



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOLOGÍA

GENERACIÓN DE SUSTRATOS COMO SOPORTE DE PLANTAS  
PARA ÁREAS VERDES URBANAS UTILIZANDO RESIDUOS DE  
CONSTRUCCIÓN

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A

SEBASTIÁN FLORES DE SANTIAGO

TUTORA PRINCIPAL DE TESIS: DRA. BLANCA LUCÍA PRADO PANO

INSTITUTO DE GEOLOGÍA

COMITÉ TUTOR:

DR. *BRUNO* MANUEL CHAVEZ VERGARA MAYORGA, INSTITUTO DE GEOLOGÍA

*DRA. SILKE CRAM* HEYDRICH, INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

*DRA MA. DEL CARMEN* GUTÉRRIZ CASTORENA, COLEGIO DE POSTGRADUADOS

MTRO. SERGIO PALACIOS, INSTITUTO DE GEOLOGÍA

CIUDAD DE MÉXICO

FEBRERO, 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto de Geología de la UNAM por permitirme seguir adelante con mi desarrollo profesional.

A CONACYT por otorgarme el apoyo económico que me permitió realizar este trabajo.

A mi asesora la Dra. Blanca Lucia Prado por su apoyo constante e incondicional, junto con su motivación constante a superar y mejorar en mi desarrollo profesional.

A los miembros de mi jurado: Dr. *Bruno* Manuel Chavez Vergara Mayorga, Dra. *Silke Cram* Heydrich, Dra. *Ma. del Carmen* Gutiérrez Castorena y al Mtro. Sergio Palacios, por su dedicación, revisiones y asesoramiento que contribuyeron a la realización de este proyecto.

Al Dr Jorge Gama Castro y Mtro Jaime Díaz Ortega por darme las bases para la generación de este trabajo y su apoyo inicial en la generación del tema.

A la Dra. Lucy Mora Palomino, Responsable del Laboratorio de Edafología Experimental, por su apoyo en la realización de los análisis físicos y químicos de las muestras utilizadas en este trabajo, por su asesoría y asistencia en la realización de dichos experimentos y en favorecer el siempre encontrar una manera de realizar el avance del proyecto.

A la Dra. Christina D Siebe Grabach, al Dr. Mario Villalobos Peñalosa y Dr. Jesús Sole Viñas por sus clases y enseñanzas a lo algo de mi estadía en el instituto y apoyo en el este trabajo.

A la Dra. Olivia Zamora Martínez, responsable del Laboratorio de Cromatografía, LANGEM, UNAM, por su apoyo en el análisis de muestras del trabajo.

Al Lic. René Alcalá Martínez, responsable del Laboratorio de Física de Suelos, por el apoyo prestando en la realización de los análisis físicos de las muestras usadas en este estudio, por su apoyo y enseñanzas en el manejo de equipos.

Al Mtro *Arturo H. Atilano* Alvarado por su apoyo en la parte inicial del proyecto y otorgar información sobre los tepetates.

A la Mtra Kumiko Shimada Miyasaka, responsable del Laboratorio de Edafología Ambiental apoyo en la realización de los análisis químicos de las muestras de suelo empleadas en este trabajo.

Al Mtro Javier Tadeo León responsable técnico del Laboratorio de Espectroscopía Atómica, por su apoyo en la determinación de metales totales en las muestras de vinaza empleadas en este trabajo.

A la Mtra Iris Suárez Quijada, responsable técnico del invernadero del departamento de edafología del Instituto de Geología, UNAM, por el préstamo de las instalaciones del invernadero para el montaje de los diversos experimentos de cultivos, la balanza de caga y el tiempo para avanzar en el proyecto. De igual manera al técnico del invernadero Jonathan Montes, por su apoyo durante el desarrollo del proyecto.

A la empresa Concretos Reciclados, S.A. de CV, a través del Ing. Enrique Granell, por su apoyo en la obtención de los materiales utilizados en la tesis.

A la Coordinación de áreas verdes y forestación, de la Dirección General de Obras y Conservación de la UNAM, a través del Ing. Alfredo Martínez Singüenza y el

Biólogo Javier Flavio Montoya Gómez por proporcionarnos la composta utilizada en los experimentos.

Al Biólogo Panuncio Jerónimo Reyes Santiago, Técnico Académico del Jardín Botánico del Instituto de Geología de la UNAM, por su apoyo en el conocimiento de especies y diseño de sustratos artificiales de cultivo.

A la organización de CICEANA, en especial a la Mtra. Margie Ortiz, Directora General de CICEANA, al Biol. Cristian René Sánchez Martínez, Director del Área de Desarrollo Socio-Ambiental, a la L.P.D.A Elizabeth Pérez Piña, Coordinadora del Jardín Botánico CICEANA y a la Biol. Ingrid Nava Líder de Proyecto Jardín Botánico CICEANA por su apoyo en el conocimiento de materiales y sustratos normalmente utilizados en los cultivos ornamentales de la ciudad de México, enfocado en su uso sobre azoteas y muros verdes.

Al proyecto "Construcción de suelos artificiales a partir de la reutilización de residuos generados por la Ciudad de México una alternativa urbana sostenible (Convenio SECITI/066/2016)" financiado por la Secretaria de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México.

Al proyecto DGAPA-PAPIIT IN105715 y el proyecto CONACYT 220489.

A los diversos profesores que formaron parte de mis estudios, y que ayudaron en gran medida a la formación de este trabajo.

A las secretarías administrativas tanto del instituto de Geología como Geofísica y su apoyo en los diversos trámites y procesos a lo largo de mi estadía.

A todos mis compañeros tanto dentro como fuera del Instituto que me otorgaron su apoyo y amistad.

A mi familia que siempre estuvo cerca apoyándome en todo para poder sacar adelante este trabajo.

# Índice

<b>Resumen</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Introducción:</b> .....	<b>2</b>
1.1. Antecedentes.....	<b>3</b>
1.2. Suelos urbanos: estado del arte.....	<b>4</b>
1.3. Objetivos.....	<b>10</b>
1.3.1. General.....	<b>10</b>
1.3.2. Particulares.....	<b>10</b>
1.4. Hipótesis.....	<b>11</b>
<b>2. Marco Teórico</b> .....	<b>11</b>
2.1. Suelo y sustrato de cultivo.....	<b>11</b>
2.1.1. Suelo.....	<b>11</b>
2.1.2. Fase Sólida.....	<b>12</b>
Fracción Mineral.....	<b>12</b>
Fracción Orgánica.....	<b>13</b>
2.1.3. Fase líquida del suelo y propiedades relacionadas.....	<b>14</b>
2.1.4. Fase Gaseosa.....	<b>17</b>
2.1.5. Servicios ecosistémicos de los suelos.....	<b>17</b>
Suelos naturales.....	<b>17</b>
Suelos urbanos.....	<b>18</b>
2.1.6. Tecnosoles.....	<b>18</b>
2.2. Áreas verdes.....	<b>20</b>
2.2.1. Definición espacios verdes urbanos.....	<b>20</b>
2.2.2. Beneficios espacios verdes urbano.....	<b>20</b>
Ecosistémicos.....	<b>20</b>
Sociales.....	<b>21</b>
Económicos.....	<b>22</b>
2.2.3. Estado actual de las áreas verdes en México.....	<b>23</b>
2.2.4. Fertilidad y productividad del suelo.....	<b>23</b>

2.2.5. Sustrato de cultivo.....	24
Características deseables en un sustrato de cultivo.....	24
2.3. Materiales utilizados en la construcción de áreas verdes de zonas urbanas: naturales y de desecho.....	25
2.3.1. Materiales normalmente utilizados como sustrato de plantas.....	25
2.3.2. Importancia de la reutilización de materiales de desecho en la ciudad de México.....	26
<b>3. Materiales y métodos.....</b>	<b>27</b>
3.1. Selección de los materiales.....	27
3.1.1. Materiales minerales .....	27
3.1.2. Material orgánico .....	29
3.2. Selección de plantas.....	30
3.2.1. Características de las plantas.....	30
3.3. Preparación y Caracterización .....	31
3.3.1. Materiales.....	31
3.3.2. Mezclas de materiales.....	32
3.4. Métodos analíticos.....	32
3.4.1. Propiedades físicas .....	32
Capacidad máxima de retención de humedad.....	32
Densidad aparente.....	33
Densidad de partícula.....	33
Porosidad.....	33
Textura.....	34
Conductividad hidráulica.....	34
3.4.2 Propiedades químicas del suelo.....	35
Fracción sólida.....	35
Conductividad eléctrica.....	35
pH.....	36
Análisis del índice de germinación de la composta.....	36



Carbono y Nitrógeno Total.....	37
Caracterización de la solución del suelo.....	37
Aniones y Cationes.....	37
Metales totales.....	38
3.4.3. Pruebas realizadas a los sustratos en mesocosmo .....	40
Análisis de la viabilidad de las plantas bajo estrés hídrico: capacidad de retención de humedad de las mezclas.....	41
Análisis de la capacidad de drenaje.....	41
Curva de humedad.....	42
3.4.4 Pruebas realizadas a los sustratos como soporte en bolsas de cultivo.....	42
Crecimiento de biomasa.....	43
Peso seco de biomasa.....	43
Turgencia.....	43
<b>4. Resultados.....</b>	<b>44</b>
4.1 Caracterización de materiales seleccionados.....	44
4.1.1 Caracterización física de los materiales minerales.....	44
4.1.2 Caracterización física del material orgánico.....	45
4.1.3 Caracterización química de los materiales minerales.....	45
4.1.4 Caracterización química del material orgánico.....	47
4.1.5 Preparación de los suelos como soporte de plantas.....	50
4.2. Caracterización de las mezclas.....	52
4.2.1 Caracterización física de las mezclas.....	52
Densidad aparente y de partícula.....	53
Porosidad y capacidad de campo.....	54
Porosidad y conductividad hidráulica.....	55
4.2.2 Caracterización química de las mezclas.....	56
pH y conductividad eléctrica.....	56
Carbono y nitrógeno.....	57

Aniones y cationes.....	58
4.3 Sustratos como soporte de plantas.....	60
4.3.1 Evaluación experimental de las mezclas, para conocer su potencial como soporte de varias plantas, bajo condiciones de invernadero.....	61
Análisis de la viabilidad de las plantas bajo estrés hídrico: capacidad de retención de humedad de las mezclas.....	64
Análisis de la capacidad de drenaje y lixiviados.....	67
Análisis de la capacidad de retención de humedad.....	69
4.3.2 Pruebas realizadas a los suelos como soporte de plantas de tomate cherry.....	70
Turgencia.....	72
<b>5. Discusión.....</b>	<b>73</b>
5.1 Caracterización de los materiales.....	73
5.1.1 Caracterización física de los materiales.....	73
5.1.2 Caracterización física del material orgánico.....	75
5.1.3 Caracterización química de los materiales minerales.....	75
5.1.4 Caracterización química del material orgánico.....	78
5.2 Caracterización de las mezclas.....	79
5.2.1 Caracterización física de las mezclas.....	79
5.2.2 Caracterización química de las mezclas.....	80
5.3 Suelos como soporte de plantas.....	81
5.3.1 Pruebas realizadas a los suelos en las macetas experimentales con vegetación.....	81
Análisis de la viabilidad de las plantas bajo estrés hídrico: capacidad de retención de humedad de las mezclas.....	81
Análisis de la capacidad de drenaje y lixiviados.....	82
Análisis de la capacidad de retención de humedad.....	84
5.3.2 Pruebas realizadas a los sustratos como soporte de plantas caso: tomate cherry.....	85
5.4 Análisis de la fertilidad.....	87

<b>6. Conclusiones.....</b>	<b>88</b>
<b>7. Bibliografía.....</b>	<b>91</b>
<b>8. Anexo.....</b>	<b>95</b>

## **Índice de tablas**

Tabla 1: Listado de materiales normalmente utilizados en áreas verdes, uso y fuente de información

Tabla 2: Materiales encontrados en la recicladora de concreto y su composición

Tabla 3: Límites de detección en el método de aniones y cationes

Tabla 4: Límites de detección en el método de metales totales

Tabla 5: Listado de mezclas, tipo de plata y demanda hídrica

Tabla 6: Resultados de la caracterización física de los materiales minerales.

Tabla 7: Resultados de la caracterización física del material orgánico.

Tabla 8: Resultados de la caracterización química de los materiales minerales

Tabla 9: Resultados del contenido de aniones y cationes en los diferentes materiales minerales

Tabla 10: Resultado del contenido de metales en los materiales minerales

Tabla 11: Tipos de compostas, usos, pH y conductividad eléctrica en la NADF-020-AMBT-2011, junto con los resultados de la composta de CU

Tabla 12: Resultados del contenido de aniones y cationes en el material orgánico

Tabla 13: Resultado del contenido de metales en el material orgánico

Tabla 14: Concentraciones máximas de elementos traza, en mg/kg, en los tres tipos de composta (A, B y C según la norma NADF-020-AMBT-2011), en comparación con las concentraciones presentes en la composta de la UNAM utilizada en el experimento

Tabla 15: Balance de cationes y aniones en los diferentes materiales

Tabla 16. Composición de las nueve mezclas preparadas. Los números indican los porcentajes de los materiales utilizados en la preparación de cada una de las mezclas

Tabla 17: Caracterización física de las 9 diferentes mezclas utilizadas en el proyecto

Tabla 18: Caracterización química de las 9 diferentes mezclas utilizadas en el proyecto.

Tabla 19. Concentración de aniones y cationes en las diferentes mezclas

Tabla 20. Resultados del análisis de contenido de metales en las mezclas

Tabla 21: Balance de cationes y aniones en las diferentes mezclas

Tabla 22: Plantas al inicio del experimento

Tabla 23: Plantas a los 8 meses del experimento

Tabla 24: Mezclas con su respectivo número de especímenes al inicio y al final del experimento, humedad inicial y final del suelo, y supervivencia de las plantas en las diferentes macetas.

Tabla 25: Plantas después de 2 semanas sin riego

Tabla 26: Velocidad de infiltración en las macetas con relación a sus diferentes mezclas.

Tabla 27: Análisis de lixiviados al finalizar el experimento

Tabla 28: Curva de humedad con base al modelo de Van Genuchten

Tabla 29. Análisis de las propiedades físicas de varios materiales minerales (Rokia, (2014)).

Tabla 30: Propiedades físicas de la composta en bibliografía y experimento

Tabla 31: Análisis de sus propiedades químicas por Rokia (2014) de varios materiales minerales

Tabla 32: Análisis de las propiedades químicas de la composta Sere (2008) y Rokia (2014)

## **Índice de figuras**

Figura 1: Curva de humedad de los suelos con base al contenido de humedad y la succión de la matriz de suelo (Hillel, 1998)

Figura 2: Densidad aparente y densidad de partícula de las diferentes mezclas analizadas

Figura 3: Porosidad y capacidad de retención de humedad a capacidad de campo de las diferentes mezclas

Figura 4: Porosidad y conductividad hidráulica de las diferentes mezclas (1-9)

Figura 5: pH y conductividad eléctrica de las diferentes mezclas

Figura 6: Crecimiento mensual del tomate cherry, durante tres meses, en las 9 mezclas.

Figura 7: Gráfica con los pesos secos finales de las plantas de tomate cherry durante los periodos de 1, 2 y 3 meses de riego.

Figura 8: Comparación del pH al inicio del experimento con tomata Cherry y después de 3 meses de establecido.

Figura 9: Valores de turgencia de las plantas desarrolladas en las nueve mezclas, en los primeros 2 meses.

## **Indicé de formulas**

- 1 Fórmula de Van Genuchten
- 2 Fórmula de capacidad máxima de retención de humedad
- 3 Fórmula de densidad aparente
- 4 Fórmula de densidad de partícula
- 5 Fórmula de porosidad
- 6 Fórmula de conductividad hidráulica
- 7 Fórmula del porcentaje de germinación relativa
- 8 Fórmula del crecimiento de radícula relativo
- 9 Fórmula del índice de germinación
- 10 Fórmula de velocidad de infiltración

## **Índice de anexos:**

### **Índice de tablas de anexos**

Tabla 1: Valores de crecimiento del tomate en los diferentes sustratos a través del tiempo

Tabla 2: Tabla con los valores de pesos secos en 1, 2 y 3 meses

Tabla 3: Presión de turgencia en las diferentes mezclas durante cada uno de los tres meses

Tabla 4: Crecimiento del tomate cherry primer mes

Tabla 5: Crecimiento del tomate cherry segundo mes

Tabla 6: Crecimiento del tomate cherry tercer mes



## **Índice de figuras de anexos**

Figura 1: Velocidad de infiltración por tiempo durante el experimento de capacidad de drenaje en la mezcla 1.

Figura 2: Velocidad de infiltración por tiempo durante el experimento de capacidad de drenaje en la mezcla 2.

Figura 3: Velocidad de infiltración por tiempo durante el experimento de capacidad de drenaje en la mezcla 3.

Figura 4: Velocidad de infiltración por tiempo durante el experimento de capacidad de drenaje en la mezcla 4.

Figura 5: Velocidad de infiltración por tiempo durante el experimento de capacidad de drenaje en la mezcla 5.

Figura 6: Velocidad de infiltración por tiempo durante el experimento de capacidad de drenaje en la mezcla 6.

Figura 7: Velocidad de infiltración por tiempo durante el experimento de capacidad de drenaje en la mezcla 7.

Figura 8: Velocidad de infiltración por tiempo durante el experimento de capacidad de drenaje en la mezcla 8.

Figura 9: Velocidad de infiltración por tiempo durante el experimento de capacidad de drenaje en la mezcla 9

Figura 10: Gráfica de la curva de humedad en la mezcla 1 con base en el contenido de agua y succión del suelo.

## Resumen

Los suelos urbanos deben tener, entre otras funciones, la de proveer servicios ecosistémicos que mejoren las condiciones de vida y desarrollo de las personas. Uno de los servicios que proveen a las zonas urbanas es el de servir de soporte de plantas en camellones, parques y jardines de las grandes ciudades. En la actualidad, la creación de áreas verdes en zonas urbanas se realiza, en su mayoría, acarreando materiales naturales desde sitios periféricos a las grandes ciudades. Por otro lado, en la Ciudad de México se producen 6,500 toneladas por día de residuos de la construcción, material que generalmente termina en tiraderos a cielo abierto con las consecuencias ambientales ampliamente reconocidas. El presente trabajo propone la creación de sustratos como soporte de plantas para áreas verdes urbanas, a partir de materiales de desecho de la construcción y composta, como sustituyentes de los componentes minerales y orgánicos, respectivamente, que componen los suelos naturales. En el presente trabajo, se evalúa la utilización de residuos de concreto, de excavación, tepetate y residuo de demolición (adcretos, blocks, concretos, cerámicos, mamposterías, ladrillos y tabiques) como componente mineral, mientras que la fracción orgánica utilizada fue la composta producida en Ciudad Universitaria. Se analizaron nueve mezclas de los materiales en diferentes proporciones de las fracciones orgánica y mineral, para comprobar el efecto de las proporciones de estos elementos sobre la capacidad de retención de humedad de los sustratos. Los suelos creados artificialmente fueron evaluados a través de sus propiedades físicas y químicas, y de su función como soporte de cuatro especies vegetales con diferente requerimiento hídrico y nutrimental: *Tagetes erecta*, *Sedum praealtum*, *Tifeagle* y *Solanum lycopersicum*. Los resultados muestran que las nueve mezclas fueron adecuadas para el crecimiento de las plantas para las cuales fueron diseñadas. El desarrollo del tomate cherry no fue homogéneo en las nueve mezclas; el sustrato creado a partir de residuo de excavación resultó la mejor opción. Además, los suelos tuvieron una capacidad de drenaje adecuada para soportar lluvias torrenciales como las que ocurren en Ciudad de México.

# 1 Introducción

El concepto “suelos urbanos” agrupa a los suelos de las áreas urbanas, y a todos los suelos que han sido fuertemente afectados por alguna actividad humana, produciendo alteraciones en su composición y evolución. Los suelos urbanos adecuarse para que brinden una serie de servicios ecosistémicos de gran importancia para la infraestructura de las ciudades y, de igual manera, mejoren las condiciones de vida y desarrollo de las personas, entre los cuales se incluyen: soporte de edificios, infraestructura de caminos, agricultura urbana, entre otros.

En la ciudad de México se producen diariamente 6,500 toneladas de residuos de construcción, los cuales, en su gran mayoría, acaban en tiraderos a cielo abierto, barrancas, zonas de reserva ecológica y/o agrícolas y cauces de ríos. Esta tendencia ocasiona una serie de problemas tales como la acumulación de residuos y problemas ambientales y, con ello, la reducción de áreas verdes o espacios urbanos que podrían ser utilizados para otra actividad; o bien, diversas reacciones fisico-químicas cuando los residuos entran en contacto con el ambiente. (<http://www.concretosrecicladados.com.mx/>)

El presente trabajo de tesis tuvo como objetivo la creación de sustratos como soporte de plantas para áreas verdes urbanas, a partir de materiales de desecho de la construcción y composta. Esta investigación puede ser una alternativa para el reciclaje de dichos residuos, al ser utilizados para generar sustratos aptos para el soporte de plantas y, de esta manera, lograr tanto la generación como la recuperación de áreas verdes urbanas.

La presente tesis está estructurada de la siguiente forma: el primer capítulo contiene, los antecedentes alrededor de los suelos urbanos, definiciones y estado del arte en la investigación. En el segundo capítulo se presenta el marco teórico sobre suelos y las propiedades de los mismos a considerar para su función como

soporte de plantas. El tercer capítulo describe los métodos utilizados tanto para la caracterización de los materiales, como la de los sustratos creados y los experimentos realizados para su evaluación como soporte de plantas. Finalmente, en los capítulos cuarto y quinto se presentan los resultados y las conclusiones del trabajo, respectivamente.

## **1.1 Antecedentes**

La mayor parte de la contaminación del aire en las zonas urbanas procede del tránsito, ya que los motores de combustión interna de los vehículos emiten una mezcla de aire con material particulado (PM), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), compuestos orgánicos volátiles (VOC<sub>s</sub>), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), y ozono (Irga *et al.*, 2015). El 22 de octubre del 2015, la Organización Mundial de la Salud (OMS) informó que la contaminación del aire es considerada como causa de muerte de aproximadamente 7 millones de personas al año en todo el mundo, y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) en 2014 atribuyó a la contaminación del aire un coste estimado de 3.6 billones de dólares para los países industrializados.

En el esquema actual del desarrollo urbano, los espacios verdes deben jugar múltiples funciones para hacer ciudades más sostenibles. Estas funciones se refieren a la prestación de servicios ecosistémicos análogo a los que proveen los sistemas naturales (reducir ruido y temperatura, filtrar el aire, secuestrar carbono y preservar la biodiversidad); así como también: proveer de beneficios sociales (interacción social en parques y jardines y vida más saludable), beneficios económicos, reducir gastos en el cuidado de la salud y promover el turismo (Anita *et al.*, 2015).

El “reverdecimiento urbano” se ha convertido en una de las metas ambientales prioritarias en los países desarrollados, considerándose como una estrategia básica para el mejoramiento de la calidad de vida del habitante urbano (Cantón *et*

*al.*, 2001). Debido a las funciones sociales y necesidades psicológicas que cumple sobre los ciudadanos, el espacio verde urbano es un ingrediente clave para lograr la sostenibilidad de la ciudad (Chiesura *et al.*, 2004). Por lo tanto, si se planifica cuidadosamente, la vegetación urbana podría ser de gran utilidad para mitigar algunos de los efectos antropogénicos negativos generados por el desarrollo de las zonas urbanas (Avisar *et al.*, 1996).

## **1.2 Suelos urbanos: estado del arte**

La ciencia del suelo urbano es un tema científico relativamente joven. El interés de la ciencia del suelo en los suelos urbanos ha aumentado desde los años setenta del siglo pasado. Hasta hoy, las zonas urbanas se han extendido en todo el mundo y ahora están cubriendo cada vez más los suelos de las antiguas zonas naturales agrícolas. Las zonas urbanas comprenden una amplia gama de diferentes usos del suelo, como por ejemplo: vías de comunicación carretera, la industria, el comercio, los sitios de disposición final de desechos, la vivienda y los parques (Norra, 2003)

El término "suelo urbano" es usualmente utilizado para designar a los suelos encontrados dentro de áreas urbanas; sin embargo, los suelos influenciados por la actividad humana se encuentran también en muchas otras partes. De hecho, la perturbación antrópica de los suelos naturales es ya considerado como un factor principal en la formación y evolución del suelo, el cual es considerado en la definición de SUITMA: suelos de áreas urbanas, industriales, tráfico, mineras y militares (Morel *et al.*, 2015).

Durante el octavo congreso de suelos de áreas urbanas, industriales, tráfico, mineras y militares (SUITMAS), realizado en la ciudad de México, se mostró que países como: Alemania, Australia, China, Corea, Francia, México, Kenia, Nigeria, Polonia, Rusia, Singapur y Sudáfrica, han estado estudiando a los suelos de las áreas urbanas, mineras, industriales y agrícolas; dichos estudios se han centrado

en los efectos de los desechos urbanos sobre los suelos, los contaminantes presentes y la evolución de dichos suelos alterados.

