



Caracterización Hidráulica de Suelos en el Predio del Observatorio Argentino Alemán de Geodesia (AGGO) Mediante Parámetros Texturales y Granulométricos

por

Jonatan Emmanuel Pendiuk

Alumno de Geofísica

Director:

Dr. Luis Guarracino

Codirector:

Dr. Leonardo Bruno Monachesi

Tesis de Grado en Geofísica

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Universidad Nacional de La Plata

Febrero de 2016

A mi familia

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Contenidos del trabajo de Tesis	2
2. Datos de laboratorio	3
2.1. Muestreo	3
2.2. Análisis granulométrico	4
2.3. Textura	8
2.4. Porosidad	8
3. Caracterización textural de las muestras	11
3.1. Clasificación de los suelos	11
3.2. Parámetros hidráulicos	12
4. Determinación de K_s a partir de la granulometría	18
4.1. Ley de Darcy	18
4.2. Fórmulas empíricas para la determinación de K_s	19
4.3. Determinación de d_{10}	21
4.4. Estimaciones de K_s	24
5. Alternativas para la estimación de K_s	28
5.1. Modificación del exponente de las fórmulas empíricas	28
5.2. Modificación del diámetro efectivo	31
6. Conclusiones	36

Índice de figuras

2.1.	Muestra de suelo extraída en el predio de AGGO.	3
2.2.	Principio de Stokes, fuerzas actuantes sobre una partícula esférica. . . .	4
2.3.	Fotografía de un picnómetro utilizado para calcular la densidad real de las muestras de suelo.	9
3.1.	Triángulo textural de la USDA.	12
3.2.	Curvas características para la textura Arcillosa.	15
3.3.	Curvas características para la textura Arcillo-limosa.	16
3.4.	Curvas características para la textura Franco-arcillosa.	17
4.1.	Curva de distribución de tamaño de granos esquemática junto a la determinación de los diámetros efectivos d_{10} y d_{60}	19
4.2.	Ajuste de los datos de la muestra P1-30.	22
4.3.	Ajuste de los datos de la muestra P1-100.	22
4.4.	Ajuste de los datos de la muestra P1-200.	23
4.5.	Ajuste de los datos de la muestra P1-380.	23
4.6.	Valores de K_s de la muestra P1-30.	25
4.7.	Valores de K_s de la muestra P1-100.	26
4.8.	Valores de K_s de la muestra P1-200.	26
4.9.	Valores de K_s de la muestra P1-380.	27
5.1.	K_s de la muestra P1-30 modificando el exponente.	30
5.2.	K_s de la muestra P1-100 modificando el exponente.	30
5.3.	K_s de la muestra P1-200 modificando el exponente.	31
5.4.	K_s de la muestra P1-380 modificando el exponente.	31
5.5.	Valores estimados de K_s de la muestra P1-30 reemplazando el diámetro efectivo.	34
5.6.	Valores estimados de K_s de la muestra P1-100 reemplazando el diámetro efectivo.	34
5.7.	Valores estimados de K_s de la muestra P1-200 reemplazando el diámetro efectivo.	35
5.8.	Valores estimados K_s de la muestra P1-380 reemplazando el diámetro efectivo.	35

Índice de tablas

2.1. Valores tabulados del diámetro, peso, porcentaje en peso, porcentaje acumulado y porcentaje pasante correspondientes a la Muestra P1-30. . .	6
2.2. Valores tabulados del diámetro, peso, porcentaje en peso, porcentaje acumulado y porcentaje pasante correspondientes a la Muestra P1-100. . .	6
2.3. Valores tabulados del diámetro, peso, porcentaje en peso, porcentaje acumulado y porcentaje pasante correspondientes a la Muestra P1-200. . .	7
2.4. Valores tabulados del diámetro, peso, porcentaje en peso, porcentaje acumulado y porcentaje pasante correspondientes a la Muestra P1-380. . .	7
2.5. Contenido porcentual de material fino para las muestras analizadas. . .	8
2.6. Valores de Porosidad obtenidos mediante el método del picnómetro. . .	10
3.1. Clasificación textural de las muestras de suelo.	12
3.2. Parámetros de van Genuchten para las muestras P1-30 y P1-200, correspondientes a la textura Arcillosa [4].	13
3.3. Parámetros de van Genuchten para la muestra P1-100, correspondiente a la textura Arcillo-limosa [4].	14
3.4. Parámetros de van Genuchten para la muestra P1-380, correspondiente a la textura Franco-arcillosa [4].	14
4.1. Parámetros de los ajustes de la expresión (4.10).	21
4.2. Diámetros efectivos y coeficiente de uniformidad estimados para las muestras analizadas.	23
4.3. Determinación de los valores de K_s de la muestra P1-30.	24
4.4. Determinación de los valores de K_s de la muestra P1-100.	24
4.5. Determinación de los valores de K_s de la muestra P1-200.	25
4.6. Determinación de los valores de K_s de la muestra P1-380.	25
5.1. Determinación de los valores de K_s de la muestra P1-30 modificando el exponente.	29
5.2. Determinación de los valores de K_s de la muestra P1-100 modificando el exponente.	29
5.3. Determinación de los valores de K_s de la muestra P1-200 modificando el exponente.	29
5.4. Determinación de los valores de K_s de la muestra P1-380 modificando el exponente	30
5.5. Diámetros medios estimados.	32

5.6. Estimaciones de K_s en función de los 3 diámetros efectivos calculados para la Muestra P1-30	32
5.7. Estimaciones de K_s en función de los 3 diámetros efectivos calculados para Muestra P1-100	33
5.8. Estimaciones de K_s en función de los 3 diámetros efectivos calculados para la Muestra P1-200	33
5.9. Estimaciones de K_s en función de los 3 diámetros efectivos calculados para la Muestra P1-380	33

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

La determinación de parámetros de flujo es un tema en continuo desarrollo en el área de la hidrología y las ciencias del suelo en general. Estos parámetros permiten lograr un mejor entendimiento del flujo de aguas subterráneas tanto en la zona saturada como en la no saturada del terreno; estudiar el transporte de contaminantes solubles en el agua; resolver problemas relacionados a la ingeniería y geomecánica, entre otros.

El flujo de agua en el subsuelo se describe comúnmente mediante la ecuación de Richards [12]. Para resolver esta ecuación es necesario conocer las curvas características del suelo. Estas curvas describen el contenido volumétrico de agua y la conductividad hidráulica en función de la altura piezométrica. Para poder determinar estas curvas en forma experimental es necesario realizar costosos ensayos en laboratorio. Dada la dificultad de realizar estos ensayos se suele optar por utilizar modelos constitutivos. Estos modelos son expresiones analíticas de las curvas características que dependen de un juego de parámetros hidráulicos. Entre los modelos más utilizados en estudios de suelo, se destacan el de van Genuchten [18] y el de Brooks and Corey [2].

La conductividad hidráulica saturada (K_s) es tal vez uno de los parámetros más importantes en la descripción de flujo de agua en el suelo ya que está directamente relacionado con la velocidad del agua. Su determinación experimental también resulta difícil y costosa. La manera usual de estimar la conductividad hidráulica saturada es utilizando métodos de campo o mediciones de laboratorio. Dentro de los métodos de campo, podemos mencionar los clásicos ensayos de bombeo. Estos ensayos son costosos tanto desde el punto de vista económico como en su duración, siendo en algunos casos impracticables por cuestiones ambientales. Por otro lado al ser estudios a escala de campo, involucran grandes volúmenes de suelo y no permiten una descripción detallada que sólo podría lograrse utilizando muestras a escala de laboratorio. Los métodos de laboratorio para la determinación de la conductividad hidráulica que involucran ensayos hidráulicos presentan grandes limitaciones prácticas y son en general muy costosos.

Una alternativa a la determinación de la conductividad hidráulica saturada mediante los ensayos mencionados consiste en la estimación en forma indirecta de este parámetro a partir de análisis granulométricos y texturales. Varios trabajos se han realizado en esta línea de investigación y se han desarrollado diferentes fórmulas empíricas

que relacionan la conductividad hidráulica con la curva de distribución de tamaño de granos o partículas que forman el suelo. Hazen [9] fue uno de los pioneros en proponer una correlación empírica con el fin de calcular la conductividad hidráulica en acuíferos conformados por arenas. A partir de este trabajo, varias fórmulas se han desarrollado intentando correlacionar la distribución del tamaño de grano en arenas con la conductividad hidráulica, entre estos trabajos se pueden citar los de Kozeny-Carman [3] y Terzaghi y Peck [16], entre otros. La efectividad de estas técnicas dependen del tipo de suelo, la mayoría de las fórmulas se han desarrollado para suelos con granos medios a grandes y no para suelos con sedimentos finos o arcillosos.

La motivación de este trabajo es la caracterización hidráulica de los suelos del predio del Observatorio Argentino Alemán de Geodesia (AGGO) ubicado en el Parque Pereyra Iraola. Este organismo está financiado en forma conjunta por el CONICET y la Agencia Federal de Cartografía y Geodesia de Alemania. La caracterización hidráulica de esta zona resulta de interés para el monitoreo de instrumental de alta precisión. En particular el gravímetro superconductor que se instalará en AGGO resulta sensible a las variaciones de humedad del suelo que pueden modelarse a partir de los parámetros que describen el flujo no saturado de agua. Con este fin se han tomado muestras de suelo en 3 locaciones a distintas profundidades para realizar análisis granulométrico y textural en laboratorio.

En este contexto, el objetivo de este trabajo de Tesis es la determinación de parámetros hidráulicos de los suelos de AGGO utilizando los datos texturales y de distribución del tamaño de granos disponibles. Con este fin se determinarán las clases texturales de los suelos, se analizarán distintas fórmulas empíricas que estiman la conductividad hidráulica saturada a partir del tamaño de los granos y se propondrán modificaciones a las fórmulas con el objetivo de lograr una mejor estimación de la conductividad hidráulica, para suelos que poseen un alto contenido de partículas finas.

1.2. Contenidos del trabajo de Tesis

En este trabajo de Tesis se estimará la conductividad hidráulica saturada (K_s) de cuatro muestras de un perfil de suelo utilizando fórmulas empíricas, las cuales relacionan la permeabilidad (κ) con la distribución de tamaño de granos. La metodología empleada en laboratorio se describirá en el Capítulo 2 junto con las técnicas de determinación de la porosidad y el contenido de arena, limo y arcilla de cada muestra. En el Capítulo 3 se utilizará el diagrama textural establecido por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) con el objetivo de realizar una clasificación general de los suelos según su textura. En base a esta clasificación se describirán las curvas características del contenido de agua y de conductividad hidráulica utilizando el modelo de van Genuchten [18]. La determinación de K_s se realizará en el Capítulo 4. En este capítulo, se presentan las distintas fórmulas empíricas a utilizar y se determinará el diámetro efectivo de los granos de cada muestra, parámetro necesario para la estimación de K_s . En el siguiente capítulo, se proponen distintas alternativas para modificar las fórmulas empíricas con el objetivo de mejorar la estimación de K_s . Por último, en el Capítulo 6, se sintetizan las conclusiones de este trabajo de Tesis.

Capítulo 2

Datos de laboratorio

En este capítulo se describen las técnicas y análisis de laboratorio realizados a las muestras de suelo recolectadas en el predio del observatorio AGGO. Se listan los resultados obtenidos acerca de la granulometría, textura y porosidad de cada muestra que serán utilizados para la determinación de los parámetros hidráulicos en los siguientes capítulos.

2.1. Muestreo

En el predio de AGGO se tomaron muestras de perfiles de suelo en 3 locaciones a profundidades de: 30cm, 100cm, 200cm y 380cm. Estas profundidades se corresponden aproximadamente con los cambios litológicos identificados a simple vista en los perfiles de suelo. La totalidad de las muestras fueron recolectadas por Marvin Reich del Centro de Investigación Alemán de Geociencias (GFZ). Las muestras correspondientes al pozo 1 fueron analizadas en el laboratorio del Instituto de Geomorfología y Suelos - Centro de Investigaciones en Suelos y Agua de uso agropecuario (IGS-CISAUA). La Figura 2.1 es una fotografía de una muestra de suelo, como puede observarse son cilíndricas de 6 cm de diámetro y 4 cm de altura.



