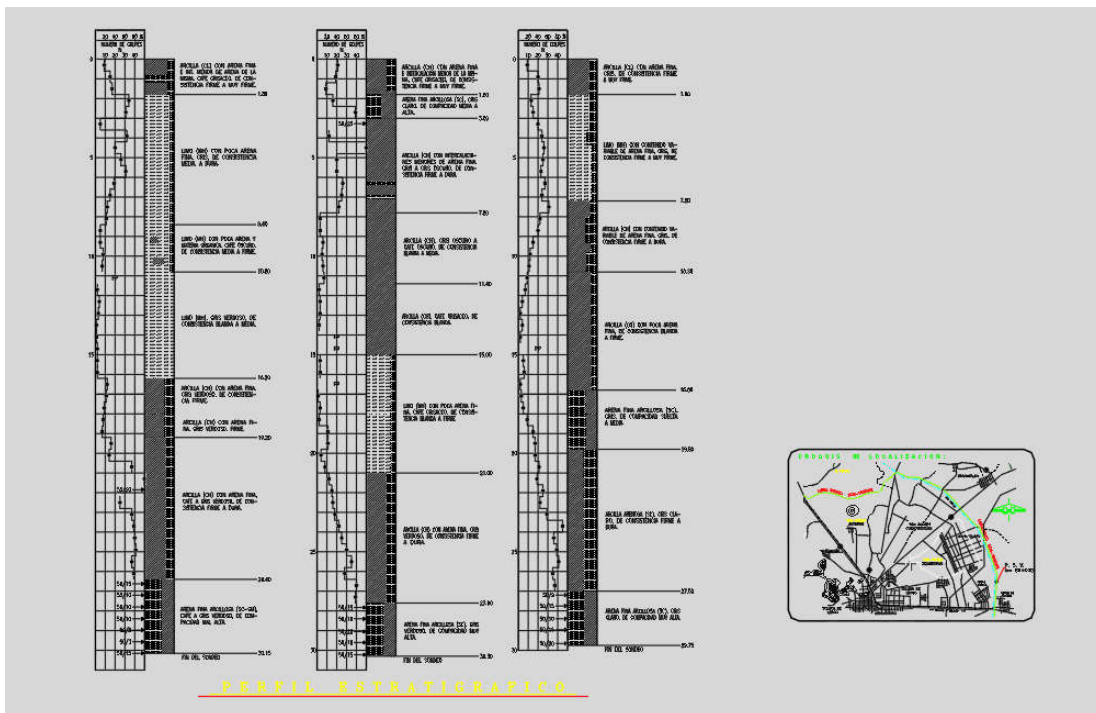


Figura 16 Sondeo Profundo

De esta manera se pone a disposición de la comunidad una herramienta amigable con el usuario, que unida con la base de datos de Excel del Anexo 1, posibilita tener un fácil acceso a datos recopilados a lo largo de varios años, permitiendo una cobertura razonablemente buena, de la fase de acopio de información previa para estudios geotécnicos en la ZMVT cuya omisión, como se describió en el capítulo inicial de este trabajo, puede dar pie a errores en el desarrollo de ese estudio geotécnico y, lo que es peor, reflejarse en un mal funcionamiento de la obra e incluso hasta en su falla.

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

---

### 5.1. CONCLUSIONES.

1. La hipótesis de partida de este trabajo estableció, referente a los datos de la ZMVT usados como base para el mismo, que: “será posible identificar patrones en al menos uno de ellos: a) Su clasificación SUCS; b) Su resistencia al esfuerzo cortante; c) Su módulo de elasticidad o d) Su coeficiente de permeabilidad”. Al término del análisis realizado y descrito en este trabajo se concluye que efectivamente, se identificaron patrones en dos de ellos y otro más al combinar los resultados aquí obtenidos para los incisos (a) y (b)

2. El primer patrón identificado es el relativo a la clasificación SUCS: El 98 % de la población de suelos de la ZMVT muestreada en 1545 ocasiones, a profundidades comprendidas entre 0 y 3 m, pertenece a grupos de suelos finos, o de suelos gruesos cuya fracción fina es tan abundante, que gobierna el comportamiento mecánico del suelo respectivo.

3. Otro patrón se refiere a la RCS, medida 1377 veces en muestras obtenidas entre 0 y 3 m de profundidad. En este caso se encontró que las medias de la RCS son semejantes: a) En el Noreste de la ZMVT, a las profundidades comprendidas entre 1 y 2 m y entre 2 y 3 m; b) En el Noroeste de la ZMVT a las profundidades comprendidas entre 0 y 1 m y entre 1 y 2 m y c) En el suroeste de la ZMVT a las profundidades comprendidas entre 1 y 2 m. Además, la Tabla de Frecuencias aplicada a la RCS permite llegar a que el valor de su media es de 15.9 ton/m<sup>2</sup>, con una desviación estándar de 9.3 ton/m<sup>2</sup>, para toda la ZMVT

4. El número de mediciones del Módulo de Elasticidad que finalmente se hizo, estuvo muy por debajo del número de mediciones de las otras dos variables, por lo que no se le aplicó herramienta estadística alguna ya que, como los datos del suelo están obtenidos en distintos estratos y se tiene una reducida cantidad de datos, su dispersión es significativa. Las treinta y tres mediciones de este Módulo mostraron una media de 1211 ton/m<sup>2</sup> y una desviación estándar de 514 ton/m<sup>2</sup>

5. De acuerdo con la conclusión N° 2, los pavimentos permeables que se construyan en la ZMVT, deberán tener en cuenta que el suelo comprendido entre 0 y 3 m de profundidad, es predominantemente impermeable, porque los suelos más abundantes en ese rango de profundidades tienen un alto porcentaje de finos (arcillas y limos) los cuales están asociados a una baja

permeabilidad. Para mejorar el funcionamiento de esos pavimentos, habrá que modificar su diseño convencional y proponer uno, que lleve el agua captada en sus componentes permeables, a estratos con una profundidad mayor a 3 m.

6. El último patrón se identificó al usar las Tablas Cruzadas, aplicadas a combinar los resultados obtenidos para las variables RCS y SUCS, cuyo comportamiento ya fue producto del desarrollo de este trabajo. Para identificar ese patrón se requirió, además, de aplicar el ANOVA de forma iterativa, con lo cual se concluye que el conjunto de tipos de suelos ML y CH tienen una media de su RCS similar e igual a 13 ton/m<sup>2</sup> y una desviación estándar de 7.35 ton/m<sup>2</sup>

7. La herramienta informática basados en AutoCAD Maps y Excel para recuperación de datos creada como parte de este trabajo y que se describe en el capítulo 6, es una aportación adicional del mismo, que busca acercar a los usuarios la información geotécnica disponible, en un formato amigable y de fácil acceso.

8. La naturaleza de este trabajo hace obligatoria una actualización permanente de SUS datos, lo que puede llevar a un ajuste de los resultados aquí obtenidos, para hacerlos más confiables, reduciendo el grado de error en las conclusiones y en las regiones aquí definidas.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

1. La naturaleza de este trabajo obliga a actualizarlo permanentemente, sobre todo ante el reciente crecimiento de obras de infraestructura y equipamiento en la ZMVT, tanto en número como en tamaño, lo cual también ha hecho crecer la información geotécnica. Es importante tener presente que esa actualización podría modificar las conclusiones aquí obtenidas, en su caso reduciendo el error posible, y garantizando de mejor manera que la información encontrada es precisa.

2. También es importante tener claro lo que resalta, por ejemplo, la reglamentación geotécnica de la Ciudad de México: Los esfuerzos por buscar y, en su caso, encontrar patrones, no exime a los responsables de nuevas obras, de aplicar el protocolo completo de exploración, sobre todo si la magnitud de esas obras es importante. Trabajos adicionales de acopio de datos, pueden contribuir a enriquecer ese protocolo y mejorar el diseño geotécnico correspondiente.

3. Específicamente, los resultados obtenidos para el coeficiente de permeabilidad,  $k$ , así sean sólo asumidos, aportan datos para un diseño preliminar de obras, que pueden contribuir a mejorar el funcionamiento hídrico de la ZMVT, el cual evidencia periódicamente sus deficiencias: Mientras por un lado, se agudiza la escasez de agua potable, debido a la insuficiente recarga de sus mantos acuíferos y a su crecimiento poblacional, por otro lado, esta última condición propicia mayor descontrol de los escurrimientos superficiales, ocasionando inundaciones cada vez más graves y frecuentes en las partes bajas de la ZMVT, con secuelas indeseables para la salud de sus habitantes, entre otros inconvenientes.

4. Ensayar otros modos de análisis para obtener el coeficiente de permeabilidad, que respondan de mejor manera al tipo de suelo dominante en la ZMVT, para tener resultados más precisos, con base en los datos ya recabados y, en su caso, otros ya actualizados. Lo mismo se recomienda para el caso del Módulo de Elasticidad.

## 6. Referencias

---

Albiter R., Á. (2017). *Actualización del estudio del subsuelo de la ZMCT*. México. FIUAEMéx - CICEM.

Juárez Badillo, E., & Rico Rodriguez, A. (2002). *Mecánica de suelos Tomo 1*. Limusa. México.

Lambe, W. T., & Whitman, R. V. (1991). *Mecánica de Suelos*. Limusa. México.

Rico y del Castillo (2008). *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres. Tomo I*. Limusa. México.

Walpole, R., Myers, R., & Myers, S. (2012). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. México: Pearson.