Centrándose en los países con las áreas urbanas más estudiadas como son Nueva York, Berlín y Moscú (Capra, 2014). Durante el congreso se observó que, por ejemplo, en Rusia se habló sobre los efectos positivos de la urbanización sobre la capacidad de los suelos para el almacenaje de carbón depósitos de polvo en los suelos urbanos; la macrofauna en los parques de las áreas urbanas, así como de la historia de los asentamientos urbanos guardada en los suelos. De Estados Unidos se mencionó sobre estudios de suelo y el ambiente urbano; estabilidad de metales pesados en suelos urbanos; diversidad de bacterias en áreas verdes urbanas; y de Alemania se especificó sobre retención de metales pesados en los taludes de carreteras; finalmente, sobre el cambio de una zona de descarga de agua a una área de recreación.

Cabe resaltar que el grupo de Francia ha tenido un enfoque más fuerte hacia los suelos de las áreas verdes urbanas, en sus propiedades y el efecto biológico sobre los mismos. A continuación se hace un recuento de algunos de los trabajos estudiados.

Acosta & otros (2013) estudiaron el efecto del pasto en áreas verdes concluyendo que aumentan el contenido de materia orgánica en áreas verdes de manera significativa, aumentando la capacidad de los suelos para acumular nutrientes para las plantas y para retener y reducir la movilidad y toxicidad de metales

Amossé & Lee (2015) al comparar un suelo urbano con un suelo natural cercano a un río, concluyeron que existe una relación entre la evolución de los suelos urbanos y los suelos naturales pero que es necesario realizar más estudios

Beesley & Dickinson (2010) estudiaron el carbón y los elementos traza en suelos urbanos bajo la adición de composta; al respecto, señalan que aun cuando la composta es utilizada para mejorar las propiedades físico químicas de los suelos, se debe tener cuidado en su adición a los suelos ya que puede exceder los niveles de elementos traza del mismo y llevar daños al medio ambiente y al ser humano.

Charzyński (2015) introdujo el termino edifisol que se refiere a los suelos desarrollados sobre los diferentes tipos de elementos de la construcción ya sean del tipo: horizontal (cubiertas planas, techos de los edificios, superficies de los puentes), vertical (grietas y huecos en las paredes) y cóncavas (canales de lluvia).

Horváth *et al.* (2014) analizaron los parámetros físicos, químicos y de metales pesados en suelos urbanos cercanos a una ciudad para ver el efecto de la misma sobre el ambiente. Como conclusión, encontraron que los valores medios más altos de metales pesados en los suelos de los parques, posiblemente producto de la contaminación del tránsito vehicular, vinculando al suelo de los espacios verdes urbanos con posibles efectos negativos sobre la salud humana

Algunos autores han preparado mezclas con cuatro residuos urbanos típicos, y se secaron y pasaron por un tamiz de 2 mm, se mezclaron de forma selectiva para imitar el material fértil de la tierra vegetal. Los materiales fueron: subsuelo excavado, desechos verdes, composta de lodo y desechos verdes, y ladrillos. Después se caracterizaron sus parámetros físicos, químicos y toxicológicos y se generaron cuatro mezclas en una relación de 40% el material orgánico y 60% el mineral, las mezclas se depositaron en macetas durante 55 días bajo condiciones controladas en una cámara climática. Al finalizar el experimento las mezclas poseían las concentraciones necesarias de fosforo para sustentar el desarrollo de una comunidad vegetal (Vidal *et al.*, 2016).

Los suelos de escombros en Europa presentan altas concentraciones de metales pesados principalmente de Pb y Hg y de B y P, están de medianamente a alto

contaminados por los metales anteriores junto con Cu y Zn, pero presentan concentraciones inferiores de Cd, Ni, As y Cr en menores concentraciones (Abel et al., 2013).

Yang & Zhang (2010) estudiaron 10 diferentes suelos urbanos cercanos a la ciudad de Nanjing; en conclusión, observaron que el principal factor que reduce la infiltración en dichos suelos es la compactación, y que las bajas infiltraciones del suelo en las ciudades tienen efectos negativos sobre el ambiente de las ciudades, resultando en un incremento en las inundaciones y reducción en la calidad del agua. Además, en zonas urbanas las concentraciones de: NO<sub>3</sub>, N, NT (Nitrógeno Total), MRP (Fosforo Reactivo al Molibdato), PT (Fosforo Total) y material suspendido, son mayores en comparación con las zonas agrícolas o forestales por lo que es necesario aumentar la cantidad de áreas verdes en las ciudades.

Algunos suelos han sido estudiados desde el enfoque de la actividad humana como factor formador por Scalenghe & Ferrari (2009), analizaron 3 suelos generados por la construcción de muros cerca de zonas con una alta pendiente; en este caso, muros retienen los materiales que se van desprendiendo y, a lo largo del tiempo, reducen el efecto de las pendientes. A estas zonas se les otorgaron los valores de 0, 4 y 40 años dependiendo de la fecha en que fue construido su respectivo muro. Estos autores realizaron una caracterización física y química de los perfiles con una profundidad de 100 cm en las diferentes zonas. Se observó que en los perfiles más viejos ocurre la generación de horizontes y un aumento en la capacidad de retención de humedad a saturación y conductividad hidráulica; en cambio, la textura permaneció siendo la misma.

Así también, Sere *et al.* (2008); realizaron pruebas químicas como: pH, capacidad de intercambio catiónico, contenido de fósforo, carbonatos y metales en residuos derivados de: (a) composta (árboles urbanos, hierba cortada); (b) lodos de fábricas de papel y (c) suelo industrial derivado del tratamiento térmico para la remoción de PAHs [Hidrocarburos aromáticos policíclicos]; ello para desarrollar dos tipos de



tecnosoles con el siguiente acomodo de los residuos en capas: (a) 75 cm (capa baja 60 cm de suelo industrial con tratamiento térmico y capa alta 15 cm de residuo de composta); (b) 105 cm (capa baja 30 cm de lodos de fábricas de papel, capa media 60 cm de suelo industrial con tratamiento térmico mezclado equitativamente con de lodos de fábricas de papel y capa alta 15 cm de residuo de composta). En estos suelos se estudió durante tres años las siguientes variables: balance hídrico, flujo de elementos traza y el establecimiento y crecimiento de especies vegetales; en su desarrollo vegetativo, se observó que el segundo perfil obtuvo los mejores valores y una mayor variedad de especies. Como conclusión se obtuvo que los tecnosoles generados en este experimento, funcionaron como filtros de elementos traza y fueron capaces de generar una cubierta vegetal y, por tanto, fue posible su recuperación ecológica; por lo que se podrían utilizar en terrenos abandonados.

Se han realizado análisis químicos similares al trabajo de los autores anteriores con los mismos materiales, pero adicionando estudios sobre la cantidad de calcita, yeso y su granulometría (Sere *et al.*, 2010). Posteriormente se realizó un análisis de pérdidas de volumen, enfocado en la reducción de la altura de los perfiles (compactación), en los cuales se observa que en los primeros 6 meses no ocurren cambios notables, pero a los 30 meses en el segundo perfil se observa una mayor reducción en su volumen. Se puede concluir que los Tecnosoles utilizados en este experimento tuvieron una evolución pedogenética rápida que se ha relacionado con el estado inicial, lo que marca una diferencia entre las condiciones de los suelos artificiales y el medio ambiente.

Rokia *et al.* (2014) estudiaron las propiedades físicas (densidad aparente, humedad a capacidad de campo) y las químicas (carbono total, fósforo, conductividad eléctrica y pH) de 11 desechos provenientes de una excavación (residuo de excavación ácido, residuo de excavación básico, ladrillos, composta de lodos de depuradora de una planta de tratamiento de aguas residuales y desechos verdes, concreto, residuo de demolición, residuos verdes, lodos de

fábrica de papel, residuo de barridos de calles, lodos de aguas residuales y desechos de vías férreas), con éstos materiales se realizaron combinaciones en cinco proporciones distintas en tubos de ensayo y las mezclas fueron analizadas con respecto a sus propiedades físicas y químicas.

Al finalizar el experimento se observó cómo una combinación de los mismos materiales pero en diferentes proporciones provocó una modificación en las propiedades físicas y químicas finales. De esta manera, se pudo utilizar la combinación que reunió las condiciones más favorables para el desarrollo de un determinado tipo de cultivo.

Macía *et al.* (2014) realizaron un proceso de compostaje mediante un sistema integrado de biorreactores de aireación estática de tres residuos: sedimentos dragados de un puerto durante sus operaciones de mantenimiento; lodos de depuración provenientes de una planta de tratamiento de aguas y astillas de madera resultados de los residuos de poda de plantas y limpieza forestal. Se determinaron diferentes propiedades químicas como: pH, conductividad eléctrica, metales traza, porcentajes de carbono y nitrógeno. Posteriormente, realizaron un compostaje, una desalinización y la generación de un Tecnosol, sobre los materiales. En cada uno de los productos obtenidos de cada uno de estos procesos, se realizaron los mismos análisis que a los materiales iniciales; además de un índice de germinación para determinar toxicidad y un análisis granulométrico.

Como conclusión se obtiene que las características de los materiales que afectan mayormente el proceso de la generación del Tecnosol, a partir de los materiales mencionados, eran el contenido de partículas finas y su alta salinidad. Los dos problemas fueron resueltos mediante compostaje y desalinización. Con esto se obtuvo un Tecnosol que puede ser utilizado en la restauración ecológica.

En este apartado se mencionaron algunos trabajos que implican el estudio de las propiedades físicas y/o químicas de sustratos y su posible utilización en zonas

naturales o de cultivo. Con estos resultados, se da a conocer que el reciclaje de residuos de la construcción y la generación de mezclas con componentes de residuos orgánicos pueden ser utilizados para remediar una zona y tener un cultivo estable. Se observa también que los sustratos estudiados tienen comportamientos similares a los suelos naturales y presentan una evolución de horizontes. El trabajo de tesis presentado se basa en la generación de sustratos que puedan comportarse como “suelos artificiales”, a partir de residuos de la construcción, para ser utilizados en el desarrollo de áreas verdes, tema sobre el que no lo cual no se han realizado estudios en México de ahí radica la importancia de la caracterización de dichos materiales para su posible utilización como soporte de plantas. Con los resultados obtenidos, se busca obtener un nuevo uso para estos materiales y la posibilidad de aumentar, con ellos, la superficie de zonas verdes urbanas que, como ya se ha mencionado anteriormente, tienen un impacto sobre el estado de las ciudades y la salud de sus habitantes.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. General**

Generar sustratos para el desarrollo de plantas a partir de los residuos de la construcción, como una alternativa sostenible que permita aprovechar este tipo de residuos generados en zonas urbanas y, con ello, evitar su disposición en terrenos baldíos o en el campo donde generan un impacto negativo al ambiente, particularmente al paisaje.

#### **1.3.2. Particulares**

1. Localización y selección de materiales de desecho viables para la construcción de sustratos artificiales como soporte de plantas.
2. Caracterizar las propiedades físicas y químicas de los materiales de desecho y proponer mezclas a partir de ellos.
3. Propuesta y generación de mezclas de los materiales

4. Evaluar las diferencias en el crecimiento vegetal obtenido a partir de los sustratos artificiales (mezclas preparadas); ello permitirá evaluar el aprovechamiento de nutrientes a partir de los residuos locales elaborados.

#### **1.4. Hipótesis**

Por su composición, los residuos de demolición, en los que están presentes concretos y altos contenidos de hidróxido de calcio, relacionados con valores altos de pH que pueden afectar la disponibilidad de nutrientes y, por ello, el crecimiento de las plantas. No obstante, se espera que tanto las distintas propiedades físicas y químicas detectadas en los residuos originales, como las diferentes mezclas obtenidas consideradas como “sustratos experimentales”, darán información sobre su potencial para permitir el crecimiento de las plantas. Por otra parte, la aplicación de composta como componente orgánico del “suelo artificial”, se espera propicie un alto grado de mineralización, lo que aportará nutrientes disponibles para las plantas mejorando, además, entre otras las propiedades físicas de los “sustratos experimentales”, su capacidad de retención de humedad.

## **2. Marco Teórico**

### **2.1 Suelo y sustrato de cultivo**

#### **2.1.1 Suelo**

El suelo es un sistema complejo que se encuentra compuesto por tres fases: (sólida, líquida y gaseosa). La fase sólida está constituida por una fracción mineral y otra orgánica; la fracción mineral consiste de partículas de varios tamaños, formas y composición química y la fracción orgánica incluye residuos en diferentes etapas de descomposición y organismos vivos; la fase líquida está compuesta por el agua que rodea a la fase sólida, por lo tanto, su composición

química dependerá de dicha fase y, como se localiza entre los diferentes espacios vacíos generados por las partículas, tendrá distintos grados de libertad de movimiento. La fase gaseosa es una mezcla de gases que se encuentra entre los espacios de las partículas que no están llenos de agua (Baver *et al.*, 1972). Las tres fases en el suelo no se encuentran en proporciones fijas, estas cambian continuamente dependiendo de variables como el clima, la vegetación y el manejo (Hillel, 1998). Bajo condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas, la fase sólida mineral constituye un  $\leq 50\%$  del volumen total del suelo, mientras que la fase líquida y gaseosa comprenden alrededor de un 25% cada una. La parte orgánica en la mayoría de los suelos minerales constituye un  $\leq 5\%$  (Lal & Shukla, 2004).

Otra definición del suelo es la siguiente: como una “capa extremadamente delgada que cubre a nuestro planeta, soporta todas las formas de vida terrestre y contribuye con nutrientes a los ecosistemas acuáticos y marinos”. Adicionalmente, los suelos actúan como un filtro vivo de los desechos antropogénicos (Ming *et al.*, 2012).

### **2.1.2 Fase sólida**

La fase sólida de un suelo se encuentra conformada principalmente, por elementos minerales de diferentes formas y tamaños y, en una menor proporción por elementos orgánicos; esta segunda parte es de gran importancia para la nutrición de las plantas.

### **Fracción Mineral**

La parte mineral de los suelos se encuentra conformada por partículas de diversa composición, dependiendo del material parental del cual se generó dicho suelo; estas partículas son de diversas formas y tamaños. A la caracterización de las partículas del suelo por su tamaño y su clasificación en clases se conoce como textura. El Sistema Internacional de la Ciencia del Suelo clasifica a las partículas

en: arenas (entre 2 a 0.02 mm), limos (entre 0.02 a 0.002 mm) y arcillas (<0.002 mm; Buckman y Harry, 1993).

La porosidad es un índice del espacio poroso relativo en un suelo. Su valor general está en intervalos de 0.3 - 0.6 (30-60%). Suelos de textura gruesa tienden a ser menos porosos que suelos de textura fina, aunque el tamaño medio de poros individuales es mayor en los de textura gruesa. En suelos arcillosos, la porosidad es altamente variable ya que el suelo alternativamente se hincha, se encoge, se agrega, se dispersa, se compacta y se agrieta. Generalmente, el término porosidad se refiere a la fracción de volumen de poros y este valor debe ser igual, en promedio, a la porosidad superficial (la fracción de poros en un área de sección transversal representativa), así como a la porosidad lineal promedio (la longitud fraccional de poros a lo largo de una línea recta que pasa a través del suelo en cualquier dirección). Sin embargo, la porosidad total no revela nada acerca de los tamaños o formas de los distintos poros en el suelo. (Hille, 1998)

La porosidad en un suelo se encuentra determinada por dos variables:

(1) la densidad aparente que es la razón de la masa del suelo al volumen total que ocupa dicha masa, que se encuentra expresada en unidades de masa por volumen de suelo y (2) la densidad real de las partículas que expresa el peso de 1cm<sup>3</sup> de partículas sólidas. En la mayoría de los análisis mecánicos de suelos se utiliza el valor de 2.65 mg/m<sup>3</sup> como valor medio (Baver *et al.*, 1972); sin embargo, la densidad real puede variar si el suelo se origina de otro tipo de minerales, por ejemplo de suelos volcánicos.

### **Fracción Orgánica**

La parte orgánica representa una pequeña fracción del volumen total del suelo pero juegan un papel importante en numerosos procesos como en su fertilidad y la capacidad de amortiguamiento ambiental (Lal & Shukla, 2004).

Los efectos en la calidad del suelo por el uso de enmiendas orgánicas son: mejorar la estructura del suelo; aumentar la capacidad de retención de agua; aumentar la disponibilidad de nutrientes y aumentar la biodiversidad del suelo. Los efectos ambientales de la materia orgánica en los suelos son atribuidos a su alta capacidad de amortiguamiento (buffer), quelación de metales pesados, filtración de contaminantes y reservorio de carbono (Lal\_&\_Shukla, 2004).

### **2.1.3 Fase líquida del suelo y propiedades relacionadas**

La fase líquida del suelo está conformada por el agua retenida en el espacio poroso, siendo un importante reservorio de agua dulce, conteniendo alrededor de 50 veces la cantidad encontrada en los ríos y arroyos (Lal\_&\_Shukla, 2004).

El contenido de agua encontrada en los suelos se encuentra afectado por dos tipos de fuerzas: fuerzas positivas que mejoran la afinidad del suelo con el agua (fuerzas de cohesión y adhesión). Por el contrario, las fuerzas negativas que retiran el agua del suelo (gravedad, evaporación, absorción de raíces) (Lal\_&\_Shukla, 2004).

La curva de retención humedad del suelo es la relación que existe entre el contenido de humedad y el potencial de la matriz de los suelos; también se expresa como la presión del agua en los poros del suelo (Figura 1). El potencial matricial es determinado por la porosidad total y la distribución del tamaño de poros principalmente; otros factores como el contenido de materia orgánica del suelo también son importantes.

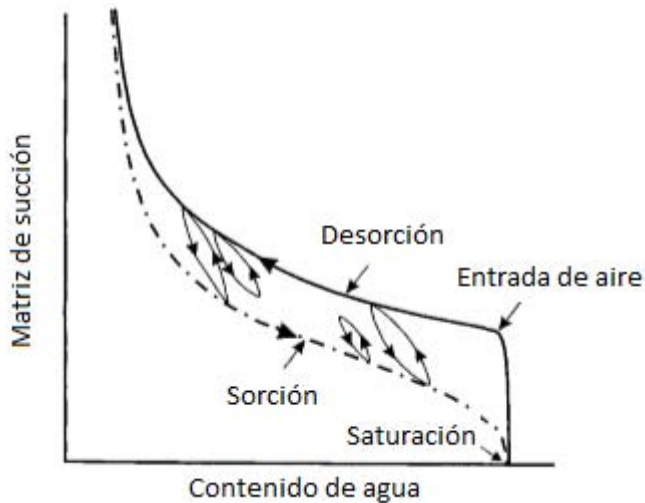


Figura 1: Curva de humedad de los suelos con base al contenido de humedad y la succión de la matriz de suelo (Hillel, 1998)

Dicha curva ha sido descrita matemáticamente mediante modelos empíricos por diferentes autores, por ejemplo Van Genuchten (1980):

$$\theta E = [(1 - a\psi)^n]^{-m} \quad (1)$$

En donde  $\psi$  es la succión matricial,  $\theta$  es la humedad volumétrica,  $a$ ,  $n$  y  $m$  son parámetros empíricos con las siguientes consideraciones  $a > 0$ ;  $n > 1$ ;  $\psi \geq 0$ ;  $0 < m < 1$ . El  $n$  se valor de encuentra entre 1.2 y 4, y el valor de  $a$  entre  $10^{-3}$  y  $10^{-2} \text{cm}^{-1}$ .

En la Edafología se definen a dos puntos de humedad principalmente, los cuales son la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. La capacidad de campo en el suelo se conoce cuando un suelo completamente saturado, se le permite drenar libremente bajo la fuerza de gravedad sin haber pérdida debido a la evaporación, hasta que el contenido de humedad del suelo se acerca a un nivel de equilibrio. El tiempo requerido para llegar a este punto se ha fijado arbitrariamente en dos días (Baver *et al.*, 1972).

El punto de marchitez permanente es el límite inferior del contenido de humedad del suelo en el que las fuerzas de cohesión y adhesión que retienen la humedad



en el suelo exceden con mucho la fuerza que las raíces de las plantas pueden ejercer para extraer la humedad del suelo. Por ello, en el punto de marchitez permanente el agua ya no está disponible para las plantas (Lal\_&\_Shukla, 2004). De este modo, el agua disponible para las plantas se define como la humedad comprendida entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente.

La velocidad con la que el agua atraviesa una masa de suelo se conoce como conductividad hidráulica, la cual es afectada por la textura y estructura del suelo, al igual que por la porosidad total, la distribución del tamaño de poros y la tortuosidad de los mismos y, en general, por la geometría de los poros del suelo, así como por los atributos del fluido como la densidad y viscosidad (Hillel, 1998).

La conductividad eléctrica es la medida utilizada para determinar la salinidad de un suelo. Los suelos salinos se relacionan con conductividades eléctricas mayores a 4mmho/cm a 25°C y los suelos no salinos se caracterizan por conductividades eléctricas menores a 4 mmho/cm a 25°C (Tan *et al.*, 2011). Los suelos salinos tienen efectos negativos sobre la capacidad de las plantas para absorber agua y nutrimentos, reduciendo su crecimiento y desarrollo.

El pH en el suelo está dado por la relación de iones  $H^+$  sobre iones  $OH^-$  en la solución del suelo (fase líquida). Se dice que un suelo es ácido si su pH es menor a 7; en este caso, se posee una dominancia de iones  $H^+$ , y alcalino cuando su dominancia es de iones  $OH^-$  y su pH es mayor a 7, y neutro cuando su pH es de 7 y posee una misma concentración de iones  $H^+$  y  $OH^-$  (Buckman\_&\_Harry, 1993). El pH tiene un efecto directo sobre las formas y disponibilidad de nutrimentos para las plantas; por ello, la mayoría de las plantas prefieren un pH entre ácido y neutro; debido a que hay una mayor disponibilidad de nutrimentos bajo estas condiciones.

#### **2.1.4 Fase Gaseosa**

En esta fase se realiza el proceso de intercambio gaseoso entre la atmósfera y el suelo, en el cual se busca prevenir una deficiencia de oxígeno en el suelo, ya que las raíces de las plantas realizan un proceso de respiración el cual tiene efectos directos sobre la productividad de la planta y existen diversas comunidades microbianas localizadas en los suelos que dependen de una respiración aeróbica. (Hillel, 1998)

#### **2.1.5 Servicios ecosistémicos de los suelos**

Las funciones de los ecosistemas se refieren a la diversidad biológica, la complejidad del hábitat, y a los procesos realizados dentro de los ecosistemas. Los bienes de los ecosistemas (como los alimentos) y servicios (como la asimilación de residuos) representan los beneficios derivados, directos o indirectos, sobre las poblaciones humanas provenientes de las funciones de los ecosistemas. Para simplificar, se refieren a los bienes y servicios de los ecosistemas juntos como servicios ecosistémicos (Constanza et al, 1997).

#### **Suelos naturales**

Morel *et al.* (2015) indica que las principales funciones aportadas por los suelos naturales son:

- Soportar el crecimiento de plantas
- Mantenimiento de la piscina de biodiversidad
- Filtración y transformación de sustancias
- Almacenaje de sustancias
- Fuente de materias primas
- Soporte físico y cultural de las actividades humanas
- Archivo del patrimonio geológico y cultural

## **Suelos urbanos**

Los suelos en ecosistemas urbanos realizan funciones específicas como: soporte de edificios, infraestructura de caminos, agricultura urbana y manejo de residuos (Morel *et al.*, 2015).

Los suelos urbanos, ya sea suelos naturales modificados por el hombre o suelos construidos, incluyendo las azoteas verdes, ofrecen varios servicios ecosistémicos. Ellos pueden estar cerca con respecto a los suelos naturales en sus capacidades para cumplir con una serie de funciones (suelos multifuncionales). Los servicios proporcionados van, desde biomasa no alimentaria usada para la producción de fibra, hasta la producción de biomasa de comida, regulación del flujo del agua en la ciudad, mantenimiento de la biodiversidad, mitigación de la contaminación, calidad del aire, efectos sobre el clima a nivel local (controlar la temperatura urbana, aislamiento término local), almacenamiento de carbono y protección de capital natural del suelo por el uso de materiales secundarios para la construcción del suelo (Morel *et al.*, 2015).

### **2.1.6 Tecnosoles**

La Base de Referencia Mundial del Recurso del Suelo (WRB, 2007) define a los tecnosoles como suelos cuyas propiedades y pedogénesis están dominados por su origen técnico. Contienen una gran cantidad de artefactos (algo en el suelo reconocible hecho o extraído de la tierra por los seres humanos), o están sellados por roca técnica dura (material duro creado por los seres humanos, que tienen propiedades diferentes de la roca natural). Incluyen suelos que se forman de residuos (lodos, cenizas, escombros y polvos de minas), pavimentos con sus materiales no consolidados subyacentes, suelos con geomembranas y suelos construidos en materiales hechos por el hombre.

