

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Vicerrectoría de Investigación y Extensión

Reporte Final de Investigación

Modelado de Procesos de Infiltración en suelos con sustratos de Terra Preta



Fuente: Ricigliano, K (2010)

Investigadores:

Marvin Villalobos Araya (Coordinador)
Karolina Villagra Mendoza

Abril 2015

Contenido

Resumen.....	6
I. Introducción	6
II. Revisión de literatura	9
2.1. Estudios realizados en enmiendas con terra preta	9
2.2. Modelos de retención de agua del suelo	10
2.3. Modelos de infiltración	12
2.4. Modelos de conductividad hidráulica	16
2.5. Enmiendas que influyen en las propiedades físicas del suelo	17
III. Metodología	19
3.1. Principio y procedimiento de calibración de los sensores	21
3.1.1. Sensores de Humedad de Suelo.....	22
3.1.2. Simulador de lluvia	23
3.2. Recolección de datos y Pre-Procesamiento	25
3.2.1. Contenido de Humedad del Suelo	25
3.2.2. Columna de Agua	25
3.2.3. Percolación.....	25
3.2.4. Precipitación.....	25
3.3. Cálculo de parámetros físicos de las muestras de suelo.....	26
3.3.1. Densidad del Suelo	26
3.3.2. Distribución de Tamaño de Partícula	26
3.3.3. Materia Orgánica contenido	26
3.3.4. Densidad de Partículas	26
3.4. Cálculo del suelo Propiedades químicas	26
3.4.1. La acidez-alcalinidad (pH).....	27
3.4.2. Conductividad Eléctrica	27
3.5. Cálculo de Propiedades Hidráulicas	27
3.5.1. Conductividad hidráulica saturada.....	27
3.5.2. Curva de Humedad de Retención del Suelo (curva PF).....	28
IV. Análisis de la dinámica y parámetros del suelo	29
4.1. Análisis de física del suelo y las propiedades químicas.....	29
4.2. Análisis del estado de humedad del suelo para los tratamientos: CT-CO-TP	35

4.3.	Análisis del estado de humedad del suelo para los tratamientos: 20TP-30TP-50TP	44
4.4.	Análisis de infiltración y percolación.....	51
4.5.	Análisis del flujo vertical en el perfil del suelo	55
V.	Descripción del modelo.....	58
VI.	Conclusiones.....	61
VII.	Bibliografía	63

Índice de figuras

Figura 1.1	Modelo de infiltración de Green-Ampt (adaptado de Chow et.al. 1994)	13
Figura 1.2.	Etapas del proceso de infiltración en una matrix dual (con micro y macroporos).	15
Figura 3.1.	Definición de la muestra experimental	19
Figura 3.2.	Flujo experimental para las pruebas de laboratorio.....	20
Figura 3.3.	Diagrama del sensor de humedad EC-5 [Decagon, 2006].....	22
Figura 3.4.	Diagrama del simulador de lluvia y sus componentes principales.....	23
Figura 3.5.	Fotografía de la cámara del simulador de lluvia	24
Figura 3.6.	Principio de sensado para el monitor de precipitación LNM Thies (2007).	24
Figura 3.7.	Arreglo experimental para la prueba de conductividad hidráulica.....	27
Figure 4.1.	Propiedades físicas del suelo para todos los tratamientos, a) Densidad aparente; b) Contenido de material orgánica; c) Porosidad.....	29
Figure 4.2.	Características químicas de las enmiendas	31
Figure 4.3.	Curvas de retención de humedad a) control, compost, enmiendas de terra preta, and b) tratamiento combinado con suelo franco-limoso y enmienda de terra preta a 20, 30 y 50%	33
Figura 4.4.	Gráficos de cajas para la comparación de mediana de los tratamientos CT y CO a varias profundidades para diferentes variables.	37
Figura 4.5.	Residuos de los datos generales para los tratamientos de compost y control.....	39
Figure 4.7.	Gráfico de normalidad para los tratamientos de compost y control.....	41
Figure 4.8.	Interacción de la humedad del suelo para los tratamientos de control y compost.	41
Figure 4.9.	Desplazamiento de la humedad del suelo en función de la profundidad y el tiempo, a) tratamiento de control (CT), b) Enmienda de compost (CO), y c), enmienda de terra preta (TP)....	43

Figure 4.10. a) Análisis de cajas para la comparación de medianas de los tratamientos combinados (20TP, 30TP, 50TP), b) Análisis de cajas para la comparación de medianas de los tratamientos combinados a diferentes profundidades.	44
Figure 4.11. Residuos para los tratamientos combinados	45
Figure 4.12. Análisis de cajas y residuos para los tratamientos de control (franco-limoso) y tratamientos combinados con terra preta al 20%, 30% and 50% (20TP, 30TP, 50TP)	46
Figure 4.13. Prueba de homogeneidad de varianza para los tratamientos CT, 20TP, 30TP and 50TP.....	48
Figure 4.14. Frente de humedad en función de la profundidad y el tiempo, a) Tratamiento 20TP, b) Tratamiento 30TP, c) Tratamiento 50TP	50
Figure 4.15. Contenido de humedad del suelo en función de la profundidad	50
Figure 4.16. a) Comportamiento de la velocidad de infiltración para los tres tratamientos combinados, b) Comparación de la velocidad de infiltración entre tratamientos 20TP y 30TP.....	52
Figure 4.17. Percolación media para los tratamientos combinados, a) interacción entre tratamientos, y b) comparación de la percolación entre tratamientos 20TP and 30TP	53
Figure 4.18. Columna de agua formada durante los tres experimentos pertenecientes a los tratamientos combinados	54
Figure 4.19. Frente de humedad para los tratamientos: a) control, b) compost, and c) terra preta.....	57
Figure 20. Frente de agua a través del perfil del suelo para los tratamientos a) 20TP, b) 30TP and c) 50TP.....	58
Figura 5.1. Esquema lógico del modelo	58
Figura 5.2. Diagrama de flujo del modelo	59
Figura 5.3 Resultados simulación de los cambios de humedad para los tratamientos con suelo franco-limoso y los combinados con enmiendas de terra preta.	60

Índice de Tablas

Tabla 3.2. Descripción de Variables	21
Tabla 3.3. Duración de la presión aplicada a cada nivel para la obtención de la curva PF	28
Tabla 4.1 Conductividad hidráulica saturada para todos los tratamientos	31
Table 4.2. Coeficiente de correlación para la variable independiente que mostraron correlación con la variable dependiente de humedad del suelo.....	32
Table 4.3. Parámetros hidráulicos del suelo ajustados para las curvas de retención ploteadas en figura 4.3, con la restricción $m=1-1/n$	34
Table 4.4 Condiciones de humedad del suelo obtenidos por dos métodos a) ollas de presión, b) medición directa por medio de sensores y método gravimétrico y volumétrico.....	35
Tabla 4.5. Estadísticas descriptivas de la variable de humedad de suelo para los tratamientos CO y CT.....	37
Tabla 4.6. Resultados del análisis de varianza de dos factores para los tratamientos CT-CO & TP..	38
Table 4.7. Estadística descriptiva de la humedad del suelo para los tratamientos combinados.	45
Table 4.8. Test de Kruskal Wallis para el análisis de varianza para la humedad del suelo (probabilidad del 95% de confianza)	46
Table 4.9. Estadística descriptiva para la humedad del suelo de los tratamientos CT, 20TP, 30TP and 50TP.....	47

1. Datos generales

Código del proyecto:	5402-1421-3001
Nombre del Proyecto:	Modelado de Procesos de Infiltración en suelos con sustratos de Terra Preta
Escuela Responsable:	Ingeniería Agrícola.
Investigador coordinador:	Marvin Villalobos Araya. Ingeniero Agrícola, M.Sc.
Investigadores colaboradores:	Karolina Villagra Mendoza, M.Sc. kvillagra@itcr.ac.cr
Período de ejecución:	Julio 16, 2012-Diciembre 19, 2014

Resumen

El saneamiento con *terra preta* es un nuevo concepto que consiste en la creación controlada, en un corto período de tiempo, de humus a partir de residuos orgánicos. La comprensión de la interacción y la incidencia de las propiedades físicas e hidráulicas del suelo en combinación con enmiendas de terra preta es un tema que no ha sido explorado detalladamente. El objetivo de este trabajo es contribuir al entendimiento de la dinámica de los procesos físicos en suelos con sustratos de terra preta por medio de un análisis que contribuya a establecer un modelo matemático.

Este trabajo analiza la interacción entre las variables del suelo que contribuyen a mejorar la capacidad de retención del agua en el mismo y ofrece un primer estudio del comportamiento de los procesos de infiltración cuando terra preta está presente. La lluvia fue simulada a escala de laboratorio sobre cilindros que contenían diferentes sustratos (tratamientos) y se midió la humedad del suelo a tres profundidades diferentes durante el evento de simulación. Se utilizó un análisis estadístico incluyendo análisis de varianza y correlación para explicar la interacción de variables. Además, el comportamiento de las series de tiempo se exploró para proporcionar los primeros resultados al introducir un modelo matemático capaz de explicar los procesos de infiltración en el suelo con terra preta.

Se espera que este trabajo sea la base para proponer un modelo híbrido no lineal capaz de generar predicciones más realistas acerca de la dinámica del proceso de infiltración tanto en suelos con bajo contenido orgánico así como en la combinación con enmiendas de terra preta. Se proyecta utilizar una técnica híbrida donde se combina un método de infiltración lineal (simple) con un modelo analítico detallado que permita mejorarlas técnicas de modelado para incluir suelos de alto contenido orgánico.

Palabras claves: *tratamiento, terra preta, compost, control, infiltración, contenido de humedad*

I. Introducción

La degradación del suelo es el resultado de una variedad de factores tales como la erosión, la pérdida de materia orgánica y la estructura, compactación, acidificación y mal drenaje del suelo. Esta degradación puede mineralizar el suelo creando extensas zonas con poca capacidad de producción. Las actividades agrícolas se ven directamente afectadas debido a los suelos poco fértiles con una capacidad de retención inferior y que requiere gran cantidad de fertilizantes, lo que aumenta los costos de producción (Factura et.al. 2010, Glaser 2007 y Glaser et al 2002). Además, la inestabilidad en las relaciones de la estructura de la capa superior del suelo y de percolación se aumenta, lo que puede acarrear contaminación de cuerpos de agua superficial y aguas subterráneas.

Las civilizaciones antiguas ya eran conscientes de este agotamiento del suelo y la consiguiente limitación para la agricultura en términos de productividad. Existe una técnica antropogénica que se estima tuvo sus orígenes entre el 450 A.C y el 950 D.C., dirigida a la formación de "Terra preta do Indio", también conocido como el suelo negro. Este es un suelo rico en materia orgánica formada por la deposición intencional de carbón, cerámica, huesos de animales y otros restos orgánicos, que tiene la característica de ser autosustentable, es decir, que mantiene su fertilidad a lo largo de cientos de años. Este tipo de suelo de origen antropogénico, se ha encontrado en la Amazonia y en partes de África (Factura et.al 2010 y Glaser, 2007). Bruno Glaser y su equipo de trabajo, de la Universidad de Bayreuth en Alemania, estima que la productividad en suelos con terra preta es dos veces más alta (Marris, E. 2006) y muestra tres veces más materia orgánica, nitrógeno y fósforo que los suelos adyacentes (Glaser, 2007). El secreto de su alta fertilidad se encuentra en el carbón, que es generado por la degradación de la materia orgánica en ambientes pobres en oxígeno en contraste, por ejemplo, al carbón formado por quemaduras. Las partículas de carbón que se producen con este método son capaces de retener agua y nutrientes (Marris, E. 2006). Este carbón es química y microbiológicamente estable y persiste en el medio ambiente durante siglos (Glaser, B., et al 2001). En suelos húmedos tropicales se considera un proceso clave para mantener la sostenibilidad de los suelos debido a la rápida descomposición de la materia orgánica por las altas temperaturas y grandes cantidades de precipitación que cae en estas áreas (Glaser, B., et al 2001). Sin embargo, a pesar de sus ventajas, la formación natural de terra preta requiere largos períodos de tiempo (años) y su uso se ha restringido a ciertas regiones de los trópicos.

Investigaciones recientes han intentado producir suelos o enmiendas con características similares a terra preta, pero en un tiempo más corto [Buzie, 2012]. Dentro de estos esfuerzos, se ha creado el concepto de "Saneamiento con terra preta (TPS)" [Buzie, 2012], caracterizado por ser una nueva técnica de relativo bajo costo. Esta técnica requiere la combinación de los residuos orgánicos, principalmente, la orina y la materia fecal; y la convierte, a través de una serie de procesos químicos y físicos, en un sustrato negro con alto contenido de carbón y materia orgánica capaz de mejorar las características del suelo. Para efectos de este trabajo, esta es la técnica de interés y el trabajo se enfoca sobre enmiendas producidas de esta forma.

La producción de esta enmienda mediante TPS requiere tres fases. La primera fase es la fermentación del ácido láctico de la materia fecal, previamente separado de la orina. Bajo condiciones anaeróbicas, se forman fermentadores del ácido láctico que es capaz de inhibir la

presencia de organismos no deseados (por ejemplo, patógenos), que podría ser potencialmente dañinos para los seres humanos. Esto es seguido por una humificación del sustrato. El tercer paso es el lombricompostaje, en la que el sustrato formado se airea y se trata con lombrices que disparan una serie de cambios químicos y biológicos, formando al final un tipo de material estable, sin olor (Buzie,2012). El producto final es conocido como una enmienda de "terra preta", y cuando se combina con suelos degradados se espera constituya una alternativa para mejorar las prácticas agrícolas reduciendo los costos de producción y mejorar la fertilidad del suelo (Kim et al 2007, Mbagwu 1989 y Mbagwu y Auerswald 1999).

Hasta ahora, las investigaciones anteriores alrededor de TSP se han centrado en el establecimiento y la mejora de las propiedades bioquímicas y físicas derivadas de la formación de enmiendas de terra preta. Sin embargo, hasta ahora no se conoce de estudios sobre la dinámica de la capacidad de infiltración y retención de esta enmienda. Por lo tanto, existe poca información científica sobre la capacidad de las enmiendas de terra preta para mejorar las actividades agrícolas bajo diferentes regímenes de agua y humedad, y en diferentes condiciones climáticas.

El proyecto de investigación propuesto tiene como objetivo desarrollar un método capaz de proporcionar información sobre la capacidad de absorber el agua y por lo tanto la capacidad de retención de agua de enmiendas de terra preta. La evaluación y la comprensión de las características de la dinámica de infiltración y flujo en las capas superiores del suelo cuando se combinan con enmiendas de terra preta son una herramienta útil para obtener información significativa respecto a las características de retención de las cuencas hidrográficas, la contaminación de los acuíferos, la formación de las inundaciones, entre otros. Por lo tanto, la información obtenida puede ser utilizada, por ejemplo, en la toma de decisiones para la gestión de las cuencas hidrográficas y la gestión del riesgo de inundación.

Como parte del trabajo experimental, se llevaron a cabo pruebas de laboratorio para generar datos que permitan la creación de un modelo explicativo de base para el desarrollo de un enfoque matemático capaz de modelar los procesos de infiltración en los suelos con enmiendas de terra preta.

II. Revisión de literatura

“Terra preta de índio”, del portugués, se conoce con diferentes variaciones de su nombre: suelo negro, suelo negro amazónico, suelo negro de indio. Sus orígenes están relacionados con la combinación antropogénica de varios componentes orgánicos, tales como carbón vegetal (a partir de materiales orgánicos calentado bajo suministro de oxígeno limitado), cerámica y residuos domésticos; tratada por una serie de procesos biológicos naturales que con el tiempo resultan en un suelo rico en materia orgánica y nutrientes, que contiene típicamente 70 por ciento más carbón que los suelos circundantes (Ricigliano, 2010). La formación de esta enmienda es auto regenerativa y puede mantenerse activa por cientos de años.

Saneamiento con terra preta, es un concepto relativamente nuevo, donde excrementos y orina humana se mezclan con residuos orgánicos y carbón vegetal, para luego ser llevado a un proceso de compostaje que genera en un corto período de tiempo un suelo rico en nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, que puede ser insertado en suelos pobres. Este nuevo concepto se convierte en un complemento para el manejo sostenible de la tierra. La incorporación de la enmienda terra preta en los suelos cultivados sugiere una nueva práctica agrícola, ya que incorpora los beneficios de carbón y nutrientes esenciales a las superficies de tierras degradadas debido a la agricultura intensiva.

2.1. Estudios realizados en enmiendas con terra preta

Los estudios que se encuentra en la literatura se han centrado en la química y / o comportamiento bioquímico de terra preta (Factura et.al. 2010, Liang et al 2006, Novotny et al 2009) y parte sobre la capacidad de retención de los suelos con terra preta. Otros han estudiado la influencia de carbón, compost y / o terra preta en las propiedades de la fertilidad del suelo y la retención de nutrientes (Steiner et.al 2008, Ferreira et al 2009, Lima et al 2002, Glaser et al 2002). Glaser et al (2002) estudiaron la humedad disponible en suelos con diferentes contenidos de carbono y observaron una mejora en la retención de humedad en suelos de textura gruesa o con alto contenido de macroporos en comparación con suelos limosos y arcillosos, donde no hubo mejoría. Dedujeron que esto era probablemente debido a la hidrofobicidad del carbón. Los autores indicaron que los suelos con alto contenido de carbono han aumentado la capacidad de campo hasta en un 18%. También se observó que una reducción en la densidad del suelo refleja un aumento en la porosidad y macroporosidad, y las tasas de infiltración en el suelo. Además, se reportó que la presencia de sustancias húmicas derivadas del carbón mejora la capacidad de retención de agua y la estabilidad de los agregados en suelos mediterráneos.

Se han realizado otros estudios respecto a los efectos de compost sobre las características físicas del suelo. Por ejemplo, Aggelides y Londres (2000) llevaron a cabo un estudio sobre el efecto del compost en las propiedades físicas del suelo (saturado y la conductividad hidráulica no saturada, la capacidad de retención de agua, densidad, porosidad total, la distribución de tamaño de poro, la fuerza de penetración del suelo y la estabilidad de los agregados) y encontraron que estas propiedades se mejoraron (más en limosos-suelos que en arcilla) de acuerdo con la cantidad de compost añadido. La densidad del suelo reportada se redujo hasta 20% y la porosidad total se

incrementó hasta el 30% en suelos francos y en 10% para arcillas. La conductividad hidráulica saturada aumenta hasta el 95% en los suelos limosos y un 168% en suelos arcillosos. Por otra parte, Wang y Col (2009) explican la presencia de una correlación negativa de la conductividad hidráulica y la materia orgánica en suelos gruesos, y sugirió que existe una capacidad de humectación reducida causada por la materia orgánica del suelo en suelos arenosos.

No se conoce de investigaciones detalladas en el tema de dinámica de infiltración en suelos con enmienda de terra preta. Este trabajo busca colaborar en este aspecto de TSP, con el fin de obtener modelos aplicables y confiables de la infiltración en este tipo de suelos.

2.2. Modelos de retención de agua del suelo

Con la precipitación se generan procesos importantes que influyen en el régimen hídrico del suelo ($\frac{d\theta}{dt}$) y que conforman la región no saturada del suelo. La *infiltración* de agua a través de la superficie del suelo, la cual se convierte en parte del contenido de agua del suelo; el *interflujo*, el cual se mueve en forma paralela a la superficie en las primeras capas de suelo en condiciones insaturadas; la *percolación*, la cual es el flujo que se mueve hacia capas profundas del suelo; la *evaporación*, siendo la pérdida de humedad de la superficie por evaporación directa; y el *ascenso capilar*, el cual es el movimiento del agua hacia arriba por medio de los capilares del suelo. Todos estos elementos conforman la ecuación de balance de agua del suelo:

$$\frac{d\theta}{dt} = Inf(t) - [Interflujo(t) + Percolación(t)] - Eva(t) + CU(t) \quad (2.1)$$

El movimiento del agua (θ) en la zona no saturada ha sido descrito por la ecuación de Richards (van Genuchten *et al* 1991) en términos del contenido de agua para condiciones homogéneas e insaturadas ($h \leq 0$):

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dz} \left(D \frac{d\theta}{dz} - K \right) \quad (2.2)$$

Donde D es la difusividad del agua del suelo (L^2T^{-1}), definido como

$$D = K \frac{dh}{d\theta}, \quad (2.3)$$

con K la conductividad hidráulica (LT^{-1}).

Brooks and Corey en 1964 (van Genuchten *et.al.* 1991) propusieron una ecuación empírica para la curva de retención de humedad:

$$\theta = \begin{cases} \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(\alpha h)^{-\lambda} & (\alpha h > 1) \\ \theta_s & (\alpha h \leq 1) \end{cases} \quad (2.4)$$

donde θ_s y θ_r son los contenidos de humedad saturado y residual, respectivamente; α es un parámetro empírico (L^{-1}) referido al valor de entrada de aire de la presión de burbujeo, y λ es un parámetro de la distribución del tamaño del poro el cual afecta la pendiente de la curva de retención. h es la succión (cabeza de presión) y es usada como positiva. Esta forma empírica, originalmente propuesta por Brooks y Corey, ha demostrado resultados precisos en suelos de textura gruesa, debido a su distribución de poros o tamaño de partícula relativamente estrechas; y menos exacta para finas texturas y suelos inalterados, debido a la ausencia de un valor de entrada de aire bien definido (van Genuchten et al 1991).