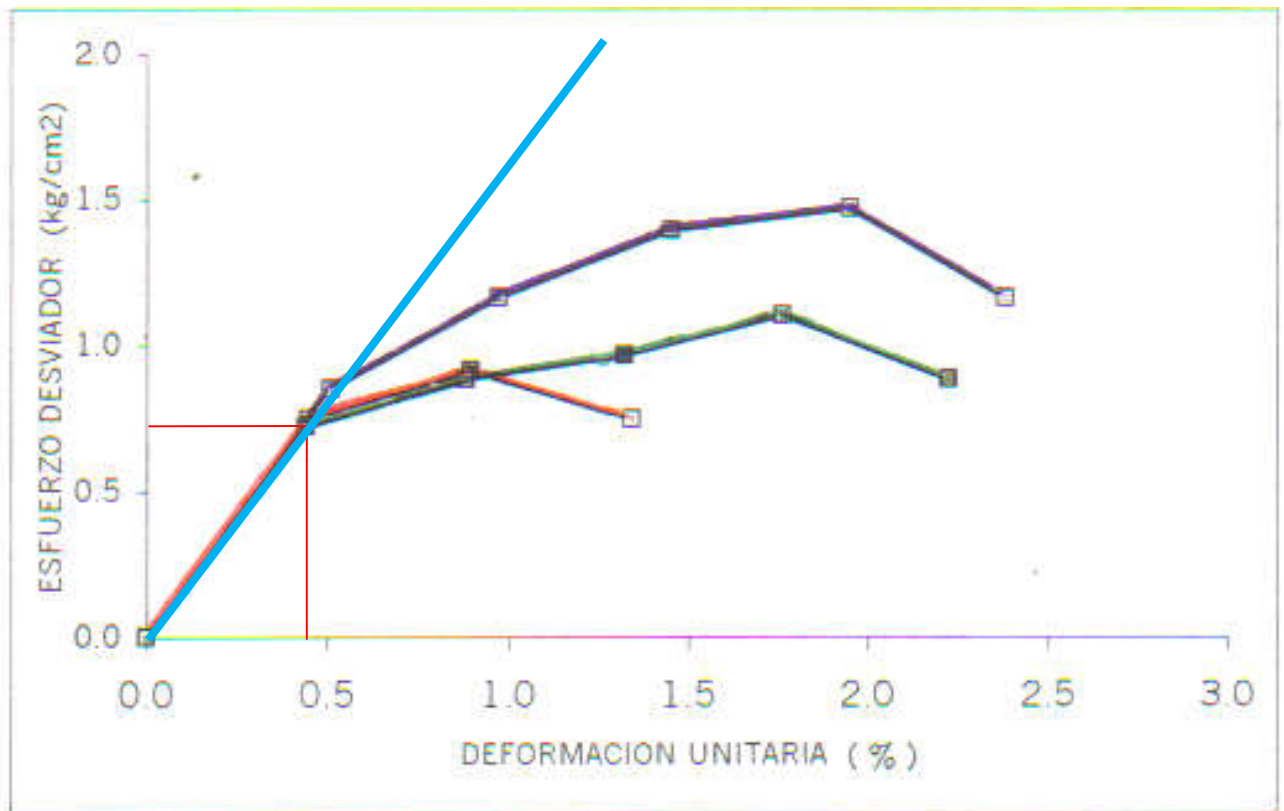
## Anexo 1

---

## Anexo 3

Para obtener el Módulo de elasticidad se obtuvieron los reportes de las pruebas triaxiales realizadas en la ZMVT en 10 sitios de estudio, de los cuales se presenta su curva ( $\sigma - \epsilon$ ) con los respectivos Módulos de Elasticidad calculados:

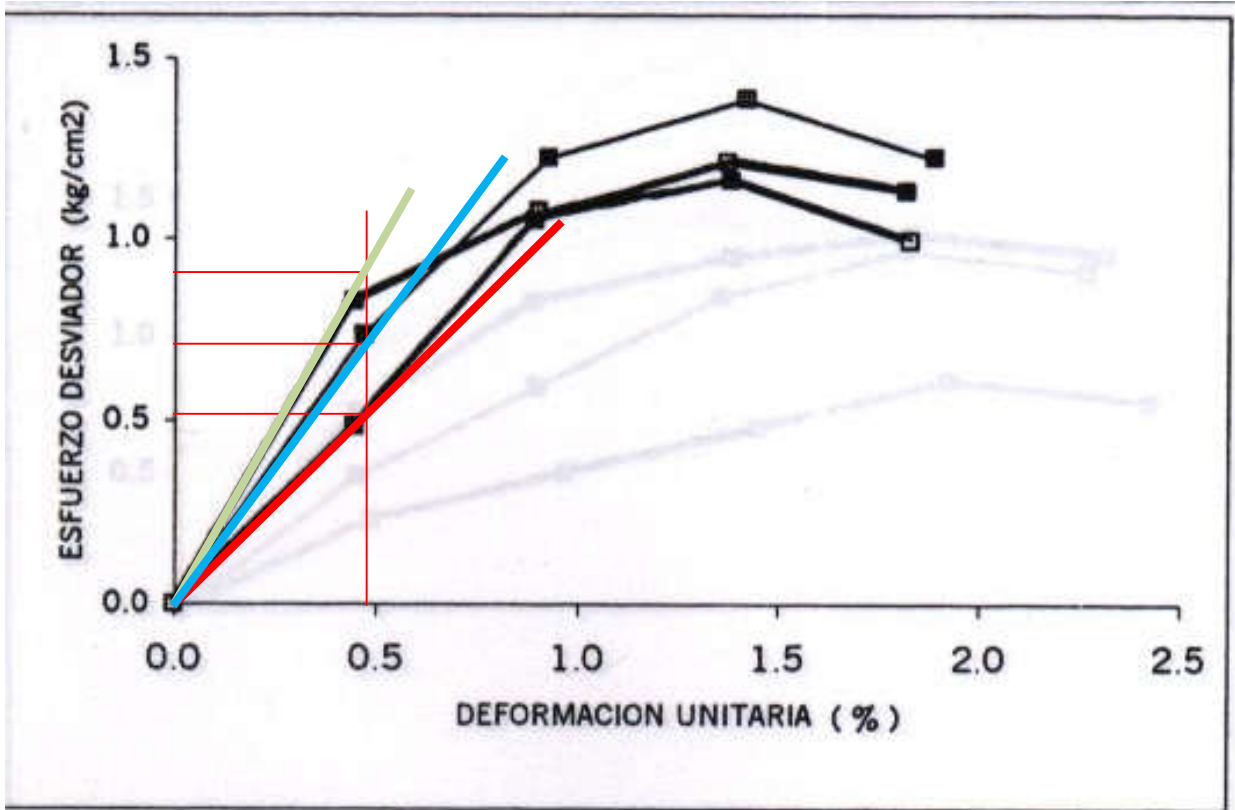
- Av. Las Torres no. 727, Santa Ana Tlapaltitlán Toluca, Estado de México



$$E = \frac{0.736}{0.428} = 1.72 \text{ kg/cm}^2$$



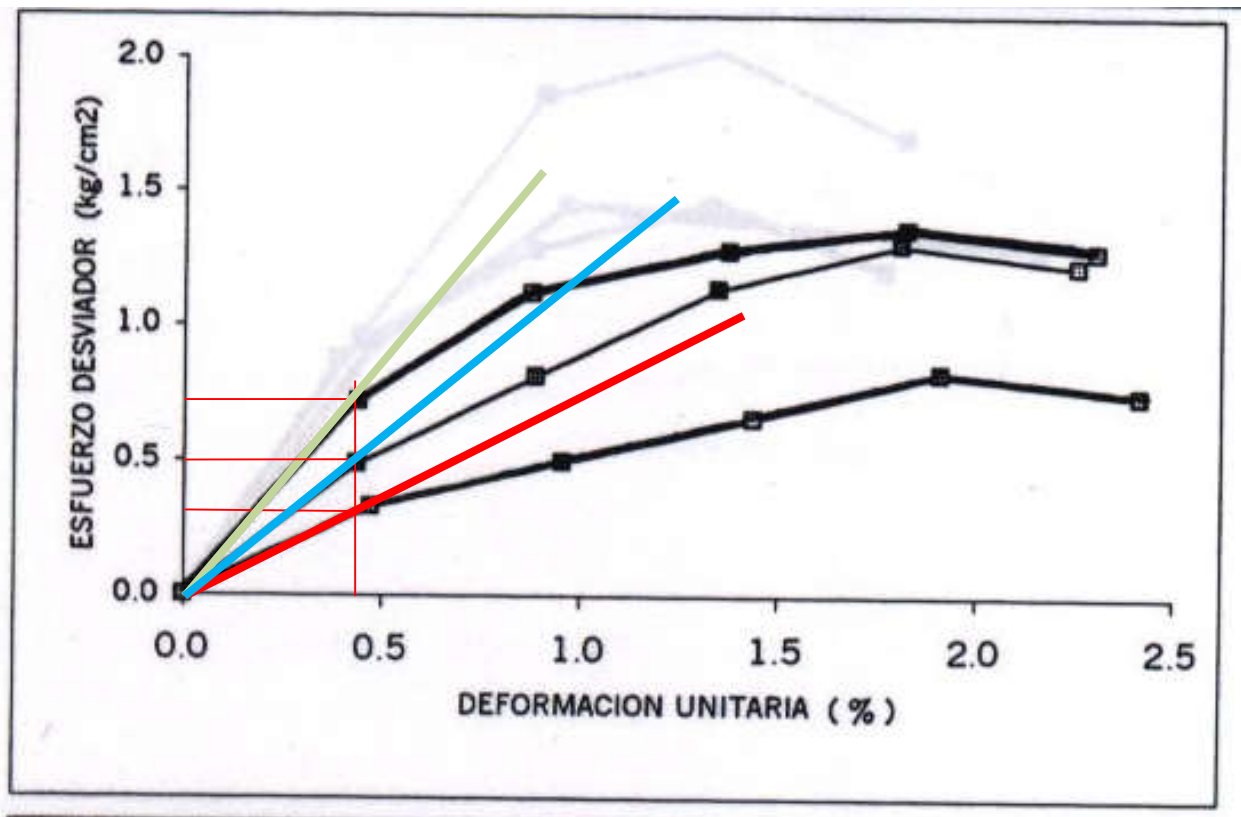
- Av. Sebastián Lerdo de Tejada no. 835 y Av. Miguel Hidalgo no 1000-PTE colonia San Bernardino



$$E_v = \frac{.8958}{0.479} = 1,870 \text{ ton/m}^2$$

$$E_a = \frac{0.7143}{0.479} = 1,490 \text{ ton/m}^2$$

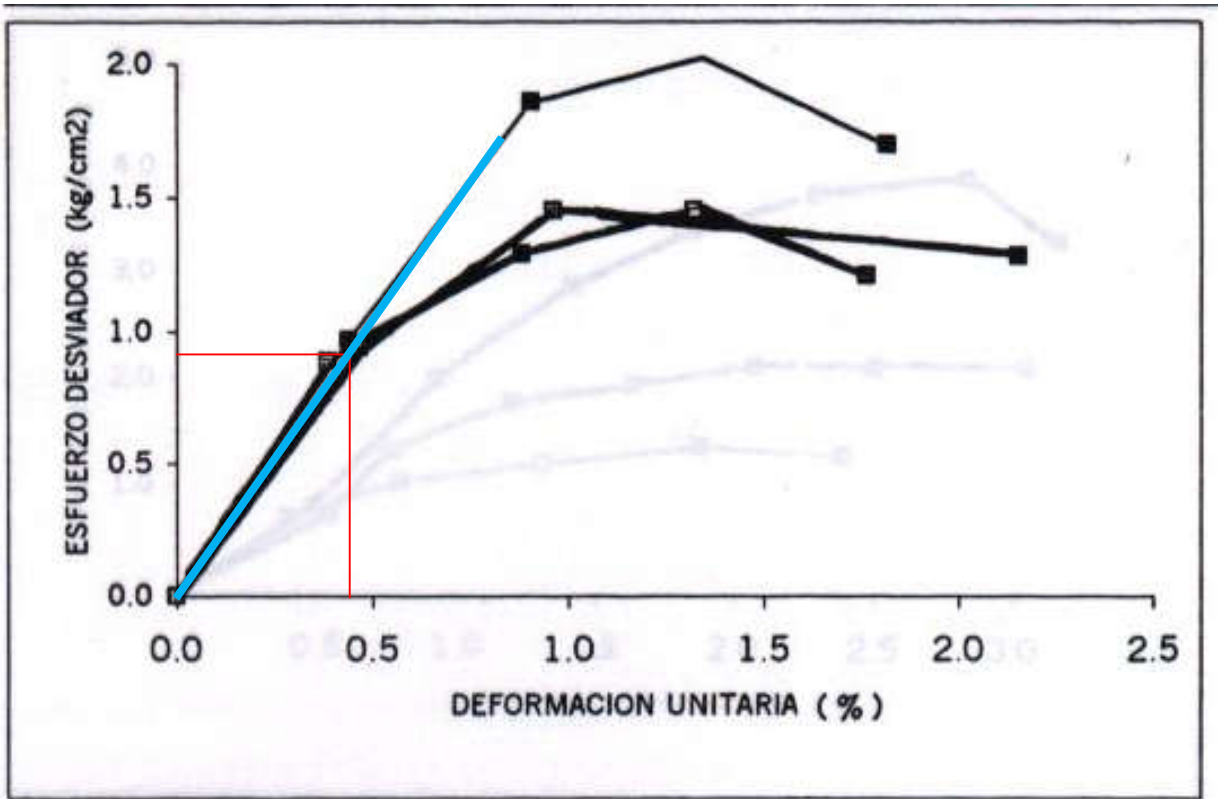
$$E_r = \frac{0.5}{0.479} = 1,043 \text{ ton/m}^2$$