El Programa “Cooperación Transfronteriza España-Portugal” dentro de su proyecto: “Vehículos de Transferencia” describe a los Tecnosoles como suelos

artificiales que son elaborados con propósitos específicos para solucionar problemas como pueden ser: el pH de terrenos, la eutrofización, los metales pesados, la contaminación con arsénico, y el soporte de plantas.

Es importante distinguir estos suelos de los suelos urbanos que son creados por procesos de urbanización; o bien, material del suelo que tiene una capa superficial hecha por el hombre de más de 50 cm de espesor, que ha sido producido por la mezcla llenado o contaminación de la superficie debido a zonas urbanas o suburbanas (Phillip, 1985).

La WRB (2007) menciona que las características de los Tecnosoles son: poseer un 20%o más de artefactos en los primeros 100 cm de la superficie del suelo o hasta roca continua o una capa cementada o endurecida, lo que se encuentre a menor profundidad. Otra opción es que contenga una geomembrana continua que de muy lentamente permeable a impermeable, construida de cualquier espesor que comience dentro de 100 cm de la superficie del suelo, o roca dura técnica presente dentro de los 5 cm de la superficie del suelo y que cubra el 95 por ciento o más en extensión horizontal del suelo. La fase sólida de los sustratos tecnogénicos es altamente variable y su composición presenta una heterogeneidad pronunciada. Por ejemplo, los residuos de construcción contienen cal, pero también pueden estar libres de carbonatos. La actividad de descomposición del suelo puede ser alterada por los cambios de pH, con consecuencias en las transformaciones de compuestos de C y N (Yao *et al.*, 2009).

## **2.2 Áreas verdes**

### **2.2.1 Definición espacios verdes urbanos**

Los espacios verdes urbanos son lugares al aire libre con cantidades significativas de vegetación, que existe principalmente como áreas seminaturales, son vistos como últimos vestigios de la naturaleza en las zonas urbanas (Beatley *et al.*, 2000).

### **2.2.2 Beneficios espacios verdes urbano**

#### **Ecosistémicos**

Los espacios verdes urbanos proporcionan un mejoramiento del clima urbano, mediante la mitigación de la intensidad del efecto “isla de calor” en climas con importantes niveles de radiación solar; además, de la rehidratación de la atmósfera en ciudades de climas áridos, el refrescamiento del aire y la consecuente reducción de las cargas térmicas de verano y los ahorros de energía asociados (Cantón *et al.*, 2001).

La vegetación urbana puede mitigar muchos de los impactos ambientales del desarrollo urbano, por ejemplo:

- Mejora la calidad del aire mediante la absorción de gases de efecto invernadero, la liberación de oxígeno y el filtrado de partículas en suspensión (Nowak *et al.*, 2007).
- Reduce los niveles de ruido mediante la absorción del mismo por el follaje.
- Protege los suelos (Konijnendijk, 2003).
- Reduce la energía utilizada en la climatización de los edificios, mediante la moderación del clima; esto se logra al reducir la exposición solar para todo el entorno urbano mediante la generación de sombras, aliviando las condiciones ambientales impuestas por el calentamiento climático (Stocco *et al.*, 2015).

## **Sociales**

Las áreas verdes tienen importantes funciones sociales, tales como los beneficios físicos de trabajar en un jardín (Doron *et al.*, 2005) y los beneficios psicológicos, como la reducción de tensión y estrés, resultante de las vistas a la naturaleza en las proximidades de la casa. En el caso de los jardines comunitarios y granjas comunitarias, podrían reservarse como un espacio público común para apoyar las funciones de producción a través del crecimiento de las plantas comestibles y ornamentales (utilizados para alimentar a los residentes locales o vender para obtener ingresos); esta función puede ser particularmente importante para los residentes en zonas de bajos ingresos, donde el acceso a alimentos sanos y frescos podría ser limitado (Franco *et al.*, 2008). Además, Los jardines comunitarios pueden tener un papel social importante al traer individuos juntos en un entorno comunitario y mediante el fomento de ejercicio al aire libre (Lovell *et al.*, 2009).

Los parques a menudo sirven como sitios de actividad física, que se asocia con una mejora de la salud y la reducción del riesgo de mortalidad por cualquier causa y muchas enfermedades crónicas y mentales (Wolch *et al.*, 2014). Las zonas verdes urbanas se encuentran relacionadas con la reducción del estrés, generando sensaciones de relajación y tranquilidad sobre los ciudadanos. (Chiesura *et al.*, 2004). Los residentes de bajos ingresos necesitan mejores accesos a parques y espacios abiertos porque ellos no pueden permitirse otras formas de entretenimiento. Los niños que habitan en viviendas de alta densidad de población tienen una mayor necesidad de accesos públicos a áreas verdes para jugar, lo que significa salud mental, desarrollo físico y social (Anita, 2015).

Las coberturas verdes y bosques urbanos pueden moderar las temperaturas, proporcionando sombra y un área de refrigeración, lo que ayuda reducir el riesgo de enfermedades relacionadas con el calor para los habitantes de la ciudad (Wolch *et al.*, 2014).

## **Económicos**

Las funciones de la naturaleza urbana pueden proveer beneficios económicos tanto para los municipios como para los ciudadanos. Purificación del aire por los árboles, por ejemplo, puede conducir a la reducción de los costos de medidas de reducción y prevención de contaminación. Por otra parte, la estética, valores históricos y recreativos de los parques urbanos, aumentar el atractivo de la ciudad y su promoción como destino turístico, generando empleo e ingresos. Además, elementos naturales tales como árboles o agua aumentan los valores de las propiedades (Chiesura *et al.*, 2004)

Las ciudades a menudo han recurrido a zonas verdes para proporcionar entornos atractivos para el asentamiento de empresas y poblaciones (Konijnendijk, 2003). Las áreas con alta cobertura de vegetación son normalmente ocupadas por los segmentos ricos de la sociedad (Pedlowski *et al.*, 2002)

Los patios residenciales en entornos urbanos pueden incluir áreas para la producción de alimentos u otros cultivos, lo que contribuye a la agricultura urbana. La agricultura urbana es común en los países en desarrollo, y en algunos países desarrollados durante los tiempos de guerra, cuando el hambre es una amenaza realista. La agricultura urbana puede proporcionar importantes beneficios ambientales en una ciudad, ya que reduce la energía requerida para el transporte de alimentos al consumidor, y disminuye los residuos debido al compostaje y la reducción de materiales de envasado (Lovell *et al.*, 2009). Los jardines comunitarios en ambientes residenciales puede aumentar la eficiencia en el procesamiento de alimentos y reducir los costos de transporté (Lovell *et al.*, 2009).

Finalmente, los beneficios económicos futuros de los espacios urbanos verdes son adaptar a las ciudades para anticipar los impactos del cambio climático como altas temperaturas, incremento en las inundaciones y las tormentas, (Anita, 2015).

### **2.2.3 Estado actual de las áreas verdes en México**

Desde 2007, durante la presentación del plan verde de la ciudad de México, ya se tenía bajo conservación 13,600 hectáreas de áreas sensibles (Siemens *et al.*, 2010). En 2015, dentro del primer informe de gobierno para la ciudad de México, se firmaron convenios para proteger y conservar los espacios verdes urbanos con un alto valor por los servicios ambientales que aportan. Estos convenios se realizaron con la delegación Xochimilco para la administración del Bosque de Nativitas y San Luis Tlaxiátemalco, que poseen una superficie de 23 hectáreas entre ambos; además, con la Delegación Iztacalco para la administración del bosque urbano Ciudad Deportiva Magdalena Mixihuca, cuya superficie es de 150 hectáreas.

Otros espacios son la Alameda central con 57,850 m<sup>2</sup> de áreas verdes; el Bosque de Chapultepec con una extensión de 686 hectáreas y el Bosque de San Juan de Aragón con una superficie de 160 hectáreas; este último, considerado uno de los principales bosques urbanos de la Zona Metropolitana del Valle de México.

Ese mismo año pero dentro del segundo informe de gobierno, a los predios particulares que conforman la ciudad de México se les entregaron 445 constancias de preservación ambiental conciliando un total de 275,075 m<sup>2</sup> de área verde preservada. Por último, en el tercer informe de gobierno de dicho año se menciona que actualmente se cuenta con 34,991 m<sup>2</sup> de azoteas naturadas en la Ciudad de México.

### **2.2.4 Fertilidad y productividad del suelo**

El suelo es fértil cuando contiene y suministra a las raíces, cantidades adecuadas de nutrientes, agua y aire para que un determinado cultivo crezca y produzca bien. Un suelo fértil tiene una estructura y profundidad adecuadas para proporcionar un ambiente favorable al desarrollo de las plantas y mantendrá sus condiciones favorables durante un largo periodo, inclusive ante influencias adversas climáticas y de vegetación (Graetz, 1990).



Un suelo es productivo cuando posee la capacidad de permitir el crecimiento de una planta determinada o secuencia de plantas bajo un sistema dado de manejo (Foth *et al.*, 1982). Por lo tanto, un suelo para ser productivo debe ser fértil; en cambio, un suelo fértil puede no ser productivo, debido a que no tiene las prácticas de manejo adecuadas para el crecimiento de la planta de interés.

### **2.2.5 Sustrato de cultivo**

Los sustratos de cultivo son mezclas de materiales utilizados en el cultivo dentro de contenedores o espacios aislados, los cuales han sido utilizados como una alternativa para sustituir al suelo natural. La importancia del cultivo en sustratos generados por el hombre, viene a razón de que la mayor parte de la producción de plantas ornamentales se realiza en contenedores o macetas por lo tanto en sustratos compuestos o elaborados. También se entiende como sustratos al suelo localizado en jardineras, espacios de ocio y deportivos que están sobre un espacio confinado y por lo tanto presentan un aislamiento con respecto al suelo natural de la zona. Raramente un sustrato se encuentra conformado por un componente único, puesto que es difícil que un solo material tenga inicialmente todas las características físicas y químicas adecuadas para el cultivo (Burés, 1997).

### **Características deseables en un sustrato de cultivo**

Las características deseadas en los sustratos con fines de soporte de plantas en áreas verdes son:

- Resistencia a la compactación.
- Adecuada aireación y drenaje.
- Suficiente capacidad de retención de agua y permeabilidad.
- Adecuado volumen de raíces y configuración.
- Apropiada reacción del suelo y estado de fertilidad.
- Protección de la superficie

(Phillip, 1985).

## 2.3 Materiales utilizados en la construcción de áreas verdes de zonas urbanas: naturales y de desecho

### 2.3.1 Materiales normalmente utilizados como sustrato de plantas

La construcción de las áreas verdes se refiere al uso de diferentes materiales que sirven como sustrato para el sostenimiento de las plantas, de acuerdo a sus características permiten el aporte de diferentes nutrientes o favorecen las propiedades físicas o químicas del sustrato. En la construcción de suelos a la medida, se requiere de una fracción mineral y de una fracción orgánica, normalmente se utilizan materiales naturales (Tabla 1), o se extrae suelo de un área natural.

Tabla 1: Listado de materiales normalmente utilizados en áreas verdes, uso y fuente de información

<b>Material</b>	<b>Uso</b>	<b>Fuente de información</b>
Abono	Mejorar la retención de humedad, fuente de carbono y nitrógeno.	Conocimiento local (Xochimilco)
Agrolita	Mejora la aireación y retención de humedad.	Conocimiento local (Xochimilco)
Arenas	Mejora la aireación y drenaje.	Velasco <i>et al.</i> , 2011
Corteza de árbol o residuo de madera	Mejora la retención de humedad, mejora la aireación y fuente de carbono.	Bures,1997 Velasco <i>et al.</i> , 2011
Composta	Mejorar la retención de humedad, fuente de carbono y nitrógeno.	Conocimiento local (Xochimilco)
Corcho	Mejora la conductividad eléctrica, pH (6 y 6.5) y porosidad.	Bures,1997
Fibra de coco	Mejora retención de humedad y conductividad hidráulica y fuente	Bures, 1997

	de carbono.	
Grava	Mejora la aireación	Velasco <i>et al.</i> , 2011
Mármol	Mejorar aireación y decorativo.	Conocimiento local (Xochimilco)
Paja	Mejora la retención de humedad y fuente de carbono.	Conocimiento local (Xochimilco)
Piedra pómez	Mejorar la porosidad.	Conocimiento local (Xochimilco)
Tepojal	Mejorar la porosidad.	Conocimiento local (Xochimilco)
Tezontle	Mejora aireación, mejora la retención de humedad	Velasco <i>et al.</i> , 2011
Tierra de hoja (Encino)	Aporte de nutrientes, mejora la retención de humedad.	Conocimiento local (Xochimilco)
Tierra negra	Aporte de nutrientes, mejora la retención de humedad.	Conocimiento local (Xochimilco)
Zeolita	Mejorar la aireación.	Conocimiento local (Xochimilco)

### 2.3.2 Importancia de la reutilización de materiales de desecho en la ciudad de México

En México se producen 30,000 t diarias de residuos de construcción y cerca de 6,500 toneladas son producidas en el Distrito Federal. Se estima que una obra de demolición genera 900 kg/m<sup>2</sup> de residuos; mientras que una obra de construcción genera 200 kg/m<sup>2</sup>. Asimismo, en cada metro cúbico de obra de construcción se generan 0.068 m<sup>3</sup> de residuo de construcción, y se estima que cada m<sup>2</sup> de construcción genera 0.30 m<sup>3</sup> de residuo de construcción a excepción de las construcción de hoteles y hospitales donde se llegan a generar 50 m<sup>3</sup> de residuo por m<sup>2</sup>.

La disposición final para todos estos desechos son: tiraderos a cielo abierto, barrancas, zonas de reserva ecológica, cauces de ríos y rellenos sanitarios. Afectando al paisaje, generando partículas suspendidas y emisión de gases a la atmosfera (maquinaria de transporte). La mayor parte de estos desechos no son depositados en un lugar correcto o enviados a reciclaje, ya sea por la poca vigilancia en sus procesos de transporte y disposición final, los costos de los mismos, o la falta de conciencia; por ello, es necesario el buscar alternativas para el uso de los mismos (<http://www.concretosrecicladados.com.mx/>)

### **3 Materiales y métodos**

#### **3.1 Selección de los materiales**

##### **3.1.1 Materiales minerales**

Los materiales minerales fueron obtenidos de la empresa Concretos Recicladados, fundada en el año 2004, que se dedica al reciclaje de los residuos construcción, y demolición cuenta con el uso de máquinas de trituración y clasificación, computarizadas y robotizadas, equipadas con motores ecológicos, para reciclar los materiales pétreos, con una capacidad de producción de 2,000 toneladas diarias. Los procesos que son llevados a cabo dentro de las instalaciones son recepción, almacenamiento, trituración y clasificación.

En la primera etapa, que se refiere a la recepción del escombros, se evalúa que los materiales estén libres de materiales indeseables que pueden restar calidad a los productos reciclados. Los materiales se clasifican en dos tipos:

1. Materiales aceptados: adocretos, arcillas, blocks, tabiques, cerámicos, concreto armado, concreto simple, mamposterías, ladrillos, y fresado de carpeta asfáltica.

2. Materiales indeseables: basura orgánica, aceites, grasas, asbestos, baterías, llantas usadas, papel plásticos, químicos, tanques de gas, textiles, vidrio, tabla-roca o yeso, lodos o jaboncillo, y enseres domésticos.

El almacenamiento, dependiendo de las características del escombro, se realiza en cuatro diferentes sitios:

1. Almacén de concreto simple o armado.
2. Almacén de materiales mezclados (Todos los materiales aceptados sin considerar residuos de excavaciones y fresado de carpeta asfáltica)
3. Arenas y Arcillas producto de excavaciones.
4. Fresado de carpeta asfáltica.

Con base en la granulometría deseada, se realiza la trituración y clasificación de los materiales de los diferentes almacenes. Se utilizan dos tipos de equipos:

1. Equipo de Trituración que cuenta con un electroimán para la separación del acero y con un sistema de aspersión para obtener la estabilización de polvos.
2. Equipo de Cribado que permite clasificar los materiales en 4 curvas granulométricas diferentes.

Los materiales quedan entonces a disposición de los usuarios que son generalmente las empresas constructoras de caminos y carreteras.

Los residuos que se utilizaron fueron: concreto molido, residuo de demolición y residuos de excavación. En este último rubro, son residuos de excavación de basaltos y en menor proporción de tepetates. A continuación se muestran los componentes de dichos residuos (Tabla 2):

Tabla 2: Materiales encontrados en la recicladora de concreto y su composición

<b>Material</b>	<b>Composición</b>
Concreto	Mezcla de cemento (Clinker [Producto de la calcinación a 1.450°C de una mezcla de piedra caliza, arcilla y mineral de hierro], yeso y aditivos), fragmentos de roca y agua
Residuo de demolición	Mezcla de adocretos, blocks, concretos, cerámicos, mamposterías, ladrillos y tabiques
Residuo de excavación	Arenas recicladas (Con propiedades equivalentes al tepetate y sin los inconvenientes de sus altos índices plásticos)
Tepetate	Capas endurecidas de origen volcánico

### **3.1.2 Material orgánico**

Uno de los componentes orgánicos más comúnmente utilizado en la construcción de suelos urbanos es la composta. En el trabajo se utilizó la composta obtenida en octubre de 2014 de la Planta de Compostaje que se encuentra dentro de Ciudad Universitaria, y que pertenece a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Esta planta de compostaje fue fundada en 1994 con el fin de dar uso a los desechos orgánicos producidos en las instalaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México. Ahí se procesan, a diario, de 25 a 36 m<sup>3</sup> de los residuos generados en la Ciudad Universitaria (CU). Únicamente se utilizan los residuos procedentes de las diferentes áreas verdes dentro de la institución y se obtienen cerca de 140 m<sup>3</sup> de composta al mes (aproximadamente 15 % de los desechos procesados), utilizados en el mantenimiento y mejoramiento de las áreas verdes de dicha institución.

Adicionalmente, se extraen subproductos como el triturado de madera, que se ocupa como acolchado en camellones o áreas sin pasto, a fin de mejorar el suelo y transferir los beneficios a la vegetación.

## 3.2 Selección de plantas

Se seleccionaron 4 especies de plantas para evaluar lo siguiente:

A - el efecto de la demanda de agua en especies vegetales, con relación a las propiedades físicas de los mezclas, se llevó a cabo un experimentos con 3 especies con diferente demanda hídrica; alta, media y baja (pasto, cempasúchil y sedum respectivamente). Las plantas fueron sembradas en las distintas mezclas descritas en el apartado 4.1.3 para observar su supervivencia.

B - la capacidad de sostener plantas de crecimiento rápido y producción de biomasa través de la producción de Jitomate (especie perenne), considerando las variables de crecimiento (altura), producción de biomasa (peso), estrés hídrico (turgencia).

### 3.2.1 Características de las plantas

Tomate (*Solanum lycopersicum L.*)

La humedad en el suelo más favorable para el desarrollo del tomate es de 50 a 60% con respecto a la porosidad tota del suelo, valores mayores a este intervalo reducen la liberación de polen y por lo tanto la polinización. Incluso valores superiores al 80% favorecen al desarrollo de enfermedades fungosas, principalmente el tizón tardío (*Phytophthora infestans*), tizón temprano (*Alternariasolani*) y moho gris (*Botrytiscinerea*); valores inferiores al 50% disminuyen la transpiración en la planta, generando problemas de deficiencia de calcio en los frutos (Velasco *et al.*, 2011). Requiere de: una capacidad de retención de humedad entre el 20 y 30; una capacidad de aireación entre el 30 y 40%; una elevada porosidad (del 85%); una capacidad de intercambio catiónica baja o nula, salinidad baja y un pH entre 5.5 y 6.8 (Velasco *et al.*, 2011).

Pasto (Tifeagle)

Este pasto requiere dosis constantes de agua y una alta cantidad de materia orgánica. Por su utilización en la alimentación del ganado, tiene fuertes impactos sobre esta actividad; por ejemplo, el aumento en el precio de la leche en Estados Unidos y la Unión Europea de 2001 a 2011, debido al aumento en el consumo de insumos de nitrógeno y fósforo como fertilizantes químicos (Mihailescu *et al.*, 2015)

Cempasúchil (*Tagetes erecta* L.):

También conocida como caléndula africana y cempasúchil, es una planta anual, firme, dura, ramificada, erguida y crece hasta 90cm de alto (O'Gorman *et al.*, 1963), requiere un pH entre 5.5 y 7, una conductividad eléctrica menor de 3mS/cm, suelos bien drenados y una densidad aparente de 1.28g/cm<sup>3</sup>. Sirve como un inhibidor de corrosión en acero templado (Mourya *et al.*, 2014). Las hojas y flores se utilizan en infusiones para combatir los cólicos y fiebres intermitentes, al igual que contra la afección estomacal y del hígado (O'Gorman *et al.*, 1963).

Sedum (*Sedum praealtum* A.D.C.):

El sedum soporta toda clase de terrenos desde salinos a calcáreos (Lamb *et al.*, 2003). Necesita poca agua, con un riego una vez por semana en primavera y verano y una vez al mes en invierno; requiere de suelos con buen drenaje (Lamb *et al.*, 2003). Tiene usos medicinales (Desinflamante, cicatrizante, espermaticida, antiséptica, antibiótica, cauterizante), y también se utiliza en la venta para jardines.

### **3.3 Preparación y Caracterización de los sustratos**

#### **3.3.1 Materiales**

Los materiales seleccionados fueron pasados a través de una malla de 3 mm de diámetro que es el valor correspondiente a gravas finas; esto buscando una relación de los materiales con los tamaños de partícula normalmente encontrados en un suelo natural.



Posteriormente, los materiales fueron homogeneizados sobre una lona y se tomaron 15 puntos de muestra aleatorios obtenidos mediante un código en MATLAB mencionado en el anexo, para su almacenaje y análisis.

### **3.3.2 Mezclas de materiales**

Una vez caracterizados los materiales individuales se diseñaron nueve diferentes mezclas conociendo las propiedades de los materiales originales, como textura y capacidad de campo, para obtener diferentes condiciones y, con ello, observar los efectos sobre el crecimiento de las plantas. Las mezclas fueron homogeneizadas y se tomó una alícuota de 5 kg, con doble propósito: caracterizar las propiedades físicas y químicas y almacenar un poco en el cuarto frío para conservar la muestra original, el resto de la mezcla fue posteriormente colocado en dos macetas con dimensiones de 49.7 cm de largo por 30 cm de ancho y 10 cm de altura, así como en 11 bolsas negras (con un volumen por bolsa de 1.355 cm<sup>3</sup>)

## **3.4 Métodos analíticos:**

### **3.4.1 Propiedades físicas**

Las propiedades físicas fueron analizadas mediante la recopilación de metodologías utilizadas en el manual de procedimientos analíticos de Flores y Alcalá (2010).

#### **Capacidad máxima de retención de humedad**

Utilizando el método de capacidad máxima de retención de humedad (Schinner *et al.*, 1993), se colocó en un embudo con filtro 30g de muestra secada al aire (por duplicado) registrando el peso (SE); posteriormente se saturó con agua destilada dejando escurrir durante 24 horas y se registró el peso (SAF). Para la obtención de blancos se colocaron en 2 embudos únicamente el papel filtro se peso y dejó escurrir durante dos horas tomando dicho peso (F).

Para obtener la capacidad máxima de retención de humedad (CA) se utiliza la siguiente fórmula:

$$CA (\%) = \left( \frac{SAF-F}{SE} \right) - 1(2)$$

### Densidad aparente

Con base en el método de volumen de cilindro conocido, se utilizó una probeta de 50 ml ( $V_t$ ) la cual fue llenada hasta dicho valor con la muestra homogenizada (por duplicado); posteriormente, se extrajo la muestra de la probeta y se colocó en un recipiente, el cual fue secado a 110°C y con esto se obtuvo el peso seco de la muestra ( $P_{ss}$ ) en g. Para obtener la densidad aparente ( $P_b$ ) en g sobre  $cm^3$  se utilizó la siguiente fórmula:

$$P_b = \left( \frac{P_{ss}}{V_t} \right)(3)$$

### Densidad de partícula

Se siguió el método con el que se obtuvo la densidad de partícula ( $\rho_p$ ) mediante el pesado de un picnómetro limpio y seco ( $p$ ); posteriormente, se pesó al picnómetro con 10 g de muestra ( $ps$ ); a continuación, se pesó al picnómetro con 10 g de suelo y lleno de agua ( $psw$ ); consecutivamente se retiró la muestra del picnómetro y se llenó con agua y se pesó ( $pw$ ), así se obtuvo la densidad del agua a 20°C ( $d_w$ ) utilizando la siguiente fórmula para obtener la densidad de partícula en  $g/cm^3$ :

$$\rho_p = d_w \frac{ps-p}{[(ps-p)-(psw-pw)]} \quad (4)$$

### Porosidad

La porosidad se determinó a partir de los valores de la densidad aparente (DA) y de partícula (DP) mediante la siguiente fórmula:

$$Porosidad = 1 - \left(\frac{D_A}{D_P}\right) \quad (5)$$

El valor obtenido anteriormente por la formula se multiplica por 100 para obtener el grado de porosidad en términos de porcentaje.