Figura 2.1. Muestra de suelo extraída en el predio de AGGO.

2.2. Análisis granulométrico

Para realizar el análisis granulométrico y determinar los parámetros texturales de cada muestra de suelo se utilizó el método de Robinson, también conocido como método de pipeteo [10,7]. Este método se basa en el principio de Stokes, según el cual las partículas de suelo en suspensión en un fluido caen con una velocidad que depende del diámetro de las mismas.

Consideremos un fluido de densidad ρ_f , viscosidad η a una temperatura T dentro de un recipiente donde se introduce una partícula esférica de radio R , densidad ρ_p y masa m . El sistema de referencia es tal que el eje y es coincidente con la dirección de la gravedad (positivo hacia abajo). La elección de este sistema se debe a que el movimiento de la partícula tiene componentes únicamente en la dirección del eje y . Las fuerzas actuantes en esa dirección son: el peso de la partícula gm , el empuje hidrostático debido al volumen de fluido desalojado por la partícula E y la fuerza de roce F_r . En la Figura 2.2 se ilustran en forma esquemática las fuerzas actuantes sobre la partícula.

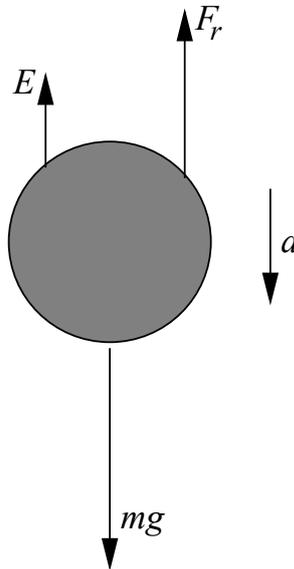


Figura 2.2. Principio de Stokes, fuerzas actuantes sobre una partícula esférica.

Al realizar un análisis dinámico del problema y recordando que la partícula sólo se mueve en la dirección del eje y , se obtiene la siguiente expresión:

$$F_y = ma = mg - E - F_r, \quad (2.1)$$

donde a y g son las aceleraciones del sistema y de la gravedad, respectivamente.

La velocidad límite se obtiene cuando la aceleración a es nula, entonces:

$$mg = E + F_r. \quad (2.2)$$

A partir de la ec. (2.2) y teniendo en cuenta que $m = \rho_p \frac{4}{3} \pi R^3$, $E = \rho_f \frac{4}{3} \pi R^3 g$, $F_r = 6\pi\eta Rv$, la velocidad v de la partícula puede expresarse del siguiente modo:

$$v = \frac{2g(\rho_p - \rho_f)R^2}{9\eta}. \quad (2.3)$$

Como se observa de la expresión (2.3), la velocidad de sedimentación de la partícula v es función de su diámetro $d = 2R$. Esta relación permite estimar el diámetro d a partir de medir la velocidad de sedimentación, lo cual permite discriminar los distintos tamaños de grano de una dada muestra de suelo. Debe tenerse en cuenta que una vez determinada v se le debe aplicar una corrección, pues el principio de Stokes asume que las partículas son esféricas, condición que en general los granos de suelo no cumplen. Además se debe controlar que la temperatura del fluido no varíe durante el proceso de medición de v , ya que dependen de ρ_f y η , propiedades del fluido que depende de la temperatura. Existen distintas tablas de velocidad de sedimentación en función de la temperatura del fluido para realizar las correcciones correspondientes.

Antes de aplicar el método de Robinson las muestras deben ser sometidas a un pretratamiento. El mismo consiste en remover químicamente componentes cementantes como materia orgánica, carbonatos, óxidos, etc. Luego se debe realizar la dispersión de las partículas para evitar que estén unidas utilizando métodos fisicoquímicos. Una vez realizados estos procedimientos se puede proceder al análisis de la muestra con el método mencionado.

Una vez finalizado el pretratamiento, se colocan las muestras dentro de una probeta graduada con un líquido en su interior, en general agua. Se agita la probeta entre 1 y 2 minutos con un agitador manual de disco o un agitador mecánico. Al finalizar la agitación comienza a producirse la sedimentación del material, proceso que es cronometrado desde su inicio. De acuerdo con (2.3) las partículas de mayor diámetro tendrán una mayor velocidad de decantación, por lo tanto son las primeras en sedimentar. El siguiente paso consiste en introducir una pipeta graduada a una profundidad h para realizar la extracción del material a un dado tiempo t . La extracción se realiza a distintos tiempos, los cuales están tabulados en función de v ($v \leq h/t$) y se basan en el principio de Stokes. El siguiente paso consiste en pesar las partículas extraídas entre dos instantes de tiempo consecutivos, determinando el *porcentaje en peso*, el cual se obtiene de la resta entre los pesos del material extraído por la pipeta en el tiempo t y el extraído en el tiempo siguiente. Por último, se calculan el *porcentaje acumulado* y el *porcentaje pasante* (porcentaje pasante=100-porcentaje acumulado) utilizando los valores de porcentaje en peso determinados según la técnica descrita. Como su nombre indica, el *porcentaje acumulado* resulta de sumar los porcentajes en peso acumulados hasta el tiempo considerado. Por su parte el porcentaje pasante representa el porcentaje en peso del material que pasa a través de un tamiz de un dado diámetro. La utilización de tamices con distintos tamaños de mallas es otra de las técnicas utilizadas para determinar la distribución de granos. El porcentaje pasante se utilizará al graficar las curvas de distribución de granos, como veremos en el Capítulo 3. Dado que este método realiza mediciones interválicas, la granulometría de las partículas estará distribuida según intervalos, cada uno de los cuales involucra un rango de diámetros determinado.

Los resultados de aplicar este método a las 4 muestras consideradas en esta Tesis se listan en las Tablas 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4. Para identificar cada una de las muestras se ha utilizado la siguiente nomenclatura: P1-30, P1-100, P1-200 y P1-380, que corresponden

a las muestras del perfil de suelo 1 a las profundidades de 30, 100, 200 y 380 cm, respectivamente.

Diámetro [μm]	Peso [gr]	Por. en peso	Por. acumulado	Por. pasante
1000	0.00	0.00	0.00	100
500	0.05	0.10	0.10	99.91
250	0.08	0.15	0.25	99.76
125	0.20	0.38	0.63	99.38
63	1.70	3.24	1.86	96.11
31	7.50	14.28	18.14	81.86
15.6	2.50	4.76	22.90	77.10
7.8	7.50	14.28	37.18	62.82
3.9	1.00	1.9	39.08	60.92
2.0	5.00	9.52	48.60	51.40
menor a 2.0	27.00	51.40	100	0.00

Tabla 2.1. Valores tabulados del diámetro, peso, porcentaje en peso, porcentaje acumulado y porcentaje pasante correspondientes a la Muestra P1-30.

Diámetro [μm]	Peso [gr]	Por. en peso	Por. acumulado	Por. pasante
1000	0.50	0.94	0.94	99.06
500	0.37	0.70	1.64	98.36
250	0.38	0.72	2.36	97.64
125	1.16	2.19	4.54	95.46
63	3.65	6.88	11.42	88.58
31	9.00	16.96	28.38	71.62
15.6	6.00	11.31	39.69	60.31
7.8	8.00	15.08	54.77	45.23
3.9	0.50	0.94	55.71	44.29
2.0	3.00	5.65	61.36	38.64
menor a 2.0	20.50	38.64	100	0.00

Tabla 2.2. Valores tabulados del diámetro, peso, porcentaje en peso, porcentaje acumulado y porcentaje pasante correspondientes a la Muestra P1-100.

Diámetro [μm]	Peso [gr]	Por. en peso	Por. acumulado	Por. pasante
1000	0.88	1.83	1.83	98.17
500	1.48	3.07	4.90	95.10
250	1.76	3.65	8.55	91.45
125	1.49	3.09	11.65	88.35
63	1.55	3.22	14.87	85.13
31	5.50	11.42	26.29	73.71
15.6	3.50	7.27	33.55	66.45
7.8	4.50	9.34	42.90	57.10
3.9	4.50	9.34	52.24	47.76
2.0	5.00	10.38	62.62	37.38
menor a 2.0	18.00	37.38	100	0.00

Tabla 2.3. Valores tabulados del diámetro, peso, porcentaje en peso, porcentaje acumulado y porcentaje pasante correspondientes a la Muestra P1-200.

Diámetro [μm]	Peso [gr]	Por. en peso	Por. acumulado	Por. pasante
1000	0.10	0.20	0.20	99.80
500	3.37	6.61	6.81	93.29
250	6.00	11.78	18.59	81.41
125	4.41	8.66	27.24	72.76
63	4.07	7.99	35.23	64.77
31	6.00	11.78	47.01	52.99
15.6	4.50	8.83	55.84	44.16
7.8	4.00	7.85	63.69	36.31
3.9	3.50	6.87	70.56	29.44
2.0	4.00	7.85	78.41	21.59
menor a 2.0	11.00	21.59	100	0.00

Tabla 2.4. Valores tabulados del diámetro, peso, porcentaje en peso, porcentaje acumulado y porcentaje pasante correspondientes a la Muestra P1-380.

Los valores de estas Tablas fueron determinados por el laboratorio IGS-CISAUA. Los mismos serán utilizados en la clasificación textural de la muestras y para obtener la curva de distribución de tamaño de granos como se verá más adelante.

2.3. Textura

Con los datos obtenidos por el método de Robinson, se determina la textura de cada muestra de suelo, que se define en base a la proporción (porcentaje en peso) de las partículas menores a 2 mm de diámetro. El conocimiento de la textura de los distintos horizontes del suelo es fundamental, pues la misma permite inferir información acerca de la capacidad de retención del suelo, su permeabilidad, el contenido de la fase gaseosa, etc. Además la determinación de la textura permite disponer de un juego de parámetros de van Genuchten [18] con los cuales es posible caracterizar el flujo de agua tanto en condiciones de saturación parcial como total.

Para la determinación de los porcentajes de las distintas partículas que componen cada muestra de suelo, se adopta el esquema del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA). La clasificación según el diámetro de las partículas es la siguiente:

- Grava: mayor a 2 mm;
- Arenas: 2 mm - 0.05 mm;
- Limo: 0.05 mm - 0.002 mm;
- Arcilla: menor a 0.002 mm.

Los porcentajes de arena, limo y arcilla de cada muestra de suelo determinadas por el laboratorio IGS-CISAUA se listan en la Tabla 2.5.

Muestra	Arena [%]	Limo [%]	Arcilla [%]
P1-30	3.86	35.22	60.92
P1-100	11.42	44.29	44.29
P1-200	14.87	37.38	47.75
P1-380	35.23	35.33	29.44

Tabla 2.5. Contenido porcentual de material fino para las muestras analizadas.

En el Capítulo siguiente se procederá a la determinación de las texturas particulares utilizando los valores porcentuales de arena, limo y arcilla de las muestras consideradas.

2.4. Porosidad

La porosidad (ϕ) del suelo se define como la fracción del volumen del espacio entre las partículas sólidas del suelo en relación con el volumen total del mismo. Su valor varía entre 0 y 1 o entre 0 y 100 si se lo expresa de manera porcentual. El conocimiento de la porosidad de una muestra de suelo no brinda información acerca del tamaño de poros, su distribución ni de su grado de conectividad. Es decir, suelos con la misma porosidad pueden presentar propiedades físicas distintas.

