

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PANAMÁ

Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas

Estimación de las distribuciones del tamaño de partícula del suelo a partir de mediciones de hidrómetro

José Ulises Jiménez, MSc.

Alexandra González

Lunes 11 de mayo de 2020



Resumen

Se presenta el uso de la función `texture()` del paquete R *envalysis 0.4* (Steinmetz 2020). La función `texture()` facilita la estimación de las distribuciones del tamaño de partícula del suelo a partir de mediciones provenientes de ensayos mediante el método del hidrómetro (D422-63 2007). Esta obra está sujeta a la Licencia Reconocimiento-Compartir Igual 3.0 España de Creative Commons.



Índice

1. Introducción	3
1.1. Objetivo	3
1.2. Método del hidrómetro	4
2. Paquete <i>envalysis</i>	5
3. Análisis de datos	6
3.1. Base de datos	7
3.2. Las salidas	8
4. Clasificar datos de textura de suelo: USDA	12
4.1. Obtener la clase de suelo	12
4.2. Obtener el triángulo de textura	14
5. Trabajando con el código	15
6. Acerca de R	18
6.1. Créditos y Licencia	18

Índice de figuras

1. Método del hidrómetro.	4
2. Distribución del tamaño de partículas finas.	10
3. Triángulo de textura de suelo.	15
4. Distribución del tamaño de partículas finas.	17

1. Introducción

El presente texto trata sobre el análisis de datos provenientes de ensayos de suelo por el método del hidrómetro para determinar las texturas con respecto a la clasificación USDA. Un primer aspecto del análisis de datos granulométricos de suelo usando herramientas informáticas creadas en *R* se presentó en el documento *Funciones de R para graficar, clasificar y explorar los datos de textura del suelo* (Jiménez 2019). Allí se explicó el uso del paquete de *R soiltexture* (Moeys 2018). El motivo de realizar estos materiales educativos, es el de dar mayor visibilidad a las técnicas informáticas libres y gratuitas que son útiles en las tareas que realizan nuestros estudiantes, técnicos, docentes e investigadores en ingeniería.

Vamos a comenzar puntualizando que generalmente un suelo consiste en partículas, agua y aire (Verruijt 2017). El contenido de agua y aire es una condición que cambia fácilmente; los suelos pueden estar perfectamente secos (sin contenido de agua) o completamente saturados (sin contenido de aire) o parcialmente saturados (con aire y agua presentes). Por otro lado, la distribución del tamaño de partículas en principio no cambia en un punto dado; mientras que sí puede variar considerablemente de un punto a otro (Scott 2013).

A la distribución del tamaño de partículas y el porcentaje en que se encuentran en un suelo se conoce como textura; y es uno de los parámetros más importantes dentro de la física de suelo en ámbitos agronómicos e ingenieriles (González, Coronado y Acosta 2007). Esta propiedad es relacionada directa e indirectamente con la distribución de los poros, de aquí, que la misma puede también relacionarse con la aireación, la retención de humedad, la retención de nutrientes, la erosionabilidad, entre otras (Gisbert Blanquer, Ibañez Asensio y Moreno Ramón 2010). Dicho lo anterior, la textura de suelo puede tomarse como un indicador para evaluar de la calidad de este recurso (Bautista-Cruz y col. 2004).

El análisis del tamaño de partículas es ampliamente utilizado en la clasificación de suelos. Los datos obtenidos de las curvas de distribución del tamaño de partículas se utilizan para determinar la idoneidad del suelo para la construcción de carreteras, edificaciones, etc (Morales González 2018) y en el ámbito agrícola, para el manejo y planificación del uso de suelo, y el mejoramiento del rendimiento del cultivo (Villareal 2018).

Los datos que se utilizan en este manual provienen de ensayos de suelo verídicos realizados con el hidrómetro “ASTM Soil Hydrometer 152H”, dentro de las actividades del Proyecto IOMA 17-006, de la tesis “Modelación de infiltración y caracterización de textura de suelo en la subcuenca del Río Estibaná”.

1.1. Objetivo

Presentar un conjunto de herramientas informáticas libres y gratis para la estimación de las distribuciones del tamaño de partícula del suelo a partir de mediciones de hidrómetro que pueden ser útiles para los trabajos que realizan estudiantes, técnicos, docentes e investigadores de la Universidad Tecnológica de Panamá.

1.2. Método del hidrómetro

El método del hidrómetro se fundamenta en la determinación cuantitativa en porcentaje de la distribución del tamaño de las partículas de las fracciones finas presentes en los suelos que pasan el tamiz N° 200, o sea, partículas de arena muy fina (0.005 mm a 0.075 mm), limo (0.002 mm a 0.005 mm) y arcilla (menor a 0.002 mm) (Aguilar 2013).



Figura 1. Método del hidrómetro.

Este método se apoya en la Ley de Stokes, que se refiere a la fuerza de fricción experimentada por objetos esféricos moviéndose en el seno de un fluido viscoso en un régimen laminar de bajos números de Reynolds. En general, la ley de Stokes es válida en el movimiento de partículas esféricas pequeñas moviéndose a velocidades bajas (González, Coronado y Acosta 2007). A continuación, se describe brevemente en que consiste el método del hidrómetro.

El hidrómetro “ASTM Soil Hydrometer 152H” es un instrumento que se utiliza para medir la densidad relativa de los líquidos; el mismo, está construido de vidrio y consiste en un cilindro hueco con un bulbo pesado. En uno de sus extremos está graduado en unidades de densidad g L^{-1} de -0.5 a 60 con base en la escala de Bouyoucos y su función es hacer que flote verticalmente el bulbo (Bouyoucos 1927).

El análisis granulométrico por el método del hidrómetro comienza con la preparación de las muestras. Primero, se secan las muestras de suelo por 24 horas a 110°C . Luego, con la ayuda de un mortero y pilón, se golpea suavemente el suelo para eliminar los terrones. Después, se pasa por el tamiz N° 200, hasta alcanzar 50 g de cada muestra (Aguilar 2013).

Se prepara una solución de Hexametáfosfato de Sodio al 4% (se disuelven 50 g $(\text{NaPO}_3)_6$ en 1250 mL de agua destilada). La solución preparada alcanza para el ensayo de 10 muestras de suelo de 50 g. A cada muestra tamizada se le añade una solución de $(\text{NaPO}_3)_6$ al 4% como dispersante químico y se dejan reposar por un período de 24 horas (Maldonado Paucar 2016). Después, las muestras se colocan en un recipiente con agitador mecánico por un 1 minuto. El contenido mezclado se coloca en una probeta y se le agrega agua destilada hasta aforar 1000 mL (Aguilar 2013).

Tapando con la mano la abertura de la probeta, se agita la solución volteando el cilindro al revés 30 veces durante 1 minuto, hasta alcanzar una mezcla uniforme, y justamente al

terminar de agitar, se pone en marcha el cronómetro al introducir suavemente el hidrómetro en la muestra en suspensión (Aguilar 2013). El cilindro de sedimentación debe colocarse en una mesa donde pueda permanecer tranquilo durante las mediciones (D422-63 2007).