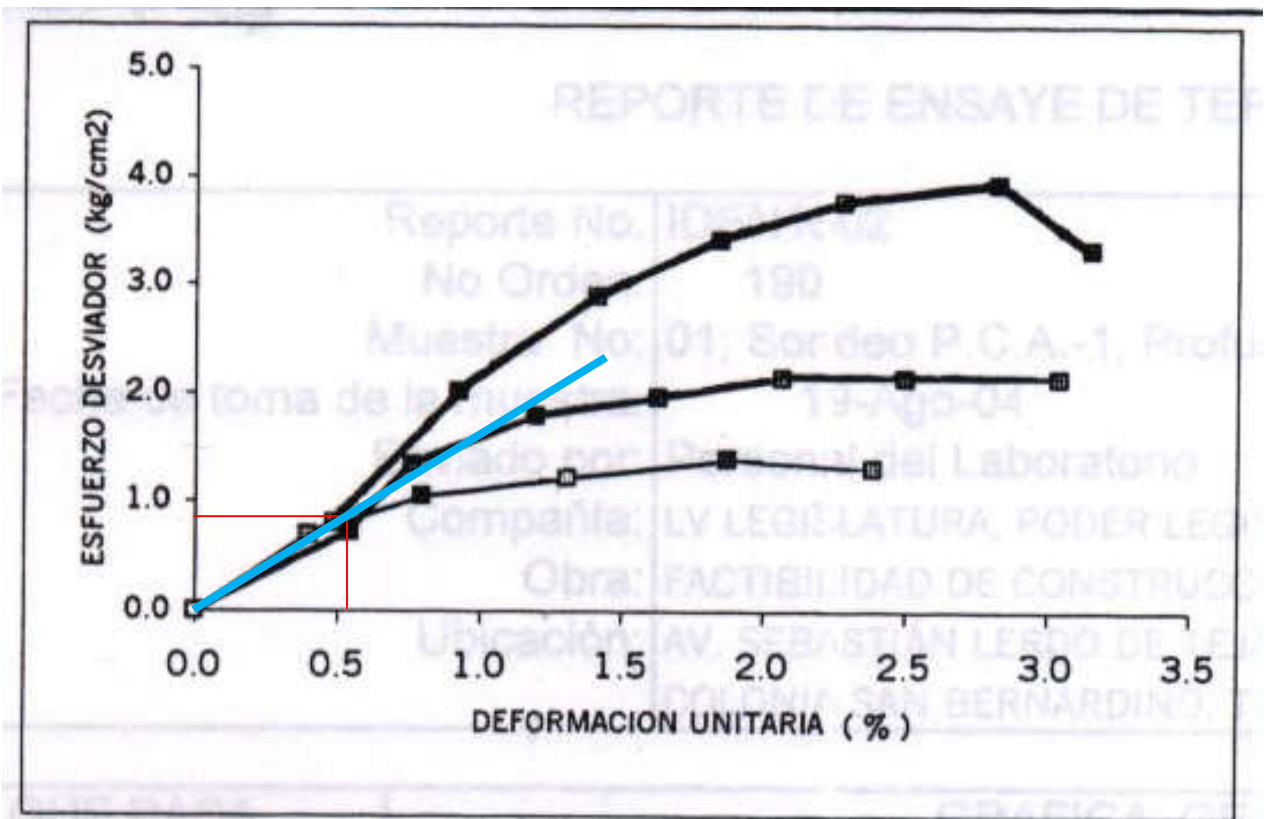
$$E_v = \frac{0.7058}{0.416} = 1,696 \text{ ton/m}^2$$

$$E_a = \frac{0.5}{0.416} = 1,200 \text{ ton/m}^2$$

$$E_r = \frac{0.2941}{0.416} = 707 \text{ ton/m}^2$$

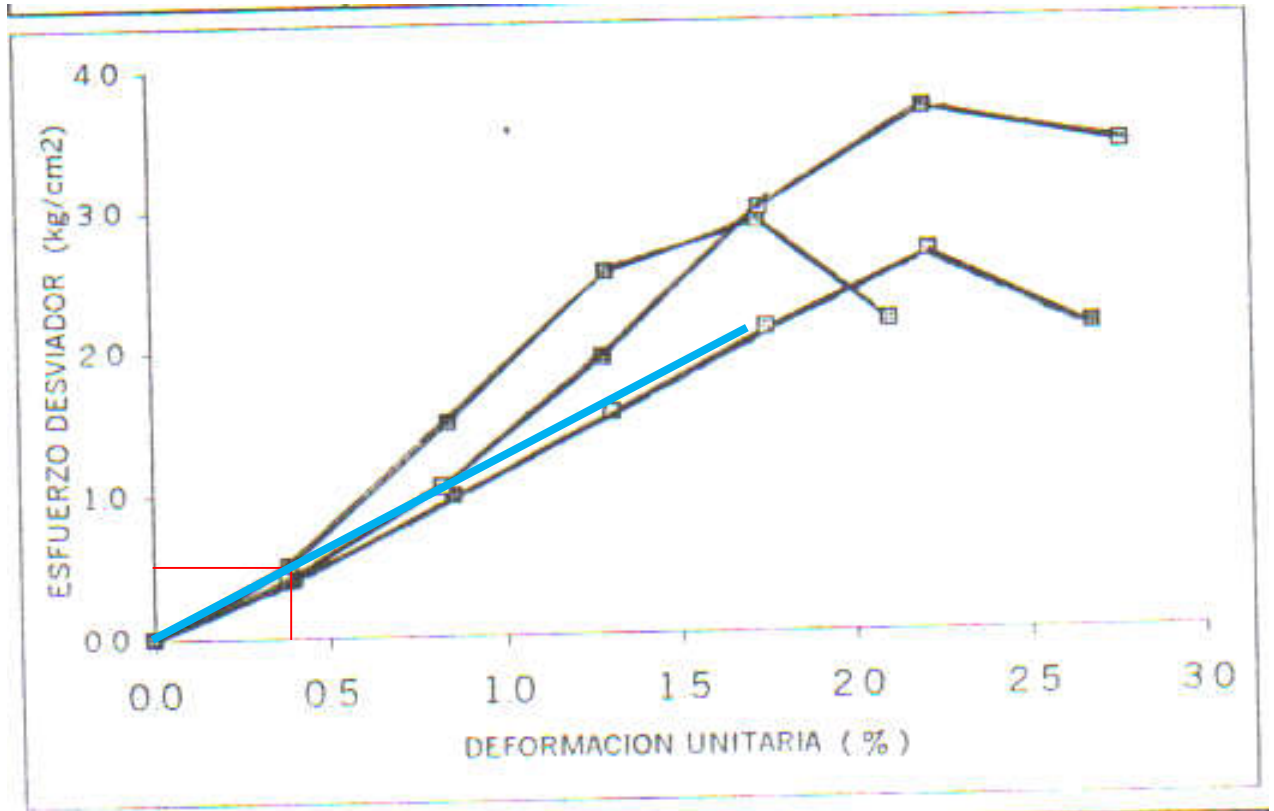


$$E = \frac{0.9375}{0.416} = 2,250 \text{ ton/m}^2$$

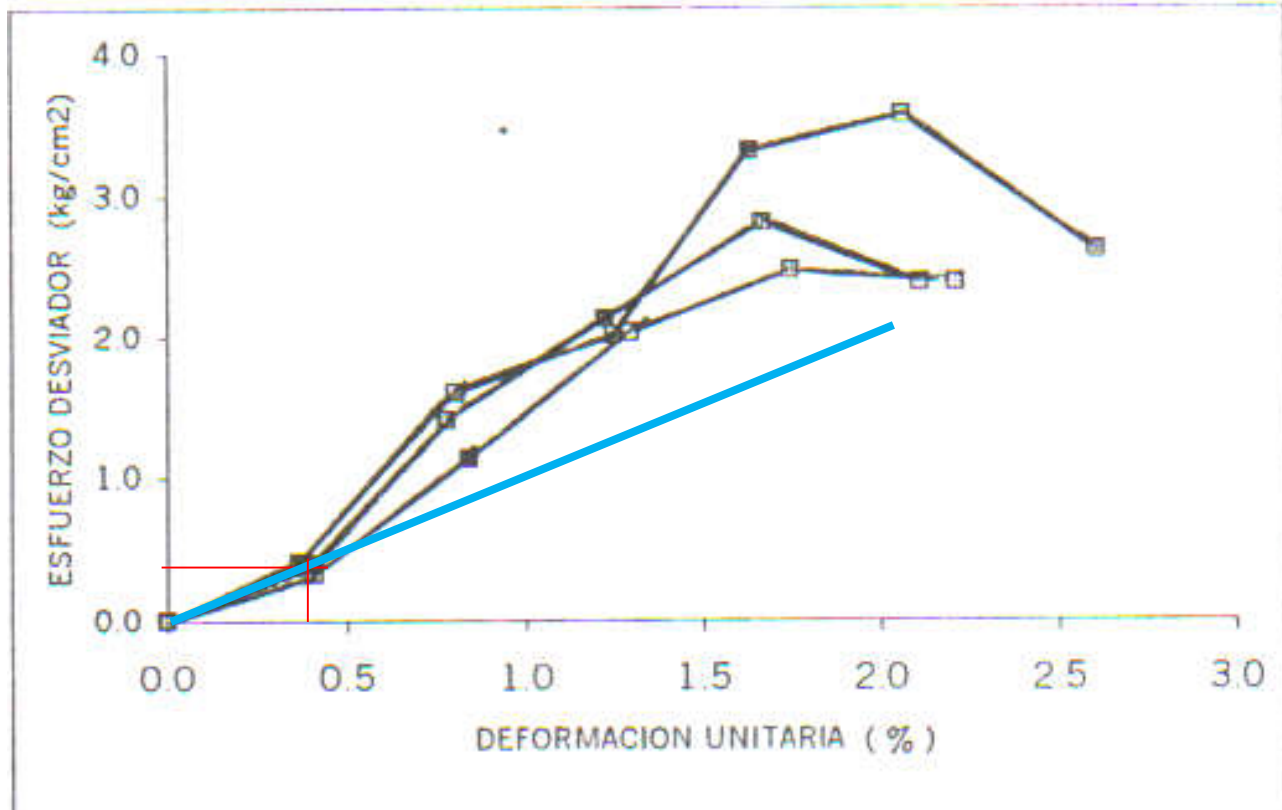


$$E = \frac{0.889}{0.559} = 1,590 \text{ ton/m}^2$$

- Av. Venustiano Carranza no 2414-pte, col. Plaza san Buenaventura.  
Toluca, Estado de México

