UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas

ESTUDIO COMPARATIVO DE SUSTRATOS DE CULTIVOS SOSTENIBLES EN SISTEMAS DE NATURACIÓN URBANA: JARDINERÍA VERTICAL Y CUBIERTA VEGETAL

TESIS DOCTORAL

Glenny Llinee López Rodríguez

Ingeniero Agrónomo

Madrid, 2016

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas

DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN AGRARIA

(Unidad de Edafología)

Programa de Doctorado en

Tecnología Agroambiental para una Agricultura Sostenible

TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO COMPARATIVO DE SUSTRATOS DE CULTIVOS
SOSTENIBLES EN SISTEMAS DE NATURACIÓN URBANA:
JARDINERÍA VERTICAL Y CUBIERTA VEGETAL**

AUTORA:

Glenny Llinee López Rodríguez, Ingeniero Agrónomo

DIRECTOR:

Dr. Alberto Masaguer Rodríguez

Profesor Titular de Edafología, Departamento de Producción Agraria (UPM)

Madrid, 2016

POLITÉCNICA

(D-15)

Tribunal nombrado por el Magfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día _____ de _____ de 2016.

Presidente: _____

Secretario: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Suplente: _____

Suplente: _____

Realizado el acto de defensa y lectura de Tesis en Madrid el día ____ de _____ de 2016 en la E.T.S. Ingenieros Agrónomos.

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

AUTORIZACIÓN PARA LA DEFENSA

ALBERTO MASAGUER RODRÍGUEZ, Profesor Titular del Departamento de Producción Agraria de la Universidad Politécnica de Madrid, como director de la Tesis Doctoral titulada *“Estudio comparativo de sustratos de cultivos sostenibles en sistemas de naturación urbana: jardinería vertical y cubierta vegetal”*, realizada por GLENNY LLINÉE LÓPEZ RODRÍGUEZ, alumna del Programa de Doctorado de Tecnología Agroambiental para una Agricultura Sostenible del Departamento de Producción Agraria (Unidad de Edafología), para aspirar al grado de Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid,

AUTORIZA

La presentación de esta memoria para que se proceda al trámite de su lectura y defensa ante el tribunal correspondiente. Y para que conste a los efectos oportunos, firmo el presente certificado en Madrid, a 12 de mayo de 2016.

Fdo.: Dr. Alberto Masaguer Rodríguez

Profesor Titular del Departamento de Producción Agraria (Unidad de Edafología)

ETSI Agrónomos de la UPM

*Dedicada a la Memoria de mi Adorada e
Inolvidable Madre (†) Luz María Rodríguez Medina*

Agradecimientos

En primer lugar, a ti **Señor Jesús** porque me diste la fortaleza y valentía para enfrentarme a los desafíos y dificultades que se me presentaron durante este periodo de estudios y por ayudarme a hacer este sueño realidad.

Al **Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF)**, al **Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (MESCyT)**, al convenio **Banco Santander - UPM** por el apoyo y la financiación otorgada.

A la **Universidad Politécnica de Madrid (UPM)**, **Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos (ETSIA)** en **Departamento de Producción Agraria, Unidad Edafología**, por su contribución en una etapa más de mi formación profesional.

Al Doctor **Alberto Masaguer Rodríguez**, por acogerme como su estudiante de doctorado, por dirigir este proyecto de tesis, por su gran y extenso apoyo, por su tiempo, por su dedicación, por su paciencia, por sus valiosas aportaciones de carácter científico así como en lo personal. Profe, muchísimas gracias.

Al **proyecto de investigación**: “Recuperación de suelos contaminados con plantas autóctonas producidas en sustratos eco-compatibles y el efecto de estos materiales en la biodisponibilidad y biodegradación de los contaminantes”, financiado por el **Plan Nacional de Investigación Español**, Ministerio de Economía y Competitividad (**MINECO**): CTM2009-13140-C02-01 y 02, Subprograma TECNO y CTM2013-47874-C2-1-R). A **Pons Agropecuaria e Intemper Española. S.L.**

Al **Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA)**, especialmente a la Sección de la Flora Urbana y Ornamental, **Finca Experimental El Encín** (Alcalá de Henares, Madrid), en la persona del Señor **Juan Ruíz Fernández** y **Técnicos de campo de El Encín**.

A **Javier Pérez Esteban** por sus contribuciones y correcciones. A todos aquellos que de una forma u otra contribuyeron para que este trabajo tuviera sus frutos y a todas las personas que me acompañaron a lo largo de este recorrido.

Agradecimientos especiales para: **Carmen, Marlyn, Otilia Vanessa, Laura y Beatriz.** A la familia **Muñoz-Montalvo: Doña María, Don Bienvenido, Raúl y Fernando.** Muchísimas gracias.

A mi madre, **Luz María,** gracias por el apoyo incondicional que me brindaste y por el sacrificio que hiciste para que yo pudiera lograr cada uno de mis sueños. Que aunque hoy físicamente no estás conmigo comparto contigo este logro y dondequiera que te encuentres, muchas gracias!

“Nadie dijo que sería fácil...”

*Muchas
Gracias*

Resumen

La investigación de **nuevos materiales** para formular **sustratos** que sirvan como medio de crecimiento vegetal se ha transformado en una actividad fundamental, debido al encarecimiento y baja disponibilidad de algunos de los existentes y a su vez a la creciente demanda de sustratos cada vez más específicos. Por ello, es conveniente investigar la aptitud de los subproductos o residuos generados por diferentes actividades productivas y de consumo como componentes de sustratos, particularmente por su reducido costo. El empleo de residuos en la formulación de sustratos tiene un elevado valor medioambiental, ya que devuelve al ciclo productivo materiales desechados y en muchos casos su manejo resulta muy problemático y caro. A su vez, el reciclado de materiales reduce la presión de explotación sobre recursos naturales cuya explotación ocasiona un fuerte impacto en el medioambiente. Por otra parte, puesto que el desarrollo de áreas verdes en las ciudades en ocasiones se ve dificultado al no disponer de superficie necesaria, han surgido los **conceptos de jardines verticales, fachadas naturadas, cubiertas o terrazas vegetales** que constituyen formas innovadoras de naturación urbana. El objetivo de este trabajo de tesis doctoral fue caracterizar, comparar y evaluar el comportamiento y la evolución de sustratos elaborados a partir de materiales sostenibles, potenciales para su utilización como medio de crecimiento vegetal en dos sistemas naturación urbana: **un jardín vertical y una cubierta vegetal**. Para ello, inicialmente se caracterizaron **siete sustratos a base de restos vegetales compostados, corteza de pino compostado y fibra de coco**, elaborados con las siguientes proporciones: **1)** un tratamiento testigo con 90% fibra de coco (polvo) + 10% poliestireno expandido **2)** 70% restos vegetales compostados + 30% puzolana volcánica, **3)** 70% corteza de pino compostada + 30% puzolana volcánica, **4)** 70% corteza de pino compostada + 30% fibra de coco, **5)** 70% fibra de coco + 30% corteza de pino compostada, **6)** 70% restos vegetales compostados + 30% corteza de pino compostada y **7)** 70% restos vegetales compostados + 30% fibra de coco. Se evaluaron las propiedades físicas, hidrofísicas y químicas. Luego, se seleccionaron los cinco sustratos con proporciones orgánicas (3, 4, 5, 6 y 7) y se evaluó el comportamiento y su **evolución en un jardín vertical** con dos especies vegetales tapizantes (*Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis*). Los ensayos se instalaron en la finca El Encín

(IMIDRA, Comunidad de Madrid). Se utilizó un diseño experimental en diseño en bloques completamente aleatorizado (DBCA) con cuatro bloques, cinco tratamientos (sustratos). También, paralelamente **se evaluó el comportamiento y la evolución de cinco sustratos para cubiertas ajardinadas**: dos con proporción mineral (1 y 2) y tres orgánicos: con restos vegetales compostados, corteza de pino compostados y fibra de coco (sustratos numerados con 3, 6 y 7). Con ellos se instaló un ensayo en cubierta vegetal con *Teucrium chamaedrys*, *Othonna cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula lycopodioides*. En ambos ensayos se realizó un seguimiento vegetal que permitió la evaluación agronómica de los sustratos y estimar su comportamiento adecuado para el desarrollo de plantas en estos sistemas de naturación. Las determinaciones analíticas de los sustratos se realizaron según la Normas Europeas UNE-EN-AENOR (2000-2002). Los resultados de la caracterización inicial muestran que las diferentes combinaciones de corteza de pino con fibra de coco presentaron bajas densidades y elevada porosidad, además de niveles óptimos de pH y conductividad eléctrica y un contenido en materia orgánica estable durante todo el ensayo, lo que se reflejó en un mayor crecimiento en las plantas. Los sustratos a base de fibra de coco en 70%, 30% y el testigo presentaron las más bajas densidades y alto espacio poroso total (EPT). Los sustratos orgánicos en su totalidad **demostraron ser eficaces** en cuanto a la retención de agua, por lo que éstos pueden proporcionar alta capacidad de retención de humedad, aireación y propiedades drenantes. Por otro lado, los resultados obtenidos en los ensayos demuestran que la utilización de sustratos sostenibles a base de **corteza de pino y fibra de coco** resulta ser una práctica sostenible y adecuada en **jardinería vertical** con vegetación tapizante. Mientras que los sustratos orgánicos con mayor proporción de **restos vegetales compostados** son adecuados para **cubiertas vegetales**.

Palabras claves: residuos orgánicos, medios de cultivo, curva de retención de humedad, cubiertas verdes, jardines verticales.

Abstract

Research into new materials to make substrates that serve as plant growth medium has become a fundamental activity, due to the rise and lower availability of some of the existing and in turn to the growing demand for ever more specific substrates. Therefore it is advisable to investigate the suitability of products or wastes generated by different productive and consumption activities as components of substrates, particularly for its low cost. The use of residues in the formulation of substrates has a high environmental value as it returned to the production cycle discarded materials and in many cases their handling is very problematic and expensive. In turn, the recycling of materials reduces the pressure of exploitation of natural resources whose exploitation causes a strong impact on the environment. Moreover, since the development of green areas in cities are sometimes hampered in the absence of surface necessary concepts have emerged vertical gardens, naturadas, covered or vegetable terraces are innovative forms of urban naturation facades. The objective of this doctoral thesis was to characterize, compare and evaluate the behavior and evolution of substrates made from sustainable materials, potential for use as plant growth medium in two urban naturation systems: a vertical garden and roof garden. To do this, initially seven substrates based on composted vegetable scraps, composted pine bark and coconut fibre, made with the following ratios were characterized: 1) a control treatment with 90% coconut fibre (powder) + 10% expanded polystyrene, 2) 70% composted vegetable scraps + 30% volcanic pozzolan, 3) 70% composted pine bark + 30% volcanic pozzolan, 4) 70% composted pine bark + 30% coconut fibre, 5) 70% coconut fibre + 30% composted pine bark, 6) 70% composted vegetable scraps + 30% composted pine bark and 7) 70% composted vegetable scraps + 30% coconut fibre. Physical, hydro and chemical properties were evaluated. Then the five substrates with organic proportions (3, 4, 5, 6 and 7) were selected and behavior and their evolution into a vertical garden with two ground cover plants (*Frankenia laevis* and *Pachysandra terminalis*) were evaluated. The trials were installed in the El Encín (IMIDRA, Madrid). An experimental design was used in a completely randomized block design (RCBD) with four blocks, five treatments (substrates). Also, the same time behavior and the evolution of five substrates for green roofs are evaluated: two mineral proportion (1 and 2) and three organic: with composted

plant waste, composted pine bark and coconut fibre (substrates numbered 3, 6 and 7). With them a trial was installed in vegetated roof garden with *Teucrium chamaedrys*, *Othonna cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* and *Crassula lycopodioides*. In both tests, plants were monitored, what allowed the agronomic evaluation of the substrates and the estimation of the suitable behavior for the development of plants in these naturalization systems. The analytical determinations of the substrates were made according to European standard UNE-AENOR (2000-2002). The results of the initial characterization shows that different combinations of pine bark, coconut fibre had low density and high porosity, in addition to optimal levels of pH and electrical conductivity and a content of stable organic matter throughout the test, which is reflected in higher growth in plants. The substrates based on coconut fiber at 70% and 30% and the control treatment had the lowest densities, high total pore space (TPS). Organic substrates proved fully effective in terms of water retention, so that they can provide high moisture holding capacity, aeration and drainage properties. Furthermore, the results of the tests show that the use of sustainable substrates based on pine bark and coconut fibre is to be a sustainable and appropriate practice in panel vertical gardening with vegetation. While organic substrates with higher proportion of composted plant residues are suitable for roof gardens.

Keywords: organic waste, culture media, moisture retention curve, green roofs, vertical gardens.

Índice General

AGRADECIMIENTOS	IX
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XIII
ÍNDICE GENERAL	XV
ÍNDICE DE TABLAS	XXI
ÍNDICE DE FIGURAS	XXVII
1. INTRODUCCIÓN	37
1.1. LA NATURACIÓN EN LOS ESPACIOS URBANOS.....	39
1.1.1. Naturación urbana: Concepto, historia, evolución y expansión	40
1.1.2. La naturación urbana y sus beneficios.....	47
1.1.3. Clasificación de los sistemas de naturación	48
1.1.4. Aplicación de la naturación en los espacios urbanos	49
1.1.5. Componentes integrales en las cubiertas vegetales	53
1.1.6. Normas tecnológicas de jardinería y paisajismo (NTJ's).....	55
1.1.6.1 Cubiertas ajardinadas intensivas: NTJ-11I.....	56
1.1.6.2 Cubiertas ecológicas extensivas: NTJ-11E.....	57
1.2. CULTIVO SIN SUELO: SUSTRATOS DE CULTIVO	57
2.1.1. Antecedentes, evolución y situación actual de los sustratos de cultivos	58
2.1.2. Sustratos y su aplicación como medio de cultivo.....	59
2.1.3. Principales sustratos empleados como medio de cultivo.....	61
2.1.4. Criterios de selección de un “buen sustrato”	64
2.1.5. Composición de los sustratos de cultivo.....	65
2.1.6. Propiedades de los sustratos empleados como medio de cultivo	66
2.1.6.1 Propiedades físicas e hidrofísicas	66
2.1.6.2 Propiedades químicas	70
2.1.6.3 Propiedades biológicas	71
2. OBJETIVOS	75
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	75

2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	75
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	79
3.1.	DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO Y LOCALIDAD.....	79
3.2.	EVALUACIÓN DE SUSTRATOS ORGÁNICOS EN LABORATORIO	80
3.2.1.	Caracterización de sustratos potenciales para sistemas de naturación urbana..	80
3.2.2.	Determinaciones analíticas de los sustratos.....	81
3.3.	EVALUACIÓN DE SUSTRATOS EN SISTEMAS DE NATURACIÓN URBANA: IN SITU	82
3.3.1.	Sustratos ensayados en un jardín vertical	82
3.3.1.1.	Sustratos utilizados en un jardín vertical.....	82
3.3.1.2.	Sistema vegetal Intemper: Fachada Natura®	82
3.3.1.3.	Vegetación utilizada en el ensayo del jardín vertical	83
3.3.1.4.	Establecimiento: instalación del ensayo y fase inicial en invernadero	84
3.3.1.5.	Establecimiento: instalación de ensayo en fachada vertical.....	85
3.3.1.6.	Manejo agronómico del experimento en sistema de jardín vertical ...	86
3.3.1.7.	Diseño experimental utilizado en el ensayo	86
3.3.1.8.	Variables evaluadas y muestreos periódicos	87
3.3.1.9.	Evaluación de vegetación y sustratos del jardín vertical.....	87
3.3.1.10.	Manejo de muestras en el laboratorio.....	89
3.3.1.11.	Determinaciones analíticas del tejido vegetal: digestión ácida en microondas	91
3.3.1.12.	Determinación de elementos minerales en absorción atómica (EAA)	91
3.3.1.13.	Análisis estadístico	92
3.3.2.	Sustratos ensayados en una cubierta vegetal	93
3.3.2.1	Sustratos utilizados en la cubierta vegetal.....	93
3.3.2.2	Vegetación utilizada en el ensayo de cubierta vegetal	93
3.3.2.3	Establecimiento e instalación del ensayo	95
3.3.2.4	Manejo agronómico del experimento de Cubierta vegetal.....	96
3.3.2.5	Diseño experimental	96
3.3.2.6	Recolección de datos y tecnología auxiliar empleada.....	97
3.3.2.7	Requerimiento hídrico durante el ensayo	98

3.3.2.8	Recolección y evaluación de lixiviados (drenajes).....	98
3.3.2.9	Índice de verdor (Spad) y contenido de clorofila	99
3.3.2.10	Evaluación de especies vegetales	100
3.3.2.11	Evaluación, muestreo y determinaciones analíticas de los sustratos	100
3.3.2.12	Análisis estadístico	101
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	105
4.1.	EVALUACIÓN DE SUSTRATOS POTENCIALES PARA DOS SISTEMAS DE NATURACIÓN URBANA	105
4.1.1.	Propiedades físicas iniciales de los sustratos.....	106
4.1.1.1.	Contenido de humedad, densidad aparente, densidad de partículas y espacio poroso total	106
4.1.1.2.	Granulometría e índice de grosor	108
4.1.2.	Propiedades hidrofísicas iniciales.....	110
4.1.2.1.	Capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR), agua difícilmente disponible (ADD) y fracción de sólidos (MS).....	110
4.1.2.2.	Curvas de retención de humedad.....	113
4.1.3.	Propiedades químicas iniciales.....	115
4.1.3.1.	pH y conductividad eléctrica	115
4.1.3.2.	Materia orgánica, carbono orgánico y relación carbono/nitrógeno..	117
4.1.3.3.	Contenido de fósforo (P) y cationes (Ca, Mg, K y Na) solubles en agua.....	120
4.1.4.	Selección de sustratos para ensayos en dos sistemas de naturación urbana.....	122
4.1.4.1.	Criterios de selección de sustratos según la modalidad de ensayo...	122
4.2.	SUSTRATOS POTENCIALES EN UN JARDÍN VERTICAL	126
4.2.1.	Evolución de los sustratos establecidos en el jardín vertical.....	126
4.2.1.1.	Densidad aparente.....	126
4.2.1.2.	pH y conductividad eléctrica (CE)	127
4.2.1.3.	Materia orgánica (MO), relación C/N y nitrógeno (N)	132
4.2.2.	Modificación de los sustratos según la especie vegetal.....	137
4.2.3.	Efecto de la disposición del saco en el comportamiento de los sustratos.	146

4.2.4. Evolución de sustratos incorporados en el jardín vertical sin vegetación	150
4.2.5. Indicadores de crecimiento derivados de podas en plantas indicadoras del jardín vertical.....	154
4.2.5.1. Longitud, peso fresco y peso seco en <i>Frankenia laevis</i> y <i>Pachysandra terminalis</i>	155
4.2.5.2. Frankenia: longitud, peso fresco y peso seco, según la fecha de corte.....	155
4.2.5.3. Frankenia: longitud, peso fresco, peso seco acumulativos.....	157
4.2.5.4. Frankenia: longitud, peso fresco, peso seco, según la ubicación	159
4.2.5.5. Pachysandra: longitud, peso fresco, peso seco, según la fecha de corte.....	161
4.2.5.6. Pachysandra: longitud, peso fresco, peso seco acumulativos.....	163
4.2.5.7. Pachysandra: longitud, peso fresco, peso seco, según la ubicación .	165
4.2.5.8. Intensidad de verdor con SPAD en <i>Pachysandra terminalis</i>	167
4.2.5.9. Intensidad de verdor con SPAD en <i>Pachysandra terminalis</i> , en el tiempo.....	168
4.2.6. Indicadores de crecimiento en derivados de muestreos destructivos en <i>Frankenia laevis</i> y <i>Pachysandra terminalis</i>	169
4.2.6.1. Longitud, peso fresco, peso seco aéreo y radicular según la fecha de evaluación.....	169
4.2.6.2. Longitud, peso fresco, peso seco aéreo y radicular según el sustrato	172
4.2.6.3. Longitud, peso fresco, peso seco aéreo y radicular, según la ubicación.....	175
4.2.6.4. Número y diámetro de tallo y raíz principales	181
4.2.7. Elementos en el tejido vegetal de <i>Frankenia laevis</i> y <i>Pachysandra terminalis</i>	186
4.2.7.1 Sodio, Magnesio, Calcio y Potasio en el tejido vegetal de las especies.....	186
4.2.7.2 Cobre, Zinc, Manganeso y Hierro en el tejido vegetal de las especies.....	188
4.2.7.3 Sodio, Magnesio, Calcio y Potasio en tejido vegetal, según ubicación del sustrato.....	190

4.2.7.4	Contenido de Fósforo (P) en parte aérea y radicular	191
4.3	SUSTRATOS POTENCIALES EN UNA CUBIERTA VEGETAL	193
4.3.1	Evaluación inicial de los sustratos en la cubierta vegetal.....	193
4.3.1.1.	Curvas de humedad	193
4.3.1.2.	Densidad aparente.....	196
4.3.1.3.	pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno y relación C/N.....	197
4.3.1.4.	Contenido de fósforo y bases intercambiables iniciales	199
4.3.1.5.	Contenido en micronutrientes: Cu, Zn, Mn y Fe	201
4.3.2	Evolución de los sustratos ensayados en la cubierta vegetal.....	202
4.3.2.1	Densidad aparente.....	202
4.3.2.2	pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno y relación C/N.....	204
4.3.3	Modificación de los sustratos según la especie vegetal.....	206
4.3.4	Indicadores de crecimiento derivados de muestreo destructivo	211
4.3.4.1	Longitud, peso fresco y peso seco en la parte aérea, según la fecha de evaluación.....	211
4.3.4.2	Diámetro de tallo principal, según el sustrato	215
4.3.4.3	Longitud, peso fresco y peso seco en la parte radicular, según la fecha de evaluación	217
4.3.5	Elementos en tejido vegetal de las especies indicadoras de la cubierta vegetal....	221
4.3.5.1	Fósforo y nitrógeno en tejido vegetal: parte aérea y radicular	222
4.3.5.2	Concentraciones de Sodio, Magnesio, Calcio y Potasio	224
4.3.5.3	Concentración de elementos menores: Cobre (Cu), Zinc (Zn), Manganeseo (Mn), Hierro (Fe)	228
4.3.6	Variables evaluadas durante el establecimiento de la cubierta vegetal	233
4.3.6.1	Intensidad de verdor (SPAD) en <i>Teucrium chamaedrys</i> y <i>Othonna cheirifolia</i>	233
4.3.6.2	Clorofila, índice de succulencia del mesófilo (Sm), contenido hídrico y clorofila total en <i>Crassula lycopodioides</i>	235
4.3.6.3	pH y conductividad eléctrica en lixiviados y porcentaje drenado	236

4.3.6.4	Contenido de humedad volumétrico, temperatura y conductividad eléctrica registrados en sensores de humedad	238
5.	CONCLUSIONES	245
5.1.	CARACTERIZACIÓN INICIAL DE SUSTRATOS POTENCIALES PARA SISTEMAS DE NATURACIÓN URBANA.....	245
5.2.	ENSAYO DE SUSTRATOS POTENCIALES EN UN JARDÍN VERTICAL.	246
5.3	ENSAYO DE SUSTRATOS POTENCIALES EN CUBIERTA VEGETAL....	247
6.	LITERATURA CITADA.....	253
7.	ANEXOS	275
	ANEXO 1. PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS DOCTORAL ...	275
	ANEXO 2. DETERMINACIONES ANALÍTICAS SEGÚN NORMAS UNE-EN.....	277

Índice de Tablas

Tabla 1. Subproductos potenciales para la elaboración de sustratos según su origen.	62
Tabla 2. Composición volumétrica de sustratos ensayados en sistemas de naturación urbana.	80
Tabla 3. Determinaciones analíticas y referencias de normas europeas para la caracterización física y química de mejoradores de suelos y sustratos de cultivos. ..	81
Tabla 4. Sustratos ensayados en un sistema de jardín vertical.	82
Tabla 5. Sustratos ensayados en un sistema de cubiertas en cubierta vegetal.	93
Tabla 6. Sensores instalados en el ensayo de cubierta vegetal.	97
Tabla 7. Propiedades físicas iniciales en sustratos potenciales para sistemas de naturación urbana (valores promedios)*.	106
Tabla 8. Distribución de partículas con diámetro menor a 1 mm de en sustratos potenciales para dos sistemas de naturación urbana (valores expresados en porcentaje en peso)*.	108
Tabla 9. Distribución de partículas con diámetro mayor a 1 mm en sustratos potenciales para dos sistemas de naturación urbana (valores expresados en porcentaje en peso)*.	110
Tabla 10. Propiedades hidrofísicas en sustratos potenciales para dos sistemas de naturación urbana (valores medios en porcentaje*/ volumen).	111
Tabla 11. Contenido de fósforo (P) y concentración inicial de cationes solubles en agua en sustratos ensayados en dos sistemas de naturación urbana, expresados en mg L ⁻¹ de sustrato (valores promedios)*.	121
Tabla 12. Valores recomendados de propiedades físicas, hidrofísicas y químicas para sustratos potenciales en dos sistemas de naturación urbana: un jardín vertical y una cubierta vegetal.	123
Tabla 13. Selección de sustratos en el jardín vertical y valores recomendados de acuerdo a los criterios basados en la evaluación de las propiedades.	124
Tabla 14. Selección de sustratos en la cubierta vegetal y valores recomendados de acuerdo a los criterios basados en la evaluación de las propiedades.	125
Tabla 15. Valores medios* de densidad aparente (Da), pH y conductividad eléctrica (CE) en sustratos con <i>Frankenia laevis</i> en el jardín vertical, según su ubicación en el panel de cultivo.	146

Tabla 16. Valores medios* de de densidad aparente (Da), pH y conductividad eléctrica (CE) en sustratos con <i>Pachysandra terminalis</i> en el jardín vertical, según su ubicación en el panel de cultivo.	146
Tabla 17. Valores medios* materia orgánica (MO), nitrógeno y relación carbono/nitrógeno (C/N) en sustratos con <i>Frankenia laevis</i> como planta indicadora en el jardín vertical, según su ubicación en el panel de cultivo.....	149
Tabla 18. Valores medios* materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y relación carbono/nitrógeno (C/N) en sustratos con <i>Pachysandra terminalis</i> como planta indicadora en el jardín vertical, según su ubicación en el panel de cultivo.	149
Tabla 19. Valores medios* de densidad aparente (Da), pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y la relación carbono/ nitrógeno (C/N) en sustratos sin vegetación establecidos en el jardín vertical.	151
Tabla 20. Valores medios* de densidad aparente, pH y conductividad eléctrica (CE) en sustratos sin vegetación en el jardín vertical, según su ubicación en el panel de cultivo.....	153
Tabla 21. Valores medios* materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y relación carbono/nitrógeno (C/N) en sustratos sin vegetación en el jardín vertical, según su ubicación en el panel de cultivo.	153
Tabla 22. Valores medios* de longitud, peso fresco y peso seco derivados de podas en parte aérea de <i>Frankenia laevis</i> y <i>Pachysandra terminalis</i> durante su desarrollo en el jardín vertical.....	155
Tabla 23. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea y radicular de <i>Frankenia laevis</i> al primer año de establecidas en el jardín vertical, según el sustrato.	172
Tabla 24. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea y radicular de <i>Pachysandra terminalis</i> al primer año de establecidas en el jardín vertical, según el sustrato.	172
Tabla 25. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea y radicular de <i>Frankenia laevis</i> al segundo año de establecidas en el jardín vertical.	173
Tabla 26. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea y radicular de <i>Pachysandra terminalis</i> al segundo año de establecidas en el jardín vertical.....	173
Tabla 27. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea y radicular de <i>Frankenia laevis</i> al tercer año de establecidas en el jardín vertical.	174
Tabla 28. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en en la parte aérea y radicular de <i>Pachysandra terminalis</i> al tercer año de establecidas en el jardín vertical.	174

Tabla 29. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea de <i>Frankenia laevis</i> al primer año de establecidas en el jardín vertical, según su ubicación.	175
Tabla 30. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en parte aérea de <i>Pachysandra terminalis</i> al primer año de establecidas en el jardín vertical, según su ubicación.....	176
Tabla 31. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la raíz de <i>Frankenia laevis</i> al primer año de establecida en el jardín vertical, según su ubicación.	176
Tabla 32. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la raíz de <i>Pachysandra terminalis</i> al primer año de establecida en el jardín vertical, según su ubicación.	177
Tabla 33. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea de <i>Frankenia laevis</i> al segundo año de establecidas en el jardín vertical, según su ubicación.	178
Tabla 34. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea de <i>Pachysandra terminalis</i> al segundo año de establecidas en el jardín vertical, según su ubicación.	178
Tabla 35. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la raíz de <i>Frankenia laevis</i> al segundo año de establecidas en el jardín vertical, según su ubicación.	178
Tabla 36. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la raíz de <i>Pachysandra terminalis</i> al segundo año de establecidas en el jardín vertical, según su ubicación.....	179
Tabla 37. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea de <i>Frankenia laevis</i> al tercer año de establecida en el jardín vertical, según su ubicación.	179
Tabla 38. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea de <i>Pachysandra terminalis</i> al tercer año de establecida en el jardín vertical, según su ubicación.....	180
Tabla 39. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la raíz de <i>Frankenia laevis</i> al final del ensayo del jardín vertical, según la ubicación del sustrato en el panel de cultivo.	180
Tabla 40. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la raíz de <i>Pachysandra terminalis</i> al final del ensayo del jardín vertical, según la ubicación del sustrato en el panel de cultivo.	181

Tabla 41. Valores medios* de número de tallos en <i>Frankenia laevis</i> y <i>Pachysandra terminalis</i> durante el periodo de desarrollo en el jardín vertical, según su ubicación.	184
Tabla 42. Valores medios* de número de raíces en <i>Frankenia laevis</i> y <i>Pachysandra terminalis</i> durante el periodo de desarrollo en el jardín vertical, según su ubicación.	185
Tabla 43. Valores medios* de diámetro de tallo principal en <i>Frankenia laevis</i> y <i>Pachysandra terminalis</i> durante el periodo de desarrollo en el jardín vertical, según su ubicación.	185
Tabla 44. Valores medios* de diámetro de raíz principal en <i>Frankenia laevis</i> y <i>Pachysandra terminalis</i> durante el periodo de desarrollo en el jardín vertical, según su ubicación.	185
Tabla 45. Valores medios* de pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica, nitrógeno y relación carbono/ nitrógeno en sustratos al inicio del ensayo de la cubierta vegetal.	197
Tabla 46. Valores medios* de contenido de fósforo y bases intercambiables en los sustratos, medidos al inicio del ensayo en la cubierta vegetal.	200
Tabla 47. Valores medios* de elementos menores en los sustratos, medidos al inicio del ensayo en la cubierta vegetal.....	202
Tabla 48. Valores medios* de pH y conductividad eléctrica (CE) en sustratos ensayados en la cubierta vegetal según la fecha de evaluación.....	204
Tabla 49. Valores medios* de materia orgánica (MO), carbono orgánico (CO) y relación carbono/ nitrógeno (C/N) en sustratos ensayados en la cubierta vegetal según la fecha de evaluación.....	205
Tabla 50. Valores medios* de pH y conductividad eléctrica (CE) en sustratos ensayados en la cubierta vegetal con <i>Teucrium chamaedrys</i> en distintas fechas de evaluación.....	207
Tabla 51. Valores medios* de pH y conductividad eléctrica (CE) en sustratos ensayados en la cubierta vegetal con <i>Othonna cheirifolia</i> en distintas fechas de evaluación...	207
Tabla 52. Valores medios* de pH y conductividad eléctrica (CE) en sustratos ensayados en la cubierta vegetal con <i>Frankenia thymifolia</i> en distintas fechas de evaluación.	207
Tabla 53. Valores medios* de pH y conductividad eléctrica (CE) en sustratos ensayados en la cubierta vegetal con <i>Crassula lycopodioides</i> en distintas fechas de evaluación.	207
Tabla 54. Valores medios* de materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y la relación C/N en sustratos ensayados en la cubierta vegetal con <i>Teucrium chamaedrys</i> en distintas fechas de evaluación.	209

Tabla 55. Valores medios* de materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y la relación C/N en sustratos ensayados en la cubierta vegetal con <i>Othonna cheirifolia</i> en distintas fechas de evaluación.	209
Tabla 56. Valores medios* de materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y la relación C/N en sustratos ensayados en la cubierta vegetal con <i>Frankenia thymifolia</i> en distintas fechas de evaluación.	209
Tabla 57. Valores medios* de materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y la relación C/N en sustratos ensayados en la cubierta vegetal con <i>Crassula lycopodioides</i> en distintas fechas de evaluación.	209
Tabla 58. Contenido hídrico, clorofila total e índice de succulencia de <i>Crassula poliploides</i>	236
Tabla 59. Valores medios* de porcentaje drenado, pH y CE en lixiviados en sustratos establecidos en la cubierta vegetal con <i>Teucrium chamaedris</i> y <i>Othonna cheirifolia</i>	237
Tabla 60. Valores medios* de porcentaje drenado, pH y CE en lixiviados en sustratos establecidos	237
Tabla 61. Variable medida en los sensores de acuerdo al sustrato.	238

Índice de Figuras

Figura 1. Proyecciones del crecimiento de las poblaciones urbana rural desde 1950 a 2030. Fuente: Banco Mundial, 2013: http://www.bancomundial.org/temas/cities/datos.htm	40
Figura 2. Zigurat construido en la antigua Mesopotamia constituye evidencia de naturación en pirámides. Fuente: http://almez.pntic.mec.es	41
Figura 3. Jardines colgantes de Babilonia, pintura del siglo XVI del pintor Danés Martin van Heemskerck. Fuente: www.wikipedia.org	41
Figura 4. Vegetación en uno de los Palacio en el Kremlin, Moscú.....	42
Figura 5. The Waldorf Astoria Roof Garden. Fuente: http://www.thehort.org/recent_news.html	43
Figura 6. (Izquierda y centro) Jardines verticales en Quai Branly Musée, París y (Derecha) Hotel Athenaeum, Londres.	45
Figura 7. (Izquierda) Edificio Fargas y Tous, Barcelona y (Derecha) Puppy en Museo Guggenheim de Bilbao (España).	46
Figura 8. Patio Cordobés. Fuente: A. Masaguer	46
Figura 9. Pared vegetada en Caixa Forum y Patio interior en Hotel Santo Domingo, Madrid.....	47
Figura 10. (Izquierda) Cubierta ecológica extensiva en un tejado con pendiente. (Derecha) Naturación intensiva: pérgola ajardinada en Burgos, España. Fuente: http://jardineriaypaisajismo.blogspot.com.es/2010/10/las-normas-tecnologicas-de-jardineria-y.html	52
Figura 11. Elementos integrantes de las cubiertas vegetales ajardinadas intensivas. Fuente: http://dcgreenworks.org/resources/about-rainwater-conservation-reuse/	53
Figura 12. Representación esquemática de las diferentes fuentes de elaboración de sustratos. Fuente: Masaguer (2008).	60
Figura 13. Representación esquemática del fraccionamiento del volumen* (V) total de un sustrato. (Fuente: Masaguer, 2008).	65
Figura 14. Curva de liberación de agua de un sustrato. Fuente: De Boodt <i>et al.</i> (1974).....	69
Figura 15. Fotografía satelital de la ubicación del jardín vertical en El Encín, IMIDRA, Madrid. Fuente: Google earth, 2013.	79
Figura 16. Panel Naturpanel® utilizado en la instalación del ensayo de jardín vertical (Fuente: Masaguer, 2013) y Fachada Naturpanel® Aljibe de Intemper.	83