Se toman las lecturas de densidad para cada intervalo establecido (2, 5, 15, 30, 60, 120, 240 y 360 minutos) (D422-63 2007). En cualquier caso, se debe registrarse el tiempo exacto de lectura. Tras cada lectura, el hidrómetro se retira y coloca en una probeta con agua destilada para evitar que el material en suspensión se adhiriera al bulbo. Los hidrómetros están graduados para ser leídos en la parte inferior del menisco. Sin embargo, en suspensiones de suelo opacas, las lecturas deben tomarse en la parte superior del menisco (D422-63 2007).

La siguiente tabla puede servir como plantilla de muestra para registrar los datos.

Tabla 1. Plantilla de muestra para registrar los datos

sample	time	temperature	reading	blank
P05	0.6	30	25	2
P05	2	30	22	2
P05	4	30	20	2
P05	15	30	15	2
P05	30	30	13	2
P05	60	30	11	2
P05	240	30	7	2
P05	1440	30	5	2
P09	0.6	30	30	2
P09	2	30	27	2
P09	4	30	25	2
P09

2. Paquete *envalysis*

Steinmetz (2020) creó el paquete *envalysis* el cual es de libre uso y solamente requiere de atribuir el reconocimiento merecido al autor. Dentro de este paquete se encuentra la función `texture()` la cual calcula la distribución del tamaño de partícula y las clases de textura DIN y USDA a partir de una serie de lecturas de hidrómetro de acuerdo con el Análisis de textura del suelo ASTM D422-63.

El algoritmo para el cálculo de la distribución del tamaño de partículas a partir de lecturas registradas del hidrómetro implementado por Steinmetz (2020) sigue y cumple con las definiciones dadas por las directrices establecidas en la guía ASTM respectiva (D422-63 2007) y Bouyoucos (1927). El código con todos los cálculos se puede consultar en <https://github.com/zsteinmetz/envalysis/blob/master/R/texture.R>.

3. Análisis de datos

En este apartado exponemos los pasos para usar el paquete *envalysis* para analizar los datos del hidrómetro. Por conveniencia usamos *RStudio* (RStudio Team 2015), pero puede usar *R GUI* (Interface gráfica de usuario, GUI por sus siglas en inglés) (R Core Team 2020).

Si ya tienes instalado R y Rstudios, pues empecemos. Si todavía no lo ha hecho le recomiendo revisar como instalar la última versión de estos programas. Bien, instalaremos el paquete *envalysis*. Puede copiar y correr el siguiente comando en la consola o puede usar el menú de *RStudio*. Seleccione la pestaña *Packages*, hace click en *Install*, se abre una ventana, escribe *envalysis* y hace click en *Install*.

```
# instalamos el paquete
install.packages("envalysis", dependencies = TRUE)
```

Una vez instalado el paquete, lo llamamos con la función `library()`. Pero, primero ajustamos cual va a ser nuestra carpeta de trabajo con la función `setwd()`, la ruta a la carpeta va entre comillas. Seguido, podemos verificar cual es la carpeta de trabajo con con la función `getwd()`.

```
setwd("C:/RSuelo/Rhydrometer")
getwd()
## [1] "C:/RSuelo/Rhydrometer"

library(envalysis)
ls("package:envalysis")

## [1] "bisdom"          "calibration"    "CI"             "clayloam"
## [5] "din32645"        "icp"            "lod"            "loq"
## [9] "mselect"         "neitzel2003"    "rmse"           "se"
## [13] "signifig"        "sorption"       "texture"        "theme_publish"
```

Con la función `ls()` obtenemos un vector con los nombres de las funciones y datos dentro del paquete *envalysis*. Aquí, *clayloam* es una base de datos que muestra el formato en que tenemos que presentar nuestros propios datos; y `texture()` es la función para el análisis de esos datos. Vemos que *clayloam* esta en la posición 4 y la función `texture()` está en la posición 15.

Llamamos los datos *clayloam* con la función `data()` y la mostramos con la función `print()`. Con la función `View(clayloam)` se abre una pestaña en el cuadrante superior a su izquierda en *RStudio* que muestra los datos. Adicionalmente, mostramos los nombres de las variables usando la función `names()`.

```
data(clayloam)
print(clayloam)

##      time temperature reading blank
## 1  0.66           23       39      2
## 2  2.00           23       33      2
## 3  5.00           23       29      2
## 4 15.00           23       23      2
```

```
## 5 30.00      23      22      2
## 6 60.00      23      20      2
## 7 180.00     23      18      2

names(clayloam)
## [1] "time"      "temperature" "reading"      "blank"
```

En la función `texture`, los argumentos son:

```
texture(reading, blank, time, temperature, data, conc = 50,
Gs = 2.65, hydrometer = "auto", model = "auto", plot = F, ... )
```

- a) `reading`: (lectura) es un vector numérico de valores de datos que proporciona las lecturas del hidrómetro en la parte inferior del menisco.
- b) `data`: (base de datos) los datos contienen las variables en la fórmula:
`reading ~ blank + time + temperature.`
- c) `blank`: (blanco) es un vector numérico que contiene las lecturas en blanco tomadas en 5 g L^{-1} solución de Hexametáfosfato de Sodio (corrección compuesta).
- d) `time`: (tiempo) es un vector numérico que contiene el tiempo transcurrido desde el comienzo de la medición en minutos.
- e) `temperature`: (temperatura) es un vector entero que contiene la temperatura medida.
- f) `conc`: es la concentración de la solución del suelo, el valor predeterminado es 50 g L^{-1} como se propone en la directriz ASTM.
- g) `Gs`: es la gravedad específica de la suspensión.
- h) `hydrometer`: (hidrómetro) es una cadena de caracteres que especifica el hidrómetro utilizado; los valores aceptados son "auto" para detección automática (predeterminado), "151H" y "152H".
- i) `model`: (modelo) la cadena se pasa a `drm` (Una función de ajuste del modelo general para el análisis de los datos de concentración/ dosis/ efecto temporal /respuesta.), "auto" elige el mejor modelo de ajuste automáticamente.
- j) `plot`: (gráfica) es un valor lógico, si es `FALSE` no se grafica (predeterminado), si es `TRUE`, se grafica la distribución del tamaño de partícula.

3.1. Base de datos

Como ya conocemos la forma que debe tener la base de datos del hidrómetro para el análisis granulométrico, podemos crear nuestra propia base de dato. La base de datos la creamos en *Excel* con las variables: *sample*, *time*, *temperature*, *reading* y *blank*. El archivo se guarda en `.csv`.