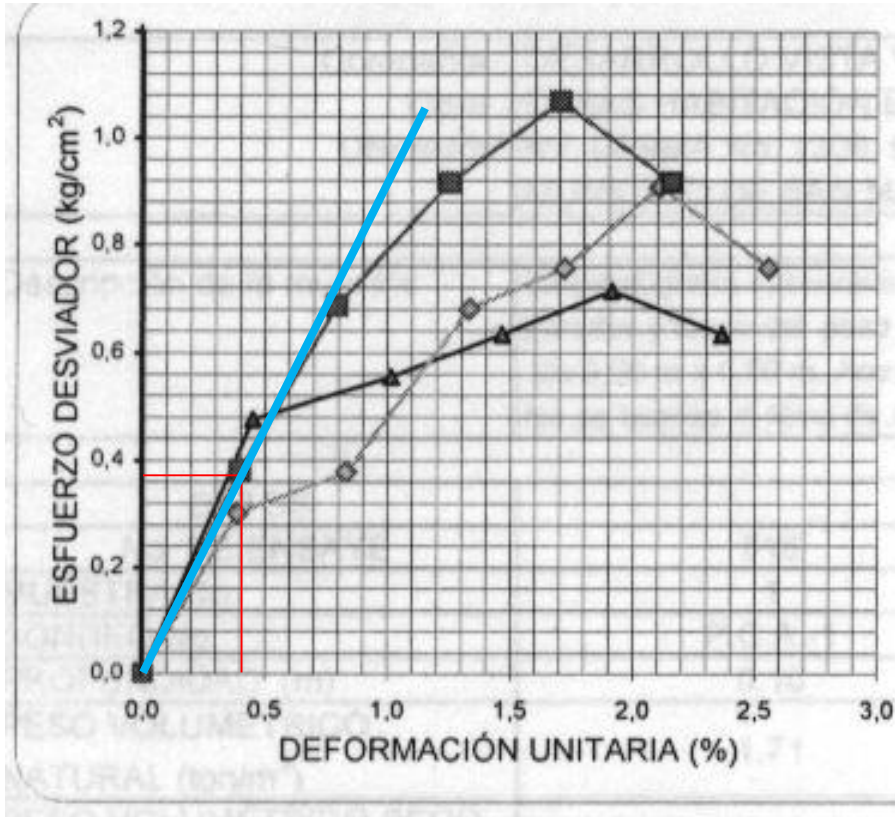


$$E = \frac{0.4706}{0.381} = 1,235 \text{ ton/m}^2$$



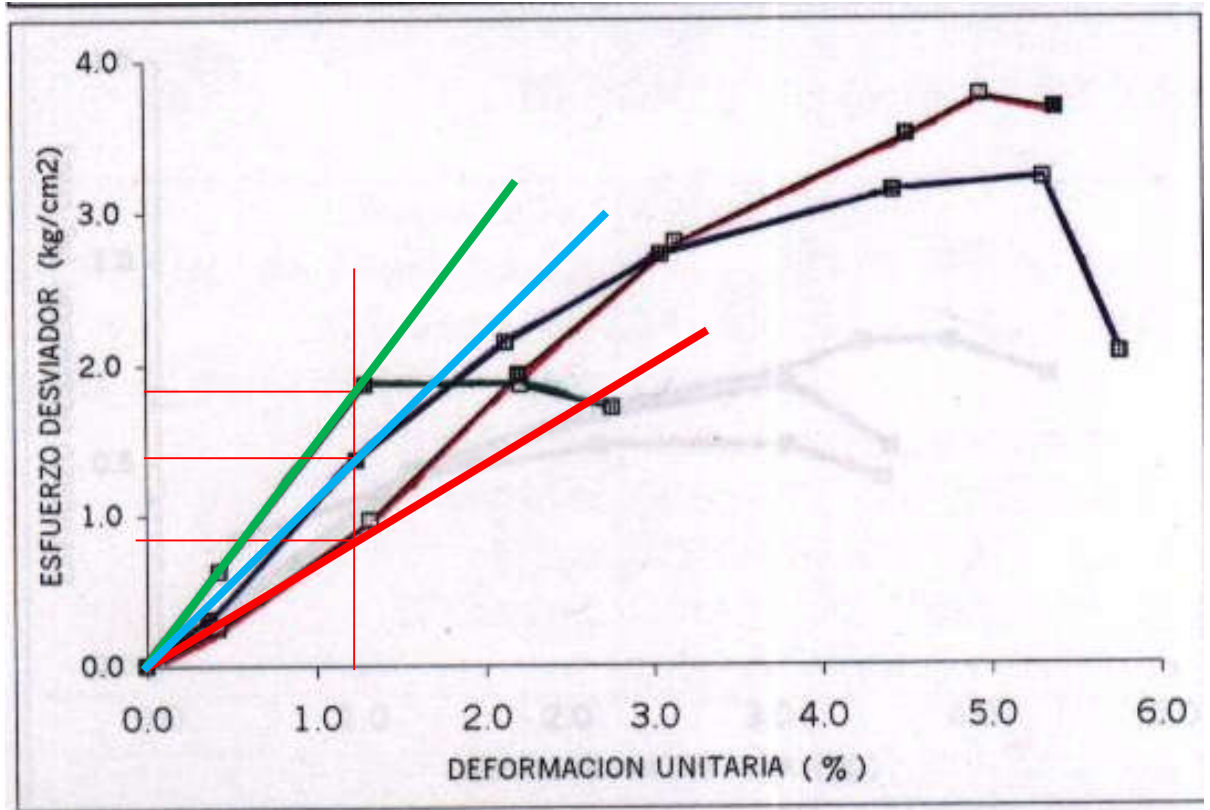
$$E = \frac{0.368}{0.405} = 909 \text{ ton/m}^2$$

- Av. Lerma no. 1309, Barrio de Santa María. Municipio de San Mateo Atenco, Estado de México



$$E = \frac{0.281}{0.401} = 701 \text{ ton/m}^2$$

- Calle Las Palomas esquina con Calle Huapango de la colonia Nueva Oxtotitlán, Municipio de Toluca, Estado de México