Van Genuchten (1980) describió una forma no dimensional para expresar la curva de retención de humedad en función del grado efectivo de saturación: ($0 \leq S_e \leq 1$):

$$S_e = \begin{cases} (\alpha h)^{-\lambda} & (\alpha h > 1) \\ 1 & (\alpha h \leq 1) \end{cases} \quad (2.5)$$

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.6)$$

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta - \theta_r}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} \quad (2.7)$$

La ecuación muestra que el contenido de agua del suelo bajo saturación (θ_s) está estrechamente relacionado con la porosidad del suelo, por lo general 5-10% menor que la porosidad, debido al aire atrapado o disuelto dentro de los poros (Van Genuchten et.al., 1991). El contenido de agua residual del suelo (θ_r) donde el gradiente de humedad tiende a cero con respecto a la cabeza de presión (h), de acuerdo a la curva de retención de humedad para suelos muy secos los valores de succión o cabeza de presión van a ser muy altos, se consideran valores de h mayores o iguales a -15 000 cm (Van Genuchten 1980). Parámetros α , n y $m = (1-1/n)$ dependen de la forma de la curva de retención de agua del suelo (Van Genuchten 1980). Los valores típicos son $\alpha = 0,02 \text{ cm}^{-1}$ y $n < 1,25$ (suelos arcillosos); $n > 1.4$ (suelos arenosos) (Bohne, 2005). S_e es la saturación eficaz que oscila entre 0 y 1. Esto ayuda a explicar la relación entre la curva de retención de agua del suelo en relación con las diferentes condiciones de agua del suelo $\theta(h)$. Por lo tanto, cuando $S_e = 0$ significa que el suelo está muy seco, y $\theta(h) \approx \theta_r$; Si $S_e = 1$ significa que el suelo está a saturación, $\theta(h) \approx \theta_s$.

Van Genuchten (1980) además propuso una función suave como modificación del modelo de Brooks y Corey para el grado efectivo de saturación de humedad.

$$S_e = \frac{1}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} \quad (2.8)$$

donde α , n y m son, como se indica anteriormente, constantes empíricas que afectan la forma de la curva de retención.

2.3. Modelos de infiltración

Una cuenca es un sistema de drenaje natural con una interacción de varios procesos biológicos, físicos y químicos, verticales y horizontales, con un punto de descarga, que en función de la gestión de la tierra realizado en él, puede generar varios impactos negativos en la economía, el medio ambiente y humano. Los procesos de infiltración y retención de agua en el suelo representan una parte fundamental de los estudios hidrológicos para reducir la descarga de agua en las partes bajas de la cuenca.

La infiltración, como se discutió anteriormente, es el proceso en el cual el agua penetra en la superficie del suelo, que constituye un proceso de alta complejidad. Por lo tanto, su descripción matemática puede típicamente representar una parte de lo que sucede exactamente en el suelo. Hay muchos factores que influyen en la tasa de infiltración, como lo son condiciones de la superficie del suelo y la cubierta vegetal, las propiedades del suelo, tales como la porosidad y la permeabilidad, y el contenido de agua del suelo (Chow et.al 1994).

Modelos hidrológicos utilizan varios métodos para estimar las tasas de infiltración. Estos podrían ser lineales, exponenciales o empíricos (Jeníček 2007). Modelos de infiltración complejos puede llegar a considerar los diferentes niveles de porosidad de la matriz del suelo (Jeníček 2007; Bronstert y Placa 1997).

Una de las primeras ecuaciones empíricas de infiltración fue propuesta por Horton a principios de los treinta (Chow et.al. 1994):

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (2.9)$$

La infiltración se inicia en alguna tasa de infiltración (f_0) y disminuye exponencialmente hasta que alcanza una velocidad constante (f_c), con una constante k que representa la tasa de decaimiento [T^{-1}]. La constante k se controla por variables como el tipo de suelo, el contenido inicial de agua, condiciones de la superficie, la topografía, entre otros (Xue y Gavin, 2008). Xue y Gavin (2008) mencionan que hay estudios que evidencian que esta ecuación es sólo aplicable para intensidades de lluvia superiores a la capacidad de infiltración.

En los años 50 Philip (Chow et al 1994) resolvió la ecuación de Richards en unas condiciones menos restrictivas, en el supuesto de que K (conductividad hidráulica saturada) y D (difusividad) varían el contenido de agua del suelo θ . Mollerup (2008) explica que además de aplicar las soluciones en serie de potencias para la condición de contorno de cabeza constante en la superficie del suelo y la caída de la infiltración de la cabeza, también podría aplicarse para la infiltración con altura de agua variable.

$$f(t) = \frac{1}{2}St^{-1/2} + K \quad (2.10)$$

Donde S se refiere a Sortividad, es decir, la capacidad de un medio para absorber o liberar agua por capilaridad.

Green-Ampt en 1911 (Chow et al 1994), propuso un sistema simplificado para la infiltración (Figura 1.1) a través del suelo parcialmente saturado en condiciones de agua estancada. El frente de agua (que penetra una profundidad L para $t > 0$) divide el contenido de agua del suelo en dos zonas, la insaturado y el saturado. El agua estancada en la superficie alcanza una profundidad H , mientras que el contenido de agua inicial (θ_i) aumenta hasta alcanzar η (porosidad) como el frente de agua se mueve hacia abajo. Xue y Gavin (2008) señalaron que el tiempo de este modelo se subestima para una profundidad de frente de humectación para formar en el suelo en parte saturado debido a la utilización de la conductividad hidráulica saturada, debido a la presencia de las condiciones insaturados.

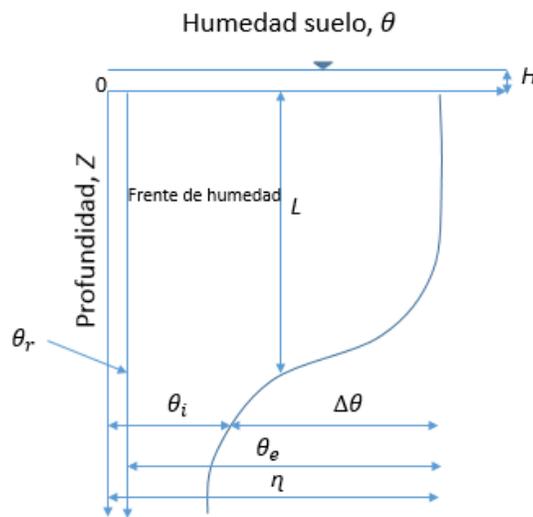


Figura 1.1 Modelo de infiltración de Green-Ampt (adaptado de Chow et.al. 1994)

La ecuación de Green-Ampt para infiltración acumulada se define como:

$$F(t) - \psi\Delta\theta \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta}\right) = Kt \quad (2.11)$$

Y reordenando la expresión se obtiene,

$$F(t) = Kt + \psi\Delta\theta \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta}\right) \quad (2.12)$$

Donde $F(t)$ es la infiltración acumulada, ψ tensión del suelo, y K la conductividad hidráulica saturada. La infiltración acumulada se convierte en una ecuación no lineal y puede ser resuelta por el método de sustitución sucesiva o por iteración de Newton. Sabiendo K , t , ψ y $\Delta\theta$, F puede ser sustituido por

un valor de prueba en el lado derecho de la ecuación (es decir, $F = Kt$) para obtener un nuevo valor de F en el lado izquierdo de la ecuación, hasta que converge a un valor constante (Chow et al 1994).

Después de calcular $F(t)$, la tasa de infiltración $f(t)$ puede ser estimada por:

$$f(t) = K \left(\frac{\psi \Delta \theta}{F(t)} + 1 \right) \quad (2.13)$$

Xue y Gavin (2008) explicaron que Mein y Larson en 1973 reconocieron el hecho de que las tasas de infiltración cambian de depender de la intensidad de lluvia a depender de la capacidad de infiltración del suelo, en el supuesto de que la capacidad de infiltración mínima del suelo es igual a la conductividad hidráulica saturada y la intensidad de lluvia tiene que ser superior a inicios de escorrentía (flujo superficial). Para un suelo con lluvia constante se identificaron varios escenarios de respuesta:

- Intensidad de la lluvia (I_n) < conductividad hidráulica saturada (K_s): toda la lluvia percola y velocidad de infiltración es igual a la intensidad de la lluvia.
- Intensidad de la lluvia (I_n) > conductividad hidráulica saturada (K_s): en la etapa inicial del evento de lluvia, toda el agua se infiltra hasta que el suelo cerca de la superficie se satura ($I_n \geq f > K_s$) y la escorrentía o encharcamiento comienza. La tasa de infiltración comienza a disminuir cuando $t > T_p$ (tiempo de encharcamiento).
- Intensidad de la lluvia > La capacidad de infiltración $f >$ conductividad hidráulica saturada: la escorrentía superficial y la disminución de la tasa de infiltración comienzan una vez que se inicia el evento de lluvia.

Mediante el uso de la ecuación de Green-Ampt, el tiempo de encharcamiento bajo una lluvia constante puede ser descrito por (Chow et al 1994):

$$T_p = \frac{K_s \psi \Delta \theta}{I_n (I_n - K_s)} \quad (2.14)$$

donde $\psi = -h$.

Xue and Gavin (2008) propusieron una extensión al modelo de Horton, asumiendo que la intensidad de la lluvia se convierte en la razón de decaimiento k :

$$f = f_c + (f_o - f_c) \exp \left[- \left(\frac{I_n}{f_c} \right) \left(\frac{K_s}{f_c} \right)^{1/2} t \right] \quad (2.15)$$

y el tiempo para que inicie la escorrentía está dado por,

$$T_p = \frac{(f_c)^{3/2} \ln \left[\frac{f_o - f_c}{I_n - f_c} \right]}{I_n (K_s)^{1/2}} \quad (2.16)$$

Bronstert y Plate (1997) explicaron el proceso de infiltración en tres etapas, como una función de un escenario de doble matriz del suelo, dependiendo de la condición del contenido de agua del suelo y la intensidad de la lluvia, con los subíndices mic und mac haciendo referencia a micro y macroporos en la estructura del suelo, respectivamente (Figura 1.2):

- Infiltración = $(I_{mic} + I_{mac})$ y $I_{mic} < I_n < (I_{mic} + I_{mac})$: ocurre cuando la infiltración en los microporos (I_{mic}) está en su capacidad potencial. Los microporos y macroporos absorben el agua de la superficie y flujo preferencial por macroporos pueden ocurrir.

- Infiltración = $I_{máx}$ y $I_n > I_{mic} + I_{mac}$: infiltración en microporos corresponde a la infiltración máxima permitida. La escorrentía puede comenzar cuando la intensidad es superior a la capacidad de infiltración.

- Infiltración = I_{mic} y $I_n < I_{mic}$: infiltración en microporos exceda intensidad de lluvia.

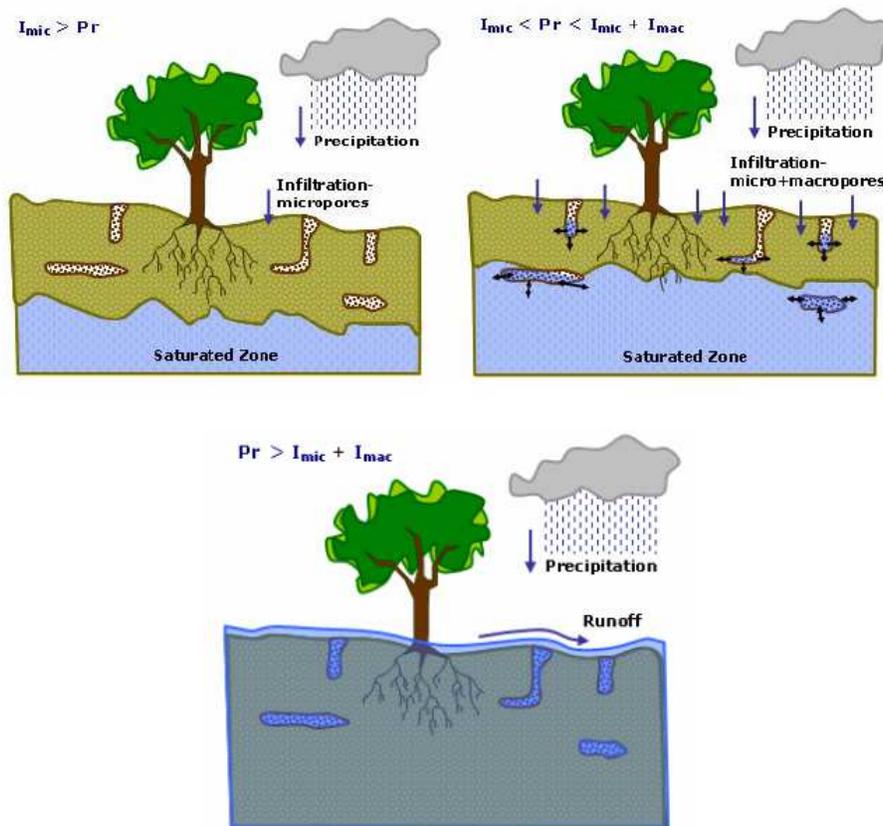


Figura 1.2. Etapas del proceso de infiltración en una matrix dual (con micro y macroporos).

2.4. Modelos de conductividad hidráulica

La velocidad a la que se producen algunos procesos físicos (infiltración, la evaporación, la recarga de las aguas subterráneas) depende de las características hidráulicas del suelo. Dependiendo de las condiciones del agua del suelo, la conductividad hidráulica puede ser insaturada o saturada.

Las principales diferencias de la conductividad hidráulica no saturada con respecto a la saturada, es que varía en el tiempo y es una función no lineal del contenido de agua del suelo o la tensión del suelo (Bohne, 2005). Este fenómeno se debe a que en condiciones de suelos insaturados el fluido se mueve por gravedad, preferiblemente a través de poros llenos de agua en relación a los poros llenos de aire. Como el contenido de agua del suelo disminuye, la tortuosidad del fluido aumenta porque los poros más grandes han sido drenados y el flujo se concentra en los poros finos. De esta manera la habilidad de transmitir agua en el suelo se disminuye drásticamente. Esta es la razón por la que texturas finas tienen conductividad hidráulica insaturados bajas con respecto a las texturas gruesas (Simunek et al. 1999).

La eficacia de transporte de agua depende también del aire presente en los poros del suelo debido a que la presencia de aire en los poros del suelo reduce el espacio disponible para el fluido, por lo tanto, un menor contenido de agua del suelo reduce la eficacia del sistema para conducir el agua (Ward y Robinson, 2000). En términos de la cabeza de presión h (o tensión negativa del suelo, ψ), cuando $h = 0$ cm, el suelo está bajo la saturación y la conductividad hidráulica está en su máximo.

La estimación de la conductividad hidráulica de suelo K bajo condiciones insaturadas lleva un proceso complejo y, en general, existen modelos para explicar su comportamiento.

En 1976, Mualem explicó la conductividad hidráulica relativa asumiendo m y n como parámetros independientes. Van Genuchten y Nielsen (1985) simplificaron este análisis con las siguientes expresiones:

$$K_r = \sqrt{S_e} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad \text{donde } m = 1 - \frac{1}{n}; 0 < m < 1 \quad (2.17)$$

La teoría de Burdine es análoga la de Mualem, y la propuso la siguiente forma:

$$K_r(S_e) = \frac{mn}{mn+2} S_e^{3+2/mn} \quad (2.18)$$

Van Genuchten (1985) mostró que el modelo de Mualem no era adecuado para $n \leq 1$ dando situaciones físicamente poco realistas cuando la pendiente de la curva de retención en saturación tiende a trasladarse a $-\infty$. Utilizando el modelo de Burdine, este se comporta similar al modelo de Mualem cuando los valores de n son relativamente grandes. Por otra parte, cuando $n \rightarrow 2$, la curva de retención se aproxima a cero. Van Genuchten y Nielsen (1985) encontraron que el modelo de Mualem es más adecuado para una mayor variedad de suelos que el modelo de Burdine. Esto significa que los suelos con distribuciones de tamaño de poro grandes (caracterizada por pequeños

valores de n) no son adecuados para la teoría de Burnide. Los autores también encontraron una restricción al predecir K_r para ciertos valores de m y n . Por ejemplo, para el modelo de Mualem, m se limita a $m = 1 - 1/n$; y $m = 1 - 2/n$ para el modelo de Burdine cuando se tienen suelos donde el n se encuentra entre 1,25 y 6.

Van Genuchten (1980) propuso un modelo de expresión derivado del modelo de Mualem para expresar la conductividad hidráulica no saturada como una función del contenido de agua del suelo y / o presión de la cabeza del suelo

$$K_r(S_e) = S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right] \quad (2.19)$$

$$K(h) = K_{sat} \cdot K_{rel} \quad (2.20)$$

$$K_{rel}(S_e) = S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2, \text{ for } m = 1 - \frac{1}{n} \text{ and } 0 < m < 1 \quad (2.21)$$

$$K_{rel}(h) = \frac{[1 - (\alpha|h|)^{n-1} (1 + (\alpha|h|)^n)^{-m}]^2}{[1 + (\alpha|h|)^n]^{ml}} \quad (2.22)$$

Donde $m = 1 - 1/n$, y l es el parámetro representando tortuosidad (0.5).

Hurtado y de Jorg van Lier (2005) recomendaron estudiar la conductividad hidráulica no saturada como una función de la cabeza de presión (h) en vez del contenido de humedad (θ or S_e) ya que la relación es más sensible a la conectividad y radio del poro, lo que hace que los valores $K(h)$ sean más consistentes que $K(S_e)$.

2.5. Enmiendas que influyen en las propiedades físicas del suelo

Varios estudios de investigación se han centrado en la mejora de las características físicas del suelo utilizando la técnica de incorporación de sustratos con alto contenido de materia orgánica para mejorar la fertilidad del suelo (Mbagwu y Auerswald 1999). Los parámetros, que influyen en la retención de agua del suelo y la permeabilidad para un movimiento adecuado de agua a través del suelo, se relacionan con la textura, la densidad aparente y la materia orgánica (Tahir et al 2012).

Algunos suelos, especialmente en la agricultura intensiva, están más expuestos a sufrir la degradación del suelo superficial, provocando una grave disminución de sus propiedades físicas e hidráulicas. Por lo tanto, la práctica de incorporación de materia orgánica de estos suelos es más frecuente hoy en día. Algunos de los beneficios de la incorporación de materia orgánica en el suelo son una mejor estabilidad estructural (macroporos y microporos de formación), menor densidad aparente y una mejor permeabilidad. El aumento del carbono orgánico mejora la infiltración de agua (Civeira & Lavado, 2006; Moniruzzaman y Katsumi, 2012).

La mayoría de los estudios sobre el efecto de la modificación de las características físicas e hidráulicas del suelo se han realizado con abono, paja, aserrín (Civeira & Lavado, 2006; Moniruzzaman y Katsumi, 2012, Wang et al 2009, Duncan et.al . 2001), y muy pocos estudios existen con enmiendas de terra preta.

Los estudios han demostrado que las enmiendas de compost (con biosólidos y arena) mejoran el flujo preferencial, reduce significativamente la densidad del suelo al incrementar el número de macro y mesoporos, y mejora la estabilidad estructural (Civiera & Lavado, 2006). Estos trabajos también encontraron que la infiltración base es menor en suelos con baja materia orgánica que, por ejemplo, en los suelos donde se añadió el compost en la superficie. Se encontró además una correlación negativa entre la infiltración y la densidad aparente, y correlación positiva con la porosidad, siendo la densidad la variable de influencia principal para la infiltración.

Moniruzzaman y Katsumi (2012) observaron que la conductividad hidráulica fue mayor para los suelos arcillo-limosos cuando se añadió el compost que con paja y aserrín. También se conoce mejor permeabilidad cuando los macroporos constituyen entre el 14 a 30% del volumen total. Esto mejora el movimiento de agua y el drenaje, debido a que en los suelos de materia modificada orgánicos el movimiento descendente del agua está dominado por la gravedad.

Wang et al (2009) encontraron que el carbono del suelo y el contenido de arena eran importantes para explicar la conductividad hidráulica saturada. Se observó una relación inversa no lineal entre la conductividad hidráulica saturada y carbono en el suelo influenciado por el contenido de arena. Esto podría ser debido a que suelos con alto contenido de arena permanecen sueltos y sin agregados, incluso con presencia de carbono en el suelo. Por lo tanto, el efecto positivo de la materia orgánica en la conductividad hidráulica saturada (en suelos arenosos) es relativamente débil en comparación con los suelos más finos, que debido a su estructura presentan una mayor conductividad hidráulica saturada. Además, los autores se refieren a un 2% de contenido de materia orgánica como un valor umbral para mostrar los agregados de suelo inestables en suelos arenosos. Por lo tanto, gran tamaño de las partículas y carbono orgánico bajo, es probable que causen la relación negativa entre conductividad hidráulica contra Carbono orgánico.

Si bien la filosofía en cuanto al enriquecimiento de los suelos con terra preta es similar a otras técnicas, los procesos fisicoquímicos y la composición del suelo son diferentes, lo que implica que posiblemente los procesos de infiltración también lo serán. Este trabajo entonces busca contribuir en estos aspectos y se espera que el modelo matemático sirva como base de comparación con otros tipos de suelo tanto tradicionales como los que poseen más alto contenido de materia orgánica.

III. Metodología

El estudio experimental de este trabajo se llevó a cabo en el laboratorio del Instituto de Ingeniería de Ríos y Zonas Costeras de la Universidad Técnica de Hamburg-Harburg, Alemania. El suelo y enmiendas utilizados para los experimentos fueron clasificados en dos grupos, el grupo I: franco-limoso (como suelo convencional, CT), compost (basado en residuos domiciliarios, CO), y terra preta (llamado TP), Grupo II: terra preta en 20%, 30% y 50% combinado con el suelo franco-limoso al 80%, 70% y 50%, respectivamente.