Llamamos la base de dato con la función `read.csv()` y creamos un objeto con un nombre arbitrario (`datos_df`). Especifique la ruta de donde se encuentre su base de datos junto con el nombre y extensión, si es que no se encuentra en la carpeta de trabajo, esto va entre

comillas. Preste atención a los demás argumentos dentro de la función `read.csv()`, como `header` (encabezado de columnas) y `sep` (símbolo que separa las columnas).

```
datos_df <- read.csv("data_hydrometer.csv", header = TRUE, sep = ";")
```

Revisamos los datos con las funciones `str()`, `head()` y `tail()`. Debe aparecer `datos_df` en el *Global Environment* de *RStudio* como un objeto tipo `data.frame`, con 5 variables y 120 observaciones.

```
str(datos_df)
## 'data.frame': 120 obs. of  5 variables:
## $ sample      : chr  "P05" "P05" "P05" "P05" ...
## $ time        : num  0.6 2 4 15 30 60 240 1440 0.6 2 ...
## $ temperature: int   30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 ...
## $ reading     : int   25 22 20 15 13 11 7 5 30 27 ...
## $ blank       : int    2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 ...

head(datos_df)
##   sample time temperature reading blank
## 1    P05  0.6             30        25     2
## 2    P05  2.0             30        22     2
## 3    P05  4.0             30        20     2
## 4    P05 15.0             30        15     2
## 5    P05 30.0             30        13     2
## 6    P05 60.0             30         11     2

tail(datos_df)
##   sample time temperature reading blank
## 115   P53    4             30        23     2
## 116   P53   15             30        20     2
## 117   P53   30             30        17     2
## 118   P53   60             30        14     2
## 119   P53  240             30         10     2
## 120   P53 1440             30          6     2
```

3.2. Las salidas

La función `texture()` de *envalysis* devuelve un objeto de la clase `"texture"`. Un objeto de la clase `"texture"` es una lista que contiene los siguientes componentes:

- **meta:** metadatos.
- **distribution:** datos que proporciona la distribución del tamaño de partícula.
- **model:** información del modelo sobre el modelo `drm` ajustado
- **din:** principales clases de textura DIN.
- **usda:** principales clases de textura del USDA.

Extraemos de `datos_df`, los datos de la muestra "P05" con la función `subset()` y los nombramos `ejemplo_df`.

```
ejemplo_df <- subset(datos_df, datos_df$sample=="P05")
```

Corremos la función `texture` para la data `ejemplo_df` y regresa la salida del análisis en la consola.

```
texture(reading ~ blank + time + temperature, ejemplo_df)
## Soil particle estimation according to ASTM D422-63
## Hydrometer model: 152H
## Specific gravity (Gs) = 2.65   Soil extract: 50 g/L
##
## Particle size distribution:
## Particle size Percent passing
##      0.05420      0.536
##      0.03029      0.476
##      0.02170      0.436
##      0.01156      0.336
##      0.00827      0.296
##      0.00592      0.256
##      0.00303      0.176
##      0.00125      0.136
##
## Fitted with Weibull (type 1) (W1.4)
##
## Soil texture classes (DIN 4022):
##           Clay   Silt   Sand
## Estimate  0.15114 0.40024 0.44861
## Std. Error 0.00369 0.00918 0.00549
##
## Soil texture classes (USDA):
##           Clay   Silt   Sand
## Estimate  0.15114 0.37847 0.47039
## Std. Error 0.00369 0.00793 0.00423
```

Puede crear un objeto nombrando la salida. Por ejemplo:

```
soil_P05 <- texture(reading ~ blank + time + temperature, ejemplo_df)
```

Cuando se realiza el análisis del hidrómetro, se debe hacer un gráfico de los resultados de la prueba, trazando los diámetros de las partículas en una escala logarítmica como la abscisa y los porcentajes más pequeños que los diámetros correspondientes a una escala aritmética como la ordenada. La función `texture()` también lo hace introduciendo el argumento `plot=TRUE`.

```
soil_P05 <- texture(reading ~ blank + time + temperature,
                  ejemplo_df, plot=TRUE)
```

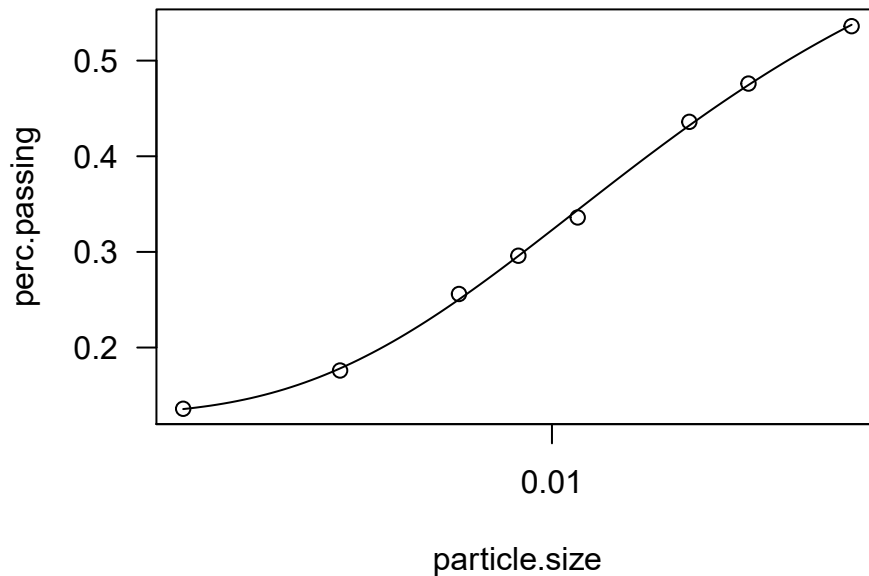


Figura 2. Distribución del tamaño de partículas finas.

También, se puede aplicar la función a todas las muestras a la vez. Para esto hay que instalar el paquete *purrr* (Henry y Wickham 2020). Del paquete *purrr* utilizaremos las funciones `map()` y `map_dfr()`. La función u operador `%>%` indica que el resultado de la instrucción anterior se usa para la instrucción que sigue a continuación. La función `split()` divide el `data.frame` `datos_df` por la identificación de la muestra (`sample`) en pequeños `data.frame`. Luego, `map()` aplica la función a cada uno de estos `data.frame` y la salida se presenta en la consola. Por motivos de espacio hemos colocado la salida en el Anexo A.

```
library(purrr)
```

```
datos_df %>%
split(.$sample) %>%
map(~ texture(reading ~ blank + time + temperature, data = .x))
```

La salida se puede guardar en un archivo `.txt` usando a la función `sink()`. Observe que se usa dos veces, en la primera se nombra el archivo sin olvidar la extensión, colocando todo entre comillas; y la segunda es de cierre de la instrucción. El documento aparecerá en la carpeta de trabajo.

```
# Para guardar todas las salidas
sink("soiltest1.txt")
datos_df %>%
split(.$sample) %>%
```

```
map(~ texture(reading ~ blank + time + temperature,
  data = .x))
sink()
```