Figura 17. Colocación de los sustratos en sacos y disposición en los paneles.....	83
Figura 18. <i>Frankenia laevis</i> (L.) F. Muell. ex Hablitz	84
Figura 19. <i>Pachysandra terminalis</i> Siebold y Zucc.	84
Figura 20. (Izquierda) Disposición de los paneles en forma horizontal. (Derecha) Inclinación de los paneles a 45° para la verticalidad vegetal.....	85
Figura 21. Esquema de la distribución de los tratamientos en la fachada del jardín vertical.....	85
Figura 22. Jardín vertical situado en la pared con vista de las tuberías de alimentación de agua en el lateral izquierdo de la pared vegetal (izquierda) y la pantalla corta- heladas (derecha).....	86
Figura 23. Equipo SPAD-502® utilizado para medir la concentración de clorofila.....	87
Figura 24. Elección de cuadrantes de muestreo según la ubicación de sustrato y vegetación en los laterales de los paneles de cultivo del jardín vertical.	88
Figura 25. Corte de los sacos de sustratos ubicados en los cuadrantes laterales del panel.	88
Figura 26. (Izquierda) Muestreo de sustrato y vegetación ubicada en los cuadrantes del lateral derecho en uno de los paneles de cultivo del jardín vertical. (Derecha) Muestreo de sustrato y vegetación ubicada en los cuadrantes centrales de los paneles de cultivo del jardín vertical.....	89
Figura 27. Separación del material vegetal de los sustratos provenientes del jardín vertical.....	89
Figura 28. Microscopio digital de mano Motic Ecoline® D-EL 1.....	90
Figura 29. Microondas Berghof Speedwave Four® utilizado en la digestión del material vegetal.	91
Figura 30. Especies ensayadas en la cubierta vegetal: <i>Teucrium chamaedrys</i> L. (Izquierda), <i>Othonna cheirifolia</i> (Centro izquierda), <i>Frankenia thymifolia</i> (Centro derecha) y <i>Crassula lycopodiodes</i> (Derecha).	93
Figura 31. Establecimiento de los sustratos y distribución de la vegetación en los paneles.....	95
Figura 32. Croquis con la distribución de los tratamientos del ensayo de la cubierta vegetal.	95
Figura 33. Establecimiento de los sustratos en los contenedores y distribución de la vegetación.	96
Figura 34. Recolección de lixiviados provenientes del drenaje de agua en una cubierta vegetal.	98

Figura 35. Muestreos y evaluación de especies vegetales en la cubierta vegetal al inicio (abril 2014) y final (abril 2015) del ensayo.	100
Figura 36. Curvas de retención de humedad en sustratos potenciales para dos sistemas de naturación urbana (expresado como porcentaje en volumen).	114
Figura 37. Curvas de liberación de humedad en sustratos potenciales para dos sistemas de naturación urbana (expresado como porcentaje en volumen).	115
Figura 38. Valores medios* iniciales de pH (arriba) y conductividad eléctrica (CE) (abajo) en sustratos potenciales para dos sistemas de naturación urbana (expresados en porcentaje en peso).	116
Figura 39. Porcentajes iniciales de materia orgánica total (MO), nitrógeno (N) y relación carbono/nitrógeno (C/N) en sustratos de cultivo ensayados en sistemas de naturación urbana (valores promedios)*.	118
Figura 40. Valores medios* de densidad aparente (Da) en el jardín vertical, según la fecha de muestreo.	126
Figura 41. Valores medios* de densidad aparente (Da) en los sustratos ensayados en el jardín vertical, según la fecha de muestreo.	127
Figura 42. Valores medios* de pH obtenidos en sustratos orgánicos en tres fechas de muestreo durante su establecimiento en el jardín vertical.	128
Figura 43. Valores medios* de pH obtenidos en sustratos orgánicos establecimiento en el jardín vertical, en tres fechas de muestreo.	130
Figura 44. Valores medios* de conductividad eléctrica (CE) obtenidos en sustratos ensayados en el jardín vertical en tres evaluaciones durante su establecimiento. ...	131
Figura 45. Valores medios* de Materia orgánica (MO) y relación carbono/nitrógeno (C/N) en sustratos ensayados en el jardín vertical, según la fecha de muestreo.	132
Figura 46. Valores medios* de nitrógeno (N) en sustratos ensayados en el jardín vertical, según la fecha de muestreo.	134
Figura 47. Valores medios* de porcentajes de materia orgánica (MO) y nitrógeno y la relación C/N obtenidas en sustratos ensayados en el jardín vertical en tres evaluaciones durante su establecimiento.	135
Figura 48. Valores medios* de densidad aparente (Da) obtenida en sustratos ensayados en el jardín vertical, según la especie vegetal (Frankenia, arriba; Pachysandra, abajo) en tres evaluaciones durante su establecimiento.	138
Figura 49. Valores medios* de pH obtenido en sustratos ensayados en el jardín vertical, según la especie vegetal (Frankenia, arriba; Pachysandra, abajo) en tres evaluaciones durante su establecimiento.	139

Figura 50. Valores medios* de conductividad eléctrica (CE) obtenido en sustratos ensayados en el jardín vertical, según la especie vegetal (<i>Frankenia</i> , arriba; <i>Pachysandra</i> , abajo) en tres evaluaciones durante su establecimiento.....	141
Figura 51. Valores medios* de materia orgánica (MO), relación carbono/ nitrógeno (C/N) y nitrógeno (N) obtenidos en sustratos con <i>Frankenia laevis</i> ensayados en el jardín vertical en tres evaluaciones durante su establecimiento.....	142
Figura 52. Valores medios* de materia orgánica (MO), relación carbono/ nitrógeno (C/N) y nitrógeno (N) obtenidos en sustratos con <i>Pachysandra terminalis</i> ensayados en el jardín vertical en tres evaluaciones durante su establecimiento. ...	144
Figura 53. Valores medios de longitud (arriba), peso fresco (centro) y peso seco (abajo) derivados de podas de la parte aérea de <i>Frankenia laevis</i> durante su desarrollo en el jardín vertical, según el sustrato y la fecha de muestreo (corte/poda).	156
Figura 54. Valores medios acumulativos de longitud (arriba), peso fresco (centro) y peso seco (abajo) derivados de podas de la parte aérea de <i>Frankenia laevis</i> durante su desarrollo en el jardín vertical, según el sustrato y la fecha de muestreo (corte/poda).	158
Figura 55. Valores medios* de longitud (arriba), peso fresco (centro) y peso seco (abajo) derivados de podas de la parte aérea en <i>Frankenia laevis</i> durante su desarrollo en el jardín vertical, según el sustrato y su ubicación en el panel de cultivo.....	160
Figura 56. Valores medios de longitud (arriba), peso fresco (centro) y peso seco (abajo) de la parte aérea derivados de podas en <i>Pachysandra terminalis</i> durante su desarrollo en el jardín vertical, según el sustrato y la fecha de muestreo (corte/poda).	162
Figura 57. Valores medios acumulativos de longitud (arriba), peso fresco (centro) y peso seco (abajo) derivados de podas de la parte aérea de <i>Pachysandra terminalis</i> durante su desarrollo en el jardín vertical, según el sustrato y la fecha de muestreo (corte/poda).	164
Figura 58. Valores medios* de longitud (arriba), peso fresco (centro) y peso seco (abajo) de la parte aérea derivados de podas en <i>Pachysandra terminalis</i> durante su desarrollo en el jardín vertical, según el sustrato y su ubicación en el panel de cultivo.....	166
Figura 59. Valor medio* de índice de verdor o unidad SPAD en <i>Pachysandra terminalis</i> durante su desarrollo en el jardín vertical, según el sustrato.	167
Figura 60. Valores promedios* de unidades SPAD en <i>Pachysandra terminalis</i> durante su desarrollo en el jardín vertical, según el sustrato y su evolución según la fecha de muestreo.	168

Figura 61. Valores medios* de longitud (arriba), peso fresco (centro) y peso seco (abajo) de la parte aérea derivados de muestreos destructivos en <i>Frankenia laevis</i> y <i>Pachysandra terminalis</i> en el jardín vertical, según la fecha de muestreo.	170
Figura 62. Valores medios* de longitud (arriba), peso fresco (centro) y peso seco (abajo) de la parte radicular derivados de muestreos destructivos en <i>Frankenia laevis</i> y <i>Pachysandra terminalis</i> en el jardín vertical, según la fecha de muestreo.	171
Figura 63. Número de tallos (arriba) y número de raíces (abajo) cuantificados en <i>Frankenia laevis</i> y <i>Pachysandra terminalis</i> durante el periodo de desarrollo en el jardín vertical (valores medios*).	182
Figura 64. Diámetro de tallo principal (arriba) y diámetro de raíz principal (abajo) medidos en <i>Frankenia laevis</i> y <i>Pachysandra terminalis</i> durante el periodo de desarrollo en el jardín vertical.	182
Figura 65. Valores medios* de peso fresco (masa fresca) y seca (masa seca) en estolones desarrollados en <i>Pachysandra terminalis</i> durante su establecimiento en el jardín vertical, según el sustrato.	183
Figura 66. Concentración media* de nutrientes disponibles en parte aérea de <i>Frankenia laevis</i> (arriba) y <i>Pachysandra terminalis</i> (abajo) según sustrato (expresada en ppm).	187
Figura 67. Concentración media* de nutrientes disponibles en zona radicular de <i>Frankenia laevis</i> (arriba) y <i>Pachysandra terminalis</i> (abajo), según sustratos (en ppm).	187
Figura 68. Concentración media* de nutrientes menores disponibles en parte aérea de <i>Frankenia laevis</i> (arriba) y <i>Pachysandra terminalis</i> (abajo) (expresada en ppm)... ..	189
Figura 69. Concentración media* de nutrientes menores disponibles en zona radicular de <i>Frankenia laevis</i> (arriba) y <i>Pachysandra terminalis</i> (abajo), según sustratos (en ppm).	189
Figura 70. Nutrientes disponibles en zona aérea de <i>Pachysandra terminalis</i> según la ubicación del sustrato en el panel de cultivo (arriba: saco superior; abajo: inferior) (expresada en ppm).	190
Figura 71. Nutrientes disponibles en zona aérea de <i>Pachysandra terminalis</i> según la ubicación del sustrato en el panel de cultivo (arriba: saco superior; abajo: inferior) (expresada en ppm).	191
Figura 72. Concentración media* de fósforo en parte aérea y radicular de <i>Frankenia laevis</i> (arriba) y <i>Pachysandra terminalis</i> (abajo) (expresada en ppm*).	192
Figura 73. Curvas de humedad de las mezclas i) 70% restos vegetales compostados+30% puzolana volcánica (RVC+PV) (arriba) y ii) 70% corteza de pino compostada+30% puzolana volcánica (CPC+PV) (abajo).	194

Figura 74. Curvas de humedad de los sustratos: i) 70% corteza de pino compostada+30% fibra de coco (CPC+FC) (arriba), ii) 70% restos vegetales compostados+30% corteza de pino compostada (RVC+CPC) (centro) y iii) 70% restos vegetales compostados+30% fibra de coco (RVC+FC) (abajo).....	195
Figura 75. Densidad aparente (Da) media* en los sustratos al inicio del establecimiento de la cubierta vegetal del ensayo.....	197
Figura 76. Densidad aparente media* en la cubierta vegetal, según la fecha de muestreo.	203
Figura 77. Densidad aparente (Da) media* en los sustratos ensayados en la cubierta vegetal, según la fecha de muestreo.....	203
Figura 78. Logitud (LG) media* en la parte aérea de <i>Teucrium chamaedrys</i> , <i>Othonna Cheirifolia</i> , <i>Frankenia thymifolia</i> y <i>Crassula lycopodioides</i> en sustratos ensayados en la cubierta vegetal, según la fecha de evaluación.....	212
Figura 79. Peso fresco (PF) medio* en la parte aérea de <i>Teucrium chamaedrys</i> , <i>Othonna Cheirifolia</i> , <i>Frankenia thymifolia</i> y <i>Crassula lycopodioides</i> en sustratos ensayados en la cubierta vegetal, según la fecha de evaluación.....	213
Figura 80. Peso seco (PS) medio* en la parte aérea de <i>Teucrium chamaedrys</i> , <i>Othonna Cheirifolia</i> , <i>Frankenia thymifolia</i> y <i>Crassula lycopodioides</i> en sustratos ensayados en la cubierta vegetal, según la fecha de evaluación.....	215
Figura 81. Valores medios* de diametro de tallo principal (DTP) (mm) en <i>Teucrium chamaedrys</i> , <i>Othonna Cheirifolia</i> , <i>Frankenia thymifolia</i> y <i>Crassula lycopodioides</i> en sustratos ensayados en la cubierta vegetal, según la fecha de evaluación.	216
Figura 82. Valores medios* de longitud (cm) radicular en <i>Teucrium chamaedrys</i> , <i>Othonna Cheirifolia</i> , <i>Frankenia thymifolia</i> y <i>Crassula lycopodioides</i> en sustratos ensayados en la cubierta vegetal, según la fecha de evaluación.	218
Figura 83. Peso fresco (PF) medio* en la parte radicular de <i>Teucrium chamaedrys</i> , <i>Othonna cheirifolia</i> , <i>Frankenia thymifolia</i> y <i>Crassula lycopodioides</i> en sustratos ensayados en la cubierta vegetal, según la fecha de evaluación. *Peso en g planta ⁻¹	220
Figura 84. Peso seco (PS) medio* en la parte radicular de <i>Teucrium chamaedrys</i> , <i>Othonna cheirifolia</i> , <i>Frankenia thymifolia</i> y <i>Crassula lycopodioides</i> en sustratos ensayados en la cubierta vegetal, según la fecha de evaluación.	221
Figura 85. Valores medios* de Fósforo (P) en la parte aérea (izquierda) y radicular (derecha) de <i>Teucrium chamaedrys</i> , <i>Othonna cheirifolia</i> , <i>Frankenia thymifolia</i> y <i>Crassula lycopodioides</i> en sustratos ensayados en la cubierta vegetal.	223
Figura 86. Valores medios* de Nitrógeno en la parte aérea (izquierda) y radicular (derecha) de <i>Teucrium chamaedrys</i> , <i>Othonna cheirifolia</i> , <i>Frankenia thymifolia</i> y <i>Crassula lycopodioides</i> en sustratos ensayados en la cubierta vegetal.	223

Figura 87. Valores medios* de Sodio (Na) en tejido vegetal aéreo (izquierda) y radicular (derecha), en <i>Teucrium chamaedrys</i> , <i>Othonna cheirifolia</i> , <i>Frankenia thymifolia</i> y <i>Crassula poliploides</i> en sustratos ensayados en la cubierta vegetal.	224
Figura 88. Valores medios de Magnesio (Mg) en tejido vegetal aéreo (izquierda) y radicular (derecha), en <i>Teucrium chamaedrys</i> , <i>Othonna cheirifolia</i> , <i>Frankenia thymifolia</i> y <i>Crassula poliploides</i> en sustratos ensayados en la cubierta vegetal.	225
Figura 89. Valores medios de Calcio (Ca) en tejido vegetal aéreo (izquierda) y radicular (derecha), en <i>Teucrium chamaedrys</i> , <i>Othonna cheirifolia</i> , <i>Frankenia thymifolia</i> y <i>Crassula poliploides</i> en sustratos ensayados en la cubierta vegetal.	226
Figura 90. Valores medios* de Potasio (K) en tejido vegetal aéreo (izquierda) y radicular (derecha), en <i>Teucrium chamaedrys</i> , <i>Othonna cheirifolia</i> , <i>Frankenia thymifolia</i> y <i>Crassula poliploides</i> en sustratos ensayados en la cubierta vegetal.	227
Figura 91. Valores medios* de Cobre (Cu) en tejido vegetal aéreo (izquierda) y radicular (derecha), en <i>Teucrium chamaedrys</i> , <i>Othonna cheirifolia</i> , <i>Frankenia thymifolia</i> y <i>Crassula poliploides</i> en sustratos ensayados en la cubierta vegetal.	229
Figura 92. Valores medios* de Zinc (Zn) en tejido vegetal aéreo (izquierda) y radicular (derecha), en <i>Teucrium chamaedrys</i> , <i>Othonna cheirifolia</i> , <i>Frankenia thymifolia</i> y <i>Crassula poliploides</i> en sustratos ensayados en la cubierta vegetal.	230
Figura 93. Valores medios* de Manganeso (Mn) en tejido vegetal aéreo (izquierda) y radicular (derecha), en <i>Teucrium chamaedrys</i> , <i>Othonna cheirifolia</i> , <i>Frankenia thymifolia</i> y <i>Crassula poliploides</i> en sustratos ensayados en la cubierta vegetal.	231
Figura 94. Valores medios* de Hierro (Fe) en tejido vegetal aéreo (izquierda) y radicular (derecha), en <i>Teucrium chamaedrys</i> , <i>Othonna cheirifolia</i> , <i>Frankenia thymifolia</i> y <i>Crassula poliploides</i> en sustratos ensayados en la cubierta vegetal.	232
Figura 95. Valores medios de intensidad de verdor o unidades Spad en <i>Teucrium chamaedrys</i> (arriba) y <i>Othonna cheirifolia</i> (abajo), durante su establecimiento en la cubierta vegetal, según el sustrato.	234
Figura 96. Contenido de humedad volumétrico (VWC) registrado en sensores 5EC, 5TM y 5TE, con sonda tipo FDR.	239
Figura 97. Temperatura registrada en sensores 5TM y 5TE, con sonda tipo FDR.	240
Figura 98. Conductividad eléctrica, sensor 5TE, con sonda tipo FDR.	240
Figura 99. Instrumentación utilizada para la determinación de DACL.	286
Figura 100. Humectación y saturación de sustratos para la determinación de propiedades físicas.	286
Figura 101. Mesa de succión (lecho de arena) utilizada para la determinación de propiedades físicas de los sustratos evaluados.	286

Figura 102. Rehumectación y saturación de las muestras húmedas en equilibrio en cilindros de muestreo.	287
Figura 103. Muestras de sustratos secadas a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$	287
Figura 104. Juego de tamices de diferentes diámetros para distribución de partículas	287

I- INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

La **naturación urbana** incorpora la vegetación al medio urbano con la finalidad de atenuar el desequilibrio entre la urbanización y la conservación del medio ambiente. Este concepto hace referencia a la **creación de zonas verdes** en las ciudades en la cual puede contemplar silvicultura urbana, agricultura urbana, permacultura, recuperación de suelos degradados, entre otros (Gómez-Campo, 2004). Sin embargo, en ocasiones el desarrollo de las áreas verdes en las ciudades se ve dificultado al no disponer de superficies necesarias para implementar vegetación, lo que puede producir reducción de zonas verdes en dichas superficies. Por lo que, esta acción incita a la búsqueda de nuevas formas que permitan la **incorporación de la vegetación a la vida urbana**. En respuesta han surgido los conceptos de **naturación vertical o jardines verticales, jardines colgantes, fachadas naturadas, cubiertas ajardinadas o terrazas vegetales, fachadas, paredes o muros vivos** que consiste en cubrir los edificios con plantas permanentes capaces de tapizar por su cuenta o mediante estructuras de apoyo (Gross, 2012). Estas formas establecen nuevas o reutilizadas técnicas que han ido imponiendo en las últimas décadas, complementando a la jardinería clásica para cubrir más allá de la superficie suelo e integrar una tercera dimensión (Urrestarazu y Burés, 2012). Al presente, los jardines verticales o “muros verdes” en las fachadas e interiores de las edificaciones constituyen las representaciones más innovadoras de naturación urbana iniciada ya en lugares como los patios cordobeses con más de noventa años de antigüedad, siendo un claro ejemplo singular de jardinería; así como también, potentes herramientas para el diseño bioclimático y sostenible (Terapia Urbana, 2013).

Algunos de los muchos beneficios proporcionados por estos sistemas de naturación son: reducción del efecto isla de calor urbano (Alexandri y Jones, 2007; MacIvor *et al.*, 2011), retención de la humedad (Thuring *et al.*, 2010), contribuyen con la biodiversidad (Gedge y Kadas, 2005), mejoran la visibilidad estética del edificio donde se implemente (White y Gatersleben, 2011) y proporcionan numerosos beneficios a la salud humana (Groenewegen *et al.*, 2006). Para que estos beneficios sean posibles, es importante el crecimiento y el desarrollo de la vegetación con el apoyo de medios de cultivo (Graceson *et al.*, 2014) que contribuyan a reducir el peso del sistema de naturación utilizado (jardín vertical o techo verde) y su efecto sobre la capacidad de carga del edificio (FLL, 2012).

El material utilizado debe ser de constitución ligera, capaz de sostener la vegetación, que a su vez proporcione una óptima relación agua/oxígeno en el sistema radicular y que permita un desarrollo satisfactorio (Baixauli y Aguilar, 2002).

Los avances tecnológicos aplicados en los diferentes sistemas de producción de plantas han afectado a todos y a cada uno de los aspectos que condicionan los cultivos, estos aspectos se enfocan en: i) factores climáticos como la implementación de invernaderos automatizados, ii) factores biológicos como el mejoramiento genético, iii) factores nutricionales como las técnicas de fertirrigación, además de, iv) factores edafológicos como la reducción y pérdida de la fertilidad del suelo, así como la búsqueda de materiales ligeros, destacándose entre ellos la introducción de nuevos medios de cultivos (López-Cuadrado *et al.*, 2006). La necesidad de **desarrollar plantas fuera de su medio natural** ha obligado a experimentar cambios notables, sustituyéndose gradualmente los cultivos tradicionales directamente en suelo por sistemas donde se utilizan otros medios de cultivo (sin suelo). En el caso particular de la producción hortícola y ornamental, **uno de los cambios más notables ha sido sustituir el uso del suelo natural por medios de cultivo de diferentes orígenes y propiedades** o por sustratos inertes que sólo cumplen una función de soporte (López-Cuadrado *et al.*, 2006).

Raviv *et al.* (1986); Abad *et al.* (1993); Terés (2001); Abad *et al.* (2004) señalan que la sustitución del cultivo en suelo por cultivo sin suelo responde a: i) la necesidad de la transportación de plantas de un sitio a otro, ii) factores limitantes para el desarrollo adecuado del cultivo, tales como la pérdida de la fertilidad natural del suelo, problemas de salinización), iii) control en el suministro de agua y nutrientes, iv) manejo de problemas fitopatológicos, v) reducción de labores de cultivos vi) aprovechamiento máximo de la superficie, entre otros factores. En ese sentido, se consigue aumentar considerablemente la posibilidad de controlar factores de producción relacionados con el entorno del sistema radicular vegetal (Terés, 2001). Actualmente, el uso de la turba, la lana de roca y de la perlita como medio de cultivo constituyen los materiales más empleados para la producción de plantas e implementación como sustratos de cultivo en estos sistemas ornamentales y paisajísticos. Razones económicas y ambientales, incitan a investigar sobre la utilización de materiales alternativos que contribuyan al uso en menor escala o casi de la eliminación de estos medios de cultivo.

Actividades diarias de carácter agrícola, forestal o urbano generan residuos orgánicos que precisan de una gestión medioambiental y que siguiendo el principio de reducir, reciclar y reutilizar pueden ser utilizados como sustratos de cultivos o para la mejora de sustratos existentes, generando una creciente necesidad de investigación en sustratos de cultivos (López-Cuadrado *et al.*, 2006). Muchos materiales pueden ser utilizados para la elaboración de sustratos de cultivos que sean sostenibles, eficaces y estables y que permiten la utilización de materia prima local. Estos materiales pueden ser utilizados para la elaboración de sustratos de cultivos sostenibles, eficaces y estables y que permiten la utilización de materiales locales que tiendan a sustituir de forma gradual a las turbas, reduciendo el deterioro ambiental que supone su empleo.

1.1. LA NATURACIÓN EN LOS ESPACIOS URBANOS

La acelerada **tasa de crecimiento registrada en las grandes ciudades del mundo** ha traído consigo la pérdida de áreas verdes en el paisaje urbano, sacrificando el entorno natural en las que están asentadas y originando cambios substanciales debido al incremento de las edificaciones. Desde mediados del siglo XX se ha observado una preocupación por el desequilibrio entre la urbanización y la conservación del medio ambiente. Según datos de las Naciones Unidas, durante el período 1950-2011, la población urbana aumentó casi cinco veces (UN-Habitat, 2011). La “bomba demográfica” supondrá ciudades desbordadas, degradadas y empobrecidas, con una población numerosa y vulnerable (FAO, 2010).

Muchas ciudades ejercen presión sobre el medio ambiente, siendo directa o indirectamente responsables del 80% del *total* del consumo de energía, de más del 70% del total de los residuos generados y más del 60% de los gases de efecto invernadero (Grimm *et al.*, 2008), deteriorando de forma gradual las condiciones medioambientales. Según cifras del Banco Mundial (2013), más del 50% de la población mundial vive en las ciudades y estima que para el 2030 superará el 60%, por lo que el problema se incrementará de forma exponencial (Figura 1). La mayoría de las ciudades no están acondicionadas para acoger un crecimiento descontrolado, por lo que se derivan problemas económicos, sociales y medioambientales. Estos últimos notables en los ciclos atmosférico, hidrológico, energético, en materia orgánica y residuos, así como problemas edificatorios, salubres y sociales (Higueras, 1997).

En respuesta a estos daños el diseño de ciudades más sostenibles es un argumento que aborda la mayor parte de los problemas globales que la sociedad ha provocado (Oliver-Solà *et al.*, 2009).

Figura 1. Proyecciones del crecimiento de las poblaciones urbana rural desde 1950 a 2030. Fuente: Banco Mundial, 2013: <http://www.bancomundial.org/temas/cities/datos.htm>

1.1.1. Naturación urbana: Concepto, historia, evolución y expansión

La naturación urbana o “*urbanaturación*”, por lo general implica mezclar tanto la vida urbana como la rural en un ambiente donde la naturaleza protagoniza a través de la **utilización de superficies construidas para la adaptación de especies vegetales**. Se reconoce la naturación como una técnica constructiva que incorpora vegetación sobre superficies horizontales, verticales o inclinadas en las edificaciones, en espacios abiertos o cerrados dentro de la ciudad (Briz y De Felipe, 2004). El término “*naturación*” se deriva del latín “*natura*” que implica el restablecimiento y la integración de la biodiversidad permisible en la edificación en los núcleos urbanos. El *jardín* propiamente dicho, surge con la intención de buscar la satisfacción corporal y espiritual inspirada por la presencia de vida vegetal en un espacio especial.

Las técnicas de construcciones utilizando cubiertas verdes, el estudio y la preocupación por los espacios verdes es un tema reciente, pero la evidencia de sistemas de naturación data desde la antigüedad. La historia de los jardines se remonta a miles de años antes de la era cristiana, no obstante, no es posible establecer con exactitud dónde

surgió su establecimiento por primera vez. El primer jardín: “El Edén”, habitado por Adán, Jardín de delicias que tenía que guardar y cultivar se menciona en la Biblia, en el Génesis. La Biblia indica que el jardín de Edén habría existido al oriente de la región de igual nombre, en el Cercano Oriente. El ejemplo más antiguo figura en la antigua Mesopotamia, alrededor del año 4000 A.C. donde se construyeron las *zigurats* (Figura 2) que correspondieron a pirámides escalonadas, las cuáles eran estructuras religiosas construidas en piedras rodeadas con escaleras en espiral (Bliss, 2007). Otras dos estructuras muy famosas en la historia: la Torre de Babel y los míticos jardines colgantes de Babilonia construidas en Mesopotamia en el año 600 A.C. por el rey Nabucodonosor II, fueron unas de las primeras cubiertas ecológicas vegetales o tejados verdes de la historia antigua (Getter y Rowe, 2006) (Figura 3).

Figura 2. Zigurat construido en la antigua Mesopotamia constituye evidencia de naturación en pirámides. Fuente: <http://almez.pntic.mec.es>

Figura 3. Jardines colgantes de Babilonia, pintura del siglo XVI del pintor Danés Martin van Heemskerck. Fuente: www.wikipedia.org

En Italia, en la época renacentista el Papa Pio II contribuyó al desarrollo del primer techo verde, durante su pontificado (1458-1464) ordenó la construcción de un palacio en la ciudad de Pienza (Italia), se utilizó una cubierta verde donde se realizaban las audiencias. Otro ejemplo es el Palacio de Thakt-i-Bahi en Shiraz, India y el Palacio Venecia en Roma de 1467 (Bliss, 2007). En 1979, accidentalmente arqueólogos descubrieron la ciudad romana de Pompeya, la cual en el año 79 A.C. fue cubierta bajo cenizas y piedra pómez por la erupción volcánica del Monte Vesubio. En la excavación descubrieron que los jardines de la azotea eran una parte esencial de la vida romana (Bliss, 2007). La cultura romana realizó sus aportes en el uso de la vegetación en zonas urbanas con la construcción de la Villa de los Misterios en Pompeya o Villa Adriana en Tivoli donde integraron edificios en el paisaje mediante galerías que dan a jardines colgantes. En el período gótico, con el fin de aligerar la arquitectura de sus edificios, muros de iglesias, palacios y patios de la época se cubrían con guirnaldas y ramales florales. Muchos de estos casos, son ejemplos de cómo el ser humano ha integrado la arquitectura y paisajismo con la agronomía aplicada en el entorno urbano (Figura 4).

En la América precolombina y en la arquitectura de la antigua India se destacó por los jardines verticales en forma de terrazas. En los siglos XVII y XVIII, la cubierta verde fue muy popular dentro de la nobleza rusa. Un ejemplo lo constituyen los jardines colgantes de uno de los palacios en el Kremlin, Moscú (Figura 4), en la parte superior del palacio se construyeron jardines que contenían estanque y una fuente (Bliss, 2007).

Figura 4. Vegetación en uno de los Palacio en el Kremlin, Moscú.

Aunque, en la época no todos los jardines en el techo fueron diseñados para impresionar, los techos noruegos cubiertos con suelo y plantados con gramíneas y otras plantas utilizadas para estabilizar el suelo en el techo eran parte de la lengua vernácula noruega. Después, para evitar el daño ocasionado por el agua de lluvia, los construyeron provistos con una capa de corteza de abedul colocada como membrana de sellado, seguido por una capa de ramas de arbustos para el drenaje y una cubierta con césped.

En la década de 1880 empezaron a aparecer jardines en los tejados en la ciudad de Nueva York. Los inversionistas creían que jardines en el techo podrían eclipsar todas las demás formas de entretenimiento de verano y que se convertiría en una parte necesaria de la vida para los neoyorquinos. El primer jardín estadounidense fue construido del Teatro Casino (39th Broadway) en New York (Bliss, 2007). La popularidad del casino promovió la construcción de techos con cubierta vegetal en edificios de hoteles, restaurantes y condominios. Dos ejemplos de hoteles prestigiosos en esta ciudad son: el Waldorf Astoria (Figura 5) y el Astor, los cuales poseen techos ajardinados instalados en su superficie. También, en el edificio de la Academia de Ciencias de California, en el parque Golden Gate de San Francisco existe un techo verde con casi una hectárea de vegetación nativa designada para la protección de algunas especies locales en peligro de extinción (Maddox, 2014).

Figura 5. The Waldorf Astoria Roof Garden. Fuente: http://www.thehort.org/recent_news.html

En Europa occidental, la exposición universal de París, celebrada en 1889 incluyó una azotea naturalizada, primer ejemplo de estos proyectos experimentales. Suiza tiene uno de los techos verdes más antiguos de Europa, creado en 1919 en la planta de purificación de agua del lago Moos, Wallishofen, Zúrich Switzerland) (Brenneisen y Hänggi, 2006; Landolt, 2001). Tiempo después, el suizo Le Corbusier liderando el movimiento modernista en el año 1930, planteó como uno de sus postulados la “*cubierta jardín*”, un espacio funcional que equilibra producción floral con diseño arquitectónico. Posteriormente, en 1950, el artista plástico y ecologista austriaco Hundertwasser, realizó algunas obras emblemáticas, convirtiendo a la naturación urbana en una característica común de la construcción en Alemania, Francia, Austria, Noruega, Suiza y otros países europeos (Köhler, 2008).

En 1970 nació en Alemania el término de “naturación”, mejor conocida actualmente como **jardines en los techos, techos verdes o cubiertas ajardinadas**. Esta idea surgió con la intención de mejorar la protección contra el fuego, y en la actualidad se instalan cada año alrededor de un millón de metros cuadrados de azoteas verdes y hasta el momento. Se calcula que alrededor del 10% de los techos en Alemania son verdes y cuenta con alrededor de diez mil hectáreas de azoteas naturalizadas (Köhler, 2008). Muchos países, incluyendo Alemania, Suiza, Holanda, Hungría, Suecia y el Reino Unido, tienen asociaciones que fomentan los techos verdes. En Suiza hay una ley federal sobre techos verdes. Gran Bretaña comenzó lentamente pero las políticas sobre este tema han cobrado gran vigor, especialmente en Londres y Sheffield (Insuasti y Padilla, 2015). En Francia existe un formidable techo verde de 8.000 m² que ha sido incorporado dentro del nuevo museo L'Historial de la Vendée que se inauguró en junio de 2006 en Les Lucs-sur-Boulogne. El francés y botánico Patrick Blanc ha desarrollado un estilo que denomina “Muro Vegetal”, con el que logra que una densa capa de vegetación crezca en cualquier superficie, incluso en el aire. Sus trabajos se pueden disfrutar en Francia, India o España, en los que se destacan: el Jardín vertical du Quai Branly Musée, en París (Figura 6, izquierda y centro), el cual constituye una de las obras más famosas de Patrick Blanc y una atracción turística de fama mundial (Gandy, 2010), el Puente de Max Juvenal, en París, el centro comercial Siam Paragon, de Bangkok, el Hotel Athenaeum en Londres (Figura 6, derecha) o el jardín tropical de la Cité de l'espace en Toulouse o el tapiz verde de la Universidad Politécnica de Hong Kong, entre otros.

Figura 6. (Izquierda y centro) Jardines verticales en Quai Branly Musée, París y (Derecha) Hotel Athenaeum, Londres.

En 1999, en México se inició el proyecto de Azoteas Verdes en el Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), mediante un convenio con la Comisión de Recursos Naturales del Gobierno de la Ciudad de México como medida urgente para mitigar los altos índices de contaminación atmosférica en la Ciudad de México. En ese sentido, el Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores de ese país construyó la azotea verde más grande de Latinoamérica, con el fin de fomentar la conciencia ecológica de sus trabajadores (Valdés, 2008).

Actualmente en varios países europeos, el establecimiento de zonas naturalizadas en los techos de las construcciones se ha perfeccionado de forma impresionante. En ese sentido, el edificio Fargas y Tous característico por su sistema de jardines colgantes, construido en el 1978 en Barcelona (Figura 7). Puppy, es una escultura del arquitecto norteamericano Jeff Koons, instalada en el acceso al Museo Guggenheim de Bilbao (España), desde 1997. Un Terrier de doce metros y medio de altura, armado en acero y revestido de arcilla y flores, que se soporta sobre una estructura metálica de cuatro pisos, con un sistema de irrigación interna (Figura 7) (Insuasti y Padilla, 2015).

Figura 7. (Izquierda) Edificio Fargas y Tous, Barcelona y (Derecha) Puppy en Museo Guggenheim de Bilbao (España).

Figura 8. Patio Cordobés. Fuente: A. Masaguer

En España esta tendencia ha quedado expresada en algunos edificios de sus ciudades como modelo de ingeniería agronómica ornamental, tal es el caso de los tradicionales patios de Córdoba con más de 90 años de antigüedad (Figura 8) y que fueron declarados a finales del 2012 Patrimonio cultural inmaterial de la Unesco. Cada año en el mes de mayo se celebra el Festival de los patios Cordobeses. En Madrid, se conocen los jardines verticales del centro cultural Caixa Fórum (Urrestarazu y Burés, 2009) (Figura 9 izquierda), otro en el interior de uno de los pisos de la Torre de Cristal en el Paseo de la Castellana y en el Hotel Mercure-Santo Domingo (Figura 9, derecha).

Figura 9. Pared vegetada en Caixa Forum y Patio interior en Hotel Santo Domingo, Madrid.

1.1.2. La naturación urbana y sus beneficios

La calidad de vida de una zona urbana y de sus habitantes depende en gran parte del mantenimiento de los espacios verdes, por lo que es cada vez más necesario la disposición y creación de áreas destinadas a la vegetación en el entorno de convivencia (Briz, 2004). La utilización de la vegetación en la planificación urbana se ha convertido en un aspecto esencial, la mayoría de los ciudadanos anhela condiciones medioambientales satisfactorias, a ello se añade el interés de que la naturaleza recupere el espacio perdido en las grandes áreas urbanas, por lo que se incita a la búsqueda de nuevas formas que permitan la incorporación de la vegetación a la vida urbana (Briz, 2004). Estas medidas tienen muchas ventajas ecológicas, que van desde el aumento del aislamiento térmico del edificio y la reducción del efectos de las islas de calor urbanas (Barrio, 1998; Fioretti, *et al.*, 2010) hasta la amortiguación del agua de precipitación (Barrio, 1998; Metselaar, 2012). Al presente, el uso de sistemas de naturación en espacios urbanos ha dado grandes beneficios ambientales en grandes ciudades del mundo, esto se debe a que la presencia de vegetación en las urbes contribuye con la mitigación del impacto ambiental y con la interrupción de contaminantes generados de acciones antrópicas (Soto, 2011).