El método clásico para determinar la porosidad de una muestra de suelo en laboratorio consiste en estimar la densidad aparente ρ_a y la densidad real ρ_r de cada muestra de suelo mediante el método de pesado. Para determinar ρ_a se utiliza el método del cilindro, el cual consiste en introducir en el suelo un cilindro metálico de volumen conocido V_t procurando perturbar lo menos posible su estructura. Luego se extrae la muestra del cilindro y se lo pesa, descontando su humedad. La densidad aparente se calcula con la siguiente fórmula:

$$\rho_a = \frac{P}{V_t g}, \quad (2.4)$$

donde P es el peso de la muestra de suelo y g la gravedad.

Por otro lado, la densidad ρ_r se calcula a partir del peso de una muestra de suelo P y el volumen que ocupa excluyendo los espacios porales, es decir, el volumen de la fase sólida V_s . Para estimarla se utiliza el método del *picnómetro*. Este dispositivo se muestra en la Fig. 2.3.



Figura 2.3. Fotografía de un picnómetro utilizado para calcular la densidad real de las muestras de suelo.

Para estimar ρ_r se deben calcular los pesos P_1 , P_2 y P_3 de la siguiente manera:

1. Pesar la muestra de suelo seco y tamizado fuera del picnómetro. El peso obtenido se denomina P_1 .
2. Pesar el picnómetro lleno de agua destilada. El peso obtenido se denomina P_2 .
3. Vaciar el picnómetro, colocar el suelo, llenar con agua y pesar. El peso obtenido se denomina P_3 .

El volumen de la fase sólida se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$V_s = \frac{P_2 - (P_3 - P_1)}{\rho_w g}, \quad (2.5)$$

donde ρ_w (1 gr/cm^3) es la densidad del agua destilada.

Una vez calculado V_s se procede a estimar la densidad real:

$$\rho_r = \frac{P}{V_s g}. \quad (2.6)$$

Finalmente se calcula la porosidad a partir de ρ_a y ρ_r :

$$\phi[\%] = \left(\frac{\rho_r - \rho_a}{\rho_r} \right) \times 100. \quad (2.7)$$

Los resultados obtenidos mediante esta metodología para las 4 muestras se listan en la Tabla 2.6.

Muestra	ρ_a [gr/cm ³]	ρ_r [gr/cm ³]	ϕ [%]
P1-30	1.25	2.17	42.39
P1-100	1.30	2.56	49.22
P1-200	1.28	2.61	50.96
P1-380	1.43	2.50	42.80

Tabla 2.6. Valores de Porosidad obtenidos mediante el método del picnómetro.

Los valores de porosidad estimados serán utilizados para calcular valores de conductividad hidráulica saturada, como se verá en el Capítulo 4. En el Capítulo siguiente las muestras serán clasificadas desde el punto de vista textural.

Capítulo 3

Caracterización textural de las muestras

En este capítulo se introduce el triángulo textural establecido por el USDA con el objetivo de realizar una caracterización textural de las muestras de suelo. Luego, se describen las curvas características de flujo no saturado. En base a la caracterización textural y datos de la literatura se estiman los parámetros del modelo de van Genuchten necesarios para la caracterización de dichas curvas.

3.1. Clasificación de los suelos

Uno de los métodos clásicos para la clasificación textural del suelo se basa en el conocimiento de los porcentajes relativos de partículas finas. A partir del porcentaje de arena, limo y arcilla, la clase textural de una muestra de suelo puede obtenerse utilizando el diagrama textural diseñado por el USDA [17]. Este diagrama es un triángulo equilátero, donde uno de sus lados corresponde a la fracción de arcilla, el otro al limo y el tercero a la fracción de arena (ver Fig. 3.1). Cada uno de sus lados se encuentra graduado de 0 % a 100 %, donde el valor 0 % de una fracción de partículas corresponde a 100 % de la anterior. El interior del triángulo está dividido en sectores, cada uno representa una clase textural de suelo caracterizado en función de las proporciones de los elementos dominantes. Notar que existen 12 texturas diferentes según esta clasificación. Cabe aclarar que el prefijo "Franco" que figura en algunas de las texturas del triángulo hace referencia a una textura media, que también suele denominarse como Marga.

Cada textura de un horizonte del suelo está definida por un punto en el interior del triángulo. Este punto se obtiene al intersectar rectas asociadas a los porcentajes representativos de cada horizonte. Notar que la suma de las tres fracciones es de 100 %, luego para definir la textura basta con trazar dos rectas ya que la tercera es dependiente de las dos primeras.

Utilizando los porcentajes listados en la Tabla 2.5 del Capítulo 2 se clasificaron las muestras de suelo según su textura. Como puede observarse en la Tabla 3.1, las muestras P1-30 y P1-200 tienen textura Arcillosa (textura fina), sin embargo no implica

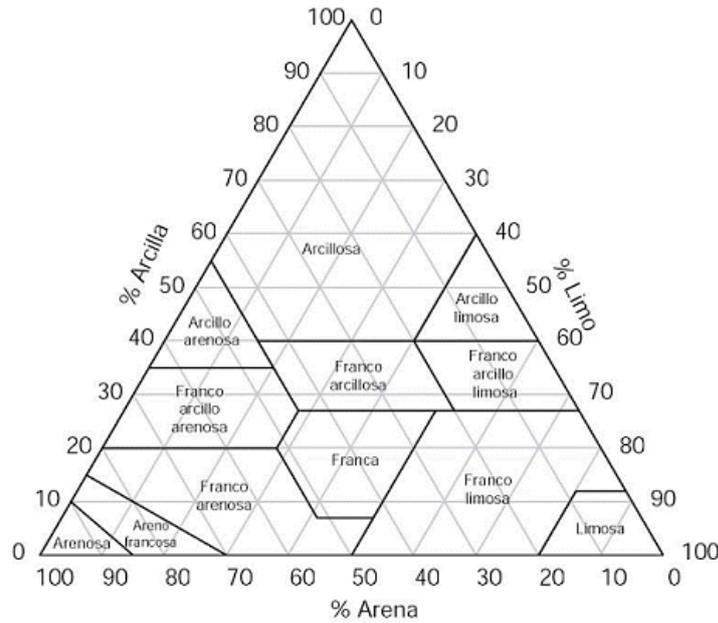


Figura 3.1. Triángulo textural de la USDA.

que ambos horizontes presenten el mismo comportamiento hidráulico. Por otro lado, las muestras P1-100 y P1-380 tienen una textura moderadamente fina que corresponden a los tipos Arcillo-limoso y Franco-arcilloso respectivamente.

Muestra	Textura
P1-30	Arcillosa
P1-100	Arcillo-Limosa
P1-200	Arcillosa
P1-380	Franco-Arcillosa

Tabla 3.1. Clasificación textural de las muestras de suelo.

3.2. Parámetros hidráulicos

Para caracterizar el flujo de agua en la zona no saturada (ZNS) se utilizan las curvas de contenido volumétrico de agua θ y de conductividad hidráulica K . Ambas variables suelen expresarse en función de la altura de presión h , la cual es una medida de la diferencia de presión entre las fase líquida (agua) y la fase gaseosa (aire) en el interior del suelo. El modelo de van Genuchten [18] permite calcular θ y K en función de h utilizando expresiones analíticas cerradas.

De acuerdo con el modelo de van Genuchten, $\theta(h)$ puede calcularse como:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + (\alpha h)^n)^m}, \quad (3.1)$$

donde θ_s y θ_r son el contenido de agua de saturación y residual respectivamente; α , n y m son parámetros empíricos del modelo. Cabe señalar que α está relacionada con la presión de burbuja, n y m se relacionan con la distribución del tamaño poral. En general suele utilizarse la siguiente relación: $m = 1 - \frac{1}{n}$.

La conductividad hidráulica, por su parte, se determina a partir de la siguiente expresión:

$$K(h) = K_s K_r(h), \quad (3.2)$$

donde K_s es la conductividad hidráulica saturada y K_r es la conductividad hidráulica relativa que varía entre 0 y 1. Cuando el medio poroso se encuentra completamente saturado $K_r = 1$ y la conductividad hidráulica se reduce a K_s [18]. Esta última viene dada por:

$$K_r(h) = \begin{cases} \frac{(1-(\alpha h)^{n-1}(1+(\alpha h)^n)^{-m})^2}{(1+(\alpha h)^n)^{\frac{m}{2}}} & , h < 0; \\ 1 & , h \geq 0. \end{cases} \quad (3.3)$$

Carsel y Parrish [4] determinaron los parámetros del modelo de van Genuchten para las 12 texturas del USDA analizando 15737 muestras de suelos. En primer lugar los citados autores realizaron una clasificación textural utilizando el diagrama de la Fig. 3.1. Luego utilizaron el modelo de regresión de Rawls y Brakensiek [13] para estimar las curvas $\theta(h)$ y $K(h)$ de las 12 texturas de suelo. Este ajuste permitió obtener los parámetros de van Genuchten para cada textura junto con sus funciones de densidad de probabilidad, permitiendo así calcular los valores medios de cada parámetro, sus desviaciones estándar σ y sus valores mínimos y máximos. Los parámetros determinados por Carsel y Parrish [4] constituyen una útil referencia para caracterizar hidráulicamente los suelos cuando no se dispone de curvas características determinadas experimentalmente.

En base a los resultados de la sección anterior, se seleccionaron los parámetros que describen las texturas de los suelos correspondientes a las muestras analizadas, cuyos valores se listan en las Tablas 3.2, 3.3 y 3.4.

Parámetro	Media	σ	Mínimo	Máximo
θ_s	0.380	0.0900	0.102	0.658
θ_r	0.0685	0.0344	8.36×10^{-4}	0.140
α [cm ⁻¹]	6.18×10^{-3}	7.59×10^{-3}	2.50×10^{-4}	0.0621
n	1.13	0.0697	1.04	1.36
K_s [m/d]	3.1536×10^{-2}	9.3312×10^{-2}	3.3437×10^{-6}	4.1126

Tabla 3.2. Parámetros de van Genuchten para las muestras P1-30 y P1-200, correspondientes a la textura Arcillosa [4].

Las Figs. 3.2, 3.3 y 3.4 ilustran las curvas características para las 3 texturas de interés. Para graficar las curvas, se utilizaron los valores medios, mínimos y máximos de los parámetros de van Genuchten. Estas curvas características pueden ser utilizadas para realizar simulaciones numéricas de flujo utilizando la ecuación de Richards [12].

Parámetro	Media	σ	Mínimo	Máximo
θ_s	0.360	0.0698	0.144	0.576
θ_r	0.0706	0.0228	1.47×10^{-4}	0.141
α [cm^{-1}]	4.13×10^{-3}	2.60×10^{-3}	5.73×10^{-4}	0.0211
n	1.16	0.0499	1.01	1.32
K_s [m/d]	1.8922×10^{-3}	3.5251×10^{-3}	1.4170×10^{-5}	4.6397×10^{-2}

Tabla 3.3. Parámetros de van Genuchten para la muestra P1-100, correspondiente a la textura Arcillo-limosa [4].

Parámetro	Media	σ	Mínimo	Máximo
θ_s	0.456	0.110	0.1206	0.799
θ_r	0.0954	9.68×10^{-3}	0.0655	0.125
α [cm^{-1}]	0.0190	0.0153	1.59×10^{-3}	0.136
n	1.32	0.0973	1.02	1.62
K_s [m/d]	0.085795	0.21686	1.2269×10^{-5}	8.4326

Tabla 3.4. Parámetros de van Genuchten para la muestra P1-380, correspondiente a la textura Franco-arcillosa [4].

Cabe mencionar que mediante la caracterización textural de los suelos, fue posible estimar un rango de variación para los parámetros de van Genuchten (Tablas 3.2-3.4). Como se ha mencionado anteriormente, K_s es uno de los parámetros más importantes en la caracterización del flujo. Una mejor caracterización de flujo tanto en la zona saturada como la no saturada podría lograrse estimando K_s mediante otras técnicas que permiten su estimación de manera más precisa. Estas técnicas se basan en la distribución del tamaño de grano del suelo y se desarrollarán en el Capítulo siguiente.