Para guardar los resultados, específicamente el de porcentajes de arena, limo y arcilla de la clasificación USDA podemos ejecutar las siguientes instrucciones.

```
datos_df %>%
split(.$sample) %>%
map(~ texture(reading ~ blank + time + temperature, data = .x)) %>%
map_dfr(~ as.data.frame(t(as.matrix(round(.x[[5]][1,1:3],4)*100))))

##      Clay  Silt  Sand
## 1  15.11 37.85 47.04
## 2  26.11 37.00 36.89
## 3  39.56 42.97 17.47
## 4   7.32 28.31 64.37
## 5  28.09 38.85 33.06
## 6  17.15 44.32 38.53
## 7  21.82 29.37 48.81
## 8  25.04 27.86 47.10
## 9  22.07 33.66 44.28
## 10 34.38 30.46 35.16
## 11 15.07 34.40 50.52
## 12 23.32 42.11 34.57
## 13 11.90 25.30 62.80
## 14 37.06 32.51 30.43
## 15 18.94 39.87 41.19
```

Para guardar la salida en un documento `.txt` usamos la función `sink()`.

```
sink("soiltest2.txt")
datos_df %>%
split(.$sample) %>%
map(~ texture(reading ~ blank + time + temperature, data = .x)) %>%
map_dfr(~ as.data.frame(t(as.matrix(round(.x[[5]][1,1:3],4)*100))))
sink()
```

Para guardar los gráficos de distribución de partículas.

```
pdf("graphics.pdf", paper = "letter")
par(mfrow = c(2, 2))
datos_df %>%
split(.$sample) %>%
map(~ texture(reading ~ blank + time + temperature, data = .x, plot=TRUE))
dev.off()
```

4. Clasificar datos de textura de suelo: USDA

4.1. Obtener la clase de suelo

Ahora queremos obtener las clases de textura de suelo según la clasificación USDA a partir de una base de datos con los porcentajes de arena, limo y arcilla. Primero, obtendremos la clase de suelo para un objeto lista tipo `+texture`, como el que guardamos con el nombre `soil_P05`. Tenemos que preparar los datos y convertirlos en un objeto tipo `data.frame`. Ubicamos y mostramos la línea de dato que necesitamos de la lista.

```
soil_P05[["usda"]][["Estimate",c("Clay", "Silt", "Sand")]  
##      Clay      Silt      Sand  
## 0.1511441 0.3784704 0.4703854
```

o lo que es lo mismo, usar las posiciones:

```
soil_P05[[5]][1,1:3]  
##      Clay      Silt      Sand  
## 0.1511441 0.3784704 0.4703854
```

Usaremos una función del paquete `soiltexture` que nos devuelve la clase de suelo como una abreviatura en inglés y también, una función creada que nos devuelve el nombre completo en español. Ambas funciones necesitan que los nombres de las variables estén en mayúscula (CLAY, SILT, SAND) y los datos en porcentaje.

Cada uno de los valores (en proporción decimal) se multiplica por 100, se transpone con `t()` y se convierte en un objeto tipo `data.frame` con la función `data.frame()`. El objeto lo creamos con un nombre arbitrario, `P05.tipo.suelo`. Luego, cambiamos los nombres de las variables a mayúsculas cerradas.

```
P05.tipo.usda <- data.frame(t(soil_P05$usda["Estimate",] * 100))  
names(P05.tipo.usda) <- toupper(names(P05.tipo.usda))
```

Ahora, para obtener la clase de suelo según USDA llamamos el paquete `soiltexture` y usamos la función `TT.points.in.classes()` y los argumentos son tres: el nombre del objeto con los datos, el sistema de clasificación y el tipo de salida. Más información sobre esta función la pueden encontrar en Moeys (2018).

```
library(soiltexture)  
TT.points.in.classes(P05.tipo.usda, class.sys = "USDA.TT", PiC.type = "t")  
## [1] "Lo"
```

Este código está escrito en Jiménez (2019). Se guardó como un archivo `verb+.Rdata+` y lo utilizamos aca. Llamamos el archivo con la función `attach()`. El archivo se llama `clasesuelo.Rdata` y tiene una única función, `clase.textura()`.

```
attach("clasesuelo.Rdata")  
clases.textura(P05.tipo.usda)  
## [1] "Franco"
```

Ahora, usaremos nuestro resultado con los datos de arena, limo y arcilla para las 15 muestras. Ese resultado se guardó como un archivo `.txt` con el nombre `soiltest2`. Lo llamamos con la función `read.table()`.

```
test2.tipo.usda <- read.table(file = "soiltest2.txt", header=TRUE)
```

Incluimos una variable con la etiqueta de la muestra.

```
test2.tipo.usda$sample <- unique(datos_df$sample)
```

Cambiamos sus nombres de variables a mayúsculas cerradas.

```
names(test2.tipo.usda) <- toupper(names(test2.tipo.usda))
```

Aplicamos la función `TT.points.in.classes()`

```
tex2.soil.usda <- TT.points.in.classes(test2.tipo.usda,
                                     class.sys = "USDA.TT", PiC.type = "t")
```

```
print(tex2.soil.usda)
```

```
## [1] "Lo"      "Lo"      "SiClLo" "SaLo"   "ClLo"   "Lo"     "Lo"     "Lo"
## [9] "Lo"      "ClLo"   "Lo"     "Lo"     "SaLo"   "ClLo"   "Lo"
```

El resultado es un vector de caracteres, de la misma longitud que el número de muestras de suelo, que contiene la abreviatura de la clase de textura a la que pertenece la muestra. En el caso de una muestra situada en el borde de dos clases, se devuelven las abreviaturas de las clases concatenadas (separadas por una coma).

Para usar la función `clase.textura()` para cada línea del `data.frame`, tenemos que usar las funciones `sapply()` y `split()`, de la siguiente forma:

```
tex2.suelo.usda <- sapply(split(test2.tipo.usda, test2.tipo.usda$SAMPLE),
                          FUN = clases.textura)
```

```
print(tex2.suelo.usda)
```

```
##                P05                P09
##            "Franco"            "Franco"
##                P15                P16
## "Franco limoso arcilloso"      "Franco arenoso"
##                P21                P24
##            "Franco arcilloso"      "Franco"
##                P25                P36
##            "Franco" "Franco arenoso arcilloso"
##                P37                P39
##            "Franco"      "Franco arcilloso"
##                P46                P49
##            "Franco"      "Franco"
##                P50                P51
##            "Franco arenoso"      "Franco arcilloso"
##                P53
##            "Franco"
```

El resultado es un vector de caracteres, de la misma longitud que el número de muestras de suelo, que contiene el nombre en español de la clase de textura a la que pertenece la muestra.