El grupo I fue instalado siguiendo la técnica experimental de bloques distribuidos al azar y grupo II con muestras repetidas (Figura 3.1). Los bloques al azar (grupo I) consistieron en tres bloques, cada uno conteniendo los tratamientos CO, CT y TP en proporciones aleatorias. Mediciones de humedad del suelo, bajo lluvia simulada se repitieron tres veces para cada bloque durante un período simulado de 80 min.

El método de muestras repetidas (grupo II) consistió en la preparación de tres cilindros con diferentes proporciones de la mezcla de suelo y sustrato (20% terra preta y el 80% franco-limoso; 30% terra preta y el 70% franco-limoso, 50% terra preta y 50% franco-limoso). El tiempo entre la simulación de lluvia (para todos los tratamientos) siguió los criterios de capacidad de campo. Esto significa que después de terminar una simulación de lluvia, se esperó un período de entre 3 a 4 días hasta que registra la condición de capacidad de campo en el suelo antes de repetir el experimento para alcanzar las tres repeticiones. Todos los suelos y sustratos fueron embalados en cilindros de 25 cm de alto y 20 cm de diámetro.

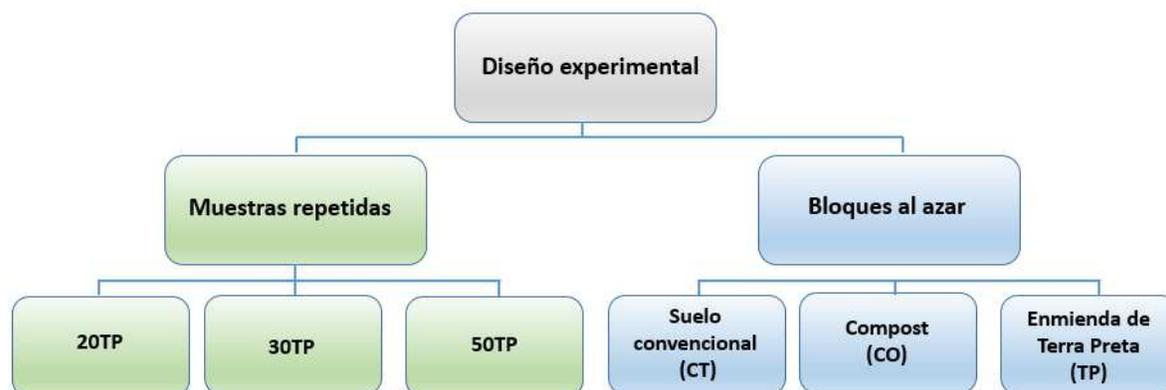


Figura 3.1. Definición de la muestra experimental

Para todos los experimentos realizados, se aplicó una cantidad de agua sobre la parte superior de cada cilindro (lluvia simulada). Con un medidor laser de precipitación se midió esta cantidad de lluvia y sus características. En cada cilindro, tres sensores de humedad del suelo se instalaron a diferentes profundidades (desde la superficie 4 cm, 15 cm y 26 cm), configurados para registrar el contenido de humedad cada 3 segundos antes y después de la simulación de lluvia. La percolación en la parte

inferior del cilindro se recogió en un intervalo de 5 minutos y la columna de agua en la parte superior del cilindro se midió en el mismo intervalo. La infiltración se calculó indirectamente por la ecuación de balance de agua en el suelo (basado en los cambios de percolación, evapotranspiración, interflujo y la humedad del suelo, ver sección 2.2). La evapotranspiración se supone que es cero (Figura 3.2). Otras características físicas e hidráulicas del suelo se midieron en el laboratorio, por ejemplo, contenido de materia orgánica, la porosidad, la densidad del suelo, densidad de partículas, la conductividad hidráulica de suelo, pH, conductividad eléctrica, etc.

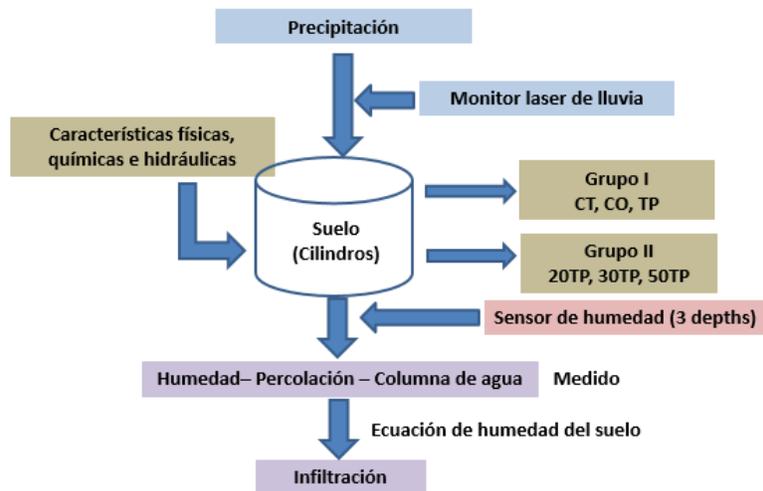


Figura 3.2. Flujo experimental para las pruebas de laboratorio.

La tabla 3.2 proporciona una descripción de todas las variables relevantes para el experimento. Todas las variables son cuantitativas con una escala de razón, además son independientes, excepto la humedad del suelo, que es la variable dependiente. Se incluye en la última columna de la tabla el método o norma utilizado para la obtención de cada variable.

Con el fin de explicar las diferencias entre todos los tratamientos se aplica una prueba de hipótesis. La hipótesis de investigación se basa en la suposición de que al menos uno de los tratamientos muestra una diferencia en el contenido de agua del suelo y que los cambios de humedad se mueven hacia abajo el perfil del suelo, con un nivel significativo de $\alpha = 0,05$. Para este propósito, un análisis de varianza de dos factores se realizará a fin de comparar la diferencia entre los tratamientos, profundidades y la interacción entre ellos. El análisis estadístico se realizó utilizando el software Minitab17.

Tabla 3.2. Descripción de Variables

Variable	Tipo	Escala	Unidad	Método-Norma
Contenido de material orgánica	Cuantitativo	Razón	%	DIN 18128
Densidad aparente	Cuantitativo	Razón	ML ⁻³	DIN 18125-1
Porosidad	Cuantitativo	Razón	%	
Densidad de partícula	Cuantitativo	Razón	ML ⁻³	DIN 18124
Coductividad hidráulica saturada	Cuantitativo	Razón	LT ⁻¹	DIN 18130
pH	Cuantitativo	Razón	-	
Conductividad eléctrica	Cuantitativo	Razón	dS/m	
Capacidad de campo	Cuantitativo	Razón	L ³ L ⁻³	Ollas de presión
Punto de marchitez permanente	Cuantitativo	Razón	L ³ L ⁻³	Ollas de presión
Agua disponible para las plantas	Cuantitativo	Razón	L ³ L ⁻³	
Saturación	Cuantitativo	Razón	L ³ L ⁻³	Ollas de presión
Percolación	Cuantitativo	Razón	LT ⁻¹	Volumétrico
Columna de agua	Cuantitativo	Razón	LT ⁻¹	Escala graduada
Infiltración	Cuantitativo	Razón	LT ⁻¹	
Tiempo	Cuantitativo	Razón	T	-
Profundidad	Cuantitativo	Razón	L	-
Humedad del suelo	Cuantitativo	Razón	L ³ L ⁻³	

3.1. Principio y procedimiento de calibración de los sensores

Antes de comenzar las mediciones, se requiere la correcta comprensión de los sensores y su utilización. Por ejemplo, los sensores de humedad del suelo requieren una calibración, con el objetivo de tener lecturas más precisas de los sustratos específicos que se está evaluando. Las siguientes secciones describen las generalidades y procedimientos de calibración para cada tipo de sensor utilizado.

3.1.1. Sensores de Humedad de Suelo

El sensor seleccionado fue tipo ECH2O, modelo EC-5 de la firma Decagon (Figura 3.3). Este sensor utiliza un principio dieléctrico (capacitivo) para estimar el contenido de humedad en el suelo. Básicamente, la capacitancia entre las dos agujas de detección es proporcional a la constante dieléctrica del suelo, que al mismo tiempo depende del contenido de humedad del suelo. El tiempo de medición recomendada es de 10,0 ms con una precisión de al menos 0.003 m³ / m³ para suelos con conductividades eléctricas de hasta 8 dS / m. Las dimensiones del sensor son 8.9 cm x 1.8 cm x 0,7 cm y su rango dinámico va desde 0 hasta 100% de contenido de humedad volumétrica [Decagon, 2006].

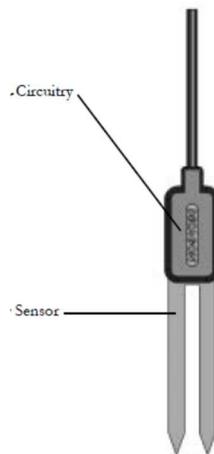


Figura 3.3. Diagrama del sensor de humedad EC-5 [Decagon, 2006]

El proceso de calibración siguió las recomendaciones del fabricante, bajo diferentes condiciones de sustratos. Los pasos seguidos fueron:

- a. Se definieron seis niveles de humedad para cada sustrato, desde muy seco hasta completamente húmedo.
- b. La lectura correspondiente a cada nivel de humedad fue adquirida con un datalogger (Datataker DT-85). Se establecieron tres lugares para medir la humedad del suelo en el cilindro de cada sustrato (4, 15 y 26 cm), entonces la lectura correspondiente fue tomada con los tres sensores para cada sustrato. Las lecturas (en mV) se repitieron constantemente hasta que se alcanzó un nivel estable.
- c. Una vez que las lecturas en mV eran estables, se tomaron muestras para cada nivel de humedad. Entonces, en el laboratorio, utilizando el método gravimétrico y volumétrico, se obtuvo el contenido de humedad del suelo de acuerdo con la norma DIN 18121-1.

d. Por medio de los seis niveles de humedad y las lecturas obtenidas, una curva de correlación fue generada entre los valores obtenidos en el laboratorio (% en volumen) y las lecturas del sensor (en mV). Se obtuvo entonces la curva de mejor ajuste y de ella se extrajo la ecuación de calibración para cada sensor y tipo de suelo.

3.1.2. Simulador de lluvia

Un simulador de lluvia fue construido para este experimento. Los bloques de construcción para la generación de lluvia (Figura 3.4) fueron un manómetro, una válvula de control de flujo, medidor de flujo, y una boquilla de cono axial completo (460.766.30.CE) con un ángulo de 90° por el fabricante Lecher. La boquilla se coloca en 3 metros por encima del nivel del suelo. Con el fin de mejorar la homogeneidad del flujo de lluvia, se utilizó una pantalla reticular por debajo de la boquilla dosificadora. La Figura 3.4 muestra un esquema de la configuración implementada y la Figura 3.5 una fotografía del montaje real.

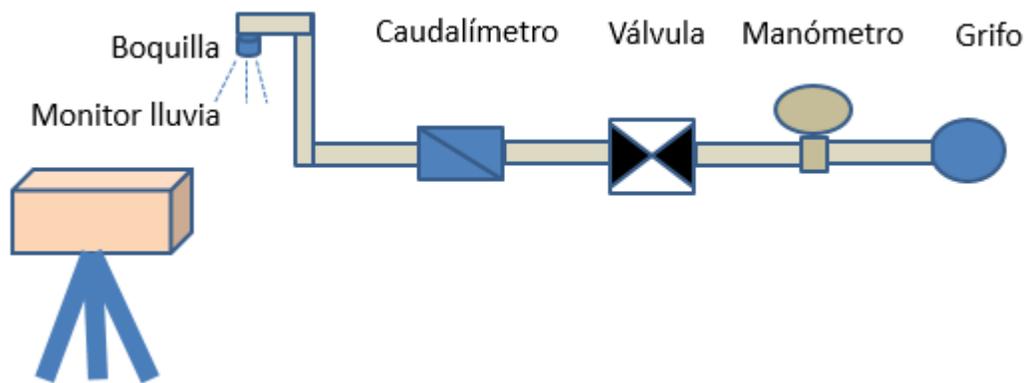


Figura 3.4. Diagrama del simulador de lluvia y sus componentes principales



Figura 3.5. Fotografía de la cámara del simulador de lluvia

Con el fin de medir la precipitación, se utilizó un monitor de láser (LNM: Laser Niederschlag Monitor) por el fabricante Thies (Figura 3.6). Las capacidades del sensor cubren la detección y medición de los diferentes tipos de lluvia como la llovizna, lluvia, granizo, y nieve. Los datos registrados incluyen el tipo de precipitación, intensidad, cantidad y su espectro [Thies, 2007].

El principio de detección del LNM consiste en la generación de un haz de luz infrarroja invisible (785 nm longitud de onda) con una fuente de láser que atraviesa una sección de la lluvia. Cuando las partículas de precipitación cruzan la zona del haz (45,6 cm²), el haz detectado se distorsiona, así como la cantidad de luz detectada en el lado receptor por un fotodiodo. El diámetro de partícula puede calcularse a partir de la reducción de la amplitud de la señal, mientras que la velocidad de las partículas se determina por el tiempo que dura la reducción de la amplitud de la señal. El tipo de precipitación se obtiene a partir del cálculo estadístico de todas las partículas medidas en función de su diámetro y la velocidad [Thies, 2007].

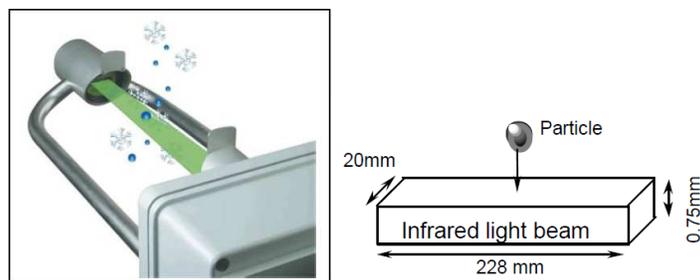


Figura 3.6. Principio de sensado para el monitor de precipitación LNM Thies (2007).

3.2. Recolección de datos y Pre-Procesamiento

Con el objetivo de registrar la información para explicar el flujo de agua a través de diferentes tipos de sustrato se aplicaron diferentes procedimientos, que se detallan a continuación.

3.2.1. Contenido de Humedad del Suelo

Los sensores de humedad del suelo se instalaron en una columna horizontal sobre las muestras en tres niveles de profundidad diferentes: cerca de la superficie (4 cm), con el fin de registrar las variantes humedad producida, directamente, por la velocidad de entrada de agua a través de la superficie del suelo. Debido a las dimensiones físicas del sensor, no fue posible instalarlo más cerca de la superficie. El segundo sensor se instaló a una profundidad media (15 cm), para proporcionar una referencia de la variación de humedad en el interior del cilindro. El tercer y último sensor se instaló cerca del límite inferior (26 cm), con el fin de registrar la variación de la humedad causada por la percolación.

Los sensores se conectan al registrador de datos, que registró las mediciones en mV y a una velocidad constante de 3 segundos, antes, durante y después del evento precipitación (experimento). La precipitación estuvo activa durante 50 minutos para el TP, tratamientos CO y CT, y 90 minutos para las muestras 50TP 20TP, 30TP, como se detalla en el apartado 1.3. La fase de percolación se extendió hasta el momento que las lecturas alcanzaron volúmenes insignificantes.

3.2.2. Columna de Agua

El exceso de agua acumulada sobre la superficie del suelo fue debido a la falta de inclinación de la superficie del suelo y para los casos en que la tasa de infiltración fue menor que la tasa de entrada de agua.

La cuantificación de la columna de agua se realizó por medición manual con la ayuda de una escala de longitud graduada, con lecturas a intervalos de 5 minutos, desde el inicio del experimento hasta la extinción de la columna.

3.2.3. Percolación

Receptores de recogida de agua se colocaron debajo de la estructura de soporte de los cilindros. La lectura de percolación fue tomada en intervalos de 5 minutos desde el inicio del experimento mediante el cálculo de su volumen a partir del peso del agua recogida.

3.2.4. Precipitación

La intensidad de la lluvia, tamaño de gota, y la duración se determina de una manera continua con la precipitación Monitor de láser (LMN). El LMN fue colocado sobre cada cilindro durante 10 minutos para adquirir la serie de datos.

3.3. Cálculo de parámetros físicos de las muestras de suelo

Para explicar el movimiento del agua en el suelo, era necesario conocer las características físicas de los sustratos bajo evaluación. Las pruebas de laboratorio se realizaron en el Laboratorio de Geología de la Universidad Técnica de Hamburg-Harburg (Geotechnik, TUHH). Las características evaluadas más importantes se resumen a continuación.

3.3.1. Densidad del Suelo

Para cada tratamiento y su repetición, después de los experimentos, se tomaron tres muestras inalteradas. Ellas fueron ponderadas antes y después de secar la muestra a 105 ° C durante al menos 24 horas o el tiempo requerido hasta obtener un peso estable. Las dimensiones de los cilindros utilizados para tomar las muestras tenían una altura y un diámetro de 50 cm [DIN, 2010].

3.3.2. Distribución de Tamaño de Partícula

Para cada tratamiento, se tomaron tres muestras perturbadas. Ellas se secaron a 105 ° C hasta alcanzar un peso estable. Después, se tamizaron durante 10 minutos para obtener el diámetro de partícula entre 16 y 0.063 mm según la norma alemana DIN 18123 [DIN 2011a]. Después, los sólidos retenidos para cada tamizado correspondiente a la diferencia de tamaño de las partículas eran ponderado. Finalmente, el porcentaje para cada intervalo correspondiente al peso total se calcula y se representa como una curva de distribución.

3.3.3. Materia Orgánica contenido

Las muestras utilizadas para el tamizado también se utilizaron para el cálculo del contenido de materia orgánica del suelo. Cada muestra se pulverizó con un mortero. De cada muestra, se obtuvieron tres repeticiones, que se pesaron antes y después de calentar hasta 550 ° C durante el tiempo necesario para alcanzar un peso constante, de acuerdo con lo establecido por la norma DIN 18128 [DIN, 2002]. La diferencia de peso indica la cantidad de sustancias volátiles presentes en la muestra de suelo.

3.3.4. Densidad de Partículas

Una vez que se determinó el contenido de materia orgánica del suelo, la norma alemana DIN 18124 se aplicó a correlacionar el contenido orgánico con la densidad de las partículas de una manera gráfica [DIN, 2011b].

3.4. Cálculo del suelo Propiedades químicas

Para cada tratamiento, se analizaron tres muestras disturbadas. Estas propiedades se obtuvieron siguiendo los protocolos de laboratorio utilizados en el laboratorio del Instituto de Gestión de Aguas Residuales y Protección del Agua de la Universidad Técnica de Hamburg-Harburg (TUHH), tal como se explica a continuación.

3.4.1. La acidez-alcalinidad (pH)

El pH se encontró con la ayuda de un sensor de pH en muestras perturbadas: se tamiza, se suspendió la muestra en una solución de CaCl₂ (relación 01:10) y se mezcló con un agitador magnético durante un período de una hora.

3.4.2. Conductividad Eléctrica

En las muestras de suelo alterado, se extrajeron sub-muestras y se mezclaron con agua destilada o agua des-ionizada. A continuación, se tamiza, y se mezcla durante un período de dos horas. Finalmente, la suspensión se filtró para medir la conductividad.

3.5. Cálculo de Propiedades Hidráulicas

La prueba hidráulica utilizada, en general, está asociados con los suelos que contienen arena, limo, y arcillas. Se pretendió adaptar los procesos para cuantificar la capacidad hidráulica de los diferentes tipos de suelos, tales como enmiendas con terra preta y compost.

3.5.1. Conductividad hidráulica saturada

Para cada tratamiento, se tomaron tres muestras inalteradas con tres repeticiones utilizando cilindros con dimensiones conocidas (9 cm de diámetro y 12 cm de altura). El método de la diferencia de gradiente se aplicó para determinar la conductividad, de acuerdo con DIN 18130 [DIN, 1998]. Las muestras se saturaron por una altura constante en un tubo graduado. Luego, con un cronómetro, el tiempo transcurrido entre el movimiento del agua debido a la diferencia de alturas fue registrado (Figura 3.7)



Figura 3.7. Arreglo experimental para la prueba de conductividad hidráulica.

3.5.2. Curva de Humedad de Retención del Suelo (curva PF)

El método de ollas de presión se utilizó para los niveles predefinidos 0.02, 0.06, 0.3, 1, 3 y 15 bar. La Tabla 3.3 muestra el tiempo transcurrido definido para cada nivel de presión. Hasta 1 bar, se emplearon cilindro de 50 mm de altura y 50 mm de diámetro. Para presiones superiores, se utilizaron anillos, que no tienen en cuenta la estructura del sustrato.

Tabla 3.3. Duración de la presión aplicada a cada nivel para la obtención de la curva PF

Presión (bar)	Duración (días)
0.02	2
0.06	8
0.3	13
1	14
3	23
15	14

A partir de los gráficos de curva de retención, se obtuvieron los niveles de humedad para cada tratamiento, que se compararon con los niveles de humedad medidos directamente a partir de los experimentos con los sensores de humedad. Los criterios utilizados para definir los niveles de humedad del suelo, medido con los sensores de humedad se detallan de la siguiente manera:

- a. Punto de marchitamiento permanente: se define como la humedad después de ser secado naturalmente hasta que la lectura con un sensor de humedad estaba cerca de $0 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$.
- b. Capacidad campo: se denota como la humedad del suelo después de 48 a 72 horas (dependiendo del tipo de suelo según la norma) de haber recibido una entrada de humedad sin observar ninguna percolación en la parte inferior.
- c. Saturación: nivel obtenido por el método gravimétrico de un suelo no alterado y saturado simple. Se obtiene por secado a 105°C hasta alcanzar un peso estable.