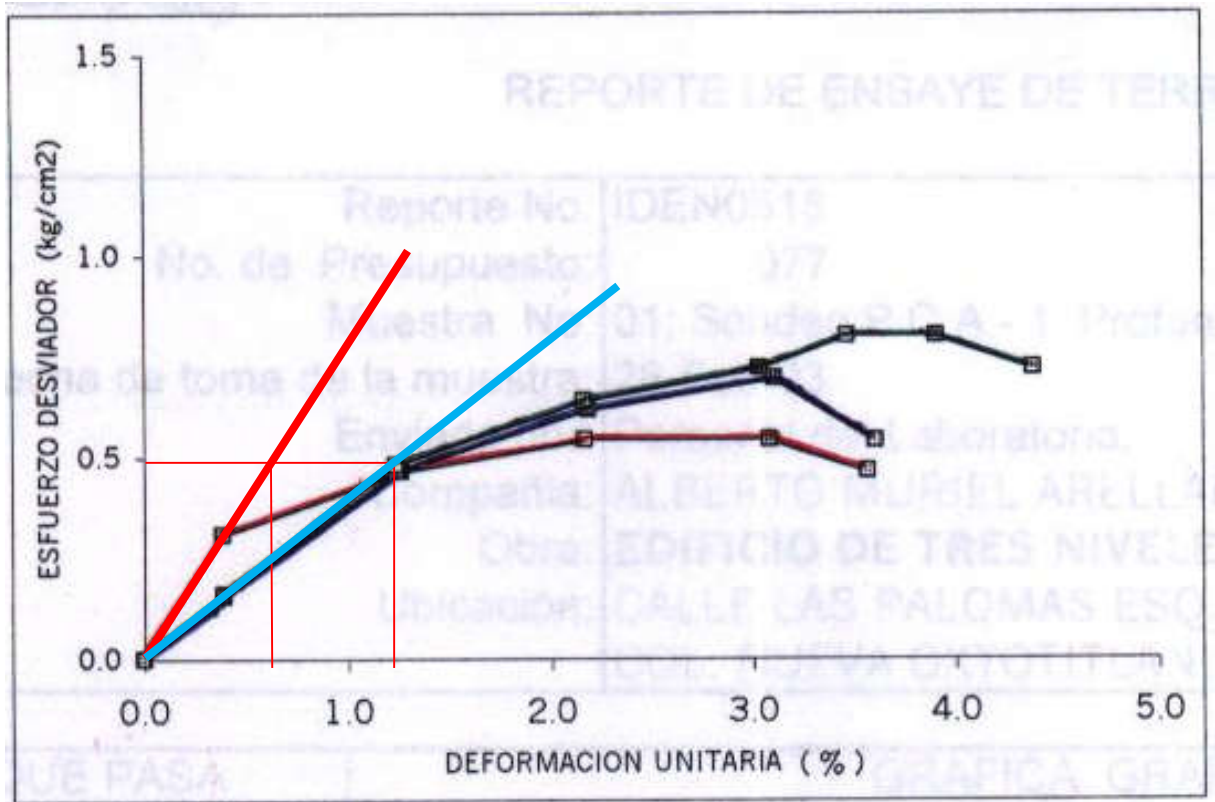


$$E_{v=0.25} = \frac{1.7}{1.25} = 1360 \text{ ton/m}^2$$

$$E_{a=0.50} = \frac{1.3889}{1.25} = 1110 \text{ ton/m}^2$$

$$E_{r=1.00} = \frac{0.85}{1.25} = 680 \text{ ton/m}^2$$

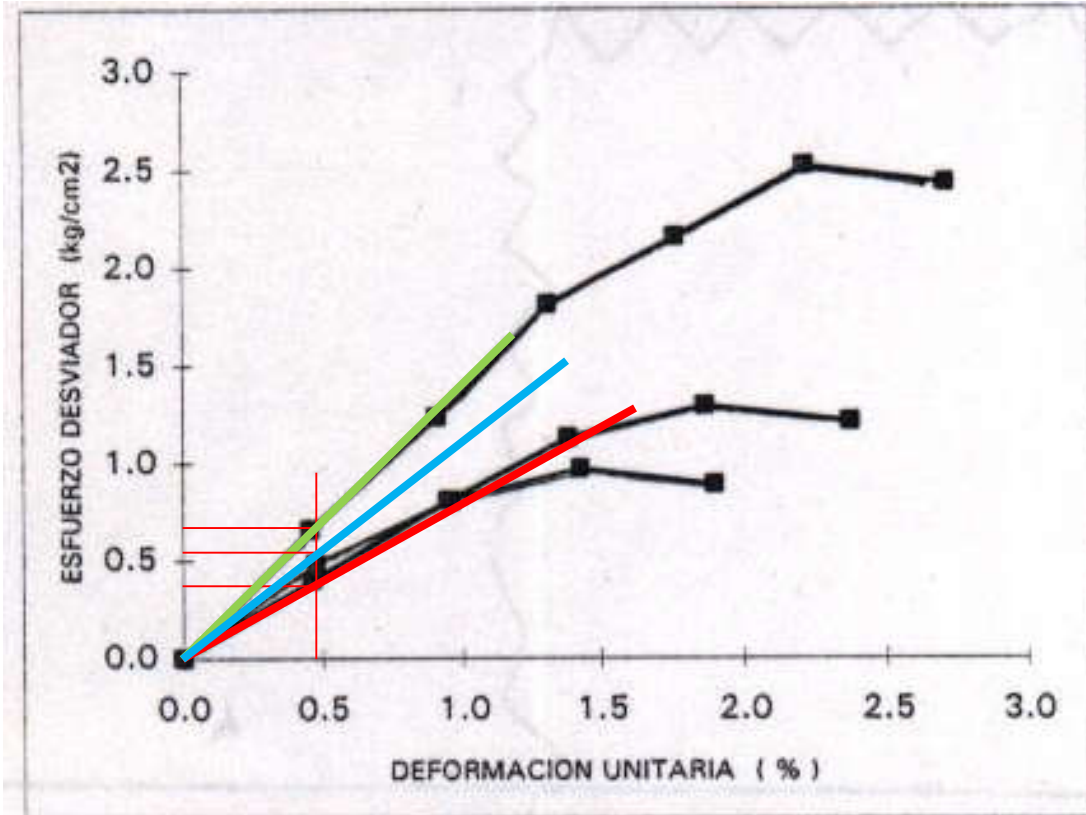




$$E_{r=0.25} = \frac{0.479}{.629} = 761 \text{ ton/m}^2$$

$$E_{0.50,1.00} = \frac{0.479}{1.208} = 396 \text{ ton/m}^2$$

- Calle Lic. Adolfo López Mateos. Toluca, Estado de México

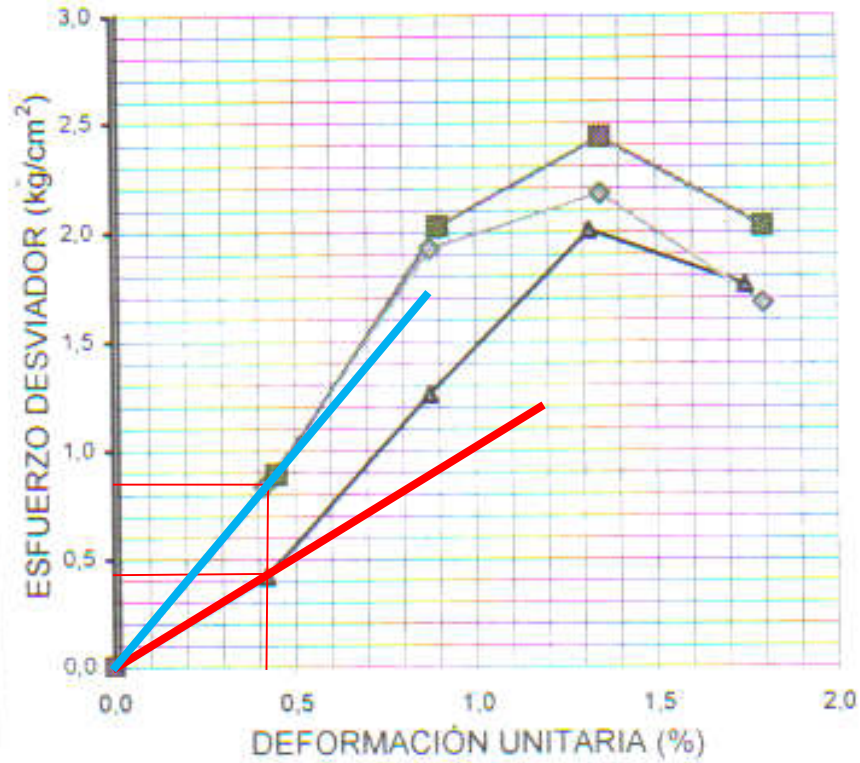


$$E_v = \frac{0.625}{0.441} = 1417 \text{ ton/m}^2$$

$$E_a = \frac{0.529}{0.441} = 1200 \text{ ton/m}^2$$

$$E_r = \frac{0.346}{0.441} = 785 \text{ ton/m}^2$$

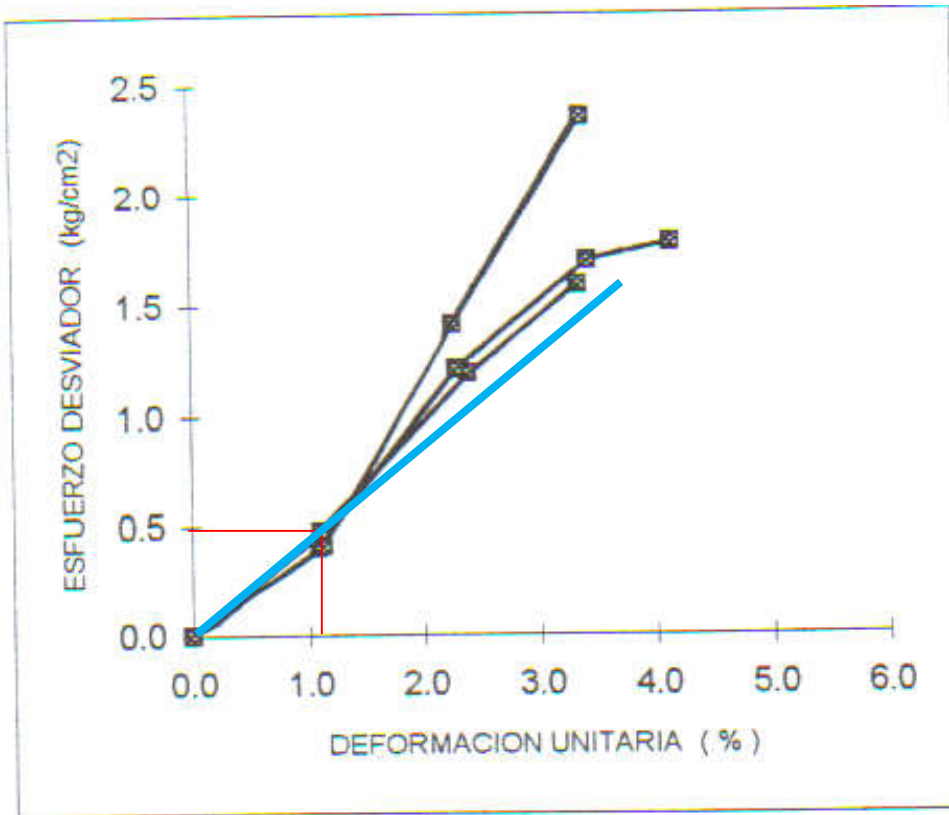
- Calle Nevado de Toluca Esq. Calle Chapa de Mota, Colonia Nueva Oxtotitlán, Toluca, Estado de México



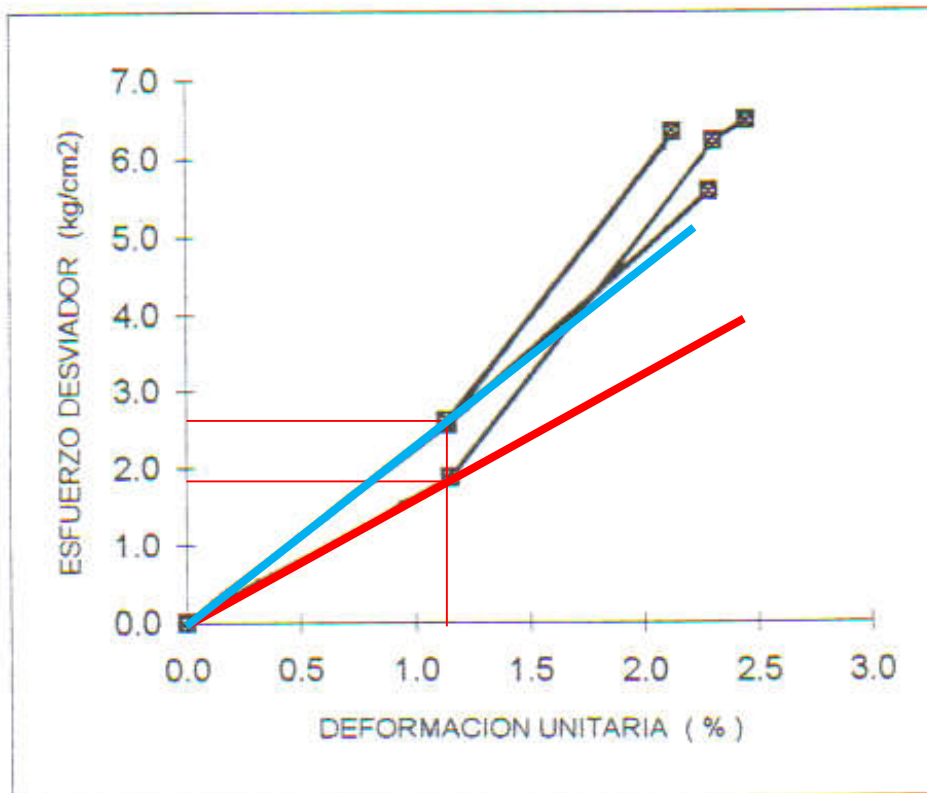
$$E_a = \frac{0.85}{0.41} = 2070 \text{ ton/m}^2$$

$$E_r = \frac{0.41}{0.41} = 1000 \text{ ton/m}^2$$

- Calle República de El Salvador no. 103 Colonia Américas, Toluca, Estado de México