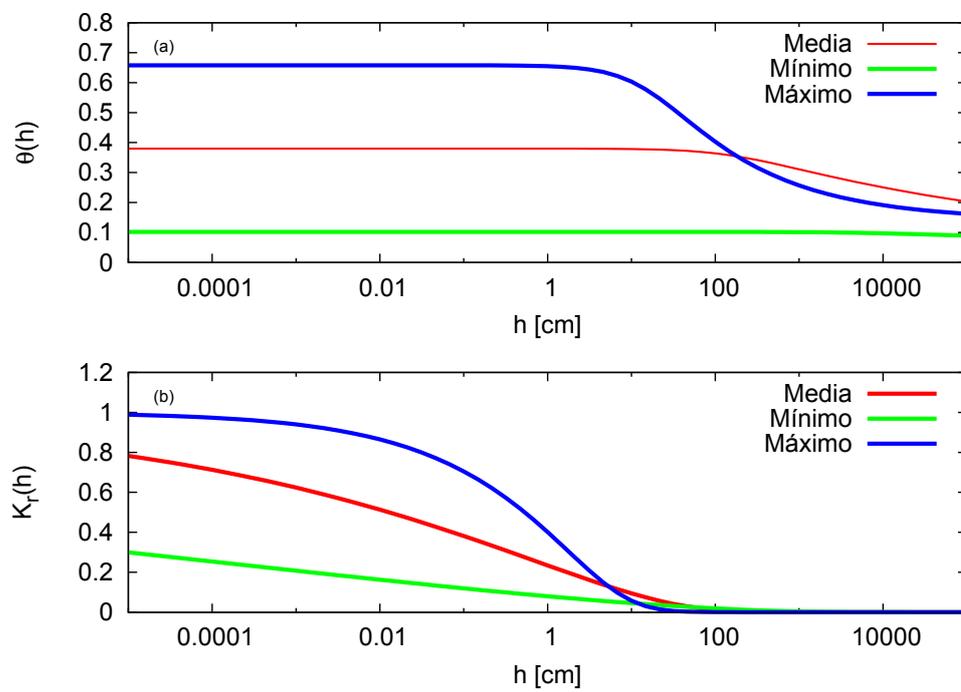


Figura 3.2. Curvas características para la textura Arcillosa.

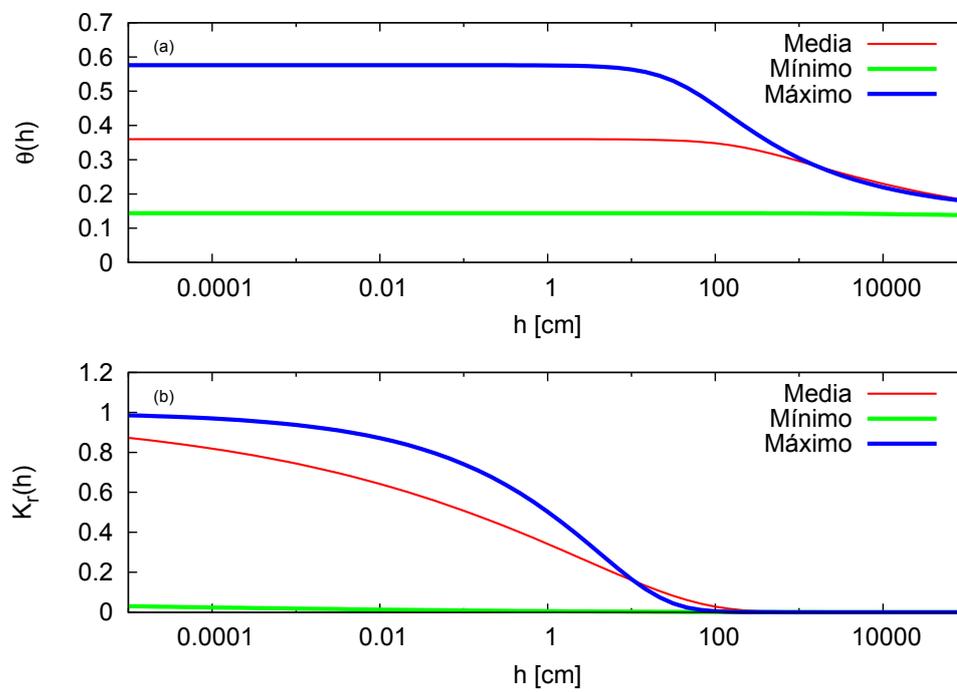


Figura 3.3. Curvas características para la textura Arcillo-limosa.

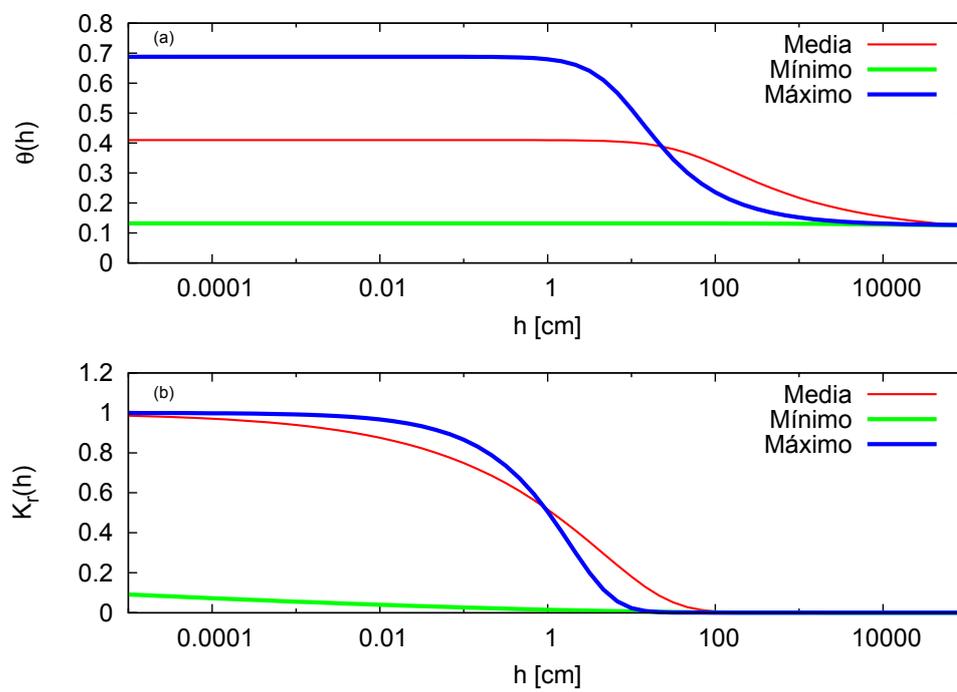


Figura 3.4. Curvas características para la textura Franco-arcillosa.

Capítulo 4

Determinación de K_s a partir de la granulometría

En este capítulo se presenta en primer lugar la ecuación que gobierna el flujo de agua en medios porosos saturados. Luego, se presentan las fórmulas empíricas utilizadas para la estimación de la conductividad hidráulica K_s a partir de la distribución de tamaño de grano para las muestras de suelo de AGGO.

4.1. Ley de Darcy

La ecuación fundamental que describe el flujo de un fluido a través de un medio poroso saturado es la Ley de Darcy. Esta fórmula empírica fue obtenida originalmente en base a mediciones del flujo de agua a través de arenas y areniscas [3].

La ley de Darcy puede representarse en forma vectorial de la siguiente manera:

$$\vec{q} = -\mathbf{K}_s \cdot \vec{\nabla} H, \quad (4.1)$$

donde \vec{q} es el vector flujo de agua que se define como la velocidad del flujo de agua por unidad de área; \mathbf{K}_s es el tensor conductividad hidráulica y H es la altura hidráulica definida como $H = h + z$, siendo z la coordenada vertical coincidente con la dirección de la gravedad. Si el medio es isótropo, la conductividad hidráulica saturada puede caracterizarse mediante la magnitud escalar K_s . Este coeficiente representa la facilidad con la cual un fluido es transportado a través de un medio poroso, por lo cual dependerá de las propiedades del fluido y de la matriz sólida.

Las propiedades relevantes del fluido son su densidad y su viscosidad, mientras que las propiedades relevantes de la matriz sólida son la distribución del tamaño de grano y su forma, la tortuosidad, la superficie específica y la porosidad. A partir de una derivación analítica de (4.1) o bien mediante un análisis dimensional, es posible expresar la conductividad hidráulica saturada como [1]

$$K_s = \kappa \left(\frac{g}{\nu} \right), \quad (4.2)$$

donde κ es la permeabilidad del medio, la cual depende exclusivamente de las propiedades de la matriz sólida y es independiente del fluido saturante. El cociente g/ν representa la influencia de las propiedades del fluido, siendo ν la viscosidad cinemática del fluido [1].

En la sección siguiente se presentarán distintas fórmulas empíricas que permiten estimar la conductividad hidráulica saturada K_s a partir de un análisis de la distribución del tamaño de granos de las muestras de suelo.

4.2. Fórmulas empíricas para la determinación de K_s

La permeabilidad de un medio poroso puede expresarse en función de las propiedades de su matriz sólida mediante la siguiente fórmula generalizada [1]:

$$\kappa = f_1(s)f_2(\phi)d^2, \quad (4.3)$$

donde $f_1(s)$ es el factor de forma, siendo s es un parámetro adimensional que expresa el efecto de la forma de los granos (o de los poros), $f_2(\phi)$ es llamado el factor de porosidad y d es el diámetro efectivo de los granos. Usualmente d es asociado al diámetro definido como d_{10} , que corresponde al diámetro del grano tal que el 10 % de la muestra posee un diámetro menor. En la Fig. 4.1 se ilustra la distribución de tamaños de grano típica y el diámetro d_{10} .

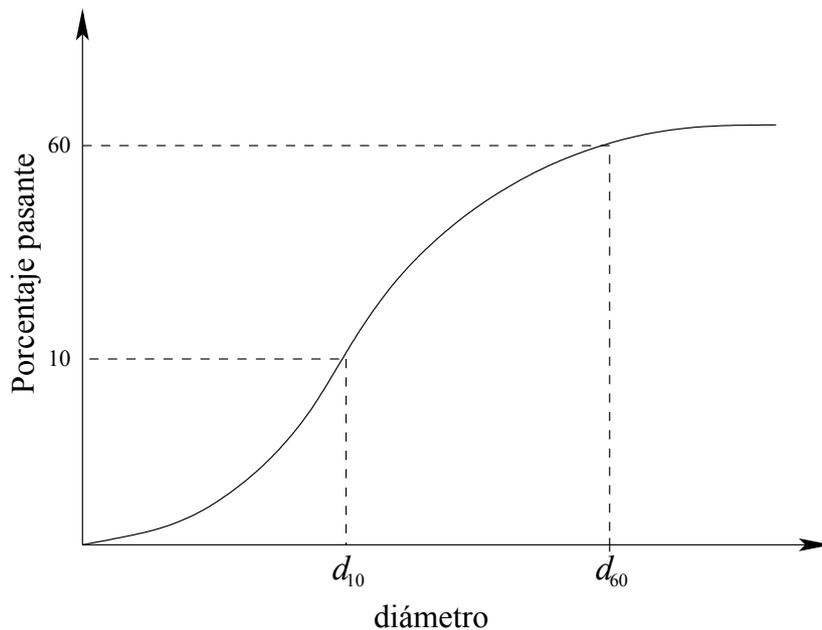


Figura 4.1. Curva de distribución de tamaño de granos esquemática junto a la determinación de los diámetros efectivos d_{10} y d_{60} .

Un coeficiente a tener en cuenta en la aplicación de estas fórmulas es el coeficiente

CAPÍTULO 4. DETERMINACIÓN DE K_s A PARTIR DE LA GRANULOMETRÍA 20

Hazen o de uniformidad U , el cual se obtiene a partir de los diámetros efectivos d_{60} y d_{10} y se calcula como $U = \left(\frac{d_{60}}{d_{10}}\right)$. Este coeficiente brinda información sobre la uniformidad de los suelos (grado de selección). Si $U < 4$ el suelo se considera uniforme o bien seleccionado, caso contrario los mismos son poco uniformes o mal seleccionados.