IV. Análisis de la dinámica y parámetros del suelo

4.1. Análisis de física del suelo y las propiedades químicas

Como soporte al análisis posterior sobre infiltración, se estudiaron las propiedades físicas del suelo, como el contenido de materia orgánica, porosidad, densidad aparente, densidad de partículas y sus propiedades hidráulicas. El tratamiento CT (franco-limoso) presenta la mayor densidad aparente y a medida que aumenta la materia orgánica, la densidad aparente disminuye. Tratamientos 20TP, 30TP y 50TP muestran valores medios con respecto a los tratamientos extremos, que está en concordancia con los resultados esperados (figura 4.1^a y figura 4.1b). La porosidad tiende a aumentar a medida que aumenta la materia orgánica, mostrando fracciones porosidad similares para todos los tratamientos, excepto para el franco arenoso (figura 4.1c).

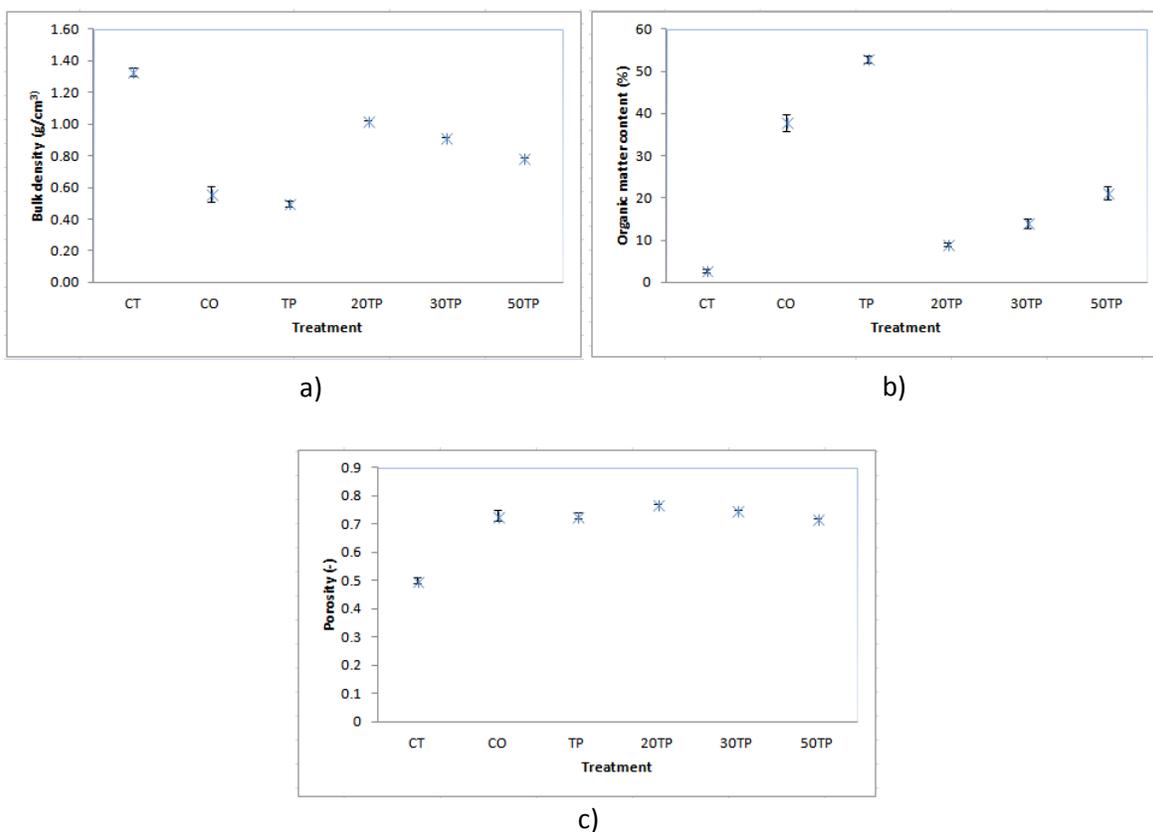


Figure 4.1. Propiedades físicas del suelo para todos los tratamientos, a) Densidad aparente; b) Contenido de material orgánica; c) Porosidad

En la figura 4.1a, se observa que la densidad aparente tiende a disminuir a medida que la materia orgánica aumenta. Por ejemplo, la diferencia entre el tratamiento de control con 1.33 g / cm³ y los suelos de enmienda (compost y terra preta), en promedio con 0,53 g / cm³, es de aproximadamente

un 40% menos. Por otra parte, comparando el tratamiento de control con los tratamientos combinados, se observa una disminución de hasta 57%. Según Porta (1999) los valores más frecuentes de la densidad del suelo de horizontes con alto contenido de arena se encuentran entre 1,45 a 1,60 g / cm³, para horizontes con altos contenidos de materia orgánica es de aproximadamente 0,25 g / cm³, y el promedio de las densidades del suelo son aproximadamente 1,35 g / cm³. La baja densidad es un indicador de baja compactación, lo que facilita el óptimo desarrollo de la zona de las raíces. Cabe señalar que la densidad de los tratamientos con suelos de enmienda terra preta y el compost es muy similar, sin embargo, en los suelos combinados un mayor contenido de terra preta producirá una densidad más baja, pero mayor que compost y enmiendas de terra preta puras. Los suelos con densidades más bajas tienen espacio más poroso y esto podría ser beneficioso para la retención de humedad, en particular cerca de la zona de las raíces.

Valores característicos de contenido orgánico en los suelos de riego son aproximadamente 2-4%, en suelos de pradera sobre 5.8%, y los suelos con alto contenido orgánico superior al 40% [Porta et al., 1999]. La figura 4.1b muestra que el contenido orgánico es considerablemente mayor en suelos de enmienda terra preta en comparación con el otro compost y control. En los tratamientos combinados, el contenido de material orgánico también mejora a medida que aumenta la fracción de terra preta, por ejemplo, para el tratamiento de 30TP la mejora va en el rango de 3 veces hasta 8 veces en 50TP con respecto al tratamiento de control.

También es evidente la relación de la porosidad con el aumento de contenido orgánico (figura 4.1c). Por ejemplo, la porosidad más baja se da por el tratamiento de control y compost. De acuerdo a la literatura texturas gruesas tienden a tener una porosidad de aproximadamente 30 a 50%, en comparación con finas texturas con un 40-60%, sin embargo los suelos con alto contenido orgánico tienen una porosidad total superior a los mencionados antes [Muñoz, 2011]. Debe tenerse en cuenta que el efecto de la porosidad de las características hidráulicas será altamente dependiente de la continuidad de los poros del sistema.

La distribución de partículas se analizó para el tratamiento de control. Dicho análisis presentó un contenido de partículas de 55% con diámetros inferiores a 0,06 mm, de la que se determinó a través del método areómetro [DIN, 2011a] que 5% correspondía a arcilla y 50% a limo. El 45% restante corresponde al contenido de arena, cayendo en la gama de suelos con textura franco-limosa.

La tabla 4.1 muestra los valores de conductividad hidráulica saturada. Se observa que los valores más bajos pertenecen a los tratamientos donde se combina el suelo de textura franco-limosa (CT) con la enmienda de terra preta. La conductividad hidráulica obtenida para la enmienda de compost está en concordancia con los datos disponibles en la literatura, y se puede explicar debido a la composición de los residuos biológicos, mientras la enmienda de terra preta tiene relativamente baja conductividad con respecto a la del compost, a pesar de que poseen fracciones relativamente similares de densidad aparente y porosidad. El efecto sobre la conductividad hidráulica es más evidente en las enmiendas de compost y terra preta. Esto podría estar asociado con el aumento de la agregación del suelo y la macroporosidad. Al analizar los tratamientos combinados (20TP, 30TP y

50TP), la conductividad hidráulica tiende a ser incluso más baja que el tratamiento de control. Esta situación debe ser estudiada con más detenimiento para corroborar este comportamiento.

Tabla 4.1 Conductividad hidráulica saturada para todos los tratamientos

Treatment	Hydraulic Conductivity (cm/d)	Std. Dev
CT	48.11	4.74
CO	488.32	431.6
TP	123.22	187.23
20TP	19.09	
30TP	13.39	
50TP	35.10	

El pH promedio del suelo para todos los suelos de enmienda resultó ligeramente alcalino (figura 4.2), lo que permite una disponibilidad suficiente de elementos orgánicos para el crecimiento adecuado de las plantas [Joshi y Ghose, 2003]. En el caso del compost, el valor de pH se considera aceptable y está lejos de ser un riesgo para producir ácidos orgánicos potencialmente tóxicos. La salinidad es muy baja para todos los tratamientos, lo que es deseable para un crecimiento óptimo de las plantas. Para los suelos se recomienda estar bajo el rango de 4.2 dS / m, que se consideran con el límite de la salinidad no apto para plantas [Kotuby-Amacher, 2003; Nuñez, 2001].

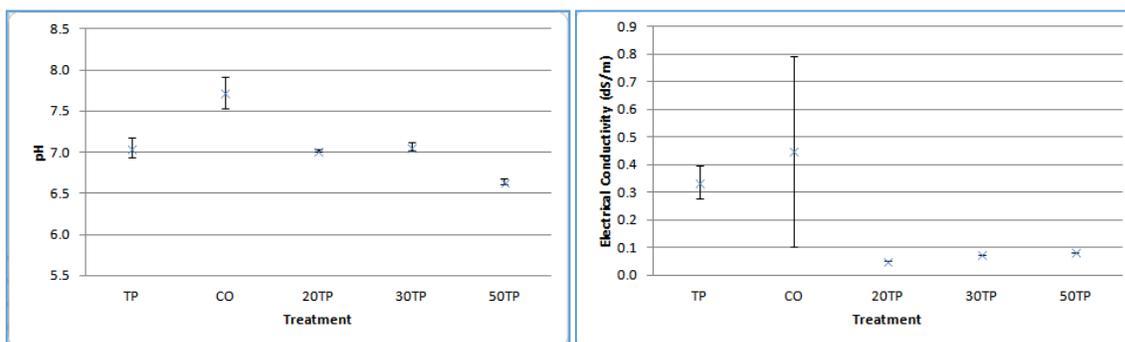


Figure 4.2. Características químicas de las enmiendas

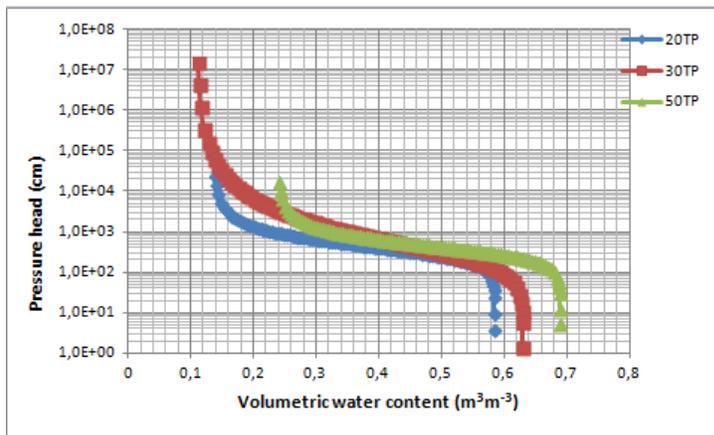
Al analizar la correlación de las distintas variables del suelo con la humedad para los tratamientos de control, compost y terra preta, y los tratamientos combinados (20TP, 30TP y 50TP) se observan en general tendencias similares de correlación entre los tratamientos (tabla 4.2.). Los coeficientes de correlación tienden a ser más altos en los tratamientos de Control, Compost y terra preta que en los tratamientos combinados. En estos últimos, la correlación con el punto de marchitez permanente tiende a aumentar y se observa una correlación negativa con el parámetro de

contenido de humedad disponible para las plantas. Mientras que en los tratamientos CT-CO y TP se visualiza una relación positiva entre contenido de humedad y contenido de agua disponible para las plantas, en los tratamientos 20TP-30TP-50TP se observa que un aumento de humedad del suelo no es un indicador del contenido de agua disponible. La correlación además, indica que la conductividad hidráulica saturada no guarda relación directa con el contenido de humedad.

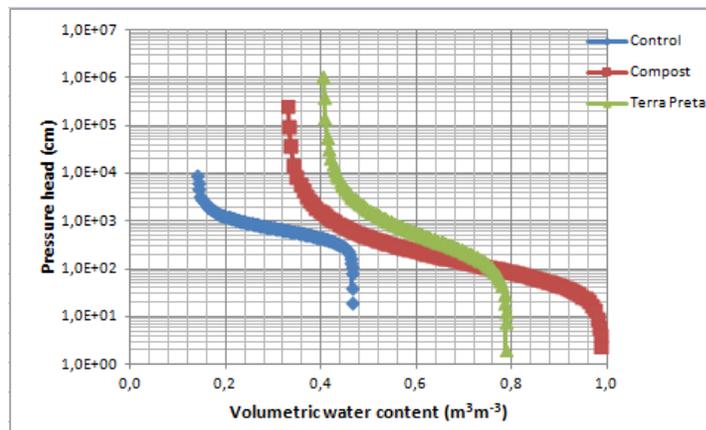
Table 4.2. Coeficiente de correlación para la variable independiente que mostraron correlación con la variable dependiente de humedad del suelo

Variable	Coeficiente de correlación para los tratamientos CT-CO-TP	Coeficiente de correlación para los tratamientos 20TP-30TP-50TP
Organic matter content	0.9255	0.8420
Bulk density	-0.9307	0.8559
Field capacity	0.9593	0.8633
Wilting point	0.7526	0.8510
Available water	0.2579	-0.5688
Saturated water content	0.9215	0.8458
Saturated hydraulic conductivity	0.0520	0.1846

Para todos los tratamientos se determinó la curva de retención de humedad por medio del método de ollas de presión. Se utilizaron muestras disturbadas de suelo, debido a la característica del experimento. La desventaja de usar muestras disturbadas es que no se puede garantizar una estructura característica del suelo. Los resultados mostraron que en la mayoría de las presiones aplicadas, la retención de agua aumentó en enmiendas de terra preta y en los tratamientos combinados con suelo franco-limoso con enmiendas de terra preta a diferentes fracciones (Figura 4.3).



a)



b)

Figure 4.3. Curvas de retención de humedad a) control, compost, enmiendas de terra preta, and b) tratamiento combinado con suelo franco-limoso y enmienda de terra preta a 20, 30 y 50% .

A la misma presión (Figura 4.3a), las enmiendas de terra preta tienen mayor capacidad de retención que el tratamiento de control. El tratamiento de compost presenta más retención a presiones superiores a 100 cm (pF -valor = 2) y lo contrario ocurre a valores de carga de presión más bajas. Esto puede ser debido a valores de conductividad hidráulica más altos para el compost. La mejora del contenido de agua de compost y terra preta, en relación con el tratamiento de control, se atribuye a un aumento en la porosidad de las enmiendas (figura 4.1). Este comportamiento es congruente con la afirmación de que la retención de agua a mayor potencial es altamente dependiente de la capilaridad y la distribución de tamaño de poro, mientras que la retención de agua con potencial más bajo es principalmente resultado de la adsorción superficial [Eusufzai y Fujii, 2012].

La figura 4.3b muestra las curvas de retención de la mezcla de un suelo mineral con diferentes proporciones de terra preta (20, 30 y 50%). Se observa claramente que conforme aumenta el contenido orgánico también aumenta la retención de agua. Todas las curvas tenían una forma similar y el factor de los cambios fue la magnitud de la retención.

De las curvas anteriores se obtuvieron los parámetros hidráulicos con el software RETC (tabla 4.3) [Van Genuchten et.al. 1991]. Estos parámetros van a ser parte de la implementación del modelo de infiltración de los suelos de enmienda terra preta.

Table 4.3. Parámetros hidráulicos del suelo ajustados para las curvas de retención ploteadas en figura 4.3, con la restricción $m=1-1/n$

Treatment	Residual soil moisture (m^3m^{-3})	Saturated content (m^3m^{-3})	α	n
Control	0.1407	0.4650	0.00163	3.2322
Compost	0.3279	0.9862	0.1265	1.7378
Terra preta amendment soil	0.4038	0.7869	0.0038	1.7177
20TP	0.1378	0.5842	0.0029	2.4203
30TP	0.1111	0.6293	0.0038	1.5455
50TP	0.2399	0.6879	0.0026	2.5773

A partir de los datos del suelo ajustados (figuras 4.3 a & 4.3b) se obtuvieron las constantes de agua del suelo. Estas constantes se compararon con los valores de humedad del suelo obtenidos directamente con los sensores de humedad in situ. En general, los valores de humedad obtenidos de la medición directa in situ son más bajos que los de las ollas de presión (tabla 4.4). Por ejemplo, la diferencia de valor de punto de marchitez y la capacidad de campo se atribuye a que en la medición con sensores de la capacidad del suelo para retener el agua está influenciada principalmente por capilaridad y fuerzas de gravedad, en lugar de las altas fuerzas de presión ejercidas por los platos de presión.

Table 4.4 Condiciones de humedad del suelo obtenidos por dos métodos a) ollas de presión, b) medición directa por medio de sensores y método gravimétrico y volumétrico

Treatment	Available water for plants	Fitted soil water retention curves			Soil moisture measured with sensors		
		Saturated soil moisture (m^3m^{-3}) 0.0 pF	Field capacity (m^3m^{-3}) 1.8-2.5 pF	Wilting point (m^3m^{-3}) 4.2 pF	Saturated soil moisture (m^3m^{-3})	Field capacity (m^3m^{-3})	Wilting point (m^3m^{-3})
Terra preta	0.28-0.38	0.787	0.68-0.78	0.404	0.660	0.600	0.580
Compost	0.26-0.54	0.986	0.58-0.86	0.323	0.550	0.430	0.440
Control	0.30-0.32	0.465	0.44-0.46	0.141	0.220	0.170	0.100
<u>Amendment soils:</u>							
20TP	0.33-0.44	0.584	0.47-0.58	0.138	0.320	0.260	0.200
30TP	0.39-0.50	0.629	0.50-0.61	0.111	0.340	0.290	0.270
50TP	0.34-0.44	0.688	0.58-0.68	0.240	0.420	0.400	0.390

4.2. Análisis del estado de humedad del suelo para los tratamientos: CT-CO-TP

La figura 4.4a muestra la comparación entre los diferentes tratamientos utilizados: suelo convencional el cual corresponde a un suelo de textura franco-limosa (CT), el compost compuesto por residuos domiciliarios (CO) y terra preta (TP) para las tres repeticiones de los tratamientos. Aunque en todos los tratamientos los valores de la mediana son similares, el cilindro 3 presenta diferencias principalmente en el tratamiento de la enmienda de terra preta (TP) con respecto a la mediana a la misma profundidad. Se determinó que esta diferencia se debe a que en el montaje experimental, por su posición, el cilindro tres recibía menos agua en comparación con los otros dos tratamientos. Esto significa que hay más homogeneidad entre las varianzas (mejor superposición) a la misma profundidad en los cilindros 1 y 2.

Los tratamientos con la enmienda de compost CO1 y CO2 muestran homogeneidad en los datos a una profundidad de 4 cm y heterogeneidad de datos para las otras profundidades (15 cm y 26 cm). El suelo convencional (franco-limoso) muestra superposición de medianas en cilindros CT1 y CT2 a una profundidad de 4 cm; y en 15 y 26 cm de profundidad el solapamiento se observa en los tres cilindros. Los valores atípicos (valores demasiado bajos) se observan a una profundidad de 4 cm para todos los cilindros, y son causados principalmente por los valores iniciales del experimento 1,

debido a que al inicio del experimento estos valores se encuentran por debajo de la capacidad de campo.

Para el tratamiento de terra preta (TP) existen diferencias (sin superposición) entre mismas profundidades para los tres cilindros. Por lo tanto, no se recomienda un análisis estructurado por profundidad. El análisis para este caso se realizó con las muestras del grupo II.

Seguido, se analizaron para tratamientos CT y CO los cilindros 1 y 2 y las repeticiones 2 y 3 únicamente, con el fin de reducir el impacto de los valores atípicos debido a las condiciones iniciales de agua en el suelo. La Figura 4.4b muestra que el contenido general de humedad se comporta similar para los cilindros 1 y 2 en los tratamientos de CT y CO. Esto significa que los datos presentan un cierto grado de homogeneidad entre repeticiones del mismo tratamiento. En la figura 4.4c se observa la mediana de las diferencias del contenido de agua del suelo entre el suelo franco-limoso (CT) y el tratamiento de compost. El tratamiento CT presenta un valor medio de humedad del suelo de alrededor 20% en volumen, mientras que el compost muestra aproximadamente el 45% en volumen de humedad. La figura 4.4d muestra la existencia de dos muestras con características claramente diferenciables, lo que justifica que los tratamientos CT y CO son suficientemente diferentes para ser analizados por separado.

La tabla 4.5 muestra que para 4 cm profundidad el coeficiente de variación es mayor que a otras profundidades para todos los tratamientos. La responsable de esta variación podría ser la proximidad del sensor de la humedad del suelo a la superficie. Por lo tanto, se toma para el análisis estadístico de humedad del suelo profundidades de 15 y 26 cm únicamente. Además, no hay ninguna diferencia observada entre los valores de humedad del suelo para la media y la mediana. Esto permite la utilización de los valores de mediana de la humedad del suelo como valor representativo de la distribución (Tabla 4.5).