La **naturación urbana** promueve la incorporación de la vegetación en zonas urbanas motivada en respuesta hacia la pérdida de espacios verdes en las ciudades, siendo capaz de transformar los edificios y espacios urbanos (interurbanos y periurbanos), en biotopos, mejorando la calidad espacial y visual de la ciudad de sus poblaciones (Briz, 2004). Las áreas verdes urbanas representan un eslabón fundamental en la regulación del microclima urbano debido a que actúan como reguladores térmicos, disminuyen la contaminación acústica, contribuyen en el mejoramiento de la calidad del aire, en la disminución de la erosión del suelo, en el incremento de la biodiversidad, brindan hábitat y alimento a la fauna silvestre, y sirven como lugar para el asentamiento y descanso de muchas especies de aves migratorias (Soto, 2011). Se ha demostrado que trascienden en la mejora de la calidad de aire, en el aumento en la absorción de dióxido de carbono (Yang *et al.*, 2008) y contribuye en el aumento de la biodiversidad urbana, proporcionando un entorno visualmente agradable (Oberndorfer *et al.*, 2007).

Un estudio realizado por Currie y Bass (2008) en la universidad de Toronto demostró que los techos verdes también pueden reducir la pérdida de calor y reducir el consumo de energía en invierno, retienen las aguas atmosféricas, contribuyen a la evapotranspiración, constituyen un filtro contra la contaminación y representan un excelente regulador del intercambio de aire, calor y humedad con el entorno urbano (Lundholm *et al.*, 2010; Wolf y Lundholm, 2008). También, estudios anteriores señalan que estos sistemas de naturación no sólo mitigan la huella ecológica de los edificios, sino también mejoran el aspecto de las ciudades (Wong *et al.*, 2010). En Italia se ha demostrado que los edificios donde aplicaron estas técnicas han permitido un ahorro de energía hasta en un 25% (Lazzarin *et al.*, 2005).

1.1.3. Clasificación de los sistemas de naturación

Los sistemas de naturación se clasifican en **naturación extensiva** si el objetivo es crear una lámina vegetal bien adaptada y que tenga mínimos cuidados y mantenimiento (Jim y Peng, 2012; Kotsiris *et al.*, 2012; Nardini *et al.*, 2012; Tabares-Velasco *et al.*, 2012) y **naturación intensiva**, si se crean verdaderos jardines con árboles, senderos e incluso estanques (Schreiter, 2011). Ambos se distinguen a través de una serie de características, tales como: requisitos de mantenimiento, tipo de vegetación, grosor del medio de crecimiento, requerimiento del soporte estructural, etc.

Cuando se trata de tratamiento técnico con vegetación especialmente adaptada de superficies edificadas horizontales, verticales o inclinadas, individuales o agrupadas, con una proximidad entre si de por lo menos 0,5 ha de extensión se denomina naturación de grandes áreas edificadas. La finalidad radica en crear áreas naturalizadas de cierta extensión en núcleos urbanos densamente edificados y unirlos mediante corredores verdes a las áreas urbanas con vegetación natural (Rudolf y Mahlau, 1995).

La **naturación extensiva (NE)** utiliza un sustrato sencillo en la que se colocan plantas adaptadas a condiciones extremas, y no se usa el riego, ni cuidados manuales o mecánicos, siendo los techos extensivos los más comunes (Getter *et al.*, 2009). Por su parte la **naturación extensiva** trata de utilizar especies vegetales bien adaptadas al área a naturalizar y autóctonas. Estas especies necesitan menor profundidad de sustrato para su desarrollo y mínimos cuidados (Metselaar, 2012). La profundidad del sustrato estará entre 8 y 12 cm, con sistemas de protección de cubierta más simples (Neila *et al.*, 2008; Ruiz-Caballero, 1999). En cambio, la **naturación intensiva (NI)** consiste en verdaderos jardines que pueden disponer de todo tipo de plantas, arbustos e incluso árboles de gran tamaño con fines estéticos y recreativos. La NI es un sistema de enverdecimiento más complejo que requiere de una protección resistente de la superficie a naturalizar. Además, la edificación deberá estar preparada para aguantar el sobrepeso. Por otra parte, la vegetación necesitará de una capa profunda de sustrato vegetal, de al menos 20 cm, que le permita desarrollarse y deberán proyectarse cuidados y mantenimiento de estos espacios y jardines.

1.1.4. Aplicación de la naturación en los espacios urbanos

El término “naturación” contempla un extenso escenario de posibilidades, debido a que implementa la vegetación en zonas interurbanas como también en áreas periurbanas (Briz, 2004). Rudolf (1992) definió la naturación como el tratamiento técnico de superficies horizontales, verticales o inclinadas, a diferentes precios, con vegetación especialmente adaptada (Neila *et al.*, 1999; Urbano y Briz, 2004), para formar una capa multifuncional sobre dichas superficies. El objetivo es crear áreas naturadas de cierta extensión conectadas por cinturones y anillos verdes (De Felipe y Briz, 1998; Rudolf *et al.*, 1995; Rudolf y Rudolf, 1995) mediante i) la transformación de una parte del área urbana en bosques y plantas que sirvan de pulmón ecológico y

recreo para los habitantes, y ii) uniendo las áreas mediante corredores verdes y pasillos ecológicos, a cualquier altura, que permitan la renovación del aire. Algunos ejemplos destacan:

a) Naturación de calles, plazas y espacios abiertos. La naturación de terraplenes de carreteras, autopistas o vías con vegetación variada a los lados de las vías de circulación, con lo que se logra por una parte una menor erosión de estas superficies y por otra amortiguar los ruidos producidos por el tráfico (Yang *et al.*, 2012). Acoge parques, jardines, glorietas, terrazas públicas, refugios, contenedores, jardineras, campos deportivos, zonas verdes varias, y cualquier zona en la calle que haya sido objeto de un proceso de ajardinamiento (Briz y De Felipe, 2004).

b) Naturación de carreteras, vías férreas y de circulación en general. La naturación de vías de tren y tranvía utiliza el espacio entre los rieles de los tranvías como soporte de vegetación. Constituye una faceta de fuerte impulso, llevada a cabo por razones estéticas y sobretudo medioambientales. Este término designa el tratamiento vegetativo de instalaciones ferroviarias mediante el uso de plantas adaptadas a las condiciones locales, de acuerdo con las necesidades técnicas de la circulación (Merino, 2005). La vegetación será de bajo porte. La base de la vía debe impermeabilizarse con antirraíces para que no se interfieran los rieles (Schreiter, 2010). Además, es importante prever una evacuación del excedente de agua para evitar la corrosión eléctrica (Siemens *et al.*, 1999; Gorbachevskaya *et al.*, 2009). Las primeras experiencias europeas con este tipo de naturación se realizaron en Berlín durante los años 20's del siglo pasado, utilizando césped (Merino, 2005).

c) Naturación de áreas edificadas. Permite el establecimiento de vegetación en casas y edificios, ya sea en superficies verticales, horizontales o inclinadas (azoteas, paredes internas y externas, fachadas, balcones y patios exteriores e interiores) con el fin de compensar la pérdida de vegetación (Merino, 2005).

c.1) Naturación de edificios en horizontalidad: cubiertas ajardinadas (azoteas y tejados). La naturación de azoteas y tejados consiste en el enverdecimiento de las cubiertas de los edificios, ya sean superficies planas o tejados con cierta inclinación, que permiten realizar obras de gran tamaño a bajo costo en las ciudades (Rudolf y Rudolf, 1995; Urbano-López, 1999). Techos verdes, es el concepto más conocido, también se

les conoce como *azotea verde* o *cubierta vegetal* constituye un tipo de cubierta plana dispuesta en los techos de las edificaciones, ya sea en suelo o en un medio de cultivo apropiado, parcial o totalmente revestido de vegetación (Chanampa *et al.*, 2011; Neila *et al.*, 2008). Algunas variaciones son la azotea aljibe que recoge el agua de lluvia en una cámara que utilizarán las plantas por capilaridad, siendo idóneo en zonas secas (Ruiz-Caballero, 1999; Rivela, *et al.*, 2013), o el aljibe pre-vegetado modular que consiste en cajones cubiertos por láminas de tepe (Neila *et al.*, 2008). Pueden llevarse a cabo a través de dos sistemas: *a) naturación directa*, en la cual, se aplica un impermeabilizante contra raíces, una membrana geotextil y una capa de sustrato, donde se puede plantar de manera directamente sobre la superficie y *b) naturación indirecta*, donde la plantación se realiza en macetas y requiere de un impermeabilizante (Mahlau *et al.*, 1995).

c.2) Naturación de edificios en verticalidad: *jardines verticales o muros verdes*.

La naturación vertical, de fachadas o paredes vivas, consiste en cubrir los edificios con plantas permanentes capaces de tapizar por su cuenta o mediante estructuras de apoyo (Gross, 2012). El establecimiento y uso de jardines verticales ha surgido en respuesta al desarrollo de la ecología, protección hacia el medioambiente y el “boom de nuevos sistemas de implementación del verde en la ciudad” promocionado por el paisajismo urbano. Las “paredes verdes” están constituidas por especies vegetales dispuestas en un arreglo vertical sobre estructuras pre-construidas de diversos materiales y su establecimiento puede ser en interior o exterior. Este concepto de naturalizar las edificaciones fue iniciado en los países escandinavos desde hace varios siglos, sin embargo, se ha popularizado en varios países de Europa, en el que se destaca Alemania. Esta práctica aplicada a cada uno de los ejemplos anteriores, se hace cada vez más común en sus dos niveles de ejecución: *extensiva o intensiva* (Getter y Rowe, 2006) (Figura 10).

Figura 10. (Izquierda) Cubierta ecológica extensiva en un tejado con pendiente. (Derecha) Naturación intensiva: pérgola ajardinada en Burgos, España.
Fuente:<http://jardineriaypaisajismo.blogspot.com.es/2010/10/las-normas-tecnologicas-de-jardineria-y.html>

Las fachadas deben estar en buen estado y ser capaces de soportar el peso aplicado verticalmente (Ottele *et al.*, 2011). Debe existir superficie suficiente junto a la fachada, que permita situar las plantas y los sistemas de anclaje (Hopkins y Goodwin, 2011), así como disponer de buen drenaje que evite la existencia de agua encharcada (Urrestarazu y Burés, 2012). Entre las soluciones utilizadas se encuentran las fachadas vegetales opacas en gaviones a partir de módulos, las fachadas de paneles vegetados desmontables en caja metálica, los paneles vegetados en celdas drenantes o las fachadas translúcidas, invernadero extraplano de vegetación intermedia y una protección exterior móvil (Alonso *et al.*, 2009, Alonso *et al.*, 2010; Olivieri *et al.*, 2010). Otra variante de fachada en vertical son los muros naturados, éstos cubren las paredes de vegetación protegiendo a los vecinos de los ruidos molestos en los costados de las vías y carreteras de tráfico intenso, consiguiendo así un aislamiento más eficaz y una imagen más agradable a la vista (Castañeda-Nolasco y Vecchia, 2007; Yang *et al.*, 2012). Las plantas pueden ir enraizadas o aisladas del suelo, sobre estructuras de madera, metal, materiales sintéticos reciclados u hormigón (Kappis *et al.*, 2010a). Los céspedes enrejados son estructuras de hormigón, material sintético en donde las plantas crecen en los orificios del enrejado. Este sistema es empleado para naturar caminos de acceso a edificaciones, aparcamientos poco concurridos o consolidar levantes con arrastres pluviales (Kappis, 2010b).

1.1.5. Componentes integrales en las cubiertas vegetales

Los sistemas de naturación se componen de capas que protegen la edificación y capas para el soporte de la vegetación (Dunnett y Kingsbury, 2004). La caracterización de cada una de las capas que forman una cubierta vegetal no varía sustancialmente con respecto de los sistemas de cubiertas no vegetales, a excepción de que éstos utilizan una membrana impermeabilizante, la cual debe resistir la penetración de raíces y a la inclusión de las capas de sustrato y vegetación. Los elementos considerados para integrar una cubierta vegetal se observan en la Figura 11.

Figura 11. Elementos integrantes de las cubiertas vegetales ajardinadas intensivas.

Fuente: <http://dcgreenworks.org/resources/about-rainwater-conservation-reuse/>

❖ **Soporte base:** es la capa de la cubierta sobre la cual se coloca la impermeabilización. La capa de pendientes o soporte base está en contacto con la cubierta original del edificio, permite corregir los desniveles o imperfecciones que pueda tener la superficie original y formar la pendiente deseada para el drenaje del agua del sistema de naturación. El material empleado puede ser mortero, hormigón ligero acabado con capa de mortero o placas aislantes térmicas (Weiler y Scholz-Barth, 2009).

❖ **Membrana impermeable:** este sistema es extremadamente importante porque es el responsable de mantener la edificación seca y libre de humedad, uno de los principales factores que se debe tomar en cuenta a la hora de diseñar una fachada

vegetal (Bliss, 2007). Esta membrana evita el riesgo de infiltración, además de proteger la superficie y prolongar su duración (VanWoert *et al.*, 2005).

❖ **Capa de aislamiento:** tiene por objeto limitar los intercambios térmicos y/o acústicos entre el exterior y el interior.

❖ **Capa de drenaje:** que es el elemento cuya función será evacuar el agua sobrante del sustrato vegetal. Dicha capa puede estar formada por una capa drenante de áridos de canto rodado con un diámetro de 10 mm sin materias extrañas y con una profundidad de 20 cm, láminas sintéticas rígidas preformadas con protuberancias en al menos una de sus caras, con un fieltro filtrante pegado a las protuberancias, hilos sintéticos ensortijados, acabado por ambas caras con un fieltro filtrante o losas preformadas con una capa de hormigón poroso y una base aislante (Neila *et al.*, 2008).

❖ **Capa protectora:** es una membrana geotextil instalada directamente bajo la membrana impermeable. Protege la superficie estructural de la fachada, en particular de los daños ocasionados durante la instalación del sistema (Bliss, 2007).

❖ **Protección contra raíces:** es una lámina impermeabilizante anti-raíces que sirve para proporcionar estanqueidad a la cubierta, hace la función de una barrera física o química que previene que las raíces de las plantas traspasen la impermeabilización. Suele ser una capa geotextil que se instala bajo la membrana de drenaje, la cual protege la superficie estructural evitando la penetración de raíces.

❖ **Capa filtrante:** debe ser un material liviano a prueba de putrefacción puesto sobre o incluido como parte de una capa de drenaje para mantener el medio de crecimiento en su lugar y asimismo prevenir que las partículas finas bloqueen el sistema de drenaje. Debe ser resistente a la perforación de raíces y a microorganismos. En los sistemas modulares, el hormigón aligerado actúa como drenante (Alonso *et al.*, 2009). La capa separadora filtrante se emplea para evitar que los sedimentos del sustrato puedan colmar la capa de drenaje reduciendo su capacidad. La capa separadora es un fieltro sintético con una gran permeabilidad perpendicular al plano.

❖ **Medio de crecimiento (sustrato):** el sustrato es el soporte sólido, inerte o no, distinto del suelo natural, orgánico o inorgánico, para el desarrollo y crecimiento de las especies vegetales. Es una combinación de material orgánico e inorgánico que proporciona el medio para el crecimiento de plantas, drena el agua del techo y preserva el crecimiento de plantas. Desempeña la función de soporte físico de la vegetación, permite el desarrollo radicular donde las raíces absorben agua, aire y nutrientes en determinadas condiciones, amplían su espacio y colonizan la capa drenante.

❖ **Capa de vegetación (plantas):** Es capa donde se desarrolla la vida vegetal. La elección de éstas va a depender principalmente del clima al cual serán expuestas. Los sistemas de cubierta vegetal extensivos se basan principalmente en plantas perennes y su elección requiere un análisis cuidadoso, con éstas variedades hay menos margen de error de diseño debido a que soportan condiciones climáticas extremas. En cubiertas intensivas se pueden usar una amplia gama de plantas, su elección estará limitado por el clima, su disponibilidad y requerimientos de mantenimiento.

1.1.6. Normas tecnológicas de jardinería y paisajismo (NTJ's)

En el año 1999, el Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Agrícolas y Peritos Técnicos de Cataluña (COITAC) publicó las Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo (NTJ's) aplicado a *Cubiertas Ecológicas Extensivas* (NTJ-11E) y en el año 2000 correspondiente a *Cubiertas Ajardinadas Intensivas* en ajardinamientos especiales (NTJ-11I). Estas normas son aplicables a proyectos, construcción y operaciones de mantenimiento de las cubiertas ajardinadas, tanto extensivas como intensivas, respectivamente. En naturación urbana estas cubiertas, tanto intensivas como extensivas pueden incorporarse en: a) azoteas y tejados planos de viviendas y de edificios, b) cubiertas de garajes subterráneos y construcciones afines, c) cubiertas sobre losas en obras lineales y d) cubiertas de integración con el paisaje circundante para reducir el impacto de zonas naturales. La NTJ-11E-1999 define una **cubierta ajardinada extensiva** (o cubierta vegetal extensiva) como un tipo de cubierta de edificios y construcciones afines con acabado vegetal de tratamiento extensivo y con unos requerimientos de mantenimiento muy bajos o nulos una vez consolidada la vegetación.

Las plantas se cultivan sobre una capa de sustrato de hasta 15 cm de espesor y en general las plantas no llegan a superar los 50 cm de altura. El peso de la capa de sustrato y capa de vegetación generalmente es inferior a 120 kg m^{-2} .

La **cubierta ajardinada intensiva**, la describe como un tipo de cubierta de edificios y construcciones afines con acabado vegetal de tratamiento intensivo o semi-intensivo y con unos requerimientos de mantenimiento normales. Las plantas se cultivan sobre una capa de sustrato mínima de 15 cm de espesor y el peso de las capas del sustrato y de vegetación es superior a los 120 kg m^{-2} (COITAC, 2000). Para definir el tipo de cubierta vegetal a instalar en una edificación, deben tomarse en cuenta las características generales de cada tipo de cubierta y sus diferencias, así como también, la utilización futura de la cubierta vegetal y las características generales de la edificación. También, este grupo técnico sugiere que se disponga de informaciones previas a la instalación de las cubiertas vegetales de carácter arquitectónico (elementos constructivos y planos), botánico (características de las especies, eco-fisiología, climático (microclima del lugar), medioambiental (contaminación urbana, emisiones de gases, etc.), sobre las instalaciones (abastecimiento de agua de riego) y el uso del jardín (privado, público, acceso peatonal, vehicular y personas con limitaciones), elementos estructurales de la planta y coordenadas geográficas de la edificación.

1.1.6.1 Cubiertas ajardinadas intensivas: NTJ-11I

Según la Comisión de las Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo (NTJ's, 2000), las cubiertas ecológicas extensivas dan respuestas a los espacios verdes ubicados sobre construcciones con requerimientos de mantenimiento similares a los espacios verdes implantados sobre el suelo. Los objetivos técnicos son reducir el consumo de energía de calefacción y refrigeración, formar una capa termoaislante adicional, atenuar los ciclos de helada-deshielo, incrementar la biodiversidad tanto vegetal como animal y el embellecimiento paisajístico de las cubiertas de las edificaciones. La naturación intensiva es un sistema de enverdecimiento más complicado debido a que requiere de una protección resistente de la superficie a naturalizar. Además, la edificación deberá estar preparada para soportar el sobrepeso. Por otra parte, la vegetación necesita de una capa profunda de sustrato vegetal ($> 20 \text{ cm}$), que permita desarrollarse (Urbano-López, 2013).

1.1.6.2 Cubiertas ecológicas extensivas: NTJ-11E

Las cubiertas ecológicas extensivas dan respuestas a los espacios verdes ubicados sobre construcciones con requerimientos de mantenimiento mínimo y con un carácter ecológico y sostenible. Se utilizan especies vegetales adaptadas al área a naturalizar. Las plantas necesitan menor profundidad para su desarrollo y mínimos cuidados (Metselaar, 2012) y la profundidad del sustrato entre 8 y 12 cm (Neila *et al.*, 2008; Ruiz-Caballero, 1999).

1.2. CULTIVO SIN SUELO: SUSTRATOS DE CULTIVO

El término “*cultivo sin suelo*” involucra **cualquier sistema de cultivo que no emplea el suelo para el desarrollo vegetal** (Baixauli y Aguilar, 2002) e incluye tanto a los cultivos cuyo desarrollo ocurre en un medio sólido poroso y distinto del suelo, como en aquellos donde las raíces se desarrollan directamente en soluciones nutritivas (Abad, Cánovas, y Díaz, 1993). Se clasifica en: a) *sistema hidropónico*, donde las raíces se desarrollan en un espacio confinado sólo con la aportación de agua y nutrientes o bien en materiales inertes y b) *sistemas de cultivos con sustratos*, donde las raíces se desarrollan sobre materiales químicamente activos (Abad, Noguera, y Burés, 2001). Terés, (2001), Abad *et al.* (2004) y Abad *et al.* (2005) definen un sustrato como un “*medio material sólido distinto del suelo in situ, natural o de síntesis, mineral u orgánico, que, colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radicular, desempeñando un papel de soporte para la planta e interviniendo activamente o no en el proceso de la nutrición*”. Los sustratos de cultivos tienen su origen en el cultivo en un espacio confinado o “*contenedor*” con volumen limitado, acompañados por fertilización y riegos intensificados. Este sistema de cultivo aplica técnicas de producción comercial de plantas y cosechas (Cánovas, 1993), entre las que se destacan el cultivo en sustrato de plantas ornamentales y el cultivo de hortalizas.

Terés (2001) destaca que desde el punto de vista de la horticultura, la finalidad de un sustrato de cultivo es producir una planta con cosecha abundante y de calidad y en un período de tiempo lo más corto posible y con los menores costes de producción (Abad *et al.*, 1993).

Los sustratos de cultivo por lo general son elaborados con materiales porosos, donde suele desarrollarse un sistema radicular que toma el agua, el oxígeno y los nutrientes necesarios para su desarrollo. De acuerdo a su composición, el sustrato puede intervenir o no en el proceso nutricional, clasificándose como *químicamente activos* o *químicamente inertes* (Abad *et al.*, 2004; Cadahia, 2005). Los sustratos inertes actúan como soporte de la planta y no interviene en el proceso de adsorción y fijación de nutrientes (Abad y Noguera, 2005).

2.1.1. Antecedentes, evolución y situación actual de los sustratos de cultivos

La utilización de los sustratos tiene sus inicios con los cultivos en macetas. Esta práctica surge con la necesidad de transportar plantas ornamentales. Los egipcios, ya hace cuatro mil años, cultivaban árboles en contenedores de madera o piedra conservando este legado en murales (Burés, 1999). Los primeros trabajos de investigación relacionados a los cultivos sin suelo surgen con la hidroponía cuando en 1666 el científico Robert Boyle publica su primer experimento de cultivo en agua y cuando en 1699, el inglés Woodward fue el primero que hizo crecer plantas cultivadas en recipientes sobre un medio líquido y en el que añadió cantidades diferentes de suelo (Baixauli y Aguilar, 2002). Burés (1999) subraya algunas referencias que destacan que el uso de los sustratos en cultivos data desde el siglo XIX. En Inglaterra en 1839, Loudon utilizó distintos materiales orgánicos y en 1851, Boussingault utilizó como medio de cultivo arena, cuarzo y carbón vegetal junto con una solución de composición conocida. Mientras que en Francia, en 1892 se realizaron experimentos de nutrición con azaleas en turba, mantillo de hojas y acículas de pino. En esta época en Alemania se habían realizado algunos ensayos de nutrición en turba. En la década de los años 20-30 del siglo XX, en Estados Unidos (Ohio) Laurie publicó la utilización de turba y arena. Durante estas dos décadas en California se desarrollaron ensayos de cultivos en agua sola, en arena y en grava. Entre 1934 y 1939 en Inglaterra, Lawrence y Newell introdujeron un sustrato el cual denominaron compost *John Innes* que consistían en mezclas de suelo franco-arcilloso, turba y arena. En 1940 Gericke publicó una guía para la jardinería sin suelo, destacando el método de cultivo hidropónico. En 1957, Matkin, Chandler y Baker, de la Universidad de California obtuvieron sustratos a base de turba y arena en distintas proporciones (Burés, 1999).

En Alemania, durante la década de los 60 se desarrolló el cultivo directo en turba, comercializándose una versión hortícola de este producto. En esta década en Europa empiezan a surgir materiales que podían ser utilizados como sustratos, utilizando la corteza de pino y otros materiales que podía fermentarse. En 1970, en Japón y algunos países de Europa, se produce el arranque definitivo de la producción comercial, de hortalizas y flores, en sustratos.

En 1972, Sheldrake y Boodley de la Universidad de Cornell configuraron una mezcla llamada “*Peat-lite*” compuesta a base de turba o corteza de pino, perlita o vermiculita (Burés, 1999).

En 1974, De Boodt, edafólogo de la Universidad de Gante (Bélgica), introdujo el concepto de “*sustrato ideal*” que marcó un hito importante en la historia de los sustratos. Para años anteriores al 1980, en España se recopilan algunas referencias sobre cultivo de hortalizas utilizando tierra volcánica. A principios de los 80 surgió la aplicación de nuevos materiales como la lana de roca, vermiculita, perlita, entre otros (Resh, 2002). Los sistemas de cultivo sin suelos más representativos en la década de los 90 fueron: cultivos de hortalizas en arena, perlita, tablas y tacos de lana de roca, corteza de pino, estériles del carbón, fibra de coco, tierra volcánica, entre otros (Abad *et al.*, 2001). Hoy, en el mundo, grandes extensiones son destinadas al cultivo sin suelo en distintas condiciones (bajo umbráculos e invernaderos) destinadas a la producción tanto hortícola como ornamental en los países del Centro y Norte de Europa. La evolución en el empleo de sustratos de cultivos, no solo se ha aplicado en los sectores hortícola y ornamental (en maceta y/o contenedor), sino también, han resultado básicos para el desarrollo de plantas en semilleros, actividades viverísticas, horticultura intensiva protegida, entre otros. Asimismo, existen otros usos para los que son igualmente importantes como son la jardinería y el paisajismo en la naturación urbana, tal como lo declara el Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo (BOE, 2010).

2.1.2. Sustratos y su aplicación como medio de cultivo

Un sustrato de cultivo debe estar constituido por un **material poroso** que permita el **desarrollo del sistema radicular de la planta y el acceso a la toma de agua, nutrientes y oxígeno** necesarios para su correcto funcionamiento (Terés, 2001).

En ese sentido, Teres (2001) señala que las características que debe reunir el sustrato a utilizar varían en función de las necesidades del material vegetal a utilizar (especie, variedad, si se trata de varias especies o de una sola, etc.), del objetivo del cultivo (multiplicación, producción de planta, producción de fruto, producción de flor, etc.), de los medios de control disponibles en la explotación (estructuras de protección del cultivo, sistemas de control de la solución nutritiva, sistemas de control de riego, etc.), de la incidencia de factores no controlados por el agricultor (factores climáticos, posibilidad de fallos en los sistemas de control, etc.). Contrario al cultivo en suelo, el cultivo en sustrato proporciona una mayor capacidad de control de los factores de producción relacionados con el sistema radicular de la planta, esto se debe a que se puede lograr la reducción de la capacidad tampón del medio, gracias a las características y al volumen reducido de los materiales empleados (Terés, 2001). Michelot (1999), constata que el soporte del cultivo (suelo o sustrato) debe cumplir cuatro funciones en la planta: a) que asegure el anclaje mecánico, b) que constituya una reserva hídrica que cubran las necesidades de agua, c) que las raíces son órganos aerobios, por lo tanto el sustrato debe proporcionar el oxígeno que necesitan para su correcto funcionamiento y d) que asegure su nutrición mineral. La variedad de materiales que pueden ser usados para la elaboración de sustratos (solos o mezclas) es muy amplia, los mismos se pueden clasificar, según su origen y proceso de manufacturación (Figura 12).

Figura 12. Representación esquemática de las diferentes fuentes de elaboración de sustratos. Fuente: Masaguer (2008).

Los **sustratos orgánicos**, y muy especialmente las turbas *Sphagnum* y la fibra de coco son componentes importantes y ampliamente utilizados en los medios de cultivo de las plantas que crecen en contenedor (Terés, 2001). También, son utilizados restos vegetales como: orujo de uva, corteza de árboles, acículas de pino, cascarilla de arroz, serrín, restos de cosechas, residuos sólidos, urbanos, lodos de depuración de aguas residuales, residuos de podas urbanas, sarmientos de vid, entre otros (Stephenson *et al.*, 2013; FAO, 2012; Kotsiris *et al.*, 2012) tras un adecuado compostaje y manejo de los residuos y subproductos orgánicos. Los **sustratos inorgánicos** pueden ser de origen natural sin manufacturación y de origen natural con manufacturación previa. Dentro de los sustratos inorgánicos de origen natural, y que no sufren proceso alguno previo a su uso, se incluyen a las gravas, las arenas de distintas granulometrías y las tierras de origen volcánico. Como sustratos inorgánicos de origen natural, pero con procesos de manufacturación incorporados antes de su uso (normalmente tratamientos con calor), se incluyen la lana de roca, la vermiculita, la perlita y la arcilla expandida. En ese sentido, se incluyen el poliestireno expandido, geotextiles y espuma de poliuretano (López-López, 2015).

2.1.3. Principales sustratos empleados como medio de cultivo

El número de materiales que pueden ser utilizados como sustratos es muy amplio y con frecuencia se recurre a la utilización de mezclas de distintos materiales para obtener características apropiadas o deseadas. En España, se desarrolló un proyecto donde se elaboró un inventario de materiales que pueden tener una aplicación como sustratos o componentes de sustratos de cultivo para la producción de plantas ornamentales en contenedor con el fin de encontrar nuevos usos a materiales considerados como subproductos (Burés, 1999). En la Tabla 1 se destaca una lista de subproductos potenciales para la elaboración de sustratos según su origen.

Tabla 1. Subproductos potenciales para la elaboración de sustratos según su origen.

Origen	Subproductos o residuos
Explotación forestal	Mantillo vegetal o tierra de bosque, tierra de castaño, hojas, acículas, corteza, serrín o virutas de madera, corcho, piñas y cáscara de piñones.
Explotación agrícola	Paja de cereales, compost de champiñones, restos de poda, restos de tallos de tabaco, restos de caña de azúcar.
Explotación ganadera	Estiércol, gallinaza, pieles y lanas, aves y peces muertos
Actividad industrial	Algodón, lino y fibras acrílicas, escorias de altos hornos, escorias de carbón, lodos de papel.
Actividad agroalimentaria	Orujos de uva y aceituna, lúpulo y malta, hojas de té, marros de café, cascarilla de arroz, carbonos activos y tierras de filtrado colmatados, restos vegetales, cáscara de frutos secos, vainas de algarrobo.
Núcleos urbanos	Basura urbana, lodos de depuradoras de aguas residuales, restos vegetales de jardinería urbana.
Yacimientos naturales, explotación minera y construcción	Tierra, Arena, Sablón, Granito, estériles de carbón, vermiculita exfoliada, arcilla expandida, arcilla calcinada, fibra de vidrio, puzolana volcánica, piedra pómez.
Plantas cultivadas	Kenaf, álamo, cardos.
Explotaciones marinas	Algas y plantas marinas.
Polícarbonos de síntesis	Poliestireno expandido, poliuretanos.

Fuente: Burés, 1997.

Algunos de los **sustratos más utilizados** en la actualidad son:

➤ **Turba.** Es el componente más utilizado en la formulación de medios de cultivo. Solamente en el año 2009 en España se consumieron 224.623,8 toneladas de turba, de las cuales 169.537,5 toneladas fueron importadas, en su mayor parte de Alemania, pero también de Estonia, Letonia, Países Bajos y Lituania (Marchan *et al.*, 2010). Actualmente, existe una tendencia creciente a la búsqueda de materiales que puedan sustituirla, por el alto coste de la turba de calidad, y sobre todo por la actual consideración medioambiental de las turberas a nivel europeo. Los histosoles o turberas consisten en acumulación de materia orgánica; este tipo de suelo se desarrolla desde abajo hacia arriba a medida que la masa vegetal muerta se deposita sobre sí misma (Burés, 1999). Se clasifican en dos grupos: turbas rubias (*Sphagnum*) y negras, las primeras tienen un mayor contenido en materia orgánica y están menos descompuestas y las segundas están más mineralizadas y con menor contenido en materia orgánica.

➤ **Lana de roca.** Se obtiene por la fundición de un 60% de diabasa, 20% de piedra caliza y 20% de carbón de coque, que se introduce en un horno a una temperatura de 1.600° C. La masa fundida pasa por unas ruedas giratorias, de donde sale en forma de

fibras de aproximadamente 0,005 mm de grosor. Su origen es Dinamarca y posteriormente se desplazó a los Países Bajos. En España y Europa es el segundo de los materiales más empleado como sustrato debido a su gran capacidad de retención de agua libre (< 95%).

➤ **Perlita.** Es un material inerte y con capacidad de cambio casi nula. Es otro sustrato muy empleado en horticultura y floricultura, bien solo o, más corrientemente, mezclado en semilleros y plantas de maceta. Para su fabricación se parte de rocas volcánicas de naturaleza silícea, formadas por silicatos de aluminio y hierro con altas proporciones de potasio y sodio. Este mineral tiene entre 2-5% de agua y, una vez triturado a la granulometría deseada, se calienta hasta 900-1000°C donde se produce una evaporación brusca del agua constituida.

➤ **Corteza de pino compostada.** Es ampliamente utilizado para la elaboración de sustratos orgánicos (Burés, 1999). Es un subproducto de la industria maderera, mundialmente utilizado y ha constituido durante los últimos años el sustrato por excelencia en numerosos países con limitada disponibilidad de turba. Entre los más comunes pueden citarse el serrín, la viruta y principalmente, la corteza de árboles (Urrestarazu *et al.*, 2004). Sin embargo, Abad *et al.*, (1997); Burés (1999); Zapata *et al.* (2005) coinciden en que este material por sí solo no reúne todas las condiciones necesarias para el crecimiento vegetal, y sugieren que es indispensable usarlo en mezcla con otros componentes (orgánicos o inorgánicos), entre los cuales sugieren compost de residuos urbanos, compost de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales y otros residuos que tengan disponibilidad en el área a implementar.

➤ **Restos vegetales urbanos.** Entre los residuos que se generan en los núcleos urbanos, de especial consideración son los procedentes del cuidado de la vegetación de los jardines, comprendiendo restos de poda, hojas, restos de la siega del césped, etc. Estos materiales suelen compostarse, solos o mezclados con lodos de depuradoras urbanas, para ser utilizados como sustrato de cultivo o abono orgánico (Burés, 1999).

➤ **Fibra de coco.** Es un material vegetal obtenido de los desechos producidos en la industria del coco, tras la extracción de las fibras más alargadas del mesocarpo. La cáscara es molida y la fibra larga se utiliza en paneles aislantes, mallas, cordelería u otros; la paja sobrante es la utilizada como sustrato. Es un material ligero y con

porosidad total muy elevada, por encima del 93%. Presenta cantidades aceptables de agua fácilmente disponible y bien aireado; se contrae poco cuando se deja secar (Abad y Noguera, 2005).

➤ **Otros sustratos.** Menos extendido se encuentran otros sustratos, que son utilizados en aquellos casos de una disponibilidad local, como la arcilla expandida, la vermiculita, piedras volcánicas, grava, espumas sintéticas, cascarilla de arroz, etc.

2.1.4. Criterios de selección de un “buen sustrato”

El propósito de cualquier medio de cultivo es producir plantas de calidad en el período de tiempo más corto y con bajos costes de producción (Abad *et al.* 1993). La amplia gama de materiales a utilizarse para el empleo de sustratos llevó a los pioneros a definir el sustrato “ideal”, concibiendo como tal a un sustrato adecuado para el cultivo de cualquier planta (Terés, 2001). Sin embargo, Hartman y Keste (1974) y Michelot (1999) señalan que para obtener buenos resultados en la plantación de interés, el sustrato debe cumplir con ciertas características, las cuales deben garantizar su aptitud para la germinación, enraizamiento y el desarrollo de plantas (Abad y Carrión, 2004; López-Cuadrado *et al.*, 2006). La elección de un material para la elaboración de un sustrato (solo o mezclado) estará determinada si se cumplen los siguientes criterios (Abad y Noguera, 2005; Terés, 2001):

- **Suministro y homogeneidad.** Cada sustrato requiere su propio plan de riego y fertilización. Un cambio en la calidad del sustrato puede llegar a alterar el sistema completo, pudiendo provocar pérdidas graves de producción. El material elegido debería reunir características como: disponibilidad elevada, suministro continuo y homogeneidad.