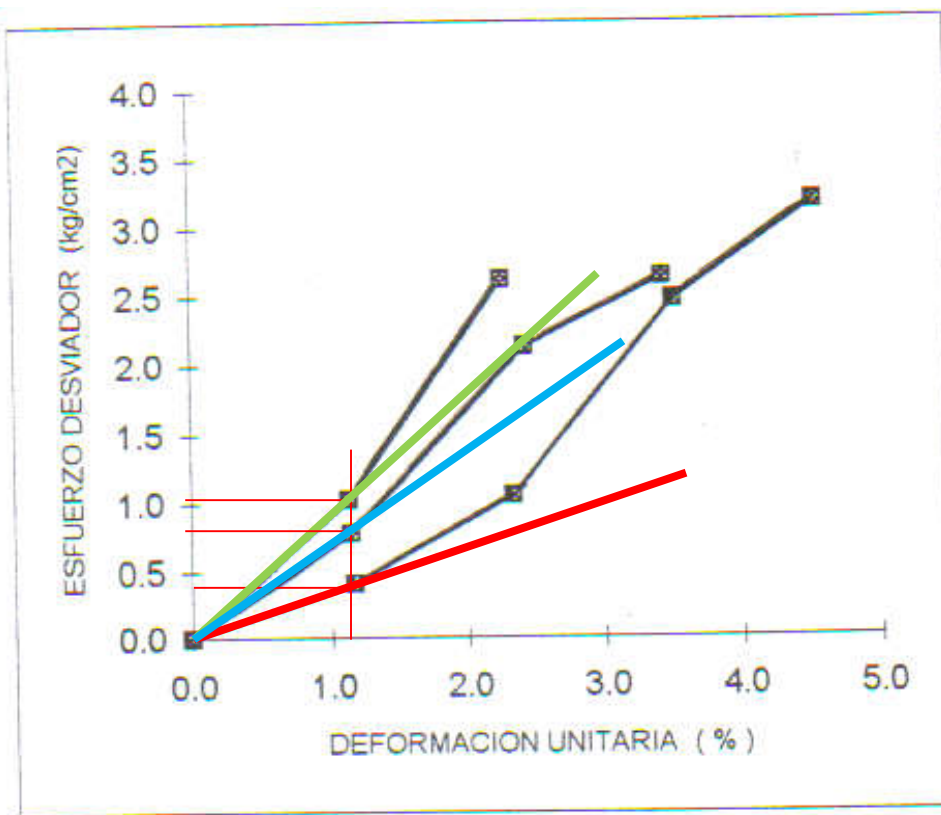


$$E = \frac{0.5}{1.143} = 437 \text{ ton/m}^2$$



$$E_a = \frac{2.667}{1.143} = 2330 \text{ ton/m}^2$$

$$E_r = \frac{1.85}{1.143} = 1618 \text{ ton/m}^2$$

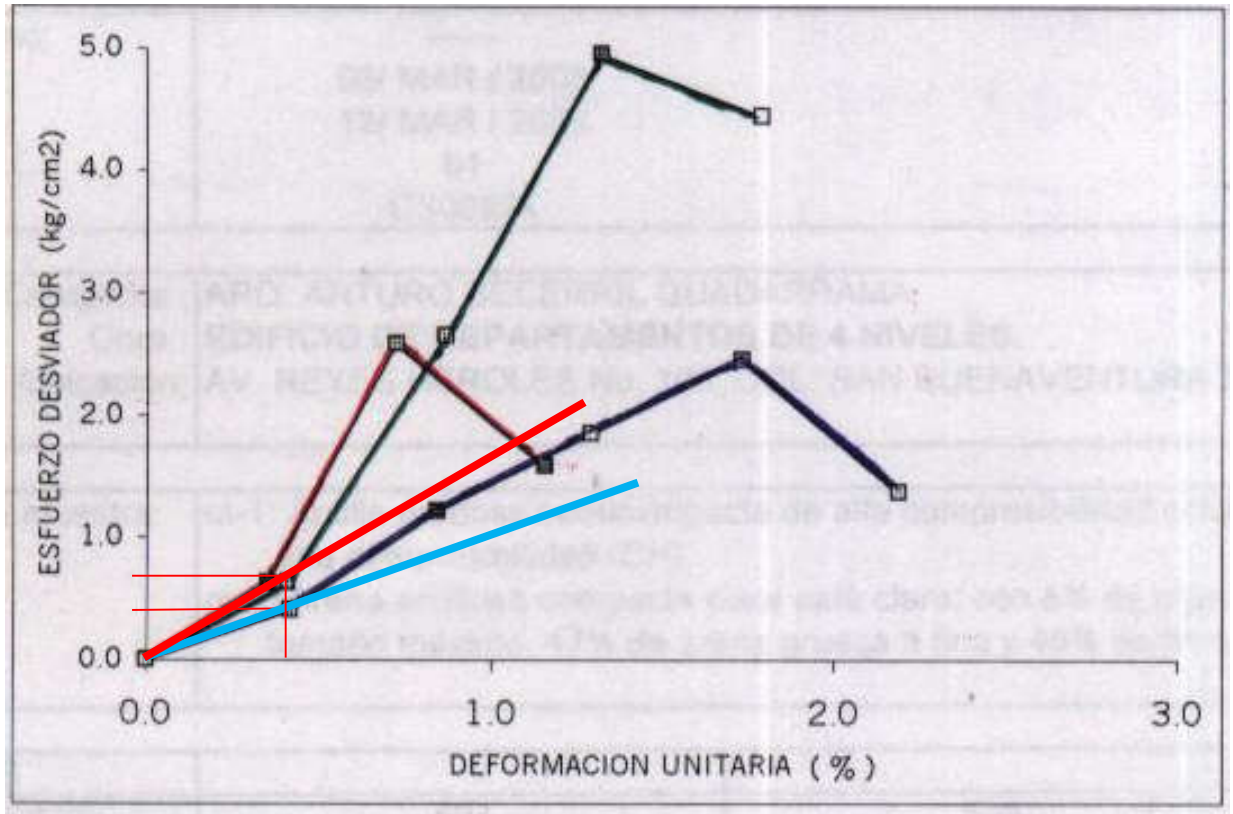


$$E_v = \frac{1.055}{1.1176} = 944 \text{ ton/m}^2$$

$$E_a = \frac{0.8125}{1.1176} = 727 \text{ ton/m}^2$$

$$E_r = \frac{0.6428}{1.1176} = 575 \text{ ton/m}^2$$

- Av. Reyes Heróles no. 105 Col. San Buenaventura. Toluca, Estado de México

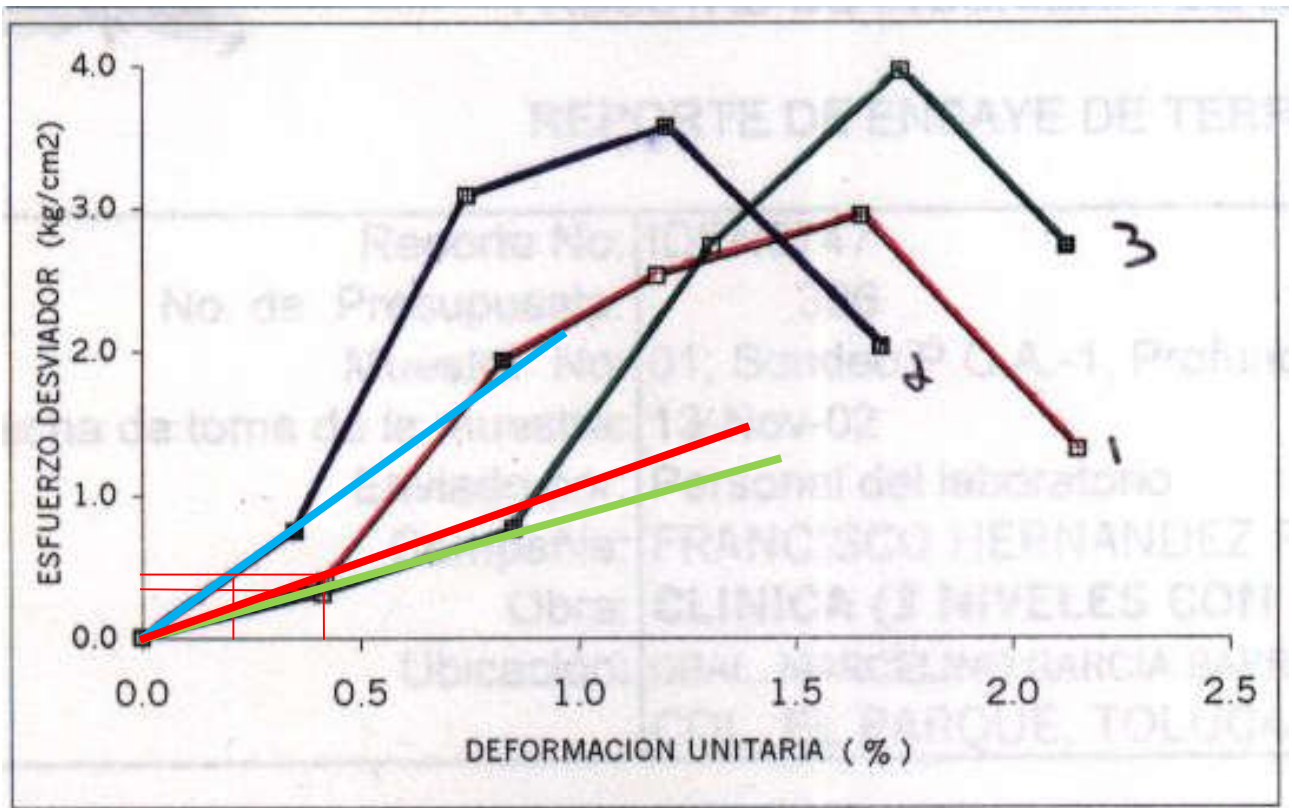


$$E_{0.50,1.00} = \frac{0.6667}{0.4146} = 1608 \text{ ton/m}^2$$

$$E_a = \frac{0.375}{0.4146} = 904 \text{ ton/m}^2$$



- Gral. Marcelino García Barragán no. 307 esq. Ignacio Allende Sur No. 1903  
Col El Parque, Toluca, Estado de México



$$E_{r=0.25} = \frac{0.47}{0.423} = 1112 \text{ ton/m}^2$$

$$E_{a=0.50} = \frac{0.47}{0.2727} = 1723 \text{ ton/m}^2$$

$$E_{v=1.00} = \frac{0.342}{0.423} = 808 \text{ ton/m}^2$$



## Anexo 4

Agregar las 80 Graficas granulométricas

Además del empleo de las gráficas generadas anteriormente, cuando ello sea posible, se compararán con resultados obtenidos mediante el método indirecto planteado por Hazen (1892) basado en la curva granulométrica, de acuerdo a como se presenta en Juárez B. y Rico R. (1997):