### **Textura**

La textura se determinó mediante el método de la pipeta donde se tomaron 10g de muestra seca, que fue tamizada por una malla de 0,63mm con lo que se consigue separar las arenas; estas fueron colocadas en una cápsula de porcelana y secadas a 105°C por 24 horas, al finalizar este tiempo fueron pesadas. El resto de la muestra se colocó dentro de una probeta de 1l, se agregó 10 ml de solución dispersante de Hidroximetilfurfural y se aforó con agua destilada, se dejó equilibrar la suspensión por 3 horas y media, se agito vigorosamente durante 1 minuto con un agitador manual. A continuación, se introdujo una pipeta y aplicando vacío se llenó, se descargó el contenido en una capsula de porcelana y se secó a 105°C por 24 horas, anotando el peso que corresponde a la fracción arcilla. Con lo anterior se obtuvieron los pesos de la fracción arcilla y arenas y, por su diferencia con el peso total, se obtiene el valor correspondiente a los limos.

### **Conductividad hidráulica**

Se determinó la conductividad hidráulica saturada en laboratorio mediante muestras alteradas en cilindros de acero de 100cm<sup>3</sup>, los cuales se llenaron hasta obtener el peso correspondiente a dicho volumen con la densidad aparente de la muestra; se colocó un papel filtro en la parte baja del cilindro y se dejó saturando con agua por capilaridad durante 24 horas. Posteriormente, se colocó dicho cilindro en un soporte universal, sobre él un cilindro de plástico con dos entradas de mangueras a diferente altura y, en la parte inferior, un embudo Buchner sobre una probeta de 50ml. En el cilindro de plástico se colocarón dos mangueras en la parte superior, una conectada a la llave de agua y la otra al drenaje; se abrió la llave hasta lograr que el nivel del agua alcanzara al del drenaje y comenzara su

escape; se observó que la velocidad del flujo del escape al drenaje contra la del escape hacia la probeta fueran iguales. Posteriormente, se vació el contenido de la probeta y se comenzó a tomar el tiempo de llenado cada 20 o 10 ml. Finalmente, para obtener la conductividad hidráulica saturada se utilizó la siguiente fórmula:

$$K_s = \left(\frac{Q}{At}\right) * \left(\frac{l}{H}\right) \quad (6)$$

En donde  $K_s$  representa la conductividad hidráulica saturada (cm/hora),  $Q$  el volumen recogido por la probeta ( $\text{cm}^3$ ),  $A$  el área del cilindro metálico ( $\text{cm}^2$ ),  $t$  el tiempo transcurrido hasta obtener el valor de  $Q$  (horas), la altura del cilindro metálico (cm), y  $H$  es la altura del cilindro de plástico hasta la manguera de drenaje (cm).

### **3.4.2 Propiedades químicas**

Las propiedades químicas se determinaron en los dos tipos de muestras: sólidas y líquidas a partir de un extracto de saturación; en el primer caso para conocer las características de los materiales y en el segundo caso para obtener la fracción lábil de las muestras.

#### **Fracción sólida**

##### **Conductividad eléctrica**

Utilizando el método para la determinación de la conductividad eléctrica en suelos (ISRIC, 1992); se pesaron 10g de suelo en frascos Nalgene de 125ml, agregando 25ml de agua destilada; posteriormente, fueron agitados durante 18 horas. Al finalizar el tiempo de agitación se calibró la celda del conductímetro (de la marca LaMotte, modelo CON 6) con un buffer de solución salina de 1413 mS; una vez calibrado el equipo, se continuó colocando la celda dentro de los frascos con muestra y anotando su resultado; entre cada medición se debe enjuagar la celda con agua destilada.

## pH

Aplicando el método para determinación de pH en suelos (ISRIC, 1992); se pesaron 10g de muestra y colocaron en frascos Nalgene de 125ml, a los cuales se les agregó 25ml de agua, se agitaron durante 18 horas; al finalizar el tiempo, se calibro el potenciómetro (de la marca Beckman modelo PHI 34), con buffers de calibración entre 7 y 10 debido a la naturaleza de las muestras para, finalmente, determinar el pH de las muestras.

## Análisis del índice de germinación en la composta

Método descrito por la norma NADF-020-AMBT-2011, para evaluar la madurez mediante fitotoxicidad. Primero se secó la muestra a 65°C por 24 horas, posteriormente se realizó una suspensión 1:5 de dicha muestra con agua desionizada y se agito por 18 horas.

En cajas de Petri se colocaron filtros Whatman No. 40 y se distribuyó sobre ellos 10 semillas de lechuga; para las muestras estudiadas, se agregó 4ml de la suspensión y para los blancos 4 ml de agua desionizada. Se dejaron las cajas a temperatura ambiente por 4 días.

Para determinar el índice de germinación, primero se determinó el porcentaje de germinación relativa (PGR) mediante la siguiente fórmula:

$$PGR = \left( \frac{\text{Numero de semillas germinadas en el extracto}}{\text{Numero de semillas germinadas en el blanco}} \right) * 100 \quad (7)$$

Posteriormente se determinó el crecimiento relativo de la radícula (CRR) con la siguiente fórmula:

$$CRR = \left( \frac{\text{Elongación de radículas en el extracto}}{\text{Elongación de radículas en el blanco}} \right) * 100 \quad (8)$$

Y, finalmente, se determinó el índice de germinación con la siguiente fórmula:

$$IG = \frac{PGR * CRR}{100} \quad (9)$$

Para la realización de los análisis siguientes: contenido de aniones y cationes, metales totales, carbono orgánico e inorgánico, se generó una pasta de saturación. La pasta se preparó con 300g del material, se agregó el agua requerida para llegar a saturación, se dejó por 24 horas y se extrajo mediante una bomba de vacío la muestra (líquida).

### **Carbono y Nitrógeno Total**

Las muestras fueron previamente secadas a 60°C durante 24 horas; posteriormente, fueron molidas en un mortero de porcelana hasta eliminar cualquier estructura arenosa; posteriormente y fueron evaluadas en un analizador elemental CNHS/O Perkin Elmer 2400 series II, bajo las siguientes condiciones:

- Gas acarreador: Helio
- Temperatura de combustión: 980°C
- Temperatura de reducción: 640°C
- Detector: Conductividad térmica
- Compuesto de calibración: Acetanilida
- Material de referencia: LECO soil calibration for C N Spart 502-309

### **Caracterización de la solución del suelo**

Para los siguientes análisis se generó una pasta de saturación. La pasta fue preparada con 300g del material, al cual se le agregó el agua requerida para llegar a saturación, se dejó por 24 horas y se extrajo mediante una bomba de vacío la muestra (líquida).

### **Aniones y cationes.**

El análisis de aniones y cationes en muestras líquidas se llevó a cabo por cromatografía de iones, utilizando un equipo constituido por: una bomba binaria de la marca Waters modelo 1525, un automuestreador de la misma marca modelo 717 y un detector conductimétrico marca Waters modelo 432, del laboratorio de Cromatografía del Instituto de Geología de la UNAM.

Para la determinación y cuantificación de aniones en las muestras se utilizó como, fase estacionaria, una columna IC-PaK ® de Waters cuyas dimensiones son: 4.6x75 mm, empleando como fase móvil una disolución constituida de acetonitrilo:butanol:gluconato borato de sodio:agua, en una relación 12:2:2:84 en modo Isocrático a un flujo de 1 ml/min

Para la determinación y cuantificación de cationes en las muestras se utilizó, como fase estacionaria, una columna Metrosep C4® de Metrohm, cuyas dimensiones son: 4X100 mm empleando, como fase móvil, una disolución constituida de HNO<sub>3</sub> 1.9 mM + ácido dipicolínico 0.8 mM, en modo Isocrático, a un flujo de 0.9 ml/min

Tabla 3: Límites de detección en el método de aniones y cationes

<b>Ión</b>	<b>LD (mg/L)</b>
Fluoruros	3
Cloruros	3
Bromuros	5
Nitratos	5
Fosfatos	10
Sulfatos	10
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	50
Sodio	0.4
Potasio	0.3
Calcio	0.4
Magnesio	0.2
Amonio	0.2

LD= Límite de detección

### **Metales totales:**

Se empleó el método de espectrometría por inducción acoplada de emisión plasma átomo (EPA Method 6010C). Mediante un espectrómetro de masas modelo OPTIMA 8300 DV, marca Perkin Elmer. Con este método, las muestras

son nebulizadas y el aerosol resultante es transportado a la antorcha de plasma, en donde cada elemento emite un espectro diferente, el cual es detectado por sensores fotosensibles que marcan los distintos picos de emisión producidas por dicha muestra.

Tabla 4: Límites de detección en el método de metales totales

<b>Elemento</b>	<b>Límite de detección Instrumental (mg/L)</b>
Ag	0.067
Al	0.004
As	0.027
B	0.077
Ba	0.002
Be	0.003
Bi	0.013
Ca	0.018
Cd	0.003
Co	0.002
Cr	0.002
Cu	0.002
Fe	0.002
K	1.029
Li	0.002
Mg	0.030
Mn	0.002
Mo	0.005
Na	0.201
Ni	0.003
Pb	0.007
Sb	0.020
Se	0.023
Si	0.006
Sn	0.007
Sr	0.002
Ti	0.003
Tl	0.022
V	0.002
Zn	0.003



### 3.4.3 Pruebas realizadas a los suelos en las mesocosmos

Con cada una de las mezclas, se prepararon dos macetas de cultivo con un volumen de 14,090 cm<sup>3</sup>; en las mezclas, se sembraron especies vegetales, seleccionadas con base en sus requerimientos hídricos (apartado 3.2). Los valores de capacidad de retención de humedad estuvieron basados en los valores de la capacidad de la composta y en la relación de que, a mayor contenido orgánico mayor capacidad de retención de humedad. A las mezclas de baja capacidad de retención de humedad, se les colocó 8 plántulas de *Sedum praealtum* y 4 cactáceas; a las de media capacidad de retención de humedad se les colocaron 8 plántulas de cempasúchil y a las de alta capacidad de retención de humedad, se les colocaron dos capas de pasto de 15 x 15 cm. Las macetas experimentales se mantuvieron en el invernadero durante 8 meses; en ese tiempo, se aplicaban un riego semanal con un volumen de agua equivalente a la capacidad de campo de cada una. Después de los ocho meses, se hicieron las siguientes pruebas:

A continuación se muestra en la tabla 5 se muestra la relación entre los diferentes tipos de plantas y su demanda hídrica.

Tabla 5: Listado de mezclas, tipo de planta y demanda hídrica

Mezcla	Planta	Demanda hídrica
1	Cactácea y <i>Sedum</i>	Baja
2	Cempasúchil	Media
3	Pasto	Alta
4	Cactácea y <i>Sedum</i>	Baja
5	Cempasúchil	Media
6	Pasto	Alta
7	Cactácea y <i>Sedum</i>	Baja
8	Cempasúchil	Media
9	Pasto	Alta

Las macetas se conservaron en el invernado por un periodo de 8 meses, el riego se realizó semanalmente aplicando únicamente la cantidad de agua necesaria para satisfacer el déficit hídrico y llevar al suelo a capacidad de campo. Esto último para evitar la pérdida de nutrimentos por lixiviación.

### **Análisis de la capacidad de retención de humedad mediante el análisis del estrés hídrico de las plantas**

El estrés hídrico de las plantas fue evaluado durante tres periodos, en los cuales el riego se hizo cada dos semanas. Cada periodo se inició con una humedad a capacidad de campo. Al finalizar cada periodo, se evaluaba el contenido de agua del suelo. Al concluir las seis semanas se anotó, de cada una de las macetas, el número de especies supervivientes.

### **Análisis de la capacidad de drenaje**

Para evaluar la capacidad de drenaje en los suelos, se midió la velocidad de infiltración de una lámina de agua en superficie. El procedimiento consistió en aplicar agua hasta saturar el suelo de la maceta; a continuación, se agregó un volumen de alrededor 3 litros de agua, equivalentes a una lámina mínima de 10 mm sobre la superficie del suelo de la maceta. A continuación, se registró la velocidad de infiltración de la lámina de agua; para ello, se utilizó la siguiente fórmula para obtener el valor de la velocidad de infiltración:

$$V_s = h/t(10)$$

Donde:  $V_s$  es velocidad de infiltración (cm/hora),  $h$  es la altura de la lámina de agua (cm) y  $t$  es el tiempo tomado en recorrer dicha distancia por la lámina de agua (hora).

### **Curva de humedad**

Mediante el monitoreo del contenido de agua del suelo (medido con una sonda TDR o Time Domain Reflectometry) y el estado energético del agua (mediante bloques de yeso), durante por lo menos 45 días, se obtuvieron los datos necesarios para construir la curva de retención de humedad de los suelos creados. Los parámetros experimentales pueden ajustarse a alguno de los modelos empíricos que existen en la literatura; esto nos permite obtener parámetros hidráulicos del suelo. La función de retención de humedad es no lineal, por lo tanto la determinación de los parámetros de la curva requieren un ajuste no lineal de la ecuación, debido a lo cual el ajuste de los datos experimentales a un modelo no es un trabajo trivial. Por lo anterior, en el trabajo de tesis recurrimos al programa SWRCFit (Seki, K., 2007), el cual ajusta los datos experimentales a tres modelos: el modelo de Brooks and Corey, el modelo de van Genuchten, y el modelo de logarítmico de Kosugi's. El modelo seleccionado para la tesis fue el de van Genuchten descrito anteriormente.

Los datos de entrada al programa son las parejas de datos tensión-humedad del suelo, que se obtuvieron mediante bloques de yeso y el sensor tdr, instalados en las macetas experimentales una vez iniciado el experimento. Los parámetros hidráulicos obtenidos para cada una de las nueve mezclas fueron: la humedad a saturación ( $\theta_s$ ), la humedad residual ( $\theta_r$ ), los parámetros  $n$  y  $\alpha$  para dicho modelo.

#### **3.4.4 Pruebas realizadas a los sustratos como soporte en bolsas de cultivo**

El análisis de los suelos creados se realizó evaluando el crecimiento de tomate cherry. Un volumen de  $1.4 \text{ cm}^3$  de cada una de las 9 mezclas se colocó en bolsas plásticas y, en cada una de ellas, se sembró una plántula de tomate cherry. El riego de las plantas se realizó semanalmente, agregando el volumen de agua necesario para llegar a la capacidad de campo de cada suelo. Se prepararon 11 bolsas de cada una de las 9 mezclas, y con ellas se realizaron las pruebas descritas a continuación.

### **Crecimiento de biomasa**

Se midió la altura de cada plántula con una periodicidad semanal, esto durante un periodo total de tres meses.

### **Peso seco de biomasa**

En el primero y segundo mes, se recolectaron las plántulas de tomate cherry de tres bolsas de cada una de las 9 mezclas; en el tercer mes, se recolectaron las plantas de las cinco bolsas restantes. Las plantas se dividieron en sus diferentes partes: hoja, tallos y raíces. Las hojas y tallos fueron cortadas y separadas con tijeras de jardinero, la recuperación de las raíces se hizo saturando el suelo con agua para suavizar los sustratos y reducir la pérdida de raíces finas; posteriormente, se enjuagaron para eliminar los residuos de los sustratos de las raíces. Las diferentes partes de las plantas se secaron a 60°C durante 72 horas y se determinó su peso.

### **Turgencia**

La turgencia es el fenómeno por el cual las células de una planta, se llenan de agua por osmosis y se hinchan. El análisis de la turgencia indica el estado del agua dentro de la planta y como las condiciones del medio ambiente afectan a la planta. Valores elevados de turgencia causan efectos sobre la planta como reducción o detención de la fotosíntesis, reducción del crecimiento de la planta y eventualmente la muerte.

La turgencia fue medida mensualmente en las diferentes plantas mediante la bomba de Scholander; con este equipo, se procedió a calibrar equipo para observar su correcto funcionamiento; posteriormente, se extrajo una extremidad de la planta (tallo) y se introdujo dentro de la bomba, se comenzó a administrar presión hasta observar un burbujeo constante en la extremidad de la planta y, de esta manera, se anotó el valor correspondiente a la presión en ese punto.

## 4 Resultados

### 4.1 Caracterización de los materiales seleccionados

Con base a las metodologías descritas anteriormente, se realizó la caracterización de las propiedades físicas y químicas de los 4 materiales minerales y de un material orgánico. Las características se describen a continuación:

#### 4.1.1 Caracterización física de los materiales minerales

Durante la caracterización física se separó a los materiales minerales del orgánico, para realizar un análisis específico de dichos componentes y observar sus diferencias.

Tabla 6: Resultados de la caracterización física de los materiales minerales.

Material	DA (g/cm <sup>3</sup> )	DP (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad (%)	CC (%)	Arena (%)	Arcilla (%)
Tepetate	1	2.3	54.7	47.8	40.4	18.2
Residuo de demolición	1.3	2.6	49.8	28.2	56.7	5.2
Concreto	1.5	3	50.4	24.6	64.3	3.6
Residuo de excavación	13	2.8	54.5	23.8	75.2	1.8

DA=Densidad Aparente, DP = Densidad de partícula CC=Capacidad de campo

En los resultados se observa que, de las propiedades físicas de los materiales minerales, por sus densidades aparentes y de partículas, los valores de porosidad fueron de alrededor del 50% y los valores de capacidad de campo menores al 30%; con excepción del tepetate que permaneció con un valor cercano al 50%. Sobre estos resultados se debe considerar que estos materiales son principalmente arenosos, con un bajo nivel de arcillas; a excepción del tepetate que posee un valor cercano al 20% de arcillas.

#### 4.1.2 Caracterización física del material orgánico

Tabla 7: Resultados de la caracterización física del material orgánico.

Material	DA (g/cm <sup>3</sup> )	DP (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad (%)	CC (%)
Composta	0.5	1.7	68.3	53.4

DA=Densidad Aparente, DP = Densidad de partícula CC=Capacidad de campo

La composta obtuvo una porosidad ligeramente inferior al 70% y una capacidad de campo arriba del 50%. Ambos valores son superiores a los obtenidos por los materiales minerales.

#### 4.1.3 Caracterización química de los materiales minerales

A continuación se muestran los resultados del análisis químico de los diferentes materiales minerales (Tabla 8).

Tabla 8: Resultados de la caracterización química de los materiales minerales

Material	pH	CE (dS/m)	C (%)	N (%)
Tepetate	8.14	1.45	0.16	0.02
Residuo de demolición	11.4	1.57	2.37	0.03
Concreto	10.35	0.98	1.08	0.01
Residuo de excavación	9.28	2.03	0.15	0

CC=Capacidad de campo, CE= Conductividad eléctrica, C= carbono total, N= Nitrógeno total

De los resultados de la parte mineral se observa que los materiales son alcalinos, con valores de pH superiores a 8; las conductividades eléctricas se encuentran entre 2 y 1 ds/m; los niveles de nitrógeno son casi nulos abajo del 0.03% y el carbono es variante pero inferior a 3% para el residuo de demolición y de 1% para el resto de los materiales.

Tabla 9. Contenido de aniones y cationes en los diferentes materiales

Muestra	F <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
	Concentración (mg/Kg)							Concentración (mg/Kg)				
Residuo de excavación	0	36	10	0	115	0	172	36	2	6	48	12
Tepetate	0	1215	553	0	880	0	662	164	0	33	285	197
Residuo de demolición	0	0	115	0	101	0	950	241	3	54	210	0
Concreto	0	57	129	0	329	0	848	172	1	34	280	2
Composta	0	0	737	0	4039	0	525	115	4	1714	277	125

En los resultados del análisis de aniones, el fluor, bromo y fosfatos fueron indetectables en todos los materiales. El tepetate obtuvo el valor más elevados en bicarbonatos, en los residuos de excavación y concreto fue muy bajo y bajo respectivamente e indetectable en los residuos de demolición y en la composta.

Respecto al contenido de cloruros, la composta dio el mayor contenido seguido del correspondiente al tepetate y el valor más bajo se detectó en los residuos de excavación.

Los nitratos se detectaron en todos los materiales, el valor más elevado lo tuvo la composta y en segundo lugar el tepetate. Los sulfatos están presentes en todos los materiales en valores altos y muy similares, a excepción de los residuos de excavación donde el contenido resultó mucho más bajo.

El sodio también estuvo presente en todos los materiales, las diferencias resultaron poco significativas con excepción de los residuos de excavación y de la composta en los que se detectaron el valor más bajo y bajo, respectivamente; no obstante, el valor más alto correspondió a los residuos de demolición y al concreto. En el caso del amonio, en todos los materiales resultó muy bajo e indetectable en el tepetate, correspondiendo a la composta el valor más alto, aunque no de manera significativa.

En cuanto al potasio, la composta tuvo de manera significativa el valor más alto, en los demás materiales los valores fueron bajos y notablemente muy bajo en los residuos de excavación.

El contenido de calcio resultó en cantidades similares en la mayoría de los materiales, con excepción de los residuos de excavación donde se detectó el valor más bajo.

Finalmente, el magnesio no fue detectable en los residuos de demolición, casi indetectable en los de concreto y muy bajo en los de excavación: no obstante, de manera significativa los valores más altos correspondieron al tepetate y a la composta.

Tabla 10: Resultado del contenido de metales en los materiales

Muestra	Al	Ba	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mn	Mo	Ni	Sr	Ti	V
	(mg/Kg)												
Tepetate	0.26	0.12	0.01	<LD	0.05	0.18	<LD	0.31	0.01	<LD	3	0.02	0.01
Residuo de demolición	0.02	0.02	<LD	0.22	0.06	0.01	0.01	<LD	0.05	0.01	0.96	<LD	0.06

LD= Limite de detección

Los resultados del contenido de metales se encontraron en concentraciones inferiores al 1% en la mayoría de los casos a excepción del estroncio con 3 mg/Kg para el tepetate y 1.5 para la composta.

#### 4.1.4 Caracterización química del material orgánico

Se realizó un análisis del componente orgánico con respecto al de su norma específica (NADF-020-AMBT-2011).

Tabla 11: Tipos de compostas, usos, pH y conductividad eléctrica en la NADF-020-AMBT-2011, junto con los resultados de la composta de CU

Tipo	A	B	C	CU- UNAM
Uso	Sustrato en viveros y	Agricultura ecológica y	Paisaje, áreas verdes	Áreas verdes



	sustituto de tierra para maceta	reforestación	urbanas y reforestación	
pH	6.7-7.5	6.5-8	6.5-8	7.76
CE	<4 dS/m	<8 dS/m	<12 dS/m	4.3dS/cm
C:N	<15	<20	<25	12.5
Índice de germinación	≥ 85 %	≥ 75 %	≥ 60 %	132%

\* CE= Conductividad eléctrica CU= Ciudad Universitaria

En el caso de la conductividad eléctrica, la relación C:N y el índice de germinación, la composta de la UNAM cumple con los requisitos para cualquier tipo de uso de acuerdo a la norma, pero por su valor de pH no es recomendable para el uso como sustrato de viveros y sustituto de suelo para cultivo (Tipo A). Destacan los niveles de nutrimentos (nitrógeno como nitratos; sulfatos; potasio; calcio y magnesio) en la composta de la UNAM.

Tabla 12: Resultados del contenido de aniones y cationes en el material orgánico

Muestra	F <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
	(mg/Kg)											
Composta	0	0	737	0	4039	0	525	115	4	1714	277	125

En la tabla 12 se observa que la composta es un material que provee concentraciones importantes de NO<sub>3</sub><sup>-1</sup> y K<sup>+1</sup> disponibles para las plantas, que provienen de la descomposición y mineralización de la materia orgánica con la que es elaborada que, en el caso de la composta de la UNAM, son residuos de jardinería.

Tabla 13: Resultado del contenido de metales en el material orgánico

Muestra	Al	Ba	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mn	Mo	Ni	Sr	Ti	V
	(mg/Kg)												
Composta	0.08	0.19	<LD	<LD	0.06	0.25	0.03	0.02	0.06	0.02	1.5	0.01	0.02

LD= Limite de detección

En la tabla 13 se observa que la concentración de metales dentro de la materia orgánica es inferior a 0.5 g/Kg en todos los casos a excepción del estroncio donde su concentración es de 1.5 mg/Kg.

Cabe resaltar que, en el caso de los metales, los siguientes elementos traza: arsénico, cadmio, plomo, antimonio, selenio, estaño, talio y zinc, no pudieron ser detectados debido a que su nivel de concentración estuvo, en todos los casos, por debajo del límite de detección del método analítico; por esta razón, no aparecen en las tablas 10 y 13.

Tabla 14: Concentraciones máximas de elementos traza, en mg/kg, en los tres tipos de composta (A,B y C según la norma NADF-020-AMBT-2011), en comparación con las concentraciones presentes en la composta de la UNAM utilizada en el experimento.