- **Finalidad de la producción.** Esta característica es un factor de gran importancia en la elección del sustrato, debido a que los objetivos del cultivo sin suelo, como técnica de producción comercial, pueden ser muchos y diversos: crecimiento rápido de plantas, plantas de muy buena calidad, con tamaño óptimo, con aspecto excelente y uniforme, que presenten pocos problemas en el trasplante o que permitan cuidados mínimos posteriores, entre otros.

- **Coste.** El coste de los materiales utilizados es importante debido a que constituye una parte importante del coste final del sustrato. El uso de materiales locales reduce este componente, debido a que reduce los costes de producción y transporte.
- **Propiedades.** Una vez decidida la finalidad de producción y se conocen los costes y la disponibilidad del material, se debe examinar con detalle las propiedades físico – químicas, químicas y biológicas del mismo.
- **Impacto ambiental.** Este puede deberse a su obtención (turba) o a la generación de un residuo difícil de reutilizarse (lana de roca).

2.1.5. Composición de los sustratos de cultivo

Un sustrato en contenedor debe concebirse como un sistema basado en tres fracciones con funciones propias e independientes: i) *fracción sólida*, asegura el mantenimiento mecánico radicular y la estabilidad de la planta; ii) *fracción líquida*, aporta a la planta el agua y por interacción con la fracción sólida aporta nutrientes necesarios para su crecimiento y desarrollo y iii) *fracción gaseosa*, asegura la transferencia de CO_2 y O_2 en el entorno radicular, el cual establece la aptitud y utilidad de los materiales utilizados como componentes de sustratos (Lemaire, 2005; Masaguer, 2008). Si las proporciones de estos componentes son inadecuadas se podrían generar problemas de asfixia radicular por la falta de oxígeno, deshidratación por falta de reserva hídrica, desequilibrio nutricional (Ansorena, 1994) (Figura 13).

Figura 13. Representación esquemática del fraccionamiento del volumen* (V) total de un sustrato. (Fuente: Masaguer, 2008).

El espacio poroso total (EPT) no solamente es generado por la colocación de las partículas, sino que también algunas partículas tienen poros internos, los cuales pueden estar conectados a la porosidad externa o estar cerrados. Estos últimos no son efectivos para almacenar aire o agua disponibles para la planta. Se recomienda que un sustrato tenga por encima del 85% de porosidad total efectiva. El grosor de los poros condiciona la aireación y retención de agua del sustrato. Poros gruesos suponen una menor relación superficie/ volumen, por lo que el equilibrio tensión superficial/ fuerzas gravitacionales se restablece cuando el poro queda solo parcialmente lleno de agua, formando una película de espesor determinado.

2.1.6. Propiedades de los sustratos empleados como medio de cultivo

La combinación de la estructura generada por las partículas de sustrato en el espacio y las características del material: naturaleza, composición elemental y estructura interna) definen las propiedades de un sustratos (Burés, 1997). Para definir el uso de un material como sustrato de cultivo es imprescindible la caracterización y el estudio crítico de sus propiedades físicas, hidrofísicas, químicas y biológicas (Terés, 2001).

2.1.6.1 Propiedades físicas e hidrofísicas

La caracterización física de los sustratos envuelve fundamentalmente el estudio de su granulometría, su densidad real y aparente y la porosidad o distribución de agua y aire en el espacio poroso. A esta propiedad se le suele dar mayor importancia, debido a que una vez seleccionado el sustrato para desarrollo vegetal, su modificación es prácticamente nula (Ansorena, 1994; Burés, 1999; Terés, 2001). Las propiedades físicas de un material candidato a sustrato están íntimamente ligadas al tipo de material que las compone. Antes de elegir un sustrato en concreto las propiedades físicas quedan concertadas, tomando en cuenta que durante el desarrollo vegetal suele haber degradación física de los componentes debido al crecimiento horizontal de las raíces, las cuales ocupan el espacio poroso.

❖ **Granulometría (distribución del tamaño de poro).** El espacio poroso de un sustrato lo constituyen los espacios huecos dejados por la fase sólida. El tamaño de los gránulos o fibras condiciona el comportamiento del sustrato, según aumenta el tamaño de los poros mayor será la granulometría. La distribución del tamaño de partícula y de los poros de los sustratos determina el balance entre el contenido de agua y el contenido del aire en cualquier nivel de humedad (Ansorena, 1994; Bunt, 1988; Handreck, 1992; Raviv, 1986). Por lo general, se expresa como un único parámetro: el *Índice de Grosor* (Abad *et al.*, 2004), este índice se define como el porcentaje acumulado (en peso o en volumen) de partículas con diámetro superior a 1mm, y suele estar correlacionado con las características hidrofísicas del sustrato.

❖ **Densidad.** Se puede referir bien a la densidad del material sólido que lo compone (densidad real), o bien a la densidad calculada considerando el espacio total ocupado por los componentes sólidos más el espacio poroso (densidad aparente). La densidad real (D_r) tiene un interés relativo, su valor varía según la materia de que se trate y suele oscilar entre 2,5-3,0 para la mayoría de los de origen mineral. Corresponde al peso del sustrato dividido por el volumen que realmente ocupa, es decir el volumen del sustrato sin tomar en cuenta el volumen de poros que existe dentro y entre las partículas del sustrato y entre el sustrato y las paredes del contenedor. Mientras que, la densidad aparente indica indirectamente la porosidad del sustrato y su facilidad de transporte y manejo. La densidad aparente (D_a) se encuentra inversamente relacionada con la porosidad de un material, a mayor densidad, menor espacio poroso y viceversa (Bunt, 1988) y se define como la masa de un sustrato entre su volumen ($D_a = m/v$).

❖ **Estructura.** Puede ser granular como la de la mayoría de los sustratos de origen mineral o del tipo fibrilar. La primera no tiene forma estable, acoplándose fácilmente a la forma del contenedor, mientras que la segunda dependerá de las características de las fibras. Si son fijadas por algún tipo de material de cementación, conservan formas rígidas y no se adaptan al recipiente pero tienen cierta facilidad de cambio de volumen y consistencia cuando pasan de secas a mojadas.

❖ **Porosidad total o Espacio Poroso Total (PT o EPT).** Es el volumen total (V_t) del medio no ocupado por las partículas sólidas, y por tanto, lo estará por aire o agua en una cierta proporción. La PT puede determinarse a través de su medida directa en el

contenedor, saturándolo con agua. El volumen de agua utilizado para saturarlo equivale a la porosidad total (Pt), mediante la fórmula: $Pt = (1 - D_a / D_r) * 100$. Donde, D_a corresponde a la densidad aparente y D_r a la densidad real. Su valor óptimo no debería ser inferior al 80-85%, aunque sustratos de menor porosidad pueden ser usados ventajosamente en determinadas condiciones. El equilibrio aire/agua se representa gráficamente mediante las curvas de humectación. Se parte de un volumen unitario saturado de agua y en el eje de ordenadas, se representa en porcentaje el volumen del material sólido más el volumen de porosidad útil. Se somete a presiones de succión creciente, se expresa en centímetros de columnas de agua (cm de columna de agua) ubicado en el eje de abscisas. A cada succión corresponderá una extracción de agua cuyo volumen es reemplazado por el equivalente de aire, de modo que a un valor de abscisas corresponde una ordenada de valor igual al volumen del material sólido más el volumen de aire. El volumen restante hasta el 100 % corresponde al agua retenida por el sustrato.

❖ **Propiedades Hidrofísicas.** Consecuencia de éstas y de las características superficiales de las partículas que compongan, el sustrato (rugosidad, afinidad o repulsión al agua), son las propiedades hidrofísicas, fundamentales a la hora de diseñar estrategias de riego en su aspecto estático: proporciones agua/aire correspondientes a cada valor de succión (curvas de liberación de agua) (Marfà *et al.*, 1999). Las principales propiedades hidrofísicas que se necesitan determinar en un sustrato para caracterizarlo son: capacidad de aireación, agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua difícilmente disponible. Estos parámetros se describen a continuación:

✓ **Capacidad de aireación (CA).** Se refiere al volumen de aire que queda en el volumen de sustrato después de que éste ha sido saturado y drenado (capacidad de contenedor). Esta porosidad proporciona inicialmente el oxígeno para la respiración de la planta y equivale al volumen de agua desplazado por una columna de agua de -10 cm de altura (1 kpa) en una caja de tensión. El volumen de aire se incrementa a medida que disminuye el volumen de agua.

✓ **Agua fácilmente disponible (AFD).** Corresponde al agua que se encuentra retenida en un sustrato entre las tensiones de -10 y -50 cm c.a. (1 y 5 kpa), es el agua que deben tomar las raíces, ya que se requiere menor energía para extraerla del sustrato.

✓ **Agua de reserva (AR).** Se refiere al agua que se encuentra entre -50 y -100 cm de tensión de columna de agua (5 y 10 kpa) succión. Esta agua aún está disponible para la planta, sin embargo las raíces necesitan mayor energía para extraerla del sustrato.

✓ **Agua difícilmente disponible (ADD).** Es el agua que se encuentra retenida en el sustrato a tensiones superiores a -100 cm de columna de agua (1m). La planta no la puede extraer del sustrato. Una vez que se han determinado las propiedades de liberación y retención de humedad se puede representar una curva como la que se muestra en la Figura 14.

Figura 14. Curva de liberación de agua de un sustrato. Fuente: De Boodt *et al.* (1974).

Según De Boodt *et al.* (1974), un buen sustrato debe tener buenas características de liberación de agua: 85% de porosidad total, 5% de espacio sólido, 20-30% de CA, 20-30% de AFD, 4-10% de AR. La curva de retención de humedad a tensiones bajas es la base principal para conocer el comportamiento físico de un sustrato, debido a que resume de forma experimental la disponibilidad de agua y aire para la planta a diferentes tensiones (López-Cuadrado *et al.*, 2006). En estas curvas se destaca la aireación como valor crítico, medida a una tensión de 10 cm de columna de agua, que corresponde al contenido máximo de agua que puede retener un sustrato a capacidad de contenedor.

2.1.6.2 Propiedades químicas

La reactividad química de un sustrato se define como la transferencia de materia entre el sustrato y la solución nutritiva que alimenta a las plantas a través de las raíces. Esta transferencia es recíproca entre sustrato y solución de nutrientes y puede ser debida a reacciones de distinta naturaleza:

a) Químicas. Se deben a la disolución e hidrólisis de los propios sustratos y pueden provocar: i) efectos fitotóxicos por liberación de iones H^+ y OH^- y ciertos iones metálicos, ii) efectos carenciales debido a la hidrólisis alcalina de algunos sustratos que provoca un aumento del pH y la precipitación del fósforo y algunos micro-elementos y iii) efectos osmóticos provocados por un exceso de sales solubles y el consiguiente descenso en la absorción de agua por la planta. Las principales propiedades químicas que se deben determinar en un sustrato son: pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad tampón, capacidad de intercambio catiónico (CIC), nutrientes disponibles en la solución, elementos pesados y compuestos fitotóxicos. El pH y la CE, los nutrientes disponibles en la solución y los metales pesados se pueden determinar en el extracto de saturación. El pH de un sustrato se prefiere que sea ligeramente ácido (5,5-6,5) y la CE que no sea mayor de $2,0 \text{ dS.m}^{-1}$. La capacidad de amortiguamiento de un sustrato se realiza a través de la curva de neutralización; si el sustrato presenta un pH muy ácido, se van adicionando volúmenes conocidos de una base diluida hasta alcanzar al pH deseado. Si el pH es alcalino se adicionan volúmenes conocidos de un ácido diluido.

b) Físico-químicas. Son reacciones de intercambio de iones. Se dan en sustratos con contenidos en materia orgánica o materiales de origen arcilloso (arcilla expandida), es decir, aquellos en los que hay cierta CIC. Estas reacciones provocan modificaciones en el pH y en la composición química de la solución nutritiva por lo que el control de la nutrición de la planta se dificulta. Se ha sugerido que una capacidad de intercambio catiónico es importante en los sustratos ($>20 \text{ cmoles}_+ \text{ kg}^{-1}$). Sin embargo, algunos productores prefieren utilizar sustratos inertes o muy poco activos.

c) Bioquímicas. Son reacciones que producen la biodegradación de los materiales que componen el sustrato. Se producen sobre todo en materiales de origen orgánico, destruyendo la estructura y variando sus propiedades físicas. Esta biodegradación libera CO_2 y otros elementos minerales por destrucción de la materia orgánica. Normalmente se prefieren sustratos inertes frente a los químicamente activos.

Los procesos químicos en ocasiones perjudican la estructura del sustrato, pudiendo cambiar sus propiedades físicas iniciales. La actividad química aporta a la solución nutritiva elementos adicionales por procesos de hidrólisis o solubilidad, cuando éstos son tóxicos, el sustrato debe descartarse, porque aunque sean elementos nutritivos útiles, en ocasiones entorpecen el equilibrio de la solución al superponer su incorporación un aporte extra que no garantiza la continuidad cuantitativa.

2.1.6.3 Propiedades biológicas

La **bioestabilidad** es la principal propiedad biológica y se refiere a la estabilidad de un sustrato orgánico frente a los organismos que lo pueden degradar (Lemaire, 1997). Esta propiedad nos permite saber si un sustrato orgánico permanece sin alterar o con poca alteración durante el ciclo de un cultivo. Para conocer si un material ha sufrido alteración biológica se cuantifica el contenido de materia orgánica inicial, después de un tiempo (varios meses) para así estimar el grado de degradación del material utilizado. El contenido de materia orgánica se determina por calcinación (Ansorena, 1994). Otra propiedad biológica importante es la sanidad del sustrato, esto es, si un sustrato es estéril o es necesario esterilizarlo. Algunos sustratos tienen patógenos para algunas especies de hortalizas. Cualquier actividad biológica en los sustratos es claramente perjudicial. Los microorganismos compiten con la raíz por oxígeno y nutrientes. La actividad biológica está restringida a los sustratos orgánicos y se deben evitar aquellos cuyo proceso degradativo sea demasiado rápido. Las propiedades biológicas de un sustrato se pueden concretar en: **i) Velocidad de descomposición.** Es función de la población microbiana y de las condiciones ambientales en las que se encuentre el sustrato. Esta puede provocar deficiencias de oxígeno y de nitrógeno, liberación de sustancias fitotóxicas y contracción del sustrato. La disponibilidad de compuestos biodegradables (carbohidratos, ácidos grasos y proteínas) determina la velocidad de descomposición. **ii) Efectos de los productos de descomposición.** Muchos de los efectos biológicos de los sustratos orgánicos se atribuyen a los ácidos húmicos y fúlvicos, productos finales de la degradación biológica de la lignina y la hemicelulosa. Muchas de funciones vegetales se ven afectadas por su acción. **iii) Actividad reguladora del crecimiento.** Es conocida la existencia de actividad auxínica en los extractos de muchos materiales orgánicos utilizados en los medios de cultivo.

II-OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

El **objetivo principal** de este trabajo consistió en: **estudiar y caracterizar sustratos orgánicos sostenibles como medios de cultivo potenciales para sistemas de naturación urbana**, además de **evaluar su comportamiento y evolución en ensayos de jardinería vertical y cubierta vegetal**.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

❖ Estudiar el **potencial de siete sustratos como medios de cultivos** para jardín vertical y cubierta vegetal, mediante la caracterización inicial de las propiedades físicas, químicas e hidrofísicas.

❖ Evaluar el **comportamiento y la evolución de cinco sustratos orgánicos** elaborados a partir de restos de poda compostada, corteza de pino compostada y fibra de coco ensayados en **un jardín vertical exterior**.

❖ Evaluar el **comportamiento y desarrollo de dos especies de plantas tapizantes: *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis*** establecidas en un jardín vertical exterior mediante la cuantificación de parámetros biométricos.

❖ Evaluar el **comportamiento y la evolución de cinco sustratos**: tres orgánicos elaborados a partir de subproductos compostados (restos de poda compostada, corteza de pino compostada y fibra de coco) y dos mixtos (con 30% de puzolana volcánica) en **una cubierta vegetal**.

❖ Evaluar el **comportamiento y desarrollo de cuatro especies de plantas: *Teucrium chamaedrys*, *Othonna cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula lycopodioides*** en **una cubierta vegetal** mediante la cuantificación de parámetros biométricos.

III-MATERIALES Y MÉTODOS

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO Y LOCALIDAD

Los ensayos se realizaron en las instalaciones de la Finca Experimental El Encín del Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA), ubicado en la Vega del Henares dentro de los límites del municipio Alcalá de Henares, Comunidad de Madrid y que limita con la provincia de Guadalajara, Comunidad de Castilla-La Mancha. Situado geográficamente entre las coordenadas 40° 31' 33" N y 3° 17' 22" W a una altitud de 610 msnm (Figura 15).

Figura 15. Fotografía satelital de la ubicación del jardín vertical en El Encín, IMIDRA, Madrid.
Fuente: Google earth, 2013.

De acuerdo a la **clasificación agroclimática** desarrollada por Papadakis, el clima predominante en la zona es **mediterráneo templado fresco**, con poca humedad ambiental, veranos muy calurosos e inviernos muy fríos. Según los datos agroclimáticos registrados en la Estación Meteorológica El Encín (No. 3170), esta localidad presenta una temperatura media anual de 14°C, donde las temperaturas medias anuales máximas y mínimas absolutas son de 39°C y -8°C, respectivamente. La temperatura más alta se alcanza durante los meses de julio y agosto con un valor medio de 24°C y la más baja en el mes de enero con temperatura media de -6°C. En cuanto a la pluviometría, la zona registra unos 433 mm de lluvia anual, siendo en julio y agosto cuando se registra la media más baja (14 mm) y durante los meses octubre, abril y mayo la media más alta (50 mm) (SIGA, 2013).

3.2. EVALUACIÓN DE SUSTRATOS ORGÁNICOS EN LABORATORIO

3.2.1. Caracterización de sustratos potenciales para sistemas de naturación urbana

En una primera etapa se estudió la potencialidad de sustratos como medio de cultivo para naturación urbana. Para ello se realizó una caracterización inicial en siete sustratos elaborados a partir de mezclas de subproductos de origen forestal, agrícola y urbano, concretamente: corteza de pino compostada (elaborada por Pons Agropecuaria), fibra de coco (formatos chips y polvo de coco, importados de Sri Lanka) y restos vegetales urbanos compostados (elaborados por la planta de Villanueva de la Cañada, Comunidad de Madrid), además de un componente mineral. Las mezclas se realizaron en proporciones 70%:30% y se utilizó un sustrato testigo de uso común en naturación urbana (Tabla 2).

Tabla 2. Composición volumétrica de sustratos ensayados en sistemas de naturación urbana.

#	Nomenclatura	Componentes	Descripción de las mezclas (% en volumen)
1	FC+PE (Testigo)	90% Sustrato de polvo de coco + 10% poliestireno expandido.	Se aprovechó la experiencia de la empresa Intemper en cuanto a la utilización de esta mezcla. Polvo de coco y poliestireno expandido fino, relación de 90/10% (volumen/volumen), respectivamente.
2	RVC+PV	70% Restos vegetales con lodo + 30% puzolana volcánica.	Se trata de un sustrato 100% reciclado con lodo de depuradora (70%) y un material mineral (30%) que asegure la estabilidad en el tiempo.
3	CPC+PV	70% Corteza de pino compostada + 30% puzolana volcánica.	Se trata de un material mineral (30%) que asegure la estabilidad en el tiempo y comparar su comportamiento frente a los restos vegetales con lodo (70%).
4	CPC+FC	70% Corteza de pino compostada + 30% fibra de coco.	Se utilizó 70% de corteza de pino de procedencia conocida y 30% de fibra de coco.
5	FC+CPC	70% Fibra de coco + 30% corteza de pino compostada.	Se utilizó 70% de fibra de coco y 30% de corteza de pino de procedencia conocida.
6	RVC+CPC	70% Restos vegetales con lodo + 30% corteza de pino compostada.	Sustrato 100% de reciclado con lodo de depuradora (70%) y se le añadió un material orgánico (30%) que no incrementara su densidad.
7	RVC+FC	70% Restos vegetales con lodo + 30% fibra de coco (tamaño chip).	Sustrato reciclado con 70% lodo de depuradora y se añadió un material orgánico (Chip de coco en 30%).

3.2.2. Determinaciones analíticas de los sustratos

Para la caracterización se determinaron las propiedades físicas, químicas e hidrofísicas con procedimientos analíticos en el laboratorio descritos en la Tabla 3. La metodología se realizó según la normativa Europea UNE-EN (AENOR 2000- 2008) (ver anexo 2) en las instalaciones del Departamento de Producción Agraria, Unidad de Edafología, (E.T.S.I. Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid).

Tabla 3. Determinaciones analíticas y referencias de normas europeas para la caracterización física y química de mejoradores de suelos y sustratos de cultivos.

Referencia	Determinación Analítica
UNE-EN 12579	Toma de muestras.
UNE-EN 12580	Determinación de cantidad.
UNE-EN 13037	Determinación del pH.
UNE-EN 13038	Determinación de la conductividad eléctrica (CE).
UNE-EN 13039	Determinación del contenido de materia orgánica y cenizas.
UNE-EN 13040	Preparación de la muestra para los ensayos físicos y químicos: Contenido de materia seca, humedad y densidad aparente compactada de laboratorio.
UNE-EN 13041	Determinación de las propiedades físicas: densidad aparente, volumen del aire, contracción y porosidad total.
UNE-EN 15428	Determinación de la granulometría de partículas
UNE-EN 13652	Extracción de nutrientes y elementos solubles en agua.
UNE-EN 13654	Determinación de nitrógeno. Método Kjeldahl modificado.

Fuente: UNE-EN (AENOR), 2000-2008. Ver anexo 1.

La caracterización física incluyó: 1) Granulometría, mediante el método propuesto por Martínez (1993), con tamices de 0,125; 0,25; 0,50; 1,0; 2,0 y 4,0 mm; 2) Índice de grosor (IG), como porcentaje en peso de partículas con diámetro mayor a 1 mm (Richards *et al.*, 1986); 3) Densidad aparente (D_a), por la Norma UNE-EN 13040:2000; 4) Densidad real (D_r) y espacio poroso total (EPT) (UNE-EN 13041:2000); 5) Capacidad de retención de agua (CRA), mediante el método descrito por Ansorena (1994); y 6) Curva de liberación de agua, por el método descrito por De Boodt *et al.* (1974) y las modificaciones de Martínez (1993) que incluyen capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR), agua total disponible (ATD) y agua difícilmente disponible (ADD).

3.3. EVALUACIÓN DE SUSTRATOS EN SISTEMAS DE NATURACIÓN URBANA: *IN SITU*

La potencialidad de un sustrato de cultivo para producir plantas en condiciones óptimas es el resultado de la interacción entre distintos tipos de factores y en consecuencia, su calidad sólo puede verse evaluada mediante la realización de ensayos con crecimiento de especies vegetales. Por lo que en una segunda etapa se instalaron dos ensayos empleando cinco sustratos orgánicos sostenibles: i) un ensayo establecido en un sistema de jardín vertical en una pared exterior y ii) otro ensayo establecido en un sistema de cubierta vegetal en condiciones de invernadero controlado.

3.3.1. Sustratos ensayados en un jardín vertical

Se estableció un ensayo en sistema de jardín vertical exterior utilizando cinco sustratos de las siete mezclas descritas en el apartado 3.2.1. El ensayo se inició a principios de abril del 2012.

3.3.1.1. Sustratos utilizados en un jardín vertical

Los materiales principales de los sustratos utilizados estaban combinados con corteza de pino compostada, fibra de coco y restos vegetales compostados. Los sustratos se describen en la Tabla 4.

Tabla 4. Sustratos ensayados en un sistema de jardín vertical.

Nomenclatura	Mezclas de Sustrato
FC+PE (Testigo)	Sustrato testigo en base de polvo de coco (90%) + poliestireno expandido (10%)
CPC+FC	Corteza de pino compostada (70%) + fibra de coco (30%)
FC+CPC	Fibra de coco (70%) + corteza de pino compostada (30%)
RVC+CPC	Restos vegetales con lodo (70%) + corteza de pino compostada (30%)
RVC+FC	Restos vegetales con lodo (70%) + fibra de coco (30%)

3.3.1.2. Sistema vegetal Intemper: Fachada Natura®

Los sustratos se dispusieron en un sistema vegetal tecnológico: *Naturpanel®*, de la empresa *Intemper Española S.L.* Las aplicaciones de este panel son utilizadas en el recubrimiento vegetal de fachadas, paredes y muros comerciales. Este sistema consiste en un panel rígido industrializado con una dimensión de 60 cm x 30 cm x 10 cm,

provistos de un depósito (aljibe) para el suministro de agua, ocho cuadrantes para la vegetación y una tubería de alimentación de agua en los laterales (Figura 16). Los sustratos se colocaron en sacos de fieltros alargados y cerrados. Se añadieron nueve litros de sustratos por saco y se dispusieron dos sacos por panel (Figura 17).

Figura 16. Panel Naturpanel® utilizado en la instalación del ensayo de jardín vertical (Fuente: Masaguer, 2013) y Fachada Naturpanel® Aljibe de Intemper.

Figura 17. Colocación de los sustratos en sacos y disposición en los paneles.

3.3.1.3. Vegetación utilizada en el ensayo del jardín vertical

Se emplearon dos especies de plantas con capacidad tapizante: *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis*. La primera, es una especie perenne perteneciente a la familia Frankeniaceae, también conocida como brezo de mar. Es una planta perenne con ramas de hasta 40 cm, extendida y que forman matas. Hojas lineales, opuestas, de márgenes enrollados, a veces con una corteza blanca; flores moradas a blanquecinas, solitarias o en inflorescencias en extremo de los tallos y ramas. Florece desde finales de primavera y a lo largo del verano (Figura 18). La segunda, de la familia Buxaceae, es una cubierta vegetal de crecimiento lento de unos 20 cm de altura que se va extendiendo y forma una

espesa cobertura muy decorativa. Con hojas ovaladas de color verde brillante, pero pueden amarillear en invierno, hojas alternas, simples y perenne. Surgen en la extremidad del tallo, recogidos en forma de diamante y resistente al frío (Figura 19).

Figura 18. *Frankenia laevis* (L.) F. Muell. ex Hablitz

Figura 19. *Pachysandra terminalis* Siebold y Zucc.

3.3.1.4. Establecimiento: instalación del ensayo y fase inicial en invernadero

Dado a que las condiciones agroclimáticas de la localidad donde se instaló el ensayo varían durante el año, es una condicionante para la adaptación de la vegetación, por lo que en una fase inicial el ensayo se instaló en un invernadero. Los paneles se dispusieron de forma horizontal hasta el enraizamiento de la vegetación en el espacio confinado (Figura 20, Izquierda). Se utilizaron ocho plantas por especie y por panel. A los treinta días de la instalación del ensayo en el invernadero los paneles se inclinaron a 45° con el fin de que las plantas fueran orientándose y adaptándose a la verticalidad (Figura 20, derecha).

Figura 20. (Izquierda) Disposición de los paneles en forma horizontal. (Derecha) Inclínación de los paneles a 45° para la verticalidad vegetal.

3.3.1.5. Establecimiento: instalación de ensayo en fachada vertical

A los sesenta días de la siembra los paneles se dispusieron en una fachada en vertical exterior con una altura de 180 cm y a una distancia de 60 cm del suelo. La instalación del ensayo en el jardín vertical se realizó colocando seis filas con doce paneles en cada una. La distribución de los tratamientos se realizó ubicando los paneles entre las filas desde el dos hasta el cinco y entre las columnas (Col.) desde la dos hasta la once (Figura 21). Los **tratamientos se identificaron como JV_{xn}**. El primer dígito (x=1, 2) identificó a las especies vegetales, donde 1=*Frankenia laevis* y 2=*Pachysandra terminalis*. El segundo dígito (n=3, 4, 5, 6 y 7) identificó el tipo de sustrato, donde 3=JV_{x3} (CPC+FC), 4=JV_{x4} (FC+CPC), 5=JV_{x5} (FC+PE), 6=JV_{x6} (RVCL+CPC) y 7=JV_{x7} (RVCL+FC). Los números romanos (I, II, III y IV) identificaron las filas con los tratamientos y cada cuadro representa un panel de cultivo (Figura 21).

Efecto de borde superior												
Fila I	Borde izquierdo	JV ₁₃	JV ₁₆	JV ₂₃	JV ₁₄	JV ₁₇	JV ₁₅	JV ₂₄	JV ₂₆	JV ₂₅	JV ₂₇	Borde derecho
Fila II		JV ₂₄	JV ₁₄	JV ₂₃	JV ₁₇	JV ₂₇	JV ₁₆	JV ₂₆	JV ₂₅	JV ₁₃	JV ₁₅	
Fila III		JV ₂₅	JV ₂₄	JV ₁₇	JV ₂₆	JV ₁₆	JV ₂₅	JV ₁₃	JV ₁₄	JV ₁₅	JV ₂₃	
Fila IV		JV ₁₇	JV ₁₆	JV ₁₄	JV ₂₅	JV ₂₄	JV ₂₇	JV ₂₆	JV ₁₃	JV ₂₃	JV ₁₅	
Efecto de borde inferior												

Figura 21. Esquema de la distribución de los tratamientos en la fachada del jardín vertical.

Se situaron paneles en las **filas superior e inferior** y en las **columnas izquierda y derecha** de la fachada vertical como efecto de borde (**no formaron parte del ensayo**). Los paneles de la fila superior con *Frankenia thymipholia* y *Ojuga reptans*; la columna izquierda con *Pachysandra terminalis* y la columna derecha con *Frankenia laevis*. En la fila inferior de la fachada se colocaron sustratos sin vegetación, los cuáles se evaluaron aunque no formaron parte del ensayo (Figura 21).

3.3.1.6. Manejo agronómico del experimento en sistema de jardín vertical

Los nutrientes se incorporaron mezclados en los sustratos antes de su colocación en los sacos. Se aplicó 4 g L^{-1} de fertilizante de lenta liberación (8-9 meses) utilizando Osmocote Exact® de doble encapsulado y con fórmula NPK +2MgO +TE (15-9-11+ trazas de elementos). En el invernadero el suministro de agua se realizó con riego por goteo con la disposición de un gotero por cuadrante para humectar los sustratos. Mientras que una vez ubicado en la pared, el suministro de agua se realizó por la tubería de alimentación de agua ubicada en la parte lateral inferior de los paneles (Figura 22, izquierda). En invierno se colocó una pantalla rompe-vientos para contrarrestar las heladas (Figura 22, derecha).

Figura 22. Jardín vertical situado en la pared con vista de las tuberías de alimentación de agua en el lateral izquierdo de la pared vegetal (izquierda) y la pantalla corta-heladas (derecha).

3.3.1.7. Diseño experimental utilizado en el ensayo

Se utilizó un diseño experimental en bloques completos al azar (DBCA) con cuatro repeticiones (bloques) y cinco tratamientos (sustratos). El experimento tuvo 40 unidades experimentales: 10 paneles en cada bloque (5 sustratos x 2 especies).

3.3.1.8. Variables evaluadas y muestreos periódicos

Durante el establecimiento del ensayo en el jardín vertical se estudió la respuesta de la vegetación en los sustratos ensayados. Se midieron las **concentraciones de clorofila** utilizando un aparato SPAD-502® de marca comercial Konica Minolta (Figura 23). El SPAD es un equipo para estimar de modo indirecto, no destructivo y de lectura rápida del contenido de clorofila. Se tomaron cuatro medidas por planta solamente en las hojas de la *Pachysandra terminalis* debido a que el área foliar de la *Frankenia thymifolia* es muy pequeña y no fue posible su lectura. También, se realizaron **cortes periódicos** (podas) en las especies a 5 centímetros desde la base, a fin de evitar crecimiento excesivo, y se midió la **longitud, peso fresco y peso seco** a $73^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Figura 23. Equipo SPAD-502® utilizado para medir la concentración de clorofila.

3.3.1.9. Evaluación de vegetación y sustratos del jardín vertical

Las evaluaciones de plantas y sustratos se iniciaron en julio del 2013 con un primer muestreo destructivo. Consistió en retirar dos cuadrantes (superior e inferior) de uno de los dos laterales del panel de cultivo. La elección del lateral evaluado se realizó previa aleatorización. Para el muestreo se efectuó un corte en vertical de los sacos conteniendo los sustratos y las plantas ubicadas en los cuadrantes 1 y 5 ó 4 y 8, según el lateral seleccionado aleatoriamente (Figura 24). También, se retiró una fila con módulos de cultivo con sustratos sin vegetación y que fueron colocados al inicio del ensayo como efecto de borde en el lado inferior de la pared vegetal (Figura 25). En estos sustratos se determinaron las mismas propiedades físico-químicas evaluadas en los sustratos con vegetación que formaron parte del ensayo con la finalidad de observar el comportamiento de los sustratos cuando no contenían vegetación y tenían las mismas condiciones de manejo.

Figura 24. Elección de cuadrantes de muestreo según la ubicación de sustrato y vegetación en los laterales de los paneles de cultivo del jardín vertical.

Figura 25. Corte de los sacos de sustratos ubicados en los cuadrantes laterales del panel.

En julio del 2014 se realizó un segundo muestreo, repitiendo el procedimiento utilizado en el primer muestreo, donde se efectuó un corte en vertical de los sacos conteniendo los sustratos y las plantas ubicadas en los cuadrantes (1 y 5 ó 4 y 8) pertenecientes al lateral contrario que no fue retirado en el primer muestreo, quedando en el jardín vertical solamente las plantas ubicadas en los cuatro cuadrantes centrales (2, 3, 6 y 7) del panel de cultivo (Figura 26, izquierda). El tercer y último muestreo se realizó en diciembre de 2014. En este muestreo se retiraron la vegetación y sustratos ubicados en los cuatro cuadrantes centrales (2, 3, 6 y 7) en el panel del cultivo, dando por finalizado el ensayo (Figura 26, derecha). Los sustratos retirados en los muestreos se situaron en bolsas de plástico y se llevaron al laboratorio para su posterior manejo y análisis.

Figura 26. (Izquierda) Muestreo de sustrato y vegetación ubicada en los cuadrantes del lateral derecho en uno de los paneles de cultivo del jardín vertical. (Derecha) Muestreo de sustrato y vegetación ubicada en los cuadrantes centrales de los paneles de cultivo del jardín vertical.

3.3.1.10. Manejo de muestras en el laboratorio

Los sustratos provenientes de los sacos de fieltro se separaron del material vegetal y luego se apartaron las raíces de la parte aérea de la planta por especie (Figura 27). Las muestras de sustratos y plantas se separaron de acuerdo a su ubicación en los paneles de cultivo. Se obtuvo sustrato, parte aérea y radicular proveniente del saco superior (cuadrante 1 ó 4) y del saco inferior (cuadrante 5 u 8). Se realizaron determinaciones analíticas por separado, tanto en los sustratos como en el material vegetal, según la ubicación (saco superior y saco inferior), según la especie (*Frankenia* y *Pachysandra*) y según el tipo de material vegetal (raíces y parte aérea).

Figura 27. Separación del material vegetal de los sustratos provenientes del jardín vertical.

El **material vegetal** se pesó en fresco y se midió la longitud y diámetro del tallo y raíz principal utilizando un microscopio digital Motic Ecoline[®] D-EL1 aplicando la herramienta informática Motic Eco-Tool[®] (Figura 28). El material vegetal (radicular y aéreo) se llevó a estufa, se secó a $73^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$, se determinó el peso seco y posteriormente se molió finamente en un molino de bolas. Se determinaron las concentraciones de Ca, Mg, K y Na en el tejido vegetal molido.

Figura 28. Microscopio digital de mano Motic Ecoline[®] D-EL 1.