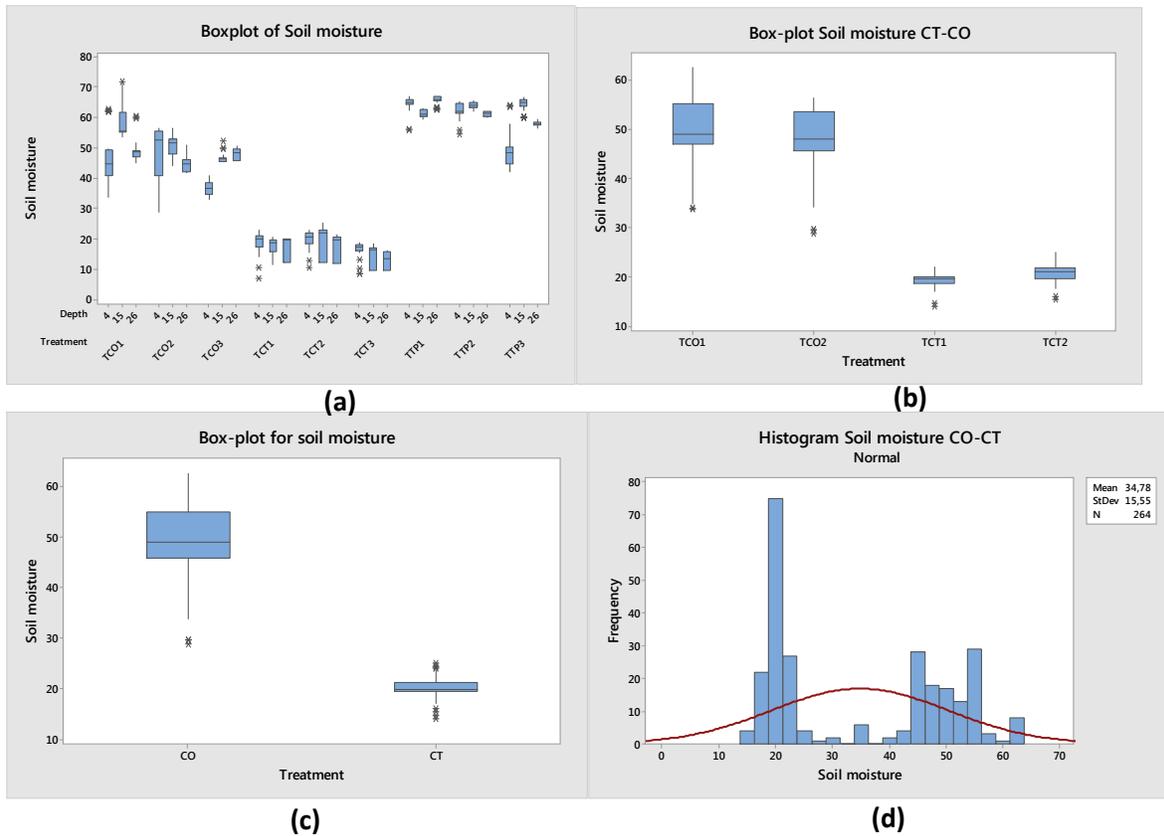


Figura 4.4. Gráficos de cajas para la comparación de mediana de los tratamientos CT y CO a varias profundidades para diferentes variables.

Tabla 4.5. Estadísticas descriptivas de la variable de humedad de suelo para los tratamientos CO y CT.

Treatment	Depth (cm)	N	Mean (Vol-%)	StDev (Vol-%)	Median (Vol-%)	CV
CO1	4	22	46.91	10.43	44.53	22.24
	15	22	55.98	2.63	55.20	4.69
	26	22	48.52	0.89	48.80	1.84
CO2	4	22	50.11	10.02	55.03	19.99
	15	22	49.47	3.24	50.93	6.54
	26	22	45.84	1.88	45.82	4.10
CT1	4	22	19.42	2.18	19.90	11.21
	15	22	19.15	0.92	19.10	4.80
	26	22	19.66	0.22	19.64	1.10
CT2	4	22	19.45	1.85	19.46	9.52
	15	22	22.57	1.13	22.32	5.00
	26	22	20.30	0.65	20.49	3.21

Para determinar cómo el valor medio de la humedad del suelo se ve afectado por los diferentes tratamientos, se realizó un análisis de varianza asumiendo homogeneidad de las varianzas y la distribución normal (Tabla 4.6). El análisis de dos factores de varianza presenta el modelo matemático:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (4.1)$$

donde:

y_{ijk} es la humedad del suelo en k-tiempos de tratamientos i y profundidad j

τ_i es el efecto medio del factor tratamiento al nivel i, $i=1,2,3,4,5,6$,

β_j es el efecto medio del factor profundidad al nivel j, $j=1,2,3$

$(\tau\beta)_{ij}$ es el efecto medio de la interacción entre tratamiento y profundidad al nivel ij

ε_{ijk} es el error aleatorio

El análisis de varianza muestra un valor P inferior a $\alpha = 0,05$ para todos los factores (tratamiento, la profundidad y la interacción entre los factores). Esto significa que, con un 95% de confianza existe al menos una diferencia entre los tratamientos, la profundidad y su interacción (Tabla 4.6). Aunque, en general, la varianza explicada por los grupos (tratamiento, la profundidad y la interacción entre ellos) es de aproximadamente 90,26%. La figura 4.5 muestra que los residuos de los valores de humedad del suelo para los tratamientos de compost y el suelo convencional (franco arenoso) no se comportan como una distribución normal. Además de la gráfica de valores ajustados, se muestra la presencia de dos poblaciones bien definidas, del lado izquierdo los residuos del suelo franco-limoso con valores de humedad del suelo homogéneos, y al lado derecho, los residuos de compost con datos heterogéneos que podría deberse a los valores extremos.

Tabla 4.6. Resultados del análisis de varianza de dos factores para los tratamientos CT-CO & TP

Source	Degree of freedom	Adj. SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Treatment	3	57152.7	19050.9	830.87	0.000
Depth	2	539.8	269.9	11.77	0.000
Error	258	5915.7	22.9		
Interaction	6	841.3	140.2	6.96	0.000
Treatment*Depth					
Pure Error	252	5074.4	20.1		
R-sq			90.26%		

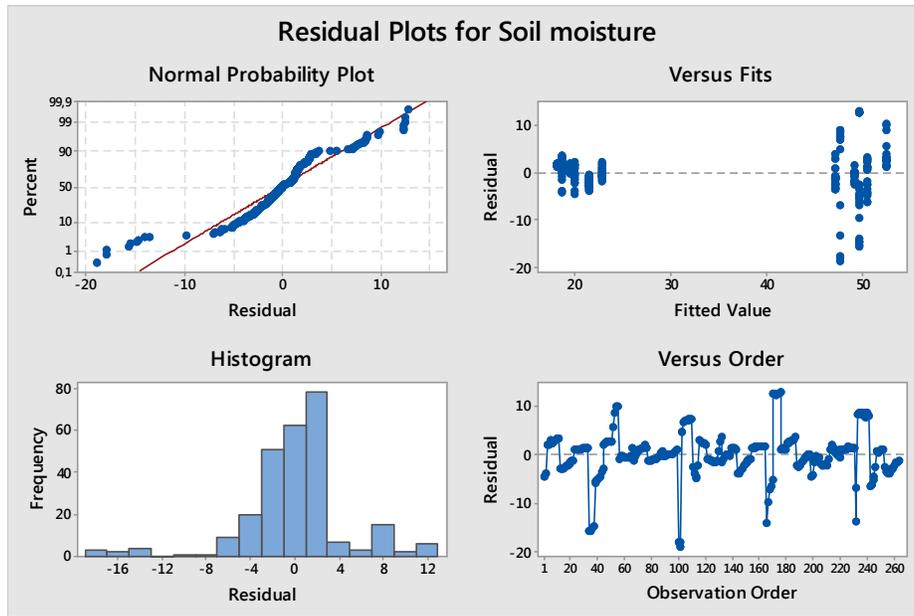


Figura 4.5. Residuos de los datos generales para los tratamientos de compost y control.

En el análisis de los datos separado por tratamiento (figura 4.6) se observa con más detalle el patrón de los datos de humedad del suelo. La figura 4.6a muestra los residuos de los valores de humedad del suelo del tratamiento con suelo franco-limoso (CT), los cuales presentan proximidad a una distribución normal, con las variaciones entre réplicas estadísticamente homogéneas. La mayoría de los valores extremos se atribuyen al proceso de ejecución del experimento de lluvia que hace oscilar los valores de humedad entre capacidad de campo, saturación y capacidad de campo nuevamente.

El tratamiento de compost (figura 4.6b) muestra un comportamiento similar a los datos del tratamiento franco-limoso, las variaciones son homogéneas y el contenido de agua aumenta hasta alcanzar un valor máximo, que luego se reduce debido por el proceso de percolación. En ambos casos (figuras 4.6a y 4.6b) la prueba de Levene muestra un valor de p mayor que $\alpha = 0.05$, indicando que las variaciones entre las réplicas del mismo tratamiento son bastante homogéneas.

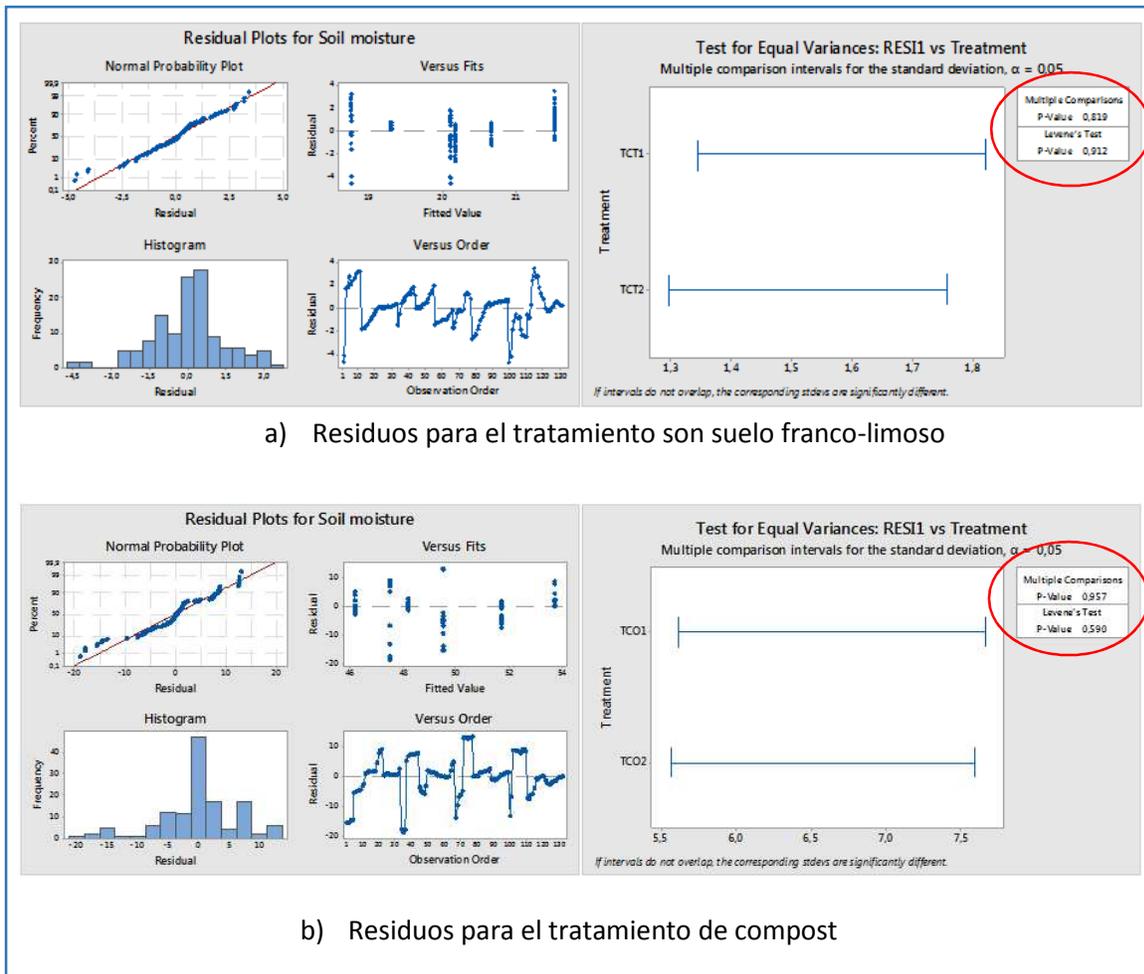


Figura 4.6. Residuos del tratamiento de control y la enmienda de compost

Aunque el supuesto de normalidad de los datos de humedad del suelo no se ajusta (Figura 4.7.), si lo hace a homogeneidad de las varianzas, por lo tanto se continúa el análisis de la varianza de los residuos de los datos de humedad del suelo para los tratamientos.

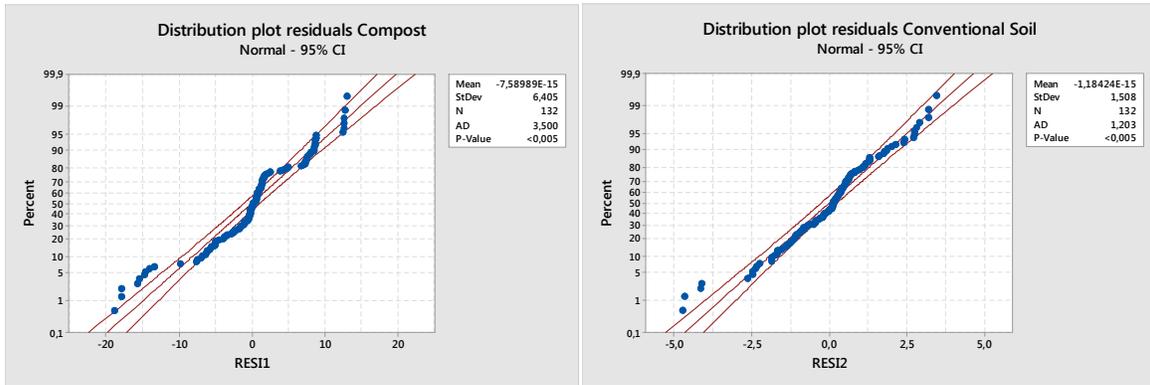


Figure 4.7. Gráfico de normalidad para los tratamientos de compost y control.

La Figura 4.8. muestra que la humedad del suelo de compost tiene un patrón similar en ambas repeticiones. Las diferencias entre ellos podría ser debido a la intensidad de la lluvia que era en promedio más alta para la repetición 1 (CO1) que para la repetición 2 (CO2) . Lo mismo ocurrió con el tratamiento del tratamiento de control, donde se aplicó un evento de lluvia superior a la repetición CT2.

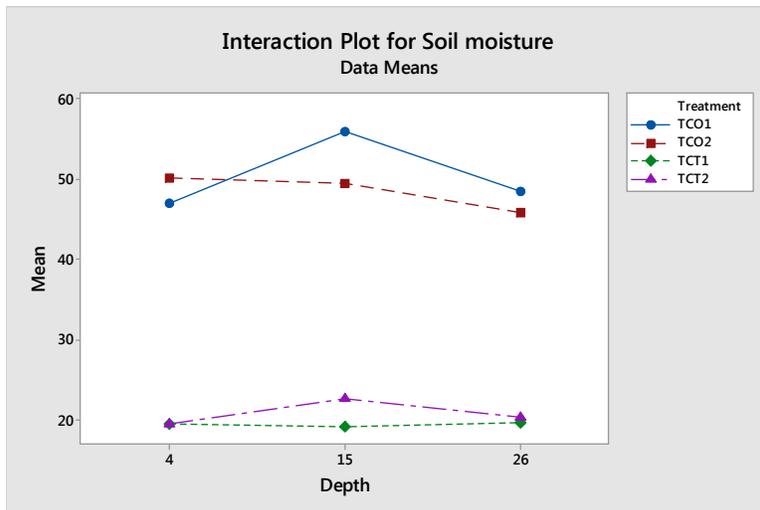


Figure 4.8. Interacción de la humedad del suelo para los tratamientos de control y compost.

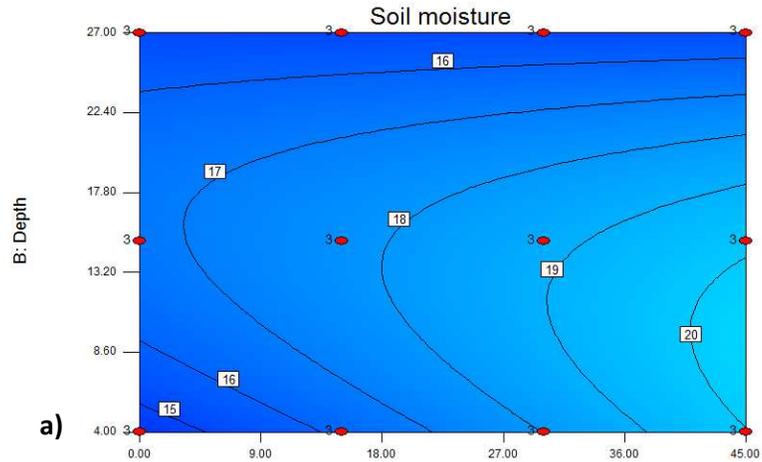
Al analizar el comportamiento del movimiento del agua a través de las diferentes profundidades (4, 15 y 26 cm) para todos los tratamientos se observa que el frente de agua no es tan evidente como para el tratamiento de control. El tratamiento de control (CT) muestra un contenido de humedad similar a lo largo de todas las profundidades, y los tratamientos de compost (CO) y terra preta (TP) evidencian un mayor contenido de humedad en el medio de las muestras (Figura 4.9). Para el

tratamiento de control (Figura 4.9a) el frente de agua viaja más lentamente en comparación con los otros tratamientos de compost y terra preta (Figuras 4.9b y c,). Por otra parte, la humedad en el punto central (15 cm) es más alta y el suelo es más seco hacia los extremos de las muestras. La figura 4.9b muestra el frente de agua para el tratamiento de compost, que avanza a una velocidad muy similar con respecto a terra preta. El frente de agua avanza hasta unos 15 cm, donde la humedad se mantiene a valores constantes a lo largo de la sección restante del perfil. En el caso de la figura 4.9c, como en el compost, el tratamiento de la terra preta presenta una zona de saturación: desde la parte superior, descendiendo, llega a un punto en el que la mayor parte del perfil se mantiene a una humedad relativamente homogénea.

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Original Scale
 (median estimates)
 Soil moisture
 • Design Points
 66.3913
 12.6587

X1 = C: Time
 X2 = B: Depth

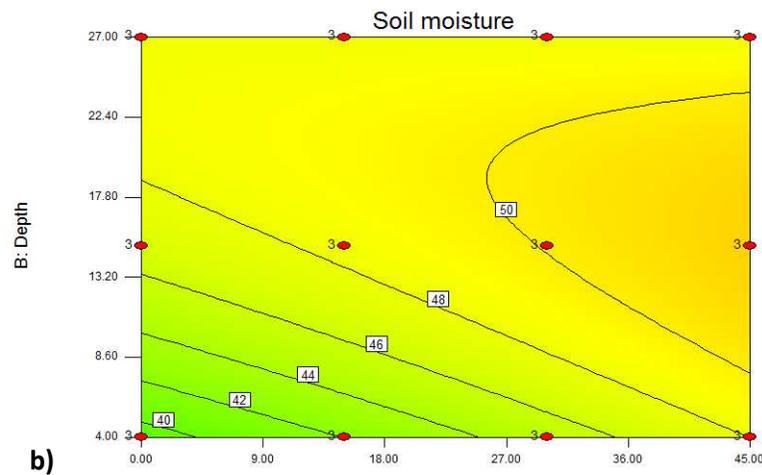
Actual Factor
 A: Treatment = CT



Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Original Scale
 (median estimates)
 Soil moisture
 • Design Points
 66.3913
 12.6587

X1 = C: Time
 X2 = B: Depth

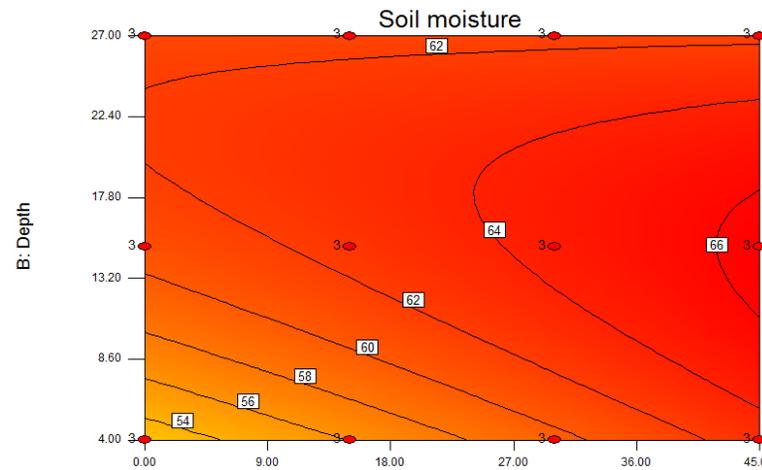
Actual Factor
 A: Treatment = CO



Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Original Scale
 (median estimates)
 Soil moisture
 • Design Points
 66.3913
 12.6587

X1 = C: Time
 X2 = B: Depth

Actual Factor
 A: Treatment = TP



c)

Figure 4.9. Desplazamiento de la humedad del suelo en función de la profundidad y el tiempo, a) tratamiento de control (CT), b) Enmienda de compost (CO), y c), enmienda de terra preta (TP).