Combinando las expresiones (4.2) y (4.3), K_s toma la siguiente forma:

$$K_s = \left(\frac{g}{\nu}\right) f_1(s) f_2(\phi) d^2. \quad (4.4)$$

Dependiendo de las expresiones que se utilicen para $f_1(s)$ y $f_2(\phi)$ se obtendrán diferentes fórmulas para la estimación de K_s . En este trabajo se utilizarán las fórmulas de origen empírico que se listan a continuación [11].

Fórmula de Hazen:

$$K_s = \left(\frac{g}{\nu}\right) 6 \times 10^{-4} (1 + 10(\phi - 0.26)) d_{10}^2. \quad (4.5)$$

Se suele utilizar en muestras que poseen un coeficiente de uniformidad $U < 5$ y un tamaño de grano efectivo entre $0.1 \text{ mm} \leq d \leq 3 \text{ mm}$.

Fórmula de Kozeny-Carman:

$$K_s = \left(\frac{g}{\nu}\right) \left(\frac{\phi^3}{(1 - \phi)^2}\right) \frac{d_{10}^2}{180}. \quad (4.6)$$

Es una de las ecuaciones más aceptadas y usadas para la estimación de K_s como función de las características del suelo. Su uso no es apropiado para suelos que poseen un diámetro efectivo mayor a 3 mm o para suelos arcillosos.

Fórmula de Breyer:

$$K_s = \left(\frac{g}{\nu}\right) 6 \times 10^{-4} \log_{10} \left(\frac{500}{U}\right) d_{10}^2. \quad (4.7)$$

No considera la porosidad en la fórmula, asumiendo $f_2(\phi) = 1$. Resulta útil para materiales con una distribución heterogénea y granos pobremente seleccionados con $1 < U < 20$ y granos entre $0.06 \text{ mm} < d < 0.6 \text{ mm}$ de diámetro.

Fórmula de Slitcher:

$$K_s = \left(\frac{g}{\nu}\right) 1 \times 10^{-2} \phi^{3.287} d_{10}^2. \quad (4.8)$$

Es aplicable a muestras con un tamaño de grano entre 0.01 mm y 5 mm.

Fórmula de Terzaghi:

$$K_s = \left(\frac{g}{\nu}\right) C_t \left(\frac{\phi - 0.13}{\sqrt[3]{1 - \phi}}\right)^2 d_{10}^2. \quad (4.9)$$

Esta fórmula se aplica para texturas arenosas de granos grandes. El coeficiente de clasificación C_t toma valores entre 6.1×10^{-3} y 10.7×10^{-3} . En este trabajo se utilizará un valor promedio de este coeficiente, $C_t = 8.4 \times 10^{-3}$.

Cabe mencionar que existen en la literatura fórmulas que utilizan otros valores de diámetro efectivo pero no se incluyen en el presente análisis por ser menos utilizadas.

Para aplicar cualquiera de las fórmulas listadas resta definir el valor de ν . En este trabajo se consideró que la temperatura del agua es de $20^\circ C$, lo cual implica que su viscosidad cinemática toma el valor $\nu = 0.0874 \text{ m}^2/\text{d}$. Para g se asume un valor de 9.80 m/s^2 .

4.3. Determinación de d_{10}

Las muestras consideradas en este estudio poseen un gran porcentaje de granos finos, por lo que no se puede determinar d_{10} a partir de los datos crudos de laboratorio. Para estimar este parámetro se optó por ajustar una expresión analítica a la curva de distribución de tamaño de grano y determinar d_{10} a partir de la curva ajustada. La distribución de tamaño de granos se grafica como el porcentaje de granos pasante P_p (porcentaje de granos menores o iguales a d) en función del diámetro d . La estimación de esta curva sirve como base para estimar el comportamiento hidráulico del suelo [6]. Para realizar el ajuste se propusieron distintas expresiones analíticas sencillas. La expresión para describir la relación funcional $P_p(d)$ que presentó el mejor ajuste a los datos fue la siguiente:

$$P_p(d) = \frac{100}{a + b d^{-1/2}}, \quad (4.10)$$

donde a y b son parámetros de ajuste. Para determinar los valores de estos parámetros se utilizó el algoritmo de Mínimos Cuadrados no lineal de Marquardt-Levenberg del programa Gnuplot.

Las Figs. 4.2-4.5 muestran los ajustes obtenidos con la expresión(4.10). Cabe aclarar que ante la ausencia de datos para $d < 2 \mu\text{m}$ y obtener una curva realista se consideró P_p nulo para $d < 0.001 \mu\text{m}$.

En la Tabla 4.1 se listan los valores de a y b obtenidos para las 4 muestras junto con el error medio cuadrático (RMS) de cada ajuste, los desvíos estándar σ de cada variable y la correlación entre a y b .

Muestra	a	b	RMS	σ_a [%]	σ_b [%]	$corr(a, b)$
P1-30	0.9151	1.5196	3.581	2.241	8.342	-0.697
P1-100	0.8694	3.1731	4.867	3.721	9.763	-0.719
P1-200	0.9437	2.2315	1.355	0.841	2.876	-0.666
P1-380	0.8391	5.6053	1.567	1.757	3.165	-0.769

Tabla 4.1. Parámetros de los ajustes de la expresión (4.10).

Al analizar la Tabla 4.1, se observa que el RMS obtenido para los 4 casos es relativamente bajo lo que muestra un satisfactorio ajuste en todos los casos. En el caso de

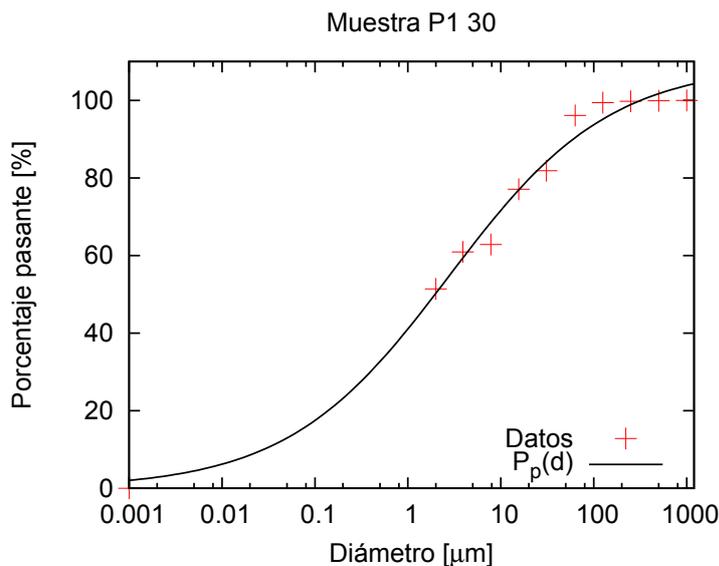


Figura 4.2. Ajuste de los datos de la muestra P1-30.

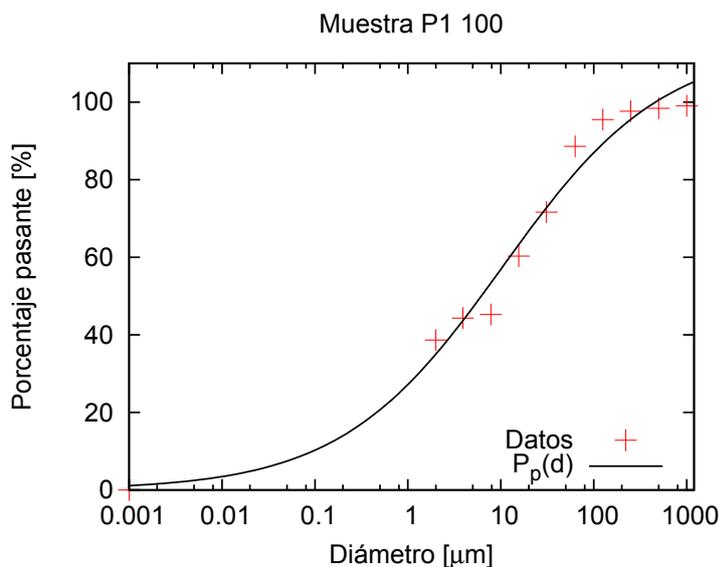


Figura 4.3. Ajuste de los datos de la muestra P1-100.

las muestras P1-30 y P1-100 el modelo propuesto no logra reproducir con exactitud los datos medidos para todo el rango de d . Esta discrepancia podría salvarse utilizando modelos que incorporen tendencia bimodales, pero escapa a los objetivos de la presente Tesis. En el caso de las muestras de horizontes más profundos P1-200 y P1-380 el ajuste entre el modelo y los datos resulta óptimo para todo el rango de variación de d . La dependencia estadística entre a y b es modesta a alta; esta dependencia es inversamente proporcional, pues $\text{corr}(a, b) < 0$ para los 4 ajustes.

En base a los ajustes realizados se determinaron los valores de los diámetros d_{10} , d_{60} y del coeficiente U utilizando las curvas ajustadas. Los valores resultantes se listan en la Tabla 4.2.

Los valores de U calculados son mayores a 4, indicando que los suelos son poco

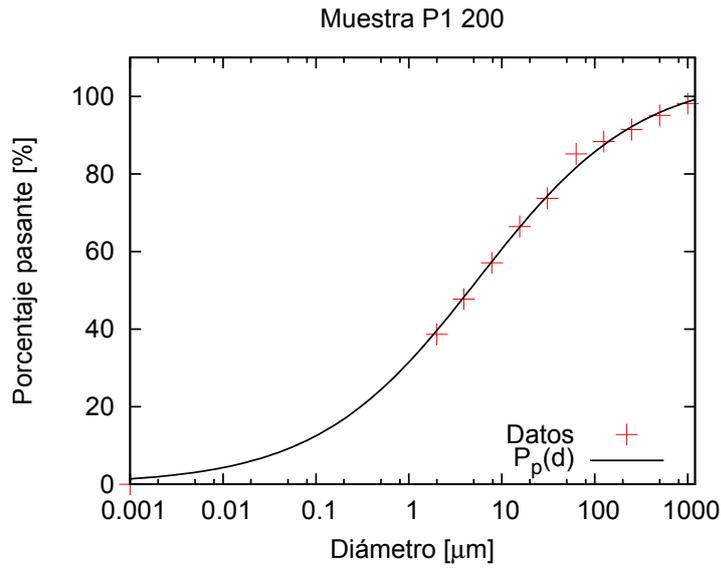


Figura 4.4. Ajuste de los datos de la muestra P1-200.

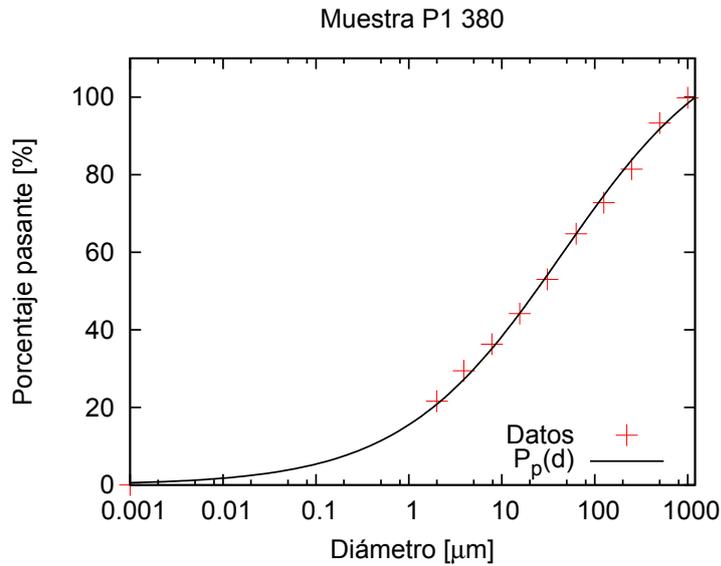


Figura 4.5. Ajuste de los datos de la muestra P1-380.