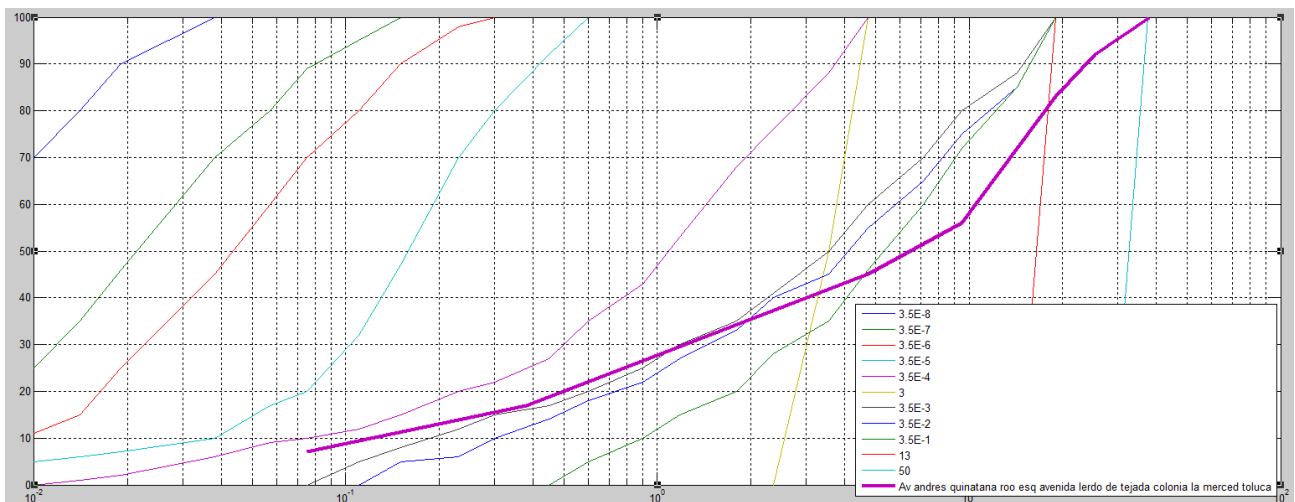
$$k = CD_{10}^2 \left( \frac{cm}{s} \right)$$

En donde k es el coeficiente de permeabilidad buscado y  $D_{10}$  el diámetro efectivo de Hazen, es el tamaño tal que sea igual o mayor que el 10%, en peso, del suelo. Esta ecuación Hazen la obtuvo de la experimentación en arenas y suele aceptarse el valor de  $C=116$  como un promedio para las experiencias de Hazen. De esta manera se intentará llegar a una conclusión lo más aproximada a la realidad acerca de la relación entre permeabilidad y curva granulométrica del suelo, para fines de este documento no se tendrán resultados mediante estudios directos del parámetro de permeabilidad.

La metodología consiste en aproximar el valor  $D_{10}$  ya sea visualmente en el gráfico o mediante una interpolación que se comporte de la manera deseada.

Como ejemplo, se tiene la siguiente gráfica en

- **Av. Andrés Quintana Roo esq. avenida Lerdo de Tejada colonia la Merced. Toluca:**



A simple vista se contempla que el valor  $D_{10}$  es de 0.15mm =0.015cm

Aplicando las metodologías de MATLAB de interpolación se tiene que las que dan mejores resultados es un ajuste lineal o un ajuste polinomial, en el primer caso se tiene un valor aproximado de  $D_{10}=0.167\text{mm}=0.0167\text{cm}$ , y para la interpolación polinomial  $D_{10}=0.162\text{mm}=0.0162\text{cm}$

Por lo tanto, para los tres casos se tienen los siguientes coeficientes de permeabilidad:

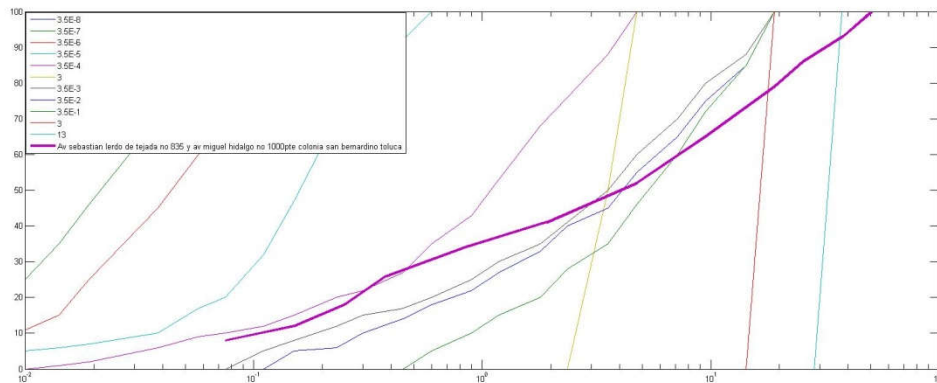
1.  $k = CD_{10}^2 \left( \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) = 116(0.015)^2 = 0.0261\text{cm/s}$
2.  $k = CD_{10}^2 \left( \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) = 116(0.0167)^2 = 0.0323\text{cm/s}$
3.  $k = CD_{10}^2 \left( \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) = 116(0.0162)^2 = 0.0304\text{cm/s}$

Se puede observar que el coeficiente k está muy cerca del valor de la curva representativa a  $k=3.5e^{-2}$ , de esta manera se comprobara los valores para otra graficas similares esperando llegar a una conclusión acerca de la aproximación del coeficiente de permeabilidad k.

- Sin embargo, para este caso la gráfica está entre  $3.5e^{-4}$  y  $3.5e^{-2}$  por lo que la aproximación no se considera tan certera, en comparación a las gráficas.

**Nota: en los siguientes datos sólo se tomarán los valores obtenidos de la interpolación lineal y polinomial respectivamente.**

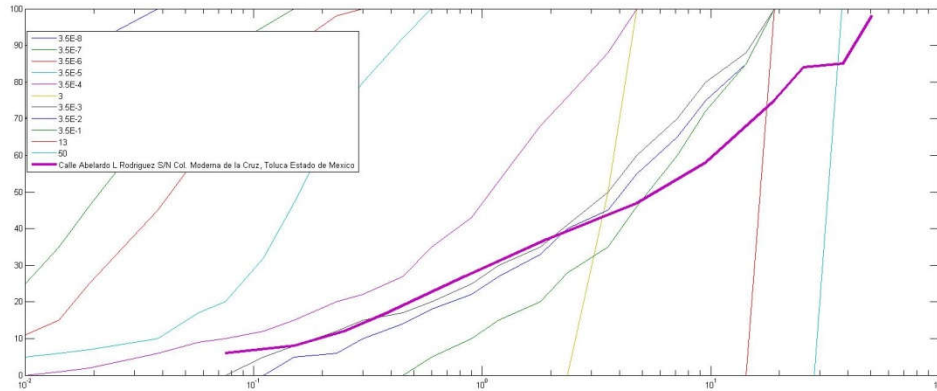
- Av. Sebastián Lerdo de Tejada no 835 y av. Miguel Hidalgo no 1000pte colonia san Bernardino Toluca



1.  $D_{10}=0.113\text{mm}=0.0113\text{cm}$   $k = CD_{10}^2 \left( \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) = 0.0148\text{cm/s}$
2.  $D_{10}=0.114\text{mm}=0.0114\text{cm}$   $k = CD_{10}^2 \left( \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) = 0.015\text{cm/s}$

Sin embargo, para este caso la gráfica está entre  $3.5e^{-4}$  y  $3.5e^{-2}$  por lo que la aproximación no se considera tan certera en comparación a las gráficas.

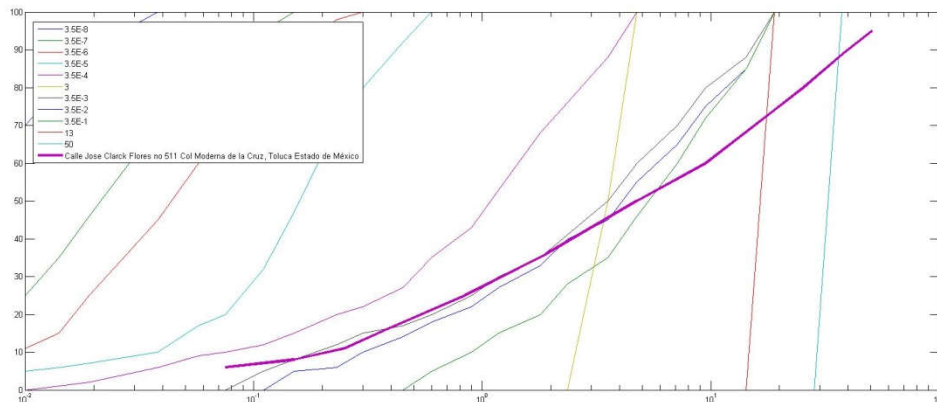
- **Calle Abelardo L Rodríguez SN Col Moderna de la Cruz Toluca Estado de México**



1.  $D_{10}=0.2\text{mm}=0.02\text{cm}$   $k = CD_{10}^2 \left(\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right) = 0.0464\text{cm/s}$
2.  $D_{10}=0.202\text{mm}=0.0202\text{cm}$   $k = CD_{10}^2 \left(\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right) = 0.0473\text{cm/s}$

Sin embargo, para este caso la gráfica está entre  $3.5e^{-4}$  y  $3.5e^{-2}$  por lo que la aproximación no se considera tan certera en comparación a las gráficas.

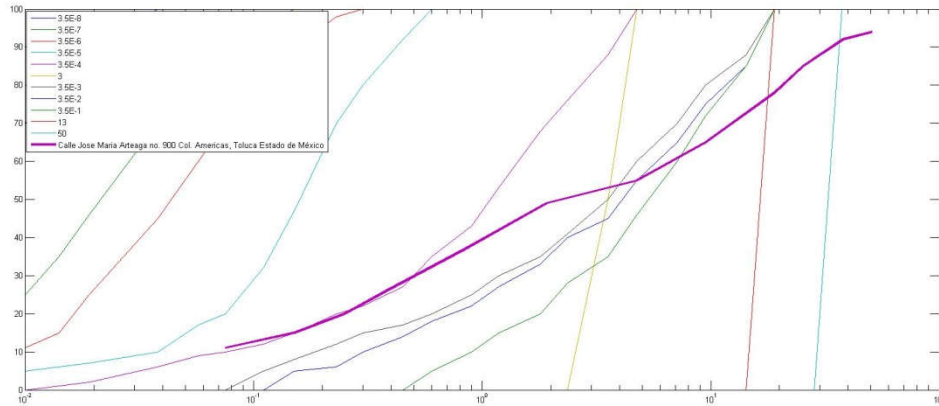
- **Calle José Clark Flores no 511 Col Moderna de la Cruz, Toluca Estado de México**



1.  $D_{10}=0.217\text{mm}=0.0217\text{cm}$   $k = CD_{10}^2 \left(\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right) = 0.0546\text{cm/s}$
2.  $D_{10}=0.22\text{mm}=0.022\text{cm}$   $k = CD_{10}^2 \left(\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right) = 0.0561\text{cm/s}$

Sin embargo, para este caso la gráfica está entre  $3.5e^{-4}$  y  $3.5e^{-2}$  por lo que la aproximación no se considera tan certera en comparación a las gráficas.