Por último, unimos los dos vectores de caracteres en un `data.frame`.

```
TEX.USDA <- data.frame(t(rbind(tex2.soil.usda, tex2.suelo.usda)))
print(TEX.USDA)

##      tex2.soil.usda      tex2.suelo.usda
## P05              Lo              Franco
## P09              Lo              Franco
## P15      SiClLo  Franco limoso arcilloso
## P16              SaLo              Franco arenoso
## P21              ClLo              Franco arcilloso
## P24              Lo              Franco
## P25              Lo              Franco
## P36              Lo Franco arenoso arcilloso
## P37              Lo              Franco
## P39              ClLo              Franco arcilloso
## P46              Lo              Franco
## P49              Lo              Franco
## P50              SaLo              Franco arenoso
## P51              ClLo              Franco arcilloso
## P53              Lo              Franco
```

4.2. Obtener el triángulo de textura

En este apartado graficamos los datos de `test2.tipo.usda` en un triángulo con la clasificación USDA. Le sugerimos revisar Moeys (2018) que explica el uso del paquete `soiltexture`. Las funciones y argumentos que se utilizan a continuación ya han sido presentados en el manual Funciones de R para graficar, clasificar y explorar los datos de textura del suelo (Jiménez 2019).

```
geo <- TT.plot(
  class.sys = "USDA.TT",
  tri.data = test2.tipo.usda,
  lang = "es2", grid.show = FALSE,
  class.p.bg.col = c("aquamarine", "aquamarine2",
    "aquamarine3", "cornsilk", "burlywood1",
    "burlywood3", "darkseagreen1", "darkseagreen3",
    "darkolivegreen1", "darkolivegreen2", "deepskyblue",
    "deepskyblue4"),
  lwd.axis = 2, class.line.col = "black",
  class.lab.col = "black", pch = 19,
  cex.lab = 1, cex.axis = 1, cex = 0.4, fg = "red")
```

```
TT.text(tri.data = test2.tipo.usda,
       geo = geo,
       labels = test2.tipo.usda$SAMPLE,
       cex = 0.8, col = "grey20", pos = 3)
```

Se utiliza la función `TT.plot` para construir el gráfico y en el argumento `class.p.bg.col` colocamos como opción un vector con los nombres de los colores de la misma longitud que el número de clases (12 clases, 12 colores).

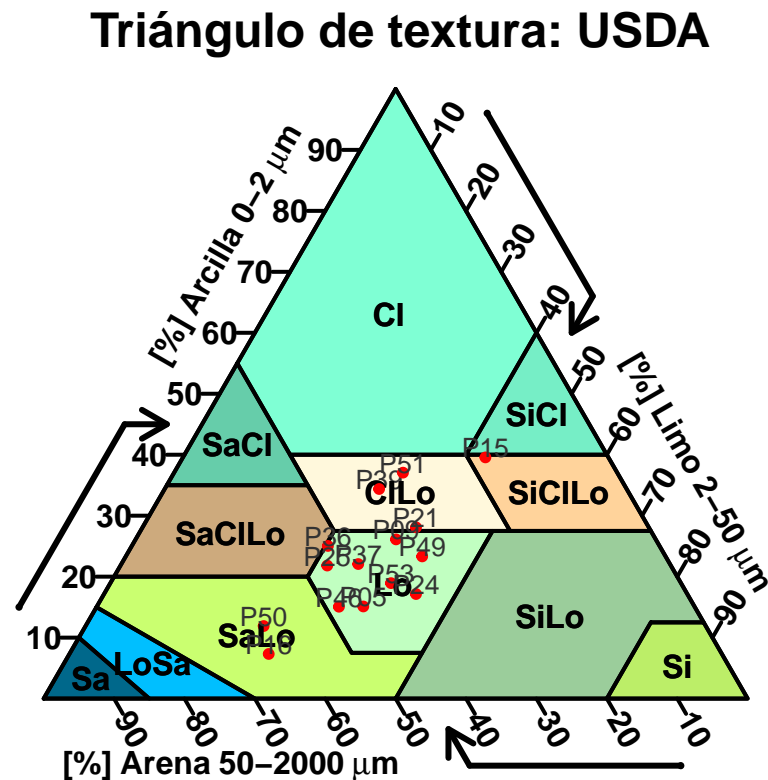


Figura 3. Triángulo de textura de suelo.

5. Trabajando con el código

Se ha tomado el código original de la función `texture()` y se le realizaron pequeñísimos cambios para adaptarlo a las necesidades propias, específicamente el cambio de idioma en las etiquetas de salida. El código modificado y los datos que se utilizan en los cálculos se guardaron en un archivo `.RDATA`.

En un fichero se copió el código original y se tradujo al español todos los caracteres o etiquetas asociados a la función `cat()`. Una vez hecho esto, se ejecuta en la consola y se crean en el *Global Environment* los objetos correspondientes a la función. Adicionalmente, se copiaron dos objetos que se usan en los cálculos: `"d422_ct"` (Valores del factor de corrección, alfa, para diferentes gravedades específicas de partículas del suelo) y `"d422_k"` (Valores de K para

usar en la ecuación para calcular el diámetro de partícula en el análisis del hidrómetro).

A continuación se muestra su uso:

```
load("hidrometro.RData")
library(drc)
```

Se requiere el paquete *drc* (Ritz y col. 2015); ya que `verb+texture()+` realiza análisis de regresión `logistic+texture()+`, primero con la función de log-logística de dos parámetros, `LL.2()`; y luego, compara con otras funciones (en total 20) y escoge la de mejor ajuste. La curva con mejor ajuste es trazada en la salida gráfica. La función `ls()` muestra un vector con los nombres de los objetos creados en el *Global Environment*, en este caso los que forman la función `texture()` de código modificado guardado como `hidrometro.RDATA`.

```
ls()
## [1] "d422_ct"          "d422_k"          "plot.texture"
## [4] "print.texture"   "texture"         "texture.default"
## [7] "texture.formula"
```

Llamamos los datos nuevamente, y tomamos la muestra "P05" otra vez para el ejemplo.

```
datos_df <- read.csv("data_hydrometer.csv", header = TRUE,
sep = ";")
ejemplo_df <- subset(datos_df, datos_df$sample=="P05")
```

Corremos `texture()`.

```
texture(reading ~ blank + time + temperature, ejemplo_df)
## Estimación del tamaño de partícula de acuerdo a ASTM D422-63
## Modelo de Hidrómetro: 152H
## Gravedad específica (Gs) = 2.65   Extracto de suelo: 50 g/L
##
## Distribución del tamaño de partícula:
## Tamaño de partícula Porcentaje que pasa
##          0.05420          0.536
##          0.03029          0.476
##          0.02170          0.436
##          0.01156          0.336
##          0.00827          0.296
##          0.00592          0.256
##          0.00303          0.176
##          0.00125          0.136
##
## Ajustada con Weibull (type 1) (W1.4)
##
## Clase de textura de suelo (USDA):
##          Arcilla   Limo   Arena
## Estimación  0.15114 0.37847 0.47039
```



```
## Error estándar 0.00369 0.00793 0.00423
```

Graficamos.

```
texture(reading ~ blank + time + temperature, ejemplo_df,  
plot = TRUE)  
abline(h=c(0.2,0.3,0.4,0.5), v= c(0.001, 0.01,0.1) , col="grey", lty = 2)
```