Muestra	$d_{10}[\mu m]$	$d_{60}[\mu m]$	U
P1-30	0.028	4.088	146
P1-100	0.121	15.840	130.91
P1-200	0.061	9.527	156.18
P1-380	0.374	45.888	122.70

Tabla 4.2. Diámetros efectivos y coeficiente de uniformidad estimados para las muestras analizadas.

uniformes. Por convención, si el valor de U es mayor a 15, el suelo es considerado de tipo till. Esta condición la verifican las 4 muestras de suelo analizadas [15].

4.4. Estimaciones de K_s

Utilizando los valores de d_{10} , ϕ y U se estimaron los valores de K_s para las 4 muestras de suelo utilizando las fórmulas empíricas (4.5)-(4.9). Los resultados obtenidos con cada fórmula y el valor medio de K_s se listan en las Tablas 4.3- 4.6. Con el objeto de comparar visualmente los resultados obtenidos con las fórmulas utilizadas, se grafican las estimaciones de K_s en las Figs. 4.6- 4.9.

Fórmula	K_s [m/d]
Hazen	2.6029×10^{-6}
Kozeny-Carman (K-C)	2.0195×10^{-6}
Breyer	6.7981×10^{-7}
Slitcher	9.4305×10^{-7}
Terzaghi	1.6598×10^{-6}
Valor medio	1.5810×10^{-6}

Tabla 4.3. Determinación de los valores de K_s de la muestra P1-30.

Fórmula	K_s [m/d]
Hazen	4.3153×10^{-5}
Kozeny-Carman (K-C)	5.3994×10^{-5}
Breyer	1.0249×10^{-5}
Slitcher	2.0448×10^{-5}
Terzaghi	3.6388×10^{-5}
Valor medio	3.2847×10^{-5}

Tabla 4.4. Determinación de los valores de K_s de la muestra P1-100.

Los valores de K_s estimados por las fórmulas de Hazen, Kozeny-Carman (K-C) y Terzaghi son mayores al valor medio calculado, en cambio las estimaciones logradas con las fórmulas de Breyer y Slitcher se encuentran por debajo de la media. El mínimo valor estimado se determinó con la fórmula de Breyer para las cuatro muestras, por otro lado la estimación de K_s calculada con la fórmula de Terzaghi, es el más cercano al valor medio en los 4 casos estudiados.

Fórmula	K_s [m/d]
Hazen	8.8240×10^{-6}
Kozeny-Carman (K-C)	1.2503×10^{-5}
Breyer	9.1303×10^{-7}
Slitcher	4.4602×10^{-6}
Terzaghi	7.9603×10^{-6}
Valor medio	6.9321×10^{-6}

Tabla 4.5. Determinación de los valores de K_s de la muestra P1-200.

Fórmula	K_s [m/d]
Hazen	7.7629×10^{-5}
Kozeny-Carman (K-C)	6.1958×10^{-5}
Breyer	1.0891×10^{-5}
Slitcher	2.8601×10^{-5}
Terzaghi	5.0382×10^{-5}
Valor medio	4.5892×10^{-5}

Tabla 4.6. Determinación de los valores de K_s de la muestra P1-380.

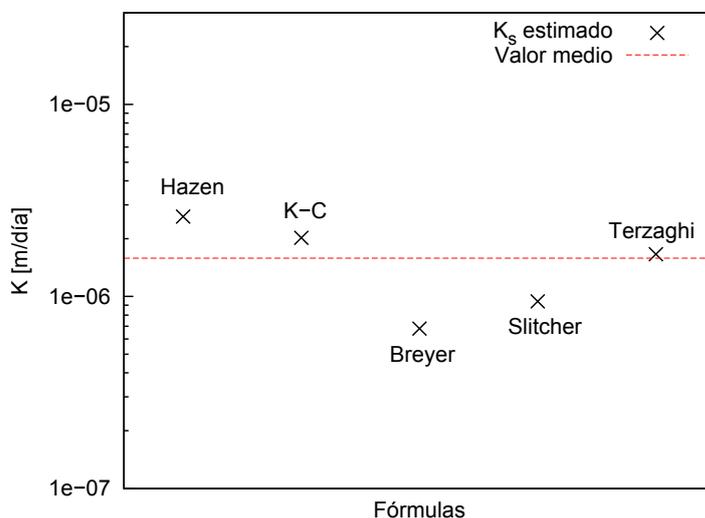


Figura 4.6. Valores de K_s de la muestra P1-30.

Si se comparan los valores obtenidos de K_s mediante este análisis con los que se obtienen a partir del análisis textural (ver Tablas 3.2-3.4), puede concluirse que los valores son significativamente bajos, cercanos a las cotas inferiores de K_s . En el caso de las muestras P1-30 y P1-200 el valor medio de los valores estimados de K_s a partir

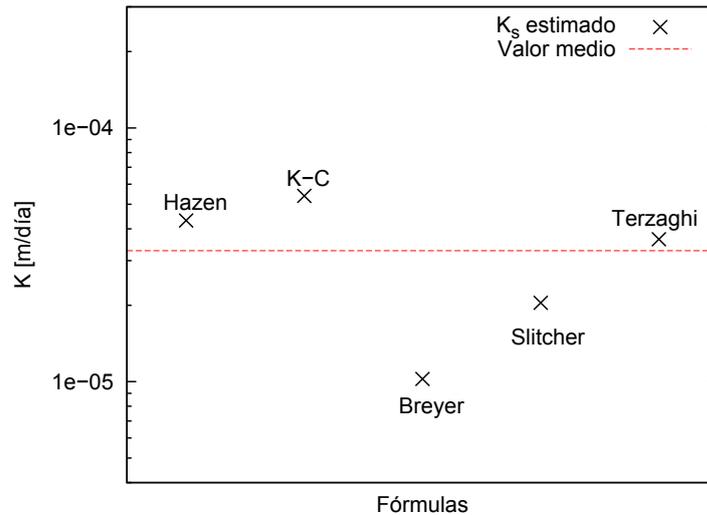


Figura 4.7. Valores de K_s de la muestra P1-100.

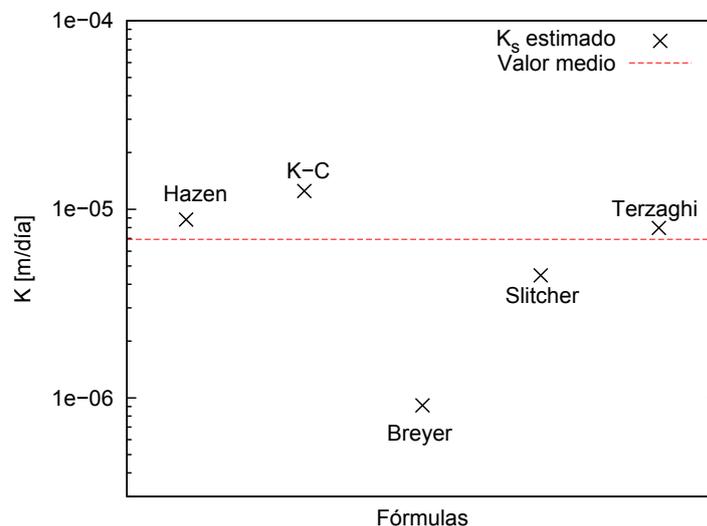


Figura 4.8. Valores de K_s de la muestra P1-200.

de las fórmulas resultan 4 ordenes de magnitud menor que el correspondiente al valor medio de la textura Arcillosa determinada por Carsel y Parrish [4]. La muestra P1-100 arroja un valor de K_s medio 2 órdenes de magnitud menor que la Arcillo-limosa, en tanto que la muestra P1-380 tiene un valor medio de K_s 3 órdenes de magnitud menor que el de la textura Franco-arcillosa. Estas discrepancias deben atribuirse a los altos valores del coeficiente de uniformidad U obtenidos para las cuatro muestras. Las fórmulas utilizadas estiman valores confiables de K_s para suelos bien seleccionados o uniformes [9].

Con el propósito de obtener estimaciones más consistentes con las texturas de los suelos, en el capítulo siguiente se proponen modificaciones a las fórmulas empíricas anteriores.

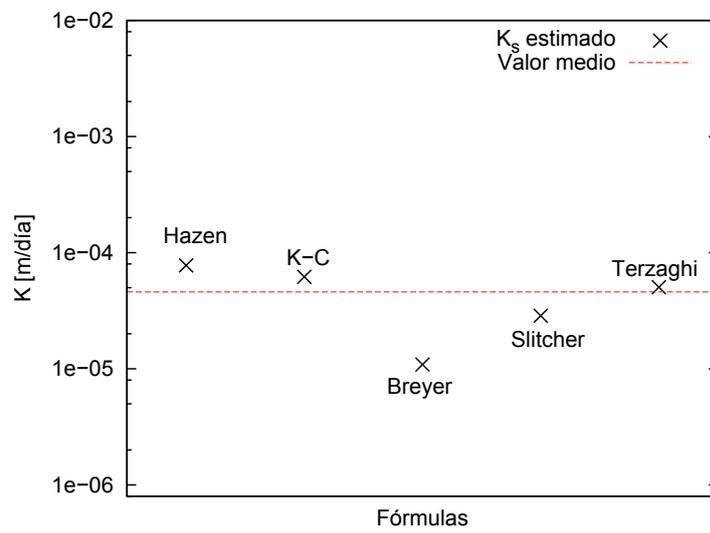


Figura 4.9. Valores de K_s de la muestra P1-380.

Capítulo 5

Alternativas para la estimación de K_s

En el presente capítulo se propone efectuar una estimación alternativa de K_s a partir de modificar las fórmulas empíricas utilizadas en el capítulo anterior. Las alternativas propuestas consisten en modificar el exponente de d_{10} y en estimar el diámetro efectivo utilizando la curva de distribución de tamaño de granos.

5.1. Modificación del exponente de las fórmulas empíricas

En el trabajo de Sheperd [14] se analizaron las distintas fórmulas para estimar K_s a partir del tamaño de grano. De acuerdo a este trabajo, las fórmulas pueden generalizarse con la siguiente expresión:

$$f(d) = ad^b, \quad (5.1)$$

donde el coeficiente b puede variar entre 1.11 y 2.05 dependiendo de la textura del suelo. En particular Garcia-Bengochea y Lovell [8] obtienen un valor de $b = 1.67$ para suelos con un alto contenido de partículas finas.

En base a estos resultados y dado que las muestras analizadas poseen un alto porcentaje de partículas finas, se propone modificar los exponentes de las fórmulas (4.5)-(4.9) utilizando 1.67 en lugar de 2.

En las Tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 se muestran los resultados obtenidos para las muestras de suelo modificando el exponente en las fórmulas. Estos mismos resultados se ilustran en las Figs. 5.1-5.4. Como puede observarse los resultados obtenidos de K_s al modificar el exponente son más realistas y caen dentro del rango de valores admisibles de Carsel y Parrish (Tablas 3.2, 3.3 y 3.4). A pesar de que las estimaciones son cuantitativamente diferentes a las que se obtienen con las fórmulas originales (es decir con exponente 2) el comportamiento relativo entre las distintas fórmulas es análogo al caso anterior.

Fórmula	K_s [m/d]
Hazen	6.9945×10^{-4}
Kozeny-Carman (K-C)	5.4267×10^{-4}
Breyer	1.8267×10^{-4}
Slitcher	2.5341×10^{-4}
Terzaghi	4.4603×10^{-4}
Valor medio	4.2485×10^{-4}

Tabla 5.1. Determinación de los valores de K_s de la muestra P1-30 modificando el exponente.