4.3. Análisis del estado de humedad del suelo para los tratamientos: 20TP-30TP-50TP

La figura 4.10a muestra la comparación de los tratamientos de enmienda de terra preta mezclada con el suelo franco-limoso 20TP, 30TP y 50TP. Se puede observar que el tratamiento 50TP presenta la mayor humedad del suelo, debido principalmente al mayor contenido de materia orgánica. Sin embargo, los valores de humedad del suelo son cercanos uno del otro, demostrando la baja variación de la humedad del suelo a lo largo del perfil del suelo. Por otro lado, el tratamiento 30TP muestra una gama más amplia de humedad del suelo, lo que sugiere menos homogeneidad a lo largo del perfil (figura 4.10b). El tratamiento 20TP muestra valores más atípicos que los otros dos tratamientos y el rango de valores correspondientes al contenido de agua en el suelo es más restringido. Esto puede ser debido a la dinámica entre infiltración y percolación, lo cual pudo introducir un factor de cambio entre los valores iniciales y finales de la prueba experimental. Por otra parte, la figura 4.10b evidencia un mayor contenido de agua del suelo en la superficie, que disminuye conforme el agua se mueve hacia abajo en el perfil del suelo, tendiendo hacia valores de capacidad de campo. Esto evidencia la presencia de procesos de percolación. Los otros dos tratamientos, 30TP y 50TP, a una profundidad de 26 cm todavía no están cerca de la capacidad de campo, lo que indica que estos dos tratamientos podrían aceptar un mayor contenido de agua...

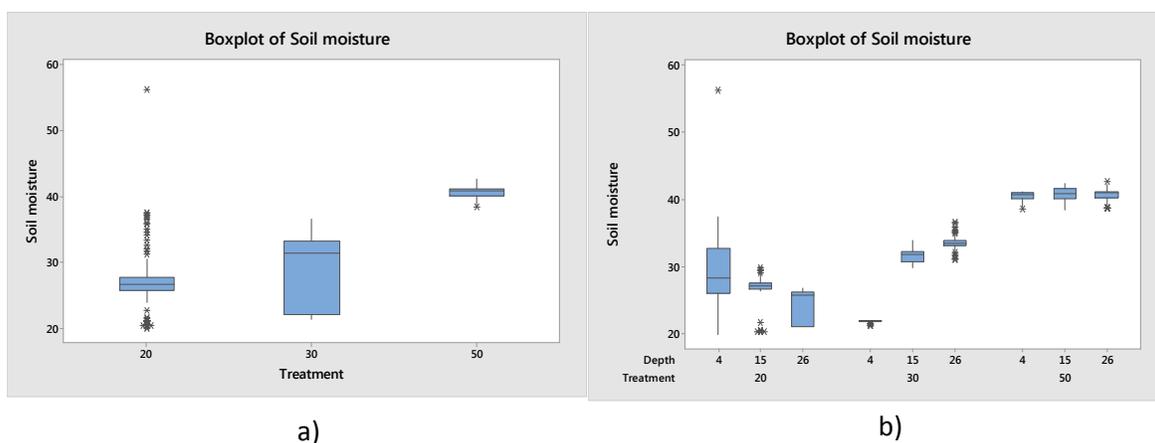


Figure 4.10. a) Análisis de cajas para la comparación de medianas de los tratamientos combinados (20TP, 30TP, 50TP), b) Análisis de cajas para la comparación de medianas de los tratamientos combinados a diferentes profundidades.

La Tabla 4.7 provee información sobre el grado de variación del contenido de agua en el suelo para los tres tratamientos 20TP, 30TP y 50TP. Se observa que el tratamiento de 20TP presenta, en general, un mayor coeficiente de variación que los otros tratamientos. Esto es debido a la mayor conductividad hidráulica y un proceso de percolación más significativo. Debido a que la media y la mediana son muy similares para todos los tratamientos, los siguientes análisis se basan en la mediana, la cual se considera más robusta para el análisis.

Tabla 4.7. Estadística descriptiva de la humedad del suelo para los tratamientos combinados.

Treatment	Depth (cm)	N	Mean (Vol-%)	StDev (Vol-%)	Median (Vol-%)	CV
20TP	4	54	29,74	5,73	28,37	19,25
	15	54	26,44	2,75	27,21	10,39
	26	54	24,59	2,30	25,83	9,33
30TP	4	54	21,96	0,20	21,98	0,91
	15	54	31,66	1,11	31,80	3,51
	26	54	33,55	1,14	33,46	3,40
50TP	4	54	40,41	0,69	40,68	1,71
	15	54	40,85	1,02	40,89	2,48
	26	54	40,72	1,08	40,95	2,64

La figura 4.11 muestra que los residuos de los tratamientos 20TP, 30TP y 50TP no se distribuyen normalmente, por lo tanto el análisis de varianza se realizó por medio de un análisis no paramétrico utilizando el test de Kruskal-Wallis (Tabla 4.8).

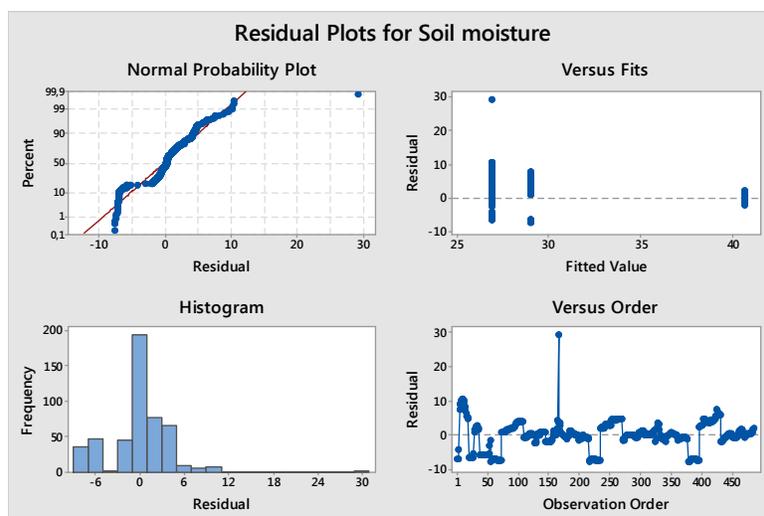


Figure 4.11. Residuos para los tratamientos combinados

Asumiendo que la hipótesis nula se refiere a que no hay diferencias entre los tratamientos, la prueba de Kruskal-Wallis para el análisis de la varianza de la humedad del suelo entre los tratamientos muestra que la mediana (para todos los tratamientos) es significativamente diferente con un 95% de confianza. Esto lo confirman los datos en la figura 4.10 y la tabla 4.8, que indican que a medida que el contenido de terra preta aumenta, el contenido de agua del suelo aumenta también. Esto es

evidente al comparar los tratamientos de suelo franco-limoso (CT1 y CT2), con los combinados con diferentes fracciones de terra preta (20TP, 30TP, 50TP) (figura 4.12).

Table 4.8. Test de Kruskal Wallis para el análisis de varianza para la humedad del suelo (probabilidad del 95% de confianza)

Treatment	N	Median	Ave Rank	Z
20TP	64	26,63	168,5	0,38
30TP	64	33,28	232,5	6,39
50TP	64	40,94	296,5	12,41
CT1	68	19.83	41,3	-12,04
CT2	68	21.41	95,7	-6,72
Overall	328		164,5	
H=307,62		DF=4	P=0,000	

Además, los cambios en la humedad del suelo son más evidentes para suelos franco-limosos, y conforme se añade terra preta, los cambios en el contenido de agua tienden a disminuir. Por lo tanto, también refuerza el cuestionamiento de la suposición de normalidad de los datos de los residuos de la ANOVA (análisis de varianza), en cuanto a la utilización de las medianas, ya que son una medida más precisa de la tendencia central en este caso (figura 4.12).

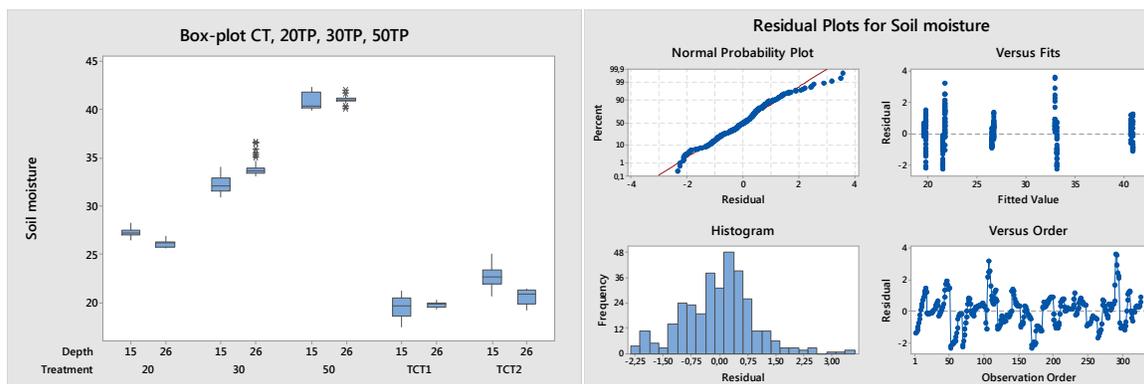


Figure 4.12. Análisis de cajas y residuos para los tratamientos de control (franco-limoso) y tratamientos combinados con terra preta al 20%, 30% and 50% (20TP, 30TP, 50TP)

Tabla 4.9 confirma la baja variación entre los datos de humedad a lo largo del perfil del suelo para los tratamientos. Las variaciones más altas se encontraron en el suelo franco-limoso(CT). Esto

significa que durante el tiempo de entrada y salida de agua (infiltración-percolación), los suelos combinados con terra preta tienden a mantener el contenido de humedad casi constante, sin producirse infiltración o percolación significativa.

Tabla 4.9. Estadística descriptiva para la humedad del suelo de los tratamientos CT, 20TP, 30TP and 50TP

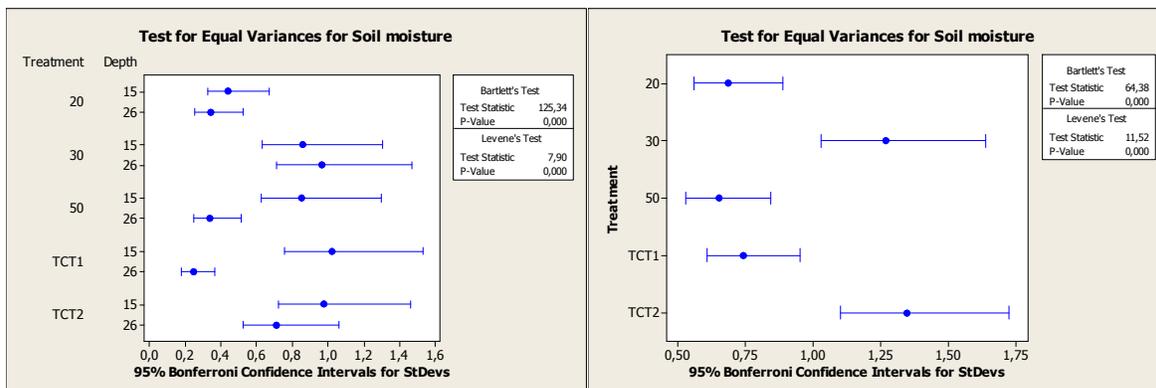
Treatment	Depth (cm)	N	Mean (Vol-%)	StDev (Vol-%)	Median (Vol-%)	CV
20TP	15	32	27,25	0,44	27,24	1,62
	26	32	26,13	0,34	26,13	1,32
30TP	15	32	32,24	0,86	32,09	2,66
	26	32	34,01	0,97	33,65	2,84
50TP	15	32	40,80	0,85	40,33	2,09
	26	32	41,01	0,34	40,99	0,82
CT1	15	34	19,60	1,02	19,64	5,21
	26	34	19,78	0,24	19,84	1,23
CT2	15	34	22,73	0,98	20,64	4,29
	26	34	20,65	0,71	20,94	3,43

La prueba de homogeneidad de las varianzas (figura 4.13) muestra que hay heterogeneidad entre las varianzas en los tratamientos especialmente a una profundidad de 26 cm. Si sólo se ejecuta la prueba para una profundidad de 15 cm (sacando el tratamiento 20TP el cual es heterogéneo respecto a los otros tratamientos), se puede observar (figura 4.13c) que se consigue la homogeneidad de la varianza. Esto sucede porque la lluvia produce cambios en la humedad del suelo debido a la infiltración y el proceso de percolación. El tratamiento de 20TP reacciona diferente con respecto a la variación del contenido de humedad, en contraste con los otros tratamientos.

El comportamiento del contenido de humedad a través de la profundidad durante el experimento se muestra en la figura 4.14, para una duración de simulación de lluvia de 90 minutos. El tratamiento 20TP muestra un mayor contenido de humedad cerca de la superficie a lo largo del tiempo. A pesar de los aumentos de humedad a lo largo del perfil, cerca de la superficie es donde se da mayor humedad. Por otra parte, las variaciones de humedad en el tiempo son más rápidos en comparación con los otros tratamientos. En el tratamiento 30TP se identifican tres regiones de humedad durante la simulación, la cual va desde menos contenido de agua cerca de la superficie, a un contenido mayor en las regiones más profundas. Tratamiento 50TP muestra una zona con mayor contenido de agua, que es más homogéneo y varía lentamente en el tiempo, a través de toda la profundidad, en contraste con los otros tratamientos.

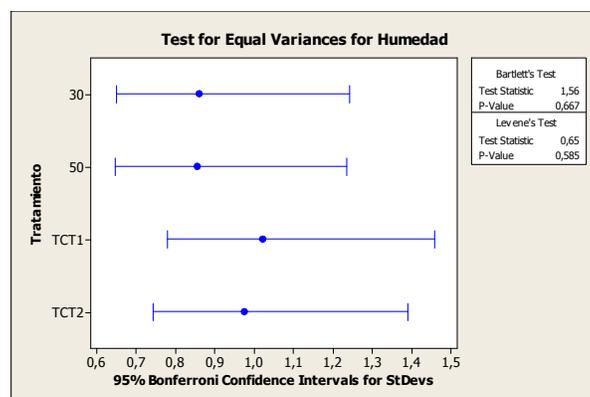
Por lo tanto, la distribución de contenido de agua a lo largo del perfil del suelo depende del grado de combinación del suelo con textura franco-limosa con enmiendas de terra preta; esto significa

que al aumentar el contenido de materia orgánica, el frente de agua no será tan evidente como para suelos franco-limoso, ya que la mayor capacidad de retención de agua tenderá a retardar la percolación.



a)

b)

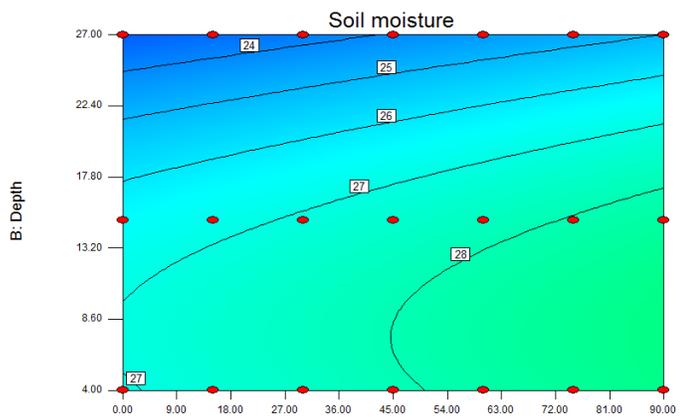


c)

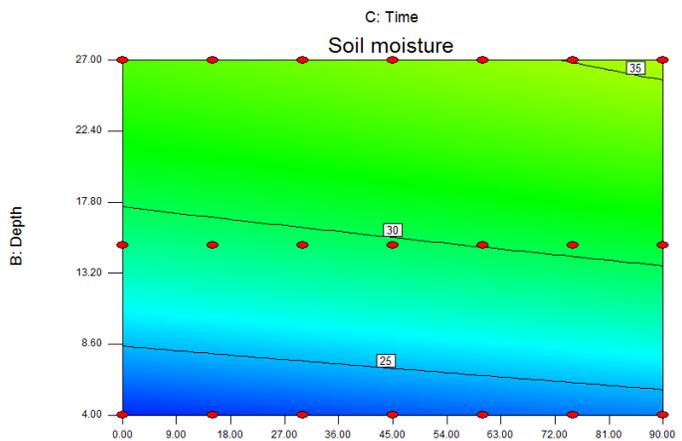
Figure 4.13. Prueba de homogeneidad de varianza para los tratamientos CT, 20TP, 30TP and 50TP. a) Igualdad de varianza para los tratamientos a diferentes profundidades, b) Igualdad de varianzas para todos los tratamientos, c) Ejemplificación de igualdad de varianzas a una profundidad de 15 cm.

A medida que aumenta la profundidad (Figura 4.15), el tratamiento 20TP muestra una tendencia opuesta con respecto al tratamiento 30TP. Esto significa que a medida que aumenta la profundidad, el tratamiento 20TP tiende a ser más seco y el tratamiento 30TP más húmedo. En contraste, las tendencias son similares para los tratamientos 30TP y 50PT, donde el contenido de humedad aumenta ligeramente con la profundidad. En general, el tratamiento 50TP muestra los niveles de humedad más altos.

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Soil moisture
 ● Design Points
 42.2362
 21.1641
 X1 = C: Time
 X2 = B: Depth
 Actual Factor
 A: Treatment = 20



Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Soil moisture
 ● Design Points
 42.2362
 21.1641
 X1 = C: Time
 X2 = B: Depth
 Actual Factor
 A: Treatment = 30



Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Soil moisture
 ● Design Points
 42.2362
 21.1641
 X1 = C: Time
 X2 = B: Depth
 Actual Factor
 A: Treatment = 50

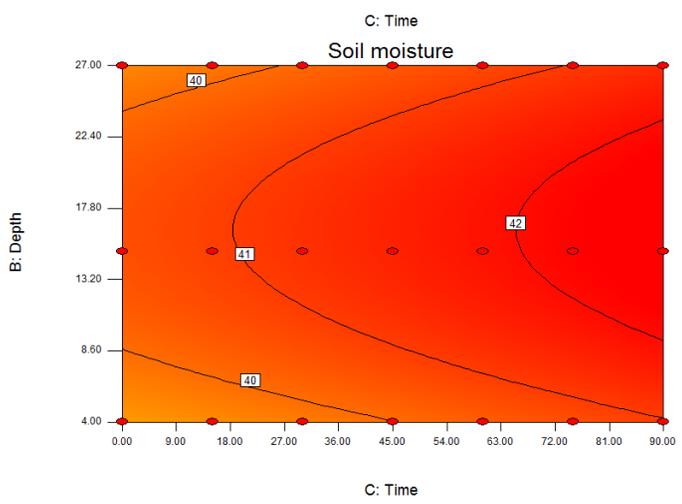


Figure 4.14. Frente de humedad en función de la profundidad y el tiempo, a) Tratamiento 20TP, b) Tratamiento 30TP, c) Tratamiento 50TP

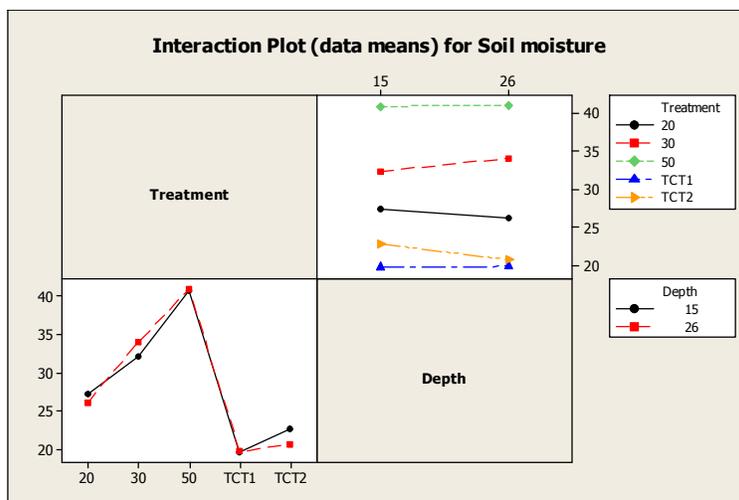
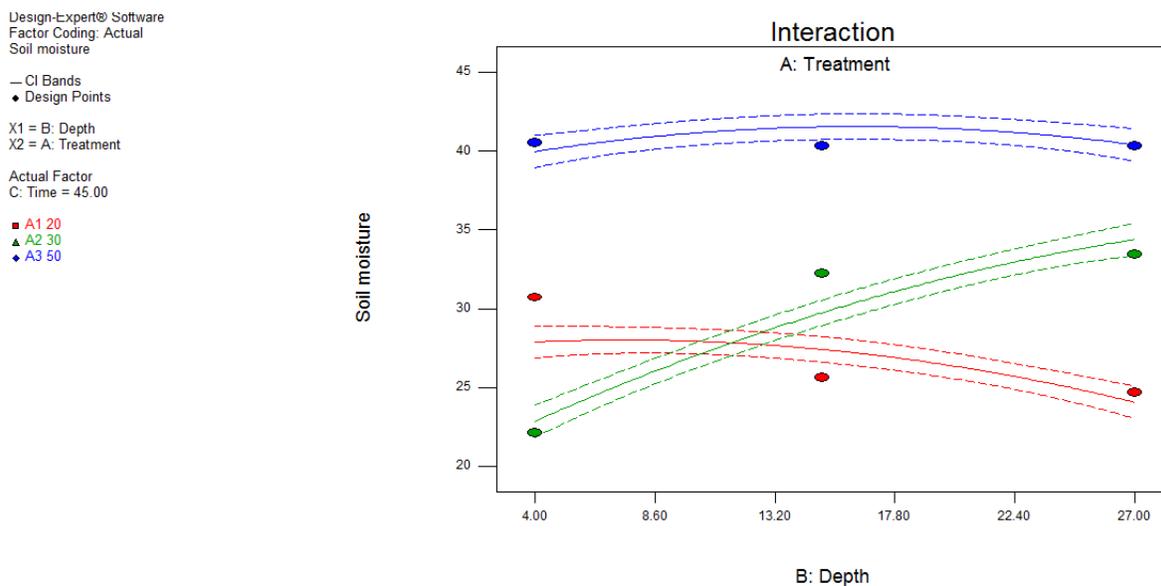


Figure 4.15. Contenido de humedad del suelo en función de la profundidad

4.4. Análisis de infiltración y percolación

En cuanto a la infiltración de los tres tratamientos combinados (figura 4.16a), se puede observar que el tratamiento con un mayor contenido de materia orgánica (50TP) muestra una tasa de infiltración promedio menor. El tratamiento 20TP muestra mayores tasas medias de infiltración en el inicio de los experimentos; y alcanza su pico máximo anterior al minuto 45. Para este tratamiento se obtuvo una mayor velocidad de infiltración en la superficie por una formación de columna de agua más pequeña (Figura 19a).