En los **sustratos** se determinaron los contenidos de humedad y peso seco, se homogenizaron, se tomó una porción equivalente a 50g para secar en estufa a $103^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ y posteriormente se molió. El material fresco de sustrato disponible se utilizó para determinación de densidad aparente compactada de laboratorio (Dacl), pH y conductividad eléctrica (CE), mientras que el material seco y molido se envió al laboratorio de la E.U.I.T. Agrícola de la UPM (Red Comunidad de Madrid nº 212) para determinaciones de carbono y nitrógeno (C y N). El equipo utilizado fue un analizador elemental Leco TruSpec CN[®], que analiza el N presente en la muestra con el método Dumas: combustión completa de la muestra a 950°C en presencia de oxígeno, reducción de los óxidos de nitrógeno formados a nitrógeno molecular y detección de éste con un detector de conductividad térmica. El carbono se mide como dióxido de carbono (procedente de la combustión de la muestra) mediante un detector de infrarrojo. La cuantificación se realiza con patrones de referencia certificados de distinta concentración de nitrógeno y carbono. El resultado final se expresa como porcentaje de N y C en la masa total analizada. Se calcularon los porcentajes de materia orgánica (MO) y la relación C/N.

3.3.1.11. Determinaciones analíticas del tejido vegetal: digestión ácida en microondas

La muestra vegetal molida tanto aérea como radicular se sometió a una digestión ácida con la finalidad de efectuar la liberación de elementos minerales, principalmente: P, K, Ca, Mg, S, Mn, Cu, Fe, Zn y Na. La digestión ácida se realizó mezclando 5 mL de ácido nítrico (HNO_3) concentrado al 65% y 3 mL de agua oxigenada (H_2O_2) concentrado al 37%, y utilizando aproximadamente 0,4g de muestra vegetal seca y finamente molida. Esta mezcla se realizó en un tubo digestor de teflón del tipo DAP-60⁺, posteriormente se introdujo un set de doce muestras en un microondas Berghof Speedwave[®]Four utilizado para digestiones a presión, programado a una temperatura mínima de 160° y una temperatura máxima de 190°C (Figura 29).

Figura 29. Microondas Berghof Speedwave Four[®] utilizado en la digestión del material vegetal.

Las muestras se dejaron durante 30 minutos en el microondas, una vez terminado el tiempo las muestras se dejaron enfriar dentro del microondas durante veinte minutos, luego se retiraron y se dejaron enfriar durante veinte minutos más. Una vez enfriadas, se añadieron 25 mL de agua destilada y se filtró con papel de filtro cuantitativo (Whatman #42) en matraz de 50 mL y se aforó. El filtrado se utilizó para la lectura de elementos (K, Ca, Mg, Na, Cu, Mn, Fe y Zn) en un equipo de absorción atómica.

3.3.1.12. Determinación de elementos minerales en absorción atómica (EAA)

Determinación de Ca, Mg, K y Na: Se transfirió a un recipiente adecuado una alícuota de 2 mL del filtrado de la muestra y de los blancos provenientes de la digestión y se agregó 18 mL de una solución de lantano (para Ca y Mg) o de litio (para K y Na)

para evitar interferencias. Las concentraciones de Ca, Mg, K y Na se leyeron en un espectrofotómetro de absorción atómica PerkinElmer AAnalyst400 (EAA) con llama de aire-acetileno y calibrado con una serie de estándares mezclados de cada elemento. Los cálculos se realizaron a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Ppm (Ca-Mg-K-Na)} = \frac{(A - B) * V}{M} \quad (\text{Ecuación 1})$$

A= mg/L de Ca, Mg, K o Na en el filtrado de las muestras.

B= mg/L de Ca, Mg, K o Na en el filtrado de los blancos.

V= volumen final de mL de filtrado.

M= masa en gramos de la muestra.

▪**Determinación de Na, Cu, Mn, Fe y Zn:** del filtrado obtenido en la digestión húmeda se leyeron directamente por EAA: Cu, Mn, Fe y Zn. Estos elementos se calcularon de la siguiente manera:

$$\text{Ppm o mg/kg (Cu, Mn, Fe, Zn)} = \frac{(A - B) * V}{M} \quad (\text{Ecuación 2})$$

A= mg/L de Cu, Mn, Fe o Zn en el filtrado de las muestras.

B= mg/L de Cu, Mn, Fe o Zn en el filtrado de los blancos.

V= volumen final de mL de filtrado; M= masa en gramos de la muestra.

3.3.1.13. Análisis estadístico

Los datos obtenidos se evaluaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) en el programa estadístico Infostat® (Di Rienzo *et al.*, 2011). Previo al ANOVA se realizaron verificaciones de supuestos de Normalidad mediante la prueba de Kruskal Wallis y gráficamente con los residuos versus predichos en un QQ-plot. La homocedasticidad se verificó con la prueba de Levene. Los datos que no cumplieron estos supuestos se transformaron a raíz cuadrada. Esta transformación se efectuó para asegurar una distribución normal y homogeneidad. La comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey a un nivel de significancia del 5% ($\alpha=0,05$). Prueba de *t Student* para probar igualdad entre dos medias.

3.3.2. Sustratos ensayados en una cubierta vegetal

Se estableció un ensayo en sistema de cubierta vegetal utilizando cinco sustratos de las siete mezclas descritas en el apartado 3.2.1. El ensayo se inició a principios de julio de 2013.

3.3.2.1 Sustratos utilizados en la cubierta vegetal

Los materiales principales de los sustratos utilizados estaban combinados con corteza de pino compostada, restos vegetales compostados, fibra de coco y puzolana volcánica. Los sustratos se describen en la Tabla 5:

Tabla 5. Sustratos ensayados en un sistema de cubiertas en cubierta vegetal.

Nomenclatura	Sustrato
RVC+PV	Restos vegetales con lodo (70%) + puzolana volcánica (30%)
CPC+PV	Corteza de pino compostada (70%) + puzolana volcánica (30%)
CPC+FC	Corteza de pino compostada (70%) + fibra de coco (30%)
RVC+CPC	Restos vegetales con lodo (70%) + corteza de pino compostada (30%)
RVC+FC	Restos vegetales con lodo (70%) + fibra de coco (30%)

3.3.2.2 Vegetación utilizada en el ensayo de cubierta vegetal

Se utilizaron cuatro especies vegetales autóctonas peninsulares con alta capacidad tapizante. Las plantas utilizadas como material vegetal fueron: *Teucrium chamaedrys*, *Othonna cheirifolia*, *Frankenia thymifolia*, y *Crassula lycopodioides* (Figura 30).

Figura 30. Especies ensayadas en la cubierta vegetal: *Teucrium chamaedrys* L. (Izquierda), *Othonna cheirifolia* (Centro izquierda), *Frankenia thymifolia* (Centro derecha) y *Crassula lycopodioides* (Derecha).

Teucrium chamaedrys L. es una planta pequeña perenne, rizomatosa, de 5 a 50 cm de altura. Los tallos tienen sección cuadrangular y están cubiertos por pelos simples. Las hojas, opuestas y pecioladas, de hasta 2x1cm, de forma oblonga y con el margen de entero a inciso, dientes obtusos o crenado–dentado, de color verde oscuro en el haz y pubescentes en el envés (Figura 30, izquierda).

Othonna cheirifolia es una planta leñosa de tallos reptantes que extienden la planta haciendo buenos recubrimientos del suelo. A partir de éstas se forman otras de verticales, donde se disponen las hojas, alternas, sésiles y en ángulo muy cerrado, que tienen forma largamente espatulada y son de color glauco. Flores compuestas de color amarillo, que salen sobre todo en primavera, pero que pueden perdurar hasta el verano. Su uso frecuente es en jardinería, ya que requiere bajo mantenimiento, y es muy utilizada para recubrimientos del suelo y taludes (Figura 30, centro-izquierda).

Frankenia thymifolia, planta leñosa perennifolia con los tallos de hasta 30 cm, muy ramificada desde la base, con los tallos arqueados-erectos. Hojas muy pequeñas, triangulares, con el margen revuelto, cortamente ciliadas en la base; a veces con costra blanquecina que les llega a cubrir completamente. Inflorescencias terminales, espiciformes, normalmente unilaterales; Flores pequeñas de color rosa intensa o púrpura (Figura 30, centro-derecha).

Otra especie utilizada para este ensayo es la ***Crassula lycopodioides*** (Figura 30, izquierda). Las especies del género *Crassula* son plantas herbáceas anuales o perennes, o arbustos arborescentes con una altura de hasta 2,5 metros. Rara vez crecen como tubérculos- geófitos, sus raíces son fibrosas y carnosas, los brotes son suculentos, a veces se vuelven leñosos. Las hojas son carnosas y regordetas como una membrana, pueden ser persistentes o caducas, la inflorescencia es un tirso solitario y las brácteas son a menudo similares a las hojas. Los miembros del género se propagan normalmente por esquejes de tallo o cortes de hoja. La mayoría toleran heladas ligeras, sin embargo las temperaturas extremas pueden hacerles perder el follaje.

3.3.2.3 Establecimiento e instalación del ensayo

La instalación del ensayo se realizó en un invernadero climatizado, colocando los sustratos en contenedores confeccionados con planchas flexibles de PVC con medidas de 45cm x 30cm x 20cm. En el fondo del contenedor se realizó un agujero donde se colocó una especie de llave para regular la cantidad de agua de riego añadida. Antes de la colocación del sustrato en los contenedores, en la parte interior se introdujo una plancha ondulada de PVC en forma de huevera con la finalidad de permitir el drenaje con una capa de fieltro para evitar pérdidas de material. Se colocaron 18 L de sustrato por contenedor, ocupando una altura de aproximadamente unos 15 cm (Figura 31).

Figura 31. Establecimiento de los sustratos y distribución de la vegetación en los paneles.

Los contenedores con los sustratos se ubicaron en mesas alargadas (9 x 3m) de acuerdo a la distribución y diseño experimental previamente establecidos. Se identificaron por T_{nn} (T=cubierta vegetal). El primer dígito con n (1, 2, 3 y 4) especificó la especie de planta, donde 1=*Teocrium chamaedrys* y 2=*Othonna cheirifolia*. 3=*Frankenia thymifolia* y 4=*Crassula poliploides*. El segundo dígito n (1, 2, 3, 4 y 5) especificó el sustrato, donde 1= TE_1 (FC+PE), 2= TE_2 (RVC+PV), 3= TE_3 (CPC+PV), 6= TE_6 (RVC+CPC) y 7= TE_7 (RVC+FC) (Figura 32).

Mesa 2	IV	Borde	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	Borde	
	III		11	33	13	23	17	37	16	27	21	42	46	12	41	36	32	26	31	47	22		43
			T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T		T
Pasillo			23	16	13	27	12	41	43	33	31	47	37	36	17	11	42	46	22	26	32	21	
Mesa 1	II	Borde	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	Borde	
	I		21	41	37	32	17	31	36	22	33	12	11	13	27	16	43	42	47	23	26		46
			T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T		T
			37	26	43	13	21	31	17	12	47	22	16	33	27	41	11	23	32	46	36	42	

Leyenda: F=fila I, II, III y IV, primer dígito= especie vegetal (Ver apartado 3.4.2) y segundo dígito= tipo de sustrato (Ver apartado 3.4.1). T= Cubierta vegetal.

Figura 32. Croquis con la distribución de los tratamientos del ensayo de la cubierta vegetal.

Se ubicaron cuarenta contenedores, divididos en dos filas de veinte por mesa. También, se prepararon ocho contenedores con sustratos (sin plantas) y se colocaron como borde situadas una al inicio y otra al final de cada fila en la mesa (Figura 32) y ocho plantas por contenedor (Figura 33).

Figura 33. Establecimiento de los sustratos en los contenedores y distribución de la vegetación.

3.3.2.4 Manejo agronómico del experimento de Cubierta vegetal

Los sustratos recibieron un tratamiento de pre-humectación con la finalidad de calcular el volumen de agua máxima de capacidad para cada uno. El abastecimiento de agua se realizó, el primer mes con riegos semanales, medidos, controlados y homogéneos con una regadera hasta la implantación de la vegetación. Al tercer mes se regó cada quince días controlando el volumen de agua aportada y midiendo la cantidad de agua de drenaje (volumen) y posterior, según las necesidades de requerimiento. Los sustratos con contenido de puzolana volcánica tuvieron mayor requerimiento hídrico por lo que se les proporcionaron 5 litros de agua, mientras que los sustratos orgánicos se les proporcionaron 3,5 litros. El suministro de nutrientes se realizó al principio de la instalación del ensayo. El fertilizante se incorporó en los sustratos antes de su colocación en los contenedores. Se aplicó fertilizante de lenta liberación (8-9 meses) (4 g L⁻¹ de *Osmocote Exact*[®] de doble encapsulado y con fórmula NPK +2MgO +TE, 15-9-11 y trazas de elementos). Se realizó reposición de plantas al mes de la plantación.

3.3.2.5 Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental de bloques completamente aleatorizados (DBCA) con cinco tratamientos (sustratos) y cuatro repeticiones (bloques). El ensayo contó con 80 unidades (cinco tratamientos, cuatro plantas y cuatro bloques).

3.3.2.6 Recolección de datos y tecnología auxiliar empleada

Se utilizaron sensores del tipo *ECH₂O Systems*[®] con sondas capaces de medir contenido de humedad (θ), temperatura y CE, en cualquier suelo o medio de cultivo, conectado a un datalogger EM-50[®]. Los datos proporcionados por estos sensores se almacenan en un datalogger EM50[®], la señal se lee en mV. La información obtenida se descargó al ordenador mediante la ayuda de un programa específico: *ECH₂O Utility*[®] para la lectura de los datos y exportación de los datos a hojas de cálculos. Este equipo es un recolector de datos con la capacidad de recibir la señal de hasta cinco sensores a través de sus puertos. La descarga de los datos se realizó de forma directa desde el datalogger al ordenador mediante USB. Las señales de los sensores se tratan mediante ecuaciones de conversión previamente a la descarga de los datos (Tabla 6).

Tabla 6. Sensores instalados en el ensayo de cubierta vegetal.

Sensor	Variable	Ecuaciones
EC-5	Humedad	$= 7,2 \times 10^{-4} * RAW - 0,393$ (Ecuación 3)
5-TM	Humedad	$= 1.04 \times 10^{-3} * RAW - 0.499$ (Ecuación 4)
	Temperatura (°C)	$= (RAW_T - 400) / 10$ (Ecuación 5)
5-TE	Humedad	$= (-5.34 \times 10^{-2}) + (2.92 \times 10^{-2}) * \varepsilon - (5.5 \times 10^{-4}) * \varepsilon^2 + (4.3 \times 10^{-6}) * \varepsilon^3$ Siendo $\varepsilon = 2 * RAW / 100$ (Ecuación 6)
5-TE	Temperatura (°C)	$= (RAW_T - 400) / 10$ (Ecuación 7)
	CE (dS.m ⁻¹)	$= RAW_{EC} / 100$ (Ecuación 8)

RAW: señal emitida por el sensor. T= temperatura, EC= conductividad eléctrica. Wáter potential (kPa) = $-e (6.43 \times 10^{-6}) * RAW \text{ counts} - 3.10 \times 10^{-2} * RAW \text{ counts} + 39.45$. Fuente: Decagon Devices Inc. (2006).

Los tipos de sensores utilizados fueron:

- **Sensor ECH2O EC-5.** Sondas capaces de medir el contenido volumétrico de agua en cualquier tipo de suelo o medio de cultivo, a través de la constante dieléctrica a un rango de calibración de 0-100% con ecuaciones polinómicas.
- **Sensor ECH2O 5TM.** Además de medir el contenido en humedad, esta sonda es capaz de medir la temperatura del sustrato o suelo en el que se instale.
- **Sensor ECH2O 5TE.** La sonda 5TE está diseñada sobre la base del sensor 5TM para medir el contenido volumétrico de agua, la conductividad eléctrica y la temperatura del medio de cultivo. Para la calibración correcta se requieren valores de CE mayores a 70 mS m^{-1} y temperaturas entre -40°C y $+50^\circ\text{C} \pm 1$ (Devices, 2006).

3.3.2.7 Requerimiento hídrico durante el ensayo

Al inicio del experimento se determinó el contenido de humedad en los cinco sustratos, con la finalidad de establecer el requerimiento hídrico de cada uno. Se tomaron ~100 g de sustrato de los contenedores del ensayo y se colocaron en bolsas de plástico, se llevaron al laboratorio. Los sustratos se homogenizaron y una porción ~50 g se secó en estufa a $103^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$. Los cálculos se efectuaron tomando en cuenta la Da y la cantidad inicial en litros de los sustratos en los contenedores.

3.3.2.8 Recolección y evaluación de lixiviados (drenajes)

Se añadió un volumen inicial equivalente a 6 litros de agua y se dejó drenar durante 24 horas aproximadamente, cerrando con anterioridad la llave de paso del tubo de drenaje de los contenedores. El lixiviado se recolectó utilizando probetas de plásticos con capacidad de un litro y embudos para conducir el lixiviado colocados debajo de la manguera de drenaje (Figura 34).

Figura 34. Recolección de lixiviados provenientes del drenaje de agua en una cubierta vegetal.

Previo a la recolección de los lixiviados se realizaron cálculos para determinar la cantidad de agua de riego a aplicar según el tipo de sustrato y según su capacidad de absorción, tomando en cuenta la variable densidad aparente. Una muestra equivalente a 50 mL de lixiviado, se llevó al laboratorio y se determinó el pH y la CE. Se evaluó el volumen recolectado y se calculó el porcentaje de drenaje con:

$$\% \text{ DRENAJE} = \frac{\text{Volumen drenado}}{\text{Volumen riego inicial}} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 9})$$

3.3.2.9 Índice de verdor (Spad) y contenido de clorofila

Durante el establecimiento del ensayo se realizaron evaluaciones de altura y grosor utilizando un metro y un calibrador pie de rey, respectivamente. También, se midió la concentración de clorofila en las plantas de *Teucrium chamaedrys* y *Othonna cheirifolia* utilizando un SPAD-502[®] Konica Minolta. Se tomaron medidas promedio de cuatro hojas de cada una de las ocho plantas ubicadas en los contenedores. Estas evaluaciones solamente se realizaron en estas dos especies debido a que el área foliar de las especies restantes es muy pequeña y no fue posible su lectura.

En la *Crassula poliploides* se realizó extracción y determinación de clorofilas totales de la biomasa vegetal. Se utilizó el método espectrofotométrico propuesto por Hansmann (1973) realizando mediciones tricromáticas para la determinación de las clorofilas a, b y c, midiendo la densidad óptica del sobrenadante a 665, 645 y 630 nm. Para la cuantificación se utiliza la ecuación propuesta por Strickland y Parsons, (1965):

$$\text{Cl}_a \text{ (mg L}^{-1}\text{)} = 11,6_{(\text{D.O.665})} - 1,31_{(\text{D.O.645})} - 0,14_{(\text{D.O.630})} \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$\text{Cl}_b \text{ (mg L}^{-1}\text{)} = 20,7_{(\text{D.O.645})} - 4,34_{(\text{D.O.665})} - 4,42_{(\text{D.O.630})} \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$\text{Cl}_c \text{ (mg L}^{-1}\text{)} = 55,0_{(\text{D.O.630})} - 4,64_{(\text{D.O.665})} - 16,3_{(\text{D.O.645})} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde Cl_a , Cl_b y Cl_c son las concentraciones de clorofila a, b y c respectivamente, y D.O. es la densidad óptica medida.

El contenido hídrico a saturación en *Crassula* se determinó a partir del incremento entre el peso fresco y peso seco. Se tomó el equivalente a dos gramos de material fresco, se secó a 70°C durante 24 horas y se pesó nuevamente. También, se determinó el índice de succulencia del mesófilo (Sm), calculado como la relación entre el contenido hídrico y la concentración de clorofilas (Kluge y Ting, 1978):

$$\text{Sm} = \frac{\text{Contenido hídrico (g)} \times \text{gramos de peso fresco (gpf)}}{\text{Cantidad de clorofila (mg)} \times \text{gpf}} \quad (\text{Ecuación 13})$$

3.3.2.10 Evaluación de especies vegetales

Las evaluaciones de las especies vegetales de la cubierta vegetal se realizaron retirando las especies contenidas en los diferentes tratamientos (Figura 35). El muestreo inicial se realizó en abril de 2014, es decir a los nueve meses de su establecimiento en los contenedores. Se seleccionaron dos de las cuatro plantas ubicadas en el centro del contenedor, retirándolas del ensayo (Figura 35). En un muestreo final realizado en abril 2015, se muestreó las dos plantas centrales restantes, retirándolas del ensayo y dando por finalizado el ensayo (Figura 35). Se midió la longitud, peso fresco y peso seco de la planta (aérea y radicular) y posteriormente se secó a $73^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Figura 35. Muestreos y evaluación de especies vegetales en la cubierta vegetal al inicio (abril 2014) y final (abril 2015) del ensayo.

3.3.2.11 Evaluación, muestreo y determinaciones analíticas de los sustratos

En muestreos sucesivos a la evaluación de las especies vegetales se realizaron extracciones de sustratos de los contenedores con el fin de determinar propiedades físico-químicas. Los sustratos muestreados se dispusieron en bolsas de plástico y se llevaron al laboratorio. Posteriormente, se eliminaron los restos de raíces y se realizaron determinaciones analíticas descritas en la Tabla 3. Se homogenizaron y se tomaron una aproximadamente 50 g para secar en estufa a $103^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$. Se determinó el contenido de humedad y el peso seco. El material fresco disponible se utilizó para determinación de densidad aparente compactada de laboratorio (DACL), pH y conductividad eléctrica (CE), mientras que el material seco se molió y se envió al laboratorio de la E.U.I.T. Agrícola para determinaciones de carbono y nitrógeno (C y N). Se calculó el porcentaje de materia orgánica (MO) y la relación C/N. Las determinaciones analíticas de los sustratos en este ensayo fueron las mismas que se realizaron en el ensayo del sistema de jardín vertical, determinados según la normativa europea UNE-EN (Tabla 3).

3.3.2.12 Análisis estadístico

Los datos experimentales obtenidos en la terraza naturalizada se evaluaron mediante un ANOVA en Infostat[®] (Di Rienzo *et al.*, 2011). Previamente, se realizaron las verificaciones de supuestos: normalidad mediante la prueba de Kruskal-Wallis y gráficamente con los residuos versus predichos en un QQ-plot y homocedasticidad mediante la prueba de Levene. Los datos que no cumplieron los supuestos se transformaron a raíz cuadrada, ello para asegurarse de que los datos cumplieran una distribución normal y fuesen homogéneos. Se realizaron comparaciones usando Tukey con un nivel de significancia del 5% ($\alpha= 0.05$) para diferencias entre medias. se aplicó la prueba de comparación simple de t-student con $p \leq 0,05$ **para comparaciones** entre dos medias independientes.

IV-RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los diferentes resultados derivados de este estudio, los cuáles se precisan en:

i) la **caracterización inicial de los sustratos** objetos de estudios destacada en las propiedades físicas, hidrofísicas y químicas evaluadas antes de los ensayos.

ii) la **evolución** de las **propiedades físicas y químicas** de sustratos seleccionados como medio de cultivo para el ensayo de **jardín vertical**, así como, la influencia de la disposición del sustrato en cuanto a las modificaciones de sus propiedades. También, sobre el **comportamiento y desarrollo vegetal** de las especies indicadoras establecidas en el jardín.

iii) las **variaciones** de las propiedades iniciales de los sustratos sin vegetación instalados como efecto de borde en el jardín vertical.

iv) la **evolución** de las **propiedades físicas y químicas** de sustratos seleccionados como medio de cultivo para el ensayo de **cubierta vegetal**, así como, el **comportamiento** evaluado a partir del **desarrollo vegetal** de las especies indicadoras establecidas en el ensayo.

4.1. EVALUACIÓN DE SUSTRATOS POTENCIALES PARA DOS SISTEMAS DE NATURACIÓN URBANA

Los resultados que se presentan en este apartado corresponden a sustratos experimentales elaborados exclusivamente para este trabajo basándose en resultados previos de los proyectos desarrollados en el Grupo de Investigación de “Calidad de Suelos y Aplicaciones Medioambientales (CASAM)” de la Universidad Politécnica de Madrid. A continuación se muestran los resultados correspondientes a la **caracterización física, hidrofísica y química iniciales** de sustratos potenciales alternativos al uso de turba *Sphagnum* propuestos para dos sistemas de naturación urbana: un **jardín vertical** y una **cubierta vegetal**. Se realizó un análisis comparativo de los sustratos y posteriormente, a partir de estos resultados y tomando en cuenta los criterios de selección considerados en este trabajo se efectuó la clasificación de los sustratos, tanto para el jardín vertical, como para la cubierta vegetal.

4.1.1. Propiedades físicas iniciales de los sustratos

4.1.1.1. Contenido de humedad, densidad aparente, densidad de partículas y espacio poroso total

En la Tabla 7 se presentan los valores medios de: **contenido de humedad (H)**, **densidad aparente (Da)**, **densidad de partículas (Dp)** y **espacio poroso total (EPT)** obtenidos en los sustratos objetos de estudio. Se observaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre sustratos con respecto al contenido de H, Da y EPT (Tabla 7).

Tabla 7. Propiedades físicas iniciales en sustratos potenciales para sistemas de naturación urbana (valores promedios)*.

Sustrato	Hg (%)	Da (g cm ⁻³)	Dp (g cm ⁻³)	EPT (%)
FC+PE (testigo)	72,5 g	0,14 a	1,68 a	95,3 g
RVC+PV	9,4 a	0,85 g	2,42 d	65,1 a
CPC+PV	16,1 b	0,72 f	2,38 d	68,9 b
CPC+FC	45,1 e	0,19 b	1,83 b	89,3 e
FC+CPC	59,1 f	0,23 c	1,84 b	92,5 f
RVC+CPC	36,4 d	0,36 d	2,02 c	82,1 d
RVC+FC	27,2 c	0,39 e	2,03 c	79,7 c
Nivel de referencia¹	-	< 0,40	1,45-2,65	>85

*Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido. Hg=humedad gravimétrica, Da=densidad aparente, Dp=densidad de partículas y EPT=espacio poroso total. ¹Abad *et al.*, 1993.

El **contenido de Humedad gravimétrica (Hg)** fue significativamente superior ($p \leq 0,05$) en el testigo (FC+PE). La Hg media registró un rango de 9,4% (RVC+PV) y 72,5% (FC+PE). La humedad es un parámetro variable, aunque por lo general puede encontrarse en torno al 45% (Masaguer *et al.*, 2015). Los sustratos FC+CPC, CPC+FC y RVC+FC, tuvieron un porcentaje de H superior al 30%; ajustándose a valores de 59%, 45% y 36%, respectivamente (Tabla 7). Según la norma inglesa la humedad de algunos materiales debe alcanzar un valor mínimo al 30% para que pueda mezclarse y humedecerse de forma adecuada (Ansorena, 1994). Los valores de **densidad aparente** óptima dependerá de dónde se cultive, si es en invernadero donde la planta no está sometida al viento, pudiendo ser tan baja como 0,15 g cm⁻³ (Abad, 1995), o al aire libre, donde el sustrato deberá ser más pesado y la densidad deberá estar comprendida entre 0,5 y 0,75 g cm⁻³. Estas características podrían estar condicionadas por la naturaleza de las mezclas. Los sustratos con contenido de puzolana volcánica (RVC+PV y CPC+PV) registraron las mayores densidades (0,85 y 0,72 g cm⁻³, respectivamente) y la densidad

más baja se obtuvo en el sustrato testigo ($0,14 \text{ g cm}^{-3}$) influenciada por el 90% de fibra de coco que posee en la mezcla. La D_a osciló entre $0,14$ (testigo) y $0,85$ (RVC+PV) g cm^{-3} . Se observa que RVC+PV y CPC+PV presentaron valores muy superiores al óptimo recomendado por Abad *et al.* (1993) ($<0,4 \text{ g cm}^{-3}$) consecuencia de la utilización de la puzolana volcánica, material de mayor densidad en estos sustratos (Tabla 7). Superar valores de D_a mayores de $0,4 \text{ g cm}^{-3}$ podría provocar un alto grado de compactación en el sustrato y condicionar el sistema radicular de la planta. En ese sentido, valores de alta densidad aparente tienen la desventaja de incrementar los costos de transporte y la reducción de la porosidad y la capacidad de aire (Corti *et al.*, 1998). Además de lo anterior, esta característica en estos dos sustratos limitaría su utilización en el jardín vertical por exceso de peso en el sistema, pero aportaría resistencia y estabilidad en una cubierta vegetal, en cuanto al vuelco del sustrato por el viento.

En cuanto a la **densidad de partículas (D_p)** fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) en RVC+PV y CPC+PV. Todos los sustratos evaluados superaron al testigo (FC+PE) (Tabla 7). La D_p registrada en los sustratos fue superior a $1,5 \text{ g cm}^{-3}$, límite inferior sugerido por Arenas *et al.* (2002). En ese sentido, la D_p se encontró dentro de los niveles de referencia ($1,45\text{-}2,65 \text{ g m}^{-3}$) reportados por Abad *et al.* (1993).

La **porosidad (EPT)** fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) en el testigo (95%), seguido de FC+CPC (93%). Los valores mínimos y máximos de EPT oscilaron entre 65% (RVC+PV) y 95% (FC+PE), respectivamente (Tabla 7). Los valores inferiores, con diferencias significativas ($p \leq 0,05$), se obtuvieron en los sustratos RVC+PV (65%) y CPC+PV (69%), siendo las mezclas con mayor densidad aparente y contenidos de humedades bajas. La porosidad de estos dos sustratos es reducida lo que no permite la adición de agua sin que comprometa la aireación. Esta característica lo haría ideal para sistemas donde requiera poco mantenimiento y donde las condiciones no sean las más adecuadas. Las medias de EPT en CPC+FC, FC+CPC y el testigo fueron superiores al 85%, nivel mínimo recomendado por Abad *et al.* (1993) y por Abad y Martínez (1996). Al sustrato testigo se le atribuye un EPT mucho mayor debido a poliestireno expandido como parte de la mezcla y añadido para incrementar la aireación del sustrato. El valor de EPT en este sustrato fue similar al recomendado por Noguera *et al.* (2000) y Arenas *et al.* (2002). Abad *et al.* (1993) señalan valores de EPT superiores al 85%. Por su parte, Landis *et al.* (1990) indica que otros autores sugieren entre 60% y 80% de

porosidad total y Aendekerk *et al.* (2000) sugiere el rango adecuado de EPT entre 45-99%. Una baja porosidad podría limitar la capacidad de retención de agua y aire.

4.1.1.2. Granulometría e índice de grosor

La distribución de tamaño de partícula de un medio de crecimiento es importante, ya que determina el espacio de los poros, el intercambio de gases y la capacidad de retención de agua (Abad *et al.*, 2001). En la Tabla 8 se presenta la distribución de **partículas con diámetro menor a 1mm**.

Tabla 8. Distribución de partículas con diámetro menor a 1 mm de en sustratos potenciales para dos sistemas de naturación urbana (valores expresados en porcentaje en peso)*.

Sustrato	Tamaño de partículas (mm)			$\Sigma < 1\text{mm}$
	< 0,25	0,25 – 0,5	0,5 – 1,0	
FC+PE (testigo)	13,3 a	19,6 d	26,3 e	59,2 d
RVC+PV	24,9 d	16,9 c	16,4 c	58,2 d
CPC+PV	16,4 b	11,9 a	14,0 a	42,4 a
CPC+FC	16,4 b	14,4 b	16,5 c	47,3 b
FC+CPC	11,0 a	12,3 a	14,9 b	38,2 a
RVC+CPC	17,1 b	17,0 c	18,9 d	52,9 c
RVC+FC	21,1 c	17,5 c	20,2 d	58,8 d
MEDIA	17,2	15,7	18,2	51,0

*Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido.

En la **fracción <0,25 mm** se muestra una mayor proporción de finos en RVC+PV, la cual podía estar relacionada a la puzolana volcánica. En ese mismo sentido, en el testigo (13%) y en FC+CPC (11%) existe la menor concentración de finos con respecto al resto de sustratos, ligados a la proporción de fibra de coco aportada a la mezcla. El “mejor sustrato” en cuanto al tamaño de partículas se refiere, es el que con textura media a gruesa, equivalente a una distribución de tamaño de partícula entre 0,25 y 2,5 mm, que permite la retención suficiente de agua fácilmente disponible junto con un contenido de aire adecuado.

En las **fracciones 0,25-0,5 mm y 0,5-1,0 mm** el testigo (20% y 26%, respectivamente) concentra su mayor porcentaje de finos, lo cual era de esperarse debido a que el formato utilizado en este sustrato era polvo de coco (Tabla 8). Este resultado coinciden con los reportados por Tapia *et al.* (2008) en sustratos de polvo de coco. Por otro lado, Evans *et al.* (1996), encontró en sustratos con contenido de fibra de

coco la mayor concentración de partículas menores a 1 mm en fracciones que iban entre 0,5 mm y 2 mm. Handreck (1983) subrayó la importancia de la fracción con tamaño entre 0,1 y 0,5 mm y su relación con la capacidad de retención de agua disponible. El testigo presentó 26% de partículas dentro de este rango, sin embargo, el resto de los sustratos estuvieron entre 14% (CPC+PV) y 20% (RVC+FC) (en peso) (Tabla 8). Spiers y Fietje (2000) reportaron un valor de 31,5% en compost de residuos verdes. Un exceso de finos (menos de 0,1 mm) obstruye los poros, aumenta la capacidad de retención de agua no disponible y disminuye la porosidad de aire (Spiers y Fietje, 2000).

La **suma total de partículas menores a 1 mm** fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) en el testigo, en RVC+PV y en RVC+FC; seguido de RVC+CPC, los cuales superaron el 50% de fracciones finas (Tabla 8). La distribución de tamaño de partículas y por lo tanto, la porosidad inter-partículas afectan el equilibrio entre el agua y el contenido de aire para cada nivel de humedad (Raviv, *et al.*, 1987). Ansorena (1994) indica que cuando las partículas pasan a tener un tamaño inferior a 1mm, se verifica un descenso en la EPT. Handreck (1983) estudió el tamaño de partícula y propiedades físicas de los medios de cultivo para contenedores y concluyó que la fracción más pequeña que 0,5 mm, y en particular entre 0,1 y 0,25 mm, tiene la mayor influencia sobre la porosidad y sobre la capacidad de retención de agua.

En la Tabla 9 se presenta la distribución de **partículas mayores a 1 mm y el índice de grosor (IG)**. Un "índice de grosor" se define como el porcentaje de volumen acumulativo de partículas mayores de 1 mm (Richards *et al.*, 1986). En la **fracción entre 1 y 2 mm** el testigo fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) concentrando el 26% de las partículas con dicha granulometría. El mayor porcentaje significativo ($p \leq 0,05$) de partículas comprendidas entre 2 y 4 se registró en CPC+PV (19%). En fracciones entre 4 y 8 mm, la proporción significativamente mayor ($p \leq 0,05$) se observó en CPC+PV y FC+CPC con 19% y 17%, respectivamente. En partículas por encima de 8 mm se registró una mayor concentración de partículas en FC+CPC, así como entre 8-16 mm y partículas superiores a 16 mm. (Tabla 9). Graceson *et al.* (2013) en estudios realizados con medios de cultivo provenientes de materiales inorgánicos (ladrillo picado) mezclados con residuos vegetales compostado reportaron mayor porcentaje de partículas entre 4 y 8 mm. Jayasinghe (2012) informó que un exceso de partículas más grandes puede conducir a excesiva aireación y retención de agua inadecuada y que un

exceso de partículas finas puede obstruir los poros y disminuir la porosidad de aire. Sustratos de cultivo con un alto porcentaje de partículas de entre 0,25 y 2,00 mm son óptimos para el crecimiento de plantas en macetas (Jayasinghe, 2010).

Tabla 9. Distribución de partículas con diámetro mayor a 1 mm en sustratos potenciales para dos sistemas de naturación urbana (valores expresados en porcentaje en peso)*.