Tipo	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	(mg/Kg)						
<b>A</b>	0.1	0.7	70	70	25	45	200
<b>B</b>	0.7	1	70	150	60	120	500
<b>C</b>	2	3	250	400-500	100	200	1200-1800
<b>Composta CU UNAM</b>	0.03	<0.01	<0.01	0.06	0.02	0.01	<0.01

En la composta utilizada todos los valores de estos elementos traza (Tabla 14), quedaron por debajo de los límites de concentración aceptables indicados en la norma (NADF-020-AMBT-2011); por tanto, cumplió con todos los valores, con resultados inferiores a los expresados como límite de concentraciones de elementos traza (Tabla 14), por lo que cumple con los requerimientos de la norma,

respecto a los posibles usos indicados en la misma, respecto a la concentración de estos elementos traza. para recibir cualquier tipo de uso bajo este parámetro.

Tabla 15: Balance de cationes y aniones en los diferentes materiales

Muestra	Sumatoria aniones	Sumatoria cationes	Error relativo
Residuo de excavación	6	5	-10
Tepetate	63	39	-24
Composta	97	115	9
Residuo de demolición	25	24	-2
Concreto	28	23	-10

Se observa que, en la mayoría de los casos, el error es inferior al 10%, a excepción del tepetate que está cercano al 24% negativo.

#### 4.1.5 Preparación de los suelos como soporte de plantas

Con base en los resultados obtenidos en la caracterización de los materiales individuales, se prepararon mezclas, para las que se consideró una fracción mineral (que incluía dos de los materiales de desecho). En todas las mezclas, se utilizó tepetate ya que es un material natural por lo que los nutrientes y elementos internos se encontraran en un estado más estable y duradero, y la composta de CU (UNAM) como fracción orgánica.

Las tres combinaciones de fracción mineral fueron:

Tepetate + concreto

Tepetate + residuo de demolición

Tepetate + residuo de excavación

Con cada una de las tres combinaciones de fracción mineral, se preparó un sustrato con alta, media y baja capacidad de retención de humedad, basado en un alto, medio y bajo contenido de composta (10%, 20% y 30% respectivamente), lo que resultó en 9 diferentes mezclas. En la Tabla 16 se muestra la composición de cada una de las mezclas.

Tabla 16. Composición de las nueve mezclas preparadas. Los números indican los porcentajes de los materiales utilizados en la preparación de cada una de las mezclas

Porcentaje de material	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6	Mezcla 7	Mezcla 8	Mezcla 9
Tepetate	35	35	35	20	20	20	30	30	30
Residuo de demolición				70	60	50			
Concreto	55	45	35						
Residuo de excavación							60	50	40
Composta	10	20	30	10	20	30	10	20	30

## 4.2. Caracterización de las mezclas

### 4.2.1 Caracterización física de las mezclas

Las propiedades físicas de las mezclas generadas se muestran a continuación:

Tabla 17: Caracterización física de las 9 diferentes mezclas utilizadas en el proyecto

Mezcla	DA (g/cm <sup>3</sup> )	DP (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad (%)	CC (%)	Ks (cm/h)
1	1.33	2.24	40.39	28.12	2.06
2	1.22	2.22	45	32.39	2.77
3	1.15	2.2	47.91	35.52	3.72
4	1.24	2.1	40.85	34.05	1.64
5	1.2	2.09	42.62	34.49	2.50
6	1.16	2.08	44.5	35.17	3.58
7	1.35	2.24	39.71	27.24	2.29
8	1.24	2.19	43.18	29.07	2.90
9	1.15	2.16	46.72	31.11	4.07

DA= Densidad aparente, DP=Densidad de partículas, CC=Capacidad de campo,

Ks= Conductividad hidráulica saturada

## Densidad aparente y de partícula

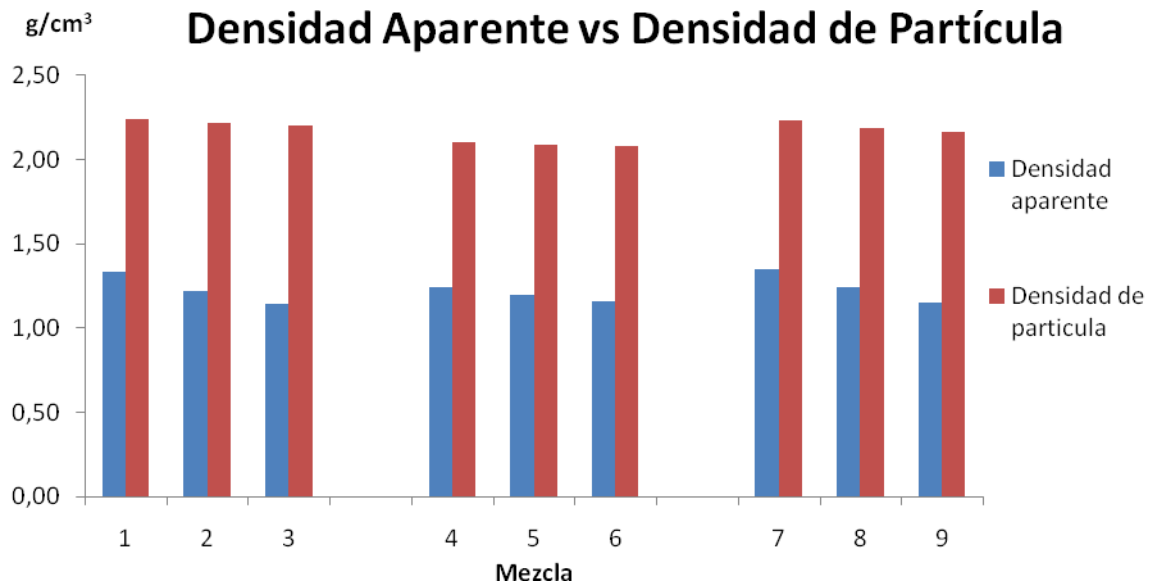


Figura 2: Densidad aparente y densidad de partícula de las diferentes mezclas generadas

En la figura 2, se observa que, en las mezclas preparadas con un mismo material mineral pero con diferente contenido de composta, las densidades, aparente y de partículas, tendieron a aumentar sus valores conforme se redujo el porcentaje de composta en la mezcla. Las densidades de partículas fueron muy similares entre las mezclas con concreto (1-3) y en las mezclas con residuo de excavación (7-9) los valores fluctuaron entre 2.2 y 2.24 g/cm<sup>3</sup>; mientras que en las mezclas de residuo de demolición (4-6) los valores resultaron ligeramente inferiores, entre 2.08 y 2.1 g/cm<sup>3</sup>.

## Porosidad y capacidad de campo

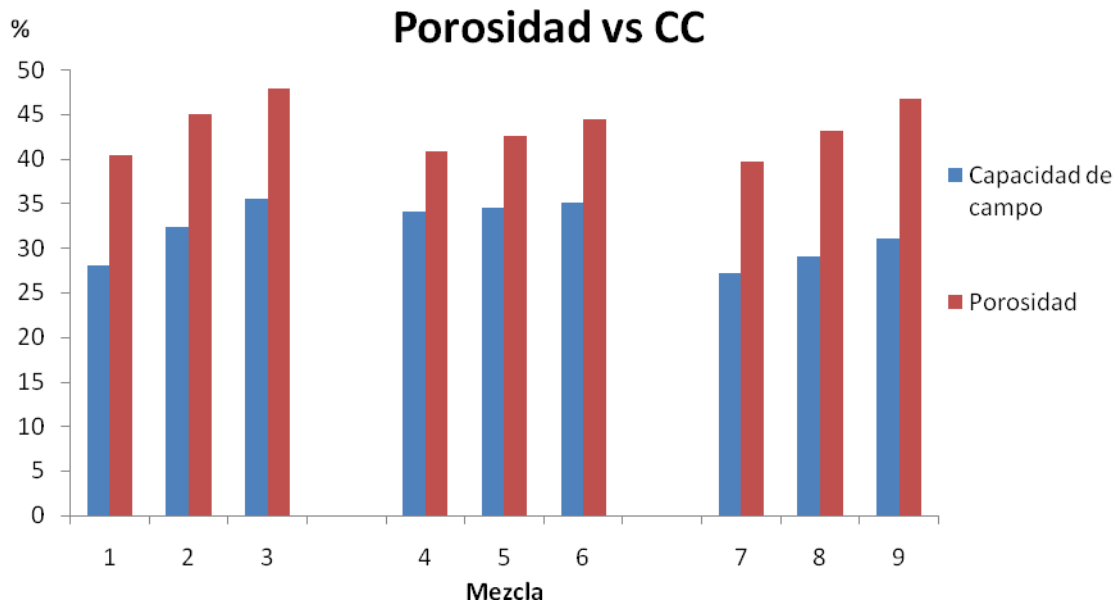


Figura 3. Porosidad y capacidad de retención de humedad, expresada como capacidad de campo en las diferentes mezclas

En la figura 3 se observa muy claramente que, en las mezclas a base de concreto (1 a 3) y residuo de demolición (7-9), sus valores tanto de porosidad como capacidad de campo aumentan conforme se aumenta el contenido de composta; y en el caso de la mezcla de residuo de demolición ocurre este mismo efecto aunque de manera menos significativa

## Porosidad y conductividad hidráulica

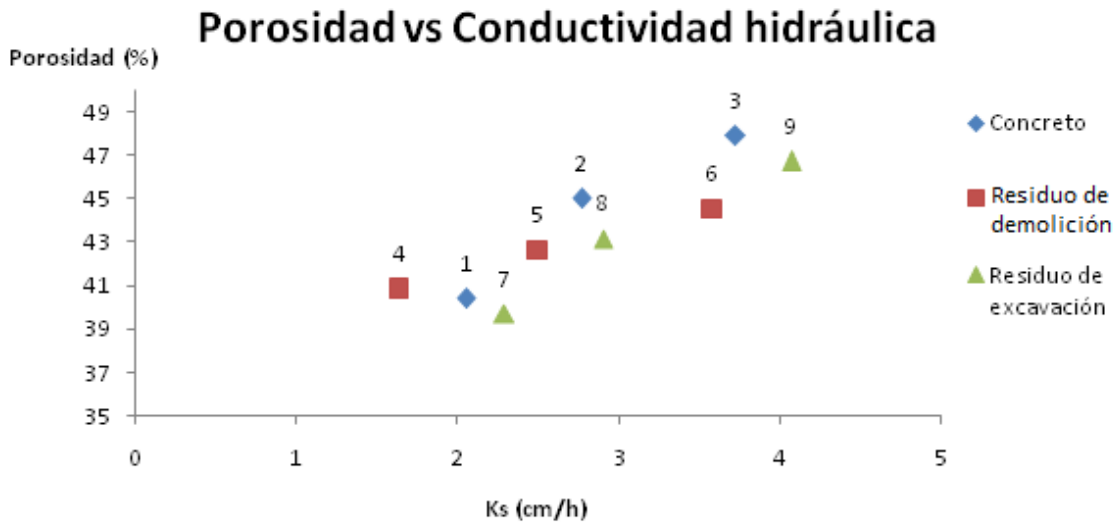


Figura 4: Porosidad y Conductividad hidráulica de las diferentes mezclas (1-9)

En la figura 4 se observa la relación entre el valor de conductividad hidráulica ( $K_s$ ) y la porosidad de los nueve sustratos, la tendencia en general es que a mayor porosidad mayor valor de conductividad hidráulica.



## 4.2.2 Caracterización química de las mezclas

Las propiedades químicas de las mezclas generadas se muestran en la tabla 18.

Tabla 18: Caracterización química de las 9 diferentes mezclas utilizadas en el proyecto.

Mezcla	pH inicial	pH a 3 meses de tomate	CE (dS/m)	CE a 3 meses en tomates (dS/m)	C (%)	N (%)	Relación C:N
1	8.89	8,79	1.18	0,95	1.88	0.12	16
2	8.75	8,62	1.36	1,15	2.4	0.17	14
3	8.57	8,44	1.57	1,39	2.97	0.24	12
4	10.37	9,07	1.62	1,49	2.67	0.12	22
5	10.2	8,86	1.74	1,59	3.5	0.21	17
6	9.97	8,63	1.83	1,72	4.19	0.28	15
7	8.27	8,21	0.93	0,44	1.16	0.11	11
8	8.11	8,11	1.06	0,50	1.87	0.17	11
9	8.08	8,01	1.17	0,67	2.96	0.25	12

CE= Conductividad eléctrica, C=Porcentaje de carbono, N= Porcentaje de nitrógeno.

### pH y conductividad eléctrica:

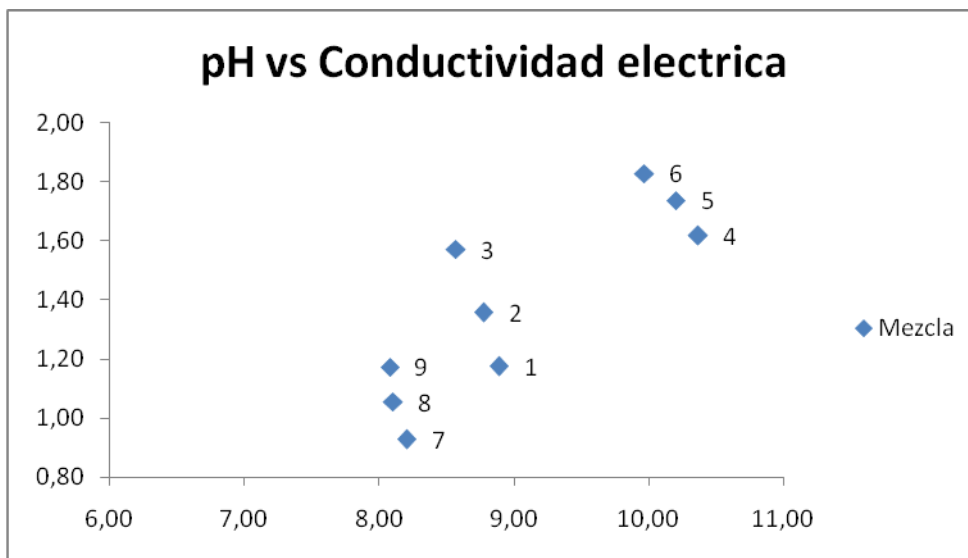


Figura 5. pH y conductividad eléctrica de las diferentes mezclas

En la figura 5 se observa como al aumentar el contenido de composta en las diferentes mezclas el pH tiende a disminuir de igual modo que, en todos los casos, se mantuvo en un valor alcalino y, por el contrario, la conductividad eléctrica a tiende a aumentar conforme sus los valores de composta aumentan; y por último, que los valores de conductividad eléctrica son inferiores a 2 dS/m en todos los casos.

### **Carbono y nitrógeno**

En la tabla 18 se observa que, en las nueve mezclas, el contenido de C oscilo entre 1.8 y 4%, mientras que el contenido de N fluctuó entre 0.11 y 0.28%, Los valores más altos de carbono son observados en las mezclas con base mineral de residuo de demolición (4, 5, 6), esto es observable en la tabla 8 en donde dicho material muestra los valores más altos de carbono con respecto a los otros materiales.

Considerando que las relaciones de carbono nitrógeno menores a 12 se relacionan con condiciones ricas en nutrientes y las mayores a 20 indican condiciones pobres. En el caso de las mezclas con concreto (1-3), se encuentran corresponden a condiciones de medias a ricas; por otra parte, las mezclas de residuo de demolición (4-6) se relacionan a condiciones de pobres a medias y las mezclas con residuo de excavación (7-9) en condiciones ricas. Bajo estas condiciones, se puede considerar que las plantas tendrán el mejor desarrollo en las mezclas con residuo de excavación (7-9), y el menor desarrollo en las mezclas con residuo de demolición (4-6).

## Aniones y cationes

Tabla 19. Concentración de aniones y cationes en las diferentes mezclas

	F <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
Mezcla	Concentración (mg/Kg)							Concentración (mg/Kg)				
1	<LD	881	243	<LD	624	<LD	641	136	3	51	282	67
2	<LD	764	320	<LD	787	<LD	694	152	1	99	313	88
3	<LD	353	471	<LD	1545	<LD	730	193	1	198	379	129
4	<LD	212	169	<LD	452	<LD	630	181	3	68	250	1
5	<LD	285	219	<LD	741	<LD	633	198	3	124	289	2
6	<LD	687	327	<LD	1209	<LD	735	225	2	203	396	10
7	<LD	734	205	<LD	548	<LD	219	76	1	46	116	62
8	<LD	450	292	<LD	1057	<LD	311	109	1	131	183	98
9	<LD	530	416	<LD	1594	<LD	385	138	2	247	239	126

En la tabla 19 se observa que, en la mayoría de los casos, al aumentar el contenido de material orgánico aumenta el valor de aniones y cationes, lo que indica que el principal aporte de dichos iones es la materia orgánica.

Por otro lado, la información de los iones solubles indica que hay valores muy altos de algunos de ellos, lo que probablemente significa que, al saturarse la solución, y se propicie la formación de sólidos por precipitación. Para verificar esta sospecha, se verificó la probable precipitación de sólidos a partir del programa de especiación Visual minteq 3.0. Este modelo permitió la formación de sales posiblemente generadas por precipitación; en dichas mezclas: aragonita, CaCO<sub>3</sub> hidrolizado, calcita, dolomita, huntita y valerita; de la misma forma que, en todas las mezclas, se obtuvo magnesita, con excepción de menos la 4 y 5 esto debido a que ambas mezclas presentan los menores contenidos de magnesio.

Tabla 20. Resultados del análisis de contenido de metales en las mezclas

Mezcla	Al	Ba	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mn	Mo	Ni	Sr	Ti	V
(mg/Kg)													
M1	0.05	0.05	<LD	<LD	0.03	0.04	<LD	0.02	0.03	<LD	1.61	<LD	0.01
M2	0.05	0.07	<LD	<LD	0.04	0.05	0.01	0.04	0.04	0.01	2.20	<LD	0.01
M3	0.09	0.09	<LD	<LD	0.05	0.08	0.01	0.05	0.05	0.01	2.28	0.01	0.01
M4	0.01	0.04	<LD	0.12	0.05	0.01	<LD	<LD	0.05	0.01	1.31	<LD	0.04
M5	0.02	0.05	<LD	0.10	0.05	0.01	<LD	<LD	0.06	0.01	1.65	<LD	0.04
M6	0.02	0.06	<LD	0.02	0.04	0.02	0.01	<LD	0.07	0.01	2.02	<LD	0.03
M7	0.07	0.07	<LD	<LD	0.03	0.06	<LD	0.04	0.02	<LD	1.35	0.01	0.01
M8	0.03	0.09	<LD	<LD	0.04	0.04	0.01	0.05	0.02	<LD	1.81	<LD	0.01
M9	0.04	0.11	<LD	<LD	0.04	0.05	0.01	0.02	0.02	0.01	1.97	<LD	0.01

LD= Limite de detección

En la tabla 20 se compara el contenido de metales en las mezclas, con respecto al de los materiales base (Tabla 12). En el caso de las mezclas, los metales: cobalto, litio, níquel y titanio las concentraciones estuvieron por debajo del límite de detección, lo que expresa que, al realizarse dichas mezclas, estos elementos se diluyeron al grado de casi ser indetectables.

Tabla 21: Balance de cationes y aniones en las diferentes mezclas

Mezcla	Sumatoria aniones	Sumatoria cationes	Error relativo
1	45	28	-25
2	49	35	-21
3	59	47	-16
4	29	24	-12
5	36	29	-15
6	55	40	-22
7	19	17	-11
8	39	29	-21
9	54	40	-22

En la tabla 21 se observa que los errores son negativos; ello hace referencia a que la composición del material sólido es relativamente soluble, de tal manera que muchos elementos entran en la solución, saturando la mezcla.

#### **4.3 Sustratos como soporte de plantas**

En los párrafos anteriores, se analizaron las propiedades físicas y químicas de las mezclas, en donde las diferencias encontradas entre ellas tendrán un efecto sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas; Además, de que, las condiciones que ofrecen las mezclas de sustratos obtenidas servirán para evaluar la capacidad de supervivencia de una planta bajo condiciones de estrés hídrico. En este apartado, se presentarán y discutirán los resultados obtenidos al evaluar las mezclas utilizadas como soporte de plantas en esta tesis.

#### **4.3.1 Evaluación experimental de las mezclas, para conocer su potencial como soporte de varias plantas, bajo condiciones de invernadero**

Las macetas experimentales y las plantas crecidas en los sustratos se conservaron en el invernadero por un periodo de 8 meses, el riego se realizó semanalmente aplicando únicamente la cantidad de agua necesaria para satisfacer el déficit hídrico y llevar a los sustratos a capacidad de campo. Esto último para evitar la pérdida de nutrientes por lixiviación.

Tabla 22: Plantas al inicio del experimento













Mezcla	Imagen	Mezcla	Imagen
1, 4		7	
5,8		2	
3,6		9	

Tabla 23: Plantas a los 8 meses del experimento

Mezcla	Imagen	Mezcla	Imagen
1, 4		7	
5,8		2	
3,6		9	



En la tabla 22 se muestra el desarrollo de las plantas al inicio del experimento; mientras que en la tabla 23 se aprecia el crecimiento después de transcurrir los ocho meses del experimento. En todas las mezclas ocurrió el crecimiento y desarrollo de las diferentes especies vegetales. Observando individualmente las macetas con la misma planta pero en diferente mezcla, no se encontró una diferencia muy marcada en el crecimiento de las diferentes especies.

### **Análisis de la viabilidad de las plantas bajo estrés hídrico: capacidad de retención de humedad de las mezclas**

Tal y como se explicó en la metodología, los sustratos en las macetas fueron llevados a capacidad de campo y se dejaron de regar durante dos semanas. Ese procedimiento se repitió tres veces. Al finalizar cada periodo, se evaluó la humedad de los sustratos y al final de los tres periodos de sequias se obtuvieron los datos mostrados en la tabla 24







Tabla 24. Mezclas de sustratos con su respectivo número de especímenes al inicio y al final del experimento, humedad inicial y final del suelo, y supervivencia de las plantas en las diferentes macetas.

<b>Mezcla</b>	<b>Número de especímenes iniciales</b>	<b>Humedad inicial (%)</b>	<b>Humedad final (%)</b>	<b>Porcentaje de supervivencia en A (%)</b>	<b>Porcentaje de supervivencia en B (%)</b>
1	12	28	9	100	100
2	8	32	10	88	100
3	*	35	10	*	*
4	12	34	12	100	100
5	8	34	12	75	75
6	*	35	10	*	*
7	12	27	10	100	100
8	8	29	9	100	100
9	*	31	9	*	*

\*Caso del pasto se utilizó una lámina de cultivo en la cual no se observó una diferencia durante el experimento

En la tabla 24 se mencionan porcentajes de supervivencia en A y B; esto se relacionan con las dos macetas utilizadas por grupo de mezclas, en donde se observa como en las mezclas con *Sedum* (1, 4, 7), no se observó la muerte de ninguna de las especies de plantas después de los tres periodos; ello por su alta resistencia a las sequías; en las de pasto (3, 6, 9) al ser una lámina de cultivo no se observó una pérdida marcada de especies. En el caso del cempasúchil (2, 5 y 8), en la mezcla 2 que tuvo como material mineral al concreto, sufrieron la pérdida se perdió de una planta en una de sus macetas y, en el caso del residuo de demolición, se observó la pérdida de 2 plantas en cada maceta; finalmente, en el tercer caso, correspondiente al residuo de excavación, no se observaron pérdidas.

Tabla 25: Plantas después de 2 semanas sin riego

Mezcla	Imagen	Mezcla	Imagen
4		7	
5		8	
6		9	

La tabla 23 se muestra el experimento con las plantas en su estado inicial, posterior a los tres periodos de sequía; las plantas con baja demanda hídrica no mostraron un efecto negativo; en las de demanda media, como se observa en la tabla 25, no se presentó una pérdida significativa de especies, que no fue mayor al 25% y, finalmente, en las de alta demanda, al ser una lamina de vegetación no

fue posible determinar el volumen de la pérdida de plantas, pero si se notó como las hojas mostraban deterioro, lo cual se ilustra en la tabla 25

### **Análisis de la capacidad de drenaje.**

Tal y como se explicó en la metodología, el experimento para evaluar la capacidad de drenaje de las mezclas, consistió en agregar agua al sustrato hasta llevarlo a saturación. Posteriormente, se adicionaron entre 2 y 3 litros de agua hasta conseguir una lamina de agua sobrepasando los 10 mm de altura; a continuación, se anotó la duración en que dicha lamina se infiltraba en el medio. Esto se realizó por triplicado en cada maceta donde las plantas ya presentaban un efecto sobre el sustrato

Tabla 26: Velocidad de infiltración en las macetas con relación a sus diferentes mezclas.

Mezcla	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vs (cm/h)	1.24	8.09	14.91	2.8	5.44	16.58	18.32	28.69	28.81

\* Vs= Velocidad de infiltración del sustrato de las macetas

Considerando que la velocidad de infiltración, vertical y en un sustrato saturado, es equivalente a la conductividad hidráulica saturada, En la tabla 26 se observa que los sustratos tienen valores de infiltración relacionados depende de su textura, por ejemplo: suelos o sustratos de tipo franco (1.32 cm/h) y arenoso (21 cm/h) (Flores & Alcalá, 2010), lo que se relaciona con un buen drenaje.