Curva granulométrica

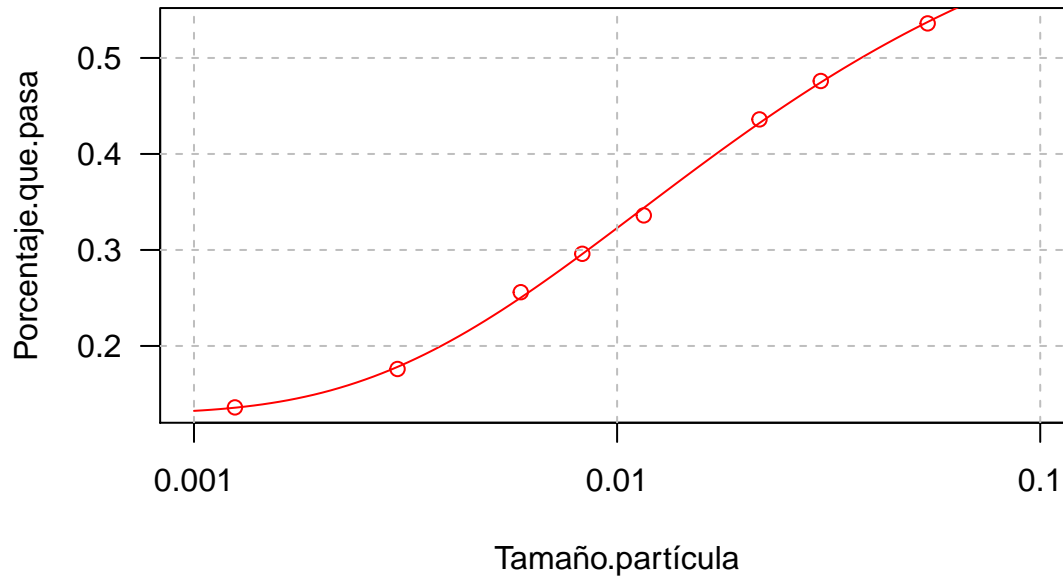


Figura 4. Distribución del tamaño de partículas finas.

6. Acerca de R

R es un conjunto integrado de funciones de software para manipulación de datos, cálculo y visualización gráfica. Este documento trata sobre funciones (y paquetes) escritas en R “lenguaje y entorno para la informática estadística”¹, y se ha generado con R version 4.0.0 (2020-04-24) (R Core Team 2020).

6.1. Créditos y Licencia

Este documento y los códigos fueron escritos en *Sweave*², *R*³ y \LaTeX ⁴ (The LaTeX3 project 2006). Esta obra está bajo una licencia de *Creative Commons* Reconocimiento - Compartir igual 3.0⁵.

En resumen, esto significa que Usted es libre de:

1. Compartir: copiar, distribuir y transmitir la obra;
2. Editar: adaptar el trabajo al contexto requerido.

En las siguientes condiciones:

1. Atribución: debe atribuir el trabajo de la manera especificada por el autor o licenciante (pero no de ninguna manera que sugiera que le respalden o su uso de la obra);
2. Compartir por igual: si modifica, transforma o se basa en este trabajo, puede distribuir el trabajo resultante solo bajo una licencia igual, similar o compatible.

Dado que este tipo de licencia es altamente permisiva, este documento se proporciona sin responsabilidades, ni garantías.

¹<http://www.r-project.org/>

²La función *Sweave* de R proporciona un marco flexible para mezclar texto y código R para la generación automática de documentos.

³R es un entorno y lenguaje de programación con un enfoque al análisis estadístico.

⁴ \LaTeX es un sistema de preparación de documentos para composición de texto de alta calidad

⁵Reconocimiento - Compartir igual (by-sa): se permite el uso comercial de la obra y de las posibles obras derivadas, siempre que su distribución se haga igual que la obra original.

Referencias

- [1] Jairo Aguilar. «Análisis granulométrico mediante el método del hidrómetro». En: *Mente & Materia* 4.1 (2013), págs. 29-29.
- [2] A Bautista-Cruz y col. *La calidad del suelo y sus indicadores*. 2004. URL: <http://www.%20revistaecosistemas.%20net/articulo.%20asp>.
- [3] George John Bouyoucos. «The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soils». En: *Soil Science* 23.5 (1927), págs. 343-354.
- [4] ASTM D422-63. «Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Technical standard)». En: *ASTM International, West Conshohocken, PA* (2007), pág. 8. URL: <http://www.astm.org/Standards/D422.htm>.
- [5] Juan Manuel Gisbert Blanquer, Sara Ibañez Asensio y Héctor Moreno Ramón. «La textura del suelo». En: (2010).
- [6] Hanoi Medina González, Jorge García Coronado y Daniel Núñez Acosta. «El método del hidrómetro: base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo». En: *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 16.3 (2007), págs. 19-24.
- [7] Lionel Henry y Hadley Wickham. *purrr: Functional Programming Tools*. R package version 0.3.4. 2020. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=purrr>.
- [8] José Ulises Jiménez. «Funciones de R para graficar, clasificar y explorar los datos de textura del suelo». En: (2019).
- [9] Alejandro David Maldonado Paucar. «Evaluación de diferentes dosis de hexametáfosfato de sodio (NaPO₃)₆, en la determinación de tres tipos texturales de suelo, mediante el método de bouyoucos.» B.S. thesis. Quito: UCE, 2016.
- [10] Julien Moeys. *soiltexture: Functions for Soil Texture Plot, Classification and Transformation*. R package version 1.5.1. 2018. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=soiltexture>.
- [11] Diego Alejandro Morales González. «Comparación entre el sistema pario y un procedimiento tradicional para obtener la granulometría en suelos finos». En: (2018).
- [12] R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2020. URL: <https://www.R-project.org/>.
- [13] C. Ritz y col. «Dose-Response Analysis Using R». En: *PLOS ONE* 10.e0146021 (12 2015). URL: <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0146021>.
- [14] RStudio Team. *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio, Inc. Boston, MA, 2015. URL: <http://www.rstudio.com/>.
- [15] Charles Robin Scott. *An introduction to soil mechanics and foundations*. Springer, 2013.
- [16] Zacharias Steinmetz. *envalysis: Miscellaneous Functions for Environmental Analyses*. R package version 0.4. 2020. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=envalysis>.

- [17] The LaTeX3 project. *The LaTeX3 project*. 2006. URL: <http://www.latex-project.org/>.
- [18] Arnold Verruijt. *An Introduction to Soil Mechanics*. Vol. 30. Springer, 2017.
- [19] J. E. Villareal. *Mapas de fertilidad como herramienta para zonificación de suelos en Panamá*. 2018.