Sustrato	Tamaño de partículas (mm)					Índice de grosor (IG)
	1 – 2	2 – 4	4 – 8	8 - 16	>16	
FC+PE (testigo)	25,8 d	13,5 a	1,5 a	0,0 a	0,0 a	40,8 a
RVC+PV	15,9 b	13,9 a	10,7 c	1,2 a	0,0 a	41,9 a
CPC+PV	16,8 b	18,7 b	19,3 e	2,9 b	0,0 a	57,7 d
CPC+FC	16,8 b	14,6 a	14,0 d	6,5 c	0,8 a	52,7 c
FC+CPC	13,7 a	11,9 a	17,2 e	16,5 d	2,5 b	61,8 d
RVC+CPC	18,0 c	13,8 a	11,0 c	4,4 c	0,0 a	47,1 b
RVC+FC	18,6 c	12,4 a	7,7 b	2,5 b	0,0 a	41,2 a
MEDIA	18,0	14,1	11,6	4,9	0,5	49,0

*Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido.

El **índice de grosor** en los sustratos CPC+PV (58%), CPC+FC (53%) y FC+CPC (62%) fue más del 50%, lo que indica que presentan el menor porcentaje de partículas finas. Este comportamiento es comparable con los reportado por López-Cuadrado *et al.* (2006), quienes indicaron una concentración superior al 50% de las fracciones de partículas mayores a 1 mm en sustratos de corteza de pino. El testigo y los sustratos con restos de podas compostados mostraron valores de IG adecuados según los parámetros establecidos por Jayansinghe (2012), donde subraya que este valor debe estar entre 30 y 45% (Tabla 9).

4.1.2. Propiedades hidrofísicas iniciales

4.1.2.1. Capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR), agua difícilmente disponible (ADD) y fracción de sólidos (MS).

La curva característica de humedad o curva de liberación de agua propuesta por De Boodt *et al.* (1974) corresponde a la relación que combina el contenido de humedad (θ) de un medio poroso y la energía con la que el agua es retenida por el mismo (potencial matricial: Ψ_m). En la Tabla 10 se presentan valores correspondientes a las **propiedades hidrofísicas** de los sustratos, basadas en la curva de retención de agua.

Tabla 10. Propiedades hidrofísicas en sustratos potenciales para dos sistemas de naturación urbana (valores medios en porcentaje*/ volumen).

Sustrato	CA (%)	AR (%)	AFD (%)	ATD (%)	ADD (%)	MS (%)
FC+PE (testigo)	37,6 c	1,0 a	24,3 d	25,3 f	32,4 e	4,7 a
RVC+PV	39,8 d	2,6 b	4,4 a	7,0 a	18,2 a	35,0 g
CPC+PV	38,9 d	2,7 b	7,6 b	10,2 b	20,8 b	31,1 f
CPC+FC	42,0 e	3,5 c	8,6 b	12,1 b	35,2 f	10,8 c
FC+CPC	40,9 e	3,3 c	17,3 c	20,6 d	31,0 d	7,6 b
RVC+CPC	29,5 a	4,8 d	17,0 c	21,8 e	30,8 d	18,0 d
RVC+FC	31,7 b	3,2 c	16,7 c	19,9 c	28,1 c	20,4 e
Nivel de referencia¹	20-30	4-10	20-30	24-40	25-31	-

*Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido. CA=capacidad de aireación, AFD=agua fácilmente disponible, AR=agua de reserva, ATD (AFD+AR) = agua total disponible ADD=agua difícilmente disponible, MS= masa de sólidos. ¹Abad *et al.*, 1993.

La capacidad de **aireación (CA)** es la diferencia entre la porosidad (o espacio total de poros, EPT) y el agua a una succión de 10 cm de columna de agua, **agua fácilmente disponible** se define como la cantidad de agua liberada entre 10 y 50 cm de succión (**AFD**), **agua de reserva (AR)** se refiere a la cantidad de agua retenida por el sustrato entre una succión de 50 y 100 cm, **agua difícilmente disponible (ADD)** es la cantidad de agua liberada cuando la aspiración se aumenta de 50 a 100 cm **y fracción de poros (MS)** corresponde a la materia seca. De Boodt y Verdonck (1972) definen los requisitos de un "sustrato ideal"; esto debe exhibir 85% de porosidad, el 20-30% CA y el 20-30% de AFD y entre 4% y 10% de AR. Ninguno de los medios utilizados en este estudio caen dentro de esa definición.

Sin embargo, RVC+CPC con un ETP de 80%, una CA de 30% y AR de 4,8%, es el sustrato que más se acerca a esta definición de "sustrato ideal", pero su AFD está por debajo de las condiciones recomendadas. Abad *et al.*, (1993) y Ansorena (1994) coinciden con De Boodt y Verdonck (1972) al indicar que los requerimientos de un sustrato deben encontrarse en torno al 20% y 30% de CA. Los valores de CA registrados en CPC+FC (42%), FC+CPC (41%) y RVC+PV (40%) fueron superior al intervalo recomendado, sin embargo, RVC+CPC (30%) cumple con este requerimiento (Tabla 10). Otras referencias como De Boodt y Verdonck (1972) sugieren una CA entre 10-30%; Puustjarvi y Robertson (1975) de 45% a 50%; Havis y Hamilton (1976) recomiendan entre 20% y 25% y Whitcomb (1988) de 25% a 35%.

El **AFD** mostró valores significativamente superiores en el testigo (24%) ($p \leq 0,05$), seguido de FC+CPC, RVC+CPC y RVC+FC (los tres con AFD=17%), los cuales fueron significativamente iguales ($p \leq 0,05$) (Tabla 10). Algunos autores como Abad *et al.* (1993) sugieren que el AFD debe comprender un margen entre 20-30%, en ese sentido, sólo el sustrato testigo cumpliría esta condición. Este valor en el testigo (24%) se atribuye a que su composición corresponde a un material que no ha sido sometido a biodegradación. El AFD mínimo y máximos estuvo entre 4% (RVC+PV) y 24% (FC+PE, testigo).

El **AR** fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) en RVC+CPC (5%) y éste igual a CPC+FC (4%); también a FC+CPC (3,3%) y RVC+FC (3,2%) y éstos iguales a los sustratos con contenido de puzolana volcánica. Los rangos oscilaron entre el 1% y 5% en FC+PE y RVC+CPC, respectivamente (Tabla 10). Los niveles óptimos sugeridos de AR, según Abad *et al.* (1993) y Ansorena (1994) se encuentran entre 4-10%, por lo tanto, solo RVC+CPC (4,8%) se mostró dentro del rango recomendado. Aunque CPC+FC (3,5%) se encontró por debajo del límite inferior se acercó bastante al mínimo recomendado. En la mayoría de los sustratos, se encontraron altos CA y baja AR. Esto significa que el agua se debe aplicar con frecuencia, y en pequeñas cantidades para evitar la lixiviación. Incluso en mezclas con restos vegetales compostados con corteza de pino o con fibra de coco, estas propiedades apenas se mejoraron.

El **ATD** mostró diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre sustratos, siendo mayor el testigo (25%). Se mostró igualdad entre FC+CPC (21%) y RVC+CPC (22%) y entre FC+CPC (21%) y RVC+CPC (19%) (Tabla 10). Los rangos de ATD oscilaron entre 7% (RVC+PV) y 25% (FC+PE). El testigo presentó un ATD cercano al límite inferior sugerido por Abad *et al.* (1993). La fibra de coco en formato polvo de coco admite una capacidad elevada de almacenamiento de agua asociadas a las fracciones finas, que hacen que se retenga el agua con mucha fuerza.

Los valores medios de **ADD** obtenidos fueron significativamente iguales ($p \leq 0,05$) en FC+CPC (31%) y RVC+CPC (31%). En ese sentido, los demás sustratos mostraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre sí. Abad *et al.* (1993) sugieren que el ADD óptimo se encuentra en un rango de 25% a 31%. De acuerdo a este criterio, solamente FC+CPC (31%), RVC+CPC (31%) y RVC+FC (28%) cumplen con esta

característica (Tabla 10). Los sustratos con puzolana volcánica fueron significativamente menores ($p \leq 0,05$) (Tabla 10). Esto demuestra la escasa capacidad de estos materiales para liberar el agua absorbida. Según Ansorena (1994), una baja ADD hace poco recomendable a estos materiales como componente de sustratos en cultivos hortícolas; sin embargo, puede ser de gran utilidad para sistemas con especies que requieran poca utilización de agua o en el sistema de cultivo que lo requiera, por ejemplo, cubiertas vegetales.

La MS depende del material de origen, por lo que puede observarse que esta variable está proporcionalmente relacionada con la densidad del sustrato y con la naturaleza de los materiales utilizados. La fracción sólida (MS) mostró diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre los sustratos. Se observa una gran variabilidad entre sustratos con rangos entre 5% (FC+PE) y 35% (RVC+PV) (Tabla 10).

4.1.2.2. Curvas de retención de humedad

Las plantas cultivadas en contenedores no pueden ser sometidas a tensiones hídricas elevadas, ya que el volumen del medio donde crecen es muy limitado (Masaguer *et al.*, 2015). En la Figura 36 se representan los valores medios correspondientes a las **curvas de retención de humedad** a diferentes tensiones (0, 10, 50 y 100 cm de columna de agua) de los sustratos estudiados.

La representación de las curvas de retención de humedad para sustratos orgánicos (relación tensión/humedad), es un indicador muy sensible a las variaciones de materia orgánica. En la medida en que el contenido de la MO incrementa, aumenta la capacidad de agua retenida en el sustrato (Masaguer *et al.*, 2015). Los valores alcanzados por las curvas inicialmente presentaron valores superiores al 65% en RVC+CPC y CPC+PV, posteriormente disminuyeron un 25%, 21% y 18% al someter los sustratos a tensiones de 10, 50 y 100 cm de columna de agua, respectivamente. Por otro lado, la tendencia de las curvas en los sustratos objetos de estudio se mostró similar entre sí. Se observa que para una misma tensión de succión, el comportamiento entre sustratos con contenido de puzolana volcánica (RVC+PV y CPC+PV) es similar, siendo CPC+PV ligeramente

superior en los diferentes puntos de tensión con respecto a RVC+PV, pero ambos menores que las curvas del resto de sustratos (Figura 36).

Figura 36. Curvas de retención de humedad en sustratos potenciales para dos sistemas de naturación urbana (expresado como porcentaje en volumen).

RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido. ¹Valor recomendado: 10cm (55-70%); 50 cm (31-40) y 100 cm (25-31).¹Abad *et al.*, 1993.

A una succión de cero cm de tensión de columna de agua los sustratos mostraron diferencias; los de contenido en puzolana volcánica (RVC+PV y CPC+PV) presentaron la menor retención de humedad a bajas tensiones y los orgánicos mostraron mayor retención de humedad (Figura 36). Los componentes minerales como la puzolana volcánica reducen la capacidad de retención tanto de la corteza de pino compostada como de los restos de podas compostados (Masaguer *et al.*, 2015). Las diferencias en cuanto a la retención de humedad entre sustratos puede deberse a las características intrínsecas de cada sustrato.

En la Figura 37 se muestran las **curvas de liberación de humedad** diferentes tensiones: 0, 10, 50 y 100 cm de columna de agua. A una tensión cero los sustratos fueron diferentes entre sí, hubo menor liberación de humedad en el testigo (5%) y por el contrario, mayor liberación en RVC+PV, cumpliendo de que el sustrato que más retiene, menos libera. Desde un punto de vista físico, el uso de esta mezcla podría requerir riego frecuente, utilizando pequeña cantidad de agua cada vez, debido a sus

bajos valores de AR descritos antes. Gracias a las características que presenta el sustrato testigo, su aumento en la capacidad de retención de agua se puede lograr sin comprometer la alta capacidad de aireación, lo que representa una propiedad específica de este material. Sin embargo, la capacidad de retención de agua del polvo de coco es considerada muy baja si se compara con un sustrato ideal (De Boodt y Verdonk, 1972; Abad *et al.*, 2001). Esto hace que en la mayoría de sus aplicaciones sea utilizado en mezcla con otros componentes que aumenten la retención de agua.

Figura 37. Curvas de liberación de humedad en sustratos potenciales para dos sistemas de naturación urbana (expresado como porcentaje en volumen).

RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido.

4.1.3. Propiedades químicas iniciales

4.1.3.1. pH y conductividad eléctrica

En la Figura 38 se muestran los valores medios de **pH** y **conductividad eléctrica (CE) iniciales** obtenidos en los sustratos. Según Bunt (1988) el rango de pH óptimo de los medios de cultivo y mezclas de sustratos para el cultivo de plantas ornamentales en contenedores es 5,2 a 6,3. La condición básica de RVC+CPC (pH=8,0) podría ser limitante para el desarrollo de algunas plantas.

Figura 38. Valores medios* iniciales de pH (arriba) y conductividad eléctrica (CE) (abajo) en sustratos potenciales para dos sistemas de naturación urbana (expresados en porcentaje en peso).

*Medias con una letra común en un mismo gráfico no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido. Abad *et al.* (1993): nivel de referencia: pH=5,2-6,3. Carmona y Abad (2008): nivel de referencia: CE=15-50 mS m⁻¹.

Los rangos mínimo y máximo de pH oscilaron entre 5,5 (CPC+FC) y 8,0 (RVC+CPC), respectivamente. No hubo diferencias significativas ($p \leq 0,05$) de pH en sustratos con mayor proporción de fibra de coco (FC+CPC y FC+PE) (Figura 38). Los valores de pH registrados en CPC+PV (pH=6,0), CPC+FC (pH=5,5), FC+CPC (pH=6,3) y FC+PE (pH=6,2) se encontraron dentro de los niveles óptimos (5,2-6,3) aconsejados para el manejo de cultivo en sustratos (Abad *et al.*, 1993). Sustratos con pH superior al límite establecido (pH=6,3) por Abad *et al.* (1993) correspondieron a los que contenían 70% de restos vegetales compostados: RVC+CPC (pH=7,7), RVC+CPC

(pH=7,9) y RVC+FC (pH=7,4). Este comportamiento puede deberse a la composición del material principal utilizado (restos vegetales) en la mezcla. Masaguer y Benito (2008) indicaron que el pH de un compost (o material compostado) varía entre 6,5 y 8,0 dependiendo de la fuente de origen, pero de acuerdo con Bunt (1988) y Abad *et al.* (1993) el pH óptimo para el cultivo de plantas ornamentales en contenedores es 5,2 a 6,3. En ese sentido, Baixauli y Aguilar (2002) destacan que el nivel óptimo de pH para cultivo sin suelo se sitúa entre 5,5 y 6,8, en este rango se encuentran de forma asimilable la mayor parte de los nutrientes.

La CE media fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) en FC+CPC (CE=69,5 mS m⁻¹), seguido de RVC+CPC (CE=49,2 mS m⁻¹), el cual fue igual a CPC+FC (CE=46,1 mS m⁻¹). Los valores medios oscilaron entre 22,7 mS m⁻¹ (CPC+PV) y 69,5 mS m⁻¹ (FC+CPC) (Figura 38). Los sustratos con puzolana volcánica presentaron las más bajas concentraciones de sales. Una CE baja facilita el manejo de la fertilización y se evitan problemas por estrés hídrico en las plantas. Bunt (1988) establece valores de CE entre 20 y 35 mS m⁻¹ como niveles de salinidad satisfactorios para la mayoría de las plantas. Abad *et al.* (1993) establece un rango óptimo de 75-349 mS m⁻¹. Posteriormente, Abad *et al.* (2002) considera que la CE de un sustrato debe oscilar entre 150-200 mS m⁻¹ y Carmona y Abad (2008) definen ese nivel óptimo entre 15 y 50 mS m⁻¹. De acuerdo a este último criterio, todos los sustratos lo cumplen. Ninguno de los valores de CE representa un problema con respecto al crecimiento de las plantas. Sólo las mezclas FC+CPC tenían valores por encima de 50 mS m⁻¹. Por otro lado, valores altos de CE podrían ser un factor limitante para plantas sensibles a la alta salinidad.

4.1.3.2. Materia orgánica, carbono orgánico y relación carbono/nitrógeno

En la Figura 39 se muestran los porcentajes iniciales de **materia orgánica total (MO)** y **Nitrógeno (N)** y la **relación carbono/nitrógeno (C/N)** de los sustratos evaluados. El porcentaje de MO por lo general varía en función de la naturaleza de las mezclas empleadas para la elaboración de los sustratos.

Figura 39. Porcentajes iniciales de materia orgánica total (MO), nitrógeno (N) y relación carbono/nitrógeno (C/N) en sustratos de cultivo ensayados en sistemas de naturación urbana (valores promedios)*.

*Medias con una letra común en una barra del mismo color o punto no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido. ¹Abad *et al.* (1993).

En comparación con los suelos donde la MO es menor al 10%, en sustratos puede oscilar entre 0-90% según el tipo de material (Valenzuela, 2006). Los sustratos con puzolana volcánica tuvieron los más bajos porcentajes de MO (11,9% en RVC+PV y

17,5% en CPC+PV), marcado por el contenido mineral de este material inorgánico; sin embargo, los sustratos con fibra de coco obtuvieron valores superiores al 40%, por lo que la superioridad en estos sustratos orgánicos podría deberse al aporte de la fibra de coco. Los sustratos con fibra de coco manifestaron igualdad significativa ($p \leq 0,05$) al sustrato testigo. El %MO fue superior en estos sustratos: FC+CPC (64%), CPC+FC (53%), RVC+FC (43%) y el testigo (43%). Los rangos de MO oscilaron entre 12% (RVC+PV) y 64% (FC+CPC) (Figura 39).

En cuanto al N se observó que los sustratos cuyos componentes eran orgánicos en su totalidad mostraron valores superiores, especialmente aquellos con mayor porcentaje de fibra de coco (FC+CPC y FC+PE) y restos vegetales compostados (RVC+CPC y RVC+FC), con respecto a los que contenían puzolana volcánica (RVC+PV y CPC+PV). Hubo diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre sustratos en cuanto al %N y los valores mínimo y máximo estuvieron en el orden de 0,14% (CPC+PV) y 1,32% (FC+PE), respectivamente (Figura 39). El contenido elevado de N en el testigo se debió a que este sustrato antes de la caracterización estaba fertilizado. A la vista de los resultados de este parámetro se puede afirmar que la utilización de fibra de coco y restos vegetales compostados como componente de sustratos con un contenido importante, podría incrementar el porcentaje de nitrógeno en las plantas, proporcionando una mejor nutrición.

Los sustratos CPC+FC (78), CPC+PV (74) y FC+CPC (67) destacaron valores de relación C/N significativamente superiores ($p \leq 0,05$) (Figura 39). En estos sustratos probablemente ha influido la corteza de pino compostada utilizada como componente principal en estas mezclas. En los sustratos con corteza de pino podría presentar el carbono en formas resistentes a la degradación en cambio, las mezclas con contenido de restos vegetales presentaron valores bajos asociados al alto contenido en nitrógeno, resultados similares fueron reportados por Benito *et al.* (2006) y López-Cuadrado *et al.* (2006).

4.1.3.3. Contenido de fósforo (P) y cationes (Ca, Mg, K y Na) solubles en agua

La fertilidad de los materiales compostados puede ser muy diversa. Algunos presentan una fertilidad muy baja como por ejemplo, los compost de cortezas de diferentes especies arbóreas. Otros sin embargo, presentan unos niveles muy elevados como los compost de RSU o los estiércoles, o bien nivel de fertilidad media o baja como algunos compost de restos de poda. Muchos materiales compostados por lo general, presentan contenidos de fósforo por encima de lo que suelen tener los componentes de turba o corteza de pino, incluso aunque estos últimos hayan recibido fertilización adicional (Masaguer *et al.*, 2015). En la Tabla 11 se muestran los valores medios iniciales del **contenido de fósforo (P) y la concentración de cationes solubles en agua: calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y sodio (Na)** obtenidos en los sustratos estudiados. En cuanto al contenido de P, en el testigo (FC+PE= 51,1 mg L⁻¹ de sustrato) se observó que fue estadísticamente superior ($p \leq 0,05$) con respecto a los otros sustratos. Este valor elevado de P se debe a la fertilización de fondo realizada en este sustrato antes de llegar al laboratorio. Los rangos mínimo y máximo oscilaron entre 19,7 mg L⁻¹ (FC+CPC) y 51,1 mg L⁻¹ (FC+PE) de P, respectivamente. Todos los sustratos estuvieron por encima de los niveles recomendados (6-10 mg L⁻¹ de P) por Abad *et al.* (1993). Además del testigo, RVC+PV (33,7 mg L⁻¹) y RVC+FC (34,5 mg L⁻¹) fueron significativamente mayores ($p \leq 0,05$) con respecto a los sustratos con contenido de corteza de pino compostada (CPC+PV, CPC+FC, FC+CPC y RVC+CPC) que mostraron valores mucho más bajos (Tabla 11). López-Cuadrado *et al.* (2006) encontraron contenidos de P entre 4 y 9 veces superiores en compost de residuos sólidos urbanos (RSU) y lodos de depuradora con respecto a los de turba fertilizada. Guerrero *et al.* (2002) encontraron un menor contenido de fosfato soluble en agua en un compost de corteza de pino con 15% de lodo compostado frente a otro con corteza de pino sin lodo. Por otra parte, dada a la naturaleza orgánica de estos materiales, suelen tener una elevada capacidad de intercambio catiónico (CIC) y un elevado porcentaje de saturación del complejo de cambio. Generalmente los composts presentan contenidos mayores de calcio, potasio y magnesio (tanto en forma total como soluble en agua o en otros extractantes) que los encontrados en sustratos basados en turbas y/o corteza de pino. Por esta razón, la inclusión de productos compostados en las mezclas suele aumentar la disponibilidad de estos nutrientes (Masaguer *et al.*, 2015).

Tabla 11. Contenido de fósforo (P) y concentración inicial de cationes solubles en agua en sustratos ensayados en dos sistemas de naturación urbana, expresados en mg L⁻¹ de sustrato (valores promedios)*.

Sustrato	P (mg L ⁻¹)	Cationes solubles en agua (mg L ⁻¹)			
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
FC+PE (testigo)	51,1 c	50,0 c	16,2 c	123,3 b	52,2 e
RVC+PV	33,7 b	40,5 b	1,2 a	118,1 b	22,0 c
CPC+PV	22,5 a	20,0 a	5,1 b	13,1 a	15,2 b
CPC+FC	23,0 a	38,7 b	7,2 b	10,7 a	6,9 a
FC+CPC	19,7 a	41,5 b	2,0 a	117,5 b	4,9 a
RVC+CPC	23,6 a	41,7 b	2,2 a	110,9 b	23,1 c
RVC+FC	34,5 b	57,2 c	18,2 c	124,1 b	36,8 d
Nivel referencia¹	6-10	>200	>70	150-249	<150

*Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido. ¹Abad *et al.*, 1993.

Los niveles de **Ca, Mg y K** estuvieron por debajo del límite (200, 70 y 150 mg L⁻¹, respectivamente) recomendado por Abad *et al.* (1993). El Ca y el Mg fueron significativamente superiores ($p \leq 0,05$) en RVC+FC (57,2 y 18,2 mg L⁻¹, respectivamente) y en el testigo (50,0 y 16,2 mg L⁻¹, respectivamente) con respecto a los demás sustratos. Los rangos de Ca oscilaron entre 20,0 mg L⁻¹ (CPC+PV) y 57,2 mg L⁻¹ (RVC+CPC), respectivamente. En ese sentido, en el Mg se encontraron entre 1,2 mg L⁻¹ (FC+CPC) y 18,2 mg L⁻¹ (RVC+FC). En cuanto al K fue significativamente menor ($p \leq 0,05$) en sustratos en con mayor proporción de corteza de pino compostada. Los valores de K oscilaron entre 10,1 mg L⁻¹ (CPC+FC) y 124,1 mg L⁻¹ (RVC+FC) (Tabla 11). Algunos tipos de composts presentan concentraciones elevadas de estos nutrientes, lo que puede verse reflejado en una elevada salinidad. Otros sustratos diferentes a los de uso habitual (basados en turba/ corteza de pino) pueden presentar niveles menores de estos nutrientes, como por ejemplo restos de madera (como astillas de pino no compostados) que contienen niveles de Ca, Mg y K (solubles en agua) inferiores a los sustratos comerciales habituales (Jackson *et al.*, 2008).

En cuanto al Na, un contenido elevado podría provocar problemas relacionados con la fitotoxicidad en las plantas. El sodio es un inhibidor del crecimiento; puede ser fácilmente absorbido por las plantas; compite con la absorción de potasio (K⁺), ion amonio (NH₄⁺), y posteriormente calcio y magnesio; es perjudicial para las plantas, ya que produce severas clorosis, crecimiento reducido y marchitamiento severo a concentraciones mayores de 150 a 200 mg L⁻¹. Los valores de Na estuvieron en el orden

de los 4,9 en FC+CPC hasta 52,2 mg L⁻¹ en el sustrato testigo (Tabla 11). A pesar de tener valores cercanos a los 50 mg L⁻¹ (valor correspondiente al testigo), podrían no existir riesgos de fitotoxicidad o alguno de los inconvenientes anteriormente mencionados. El exceso de sales en el polvo de coco (material principal del testigo) se debe al tratamiento con agua salina que se le aplica al fruto del cocotero para facilitar la extracción de la fibra (Ma y Nichols, 2004). Para superar estos problemas el polvo de coco es lavado para eliminar el exceso de sales y se le adiciona una fuente de calcio y magnesio previo a su empleo (De Kreij y Van Leeuwen, 2001).

4.1.4. Selección de sustratos para ensayos en dos sistemas de naturación urbana

En la caracterización de los sustratos los valores obtenidos en el laboratorio permiten establecer los criterios de manejo con el fin de obtener un resultado satisfactorio en el desarrollo de las plantas en el sistema de cultivo de interés. Para establecer la utilidad de materiales orgánicos como componentes de sustratos, Ansorena (1994) indica que es fundamental conocer sus propiedades físicas, hidrofísicas y químicas. Adicionalmente, estos antecedentes permiten valorar posibles riesgos y restricciones de uso y que a la hora de su uso tendrían que tomarse en cuenta. Por lo general, un material para ser utilizado como medio de cultivo se les exige suficientes nutrientes asimilables/ disponibles, baja salinidad, pH ligeramente ácido y moderada capacidad tampón, y una mínima velocidad de descomposición.

4.1.4.1. Criterios de selección de sustratos según la modalidad de ensayo

Para **valorar la aptitud de las mezclas de materiales** (restos de poda compostados, corteza de pino compostada, fibra de coco y puzolana volcánica) como **sustrato de cultivos potenciales para sistemas de naturación urbana propuestos**, se realizó una caracterización inicial con el objeto de establecer las mejores mezclas en dos modalidades de estudios: un **jardín vertical** y una **cubierta vegetal**. Para ello se han sugerido unos **índices o niveles de referencia como valores recomendados** apoyados en los resultados de caracterización inicial, discutidos en el apartado 4.1. Estos índices se resumen en la Tabla 12 y se explican subsecuentemente.

Tabla 12. Valores recomendados de propiedades físicas, hidrofísicas y químicas para sustratos potenciales en dos sistemas de naturación urbana: un jardín vertical y una cubierta vegetal.

Sustrato	Da g cm ⁻³	EPT %	CA %	AFD %	AR %	ADD %	pH -	CE mS m ⁻¹	MO %
FC+PE (Testigo)	0,14	95	38	24	1	32	6,2	39,5	42,5
RVC+PV	0,85	65	40	4	3	18	7,7	30,1	11,9
CPC+PV	0,72	69	38	8	3	21	6,0	22,7	17,5
CPC+FC	0,19	89	42	9	4	35	5,5	46,1	52,6
FC+CPC	0,23	93	41	17	4	31	6,3	69,5	64,3
RVC+CPC	0,36	82	30	17	5	31	8,0	49,2	33,1
RCV+FC	0,39	80	30	17	3	28	7,4	40,2	42,9
¹ Jardín vertical	0,4	>80	30-40	15-30	3-12	20-35	5-7	40-70	>40
² Cubierta vegetal	0,5-1	>75	30-45	15-35	3-12	20-40	6-7,5	40-80	10-40

RVC= restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC= corteza de pino compostada, FC= fibra de coco, PE= poliestireno expandido. Da= densidad aparente, EPT= espacio poroso total, CA= capacidad de aireación, AFD= agua fácilmente disponible, AR= agua de reserva, ADD= agua difícilmente disponible, CE= conductividad eléctrica, MO=materia orgánica. 1 y 2= valores recomendados en este estudio: Propiedades físicas, hidrofísicas y químicas para sustratos en sistemas de naturación urbana (1=jardín vertical; 2=cubierta vegetal).

La **densidad aparente (Da)** considerada en este estudio se estableció en valores menores a 0,4 g cm⁻³ en jardín vertical y entre 0,5 y 1,0 g cm⁻³ en cubierta vegetal. Por debajo de estos valores el sustrato puede resultar demasiado ligero. En la primera modalidad de naturación se buscaba un sustrato de cultivo que permita el desarrollo satisfactorio radicular, sea ligero, sostenga la vegetación y que además, permita una relación adecuada de agua/oxígeno y que a nivel estructural reduzcan el peso de todo el sistema y su efecto sobre la capacidad de carga del edificio. En la segunda modalidad de estudio (cubierta vegetal), además de cumplir buenas características para el desarrollo adecuado de la vegetación se busca que sea estable en el contenedor y que impida el vuelco del sustrato o del sistema. La norma tecnológica de jardinería y paisajismo para cubiertas intensivas (NTJ 11-I) recomienda una Da entre 1,0 y 1,6 g cm⁻³ en sustratos-mezcla y entre 0,6 y 1,3 g cm⁻³ en sustratos a base de fragmentos de materiales minerales, ambos casos sobre materia seca, sin que supere una Da de 1,4-2,2 g cm⁻³ en sustratos-mezclas, ni de 1,0-1,8 g cm⁻³ en sustratos a base de fragmentos de materiales minerales a máxima capacidad de agua.

Los sustratos estudiados tienen un gran número de poros en sus partículas (intra e inter-particulares) y de tamaño ajustados a las curvas granulométricas de sistemas de cubiertas tanto extensivas como intensivas sugeridas por las NTJ-11E y NTJ-11I, respectivamente. Estas características resultan determinantes para la adaptación de las especies vegetales que se establezcan en los sistemas de naturación.

Como consecuencia de la distribución de estas partículas y su disposición en el medio de cultivo, cada sustrato tendrá un comportamiento según la necesidad de agua y aire. Por lo que, la porosidad total recomendada se establece con valores superiores al 80% en el jardín vertical y por encima de 75% en la cubierta vegetal. La NTJ-11E establece un contenido de aire/ agua a máxima capacidad de agua $\geq 35\%$ cuando los sistemas estén provistos de capa drenante y $\geq 20\%$ cuando estén desprovistos de ella. Sin embargo, NTJ-11I establece valores de $\geq 45\%$ a máxima capacidad de agua y un contenido de aire a máxima capacidad de agua $\geq 10\%$. Las capacidades de aireación en el jardín vertical se sugieren entre 30-40%, mientras que en cubiertas vegetales se sugiere un rango más amplio (30-45%). Esto se debe a que en el primero hay sustratos con partículas más finas, los cuáles requerirán un control de riego especial para no condicionar la aireación. Lo que indica que sustratos con mayor retención permiten espaciar los riegos debido a la mayor disponibilidad de AFD.

Las **propiedades químicas** representadas por **pH, CE y MO** condicionan la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Los sustratos estudiados podrían garantizar pH adecuados y moderada capacidad tampón, baja salinidad y una velocidad mínima de descomposición, características ideales para establecer un jardín vertical y/o una cubierta vegetal. A partir de los criterios expuestos anteriormente y como **aporte principal de esta tesis doctoral** en la Tabla 13 y Tabla 14 se presentan los sustratos seleccionados para cada uno de los ensayos, según la modalidad: un jardín vertical y una cubierta vegetal, respectivamente, acompañado de **índices o valores recomendados de acuerdo a nuestro razonamiento**.

Tabla 13. Selección de sustratos en el jardín vertical y valores recomendados de acuerdo a los criterios basados en la evaluación de las propiedades.

Sustrato	Da	EPT	CA	AFD	AR	ADD	pH	CE	MO
FC+PE (Testigo)	0,14	95	38	24	1	32	6,2	39,5	42,5
CPC+FC	0,19	89	42	9	4	35	5,5	46,1	52,6
FC+CPC	0,23	93	41	17	4	31	6,3	69,5	64,3
RVC+CPC	0,36	82	30	17	5	31	8,0	49,2	33,1
RCV+FC	0,39	80	30	17	3	28	7,4	40,2	42,9
Índice sugerido	0,4	>80	30-40	15-30	3-12	20-35	5-7	40-70	> 40

FC=fibra de coco, PE= poliestireno expandido, CPC= corteza de pino compostada, RVC= restos vegetales compostados. Da= densidad aparente, EPT= espacio poroso total, CA= capacidad de aireación, AFD= agua fácilmente disponible, AR= agua de reserva, ADD= agua difícilmente disponible, CE= conductividad eléctrica, MO=materia orgánica.

Tabla 14. Selección de sustratos en la cubierta vegetal y valores recomendados de acuerdo a los criterios basados en la evaluación de las propiedades.

Sustrato	Da	EPT	CA	AFD	AR	ADD	pH	CE	MO
RVC+PV	0,85	65	40	4	3	18	7,7	30,1	11,9
CPC+PV	0,72	69	38	8	3	21	6,0	22,7	17,5
CPC+FC	0,19	89	42	9	4	35	5,5	46,1	52,6
RVC+CPC	0,36	82	30	17	5	31	8,0	49,2	33,1
RCV+FC	0,39	80	32	17	3	28	7,4	40,2	42,9
Índice sugerido	0,5-1	>75	30-45	15-35	3-12	20-40	6-7,5	40-80	10-40

CPC= corteza de pino compostada, PV= puzolana volcánica, RVC= restos vegetales compostados. Da= densidad aparente, EPT= espacio poroso total, CA= capacidad de aireación, AFD= agua fácilmente disponible, AR= agua de reserva, ADD= agua difícilmente disponible, CE= conductividad eléctrica, MO=materia orgánica.

Para el **ensayo en jardinería vertical** se tomaron en cuenta los materiales más ligeros, de fácil manipulación, transporte e instalación. También, aquellos que presentaron buena porosidad y alta retención de humedad, además de pH y CE adecuados. Para el **ensayo en la cubierta vegetal** se utilizaron los sustratos menos ligeros que garanticen su permanencia firme ante el viento pero que no supongan demasiado peso en la estructura.

La **elevada Da** observada en los sustratos con puzolana volcánica (PV) podría limitar su uso en sistemas de jardines verticales. Para el jardín vertical se descartaron los sustratos que tuviesen una densidad aparente no superior a $0,40 \text{ g cm}^{-3}$. Todo ello para minimizar los efectos sobre el apoyo a la capacidad de soporte de carga de la pared de instalación y por otro lado, reducir la compactación del sustrato. Los sustratos con **puzolana volcánica** presentaron problemas de porosidad y baja retención en comparación con los sustratos orgánicos, los cuales presentaron valores más adecuados. Los sustratos con mayor proporción de **materiales orgánicos** retienen mayor humedad. Esta retención fue baja en sustratos con puzolana volcánica. Los sustratos con **proporciones de corteza de pino compostada y fibra de coco** presentaron valores adecuados de pH, ideal para la asimilación de los nutrientes. Por otro lado, los sustratos mostraron salinidad adecuada, lo cual es otro factor determinante en cuanto a la buena disponibilidad de nutrientes. Los **sustratos con materiales compostados** son más estables en el tiempo. Se consideró la C/N para conocer su estado de madurez.

4.2. SUSTRATOS POTENCIALES EN UN JARDÍN VERTICAL

4.2.1. Evolución de los sustratos establecidos en el jardín vertical

Con la finalidad de conocer el **comportamiento** y la **evolución** de los sustratos establecidos en el ensayo del jardín vertical, se determinaron las **propiedades físicas y químicas** en tres fechas de evaluación (muestreo) durante su establecimiento: i) al **primer año** (julio 2013) y ii) **segundo año** (julio 2014) y iii) **al finalizar del ensayo** (diciembre de 2014).

4.2.1.1. Densidad aparente

La densidad aparente (D_a) de los sustratos en los dos primeros años de establecido el jardín vertical fue estable ($0,26 \text{ g cm}^{-3}$, en julio 2013 y $0,27 \text{ g cm}^{-3}$, en julio 2013), sin embargo, al final del ensayo (diciembre 2014) se mostró significativamente mayor ($p \leq 0,05$) con un valor de $0,33 \text{ g cm}^{-3}$. Durante el ensayo los valores registrados se mantuvieron por debajo del límite superior óptimo ($0,4 \text{ g cm}^{-3}$) (Ansorena, 1994; Abad *et al.*, 2001) (Figura 40). Es importante que la D_a se mantenga en el tiempo del jardín debido a que indica que el sustrato se mantiene estable y no tiende a compactarse, contribuyendo a mantener la humedad y la densificación del mismo.