Al comparar las tasas promedio de infiltración entre 20TP y 30TP (figura 4.16b), se puede observar que la infiltración de 20TP alcanza su pico más rápido que 30TP. Mientras que para 30TP, todavía a los 75 minutos sigue ascendiendo.

La figura 4.17a muestra las tasas medias de percolación para los tratamientos 20TP, 30TP y 50TP. El pico promedio de percolación se produce más rápido para el tratamiento 20TP (45 minutos) que para los tratamientos 30TP (75 minutos) y 50TP (90 minutos). Figura 17b evidencia la respuesta de percolación para tratamientos 20TP y 30TP. Ambos picos alcanzan valores similares, pero 30TP enfrenta un retraso mayor que 20TP.

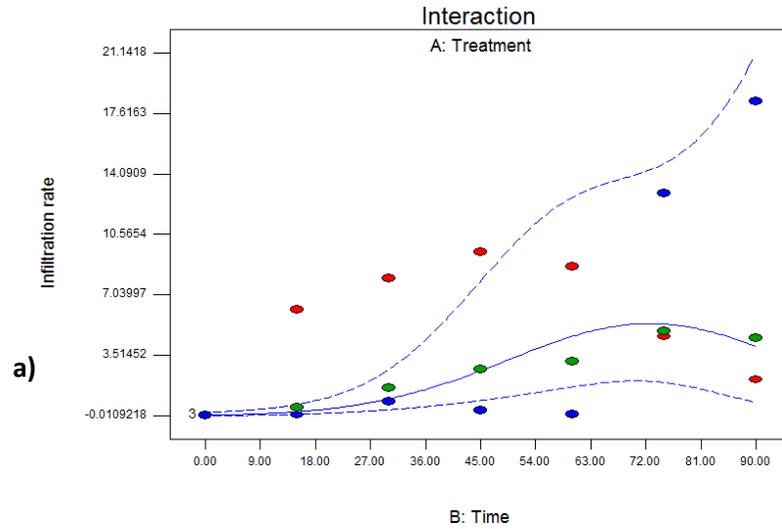
En la comparación de las tasas de percolación e infiltración promedio (figuras 4.16 y 4.17) para el tratamiento 20TP, se observa que la relación entre la tasa de percolación-infiltración es de 177: 1. Esto indica que la tasa de percolación es 177 veces más grande que la tasa de infiltración. Para el tratamiento 30TP la proporción es de 400: 1 y para el tratamiento 50TP la proporción es de 30: 1. La figura 18 explica esta situación. Durante los experimentos (simulación de lluvia) se formó una columna de agua (en casi todos los cilindros) que desaparece después del cese de la lluvia o con cierto retraso durante la simulación de lluvia. En el análisis del proceso de percolación después de la simulación de lluvia, es importante considerar el efecto de la columna de agua. Se puede observar que la columna de agua formada en el tratamiento 20TP es más pequeña que los otros tratamientos. Esto hace pensar que su contribución tiende a aumentar no sólo una percolación anticipada, pero también muestra una velocidad de infiltración mayor. El tratamiento 30TP presenta que la columna de agua media es mayor que el tratamiento anterior y presenta un mayor retardo para desaparecer, lo que sugiere que su velocidad de infiltración es menor. El tratamiento 50TP presenta un escenario diferente a los tratamientos anteriores. Se acumula una mayor cantidad de agua en la superficie y la pendiente descendente después del pico es menos pronunciada, originando un tiempo de acumulación mayor en la superficie, incluso después de la simulación del experimento. Si se refiere a la figura 4.17a, y a las correlaciones hechas al inicio del párrafo, se deduce que la tasa de percolación es similar a los otros tratamientos, por lo que en el tiempo se tiende a pensar que el tratamiento combinado conforme aumenta el contenido de materia orgánica tiende a retener mayor humedad.

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Original Scale
 (median estimates)
 Infiltration rate

— CI Bands
 ● Design Points

X1 = B: Time
 X2 = A: Treatment

■ A1 20TP
 ▲ A2 30TP
 ◆ A3 50TP



Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Infiltration rate

— CI Bands
 ● Design Points

X1 = B: Time
 X2 = A: Treatment

■ A1 20TP
 ▲ A2 30TP

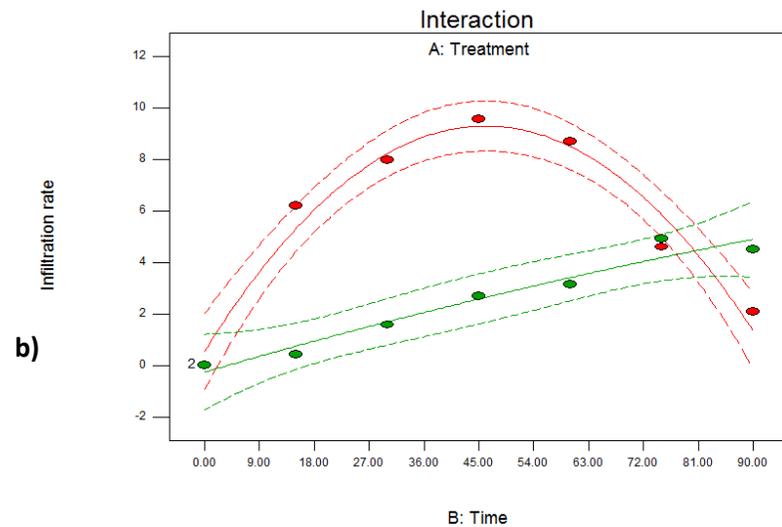


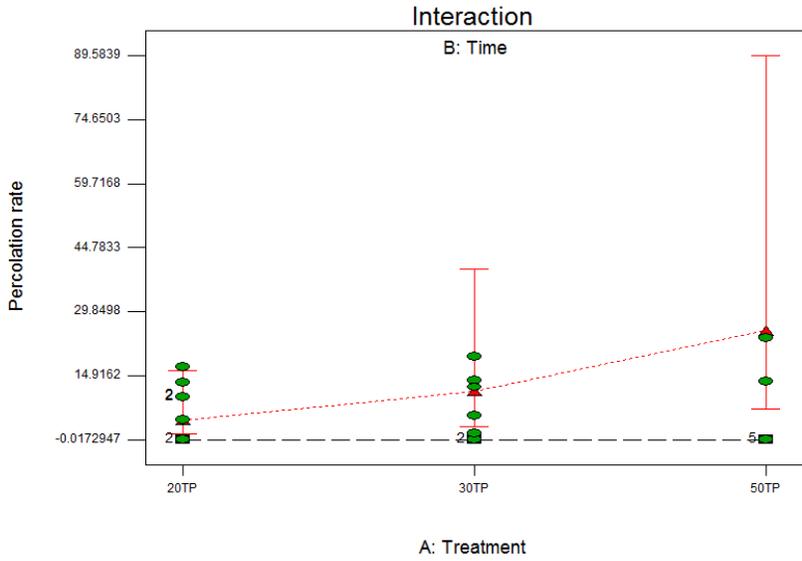
Figure 4.16. a) Comportamiento de la velocidad de infiltración para los tres tratamientos combinados, b) Comparación de la velocidad de infiltración entre tratamientos 20TP y 30TP. La razón de percolación-infiltración con respecto a la columna de agua, evidencia que los tratamientos combinados presentan mayor capacidad de retención de agua que los otros tratamientos.

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Original Scale
 (median estimates)
 Percolation rate

◆ Design Points
 X1 = A: Treatment
 X2 = B: Time

■ B- 0.00
 ▲ B+ 90.00

a)



Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Percolation rate

— CI Bands
 ● Design Points
 X1 = B: Time
 X2 = A: Treatment

■ A1 20TP
 ▲ A2 30TP

b)

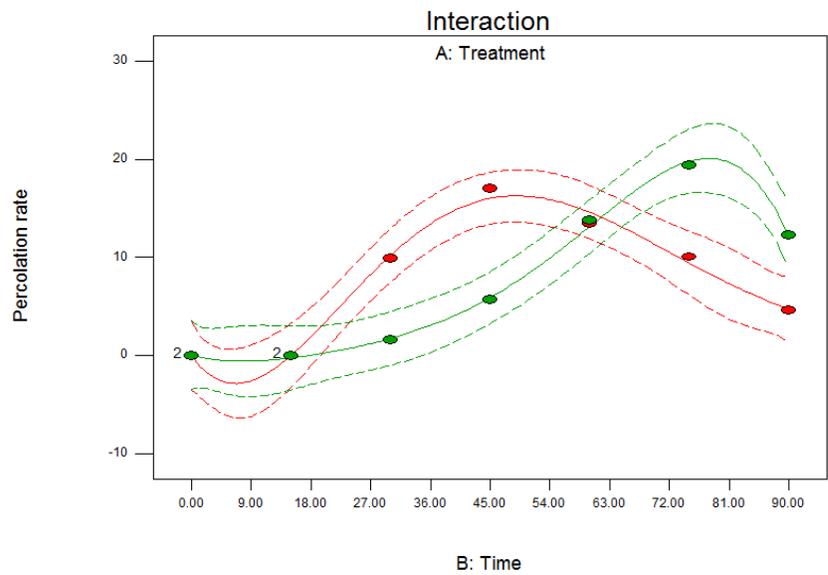


Figura 4.17. Percolación media para los tratamientos combinados, a) interacción entre tratamientos, y b) comparación de la percolación entre tratamientos 20TP and 30TP

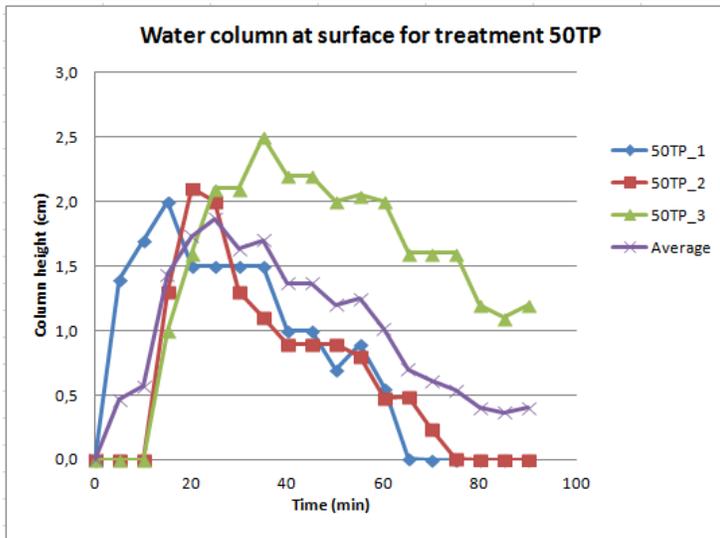
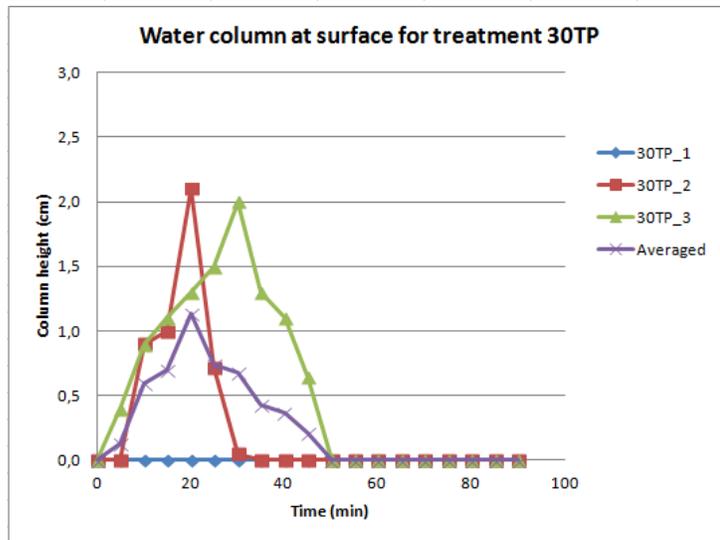
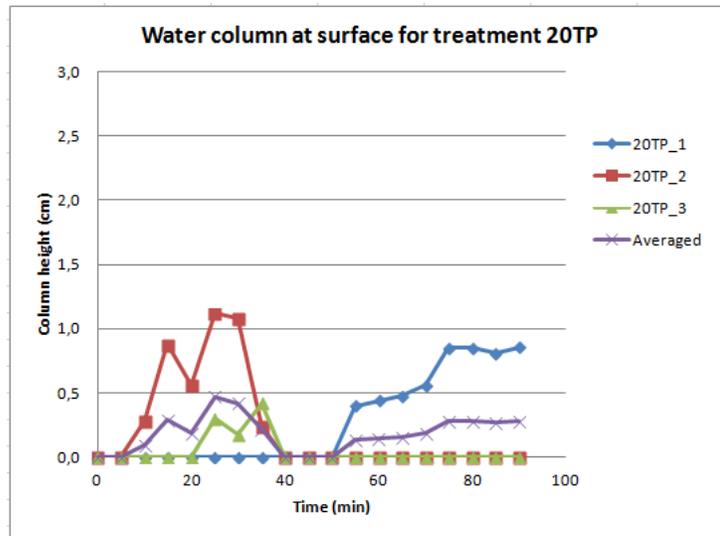


Figura 4.18. Columna de agua formada durante los tres experimentos pertenecientes a los tratamientos combinados

4.5. Análisis del flujo vertical en el perfil del suelo

El análisis del movimiento del flujo vertical a través de los diferentes tratamientos es mostrado en las figuras 4.19 y 4.20. En todos los gráficos la profundidad total de los suelos empaquetados fue de 3 dm (decímetros), la superficie se fijó a 3 dm y el punto más profundo se fijó en 0 dm. Con el objetivo de comparar las curvas para diferentes tratamientos, se normalizó el contenido de humedad.

Los valores de humedad normalizados en las curvas muestran una compleja dinámica de flujo. Dado que los valores medios corresponden a un proceso de secado y humectación, se observa en todos los tratamientos que hay una clara tendencia a mantener más húmedos los puntos centrales en el perfil del suelo.

Aunque en el tratamiento de control la superficie del suelo tiende a aumentar su humedad, la zona media también mantiene más humedad. No hay variaciones relevantes en la sección inferior, lo cual puede ser debido a un proceso de percolación (Figura 4.19a). El tratamiento de compost muestra niveles de humedad similares al tratamiento de control, incluso después de 50 minutos de experimento, siendo el contenido de humedad mayor en la zona media del perfil. En la parte baja, el contenido de humedad aumenta ligeramente en comparación con el tratamiento de control (Figura 19b). Así mismo, el frente de humedad en el tratamiento con enmienda de terra preta, se mueve a una velocidad menor que los dos tratamientos anteriores, pero mantiene la misma tendencia de mayor humedecimiento en la parte media del perfil. (Figura 19c).

El tratamiento 20TP (figura 20a), muestra que el frente de la humedad comienza a avanzar a través de la región de la parte superior y a medida que transcurre el tiempo, la humedad alcanza las capas más profundas. En los primeros 20 minutos aumenta el contenido de humedad rápidamente y luego se nota una reducción controlada, a pesar de la infiltración. Mientras que en la región superior la humedad tiende a bajar, se da un aumento de humedad desde la región media hacia la parte inferior del cilindro sin observar mayores variaciones en la parte inferior. La poca variación en la parte inferior podría ser debido al efecto del proceso de percolación. Para el tratamiento 30TP (figura 20b) se observa un efecto contrario al tratamiento 20TP. La humedad del suelo aumenta en la región cercana a la superficie del suelo, pero a una razón menor que el tratamiento 20TP. Después de 20 minutos, la humedad comienza a aumentar en la superficie y alcanza un valor estable. Es evidente un contenido más alto y estable de humedad en la zona media. El agua se mantiene en la parte inferior del cilindro, lo que indica que se podría estar retrasando el proceso de percolación. El tratamiento 50TP (figura 20c) muestra un suelo casi saturado con baja variación a lo largo del perfil.

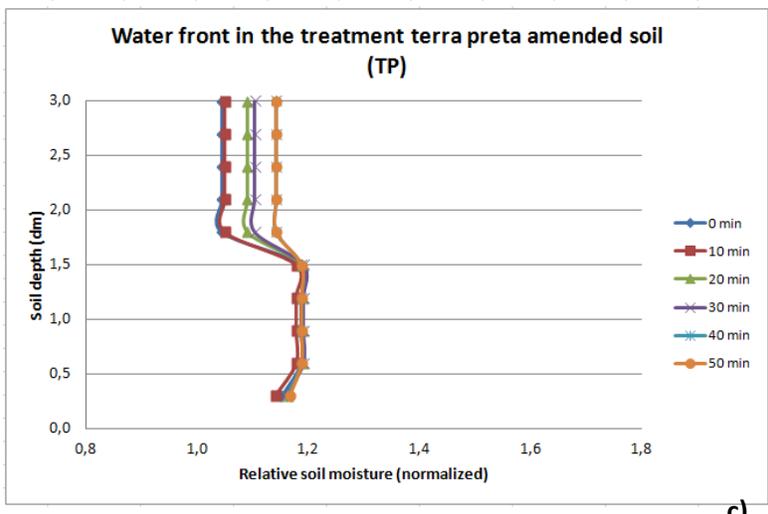
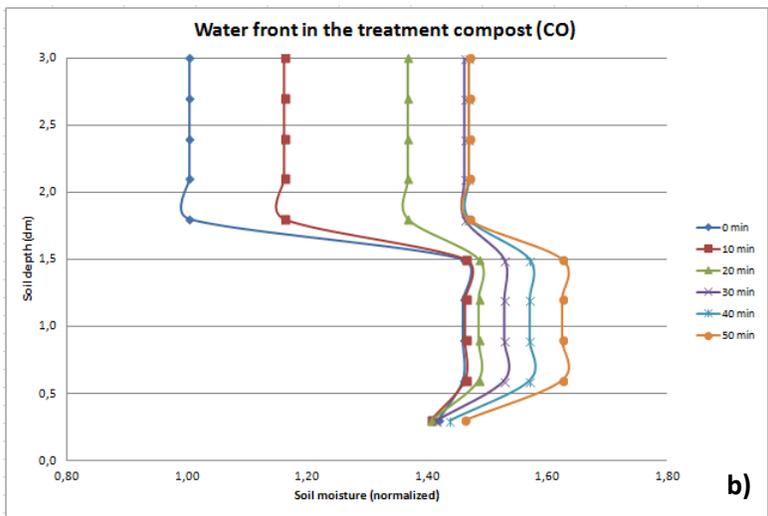
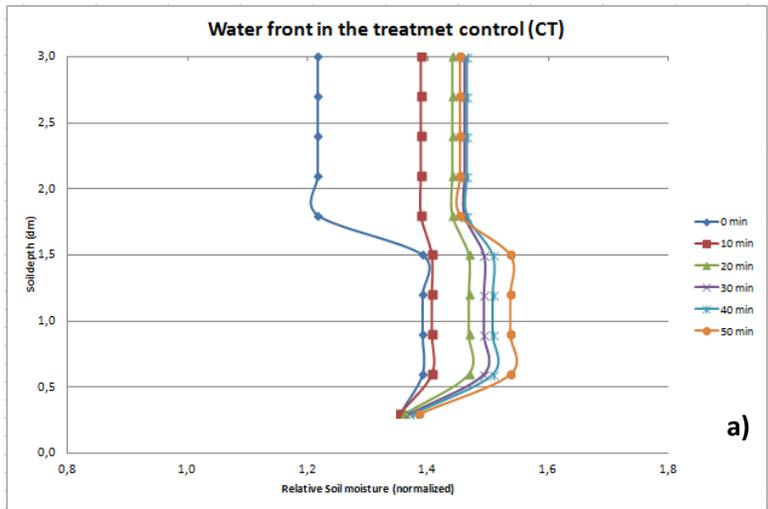


Figure 4.19. Frente de humedad para los tratamientos: a) control, b) compost, and c) terra preta .