ANEXO A

Salida de la estimación del tamaño de partícula de acuerdo a ASTM D422-63, para la base de datos evaluada (total 15 muestras)

1 \$P05
2 Soil particle estimation according to ASTM D422-63
3 Hydrometer model: 152H
4 Specific gravity (Gs) = 2.65 Soil extract: 50 g/L
5

6 Particle size distribution:
7 Particle size Percent passing
8 0.05420 0.536
9 0.03029 0.476
10 0.02170 0.436
11 0.01156 0.336
12 0.00827 0.296
13 0.00592 0.256
14 0.00303 0.176
15 0.00125 0.136
16

17 Fitted with Weibull (type 1) (W1.4)

18
19 Soil texture classes (DIN 4022):
20 Clay Silt Sand
21 Estimate 0.15114 0.40024 0.44861
22 Std. Error 0.00369 0.00918 0.00549
23

24 Soil texture classes (USDA):
25 Clay Silt Sand
26 Estimate 0.15114 0.37847 0.47039
27 Std. Error 0.00369 0.00793 0.00423
28

29 \$P09
30 Soil particle estimation according to ASTM D422-63
31 Hydrometer model: 152H
32 Specific gravity (Gs) = 2.65 Soil extract: 50 g/L
33

34 Particle size distribution:
35 Particle size Percent passing
36 0.05230 0.636
37 0.02927 0.576
38 0.02099 0.536
39 0.01113 0.456
40 0.00792 0.436
41 0.00571 0.376
42 0.00293 0.296
43 0.00122 0.216
44

45 Fitted with Log-logistic (ED50 as parameter) with lower limit at 0 (LL.3)

46
47 Soil texture classes (DIN 4022):
48 Clay Silt Sand
49 Estimate 0.26115 0.3918 0.34708
50 Std. Error 0.00554 0.0143 0.00881
51

52 Soil texture classes (USDA):
53 Clay Silt Sand
54 Estimate 0.26115 0.3700 0.3689
55 Std. Error 0.00554 0.0124 0.0069
56

57 \$P15
58 Soil particle estimation according to ASTM D422-63
59 Hydrometer model: 152H
60 Specific gravity (Gs) = 2.65 Soil extract: 50 g/L
61

62 Particle size distribution:
63 Particle size Percent passing
64 0.04869 0.816
65 0.02690 0.796
66 0.01949 0.736

67	0.01038	0.656
68	0.00745	0.616
69	0.00538	0.556
70	0.00280	0.436
71	0.00118	0.336

72
73 Fitted with Shifted Michaelis-Menten (MM.3)

74
75 Soil texture classes (DIN 4022):
76 Clay Silt Sand
77 Estimate 0.39561 0.4420 0.16240
78 Std. Error 0.00703 0.0164 0.00938

79
80 Soil texture classes (USDA):
81 Clay Silt Sand
82 Estimate 0.39561 0.4297 0.17472
83 Std. Error 0.00703 0.0155 0.00851

84
85 \$P16
86 Soil particle estimation according to ASTM D422-63
87 Hydrometer model: 152H
88 Specific gravity (Gs) = 2.65 Soil extract: 50 g/L

89
90 Particle size distribution:
91 Particle size Percent passing
92 0.05746 0.356
93 0.03167 0.336
94 0.02279 0.276
95 0.01198 0.216
96 0.00861 0.156
97 0.00612 0.136
98 0.00309 0.096
99 0.00128 0.056

100
101 Fitted with Generalized log-logistic (ED50 as parameter) (LL.5)

102
103 Soil texture classes (DIN 4022):
104 Clay Silt Sand
105 Estimate 0.07316 0.2835 0.643
106 Std. Error 0.00809 0.0201 0.012

107
108 Soil texture classes (USDA):
109 Clay Silt Sand
110 Estimate 0.07316 0.2831 0.6437
111 Std. Error 0.00809 0.0197 0.0116

112
113 \$P21
114 Soil particle estimation according to ASTM D422-63
115 Hydrometer model: 152H
116 Specific gravity (Gs) = 2.65 Soil extract: 50 g/L

117
118 Particle size distribution:
119 Particle size Percent passing
120 0.05152 0.676
121 0.02864 0.636
122 0.02070 0.576
123 0.01091 0.516
124 0.00777 0.496
125 0.00564 0.416
126 0.00291 0.316
127 0.00122 0.236

128
129 Fitted with Shifted Michaelis-Menten (MM.3)

130
131 Soil texture classes (DIN 4022):
132 Clay Silt Sand

133 Estimate 0.2809 0.4008 0.3184
 134 Std. Error 0.0107 0.0246 0.0139
 135
 136 Soil texture classes (USDA):
 137 Clay Silt Sand
 138 Estimate 0.2809 0.3885 0.3306
 139 Std. Error 0.0107 0.0232 0.0125
 140
 141 \$P24
 142 Soil particle estimation according to ASTM D422-63
 143 Hydrometer model: 152H
 144 Specific gravity (Gs) = 2.65 Soil extract: 50 g/L
 145
 146 Particle size distribution:
 147 Particle size Percent passing
 148 0.05268 0.616
 149 0.02927 0.576
 150 0.02099 0.536
 151 0.01113 0.456
 152 0.00798 0.416
 153 0.00575 0.356
 154 0.00296 0.256
 155 0.00127 0.076
 156
 157 Fitted with Log-logistic (ED50 as parameter) (LL.4)
 158
 159 Soil texture classes (DIN 4022):
 160 Clay Silt Sand
 161 Estimate 0.17151 0.460 0.36880
 162 Std. Error 0.00496 0.012 0.00702
 163
 164 Soil texture classes (USDA):
 165 Clay Silt Sand
 166 Estimate 0.17151 0.4432 0.38532
 167 Std. Error 0.00496 0.0106 0.00568
 168
 169 \$P25
 170 Soil particle estimation according to ASTM D422-63
 171 Hydrometer model: 152H
 172 Specific gravity (Gs) = 2.65 Soil extract: 50 g/L
 173
 174 Particle size distribution:
 175 Particle size Percent passing
 176 0.05457 0.516
 177 0.03009 0.496
 178 0.02128 0.496
 179 0.01128 0.416
 180 0.00808 0.376
 181 0.00578 0.336
 182 0.00296 0.256
 183 0.00124 0.176
 184
 185 Fitted with Generalized log-logistic (ED50 as parameter) (LL.5)
 186
 187 Soil texture classes (DIN 4022):
 188 Clay Silt Sand
 189 Estimate 0.21820 0.2945 0.48733
 190 Std. Error 0.00536 0.0136 0.00825
 191
 192 Soil texture classes (USDA):
 193 Clay Silt Sand
 194 Estimate 0.21820 0.2937 0.48812
 195 Std. Error 0.00536 0.0126 0.00719
 196
 197 \$P36
 198 Soil particle estimation according to ASTM D422-63

199 Hydrometer model: 152H
200 Specific gravity (Gs) = 2.65 Soil extract: 50 g/L
201

202 Particle size distribution:
203 Particle size Percent passing
204 0.05420 0.536
205 0.03009 0.496
206 0.02142 0.476
207 0.01121 0.436
208 0.00808 0.376
209 0.00578 0.336
210 0.00294 0.276
211 0.00122 0.236
212