Figura 40. Valores medios* de densidad aparente (D_a) en el jardín vertical, según la fecha de muestreo.

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD. Abad *et al.* (1993): nivel de referencia: $D_a = 0,4 \text{ g cm}^{-3}$. Niveles de referencia sugerido en este estudio: $D_a = 0,4 \text{ g cm}^{-3}$.

En la Figura 41 se muestra la Da en los sustratos estudiados, según la fecha de muestreo. Todos los sustratos mantienen sus densidades a lo largo del tiempo, es decir, los sustratos inicialmente menos densos por la naturaleza de sus mezclas (principalmente por el aporte de la fibra de coco y corteza de pino) se mantienen esta propiedad baja durante todo el ensayo.

Figura 41. Valores medios* de densidad aparente (Da) en los sustratos ensayados en el jardín vertical, según la fecha de muestreo.

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido. Abad *et al.* (1993): nivel de referencia: $Da = >0,4 \text{ g cm}^{-3}$. Niveles de referencia sugerido en este estudio: $Da = 0,4 \text{ g cm}^{-3}$.

Esta misma tendencia se mantiene en los sustratos con mayor densidad inicial. Los mayores promedios de densidad aparente correspondieron a los materiales de restos vegetales compostados con valores de $0,33$, $0,37$ y $0,42 \text{ g cm}^{-3}$ (RVC+CPC) en julio 2013, julio 2014 y diciembre 2014, respectivamente y $0,36$, $0,35$ y $0,43 \text{ g cm}^{-3}$ (RVC+FC) en julio 2013, julio 2014 y diciembre 2014, respectivamente (Figura 41). Este incremento en la Da podría estar influenciado por el desarrollo del sistema radicular dentro de los sacos de cultivo.

4.2.1.2. pH y conductividad eléctrica (CE)

La capacidad de los sustratos para adsorber cationes metálicos depende del pH, cuanto más alto es el pH, más elevada es la capacidad de intercambio catiónico. El pH produce efecto sobre la asimilabilidad de los nutrientes.

Masaguer *et al.* (2015) indican que este efecto ocurre cuando el pH se encuentra entre 5 y 6,5, debido a que por debajo de este intervalo se podrían presentar deficiencias de nitrógeno, potasio, calcio, magnesio o boro, mientras que por encima del límite superior podría disminuir la asimilabilidad de fósforo, hierro, manganeso, zinc y cobre. La Figura 42 muestra el pH obtenido en los sustratos en distintas fechas de muestreo durante el período de ensayo del jardín vertical.

Figura 42. Valores medios* de pH obtenidos en sustratos orgánicos en tres fechas de muestreo durante su establecimiento en el jardín vertical.

*Medias con una letra común en un mismo grupo de barras y para una misma fecha no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido. Abad *et al.* (1993): nivel de referencia: pH=5,5-6,8. Niveles de referencia sugerido en este estudio: pH= 6-7.

Durante el primer año de establecido el ensayo se mostró un pH significativamente menor ($p \leq 0,05$) con respecto a la evaluación realizada a final del ensayo, sin embargo, no difirió significativamente ($p \leq 0,05$) al pH registrado al segundo año (Figura 42). Cabe destacar que antes de la instalación del ensayo se aplicó una fertilización de fondo con fertilizante de liberación lenta de hasta nueve meses, lo cual estimularía a mantener el pH por debajo de 6,7. Durante las evaluaciones subsiguientes el pH aumentó a valores de 7,0 en julio 2014 y 7,3 en diciembre 2014, lo que probablemente estuviese favorecido por el fertilizante añadido el cual pudo haber sido consumido en su totalidad por las plantas o a que el pH de los sustratos se acercara al pH del agua de riego (7,4). La incorporación de materiales compostados a los medios de cultivo por añadidura lleva un aumento de la salinidad derivado de la CE alta que suelen presentar dichos materiales. Masaguer y Benito (2008) indicaron que la CE de un material compostado varía entre 6,5 y 8,0 mS m^{-1} dependiendo de la fuente de origen del sustrato. La CE fue significativamente superior en la segunda evaluación (julio 2014) mostrándose diferencias ($p \leq 0,05$) en los tres períodos de muestreo. La CE registrada fue de 13,3 mS m^{-1} en julio 2013, 31,4 mS m^{-1} en julio 2014 y 21,5 mS m^{-1} en diciembre 2014 (Figura 42). Una mayor riqueza en nitrógeno y un elevado grado de mineralización puede dar lugar a mayor CE debido a los iones de amonio y nitrato aportados en la fertilización al inicio del ensayo.

En materiales compostados su propio proceso de elaboración determina normalmente un aumento en el pH. Si se trata de materiales maduros suelen presentar pH desde ligeramente básico (7,5-8,5) a básico ($>8,5$). En la Figura 43 se muestra la **evolución del pH** obtenido en los **sustratos evaluados en el jardín vertical, según la fecha de muestreo**. En CPC+FC y FC+CPC el pH fue significativamente menor ($p \leq 0,05$) en las tres fechas de evaluación (Figura 43). Se observa que todos los sustratos estudiados presentan pH neutro o ligeramente ácido. Los valores de pH obtenidos en CPC+FC fue de 6,0 en julio 2013, de 6,6 en julio 2014 y de 6,8 en diciembre 2014. Mientras que en FC+CPC fue de 6,0, en julio 2013, 6,4 en julio y de 7,1 en diciembre 2014 (Figura 43). Masaguer *et al.* (2015) indicaron que sustratos como la turba y la corteza de pino suelen presentar pH ácido, generalmente entre 3,5 y 4,5, en el caso de las turbas y alrededor de 5 en el caso de la corteza de pino. Por lo que los niveles de pH en estos dos sustratos pudieron aumentar debido a la presencia de la fibra de coco.

Bunt (1988) indica que el pH óptimo para cultivo de plantas ornamentales en contenedores es de 5,2 a 6,3.

Figura 43. Valores medios* de pH obtenidos en sustratos orgánicos establecimiento en el jardín vertical, en tres fechas de muestreo.

*Medias con una letra común en un mismo grupo de barras y para una misma fecha no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido. Abad *et al.* (1993): nivel de referencia: pH=5,5-6,8. Niveles de referencia sugerido en este estudio: pH= 6-7.

Los sustratos con restos vegetales compostados (RVC+CPC= 7,4; RVC+FC= 7,3) y el testigo (6,8) fueron significativamente mayores ($p \leq 0,05$) en las tres fechas de muestreo. En ese sentido, RVC+CPC y RVC+FC superaron los niveles recomendados (5,5-6,8) por Abad *et al.* (1993) en las tres evaluaciones, sin embargo el testigo sólo se mantuvo en esos rango el primer año de establecido. López-Cuadrado *et al.* (2006), Ostos *et al.* (2008) y Barral-Silva (2007) en compost de residuos sólidos urbanos con restos de poda reportaron pH de 7,6, 7,0 y 7,3, respectivamente. En cuanto al pH los sustratos CPC+FC y FC+CPC se ajustan a los criterios sugeridos en este estudio y para este ensayo en jardinería vertical (pH=5-7). Por lo que la selección de especies vegetales en este sistema de jardinería sería un punto importante a tomar en consideración debido a que se podría utilizar más bien plantas acidófilas que desarrollarían bien en sustratos con pH desde 5 (bajo) hasta 6 (alto) como el CPC+FC Y FC+CPC o bien plantas neutrófilas con pH desde 5,5 (bajo) < 6,5 (elevado) < 7 (muy

alto) donde encajaría el sustrato testigo. El origen y la naturaleza de los materiales compostados y el propio proceso de compostaje pueden determinar un mayor o menor nivel de sales. En la Figura 44 se presenta la **CE obtenida durante el tiempo de establecido el jardín vertical**, según la **fecha de muestreo**.

Figura 44. Valores medios* de conductividad eléctrica (CE) obtenidos en sustratos ensayados en el jardín vertical en tres evaluaciones durante su establecimiento.

*Medias con una letra común en un mismo grupo de barras y para una misma fecha no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido. Carmona y Abad (2008): nivel de referencia: CE=15-50 mS m^{-1} . Niveles de referencia sugerido en este estudio: CE= 40-70 mS m^{-1} .

La CE registrada en el primer año de evaluación fue más baja (entre 12,1 mS m^{-1} (testigo) y 15,7 mS m^{-1} (FC+CPC)) en relación a los valores registrados al segundo año donde hubo un incremento importante de CE. Bunt (1988) establece que valores de CE entre 20 y 35 mS m^{-1} son niveles de salinidad satisfactorios para el buen desarrollo de la mayoría de plantas. Por otro lado, Abad *et al.* (1993) establece un rango óptimo de 75-350 mS m^{-1} . Sin embargo, Abad *et al.* (2002) considera que la CE de un sustrato debe oscilar entre 150-200 mS m^{-1} . Los sustratos FC+CPC (40,5 mS m^{-1}) y RVC+CPC (43,9 mS m^{-1}) superaron valores en torno a los 40 mS m^{-1} . No obstante, al final del ensayo estos valores se redujeron en un 45 y 47%, respectivamente, al igual que el testigo, el cual disminuyó en un 37% con respecto al segundo año (julio 2014). CPC+FC y RVC+FC mantuvieron los niveles de CE de julio 2014 con respecto a los valores finales (Figura 44).

Este incremento de CE en el segundo año pudo deberse a la fertirrigación realizada durante este año para compensar los nutrientes. Masaguer *et al.* (2015) indican que la salinidad del sustrato puede aumentar durante el cultivo bien sea por la utilización de fertilizantes de liberación lenta o por fertilización en exceso cuando el sustrato tiene una elevada capacidad de intercambio catiónico.

4.2.1.3. Materia orgánica (MO), relación C/N y nitrógeno (N)

En el estudio de los componentes materia orgánica y nitrógeno total destaca la relación C/N. La primera informa el origen de los materiales, principalmente del origen orgánico o mineral del sustrato, además del contenido de carbono orgánico con la aplicación del factor de conversión de “Van Bemmelen” (1,724). Por otro lado, el segundo indica la reserva de nitrógeno como nutriente. Por lo que, conocidos ambos puede calcularse la relación C/N que permite conocer el grado de estabilización de las mezclas, principalmente compostadas. La Figura 45 muestra la variación de la **materia orgánica (MO) y la relación carbono/nitrógeno (C/N)** según la época de muestreo.

Figura 45. Valores medios* de Materia orgánica (MO) y relación carbono/nitrógeno (C/N) en sustratos ensayados en el jardín vertical, según la fecha de muestreo.

*Medias con una letra común en un mismo grupo de barras y para una misma variable no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD. MO=materia orgánica, C/N=relación carbono/nitrógeno; N=nitrógeno. Abad *et al.* (1993): MO: >80 y C/N: 20-40. Índice de referencia sugerido en este estudio: MO= >40 .

El **%MO** durante los primeros dos años de establecido el jardín vertical fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) y superó el 50% (MO=55% en julio 2013; MO=53% en julio 2014), durante ese período la MO se mantiene estable. Al final del ensayo el contenido de MO se redujo a 38%, pudiendo acontecer un proceso de degradación microbiana.

La **relación C/N** tiene una influencia notable en el comportamiento físico y químico de los sustratos en el tiempo. En cuanto a la relación C/N, ésta se mantuvo entre fechas, por lo que no hubo diferencias significativas ($p \leq 0,05$) y fue de 41 en julio 2014, 38 en julio 2014 y 39 en diciembre 2014, respectivamente (Figura 45). El intervalo óptimo de esta relación es cercano al intervalo sugerido por Abad *et al.* (1993) donde explica que una relación C/N entre 20 y 40 indicaría que los materiales utilizados como mezclas de sustratos se encuentran en estado estable y maduro. Relaciones bajas o medias (20-30) no son interesantes, dado a que su alto grado de mineralización suele implicar pérdida de estructura y variaciones en la porosidad ligadas a la colmatación de los poros finos. Por otro lado, una relación C/N menor de 30 favorece la descomposición de los sustratos debido a la actividad microbiana, mientras que sustratos con alto C/N (pocos maduros) inducen a problemas de inmovilización de nitrógeno (Masaguer *et al.*, 2015). Además, una relación baja de C/N podría indicar pérdidas de N por volatilización como amoníaco, lo que podría producir malos olores en el sustrato.

La Figura 46 muestra el **porcentaje de nitrógeno (%N)** según la época de muestreo. El nitrógeno se mantiene con un valor superior al 85% a lo largo del ensayo por lo que no ocurre variabilidad entre fechas (Figura 46). El contenido de nitrógeno en los sustratos puede verse influenciado por la aplicación del fertilizante de liberación lenta (hasta 9 meses) aplicado al inicio del ensayo, luego mantenerse gracias a por las aplicaciones de nutrientes a través de la fertirrigación realizada al segundo año y por último, mantenerse debido a la presencia de materia orgánica en los sustratos, la cual en la mayoría de los casos actúa como un reservorio dosificador de nutrientes.

Figura 46. Valores medios* de nitrógeno (N) en sustratos ensayados en el jardín vertical, según la fecha de muestreo.

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD. MO=materia orgánica, C/N=relación carbono/nitrógeno; N=nitrógeno.

La Figura 47 muestra la **materia orgánica (MO)**, **nitrógeno (N)** y la **relación carbono/nitrógeno (C/N)** en tres fechas de muestreo (julio 2013, julio 2014 y diciembre 2014) **según el sustrato**. El contenido de la materia orgánica principalmente varía en función de la naturaleza de las mezclas utilizadas. Debido a ello la MO fue significativamente superior ($p \leq 0,05$) en el sustrato testigo, en CPC+FC y en FC+CPC durante julio 2013 y julio 2014. Al final del ensayo (diciembre 2014) sólo fue superior en CPC+FC (Figura 47). Los sustratos con materiales fibra de coco (testigo) y corteza de pino compostada mezclada con fibra de coco en sus dos variantes (CPC+FC y FC+CPC) mantienen estabilidad estructural en julio 2013 y julio 2014. En diciembre 2014, estos sustratos sufren un descenso importante probablemente provocado por la mineralización de MO. No obstante, los sustratos con restos vegetales compostados se mantienen con valores inferiores durante el periodo de establecido el jardín vertical, con respecto a los demás sustratos. Este resultado coincide con López-Cuadrado *et al.* (2006) donde reportó un valor más bajo en un sustrato con restos de poda.

Figura 47. Valores medios* de porcentajes de materia orgánica (MO) y nitrógeno y la relación C/N obtenidas en sustratos ensayados en el jardín vertical en tres evaluaciones durante su establecimiento.

*Medias con una letra común en una misma fecha no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido. Abad *et al.* (1993): nivel de referencia: MO: >80; C/N: 20-40. Índice de referencia sugerido en este estudio: MO: >40.

Los rangos de MO a lo largo del ensayo estuvieron entre 38% (RVC+CPC) y 63% (FC+PC y CPC+FC) en julio 2013 y entre 43% (RVC+FC) y 64% (FC+PE) en julio 2014. En diciembre 2014 el mínimo y el máximo estuvieron en 35% (RVC+CPC y RVC+FC) y 45% (CPC+FC), respectivamente (Figura 47). Durante los primeros dos años el N se mantuvo prácticamente estable. El comportamiento de %N fue similar en julio 2013 con respecto a julio 2014. Los rangos de N fluctuaron entre 0,7% (CPC+FC) y 1,1% (RVC+CPC), tanto en julio 2013 como en julio 2014; y entre 0,8% (CPC+FC; FC+CPC) y 0,9% (RVC+CPC; RVC+FC) en diciembre 2014 (Figura 47). Los sustratos con restos vegetales compostados fueron significativamente mayores ($p \leq 0,05$) con valores de alrededor del 1%. RVC+CPC y RVC+FC disminuyeron ligeramente hacia el final del ensayo. El testigo fue mayor consecutivamente a los sustratos con restos de poda con 0,9% de N en julio 2013, redujo ligeramente a 0,8% de N en julio 2014 y al final del ensayo se igualó al valor inicial (0,9%). Domeño *et al.* (2009) reportaron valores de 0,5% en fibra de coco sin utilizar y un valor de 0,9% después de seis meses de uso en cultivo. Se observa una marcada diferencia en la relación C/N entre los sustratos elaborados con restos vegetales compostados y los que en su elaboración contienen fibra de coco y corteza de pino, además del sustrato testigo que en julio 2013 y julio 2014 obtuvieron una relación C/N significativamente superior ($p \leq 0,05$). Los sustratos de restos vegetales compostados mostraron relaciones C/N bajas debido principalmente a su alto contenido de nitrógeno. En el primer año de muestreo, los valores mínimos y máximos oscilaron entre 20 (RVC+CPC) y 51 (FC+CPC), respectivamente. En Julio 2014, entre 26 (RVC+CPC) y 54 (FC+CPC) y en diciembre 2014 entre 35 (FC+CPC) y 45 (CPC+FC) (Figura 47). De acuerdo a Abad, Noguera y Carrión (1998), RVC+FC se encuentran en el valor óptimo, ya que señalan que una relación C/N en torno a 30 es considerada adecuada o es un valor ideal para el cultivo en sustratos orgánicos, y es un índice de un material maduro y estable. Abad *et al.* (1993) sugieren una relación C/N entre 20 y 40. Una relación C/N por debajo de un valor de 30 favorecería la descomposición de los sustratos debido a la actividad de los microorganismos. Sin embargo, Lemaire (1997) y Sánchez-Hernández *et al.*, (2007) indican que la relación C/N no es suficiente para considerar a un material orgánico como estabilizado. RVC+FC y RVC+CPC se ajustan a los niveles recomendados por Abad y Noguera (2000) y a los índices sugeridos en este estudio para este ensayo en el jardín vertical.

4.2.2. Modificación de los sustratos según la especie vegetal

Las plantas que crecen en contenedores, especialmente las que duran confinadas por largos periodos, normalmente desarrollan mayor cantidad de raíces en el fondo y en el espacio entre el sustrato y las paredes del contenedor. Los valores que recogen la Figura 48 muestran que los sustratos con restos vegetales compostados en *Frankenia* y en *Pachysandra* destacan por tener mayor densidad aparente (D_a) durante las tres fechas de muestreo, encontrándose dentro de los niveles citados por Morel *et al.* (2000). En **Frankenia**, los valores mínimos y máximos de D_a oscilaron entre 0,15 (testigo) y 0,38 g cm^{-3} (RVC+CPC) en julio 2013, entre 0,13 (testigo) y 0,41 g cm^{-3} (RVC+FC) en julio 2014 y entre 0,21 (testigo) y 0,49 g cm^{-3} (RVC+FC) en diciembre 2014, respectivamente.

En **Pachysandra**, se presenta un comportamiento similar con respecto a esta variable. Los valores mínimos y máximos registrados de D_a registrados en el testigo y en RVC+FC, respectivamente, durante las tres evaluaciones oscilaron entre 0,13 y 0,35 g cm^{-3} en julio 2013, entre 0,11 y 0,31 g cm^{-3} en julio 2014 y entre 0,21 y 0,40 g cm^{-3} en diciembre 2014, respectivamente (Figura 48). López-Cuadrado *et al.* (2006) destaca valores de 0,29 g cm^{-3} en sustratos de restos de podas y 0,24 g cm^{-3} en sustratos de corteza de pino, ambos casos ensayados con *Osteospermum eklonis*. El testigo mostró menor densidad debido a la composición por su naturaleza en ambas especies. Es importante notar que la densidad aparente presentó muy poca variación durante el periodo de establecido el jardín vertical.

Figura 48. Valores medios* de densidad aparente (D_a) obtenida en sustratos ensayados en el jardín vertical, según la especie vegetal (*Frankenia*, arriba; *Pachysandra*, abajo) en tres evaluaciones durante su establecimiento.

*Medias con una letra común en una misma fecha no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido. Abad *et al.* (1993): nivel de referencia: $D_a = < 0,4 \text{ g cm}^{-3}$. Niveles sugeridos en este estudio: $D_a =$

Conocer el pH y la CE antes de establecer un cultivo permite dar una idea sobre la disponibilidad de los nutrientes para las plantas. En la Figura 49 y Figura 50 se muestran valores de **pH y CE** en los sustratos, respectivamente, **según la especie vegetal: *Frankenia thymifolia* y *Pachysandra terminalis***, en tres periodos de evaluación. El pH reflejó un comportamiento similar, tanto en *Frankenia laevis* como en *Pachysandra terminalis* con respecto al tipo de sustrato; fue significativamente superior ($p \leq 0,05$) en el testigo y en sustratos con restos de podas compostados (RVC+CPC y RVC+FC) en las dos especies durante los tres periodos de evaluación

(Figura 49). En *Frankenia*, el pH osciló entre 6,0 (FC+CPC) y 7,5 (RVC+CPC) en julio 2013; entre 6,1 (FC+CPC) y 7,2 (RVC+CPC; RVC+FC y FC+PE) en julio 2014 y entre 6,4 (CPC+FC) y 7,6 (FC+PE) en diciembre 2014. En ese sentido, en *Pachysandra*, el pH fluctuó entre 5,9 (CPC+FC) y 7,2 (RVC+CPC; RVC+FC) en julio 2013, 6,7 (CPC+FC; FC+CPC) y 7,4 (RVC+CPC; RVC+FC) en julio 2014 y entre 7,1 (CPC+FC) y 7,8 (FC+PE) en diciembre 2014 (Figura 49).

Figura 49. Valores medios* de pH obtenido en sustratos ensayados en el jardín vertical, según la especie vegetal (*Frankenia*, arriba; *Pachysandra*, abajo) en tres evaluaciones durante su establecimiento.

*Medias con una letra común en una misma fecha no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido. Abad *et al.* (1993): nivel de referencia: pH= 5,5-6,8. Nivel de referencia sugerido en este estudio: pH= 6-7.

Si el pH del sustrato se encuentra en el rango óptimo (entre 5,0-6,8) la mayoría de los nutrientes mantiene su máximo nivel de solubilidad (Baixauli y Aguilar, 2002). Por debajo de este rango, pueden presentarse deficiencias de N, K, Ca y Mg, mientras que valores superiores a este rango puede disminuir la solubilidad de Fe, P, Mn, Zn y Cu (Abad, *et al.*, 2005). El primer año el testigo, CPC+FC y FC+CPC reflejaron valores dentro de los niveles de referencia recomendados (pH= 5,5-6,8) por Abad *et al.* (1993), tanto en Frankenia como Pachysandra. En ese sentido, el segundo año y al final del ensayo CPC+FC y FC+CPC estuvieron dentro de ese intervalo solo en Frankenia.

Todos los sustratos mantuvieron una CE adecuada durante su establecimiento en el jardín vertical, tanto en Frankenia como en Pachysandra, a excepción de FC+CPC ($52,9 \text{ mS m}^{-1}$) en Pachysandra que en julio 2014, superó ligeramente el nivel recomendado por Carmona y Abad (2008) (entre 15 y 50 mS m^{-1}). El rango de CE adecuado se encuentra entre 15 a 30 mS m^{-1} (Carrasco *et al.*, 2007), no obstante, Carmona y Abad (2008) recomiendan un límite superior de hasta 50 mS m^{-1} . Los rangos de CE registrados en julio 2013 no mostraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre sustratos en las dos especies. Los rangos oscilaron entre $9,1 \text{ mS m}^{-1}$ (testigo) y $17,2 \text{ mS m}^{-1}$ (FC+CPC) en Frankenia; y entre $13,3 \text{ mS m}^{-1}$ (RVC+CPC) y $15,1 \text{ mS m}^{-1}$ (CPC+FC) en Pachysandra. En julio 2014, CE en Frankenia fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) en RVC+CPC ($40,2 \text{ mS m}^{-1}$), seguido de FC+CPC ($28,2 \text{ mS m}^{-1}$). CPC+FC ($15,6 \text{ mS m}^{-1}$) fue significativamente menor ($p \leq 0,05$) que todos los sustratos, pero igual a RVC+FC ($18,3 \text{ mS m}^{-1}$). En Pachysandra, FC+CPC ($52,9 \text{ mS m}^{-1}$) y RVC+CPC ($47,7 \text{ mS m}^{-1}$) fueron significativamente mayores ($p \leq 0,05$) en Julio 2014. Los rangos mínimos y máximos de CE registrados en julio 2014 oscilaron entre $15,6 \text{ mS m}^{-1}$ (CPC+FC) y $40,2 \text{ mS m}^{-1}$ (RVC+CPC), respectivamente, en Frankenia; mientras que en Pachysandra estos rangos se encontraron entre $27,7 \text{ mS m}^{-1}$ (RVC+CPC) y $52,9 \text{ mS m}^{-1}$ (FC+CPC). En diciembre 2014, en Frankenia no hubo diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre sustratos. El rango de CE estuvo entre $16,1 \text{ mS m}^{-1}$ (testigo) y $22,2 \text{ mS m}^{-1}$ (RVC+FC). En Pachysandra, RVC+FC ($28,4 \text{ mS m}^{-1}$) fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) que el testigo ($18,51 \text{ mS m}^{-1}$) y que CPC+FC ($20,63 \text{ mS m}^{-1}$) (Figura 50).

Figura 50. Valores medios* de conductividad eléctrica (CE) obtenido en sustratos ensayados en el jardín vertical, según la especie vegetal (*Frankenia*, arriba; *Pachysandra*, abajo) en tres evaluaciones durante su establecimiento.

*Medias con una letra común en una misma fecha no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido. Niveles: Carmona y Abad (2008): 15-50 mS m^{-1} . En este estudio: 40-70 mS m^{-1} .

En la Figura 51 se presentan la **materia orgánica (MO)**, **nitrógeno (N)** y la **relación carbono/nitrógeno (C/N)** obtenidos en sustratos con *Frankenia laevis*, según fecha de muestreo. El comportamiento de MO fue similar en julio 2013 y en julio 2014, debido a que hubo diferencias significativamente mayores ($p \leq 0,05$) en el testigo (65% y 64%, respectivamente), CPC+FC (61% y 60%, respectivamente) y FC+CPC (66% y 63%, respectivamente). En diciembre 2014 no hubo diferencias entre sustratos.

Figura 51. Valores medios* de materia orgánica (MO), relación carbono/ nitrógeno (C/N) y nitrógeno (N) obtenidos en sustratos con *Frankenia laevis* ensayados en el jardín vertical en tres evaluaciones durante su establecimiento.

*Medias con una letra común en una misma fecha no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido. Abad *et al.* (1993): nivel de referencia: MO: $>80\%$ y C/N: 20-40. Índice de referencia sugerido en este estudio: MO= >40 .

Los rangos de MO en Frankenia oscilaron entre 46% (RVC+CPC; RVC+FC) y 66% (FC+CPC), respectivamente, en Julio 2013; entre 37% (RVC+FC) y 64% (testigo), respectivamente, en julio 2014; y entre 32% (RVC+FC) y 44% (CPC+FC), respectivamente, en diciembre 2014 (Figura 51). Se observó un descenso importante en la MO al final del ensayo (diciembre 2014) con respecto a los valores de julio 2013 y julio 2014, lo cual se podría atribuir a la mineralización de los sustratos.

En cuanto al N, en julio 2013 y julio 2014 RVC+CPC y RVC+FC se mostraron significativamente superiores ($p \leq 0,05$) que el testigo y que los sustrato con corteza de pino compostada (CPC+FC; FC+CPC). En diciembre 2014 no hubo diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre sustratos. Los valores medios mínimos y máximos en julio 2013 fluctuaron entre 0,63% (CPC+FC y FC+CPC) y 1,04% (RVC+CPC), respectivamente; en julio 2014 estos rangos estuvieron entre 0,64% (CPC+FC) y 1,04% (RVC+CPC), respectivamente; y entre 1% (RVC+FC) y 0,83% (FC+CPC) (Figura 51).

La relación C/N registrada en Frankenia muestra un comportamiento similar al de la MO, debido a que muestra valores significativamente superiores ($p \leq 0,05$) en el testigo, CPC+FC y FC+CPC con respecto a los sustratos con contenido de restos vegetales compostado, tanto en julio 2013 como en julio 2014. En diciembre no mostraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$). Los rangos de relación C/N en Frankenia oscilaron entre 27 (RVC+CPC) y 61 (FC+CPC), respectivamente, en Julio 2013; entre 22 (RVC+FC) y 57 (FC+CPC), respectivamente, en julio 2014; y entre 36 (FC+CPC) y 45 (CPC+FC), respectivamente, en diciembre 2014 (Figura 51). En julio 2013 y julio 2014 se registró una relación C/N por encima del valor máximo recomendado en el testigo y en los sustratos con fibra de coco y corteza de pino compostada en sus dos variantes (Figura 51). Valores altos en la relación C/N conllevan a una mineralización más lenta (Castillo *et al.*, 2000) en los sustratos.

En la Figura 52 se presentan la **materia orgánica (MO)**, **nitrógeno (N)** y la **relación carbono/nitrógeno (C/N)** obtenidos en sustratos con *Pachysandra terminalis*, según fecha de muestreo.

Figura 52. Valores medios* de materia orgánica (MO), relación carbono/ nitrógeno (C/N) y nitrógeno (N) obtenidos en sustratos con *Pachysandra terminalis* ensayados en el jardín vertical en tres evaluaciones durante su establecimiento.

*Medias con una letra común en una misma fecha (horizontal) no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco, PE=poliestireno expandido. Abad *et al.* (1993): nivel de referencia: MO: $>80\%$ y C/N: 20-40. Índice de referencia sugerido en este estudio: MO= >40 .

Al primer y segundo año de establecido el jardín vertical el comportamiento del %MO en los sustratos con *Pachysandra* fue similar que con *Frankenia*. El %MO fue significativamente superior ($p \leq 0,05$) en el testigo (62%), CPC+FC (62%) y FC+CPC (59%). En diciembre 2014 sólo CPC+ FC (47%) fue significativamente superior ($p \leq 0,05$) que el resto de los sustratos. Los rangos de MO en *Frankenia* oscilaron entre 46% (RVC+CPC; RVC+FC) y 66% (FC+CPC), respectivamente, en Julio 2013; entre 37% (RVC+FC) y 64% (testigo), respectivamente, en julio 2014; y entre 32% (RVC+FC) y 44% (CPC+FC), respectivamente, en diciembre 2014 (Figura 52). Se observó un descenso importante en la MO al final del ensayo (diciembre 2014) con respecto a los valores de julio 2013 y julio 2014, lo cual se podría atribuir a la mineralización de los sustratos.

El N fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) en RVC+CPC y RVC+FC, en los dos primeros años. En diciembre 2014 no hubo diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre sustratos. El mínimo y máximo de N fluctuó entre 0,76% (CPC+FC) y 1,09% (RVC+CPC), respectivamente en julio 2013. No obstante, en julio 2014 estuvieron entre 0,74% (CPC+FC) y 1,14% (RVC+CPC), respectivamente; y en diciembre 2014 entre 0,78% (CPC+FC) y 0,93% (RVC+CPC) (Figura 52).

La relación C/N en *Pachysandra* muestra un comportamiento similar al de la MO, debido a que presenta valores significativamente superior ($p \leq 0,05$) en el testigo, en CPC+FC y FC+CPC con respecto a los de contenido de restos vegetales compostados, tanto en julio 2013 como en julio 2014. En diciembre no mostraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$). Los rangos de C/N en *Pachysandra* oscilaron entre 24 (RVC+CPC; RVC+FC) y 49 (CPC+FC), respectivamente, en Julio 2013; entre 19 (RVC+FC) y 47 (CPC+FC), respectivamente, en julio 2014; y entre 35 (FC+CPC) y 46 (CPC+FC), respectivamente, en diciembre 2014 (Figura 52). En julio 2013 y julio 2014 se registró una relación C/N ligeramente más alta o casi cercana al límite superior (20-40) sugerido por Carmona y Abad (2008) en el testigo (41% y 42%, respectivamente). En los sustratos corteza de pino compostada y fibra de coco en sus dos variantes la relación C/N estuvo por encima de este límite, tanto en julio 2013 como en julio 2014, sin embargo, CPC+FC mantuvo una C/N alta hasta el final del ensayo (Figura 52).

4.2.3. Efecto de la disposición del saco en el comportamiento de los sustratos

En la Tabla 15 y Tabla 16 se comparan **densidad aparente (Da)**, **pH** y **conductividad eléctrica (CE)** registrados en sustratos con *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis*, respectivamente; **según su ubicación** (superior o inferior) en el **panel de cultivo**.

Tabla 15. Valores medios* de densidad aparente (Da), pH y conductividad eléctrica (CE) en sustratos con *Frankenia laevis* en el jardín vertical, según su ubicación en el panel de cultivo.

Sustrato	Da Superior (g cm ⁻³)	Da Inferior (g cm ⁻³)	pH Superior	pH Inferior	CE Superior (mS m ⁻¹)	CE Inferior (mS m ⁻¹)
FC+PE (Testigo)	0,21 a B	0,09 a A	6,6 b A	7,9 b B	24,85 a B	9,20 a A
CPC+FC	0,34 b B	0,14 b A	5,3 a A	7,3 a B	21,75 a B	8,20 a A
FC+CPC	0,38 b B	0,17 b A	5,5 a A	7,3 a B	33,96 b B	8,71 a A
RVC+CPC	0,49 c B	0,27 c A	6,8 b A	7,9 b B	37,35 b B	11,94 a A
RVC+FC	0,54 c B	0,29 c A	6,7 b A	7,8 b B	25,36 a B	9,56 a A
Nivel de Ref.¹	>0,40		5,5-6,8¹		15,1-50²	
Índice sugerido²	0,40		5-7		40-70	

Tabla 16. Valores medios* de de densidad aparente (Da), pH y conductividad eléctrica (CE) en sustratos con *Pachysandra terminalis* en el jardín vertical, según su ubicación en el panel de cultivo.

Sustrato	Da Superior (g cm ⁻³)	Da Inferior (g cm ⁻³)	pH Superior	pH Inferior	CE Superior (mS m ⁻¹)	CE Inferior (mS m ⁻¹)
FC+PE (Testigo)	0,12 a A	0,09 a A	6,7 b A	7,9 c B	33,94 a B	8,05 a A
CPC+FC	0,24 b A	0,22 b A	5,7 a A	7,4 a B	35,05 a B	7,35 a A
FC+CPC	0,21 b B	0,23 b A	5,8 a A	7,5 a B	51,83 b B	10,02 a A
RVC+CPC	0,31 c A	0,26 c A	7,0 c A	7,8 c B	46,34 b B	11,00 a A
RVC+FC	0,33 c A	0,29 c A	7,1 c A	7,8 c B	38,12 a B	8,95 a A
Nivel de Ref.¹	>0,40		5,5-6,8		15,1-50²	
Índice sugerido²	0,40		5-7		40-70	

En Tabla 15 y Tabla 16: *Medias con una letra minúscula común en una misma columna y para una misma ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Letra mayúscula en común y en una misma fila no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD/ t Student. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido. ¹Abad *et al.*, (1993): nivel de referencia: pH: 5,5-6,8. Carmona y Abad (2008): nivel de referencia: 15-50 mS m⁻¹. ²Índice sugerido en este estudio.

En *Frankenia* se observan valores significativamente mayores ($p \leq 0,05$) en el saco superior con respecto al saco inferior. Esta diferencia pudo estar influenciada debida a la compactación del sustrato inferior por la acción del agua retenida en el aljibe. A pesar de estos resultados, claramente se observa que los sustratos mantienen la tendencia de acuerdo al tipo de material que caracteriza cada una de las mezclas.

En *Pachysandra*, sólo existe diferencia significativamente mayor en el saco superior de FC+CPC con respecto al saco inferior. La tendencia en cuanto a las densidades se mantiene igual que en la *Frankenia*. Este caso puede explicarse con el desarrollo extraordinario de estolones que presentó este sustrato durante el establecimiento de la *Pachysandra* en el jardín vertical.

En cuanto al pH registrado en *Frankenia*, en el saco inferior fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$). No hubo diferencias entre CPC+FC y FC+CPC, tanto en el saco superior como en el inferior, siendo éstos significativamente menores ($p \leq 0,05$). El testigo y los sustratos con restos vegetales compostados en sus dos combinaciones fueron significativamente superiores ($p \leq 0,05$) en las dos ubicaciones. El pH osciló entre 5,3 (CPC+FC) y 6,8 (RVC+CPC) en el saco superior; y entre 7,3 (CPC+FC; FC+CPC) y 7,9 (RVC+CPC) en el saco inferior (Tabla 15).