- **Calle José María Arteaga no. 900 Col. Américas, Toluca Estado de México**

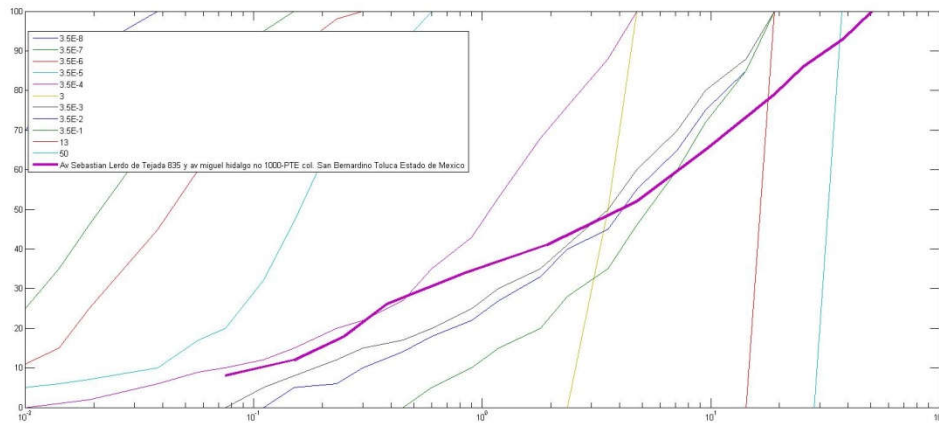


No llega al  $D_{10}$

**Zona 2: Para la zona dos ninguna gráfica alcanza el  $D_{10}$**

**Zona 3**

- **Av. Sebastián Lerdo de Tejada 835 y av. Miguel Hidalgo no 1000-PTE col San Bernardino Toluca Estado de México**

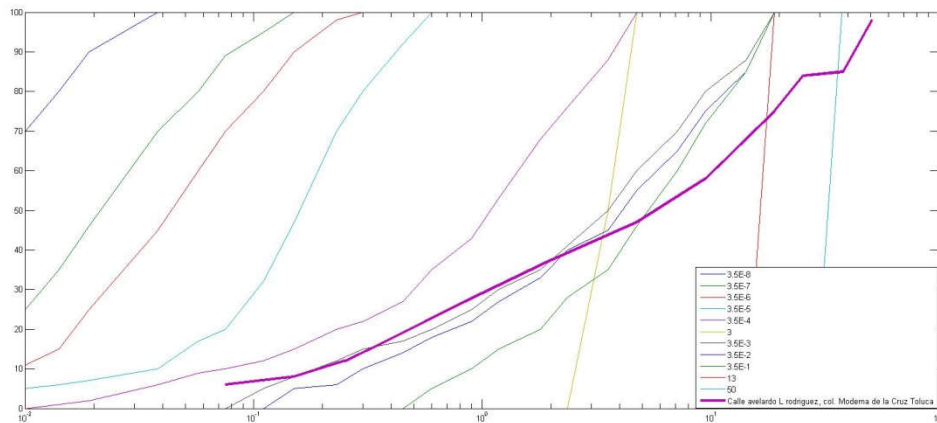


1.  $D_{10}=0.113\text{mm}=0.0113\text{cm}$   $k = CD_{10}^2 \left( \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) = 0.01481\text{cm/s}$

2.  $D_{10}=0.114\text{mm}=0.0114\text{cm}$   $k = CD_{10}^2 \left( \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) = 0.015\text{cm/s}$

**Sin embargo, para este caso la gráfica está entre  $3.5e^{-4}$  y  $3.5e^{-2}$  por lo que la aproximación no se considera tan certera en comparación a las gráficas.**

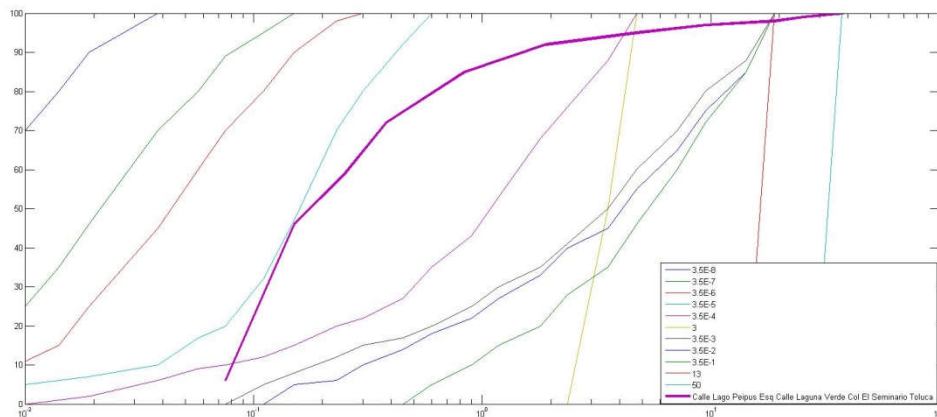
## Calle Abelardo L Rodríguez col Moderna de la Cruz



1.  $D_{10}=0.2\text{mm}=0.02\text{cm}$   $k = CD_{10}^2 \left( \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) = 0.0464\text{cm/s}$
2.  $D_{10}=0.202\text{mm}=0.0202\text{cm}$   $k = CD_{10}^2 \left( \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) = 0.0473\text{cm/s}$

Sin embargo, para este caso la gráfica está entre  $3.5e^{-4}$  y  $3.5e^{-2}$  por lo que la aproximación no se considera tan certera en comparación a las gráficas.

## Calle Lago Peipus Esq. Calle Laguna Verde. Col. El Seminario, Toluca Estado de México

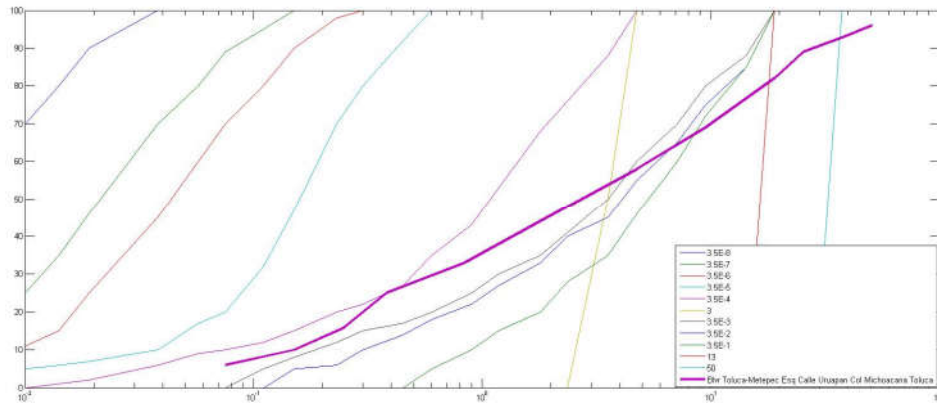


1.  $D_{10}=0.082\text{mm}=0.0082\text{cm}$   $k = CD_{10}^2 \left( \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) = 0.0078\text{cm/s}$

Sin embargo, para este caso el comportamiento de la gráfica no se asemeja a las gráficas base

## Zona 4

### Blv. Toluca-Metepec Esq. Calle Uruapan Col Michoacana Toluca

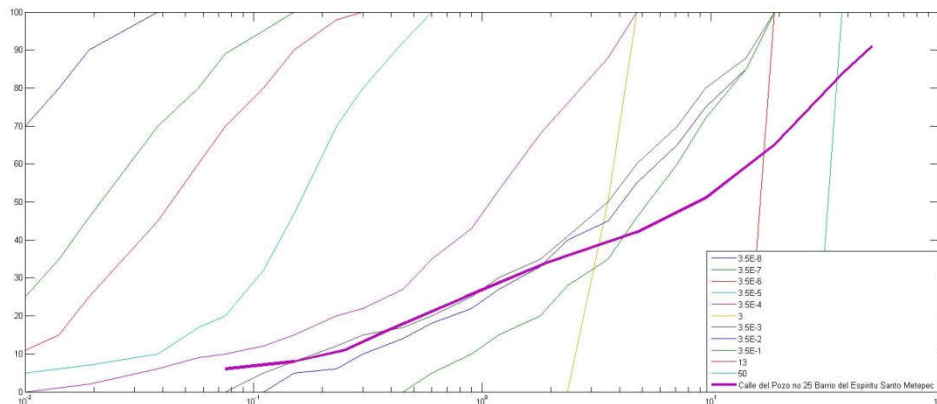


$$1. D_{10}=0.15\text{mm}=0.015\text{cm} \quad k = CD_{10}^2 \left( \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) = 0.0261\text{cm/s}$$

$$2. D_{10}=0.15\text{mm}=0.015\text{cm} \quad k = CD_{10}^2 \left( \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) = 0.0261\text{cm/s}$$

Sin embargo, para este caso la gráfica está entre  $3.5e^{-4}$  y  $3.5e^{-2}$  por lo que la aproximación no se considera tan certera en comparación a las gráficas.

### Calle del Pozo no 25 Barrio del Espíritu Santo Metepec

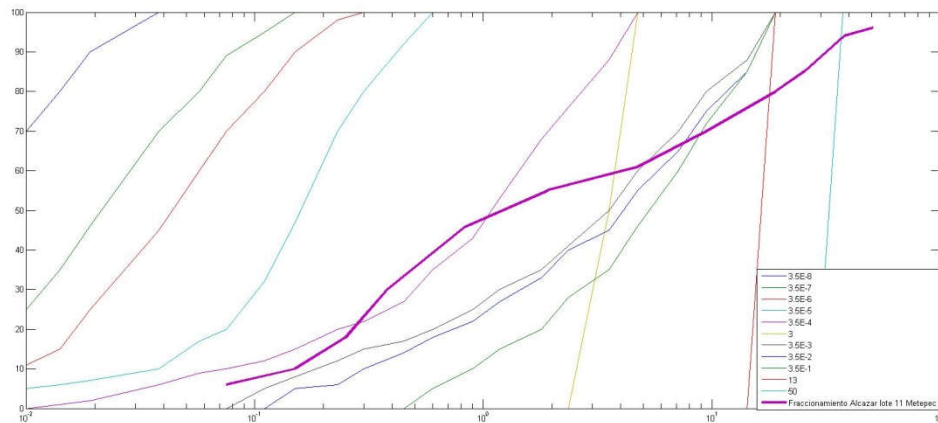


$$1. D_{10}=0.217\text{mm}=0.0217\text{cm} \quad k = CD_{10}^2 \left( \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) = 0.0546\text{cm/s}$$

$$2. D_{10}=0.22\text{mm}=0.022\text{cm} \quad k = CD_{10}^2 \left( \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) = 0.0561\text{cm/s}$$

Sin embargo, para este caso la gráfica está entre  $3.5e^{-4}$  y  $3.5e^{-2}$  por lo que la aproximación no se considera tan certera en comparación a las gráficas.

## Fraccionamiento Alcázar lote 11 Metepec



1.  $D_{10}=0.15\text{mm}=0.015\text{cm}$   $k = CD_{10}^2 \left( \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) = 0.0261\text{cm/s}$

2.  $D_{10}=0.15\text{mm}=0.015\text{cm}$   $k = CD_{10}^2 \left( \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) = 0.0261\text{cm/s}$

**Sin embargo, para este caso la gráfica está entre  $3.5e^{-4}$  y  $3.5e^{-2}$  por lo que la aproximación no se considera tan certera en comparación a las gráficas.**