213 Fitted with Brain-Cousens (hormesis) (BC.5)
214

215 Soil texture classes (DIN 4022):
216 Clay Silt Sand
217 Estimate 0.25043 0.2956 0.454
218 Std. Error 0.00686 0.0199 0.013
219

220 Soil texture classes (USDA):
221 Clay Silt Sand
222 Estimate 0.25043 0.2786 0.47099
223 Std. Error 0.00686 0.0149 0.00801
224

225 \$P37

226 Soil particle estimation according to ASTM D422-63
227 Hydrometer model: 152H
228 Specific gravity (Gs) = 2.65 Soil extract: 50 g/L
229

230 Particle size distribution:
231 Particle size Percent passing
232 0.05382 0.556
233 0.02969 0.536
234 0.02156 0.456
235 0.01142 0.376
236 0.00818 0.336
237 0.00582 0.316
238 0.00298 0.236
239 0.00123 0.196
240

241 Fitted with Generalized log-logistic (ED50 as parameter) (LL.5)
242

243 Soil texture classes (DIN 4022):
244 Clay Silt Sand
245 Estimate 0.22069 0.3367 0.4426
246 Std. Error 0.00927 0.0233 0.0141
247

248 Soil texture classes (USDA):
249 Clay Silt Sand
250 Estimate 0.22069 0.3366 0.4428
251 Std. Error 0.00927 0.0231 0.0138
252

253 \$P39

254 Soil particle estimation according to ASTM D422-63
255 Hydrometer model: 152H
256 Specific gravity (Gs) = 2.65 Soil extract: 50 g/L
257

258 Particle size distribution:
259 Particle size Percent passing
260 0.05191 0.656
261 0.02907 0.596
262 0.02070 0.576
263 0.01091 0.516
264 0.00777 0.496

265 0.00560 0.436
266 0.00286 0.376
267 0.00119 0.296
268

269 Fitted with Weibull (type 1) with lower limit at 0 and upper limit at 1 (W1.2)

270
271 Soil texture classes (DIN 4022):
272 Clay Silt Sand
273 Estimate 0.34382 0.3224 0.33374
274 Std. Error 0.00465 0.0102 0.00555
275

276 Soil texture classes (USDA):
277 Clay Silt Sand
278 Estimate 0.34382 0.30458 0.35160
279 Std. Error 0.00465 0.00993 0.00528
280

281 \$P46
282 Soil particle estimation according to ASTM D422-63
283 Hydrometer model: 152H
284 Specific gravity (Gs) = 2.65 Soil extract: 50 g/L
285

286 Particle size distribution:
287 Particle size Percent passing
288 0.05494 0.496
289 0.03029 0.476
290 0.02170 0.436
291 0.01142 0.376
292 0.00818 0.336
293 0.00592 0.256
294 0.00301 0.196
295 0.00126 0.116
296

297 Fitted with Weibull (type 2) with lower limit at 0 (W2.3)

298
299 Soil texture classes (DIN 4022):
300 Clay Silt Sand
301 Estimate 0.1507 0.3490 0.5002
302 Std. Error 0.0087 0.0205 0.0118
303

304 Soil texture classes (USDA):
305 Clay Silt Sand
306 Estimate 0.1507 0.3440 0.505
307 Std. Error 0.0087 0.0187 0.010
308

309 \$P49
310 Soil particle estimation according to ASTM D422-63
311 Hydrometer model: 152H
312 Specific gravity (Gs) = 2.65 Soil extract: 50 g/L
313

314 Particle size distribution:
315 Particle size Percent passing
316 0.05191 0.656
317 0.02886 0.616
318 0.02070 0.576
319 0.01106 0.476
320 0.00798 0.416
321 0.00575 0.356
322 0.00294 0.276
323 0.00123 0.196
324

325 Fitted with Weibull (type 2) (W2.4)

326
327 Soil texture classes (DIN 4022):
328 Clay Silt Sand
329 Estimate 0.23323 0.42723 0.33954
330 Std. Error 0.00262 0.00724 0.00461

331
332 Soil texture classes (USDA):
333 Clay Silt Sand
334 Estimate 0.23323 0.42109 0.3457
335 Std. Error 0.00262 0.00623 0.0036
336
337 \$P50
338 Soil particle estimation according to ASTM D422-63
339 Hydrometer model: 152H
340 Specific gravity (Gs) = 2.65 Soil extract: 50 g/L
341
342 Particle size distribution:
343 Particle size Percent passing
344 0.05711 0.376
345 0.03147 0.356
346 0.02239 0.336
347 0.01177 0.276
348 0.00837 0.256
349 0.00602 0.196
350 0.00306 0.136
351 0.00126 0.116
352
353 Fitted with Weibull (type 1) (W1.4)
354
355 Soil texture classes (DIN 4022):
356 Clay Silt Sand
357 Estimate 0.1190 0.2586 0.62233
358 Std. Error 0.0059 0.0128 0.00691
359
360 Soil texture classes (USDA):
361 Clay Silt Sand
362 Estimate 0.1190 0.2530 0.62798
363 Std. Error 0.0059 0.0117 0.00583
364
365 \$P51
366 Soil particle estimation according to ASTM D422-63
367 Hydrometer model: 152H
368 Specific gravity (Gs) = 2.65 Soil extract: 50 g/L
369
370 Particle size distribution:
371 Particle size Percent passing
372 0.05112 0.696
373 0.02843 0.656
374 0.02010 0.656
375 0.01061 0.596
376 0.00766 0.536
377 0.00549 0.496
378 0.00282 0.416
379 0.00119 0.316
380
381 Fitted with Shifted Michaelis-Menten (MM.3)
382
383 Soil texture classes (DIN 4022):
384 Clay Silt Sand
385 Estimate 0.37061 0.3333 0.29611
386 Std. Error 0.00669 0.0151 0.00838
387
388 Soil texture classes (USDA):
389 Clay Silt Sand
390 Estimate 0.37061 0.3251 0.30430
391 Std. Error 0.00669 0.0144 0.00768
392
393 \$P53
394 Soil particle estimation according to ASTM D422-63
395 Hydrometer model: 152H
396 Specific gravity (Gs) = 2.65 Soil extract: 50 g/L

397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421

Particle size distribution:

Particle size	Percent passing
0.05307	0.596
0.02969	0.536
0.02128	0.496
0.01121	0.436
0.00808	0.376
0.00582	0.316
0.00298	0.236
0.00124	0.156

Fitted with Brain-Cousens (hormesis) (BC.5)

Soil texture classes (DIN 4022):

	Clay	Silt	Sand
Estimate	0.1894	0.4256	0.3850
Std. Error	0.0076	0.0221	0.0145

Soil texture classes (USDA):

	Clay	Silt	Sand
Estimate	0.1894	0.3987	0.41186
Std. Error	0.0076	0.0161	0.00848

ANEXO B

Salida gráfica de la distribución del tamaño de partícula