Fórmula	K_s [m/d]
Hazen	7.5690×10^{-3}
Kozeny-Carman (K-C)	9.4705×10^{-3}
Breyer	1.7976×10^{-3}
Slitcher	3.5865×10^{-3}
Terzaghi	6.3824×10^{-3}
Valor medio	5.7613×10^{-3}

Tabla 5.2. Determinación de los valores de K_s de la muestra P1-100 modificando el exponente.

Fórmula	K_s [m/d]
Hazen	2.0276×10^{-3}
Kozeny-Carman (K-C)	2.8729×10^{-3}
Breyer	2.0980×10^{-4}
Slitcher	1.0249×10^{-3}
Terzaghi	1.8291×10^{-3}
Valor medio	1.5929×10^{-3}

Tabla 5.3. Determinación de los valores de K_s de la muestra P1-200 modificando el exponente.

Fórmula	K_s [m/d]
Hazen	1.1942×10^{-2}
Kozeny-Carman (K-C)	9.5314×10^{-3}
Breyer	1.6755×10^{-3}
Slitcher	4.3999×10^{-3}
Terzaghi	7.7506×10^{-3}
Valor medio	7.0600×10^{-3}

Tabla 5.4. Determinación de los valores de K_s de la muestra P1-380 modificando el exponente

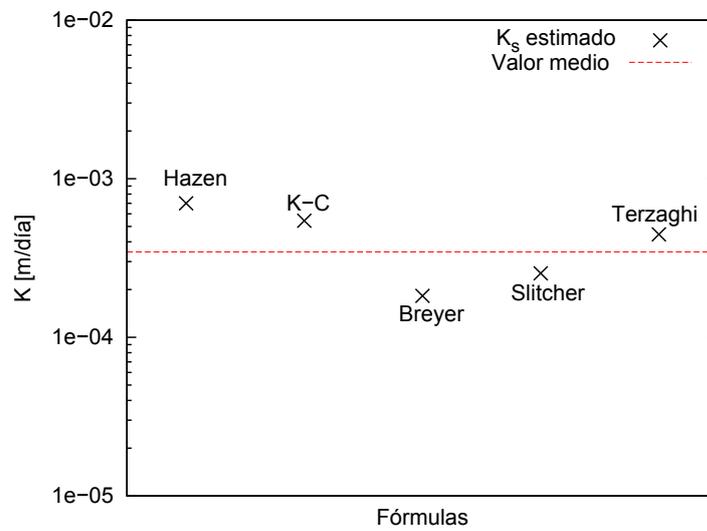


Figura 5.1. K_s de la muestra P1-30 modificando el exponente.

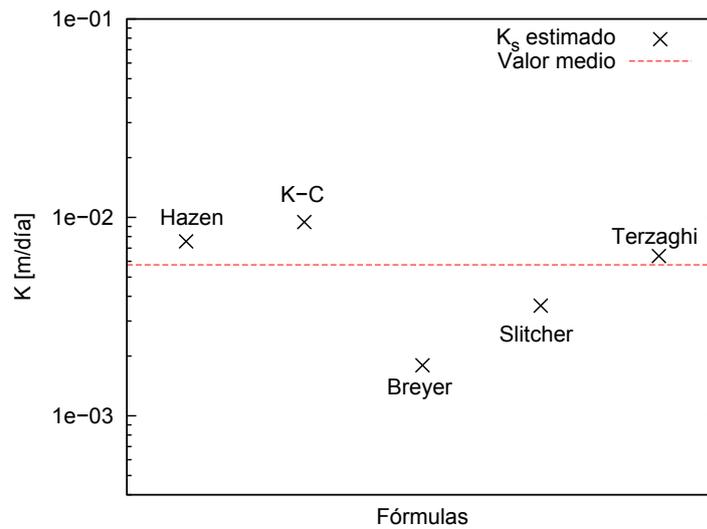


Figura 5.2. K_s de la muestra P1-100 modificando el exponente.

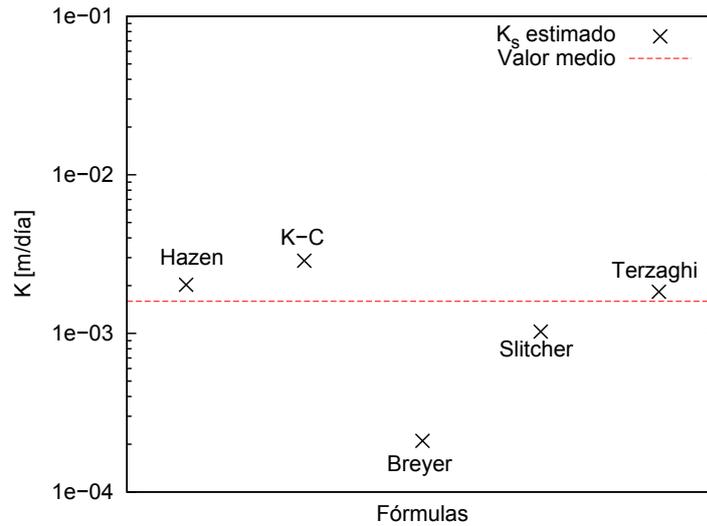


Figura 5.3. K_s de la muestra P1-200 modificando el exponente.

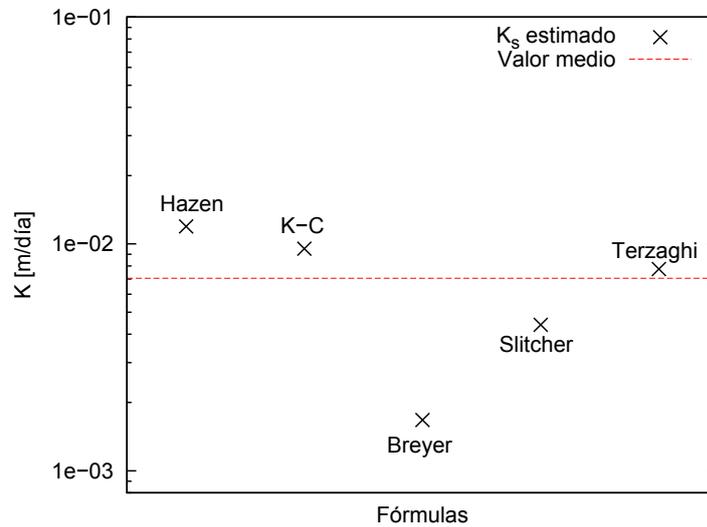


Figura 5.4. K_s de la muestra P1-380 modificando el exponente.

5.2. Modificación del diámetro efectivo

En las fórmulas empíricas para estimar K_s el diámetro efectivo se asocia al valor de d_{10} . La validez de esta estimación estaría asegurada para valores de U menores a 5 [9], es decir para suelos uniformes o bien seleccionados.

Dado que en este caso no se cumple dicha condición, se propone utilizar como diámetro efectivo en las fórmulas (4.5)-(4.9) los valores que se obtienen a partir de las medias aritmética, armónica y geométrica de los diámetros de los granos.

Las medias aritmética (d_a), armónica (d_h) y geométrica (d_g) se calculan a partir de las siguientes expresiones:

$$d_a = \frac{\sum_{i=1}^n p_i d_i}{100}, \tag{5.2}$$

$$d_h = 100 \left(\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{d_i} \right)^{-1}, \quad (5.3)$$

$$d_g = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n p_i \ln(d_i)}{100} \right), \quad (5.4)$$

donde d_i es el diámetro, p_i es el porcentaje en peso y n el número de puntos determinados experimentalmente. Los valores de d_i y p_i corresponden a la primer y tercer columna de las Tablas 2.1- 2.4. El diámetro d_n se calcula mediante la siguiente forma [5]:

$$d_n = \frac{d_{min}}{\sqrt{3}}, \quad (5.5)$$

donde $d_{min} = 2\mu m$, es el diámetro mínimo que se pudo medir con el método de Robinson.

Los diámetros efectivos estimados con las fórmulas 5.2- 5.4 se listan en la Tabla 5.5. Se observa en todos los casos que $d_a > d_g > d_h$. Los valores de d_a son mucho mayores al resto, esto se debe a la poca uniformidad que presentan las muestras de suelo. Una vez calculados los diámetros medios, se reemplazan en las fórmulas empíricas en lugar de d_{10} . Los resultados obtenidos se listan en las Tablas 5.6- 5.9 y se los grafican en las Figs. 5.5- 5.8.

Muestra	d_{10}	d_a	d_h	d_g
Muestra P1-30	0.028	10.533	1.9084	3.4815
Muestra P1-100	0.121	30.566	2.5089	6.3566
Muestra P1-200	0.061	55.073	2.3765	6.2840
Muestra P1-380	0.374	86.675	3.7604	16.635

Tabla 5.5. Diámetros medios estimados.

Fórmula	$K_s(d_a)$ [m/d]	$K_s(d_h)$ [m/d]	$K_s(d_g)$ [m/d]
Hazen	1.5390×10^{-1}	5.0524×10^{-3}	1.6815×10^{-2}
K-C	1.1940×10^{-1}	3.9199×10^{-3}	1.3046×10^{-2}
Breyer	1.7415×10^{-1}	4.3487×10^{-3}	1.6076×10^{-2}
Slitcher	5.5759×10^{-2}	1.8305×10^{-3}	6.0924×10^{-3}
Terzaghi	9.8141×10^{-2}	3.2218×10^{-3}	1.0723×10^{-2}
Valor medio	1.2027×10^{-1}	3.6747×10^{-3}	1.2551×10^{-2}

Tabla 5.6. Estimaciones de K_s en función de los 3 diámetros efectivos calculados para la Muestra P1-30

Fórmula	$K_s(d_a)$ [m/d]	$K_s(d_h)$ [m/d]	$K_s(d_g)$ [m/d]
Hazen	1.6193	1.0910×10^{-2}	7.0036×10^{-2}
K-C	2.0261	1.3651×10^{-2}	8.7610×10^{-2}
Breyer	1.4122	6.0537×10^{-3}	4.7123×10^{-2}
Slitcher	7.6734×10^{-1}	5.1698×10^{-3}	3.3186×10^{-2}
Terzaghi	1.3655	9.2000×10^{-3}	5.9057×10^{-2}
Valor medio	1.4382	8.9971×10^{-3}	5.9407×10^{-2}

Tabla 5.7. Estimaciones de K_s en función de los 3 diámetros efectivos calculados para Muestra P1-100

Fórmula	$K_s(d_a)$ [m/d]	$K_s(d_h)$ [m/d]	$K_s(d_g)$ [m/d]
Hazen	5.5243	1.0287×10^{-2}	7.1926×10^{-2}
K-C	7.8275	1.4576×10^{-2}	1.0191×10^{-1}
Breyer	5.3168	5.9956×10^{-3}	5.0369×10^{-2}
Slitcher	2.7923	5.1997×10^{-3}	3.6356×10^{-2}
Terzaghi	4.9835	9.2799×10^{-3}	6.4885×10^{-2}
Valor medio	5.2889	9.0676×10^{-3}	6.5090×10^{-2}

Tabla 5.8. Estimaciones de K_s en función de los 3 diámetros efectivos calculados para la Muestra P1-200

Fórmula	$K_s(d_a)$ [m/d]	$K_s(d_h)$ [m/d]	$K_s(d_g)$ [m/d]
Hazen	10.57783	1.9911×10^{-2}	1.8966×10^{-1}
K-C	8.4428	1.5891×10^{-2}	3.1100×10^{-1}
Breyer	11.3210	1.1549×10^{-2}	3.1653×10^{-1}
Slitcher	3.8974	7.3359×10^{-3}	1.4356×10^{-1}
Terzaghi	6.8654	1.2922×10^{-2}	2.5290×10^{-1}
Valor medio	8.2210	1.3522×10^{-2}	2.8273×10^{-1}

Tabla 5.9. Estimaciones de K_s en función de los 3 diámetros efectivos calculados para la Muestra P1-380

Los valores calculados de K_s utilizando d_a son los de mayor magnitud, llegando a ser 2 órdenes de magnitud mayor que las estimaciones de K_s utilizando d_h y d_g . Estos valores superan los valores máximos determinados por Carsel y Parrish para estas texturas, con excepción del caso de la muestra P1-30. Por otro lado, los valores estimados de K_s en función de d_h y d_g caen dentro del rango de admisibilidad de Carsel y Parrish con excepción de la muestra P1-100, cuyos valores de $K_s(d_g)$ superan la cota máxima de K_s admisible. En general, se cumple $K_s(d_g) > K_s(d_h)$ en un orden de magnitud.