Los lixiviados obtenidos en este experimento, fueron analizados con respecto a los parámetros de pH y CE; los resultados se muestran en la tabla 27.

Tabla 27: Análisis de lixiviados al finalizar el experimento

Mezcla	CE (dS/m)	pH
1	11.1	8.5
2	12.7	8.4
3	13.2	8.3
4	13.6	8.7
5	13.8	8.6
6	14.4	8.5
7	8.5	8.4
8	9.4	8.2
9	10.7	7.9

CE= Conductividad eléctrica

No obstante que el riego de las macetas durante el tiempo experimental se realizó de tal forma que no existieran lixiviados, en esta etapa de sobre saturación, se pudieron recolectar los lixiviados. En la tabla 27, como primer punto se observa que, comparando los resultados con los valores obtenidos sobre la caracterización original de las mezclas (tabla 16), los lixiviados tienen valores superiores de conductividad eléctrica y, en contraparte, valores ligeramente inferiores de pH; normalmente se esperaría que, ambos valores, fueran inferiores; ya que se están analizando los lixiviados del material original, los cuales son soluciones más diluidas en comparación con las mezclas originales. El caso de que la conductividad eléctrica aumente, se relaciona con el hecho de que, en la recolección de lixiviados, se obtuvo un una parte del material solido del medio; esto debido a que, en comparación con el análisis original, las macetas contenedoras no poseían de un filtro que impidiera que materiales gruesos entraran en la solución. Como segundo punto, se observa un comportamiento similar al de las mezclas, tanto en el pH como la conductividad eléctrica, en donde

debido a que al aumentar el contenido de composta aumenta la conductividad eléctrica pero el pH se reduce.

### **Análisis de la capacidad de retención de humedad**

En la tabla 28 se muestra los valores de los diferentes parámetros obtenidos para cada una de las mezclas experimentales, junto con el coeficiente de correlación que indica el grado de ajuste de los datos al modelo.

Tabla 28: Curva de humedad con base al modelo de Van Genuchten

<b>Mezcla</b>	$\theta_s$ cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	$\theta_{cc}$ cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	$\theta_r$ cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	$\alpha$ 1/cm	n	R <sup>2</sup>	<sup>A</sup> $\theta_{cc}$ cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	<sup>A</sup> Porosidad %
1	0.33	0.14	0.12	0.07	4.1	0.93	0.28	0.40
2	0.35	0.17	0.11	0.01	2.1	0.88	0.32	0.45
3	0.42	0.21	0.17	0.09	3.0	0.94	0.36	0.48
4	0.33	0.14	0	0.09	1.7	0.93	0.34	0.41
5	0.36	0.18	0.13	0.09	2.3	0.94	0.34	0.43
6	0.39	0.25	0.18	0.09	3.6	0.93	0.35	0.45
7	0.19	0.13	0.0	0.05	1.6	0.98	0.27	0.40
8	0.24	0.15	0	0.25	1.3	0.93	0.29	0.43
9	0.40	0.24	0.07	0.30	1.6	0.99	0.31	0.47

<sup>A</sup>Medidos al inicio del experimento  $\theta_s$ = Punto de saturación,  $\theta_{cc}$ = Punto de capacidad de campo,  $\theta_r$ = Punto de marchitez permanente

En la tabla anterior, se observa que el ajuste de los datos al modelo de van Genuchten resultó relativamente adecuado; el coeficiente de correlación fue superior a 0.88 lo que habla de un buen ajuste; por lo que respecta a los valores del parámetro empírico, se aprecia que n cayeron en el rango (intervalo) indicado por el autor, que fluctúa entre 1.2 y 4. Sin embargo, los valores del parámetro  $\alpha$  fueron superiores al valor máximo de 0.01 que señala el autor del modelo (van Genuchten, 1980), este último comportamiento fue más notable en las mezclas 8 y

9, en las cuales se recolectaron datos durante únicamente 7 días; por lo anterior, se estima que será posible obtener un mejor ajuste si se monitorean los parámetros durante periodos prolongados superiores a los dos meses.

Con base en los resultados, en los tres casos (residuos de concreto, demolición y de excavación), la porosidad y capacidad de retención de humedad del suelo o sustrato está en función del contenido de composta, siendo mayor a mayor contenido del elemento orgánico y viceversa.

#### 4.3.2 Pruebas realizadas a los sustratos como soporte de plantas de tomate cherry

En los experimentos con bolsas de cultivo, se analizó el crecimiento y producción de biomasa de la especie vegetal “tomate cherry” en las nueve mezclas durante tres meses. Se registró el crecimiento, la producción de biomasa y la turgencia, a cada mes.

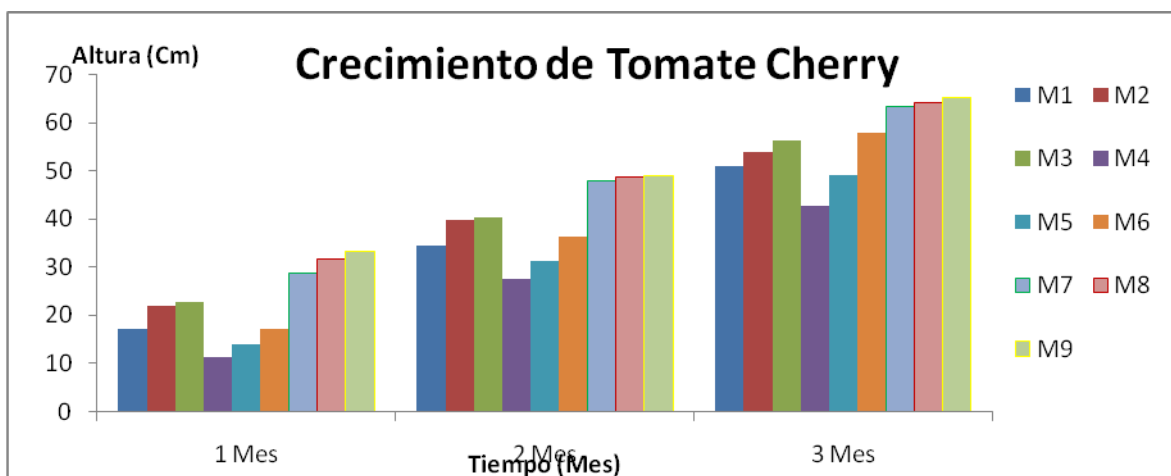


Figura 6: Crecimiento mensual del tomate cherry, durante tres meses, en las 9 mezclas.

En la figura 6 se observa como en cada uno de los meses, las plantas desarrolladas en las mezclas centrales obtenidas con residuo de demolición (4-6), tuvieron los valores de crecimiento más bajos, mientras que las que se desarrollaron en las mezclas obtenidas con residuo de excavación (7-9) lograron los valores más altos.

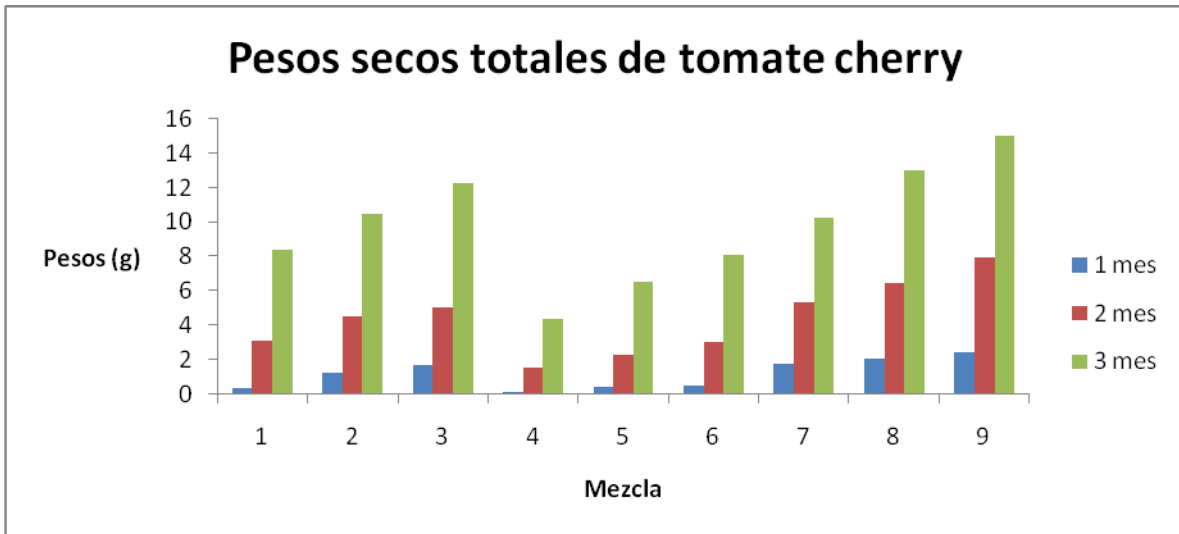


Figura 7: Grafica con los pesos secos finales de las plantas de tomate cherry durante los periodos de 1, 2 y 3 meses de riego.

La figura 7 está relacionada con la figura 6 ya que, en donde se obtuvieron los valores mayores de crecimiento también se logró el mayor valor de altura; con estos resultados se corrobora que el grupo de mezclas con residuo de excavación (7,8,9) permitieron obtener los mayores valores de crecimiento y de altura de las plantas. Mientras que con las mezclas con residuo de demolición (4,5,6) se obtuvieron los valores más bajos de crecimiento y peso seco.



## pH inicial vs pH 3 meses con tomate Cherry

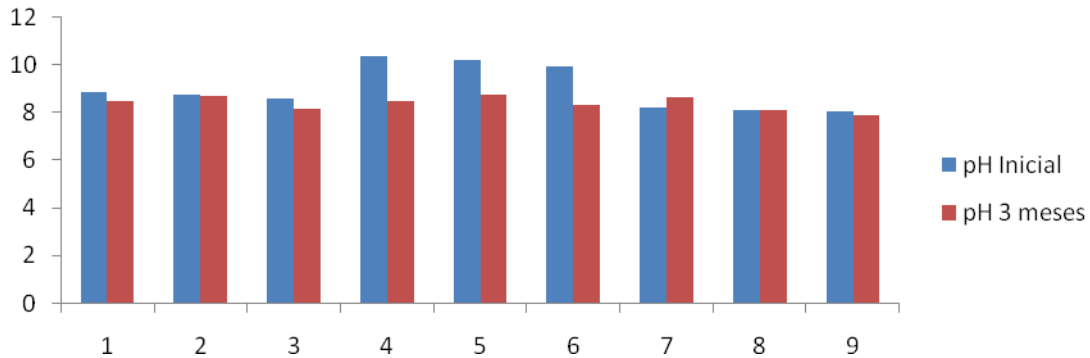


Figura 8: Comparación del pH al inicio del experimento con tomata Cherry y después de 3 meses de establecido.

Al pasar Después de 3 meses de establecido el cultivo de tomate, se volvió a medir el pH en las muestras del sustrato, observándose que todos los valores son inferiores a los valores de pH originales o de la primera medición, fluctuando entre 8 y 9; además, fueron muy similares entre ellos

## Turgencia

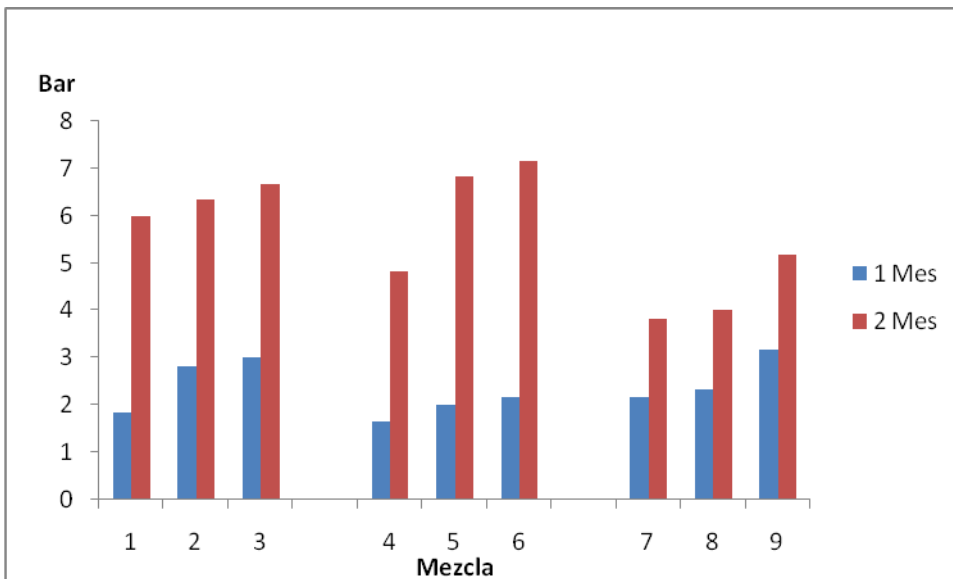


Figura 9: Valores de turgencia de las plantas desarrolladas en las nueve mezclas, en los primeros 2 meses.

Como se observa en la figura 9, la turgencia tiende a aumentar cuando el contenido de composta aumenta en las mezclas, esto se relaciona con dos aspectos: (1) que las plantas con mayor contenido de composta tendrían a crecer más; por ello, requerían más agua del sustrato y (2) el hecho de que a mayor contenido de composta hay un mayor contenido de sales en el sustrato, lo que provoca que la planta se esfuerce más por retener el agua dentro de ella, evitando que se realice un intercambio osmótico con el medio.

## **Discusión**

### **5.1 Caracterización de los materiales**

#### **5.1.1 Caracterización física de los materiales**

Como se observo en la tabla 5, dentro de los materiales minerales utilizados, el tepetate presentó los valores inferiores tanto en densidad de partícula como aparente, con 2.25 y 1.02 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Por lo que respecta a los residuos de concreto, los valores más altos fluctuaron entre 2.95 y 1.46 g/cm<sup>3</sup>. Como ya se ha mencionado anteriormente, el residuo de demolición es una combinación principalmente de concreto con otros materiales, en su mayoría cerámicos por que, al compararse con la muestra de concreto puro, se observa que hay una reducción en la densidad aparente en un 11% y en la densidad de partícula en un 12%. Por último, la composta siendo el material orgánico presentó los valores más bajos, tanto de densidad aparente como de partículas; además de que presenta la diferencia más marcada entre ellos, por lo cual se asume que tendrá una mayor porosidad con respecto al resto de los materiales.

Los materiales minerales poseen un alto contenido de arenas, el residuo de excavación tiene un 75%, el concreto 64%, la residuo de demolición 57% y el tepetate 40%, estos resultados de arena se relacionan inversamente con los

resultados del porcentaje de arcilla (tamaño), por lo cual el residuo de excavación presenta un 2%, el concreto 4%, el residuo de demolición 5% y el tepetate 18%.

Observando la relación entre los valores de porosidad se encuentran en todos los casos de los materiales minerales se encuentran alrededor del 50%, el residuo de demolición, concreto y residuo de excavación poseen una capacidad de retención de humedad a capacidad de campo alrededor del 25%. Mientras que el tepetate tiene un valor de porosidad de 55% y una capacidad de campo de 47%, los valores de capacidad de campo siguen la tendencia del contenido de arcilla de los materiales.

Tabla 29. Análisis de las propiedades físicas de varios materiales minerales (Rokia, (2014).

Material de Rokia (2014)	CC	DA
Material básico de suelo	22.6	1.5
Concreto	14.5	1.4
Residuo de demolición	23.8	1.4

ctot: Carbono total, CEC: Conductividad eléctrica, CC: Capacidad de Campo, DA: Densidad aparente

Comparando los resultados de la tabla 29 con la tabla 6, se observa que el residuo de demolición en el experimento tiene una densidad aparente inferior y una capacidad de campo mayor en comparación con la información estudiada en la bibliografía. Mientras que el concreto tiene prácticamente el mismo valor de densidad aparente pero una capacidad mayor al 10% total con relación a lo que existen en la bibliografía. Este efecto debe estar relacionado con una diferencia en las densidades de partículas entre ambos casos. El residuo de demolición es

bastante similar en ambos casos, siendo el del experimento ligeramente mayor en su capacidad de campo.

### 5.1.2 Caracterización física del material orgánico

La composta obtuvo los valores más altos de porosidad y capacidad de campo en comparación con el resto de los materiales, pero la relación que existe entre su volumen final de poros y su capacidad de retención de humedad es ligeramente inferior al del tepetate; esto al final, indica que ambos materiales tendrán un fuerte efecto en el mejoramiento de la capacidad de retención de humedad de las mezclas.

Tabla 30. Propiedades físicas de la composta en bibliografía y experimento

Composta	CC (%)	DA (g/cm <sup>3</sup> )
Rokia (2014)	53	0.6
CU- UNAM	53.4	0.5

DA=Densidad Aparente, CC=Capacidad de campo, CU= Ciudad Universitaria

Comparando las compostas de la literatura (Rokia, 2014) y la de la UNAM utilizada en este trabajo, se observa que tanto en la capacidad de campo como en la densidad aparente, la diferencia es inferior al 0.1% ; es decir, son valores bastante aproximados. Este hecho nos indica que aún cuando el proceso de compostaje ocurrió en diferentes lugares, los valores de estas propiedades físicas no muestran una diferencia significativa.

### 5.1.3 Caracterización química de los materiales minerales

Como se mencionó anteriormente, en este apartado se hace la comparación entre las propiedades químicas de los materiales minerales y de la composta con respecto a la norma

En la tabla 8 se observó que los materiales minerales presentan valores alcalinos de pH, teniendo el valor máximo el residuo de demolición con 11 y el mínimo el tepetate con 8; la conductividad eléctrica es inferior a 2 dS/m en todos los materiales minerales. Comparando los valores de pH del concreto y el residuo de demolición, en este último detectó el valor más alto; lo que nos permite entender es que, dentro de su heterogeneidad, hay presentes materiales que son aún más alcalinos que el concreto.

El contenido de C total en la fase sólida para el tepetate y residuo de excavación fue de 0.16 y 0.15%; por otro lado, en el concreto y en el residuo de demolición, los valores fueron de 1.1 y 2.4%, respectivamente. Es probable que los valores altos de C total en estos últimos residuos, se deban a la presencia de pequeños fragmentos de celulosa que se encontraran adicionados a los materiales y que no fueran removidos durante el proceso de elaboración de las mezclas, ya que en los materiales de los que están conformadas no se explica la presencia de algún elemento que contenga carbono. Finalmente, el contenido de nitrógeno fue inferior al 0.03% en todos los casos.

El conjunto de resultados relativos al contenido de arena, arcilla y carbono total, explica la menor capacidad de retención de humedad en los materiales provenientes de los desechos de la construcción, mientras que una alta porosidad y mayor capacidad de retención de humedad correspondieron al tepetate.

Cuando se realizó el análisis de los materiales iniciales sobre los iones mayores en el extracto de saturación (tablas 9 y 12), fueron equivalentes a los iones disponibles; por otra parte, se pudo observar que, con excepción de la composta, los valores de pH de los demás materiales son superiores a 8 y tienen una alta salinidad. Además, con excepción de los residuos de demolición que tienen los valores más altos de sulfatos y de sodio y el tepetate con los valores más altos en bicarbonatos, la composta es el material más rico en  $\text{NO}_3^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{K}^+$ , y dentro de los materiales, el residuo de demolición presentó altas concentraciones

de  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{Na}^{+}$ , mientras que el concreto solo posee altas concentraciones de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Na}^{+}$ , indicando que los componentes anexos al residuo de demolición, le aportan un contenido de  $\text{Mg}^{+2}$  no presente en el concreto. Estas concentraciones establecen que los materiales iniciales, en general, son ricos en minerales solubles de  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{Na}^{+}$ . Partiendo de la idea de que los residuos de demolición poseen restos de cemento, se explica la presencia de estos iones. Lo cual significa que estos materiales están enriquecidos en materiales tales como  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{CaSO}_4$ .

El tepetate presentó los valores más elevados de carbonatos, (bicarbonatos) los cuales son normalmente detectados en la forma de carbonatos de pero, como se observa en el balance, el contenido es casi 4 veces más elevados; esto es debido a que se está analizando la fracción disponible en el sustrato no se encontrará un balance; este dato está indicando que los carbonatos se encuentran disponibles y están formando nuevos compuestos con otros elementos.

Tabla 31. Análisis de sus propiedades químicas por Rokia (2014) de varios materiales minerales

Material de Rokia (2014)	CEC (dS/m)	pH
Material básico de suelo	2.2	8.2
Concreto	4.7	10.1
Residuo de demolición	3.5	10.3

Comparando los materiales de la bibliografía (tabla 31) con los materiales minerales del experimento (tabla 8), el pH en todos los materiales minerales del experimento, fue más alcalino. En el caso de la conductividad eléctrica, el material de la bibliografía presentó un valor inferior al de los materiales del experimento; con esto se indica que la salinidad será una limitante al utilizar los materiales en el experimento.

#### 5.1.4 Caracterización química del material orgánico

Prosiguiendo con la comparación entre la composta utilizada y la de la norma, se observa que, en los valores de la tabla 7, se puede hacer el siguiente análisis: los valores de pH, conductividad eléctrica y la relación C:N en la composta, cumplen con los requerimientos para uso en zonas agrícolas y reforestación (Tipo B), así como para paisajes y áreas verdes urbanas (Tipo C). En el caso de uso como sustrato de viveros y sustituto de suelo en macetas (Tipo A), su pH es ligeramente más elevado del límite que es de 7.5, con un valor superior de 7.6, el resto de los valores si quedan dentro de los requeridos por la norma (NADF-020-AMBT-2011).

Algunos de los macronutrientes más importantes para el desarrollo de las plantas son el nitrógeno y potasio, los cuales se detectaron con las concentraciones más altas en la composta. Otros elementos de importancia son el calcio, azufre y el fósforo, en el primer caso, la composta y tepetate presentan contenidos altos de dicho elemento, mientras que, en el caso de los otros dos elementos, no fueron determinados pero, si no se encontraran presentes, se observará algún efecto negativo en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Tabla 32. Análisis de las propiedades químicas de la composta Sere (2008) y Rokia (2014)

Composta	CEC (dS/m)	pH	C/N	Cd (mg/Kg)	Cu (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)
Sere (2008)	42.3	8.6	20	<0,5	60.4	64.1	287.5
Rokia (2014)	56.4	8.4					

Observando la tabla 32, comparándola con los resultados de composta (tablas 11 y 13), se observa que todas las condiciones de la composta experimental son superiores a las de la literatura, siendo la relación carbono nitrógeno más cercana, el pH menos alcalino, la conductividad eléctrica poco mas de 6 veces inferior, y las concentraciones de metales prácticamente inexistentes, y comparando los valores

de Sere y con la norma (NADF-020-AMBT-2011) por su pH y conductividad eléctrica no puede ser utilizada en ninguna de los tres escenarios, mientras que, por su concentración de plomo y Zinc no se puede utilizar para el tipo A (sustrato de viveros)

## **5.2 Caracterización de las mezclas**

### **5.2.1 Caracterización física de las mezclas**

Como se observa en la figura 2, al aumentar el nivel de composta disminuye la densidad aparente y de partículas, este efecto es más fácilmente observable en la densidad aparente de las diferentes mezclas en las cuales, al aumentar el contenido de composta la densidad se reducía entre un 5 y 10%; en cambio, en la densidad de partículas se observa una reducción del 1% al aumentar el contenido de composta. Con esto se demuestra como el aporte de composta modifica directamente propiedades como la densidad aparente y la real y por lo tanto a porosidad.

En la figura 3, se observa que en las mezclas a base de concreto (1 a 3), tanto la porosidad como la capacidad de retención de humedad a CC, aumentan al aumentar el contenido de composta; por lo tanto, se observa como la mezcla 1 tiene los valores inferiores y la 3 los superiores. Este comportamiento se aprecia también en las mezclas a base de residuo de excavación, aunque se encuentra menos marcado. En las mezclas a base de residuo de demolición (4-6), se observa que la porosidad del sustrato varía en ese sentido, pero no se observa una variación tan marcada en su capacidad de retención de humedad a capacidad de campo; esto probablemente es debido, a que estas muestras presentan el material mineral con el mayor contenido de arenas y la menor cantidad de tepetate, el cual otorgaba el mayor contenido de arcillas; por lo tanto, aún con el efecto de composta, su capacidad de retención de humedad será menor en comparación con el resto de las mezclas



En la figura 4, se aprecia que las porosidades aumentan junto con la conductividad hidráulica; cabe destacar que, aún cuando el concreto presenta las porosidades más altas, son ligeramente superiores a las del residuo de demolición, que posee la conductividad hidráulica más alta; esto se puede entender al observar la capacidad de campo, que es mayor en el concreto en comparación con el residuo de excavación; por lo tanto, se indica que el concreto retiene más humedad a capacidad de campo, mientras que el residuo de excavación está reteniendo un valor inferior; hecho que se relaciona con que su mayor conductividad hidráulica.

### **5.2.2 Caracterización química de las mezclas**

Observando la figura 5 se observa que las muestras con concreto (1-3) tuvieron un pH entre 8.6 y 8.9; las de residuo de demolición (4-6) entre 10.4 y 10 siendo estos los valores más elevados y, por último, las mezclas con residuo de excavación (7-9) con los valores de pH inferiores entre 8.1 y 8.3. El pH resultó inferior dentro de un mismo grupo de mezclas al aumentar su nivel de composta.