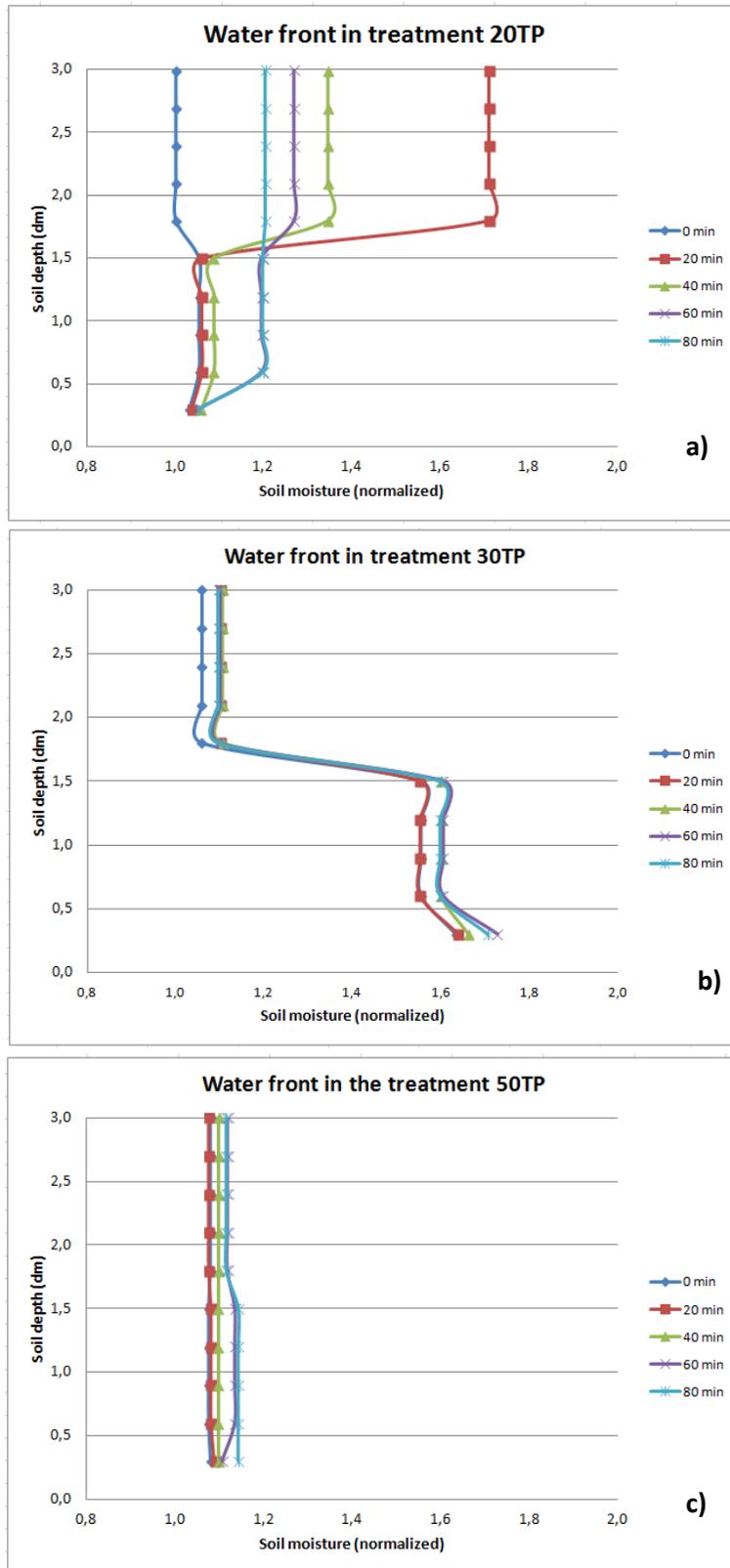


Figure 20. Frente de agua a través del perfil del suelo para los tratamientos a) 20TP, b) 30TP and c) 50TP

V. Descripción del modelo

Como se ha discutido en el capítulo anterior, hay algunas variables físicas, que influyen considerablemente el movimiento del agua hacia abajo a través del suelo. El modelo explica el movimiento de agua a través de la zona no saturada, donde hay un soluto (agua-aire) de cambio y los poros están parcialmente llenos de agua. Al principio, la matriz del suelo tiene un contenido de agua inicial que varía con la profundidad, y como el evento de lluvia se añade agua en el suelo cambiando el régimen de agua del suelo en las capas superiores. La infiltración es el proceso físico principal que influye en la entrada de agua en el suelo. Dependiendo de las características de la precipitación y las propiedades del suelo en la superficie del agua, o bien se infiltra, o corre en forma de escorrentía sobre la superficie del suelo. En la zona no saturada, el suelo se puede explicar como una matriz con la interacción de los diferentes tipos de poros, tales como microporos, mesoporos y macroporos. Dentro de la matriz del suelo, el movimiento del agua depende en gran medida el contenido de materia orgánica, la porosidad y conductividad hidráulica. Para equilibrar la dinámica del agua en la matriz del suelo, se incluyen también otras propiedades físicas, como la infiltración e interflujo. Por último, un equilibrio de todos estos procesos puede ayudar a determinar el contenido de agua del suelo y su dinámica (Figura 5.1).

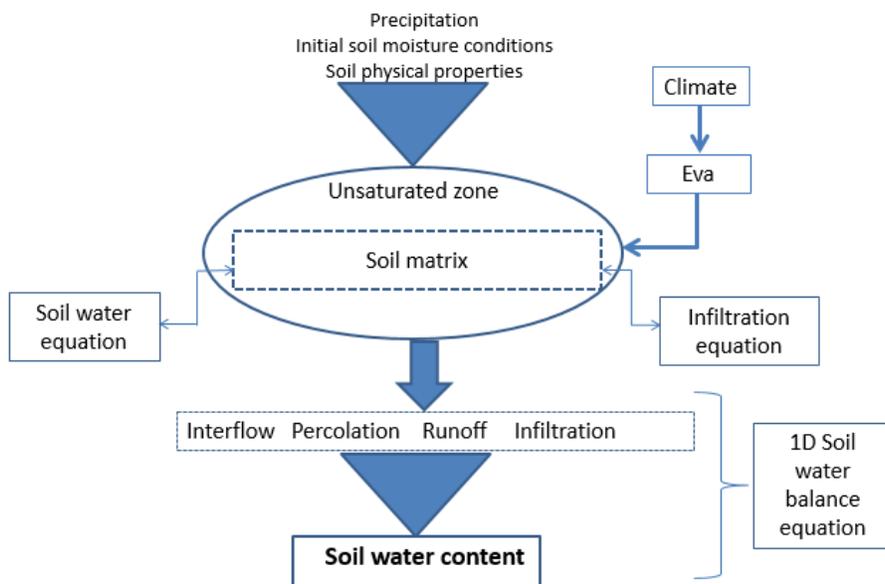


Figura 5.1. Esquema lógico del modelo

La figura 5.2 muestra el diagrama de flujo utilizado para modelar la humedad del suelo. Se utilizaron los parámetros de Van Genuchten para obtener la conductividad hidráulica no saturada a partir de

una conductividad hidráulica relativa. Con estos datos, se utilizó la ecuación modificada de Phillips (ecuaciones 2.15 y 2.16) para determinar infiltración, y para la percolación se utilizó una relación de humedad del suelo con base en el contenido de humedad a capacidad de campo. Los datos de evapotranspiración e interflujo se asumieron como cero ya que estas dos variables se encontraban controladas durante los experimentos, sin embargo a un nivel macro deben ser tomados en cuenta.

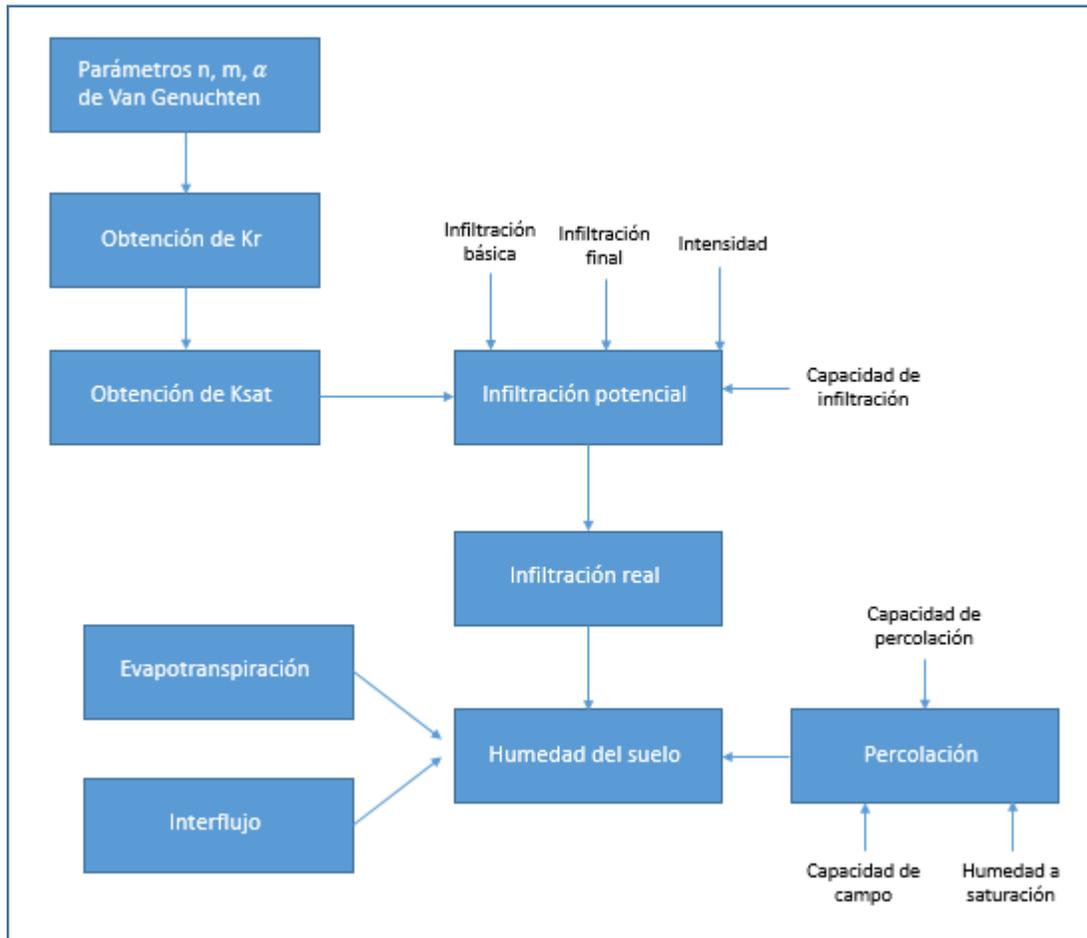


Figura 5.2. Diagrama de flujo del modelo

La figura 5.3 muestra el comportamiento de la simulación (línea continua) con los datos experimentales (puntos). Se observa que para todos los tratamientos, excepto para el tratamiento 50TP, los valores teóricos se comportan con bastante similitud a los valores experimentales. Para el suelo franco-limoso (sin enmiendas) la simulación tiende a sobreestimar el valor de humedad del suelo en el tiempo, y para los tratamientos combinados 20TP y 30TP se da una sobreestimación de valores y conforme pasa el tiempo la humedad tiende a ser menor que los valores experimentales.

Este fenómeno parece que es debido a los datos de infiltración básica y al efecto de columna de agua que la cual se registra con mayores niveles en el tratamiento 50TP. Para el tratamiento 50TP, se observa que después de 30 minutos la humedad tiende a mantenerse, esto es debido a la baja tasa de infiltración y percolación, donde la columna de agua tiende a aumentar con el tiempo.

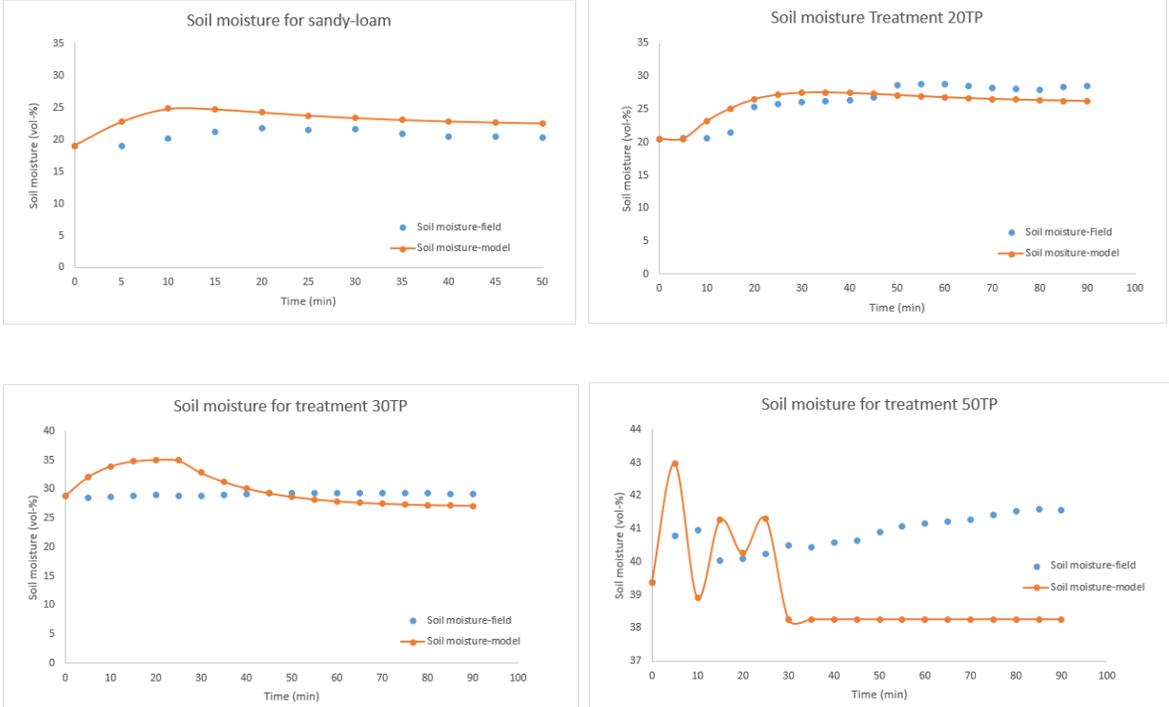


Figura 5.3 Resultados simulación de los cambios de humedad para los tratamientos con suelo franco-limoso y los combinados con enmiendas de terra preta.

VI. Conclusiones

En este trabajo se estudió el problema de caracterizar la infiltración para suelos con alto contenido de material orgánica. Se partió del caso de un suelo pobre en contenido de materia orgánica y se comparó con los cambios en los procesos físicos (principalmente infiltración y contenido de agua) que se producían cuando se combinaba con enmiendas de terra preta.

El análisis estadístico demostró que la hipótesis nula (todos los tratamientos tienen condiciones de humedad iguales) no se cumplía y que cada tratamiento se comporta diferente. Además, se determinó que los valores de humedad eran mejor representados por la mediana, ya que la media se veía afectada por los valores extremos, principalmente por los valores de humedad que presentaba el suelo antes y después de los experimentos cuando se les aplicaba la lluvia. El coeficiente de variación fue más alto en los datos de humedad que se encontraban cerca de la superficie, lo que tiende a pensar que el impacto de las gotas, y posteriormente la conformación de la columna de agua, podrían haber contribuido a dicha variación. Los tratamientos combinados (20TP, 30TP y 50TP) tendieron a comportarse estadísticamente en forma no paramétrica. Esto es consistente con las observaciones experimentales, dado que el contenido de humedad se mantuvo muy homogéneo antes y después de los experimentos, con una muy baja infiltración y percolación, lo que pudo contribuir a evitar que se distribuyeran los datos en forma normal.

Las propiedades físicas del suelo tienen a comportarse de acuerdo a la teoría para suelos con diferentes contenidos de materia orgánica. Sin embargo, la conductividad hidráulica tiende a ser mayor en el tratamiento de compost. La estructura de la enmienda para este caso pudo ser diferente en comparación a las enmiendas con tierra preta, lo que puede facilitar la transmitividad del agua a través del material. Sin embargo, en la mayoría de los tratamientos, dicha conductividad tiende a presentar bastante variabilidad, lo que puede indicar que la forma de empaquetar los cilindros con el material disturbado puede tener un impacto en los resultados.

Se demostró que con factores mayores de 0.3 en adición de terra preta al suelo, los procesos físicos son muy heterogéneos, lo que hace difícil predecir su comportamiento. Además, a medida que aumenta el contenido de materia orgánica, en forma principalmente de carbón, las características de infiltración tienen a no ser tan positivas al darse una filtración más lenta del agua. Sin embargo, las características de humedad del suelo si tienden a ser más prometedoras. Se observó que altos contenidos de terra preta, también tendían a retrasar la percolación, por lo que contribuye a

producir un efecto positivo en la capacidad de retención. Esto resulta sumamente beneficioso en lugares afectados por periodos de largas sequías ya que el suelo va a tender a mantener su humedad por más tiempo. No obstante, a pesar que la adición de materia orgánica mejora la retención de humedad del suelo, ésta también tiende a propiciar encharcamiento o escorrentía por saturación o por capacidad de infiltración, lo que puede no ser muy beneficioso en presencia de altas intensidades de lluvia.

Se observó que los procesos de infiltración se ven favorecidos a partir de combinaciones del 20% de adición de terra preta, por lo que, si se pensara en áreas de cultivo donde la capa arable es de 40 cm de profundidad, se podría estimar que adiciones de 8 cm (como máximo) de terra preta por metro cuadrado podrían contribuir sustancialmente a suelos franco-limosos degradados.

Los resultados obtenidos con la simulación de los experimentos fueron bastante aceptables para la mayoría de casos, sin embargo, no fue posible lograr buenos resultados para el tratamiento 50TP. Se logra observar que las condiciones de modelación para diferentes proporciones de materia orgánica varían, lo que sugiere que se debe aplicar un acercamiento de modelado segmentado de acuerdo al contenido de materia orgánica para lograr obtener mejores estimaciones.

En general, este trabajo y sus resultados contribuye al entendimiento de la forma de comportarse el movimiento de agua a través del perfil del suelo cuando se agregan enmiendas de terra preta en suelos franco-limosos y se espera esto sea útil en la formulación de modelos adecuados para este tipo de suelos.

VII. Bibliografía

Bronstert, A; Plate, E. 1997. Modelling of runoff generation and soil moisture dynamics for hillslopes and micro-catchments. *Journal of Hydrology*, 198(1-4): 177-195.

Chow, V.T.; Maidment, D.; Mays, L. 1994. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Interamericana. Bogotá, Colombia. 583 p.

Civeira, G., Lavado, R. 2006. Efecto del aporte de enmiendas orgánicas sobre propiedades físicas e hidrológicas de un suelo urbano degradado. *Ci. Suelo (argentina)*, 24(2): 123-130.

Decagon. 2006. *User Manual ECH₂O Soil Moisture Sensor Models EC-10, EC-20 & EC-5*. Germany.

DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.). 1998. DIN 18130-1: 1998-05 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben-Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts-Teil 1 . Beuth Verlag. Germany.

DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.). 2002. DIN 18128: 2002-12 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben-Bestimmung des Glühverlustes . Beuth Verlag. Germany.

DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.). 2010. DIN 18125-1: 2010-07 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben-Bestimmung der Dichte des Bodens-Teil 1: Laborversuche. Beuth Verlag. Germany.

DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.). 2011a. DIN 18123: 2011-04 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben-Bestimmung der Korngrößenverteilung. Beuth Verlag. Germany.

DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.). 2011b. DIN 18124: 2011-04 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben-Bestimmung der Korndichte – Kapillarpyknometer, Weithalspyknometer, Gaspyknometer . Beuth Verlag. Germany.

Duncan, C., Bezdicek, D., Fauci, M. 2001. Effect of compost, coal ash, and straw amendments on restoring the quality of eroded Palouse soil. *Biology and Fertility of Soils* 33 (5): 365-372

Eusufzai, M.K, Fujii, K. 2012. Effect of organic matter amendment on hydraulic and pore characteristics of a clay loam soil. *Open Journal of Soil Science*, 2: 372-381.

Iglesias, E., Perez, V. 1989. Evaluation of City Refuse Compost Maturity: A review. *Biological Waste* 27: 115-142.

Joshi, H., Ghose, M. 2003. Forest structure and species distribution along soil salinity and pH gradient in mangrove swamps of the Sundarbans. *Tropical Ecology* 44 (2): 197-206.

Mbagwu, J.1989. Effects of organic amendments on some physical properties of a tropical Ultisol. *Biological Wastes*, 28: 1-13.

Minitab.2013. Minitab16. Available in: <http://www.minitab.com>

Mollerup, M. 2008. Philip's infiltration equation for variable-head ponded infiltration. *Journal of Hydrology* 347 (1-2): 173-176.

Moniruzzaman, K.E., Katsumi, F. 2012. Effect of organic matter amendment on hydraulic and pore characteristics of a clay loam soil. *Open Journal of Soil Science*, 2: 372-381.

Muñoz, R. 2011. *Edafología: Prácticas de Laboratorio*. Universidad Estatal a Distancia. Escuela de Ciencias Exactas Naturales. Costa Rica.

Nuñez, J. 2001. *Manejo y Conservación de Suelos*. EUNED, San José, Costa Rica, 288 p.

Porta, J., López-Acevedo, M. and Roquero, C. 1999. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 2nd edition. Mundi-Prensa. Madrid. 849 p.

Ricigliano, K. (2010). Terra pretas: Charcoal amendments influence on relict soils and modern agriculture. Online revised on February 9, 2015, at: <https://www.soils.org/files/students/2010-ricigliano-entry.pdf>

Stat-Ease. 2013. Design Expert. Available in: <http://www.statease.com>

Tahir, M., Hassan A.U., Zahir, Z.A., Rehman, K.U. 2012. Modeling water retention capacity and hydraulic properties of a manure-amendment loam soil and its effect on wheat and maize yield. *International Journal of Agriculture and Biology*, 14: 492-498.

Thies. 2007. Laser Precipitation Monitor 5.4110.xx.x00.V2.4x STD. Instruction for Use. Germany.

Thompson, A.M., Paul, A.C., Balster, N.J. 2008. Physical and hydraulic properties of engineered soil media for bioretention basins. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 51(2): 499-514.

Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity on unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*, 44: 892-898.

Van Genuchten, M.Th., Leij, F.J., Yates, S.R. 1991. *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils*. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service. Riverside, California, 92 p.

Van Genuchten, M.Th.; Nielsen, D.R. 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soil. *Annales Geophysicae*, 3(5): 615-628.

Wang, T.; wedin, D.; Zlotnik, V. 2009. Field evidence of a negative correlation between saturated hydraulic conductivity and soil carbon in a sandy-soil. *Papers in the Earth and Atmospheric Sciences*. Paper 147. Online at: <http://digitalcommons.unl.edu/geosciencefacpub/147>

Xue, J.; Gavin, K. 2008. Effect of rainfall intensity on infiltration into partly saturated slopes. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26(2): 199-209.