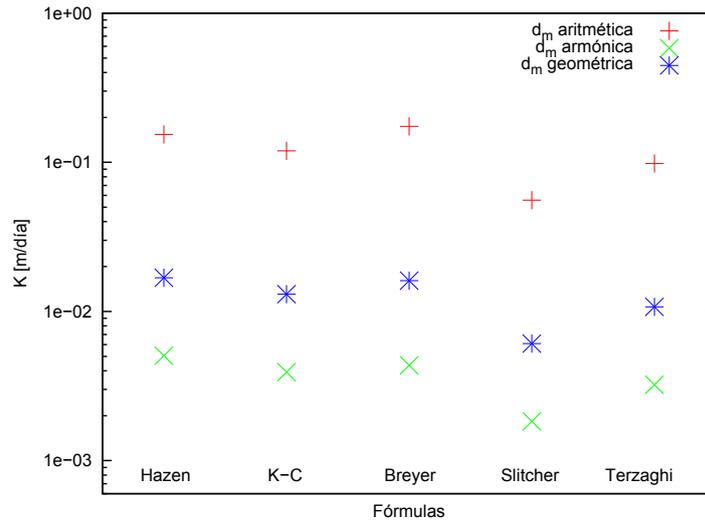


Figura 5.5. Valores estimados de K_s de la muestra P1-30 reemplazando el diámetro efectivo.

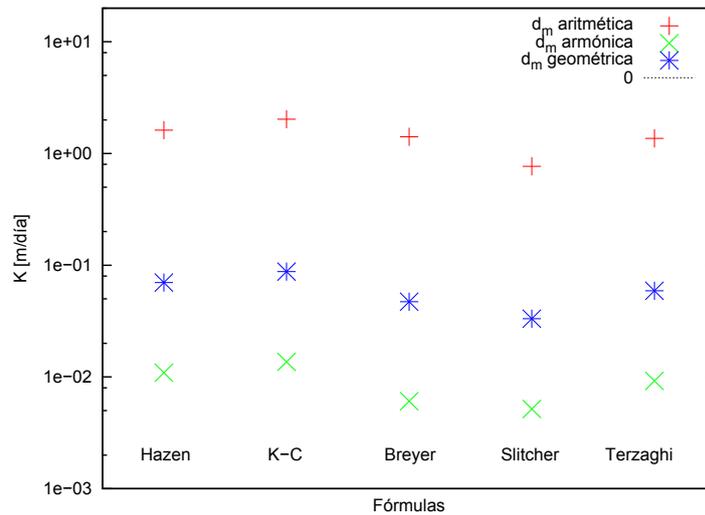


Figura 5.6. Valores estimados de K_s de la muestra P1-100 reemplazando el diámetro efectivo.

En virtud de estos resultados, la utilización de la media armónica de los diámetros en las fórmulas (4.5)-(4.9) pareciera ser la opción más apropiada para la estimación de K_s en suelos con gran porcentaje de material fino. Notar que en la media armónica el promedio se realiza mediante la inversa de los valores de los diámetros, lo que otorga mayor relevancia en el promedio a los granos más pequeños. Esta podría ser una justificación teórica para la utilización de la media armónica como diámetro efectivo en las fórmulas empíricas. Por otra parte se destaca que estos valores resultan comparables con las estimaciones realizadas en la sección anterior mediante un cambio del exponente en las fórmulas.

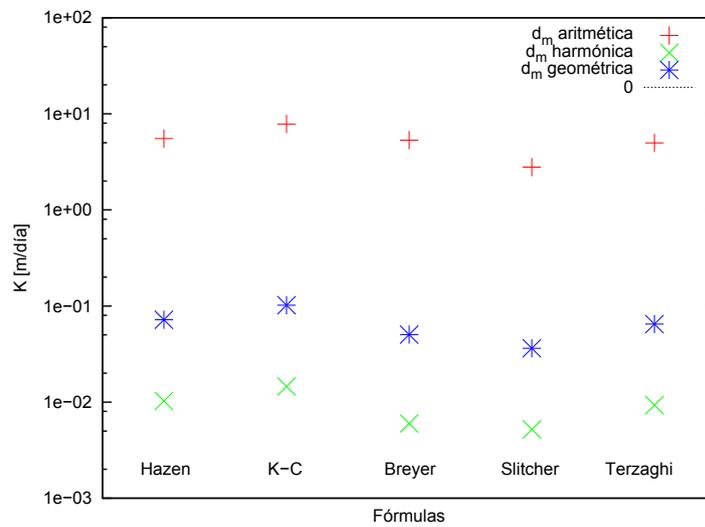


Figura 5.7. Valores estimados de K_s de la muestra P1-200 reemplazando el diámetro efectivo.

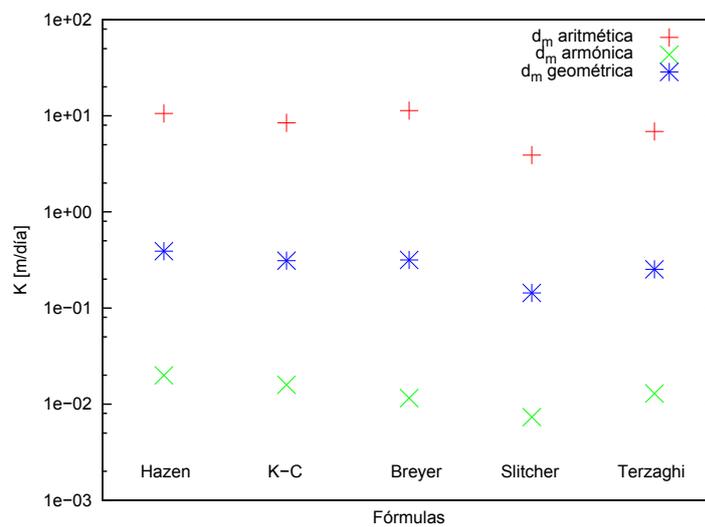


Figura 5.8. Valores estimados K_s de la muestra P1-380 reemplazando el diámetro efectivo.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo de Tesis se estimaron parámetros hidráulicos a partir de datos texturales y granulométricos medidos en laboratorio para suelos del observatorio AGGO. El análisis textural permitió clasificar los suelos en 3 categorías: Arcilloso, Arcillo-limoso y Franco-arcilloso. Esta clasificación nos permitió seleccionar valores de referencia para las curvas de $\theta(h)$ y $K(h)$ representativos de los suelos.

En cuanto a la determinación de la conductividad hidráulica saturada K_s , se utilizaron 5 fórmulas empíricas basadas en el diámetro de los granos. Las estimaciones obtenidas con la metodología clásica no fueron satisfactorias ya que las muestras de suelo contienen un gran porcentaje de arcilla (material fino) y son poco uniformes.

Ante estos resultados se propuso como alternativa la modificación de los exponentes y del diámetro efectivo de las fórmulas empíricas. Estas modificaciones arrojaron valores comparables cuando se utiliza un coeficiente de 1.67 o un diámetro efectivo calculado mediante la media armónica de los diámetros. La utilización de la media armónica para el cálculo del diámetro efectivo resulta razonable para suelos con alto contenido de material fino. En base a estos resultados se recomienda la utilización de los siguiente valores de K_s [m/día]: 3.6747×10^{-3} para la muestra P1-30, 8.9971×10^{-3} para la muestra P2-100, 9.0676×10^{-3} para la muestra P1-200 y 1.3522×10^{-2} para la muestra P1-380.

El análisis presentado en este trabajo permitió realizar una primera caracterización hidráulica de los suelos del observatorio AGGO. Una de las características más sobresalientes es el alto contenido de material fino de los suelos, lo que dificultó la estimación de los parámetros mediante las fórmulas clásicas. Este trabajo sienta las bases para trabajos futuros y propone valores de los parámetros hidráulicos que deben ser contrastados con otras técnicas.

Agradecimientos

Deseo expresar mi gratitud a mis directores, los Doctores Luis Guarracino y Leonardo Bruno Monachesi, por la dedicación que me brindaron y por su paciencia. Al Director Científico de AGGO Dr. Claudio Brunini por financiar los análisis de laboratorio sin los cuales esta Tesis no se podría haber realizado. Al laboratorio IGS-CISAUA, en particular al Licenciado Mario Da Silva quien realizó los ensayos en laboratorio. A mi novia Gabriela por brindarme su amor y paciencia. Y en especial a mi familia que me apoyaron y acompañaron siempre.

Bibliografía

- [1] Bear, J. 1972. *Dynamics of Fluid in Porous Media*, Elsevier, New York.
- [2] Brooks, R.H. and Corey, A.T. 1964. *Hydraulic Properties of Porous Media*. Hydrology Paper n 3, Civil Engineering Dep. Colorado State Univ., Fort Collins, Colo.
- [3] Carman, P. C. 1937. *Fluid Flow Through Granular Beds*, Transactions of the Institute of Chemical Engineering, Vol. 15, pp. 150–166.
- [4] Carsel, R. F., and Parrish, R.S. 1988. *Developing Joint Probability Distributions of Soil Water Retention Characteristics*, Water Resour. Res., Vol. 24, pp. 755 – 769.
- [5] Chapuis, R. P. and Légaré, P. 1992. *A Simple Method for Determining the Surface Area of Fine Aggregates and Fillers in Bituminous Mixtures*, in: *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance*. ASTM, Philadelphia, ASTM STP, Vol. 1147, pp. 177–186.
- [6] Fredlund, M.D. and Fredlund, D.G. and Wilson, G.W. 2000. *An Equation to Represent Grain-Size Distribution*. NRC Research Press website.
- [7] Galehouse, J.S. 1971. *Sedimentation Analysis. Procedures in Sedimentary Petrology*. Wiley-Interscience, pp 69-94.
- [8] Garcia-Bengochea, I. and Lovell, C.W. 1981. *Correlative Measurements of Pore Size Distribution and Permeability in Soils*. Permeability and Ground Water Contaminant Transport. ASTM STP, Vol. 746. pp. 137-150.
- [9] Hazen, Allen. 1892. *Some Physical Properties of Sands and Gravels*. Mass. State Board of Health, Ann. Rept.
- [10] Krumbein, W. and Pettijohn F. 1938. *Manual of Sedimentary Petrology*. Appleton-Century-Crofts Ed., pag. 549.
- [11] Odong, J. 2008. *Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity Based on Grain-Size Analysis*. J. Am. Sci., Vol. 3, pp. 1–6.
- [12] Richards, L. 1931. *Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums*. Physics, Vol 1, pp. 318-333.
- [13] Rawls, W. J. and D. L. Brakensiek. 1985. *Prediction of Soil Water Properties for Hydrologic Modeling*. Proceedings, Water-shed Management in the Eighties, 293-299 pp. American Society of Civil Engineers, New York.

- [14] Sheperd, R. G. 1989. Correlations of Permeability and Grain Size. *Ground Water*, Vol. 27, No 5.
- [15] Svensson, A. 2014. Estimation of Hydraulic Conductivity from Grain size Analyses. Master of Science Thesis in the Master's Programme Geo and Water Engineering.
- [16] Terzaghi, K. and Peck, R. B. 1964. *Soil Mechanics in Engineering Practise*. Wiley, New York.
- [17] U.S. Department of Agriculture. 1951. *Soil Survey Manual*, U.S. Dep. Agric. Handbk., Vol. 18, pp. 503.
- [18] van Genuchten, M. T. 1980. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, Vol. 9(3), pp. 365-372.