En la figura 5 también se observa que los valores de conductividad eléctrica, son mayores en los conjuntos de mezclas con un mayor valor de pH; lo que muestra la influencia del material mineral sobre dicho valor; sin embargo, la composta determina que sustrato, dentro de un mismo grupo de mezclas, tendrá el mayor valor de conductividad.

El contenido de C y N, mostrado en la tabla 18, muestra que el nitrógeno está fuertemente relacionado con el porcentaje de composta en las muestras y, por ello, las mezclas con 30% (3, 6 y 9) obtuvieron los valores más altos de dicho elemento. De igual manera, el carbono aumentaba de manera proporcional al aumento de composta. Por otra parte, las mezclas de residuo de demolición (4, 5 y 6) presentan los valores más altos

comparados con el resto de las mezclas; esto es debido a que su material mineral presentó los valores más altos de carbono, con respecto al resto de los materiales minerales.

Considerando que las relaciones carbono nitrógeno (C/N) menores a 12, se relacionan con condiciones más equilibradas para la disponibilidad de nitrógeno las mayores a 20 corresponden a condiciones pobres en ese mismo sentido; en el caso de las mezclas con concreto (1-3) se encuentran en condiciones de medias a ricas, las mezclas de residuo de demolición (4-6) en condiciones de pobres a medias y las mezclas con residuo de excavación (7-9) en condiciones ricas. Bajo estas condiciones se puede considerar que las plantas tendrán el mejor desarrollo en las mezclas con residuo de excavación (7-9), y el menor desarrollo en las mezclas con residuo de demolición (4-6).

Luego entonces en, las mezclas con una adecuada relación C/N, se liberarán cantidades suficientes de nitrógeno, en sus diversas presentaciones, que estará disponible para las plantas. Esto explica porque las plantas se adaptaron a los sustratos. Sin embargo, también se liberan otros iones a la solución, algunos de ellos esenciales y otros que pueden favorecer antagonismo.

Analizando los antagonismos de Ca/Mg y K/Mg.

En el primer caso, se esperan valores entre 10/1 y 15/1; dentro de las mezclas de concreto y residuo de excavación se encuentran relaciones de 4/1 y 2/1, respectivamente; debido a ello, se tendrán problemas por el exceso de magnesio en sus soluciones y, además, un antagonismo de dicho elemento en relación con el calcio; mientras que las mezclas con residuos de demolición (4-6) presentan el caso contrario, al carecer o tener valores muy bajos de magnesio por lo que, al presentarse un antagonismo de calcio, habrá algún efecto en la asimilación de magnesio por la planta.

En el segundo caso, se esperan valores de relación mayores a 0.6/1, esto cumple en todos los casos marcando de nuevo que, en las mezclas con residuo de demolición, con bajos contenidos de magnesio, se presenta un antagonismo de potasio.

La carencia de buen drenaje o poca agua que favorezca la lixiviación, que en estas mezclas hay un riesgo de precipitar nuevos sólidos y, de esta manera, el que se favorece la pérdida de poros finos y, por lo tanto, un aumento en la densidad aparente y en la capacidad de almacenamiento de agua.

En la tabla 20 se observa que, en general, los metales se encuentran en concentraciones bajas con excepción del potasio; lo que es importante en vista de que este es uno de los macronutrientes indispensables para las plantas (Tomate). También se observan concentraciones elevadas de calcio y magnesio que también son nutrimentos esenciales para las plantas. El magnesio se encuentra en muy bajas concentraciones en las mezclas de residuo de demolición (4-6), y es el único conjunto de mezclas que presenta concentraciones muy bajas de cromo que, en este caso, se trata de un metal tóxico para la vegetación; por ello, se puede concluir que dichas mezclas probablemente presenten un menor desarrollo y floración con respecto al resto.

### **5.3 Suelos como soporte de plantas**

#### **5.3.1 Pruebas realizadas a los suelos en las macetas experimentales con vegetación**

##### **Análisis de la viabilidad de las plantas bajo estrés hídrico: capacidad de retención de humedad de las mezclas**

En la tabla 24, como se menciona en la parte de resultados, el caso de plantas del desierto, se encontró que no muestran pérdida de individuos debido a su resistencia a los periodos largos de sequía; por ello, las observaciones se

enfocaron en el caso del cempasúchil, donde en la mezcla con residuo de demolición se tuvo el mayor grado de pérdidas con un 25%; por otra parte, la mezcla con concreto presento una pérdida de 12% y el residuo de demolición no presento pérdidas. En primera instancia, se podría atribuir estas pérdidas no solo a las condiciones de sequía, si no a las condiciones físicas y químicas del material, donde las mezclas con demolición presentan los valores más extremos y las de residuo de excavación los más estable. Con esto, se muestra la efectividad de las mezclas para soportar diferentes tipos de vegetación, en periodos de estrés hídrico hasta de dos semanas bajo condiciones de invernadero.

### **Análisis de la capacidad de drenaje y lixiviados**

Los suelos en áreas verdes urbanas, requieren tener una alta tasa de infiltración para evitar riesgos de inundaciones principalmente en la época de lluvias; la precipitación diaria en la ciudad de México durante la época de lluvias varía entre 20 y 40 mm (CONAGUA, 2015). Con base en la velocidad de infiltración observada en las mezclas, en el caso más lento (mezclas 1), las láminas de 20 y 40 mm tardarían en drenarse entre 1.6 y 3.2 horas respectivamente.

Otro resultado observado en estas pruebas de capacidad de drenaje, es que no ocurrieron pérdidas de especímenes vegetales en ninguno de los casos, lo que indica que en los tiempos que abarco el experimento, la falta de oxigenación en las raíces no condujo a la pérdida de especies.

En la tabla 27 se observa que hay una relación entre las mezclas, con respecto a sus valores originales de pH y conductividad eléctrica en relación a sus lixiviados. Esta relación se observa en las mezclas con residuo de excavación (7-9), las cuales habían obtenido los valores inferiores de pH y conductividad eléctrica (Figuras 9 y 10); al igual que como se observa en la tabla 27, también obtuvieron los valores inferiores de pH y conductividad en sus lixiviados. Mientras que las

mezclas de residuo de demolición (4-6) habían obtenido los valores mayores tanto de conductividad eléctrica, pH y de lixiviados en sus análisis originales.

Se pudo observar que los valores de los lixiviados en sus concentraciones de conductividad eléctrica, son muy superiores a los de las mezclas originales, y el pH rondan los valores de 7 y 8; esto quiere decir que, la mayor parte de los lixiviados proviene del material orgánico; su alta concentración indica que la mayoría de las sales presentes en la composta son muy solubles y, por ello, están disponibles para las plantas, pero también son fácilmente removibles del sustrato.

### **Análisis de la capacidad de retención de humedad**

En relación a la capacidad de retención de humedad, en la tabla 28 se observa que, entre los sustratos, la mezcla a base de concreto resultó tener la mayor porosidad con 43%, a partir del un mayor contenido de humedad a saturación mientras que la humedad a saturación en los sustratos con la menor proporción de composta fue de 33% en los tres casos. La humedad a capacidad de campo fue de alrededor 23% en los suelos con mayor contenido de composta y de 14% en los suelos con menor contenido de este elemento. Hablando del agua disponible para las plantas, estimando este valor con base en la humedad residual obtenida por simulación, en los tres casos (concreto, mezcla y residuo de excavación) fue de alrededor 23%, en los casos con mayor contenido de composta, y de alrededor 2% en los casos son menor contenido de composta.

Las dos últimas columnas de la tabla 28, muestran los valores de la humedad volumétrica correspondiente a la capacidad de campo y porosidad de cada una de las mezclas, medidos al inicio del experimento (8 meses atrás). Se observa que en todos los casos ambos parámetros disminuyeron. Este resultado puede explicarse por el hecho de haberse generado la compactación del sustrato

Probablemente, por el riego de las macetas. Este hecho coincide con una disminución de la porosidad total y de la meso porosidad, la cual es el tipo de

porosidad afectado por la compactación. O también pudo haber disminuido, debido a la re-precipitación de los materiales solubles encontrados en las mezclas, los cuales ocupan parte del espacio libre poroso; estas posibles sales que se generan son mencionadas en el apartado de resultados relacionado con la tabla 19.

### **5.3.2 Pruebas realizadas a los suelos como soporte de plantas caso: tomate cherry**

En la figura 13 se observa que la tasa de crecimiento más rápido de la planta se ocurrió en el conjunto de mezclas con residuo de excavación (7, 8 y 9), ver figura 13, existiendo diferencias mínimas entre ellas a lo largo de cada uno de los meses que duró el experimento. Las menores tasas de crecimiento fueron las obtenidas en las mezclas 4, 5 y 6 formadas por residuo de demolición. Este resultado muestra una relación directa entre el crecimiento y el contenido de carbono; a mayor contenido orgánico mayor crecimiento. Cabe señalar que la menor tasa de crecimiento pudo haberse debido a la afectación generada por los valores de pH y la relación C:N. Por último, el crecimiento de la mezcla 6, perteneciente al grupo de residuo de demolición, obtuvo valores superiores de crecimiento en el tercer mes comparada con las de concreto (1-3).

Un punto a destacar es que la mezcla 6 en su tercer mes, obtuvo un mayor crecimiento que el logrado en las mezclas 1,2 y 3, pero un valor inferior de peso seco, por lo que se da a entender que la planta creció alta pero no gruesa, posiblemente se etioló debido al efecto de la radiación solar que recibió en dicho periodo, es decir que fue insuficiente.

En el caso de las mezclas hechas con concreto (1-3) obtuvieron valores de pH entre 8.4 y 8.9 se observa, además, que las mezclas hechas con residuo de demolición (4-6) se detectaron los valores más alcalinos entre 8.6 y 9.1, pero

fueron las que presentaron la reducción más notoria al pasar los tres meses; mientras que, en las mezclas con residuo de excavación (7-9) se detectaron los valores menos alcalinos, entre 8.1 y 8.3. Debido a este comportamiento de relaciona directamente con las características del material mineral base durante la preparación de las mezclas, es que el residuo de demolición tiene los valores de pH más altos, alrededor de 11, por lo que sus mezclas (4-6) tienen los valores de pH superiores en comparación con el resto.

Se considera que las concentraciones de carbono y nitrógeno en los sustratos y que, por tanto, estuvieron disponibles para las plantas fue idóneo, toda vez que el desarrollo de las mismas fue bueno; además de que estas no presentaron ningún efecto relacionado con la deficiencia de nitrógeno (Clorosis, coloración purpura, menor crecimiento foliar en relación el radicular). Los valores más altos de carbono corresponden a las mezclas con base mineral de residuo de demolición (4, 5, 6); esto se debe a que este material contenía los valores más altos de carbono con respecto a los otros materiales (Tabla 8).

En el caso de la turgencia entre el primer y segundo mes, aun cuando se realizó la turgencia bajo las mismas condiciones, esta aumento para el segundo mes; este hecho se relaciona con las plantas, las cuales tenían un mayor tamaño y por lo tanto una mayor demanda de agua, por lo cual si el volumen de agua era el mismo pero el tamaño de la planta superior, esta realizaría un mayor esfuerzo por impedir que el agua escapara, lo cual se muestra con un aumento en la turgencia. La turgencia presenta cierta relación con el contenido de sales en el medio (tabla 18), como se menciona anteriormente, esto se observó debido a que, a un mayor contenido de composta se relacionó con un mayor contenido de sales, lo que corresponde a un valor mayor de turgencia; sin embargo, como se aprecia en la figura 9, no se presentó como una limitante para el crecimiento de las plantas.

## 5.4 Análisis de la fertilidad

En un intento de evaluar la fertilidad teórica de los sustratos con base en el crecimiento del tomate, se tienen los siguientes resultados:

- El total de los sustratos creados tuvieron la capacidad de retención de humedad que el tomate requiere (capacidad de campo entre 30 y 20%, figura 7).
- El valor de conductividad eléctrica de las mezclas osciló entre 1 y 2 dS/m, mientras que para el cultivo de tomate se recomienda fluctúe entre 2 y 4 dS/m. De este modo, se observa que las mezclas tienen una conductividad eléctrica inferior a la recomendada para el tomate, lo que podría significar un contenido inferior de sales solubles requeridas por la especie.
- Los valores de pH de las nueve mezclas estuvieron entre 8 y 9, siendo que para el tomate se recomienda un pH entre 5.5 y 7. Este resultado sugiere que las plantas deberían haber presentado problemas en su capacidad para la absorción de nutrimentos y, por ello, deficiencias en su crecimiento y desarrollo.
- Respecto a las concentraciones de nutrimentos requeridos por el tomate, la mayoría de los suelos sustratos presentaron valores adecuados en los elementos: nitrógeno, potasio, calcio y magnesio (tablas 16 y 17) a excepción de las mezclas con residuo de demolición (4-6). Estos últimos sustratos presentaron deficiencia de magnesio; lo que se relaciona con el tono amarillo y perdido de las hojas bajas de la planta y reducción de la calidad del fruto. En este último punto, no se observó evidencia de dicha deficiencia sino hasta el tercer mes, presentándose en todas las mezclas; cómo se observa en la tabla 33.



Los resultados del experimento de crecimiento de tomate cherry son los siguientes:

- Las mezclas con base mineral de residuo de demolición (4-6), mostraron el menor crecimiento y desarrollo, en comparación con el resto de las mezclas (figuras 11 a 13). Este resultado se asocia con: (1) la menor aireación observada en estos suelos (ya que estas mezclas tuvieron el valor más bajo de porosidad y conductividad hidráulica); (2) los el pH más alcalino; (3) el menor contenido de magnesio y (4) un ligero contenido de cromo el cual es un elemento tóxico para las plantas.
- Las mezclas con base mineral de residuo de excavación (7-9) presentaron los mejores valores de crecimiento y desarrollo del cultivo de tomate; estos resultados se relacionan con: (1) el valor de conductividad hidráulica más elevado y, por ello, con la mayor aireación; (2) los valores de pH y conductividad eléctrica más bajos. Es importante hacer notar, que el contenido de nutrientes en estas mezclas (7-9) no muestran gran diferencia con el resto de las mismas.

## **5. Conclusiones**

Las mezclas con los mejores resultados en cuanto a soporte de plantas fueron las obtenidas con residuo de excavación; en particular, aquella a la que se le agregó el mayor porcentaje de composta (mezcla 9) fue la más efectiva.

Las mezclas generadas con base a los materiales de residuos, aunque presentaron un pH alcalino, fueron viables para su utilización como soporte de diversas especies vegetales; del mismo modo, pueden ser utilizadas como parte de una remediación ecológica de zonas urbanas abandonadas, o de suelos degradados.

Los materiales minerales utilizados, no son tóxicos, al no contener niveles significativos de elementos tóxicos como metales pesados, son muy arenosos y presentan porosidades alrededor del 50%, tienen bajos contenidos de carbono y nitrógeno, pero estos elementos fueron proporcionados por la fracción orgánica adicionada en forma de composta.

Durante la creación de los sustratos utilizados, la modificación de los porcentajes, tanto de los materiales minerales originales como de la fracción orgánica, esta última a partir de fuentes externas, para obtener las mezclas finales fue un objetivo fundamental; ello resultó en la generación de cambios en sus propiedades físicas y químicas lo que, finalmente, permitió lograr diferencias en el establecimiento, desarrollo y supervivencia de las plantas experimentales.

Con base en los resultados físicos, químicos y experimentales, se comprobó que es posible generar sustratos como una propuesta para el reciclaje de los residuos derivados de la construcción, excavación y demolición; además, quedó claro que estos sustratos puedan ser utilizados como un “suelo artificial” con viabilidad para el soporte de vegetación.

La composta no solo funcionó como una fuente de nutrientes sino, también, como un mejorador de suelos ya que modificó de manera positiva las condiciones de pH, aumentando la capacidad de campo y la porosidad; además, resultó ser una fuente de:  $\text{N-NO}_3^-$ ,  $\text{N-NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ .

El residuo de demolición resultó ser el material con las propiedades menos favorables para establecer una población viable de especies vegetales.

Los residuos triturados utilizados para la conformación de las mezclas contienen materiales muy solubles; debido a ello, las sales disueltas probablemente se reprecipitan en el sustrato, cuando se reduce el volumen de agua de riego, lo que genera la sobresaturación de humedad debido a la compactación del sustrato. Se

recomienda regar con un volumen de agua mayor al de poro durante un tiempo, hasta que se incremente el drenaje de las macetas y se favorezca la lixiviación de sales. Debido a este hecho, para generar sustratos con materiales derivados de estos residuos, será recomendable utilizar materiales con tamaño de partícula mayor a 2 mm para evitar la compactación.

## 6 Bibliografía

Andersson E. *et al.*, 2006. Urban Landscapes and Sustainable Cities. Ecology and Society volumen 11, numero 1. Resilience Alliance. 7pp.

Anita J., 2015. Constraints to greening the environment in MuaraAngke fishing settlement, North Jakarta. Social and Behavioral Sciences volumen 179. Elsevier. 195- 203pp.

Avisar R. *et al.*, 1996. Potential effects of vegetation on the urban thermal environment. Atmospheric Environment. volumen 30, numero 3. Elsevier Science Ltd. 437-448pp

Beatley T., 2000. Green Urbanism Learning from European Cities. Island Press. Washington, EUA. 1-25pp.

Buckman H. & Brady N. 1993. The nature and properties of soils. 5 reimpression. Editorial Limusa. Distrito Federal. México. 590pp

Bures S. 1997. Sustratos. Primera impresión. Ediciones Agrotecnicas S.I. Madrid. España. 342pp.

Cantón M. *et al.*, 2001. Sustentabilidad energética del parque edilicio en entornos urbanos forestados. Análisis de la disponibilidad del recurso solar en la estación fría. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente volumen 5. ASADES. 6 pp.

Chiesura A., 2004. The role of urban parks for the sustainable city. Landscape and Urban Planning volumen 68. Elsevier. 129-138pp.

Costanza R, et al., 1997 The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253–260

Doron G., 2005. Urban Agriculture: Small, Medium, Large. *Architectural Design* volumen 75, número 3, 52-59pp.

Franco M. *et al.*, 2008. Neighborhood Characteristics and Availability of Healthy Foods in Baltimore. *American Journal of Preventive Medicine*, volumen 35, número 6. 561- 567 pp.

Flores L. & Alcalá J. 2010. *Manual de Procedimientos Analíticos*. Universidad Nacional Autónoma de México. 56pp.

Foth h. & Turk M. 1982. *Fundamentos de la ciencia del suelo*, sexta impresión. John Wiley y Sons Inc. Editorial Continental. México. 527pp.

Graetz H. 1990. *Suelos y fertilización*. Segunda edición. Editorial Trillas. México. 80 pp.

Hillel. D. 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press. USA. 770pp.

Irga P. *et al.* 2015. Does urban forestry have a quantitative effect on ambient air quality in an urban environment. *Atmospheric Environment*, volumen 120. Elsevier. 173-181pp

ISRIC, 1992: *Procedures for soil analysis*, Tercera edición. Ed: L.P. van Reeuwijk. Technical paper No. 9. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen.

Konijnendijk C. 2003. A decade of urban forestry in Europe. *Forest Policy and Economics*, volumen 5. Elsevier. 173–186pp.

Lamb E. & Lamb B. 2003. Guía de los cactus y otras suculentas. Primera edición Ediciones Omega S.A. Barcelona, España. 364 pp.

Lal R. & Shukla M. 2004. Principles of soil physics. Marcel Dekker Inc. U.S.A. 682pp.

Lovell S. & Johnston D., 2009. Designing Landscapes for Performance Based on Emerging Principles in Landscape Ecology. Ecology and Society, volumen 14, numero 1. Resilience Alliance. 24pp.

Macía F. *et al.*, 2014. Technosols as a novel valorization strategy for an ecological management of dredged marine sediments. Ecological Engineering, volumen 67. Publicado por Elsevier. 182–189 pp

Mihailescu E. *et al.*, 2015. Economic impacts of nitrogen and phosphorus use efficiency on nineteen intensive grass-based dairy farms in the South of Ireland. Agricultural Systems 132. Publicado por Elsevier B.V. 121–132pp.

Ming P. *et al.*, 2012. Handbook of Soil Sciences: Properties and Processes, CRC Press. Segunda edición. 1442 pp.

Morel J. *et al.*, 2015. Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). Journal of Soils and Sediments

Mourya P. *et al.*, 2014. Corrosion inhibition of mild steel in acidic solution by Tagetes erecta (Marigold flower) extract as a green inhibitor. Corrosion Science 85. Publicado por Elsevier B.V. 352–363pp.

Nowak D. & Dwyer J. 2007. Understanding the Benefits and Costs of Urban Forest Ecosystems. Urban and Community Forestry in the Northeast, segunda edición. Springer. 25-46pp.

O'Gorman H. 1963. Plantas y flores de México. Primera edición en español. Universidad Nacional Autónoma de México. D.F. México. 218pp.

Pedlowski M. *et al.*, 2002. Urban forest and environmental inequality in Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brazil. Urban Ecosystems, volumen 6 .Kluwer Academic Publishers.9-20pp.

Phillip J. 1985. A description of urban soils and their desired characteristics. Journal of Arboriculture. Noviembre 1985. School of Forestry, Nueva York. 330-339 pp.

Rokia S. *et al.*, 2014 Modelling agronomic properties of Technosols constructed with urban wastes. Waste Management 34. Publicado por Elsevier. 2155–2162 pp.

Scalenghe R. & Ferraris S., 2009. The First Forty Years of a Technosol. Pedosphere, volumen 19, número 1. Publicado por Elsevier. 40-52pp

Schinner, F. *et al.*, 1993. Bodenbiologische Arbeitsmethoden. 2. Auflage. Springer Verlag

Seki, K. 2007. SWRC fit - a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. Disponible en: <http://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/hessd-2007-0019/>

Sere G. *et al.*, 2008. Soil Construction: A Step for Ecological Reclamation of Derelict Lands. *Journal Soils Sediments* volumen 8 numero 2. Springer-Verlag. 130-136pp

Sere G. *et al.*, 2010. Early pedogenic evolution of constructed Technosols. *Journal Soils Sediments*, volumen 10, número 7. 1246–1254 pp

Siemens AG. *et al.*, 2010. Índice de Ciudades Verdes de América Latina. Disponible en: [http://www.siemens.com/press/pool/de/events/corporate/2010-11-lam/study-latin-american-green-city-index\\_spain.pdf](http://www.siemens.com/press/pool/de/events/corporate/2010-11-lam/study-latin-american-green-city-index_spain.pdf)

Stocco S. *et al.*, 2015. Design of urban green square in dry areas: Thermal performance and comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, volumen 14. Elsevier. 323-335pp.

Tan K. 2011. Principles of soil chemistry. 4 edition. CRC Press. New York. EUA. 362pp

Trillas. 2008, Tomates, 3 edición, editorial SEP Trillas, basado en trabajo de J.M.M: Van Haedd, Distrito federal, México, 67pp.

Van Genuchten, M. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Water Resources Research*, volumen 16, 892-898 pp.

Velasco D. *et al.*, 2011. Cultivo de tomate en hidroponía e invernadero. 3 edición. Universidad Autónoma de Chapingo. Distrito Federal. México. 126pp

Wolch J. *et al.*, 2014. Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities „just green enough“. *Landscape and Urban Planning* volumen 125. Elsevier. 234–244 pp.



Yao F. *et al.*, 2009. Chemical changes in heavy metals in the leachates from Technosols. *Chemosphere*, número 77. Elsevier. 29-35 pp.

## 7. Anexo

Código de programa en matlab para obtener valores aleatorios

```
alto=input('Dame el alto');
```

```
ancho=input('Dame el ancho');
```

```
Valores=[round(ancho*rand(15,1)),round(alto*rand(15,1))]
```

Tabla 1: Valores de crecimiento del tomate en los diferentes sustratos a través del tiempo

<b>Crecimiento de tomate se trata de la altura? (cm)</b>										
Días	Mezclas									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	3,12	2,86	2,74	2,49	2,84	2,43	2,58	3,11	3,22	2,98
11	5,72	6,55	6,25	3,97	4,56	4,23	6,25	5,65	7,88	3,97
18	9,54	11,46	10,58	6,16	7,10	7,74	11,95	12,34	14,72	4,93
25	12,79	16,09	14,73	8,64	9,87	12,23	19,41	20,65	23,23	6,06
32	15,54	18,84	18,65	10,21	11,91	15,08	25,80	26,21	28,54	6,63
35	17,29	21,98	22,64	11,22	13,94	17,24	28,84	31,80	33,24	7,27
39	22,51	24,68	28,29	14,01	17,79	18,65	35,50	35,89	37,05	7,51
46	29,74	31,04	33,51	18,33	21,89	22,39	39,94	40,76	41,29	8,03
53	31,80	34,48	36,20	23,40	27,30	29,14	44,69	45,08	45,14	8,99
63	34,45	39,79	40,31	27,64	31,38	36,48	47,86	48,93	48,68	10,18
70	38,00	42,64	42,68	33,16	36,10	43,94	51,10	51,14	52,02	10,28
73	40,56	45,10	45,08	34,24	38,16	45,74	54,26	54,36	54,56	10,92
77	42,36	48,58	49,52	36,98	40,52	47,72	55,76	56,86	57,30	11,32
84	47,50	52,06	52,96	39,92	45,12	52,72	60,64	61,20	61,58	12,24
91	51,10	53,96	56,28	42,84	49,18	57,86	63,36	64,10	65,24	12,98

Tabla 2: Tabla con los valores de pesos secos del material vegetal recolectado mensualmente. en 1, 2 y 3 meses

<b>Pesos secos finales (g)</b>			
Mezcla	1 mes	2 mes	3 mes
1	0,38	3,14	8,38
2	1,26	4,56	10,51

3	1,69	5,07	12,27
4	0,13	1,53	4,41
5	0,43	2,34	6,53
6	0,55	3,04	8,1
7	1,81	5,35	10,27
8	2,08	6,47	13
9	2,47	7,96	15
10	0,06	0,24	0,74

Tabla 3: Presión de turgencia en las diferentes mezclas durante cada uno de los tres meses

Mezcla	1 mes (Bar)	2 mes (Bar)
1	1,8	6,0
2	2,8	6,3
3	3,0	6,7
4	1,7	4,8
5	2,0	6,8
6	2,2	7,2
7	2,2	3,8
8	2,3	4,0
9	3,2	5,2

Tabla 4: Crecimiento del tomate cherry primer mes

Mezcla	Imagen
1-2-3	 A photograph showing several young cherry tomato plants growing in black plastic bags. The plants are relatively tall and have several green leaves. They are arranged in rows in a greenhouse or indoor setting with windows in the background.
4-5-6	 A photograph showing several young cherry tomato plants growing in black plastic bags. These plants appear shorter and less developed than those in the first image. They are arranged in rows in a greenhouse or indoor setting with windows in the background.

7-8-9	
-------	--

Tabla 5: Crecimiento del tomate cherry segundo mes

Mezcla	Imagen
1-2	

3-4



5



6



7







8







9



Tabla 6: Crecimiento del tomate cherry en el tercer mes

Mezcla	Imagen	Mezcla	Imagen
1		2	
3		4	

5		6	
7		8	



9

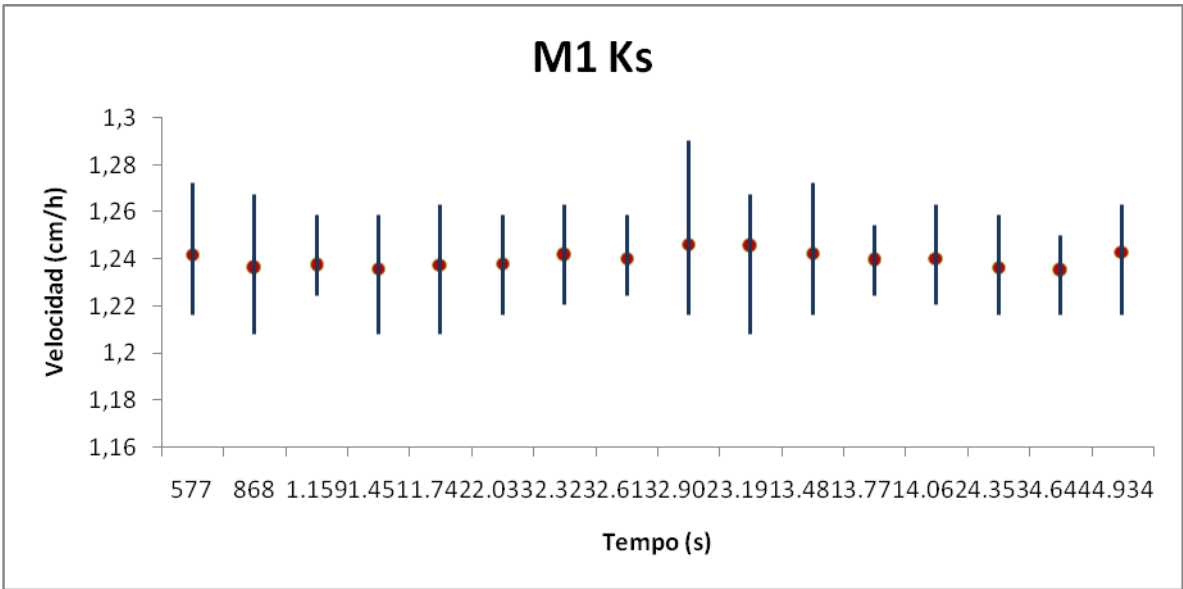


Figura 1: Velocidad de infiltración por tiempo durante el experimento de capacidad de drenaje en la mezcla 1.

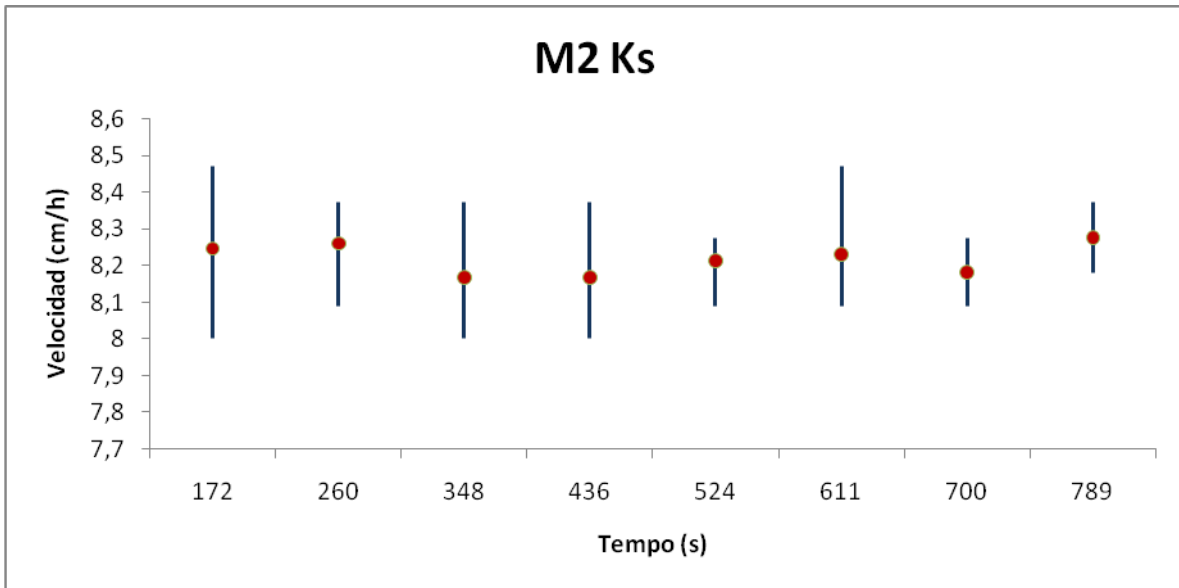


Figura 2: Velocidad de infiltración por tiempo durante el experimento de capacidad de drenaje en la mezcla 2.

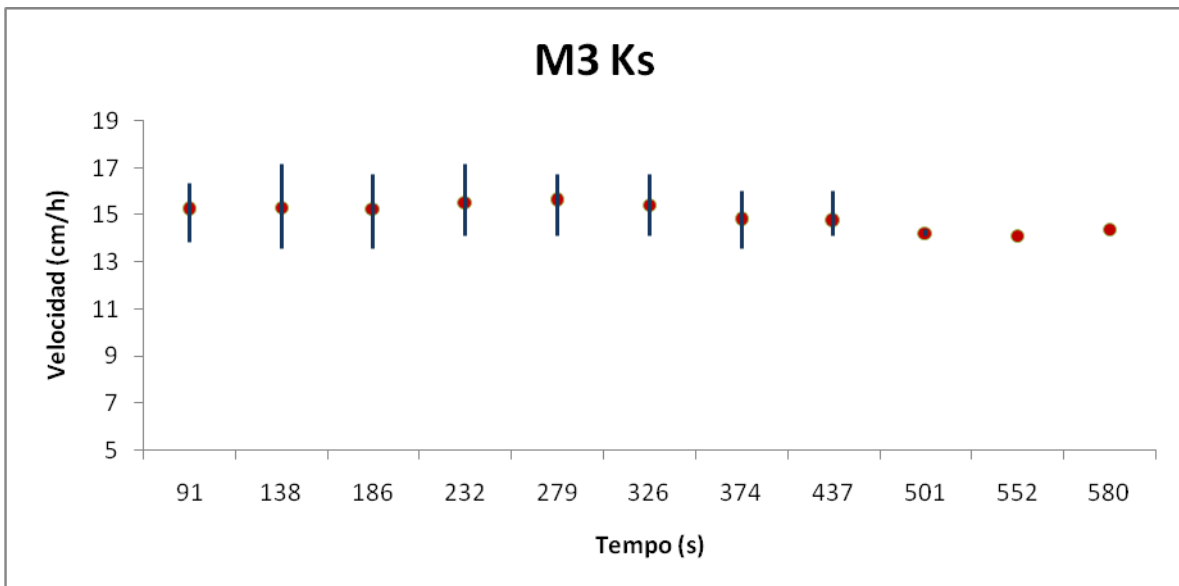


Figura 3: Velocidad de infiltración por tiempo durante el experimento de capacidad de drenaje en la mezcla 3.

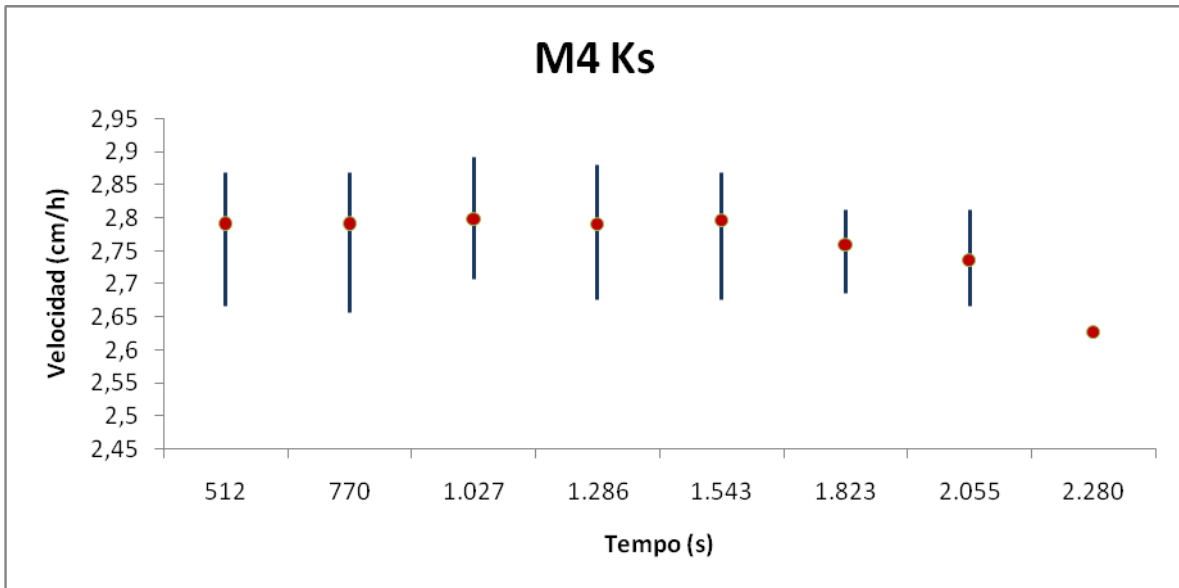


Figura 4: Velocidad de infiltración por tiempo durante el experimento de capacidad de drenaje en la mezcla 4.

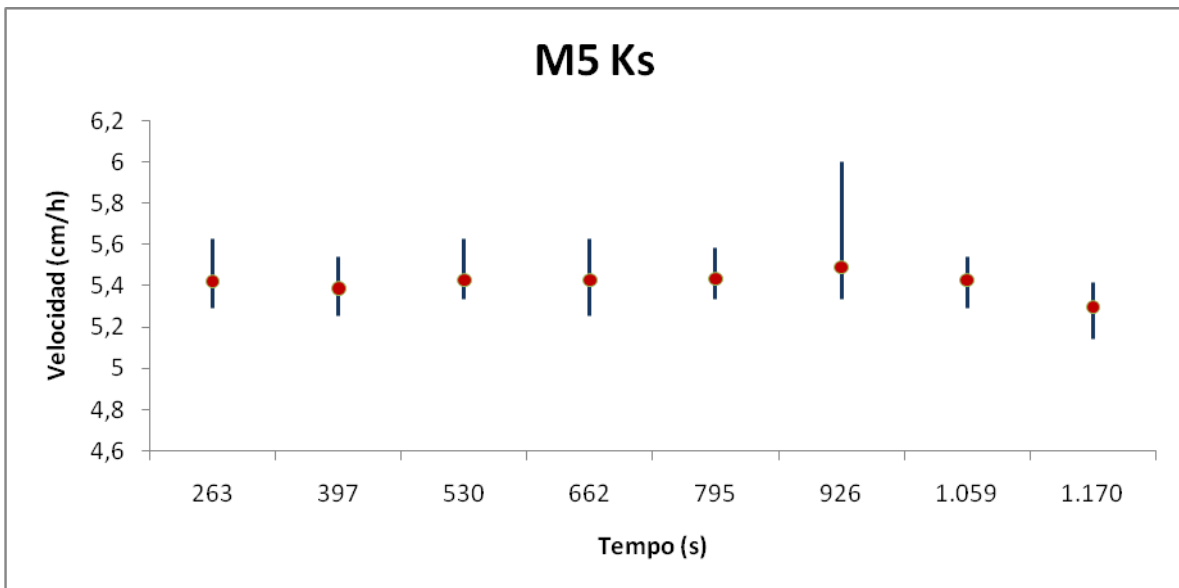


Figura 5: Velocidad de infiltración por tiempo durante el experimento de capacidad de drenaje en la mezcla 5.

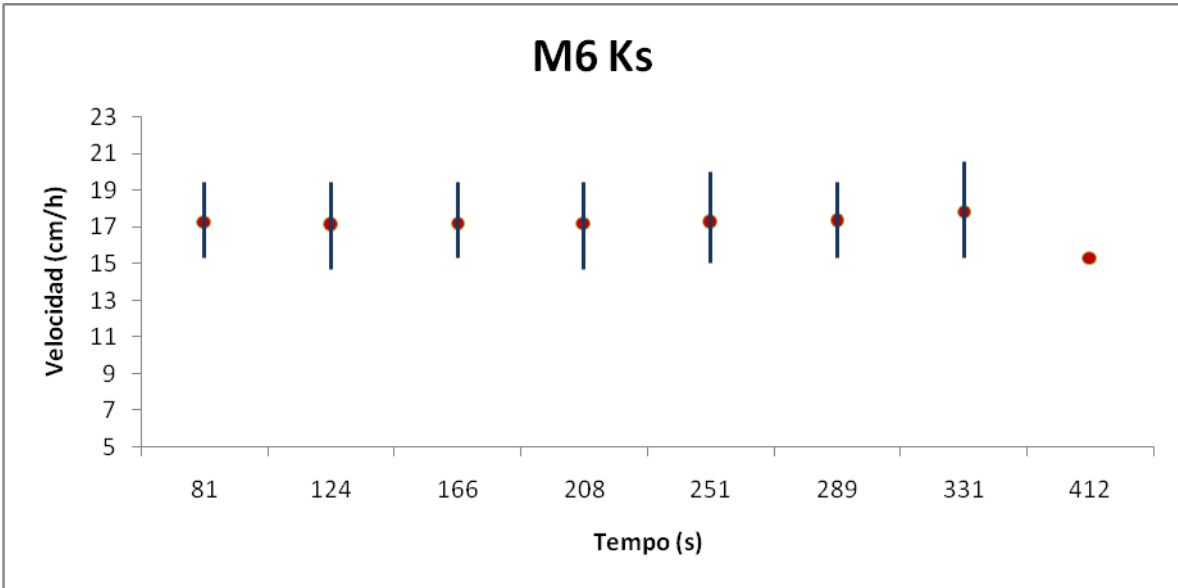


Figura 6: Velocidad de infiltración por tiempo durante el experimento de capacidad de drenaje en la mezcla 6.

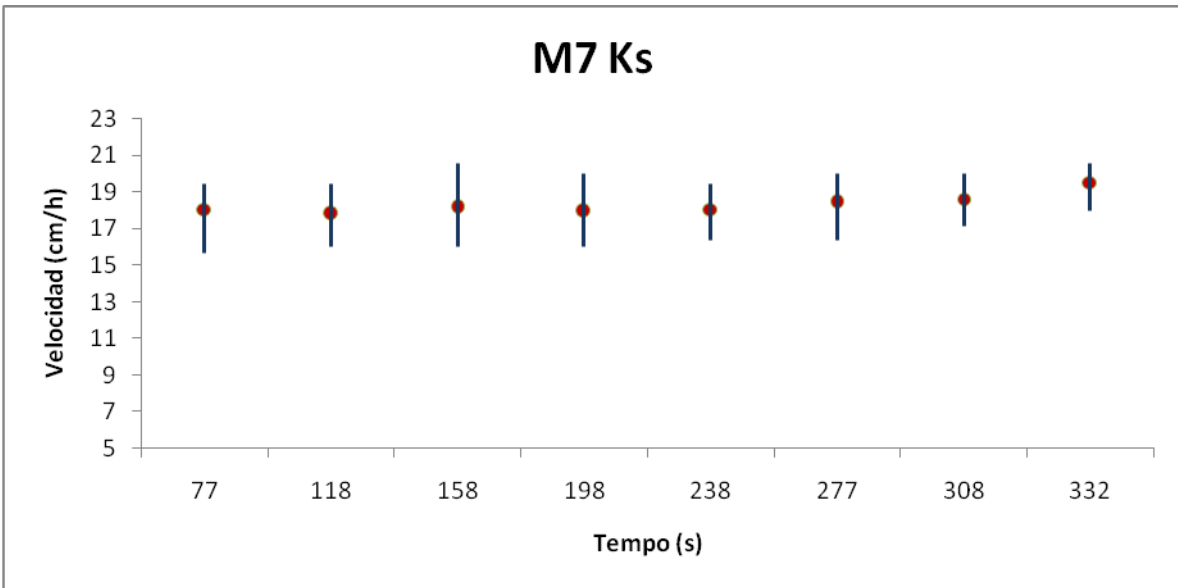


Figura 7: Velocidad de infiltración por tiempo durante el experimento de capacidad de drenaje en la mezcla 7.

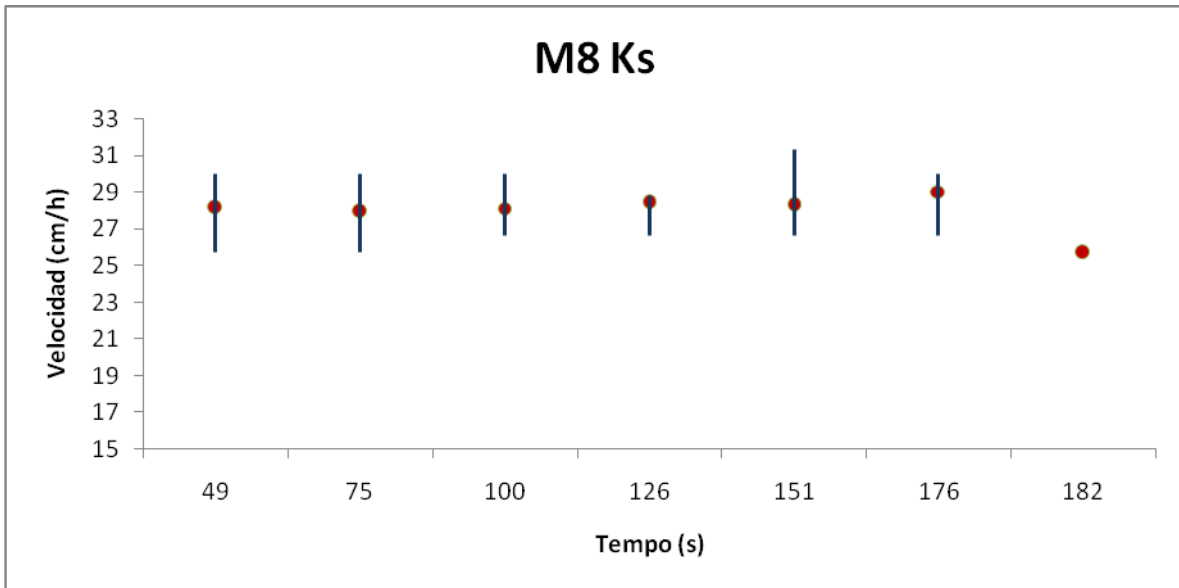


Figura 8: Velocidad de infiltración por tiempo durante el experimento de capacidad de drenaje en la mezcla 8.

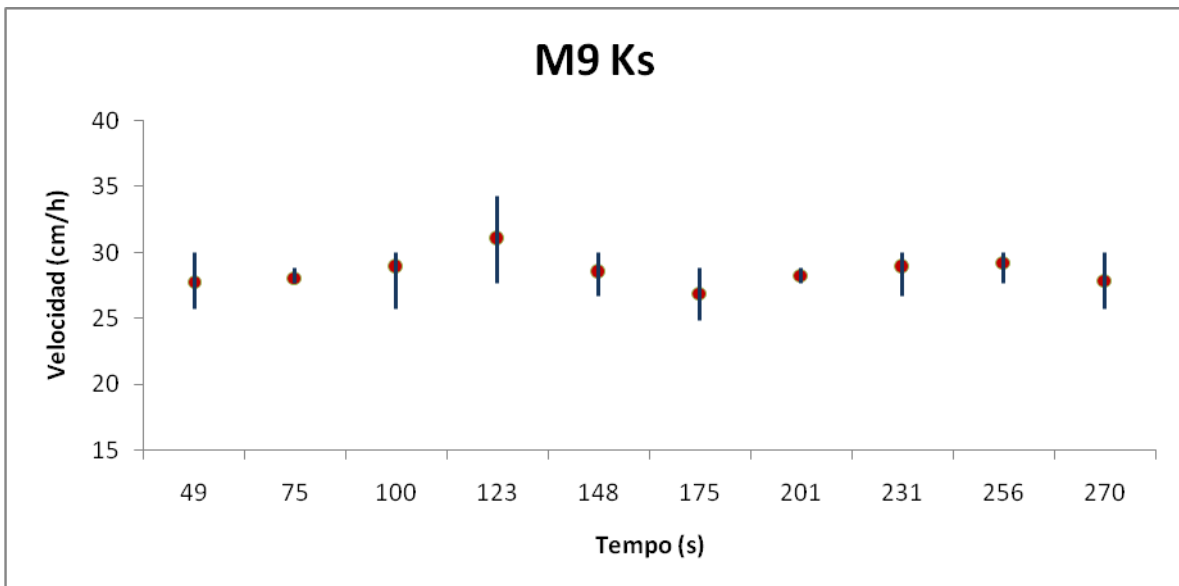


Figura 9: Velocidad de infiltración por tiempo durante el experimento de capacidad de drenaje en la mezcla 9

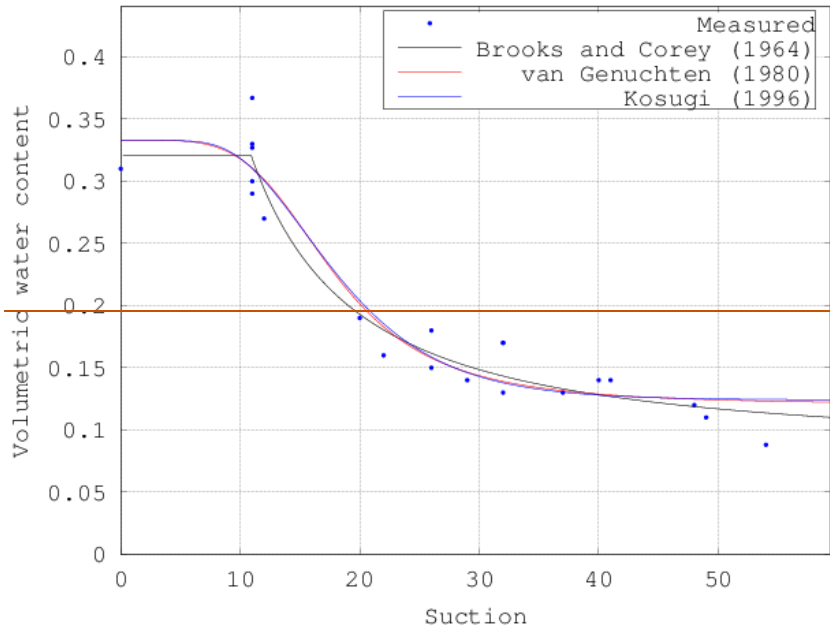


Figura 10: Grafica de la curva de humedad en la mezcla 1 con base en el contenido de agua y succión del suelo.