La alcalinidad en los sustratos ubicados en el saco inferior puede deberse al agua de riego ($pH=7,87$). Estos datos nos indican una acumulación de sales que podría estar asociada al agua de riego y que podría subir por capilaridad en el panel de cultivo, pudiendo ser también la causa del aumento en el pH de los sustratos de esta ubicación. Si el pH del sustrato se encuentra en el rango óptimo (entre 5,0-6,5) la mayoría de los nutrientes mantienen su máximo nivel de solubilidad.

En *Pachysandra*, al contrario que en la *Frankenia*, los valores de pH registrados en los sustratos ubicados en el saco superior fueron significativamente mayores ($p \leq 0,05$). No hubo diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre CPC+FC y FC+CPC ni entre RVC+CPC y RVC+FC, tanto en el saco superior como en el inferior; siendo los primeros significativamente menores ($p \leq 0,05$). El testigo fue significativamente igual ($p \leq 0,05$) a los de restos vegetales compostados del saco inferior. Los valores medios de pH oscilaron entre 5,7 (CPC+FC) y 7,1 (RVC+FC) en el saco superior; y entre 7,4 (CPC+FC) y 7,9 (en el testigo) en el saco inferior. Los sustratos testigo y restos vegetales compostados en sus dos combinaciones fueron significativamente superiores en ambas ubicaciones (Tabla 16).

Una baja CE facilita el manejo de la fertilización y evita problemas de toxicidad. En el desarrollo vegetal, la CE de un sustrato puede aumentar por: 1) la presencia de fertilizantes insolubles, como los de liberación lenta, 2) incorporación de una cantidad

de fertilizante superior a las absorbidas o lixiviadas, 3) cuando el sustrato tiene una alta capacidad de intercambio catiónico y al mismo tiempo libera nutrientes durante su descomposición. La CE fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) en sustratos del saco superior, tanto en *Frankenia* (Tabla 15) como en *Pachysandra* (Tabla 16). Esto pudo deberse a que el pH fue menor en el saco superior por lo que los nutrientes podrían estar más disponibles. En el saco superior FC+CPC y RVC+CPC fueron significativamente superiores ($p \leq 0,05$) en las dos especies. En el saco inferior no se observaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre sustrato con respecto a la especie vegetal. En *Frankenia* la CE osciló entre 21,8 mS m⁻¹ (CPC+FC) y 37,4 mS m⁻¹ (RVC+CPC) en el saco superior; y entre 8,2 mS m⁻¹ (CPC+FC) y 11,9 mS m⁻¹ (RVC+CPC) en el saco inferior (Tabla 15). En *Pachysandra*, los valores oscilaron entre 33,9 mS m⁻¹ (testigo) y 51,8 mS m⁻¹ (FC+CPC) en el saco superior; y entre 8,1 mS m⁻¹ (testigo) y 11,0 mS m⁻¹ (RVC+CPC) en el saco inferior (Tabla 16). La CE mostró variabilidad al igual que el pH, con valores más altos en la zona superior y más bajos en la zona inferior. La CE registrada en los sustratos con *Frankenia* se ajustó a los niveles de referencia sugeridos por Carmona y Abad (2008) (entre 15-50 mS m⁻¹), al igual que la CE registrada en *Pachysandra*. Solamente FC+CPC tuvo un ligero aumento en la conductividad. Carrasco *et al.* (2007) indica que el rango de CE adecuado está entre 15 a 30 mS m⁻¹, sin embargo Carmona y Abad (2008) recomiendan un límite superior de hasta 50 mS m⁻¹.

En la Tabla 17 y Tabla 18 se comparan los sustratos de acuerdo al porcentaje de **materia orgánica (MO) y nitrógeno (N) y la relación carbono/nitrógeno (C/N)** en *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis*, respectivamente; **según la ubicación del sustrato en el panel de cultivo**. La MO y la relación C/N en *Frankenia* y *Pachysandra* no mostraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre el saco superior y el inferior. En *Frankenia*, fue significativamente superior ($p \leq 0,05$) en el testigo, CPC+FC y FC+CPC, tanto en el saco superior como en el inferior. Este mismo comportamiento se observó en *Pachysandra*. Los valores mínimos y máximos de MO en *Frankenia* oscilaron entre 39% (RVC+FC) y 57% (CPC+FC; FC+CPC) en el saco superior y entre 38% (RVC+FC) y 55% (FC+PE; FC+CPC) en el inferior; mientras que en *Pachysandra*, oscilaron entre 39% (RVC+CPC) y 56% (CPC+FC) saco superior y entre 38% (RVC+CPC) y 56% (CPC+FC) en el inferior (Tabla 17; Tabla 18). En ambas especies los valores de MO estuvieron en el nivel recomendado por Abad *et al.* (1993).

Tabla 17. Valores medios* materia orgánica (MO), nitrógeno y relación carbono/ nitrógeno (C/N) en sustratos con *Frankenia laevis* como planta indicadora en el jardín vertical, según su ubicación en el panel de cultivo.

Sustrato	%MO Superior	MO% Inferior	%N Superior	%N Inferior	C/N Superior	C/N Inferior
FC+PE (Testigo)	56,1 b A	55,0 b A	0,74 a A	0,78 a B	45,0 b A	43,3 b A
CPC+FC	56,6 b A	53,3 b A	0,68 a A	0,73 a A	55,1 b A	49,2 b A
FC+CPC	56,8 b A	54,8 b A	0,67 a A	0,74 a A	52,4 b A	49,9 b A
RVC+CPC	40,2 a A	39,9 a A	1,01 b A	0,96 b A	27,7 a A	29,8 a A
RVC+FC	38,6 a A	38,3 a A	0,96 b A	0,96 b A	29,2 a A	31,5 a A
Nivel de Ref.¹	>80		-		20-40	
Índice sugerido²	>40		-		-	

Tabla 18. Valores medios* materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y relación carbono/ nitrógeno (C/N) en sustratos con *Pachysandra terminalis* como planta indicadora en el jardín vertical, según su ubicación en el panel de cultivo.

Sustrato	%MO Superior	MO% Inferior	%N Superior	%N Inferior	C/N Superior	C/N Inferior
FC+PE (Testigo)	52,5 b A	55,1 b A	0,97 b A	0,85 b B	39,17 b A	40,68 b A
CPC+FC	56,2 b A	56,2 b A	0,79 a A	0,73 a A	46,17 c A	48,74 c A
FC+CPC	53,9 b A	49,7 b A	0,82 a A	0,76 a A	43,33 c A	41,06 b A
RVC+CPC	39,4 a A	37,7 a A	1,11 b A	0,99 c A	27,19 a A	27,73 a A
RVC+FC	40,4 a A	40,7 a A	1,01 b A	0,96 c A	28,05 a A	31,42 a A
Nivel de Ref.¹	>80		-		20-40	
Índice sugerido²	>40		-		-	

En Tabla 17 y Tabla 18: *Medias con una letra minúscula común en una misma columna y para una misma ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Letra mayúscula en común y en una misma fila no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD/ t Student. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados. ¹Abad *et al.*, 1993: nivel de referencia: MO: >80% y C/N: 20-40. ²Índice sugerido en este estudio.

En cuanto al %N, solo en el testigo se observó diferencia significativamente mayor ($p \leq 0,05$) en el saco inferior, tanto en *Frankenia* como en *Pachysandra*. En *Frankenia* se observó un %N significativamente mayor ($p \leq 0,05$) en RVC+CPC y RVC+FC en las dos ubicaciones. Los rangos de N oscilaron entre 0,67% (FC+CPC) y 1,01% (RVC+CPC) en el saco superior; y entre 0,73% (CPC+FC) y 0,96% (RVC+CPC; RVC+FC) en el inferior (Tabla 17; Tabla 18).

Con respecto a la relación C/N fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) en FC+PE, CPC+FC y FC+CPC, tanto en el saco superior como en el inferior de *Frankenia*. En *Pachysandra*, CPC+FC y FC+CPC fueron significativamente mayores ($p \leq 0,05$) en el saco superior, seguido del sustrato testigo. En el inferior, CPC+FC resultó ser mayor ($p \leq 0,05$), seguido del testigo y de FC+CPC, los cuales fueron iguales ($p \leq 0,05$).

Los valores medios de relación C/N en *Frankenia* oscilaron entre 29 (RVC+FC) y 55 (CPC+FC) en el saco superior; y entre 30 (RVC+CPC) y 50 (FC+CPC) en el inferior. En *Pachysandra*, oscilaron entre 27 (RVC+CPC) y 46 (CPC+FC) en el saco superior y entre 28 (RVC+CPC) y 49 (CPC+FC) en el inferior (Tabla 17; Tabla 18). El contenido más bajo de N total de un material orgánico proporciona una relación carbono/nitrógeno (C/N) alta que indicaría una mineralización más lenta (Castillo *et al.*, 2000) como sucede en los sustratos FC+CPC y CPC+FC (en *Frankenia*) que tienen menos nitrógeno total y la MO más alta. Estos valores dependerán en muchas ocasiones de la naturaleza de las mezclas empleadas. Lo contrario sucede con RVC+CPC y RVC+FC, donde la relación C/N indica que la mineralización se lleva más rápidamente porque los microorganismos que descomponen los materiales orgánicos frescos utilizan el nitrógeno para la síntesis de sus proteínas celulares y al ser más abundante la actividad microbiana es más rápida la descomposición (Abad *et al.*, 2005). Según este autor una relación C/N entre 20 y 40 es considerada como óptima para el cultivo en sustrato. Por otro lado, para las enmiendas orgánicas (compost vegetal) se recomienda una $C/N < 15$ según RD 824/2005 (BOE, 2005). En las condiciones experimentales realizadas en este trabajo, los sustratos con restos vegetales compostados, tanto en *Frankenia* como en *Pachysandra* cuentan con una relación en ese intervalo. En adición, el testigo (FC+PE) en *Pachysandra* estuvo en el límite superior.

4.2.4. Evolución de sustratos incorporados en el jardín vertical sin vegetación

En la Tabla 19 se presentan **propiedades físicas y químicas: Da, pH, CE, %MO, %N y la relación C/N** en **sustratos sin vegetación** establecidos en el jardín vertical durante un año en el ensayo (desde inicio del ensayo hasta el primer muestreo destructivo), retirados en el primer muestreo. Esta evaluación extra se realizó con el fin de observar el comportamiento y evolución de los sustratos cuando tienen el mismo manejo y condiciones a los sustratos con vegetación. La Da registrada en los sustratos sin vegetación mostraron un descenso con respecto a los valores registrados inicialmente, a excepción del testigo. En contenedores, los sustratos tienden a compactarse debido a la falta de cuidado en la manipulación, los impactos físicos en la superficie del sustrato cuando se mueven los contenedores y por la sobre-irrigación.

Esto significa que la porosidad puede disminuir y aumentar el volumen de partículas, por lo que la relación masa del sustrato/ volumen total puede verse afectada. Una vez compactado el sustrato en el contenedor, el proceso es irreversible y el crecimiento de la raíz se reduce (Kafkafi, 2008).

Tabla 19. Valores medios* de densidad aparente (Da), pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y la relación carbono/ nitrógeno (C/N) en sustratos sin vegetación establecidos en el jardín vertical.

Sustrato	Da (g cm ⁻³)	pH	CE (mS m ⁻¹)	MO (%)	N (%)	C/N
FC+PE (Testigo)	0,17 a	6,5 b	83,70 a	61,2 b	0,99 b	37,0 ab
CPC+FC	0,21 a	6,4 b	86,25 a	62,4 b	0,70 a	52,5 b
FC+CPC	0,20 a	6,6 b	80,48 a	57,6 ab	0,93 ab	37,4 ab
RVC+CPC	0,26 b	5,8 a	180,78 b	55,3 ab	1,09 b	34,0 a
RVC+FC	0,26 b	7,2 c	121,50 b	40,1 a	1,04 b	22,6 a
Nivel de Ref.¹	>0,40	5,5-6,8	15,1-50²	>80%	-	20-40
Índice sugerido³	0,40	5-7	40-70	> 40	-	-

*Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados. Da= densidad aparente, CE= conductividad eléctrica, MO= materia orgánica, N= nitrógeno, C/N= relación carbono/nitrógeno. ¹Abad *et al.*, (1993), ²Carmona y Abad (2008). ³Índice sugerido en este estudio.

Por otro lado, además de las propiedades físicas en materiales compostados las propiedades físicas y químicas, principalmente pH y CE son las que más limitan la proporción de los mismos en las mezclas (Carmona *et al.*, 2012). Idealmente se requieren niveles de pH entre 5,3 y 6,5 para asegurar la absorción de la mayoría de los nutrientes (Abad *et al.*, 2001). Comparando los valores de pH entre los sustratos sin vegetar, claramente se observa que RVC+FC fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) (7,2); superando el pH límite sugerido por Abad *et al.* (1993) y por Abad *et al.* (2001). Sin embargo, podría ajustarse al límite superior sugerido en este estudio para un jardín vertical (pH=5-7). RVC+CPC, disminuyó el pH con respecto al valor obtenido en los sustratos con vegetación (de 7,4 a 5,8), tornándose ácido. El hecho de que los sustratos sin vegetación sólo recibieran fertirrigación y no contaran con un elemento que extayera los nutrientes (planta vegetal) pudo influir en la acidez de los mismos. El pH mostró rangos desde 5,8 (RVC+CPC) hasta 7,2 (RVC+FC). Cabe destacar que, es transcendental tener en consideración que una parte importante de las sales se arrastra fácilmente en el agua de drenaje cuando se proporcionan riegos, siendo posible corregir o prevenir una elevada salinidad mediante lixiviación controlada (Abad y Noguera, 1998).

Masaguer *et al.* (2015) indican que cuando el pH de un sustrato está fuera del intervalo recomendado se puede corregir, ya sea durante el compostado o en el producto final. Una solución al pH alcalino es mezclar con otros componentes de sustratos más ácidos o con azufre elemental.

La CE diferencia dos grupos de sustratos. Por un lado, las mezclas de mayor densidad (RVC+CPC; RVC+FC) presentan valores de CE significativamente superiores ($p \leq 0,05$) (180,9 y 121,5 mS m^{-1} , respectivamente) debido a las sales aportadas por sus componentes. Por el contrario, el testigo y las mezclas de corteza de pino con fibra de coco en sus dos variantes (CPC+FC; FC+CPC) muestran valores de 83,7, 86,3 y 80,5 mS m^{-1} , respectivamente. La CE en los sustratos sin vegetación incrementó de manera exagerada con respecto a los sustratos establecidos con plantas debido a la aplicación del fertilizante de liberación lenta, el cual pudo acumularse en las paredes del fieltro. Los valores medio de CE encontrados oscilaron entre 80 y 181 mS.m^{-1} (Tabla 19), cuando en los sustratos con vegetación se mantuvieron bajos (entre 12 y 15 mS.m^{-1}), superando los límites sugeridos por Carmona y Abad (2008). En este caso la salinidad pudo estar influenciada por la acumulación de sales en la tela de fieltro de los sacos que contenían los sustratos, además de la evapotranspiración que ocurría al estar los sustratos prácticamente expuestos al sol. Si la conductividad eléctrica de un sustrato está elevada hace disminuir la diferencia de potencial osmótico entre el sustrato y los tejidos de la planta, impidiendo la absorción de agua por las raíces y pudiendo provocar estrés hídrico. La salinidad puede corregirse mediante lixiviación de las sales con abundante agua de riego (Fornes *et al.*, 2010).

La relación C/N tiene una influencia notable en el comportamiento físico y químico de los sustratos en el tiempo. Relaciones cercanas a 20-30 suele implicar pérdida de estructura, es preferible la utilización de materiales con relación C/N cercana al orden de 50-60 para evitar la mineralización del sustrato o que contribuya a la lenta descomposición del sustrato, aunque esto podría inmovilizar N o producir autocalentamiento y descomposición al añadir el N con el fertilizante. La variaciones de C/N oscilaron entre 23 (RVC+FC) y 53 (CPC+FC), siendo este último significativamente mayor ($p \leq 0,05$) que RVC+CPC y RVC+FC e igual ($p \leq 0,05$) que FC+PE (37) y que FC+CPC (37) (Tabla 19). Abad *et al.* (1993) sugiere una C/N en torno a 20-40, por lo que los sustratos lo cumplen.

En la Tabla 20 se presenta la **densidad aparente**, el **pH** y la **CE**, mientras que en la Tabla 21 se presenta el porcentaje de **MO** y **N** y la **relación C/N** en **sustratos sin vegetación, según la ubicación en el módulo o panel de cultivo**. La densidad aparente de los sustratos sin vegetación no se vio afectada por la ubicación del sustrato. Sin embargo, los sustratos mostraron la tendencia inicial (sustratos con baja densidad se mantuvieron bajos). Los sustratos con restos vegetales compostados mostraron la mayor densidad aparente. Lo que indica que los sustratos mantienen esta propiedad física aún con una menor actividad biológica.

Tabla 20. Valores medios* de densidad aparente, pH y conductividad eléctrica (CE) en sustratos sin vegetación en el jardín vertical, según su ubicación en el panel de cultivo.

Sustrato	Da Superior (g cm ⁻³)	Da Inferior (g cm ⁻³)	pH Superior	pH Inferior	CE Superior (mS m ⁻¹)	CE Inferior (mS m ⁻¹)
FC+PE (Testigo)	0,17 a A	0,16 a A	7,1 a A	5,9 b A	15,84 a A	151,55 a B
CPC+FC	0,19 a A	0,15 a A	7,6 a A	5,2 ab A	17,65 a A	154,85 a B
FC+CPC	0,18 a A	0,16 a A	7,7 a A	5,6 ab A	25,20 ab A	135,75 a B
RVC+CPC	0,26 b A	0,27 b A	7,0 a B	4,7 a A	34,55 b A	227,00 b B
RVC+FC	0,31 b A	0,32 b A	7,7 a B	6,8 b A	28,50 b A	214,50 b B
Nivel de Ref. ¹	>0,40		5,5-6,8 ¹		15,1-50 ²	
Índice sugerido ²	>0,40		5-7		40-70	

Tabla 21. Valores medios* materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y relación carbono/ nitrógeno (C/N) en sustratos sin vegetación en el jardín vertical, según su ubicación en el panel de cultivo.

Sustrato	%MO Superior	MO% Inferior	%N Superior	%N Inferior	C/N Superior	C/N Inferior
FC+PE (Testigo)	69,9 b A	52,6 b A	1,08 ab A	0,90 ab A	39,9 bc A	34,1 ab A
CPC+FC	62,2 b A	62,5 b A	0,76 a A	0,65 a A	48,5 c A	56,5 b A
FC+CPC	62,4 b A	52,7 b A	0,92 ab A	0,94 b A	40,9 bc A	33,9 ab A
RVC+CPC	44,6 a A	66,0 b B	1,41 b B	0,78 ab A	18,4 a A	49,5 b B
RVC+FC	44,0 a A	36,3 a A	1,15 ab A	0,93 b A	22,4 b A	22,8 a A
Nivel de Ref. ¹	>80		-		20-40	
Índice sugerido ²	>40		-		-	

En Tabla 20 y Tabla 21: *Medias con una letra minúscula común en una misma columna y para una misma ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Letra mayúscula en común y en una misma fila no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD/ t Student. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados. ¹Abad *et al.* (1993). ²Índice sugerido en este estudio.

El pH registrado en los sustratos del saco superior fueron significativamente mayores ($p \leq 0,05$) en RVC+CPC y RVC+FC con respecto al saco inferior. No hubo diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre sustratos del saco superior, sin embargo, en el saco inferior FC+PE (5,9) y RVC+FC (4,7), fueron significativamente superiores que

RVC+CPC (6,8). Los valores medios de pH oscilaron entre 7,0 (RVC+CPC) y 7,7 (RVC+FC; FC+CPC) en el saco superior; y entre 4,7 (RVC+FC) y 6,8 (RVC+FC) en el saco inferior (Tabla 20). Los niveles de pH y CE, en el primero se encontraron valores medios de 4,6 y 6,8 en la zona superior y entre 7 y 7,6 en la zona inferior.

La CE media osciló entre 14,6 y 28,5 mS.m^{-1} en la zona superior y entre 135,8 y 227,0 mS.m^{-1} en la zona inferior (Tabla 20). Al igual que en los resultados anteriores, los valores de pH y CE en la zona inferior pueden deberse a la alcalinidad que existe en el agua de riego (7,87) y a la absorción por la acción de las raíces de las sales contenidas en el agua acumulada en los aljibes de los paneles, respectivamente.

Con respecto a la MO, N y a la relación C/N el comportamiento fue similar para todos los sustratos en ambas ubicaciones. Se observaron valores significativamente menores ($p \leq 0,05$) en los sustratos con mayor porcentaje de restos vegetales compostados (Tabla 21). Se observan rangos mínimos y máximos de 44% y 70% de MO, 0,92% y 1,41% de N y 18 y 48 en la relación C/N en la zona superior, mientras que en la zona inferior estos valores fueron de 36% y 63% de MO, 0,65% y 0,94% de N y 23 y 57 en la relación C/N (Tabla 21). En general, la tendencia de los valores registrados de pH, CE, MO, N y relación C/N fue parecida a los sustratos que tenían plantas indicadoras. Los valores de CE estuvieron muy por encima con respecto a los sustratos con plantas. Mientras que la MO arrojó valores similares a los de los sustratos que formaron parte del ensayo. A excepción del sustrato corteza de pino compostada con fibra de coco, todos los sustratos estuvieron en el rango de relación C/N sugerido por Abad *et al.* (1993).

4.2.5. Indicadores de crecimiento derivados de podas en plantas indicadoras del jardín vertical

Además, de evaluar la evolución y el comportamiento de los sustratos en el jardín vertical, se estudió la **respuesta de las especies vegetales** establecidas como **plantas indicadoras** (*Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis*) de manera que se puedan establecer diferencias según su crecimiento vegetativo con respecto a los sustratos ensayados. En este apartado se presentan resultados correspondientes a **indicadores de crecimiento** provenientes de podas sucesivas: **longitud (LG)**, **peso fresco (PF)**, **peso seco (PS)** evaluados en la parte aérea durante el periodo del ensayo.

4.2.5.1. Longitud, peso fresco y peso seco en *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis*

El desarrollo de las especies indicadoras en el jardín vertical evaluado a partir de **longitud (LG), peso fresco (PF) y peso seco (PS)** obtenidos en *Frankenia* y *Pachysandra* se presentan en la Tabla 22. En *Frankenia* se observa un mayor desarrollo vegetativo en el testigo. Este sustrato estaría influenciado debido al importante aporte de nitrógeno proveniente de la fibra de coco, además del aportado como fertilizante. Los valores mínimos y máximos de longitud oscilaron entre 30 (FC+CPC) y 36 cm (testigo) (Tabla 22). En *Pachysandra*, se observan diferencias significativas ($p \leq 0,05$) solamente en PF y PS destacando CPC+FC (PF=13,9 y PS=4,1 g planta⁻¹). En cuanto a la LG aérea no hubo diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre sustratos (Tabla 22). La longitud media de *Pachysandra* estuvo entre 18 (RVC+FC) y 19 cm (testigo).

Tabla 22. Valores medios* de longitud, peso fresco y peso seco derivados de podas en parte aérea de *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis* durante su desarrollo en el jardín vertical.

Sustrato	Frankenia			Pachysandra		
	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco (g planta ⁻¹)	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco (g planta ⁻¹)
FC+PE (testigo)	36,1 b	24,7 b	7,0 b	18,5 a	13,0 ab	3,8 ab
CPC+FC	34,7 ab	22,1 ab	6,7 ab	18,4 a	13,9 b	4,1 b
FC+CPC	30,2 a	20,8 a	6,0 a	18,2 a	11,3 ab	3,1 ab
RVC+CPC	34,5 ab	21,5 ab	6,5 ab	18,2 a	11,4 ab	3,3 ab
RVC+FC	34,3 ab	21,4 ab	6,5 ab	17,9 a	10,1 a	2,9 a

*Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados.

4.2.5.2. *Frankenia*: longitud, peso fresco y peso seco, según la fecha de corte

En la Figura 53 se muestran los valores medios de **LG, PF y PS en la parte aérea** de *Frankenia laevis*, en los sustrato estudiados, **según la fecha de corte**. El comportamiento de la especie a lo largo del tiempo muestra un crecimiento y desarrollo influenciado por los cambios estacionales. La tendencia es similar en todos los sustratos y se observa un mayor desarrollo vegetativo aéreo en los meses de octubre, enero y abril, es decir, durante las estaciones de otoño-invierno-primavera. En verano (julio 2012, 2013 y 2014) ocurre un descenso considerable en el desarrollo vegetal en todas las variables (Figura 53).

Figura 53. Valores medios de longitud (arriba), peso fresco (centro) y peso seco (abajo) derivados de podas de la parte aérea de *Frankenia laevis* durante su desarrollo en el jardín vertical, según el sustrato y la fecha de muestreo (corte/poda).

*Medias con una letra común en una mismo ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados.

En el testigo se observa una mayor producción de PF y PS en el período Octubre 2012-Abril 2013, sin embargo, en los otros sustratos la tendencia se mantiene, por lo que ocurre un efecto otoñal y primaveral, épocas en las que *Frankenia* presenta un mayor alargamiento (Figura 53). En este periodo, la planta encuentra temperaturas que generan mayor desarrollo aéreo, por lo que, en Verano como resultado se podrían encontrar plantas con menor masa aérea y radicular, lo que afectaría su capacidad de rebrotar y soportar períodos de sequía durante esta época.

4.2.5.3. ***Frankenia*: longitud, peso fresco, peso seco acumulativos**

En la Figura 54 se muestra los valores acumulativos de **LG, PF y PS en la parte aérea** de *Frankenia laevis*, en los sustratos estudiados, **en el tiempo**. Un jardín bien establecido y con un mantenimiento adecuado se convierte en un conjunto de larga vida en el que sus elementos vegetales van ganando con el tiempo tamaño, presencia y valor ornamental, pudiendo llegar a durar varios años. En naturación urbana cuando se implementa un sistema como un jardín vertical, se busca que sea vistoso, que presente un crecimiento no muy excesivo, puesto que lo que se busca es que sea agradable a la vista y que no requiera mucho mantenimiento. La especie *Frankenia Thymifolia* resultó una especie tolerante a factores de clima (heladas y calor extremo), patógenos (no hubo ataque de plagas o enfermedades) y tolerante a cambios tanto en el pH como a la salinidad. Mohr y Schopfer (1995) definen que el crecimiento de los diferentes órganos de las plantas, es un proceso fisiológico complejo, que depende directamente de la fotosíntesis, la respiración, la división celular, la elongación, la diferenciación, entre otros, y que además está influenciada por factores como temperatura, intensidad de luz, densidad de población, calidad de la planta y disponibilidad de agua y de nutrientes. En general, ***Frankenia*** presentó un **desarrollo foliar excelente**. La LG acumulativa destaca en el sustrato testigo con una media de 313,0 cm, seguido de CPC+FC con una longitud acumulada de 301,7 cm. No obstante, el resto de los sustratos mantienen una tendencia favorable, siendo menor FC+CPC con una media de 286,6 cm de longitud. La masa foliar acumulada presenta una tendencia similar a la longitud, destacando el testigo con un peso fresco de 216 g planta⁻¹, seguido de CPC+FC con 196,4 g planta⁻¹. El menor PF acumulado se registró en FC+CPC (184,5 g planta⁻¹) (Figura 54).

Figura 54. Valores medios acumulativos de longitud (arriba), peso fresco (centro) y peso seco (abajo) derivados de podas de la parte aérea de *Frankenia laevis* durante su desarrollo en el jardín vertical, según el sustrato y la fecha de muestreo (corte/poda).

*Medias con una letra común en una misma ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados.

4.2.5.4. Frankenia: longitud, peso fresco, peso seco, según la ubicación

Factores como la orientación y la ubicación del jardín u otros como la localización del sustrato en el jardín, pueden tener influencia en cuanto al desarrollo satisfactorio de las especies establecidas. En la Figura 55 se muestra los valores de **LG, PF y PS en la parte aérea** de *Frankenia laevis* y cómo influye la disposición del sustrato de acuerdo a su **ubicación en el panel de cultivo**. Se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre sustratos, según la ubicación, mostrando mayor desarrollo aéreo las plantas de *Frankenia laevis* ubicadas en el saco superior del panel del cultivo (Figura 55). Los parámetros de crecimiento evaluados en *Frankenia* mostraron mayor dominio en los sustratos ubicados en el saco superior con respecto al saco inferior, el cual podría estar influir en una mayor asimilación de los nutrientes. Por otro lado, durante el establecimiento del ensayo se observó que la especie tiene una gran caída, lo que hacía que tapara las plantas del sustrato inferior, aportando sombra e impidiendo su desarrollo espontáneo.

Figura 55. Valores medios* de longitud (arriba), peso fresco (centro) y peso seco (abajo) derivados de podas de la parte aérea en *Frankenia laevis* durante su desarrollo en el jardín vertical, según el sustrato y su ubicación en el panel de cultivo.

*Medias con una letra común en una misma ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados.

4.2.5.5. **Pachysandra: longitud, peso fresco, peso seco, según la fecha de corte**

El crecimiento vegetal de *Pachysandra terminalis* es lento, si se compara con la rapidez con la que crecía *Frankenia laevis*, por lo que la frecuencia de podas fue menor. En la Figura 56 se presentan la **LG, PF y PS** en la **parte aérea** de *Pachysandra terminalis* en los sustrato estudiados, **según la época de corte (fecha de muestreo)**. El crecimiento inicial de plantas en contenedor es determinante para la calidad de las plantas. Al inicio del ensayo la adaptación de la *Pachysandra* en el jardín vertical costó un poco más en comparación con la *Frankenia* que tuvo muy buena adaptabilidad desde el principio. Sin embargo, se puede decir que esta especie es una buena indicadora en este sistema de jardín vertical debido a que a los dos meses de la plantación (finales de Primavera) realizada en abril 2012 y una vez establecida en vertical la planta alcanzó cerca de 10 cm de longitud, en Verano-Otoño alcanzó más de 30 cm de longitud y en Invierno ralentiza su crecimiento. El desarrollo vegetativo de *Pachysandra terminalis* fue similar al ocurrido con *Frankenia laevis*, en cuanto a LG, PF y PS debido a que el crecimiento fue estacional. El menor desarrollo se mostró de cara al verano, es decir, en junio 2012 y en junio 2013. Los picos de crecimiento se observaron en octubre 2012 y ligeramente en octubre 2013. Prácticamente, hubo similitud entre sustratos según la fecha de muestreo (Figura 56). También, se observa que existe una cierta proporcionalidad entre la LG y PF. El mayor desarrollo aéreo se produjo en Octubre 2012 en los cinco sustratos, los rangos oscilaron entre 33,3 y 35,9 cm en esa fecha; luego disminuye considerablemente en junio de 2013, sube ligeramente en octubre 2013 (con rangos de 13,5 cm y 15,3 cm) y desciende en el último muestreo con valores medios con rango por debajo a los registrados al inicio del ensayo (Figura 56).

Figura 56. Valores medios de longitud (arriba), peso fresco (centro) y peso seco (abajo) de la parte aérea derivados de podas en *Pachysandra terminalis* durante su desarrollo en el jardín vertical, según el sustrato y la fecha de muestreo (corte/poda).

CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados.

4.2.5.6. Pachysandra: longitud, peso fresco, peso seco acumulativos

En la Figura 57 se muestra los valores acumulativos de **LG, PF y PS en la parte aérea** de *Pachysandra terminalis* registrados en los sustrato estudiados **en el tiempo**. En cuanto al desarrollo foliar de esta especie tuvo un crecimiento homogéneo en todos los sustratos. En el primer corte la longitud de la planta alcanzó los 16 cm (RVC+FC) y menor desarrollo en el testigo (12 cm). Los mejores resultados se obtuvieron cuando las plantas crecieron en las mezclas de corteza de pino compostada, con corteza de coco (CPC+FC y FC+CPC). El valor acumulativo máximo fue alcanzado en CPC+FC con unos 76 cm de longitud. En este mismo sustrato destacó el crecimiento foliar medido a través del peso fresco con un peso máximo de 54 g planta⁻¹. El menor desarrollo acumulativo a través de LG, PF y PS se registró el testigo con valores máximos correspondientes a 70 cm, 42,3 y 12,1 g planta⁻¹, respectivamente (Figura 57).

Figura 57. Valores medios acumulativos de longitud (arriba), peso fresco (centro) y peso seco (abajo) derivados de podas de la parte aérea de *Pachysandra terminalis* durante su desarrollo en el jardín vertical, según el sustrato y la fecha de muestreo (corte/poda).

*Medias con una letra común en una misma ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados.

4.2.5.7. **Pachysandra: longitud, peso fresco, peso seco, según la ubicación**

En la Figura 58 se muestra los valores de **LG, PF y PS en la parte aérea** de *Pachysandra terminalis* y cómo influye la disposición del sustrato de acuerdo a su **ubicación en el panel de cultivo**. Los rangos oscilaron entre 17,8 cm y 19,8 cm en el saco superior y 16,9 cm y 18,7 cm en el saco inferior. En el saco superior la LG media los sustratos RVC+FC y FC+PE (testigo) fueron estadísticamente inferiores ($p \leq 0,05$) a FC+CPC y CPC+FC, mientras que en el saco inferior el sustrato testigo fue estadísticamente inferior ($p \leq 0,05$) (16,9 cm) y estadísticamente diferente ($p \leq 0,05$) a CPC+FC y RVC+FC. El PF en el saco superior fue significativamente menor ($p \leq 0,05$) en el testigo y en sustratos con mayor cantidad de restos vegetales compostados, mientras que en el inferior sólo se observó diferencia significativamente menor ($p \leq 0,05$) en el testigo y en FC+CPC. Para PS los valores medios registrados en el sustrato testigo son estadísticamente menores ($p \leq 0,05$) y en CPC+FC mayores ($p \leq 0,05$) para ambas ubicaciones (Figura 58).

Figura 58. Valores medios* de longitud (arriba), peso fresco (centro) y peso seco (abajo) de la parte aérea derivados de podas en *Pachysandra terminalis* durante su desarrollo en el jardín vertical, según el sustrato y su ubicación en el panel de cultivo.

*Medias con una letra común en una misma ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados.

4.2.5.8. Intensidad de verdor con SPAD en *Pachysandra terminalis*

En la Figura 59 se presentan los datos correspondientes a la **intensidad de verdor o unidades SPAD (U-Spad)**, registrados en *Pachysandra terminalis* durante su establecimiento en el jardín vertical. Se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en los sustratos con mayor contenido de restos vegetales con respecto a CPC+FC, siendo este último estadísticamente superior ($p \leq 0,05$) (43,9 U-Spad), pero estadísticamente similar ($p \leq 0,05$) a FC+CPC y FC+PE en cuanto a valores medios de intensidad de verdor (contenido de clorofila en las hojas) en la especie *Pachysandra terminalis* durante el desarrollo y crecimiento en el jardín vertical. Los valores medio encontrados oscilaron entre 38 y 47 unidades SPAD (Figura 59). Cuanto mayor es la unidad SPAD, mayor será concentración de clorofila, asociada al contenido de N en la planta (Uddling *et al.* 2007). Lecturas de unidades SPAD reiteradamente se han sugerido como una manera rápida para diagnosticar N en plantas (Olivier *et al.*, 2006; Tremblay *et al.*, 2010).

Figura 59. Valor medio* de índice de verdor o unidad SPAD en *Pachysandra terminalis* durante su desarrollo en el jardín vertical, según el sustrato.

*Medias con una letra común en un mismo tratamiento (sustrato) no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido (testigo), RVC=Restos vegetales compostados.

4.2.5.9. Intensidad de verdor con SPAD en *Pachysandra terminalis*, en el tiempo

En la Figura 60 se muestran resultados de la **evolución en el tiempo del índice de verdor en *Pachysandra terminalis***, en distintas fechas de muestreo, según el sustrato. En los meses fríos y con menores horas de luz (octubre, diciembre y marzo) este índice disminuye por debajo de las 40 unidades SPAD, sin embargo en los meses de abril y junio este índice aumenta por encima de las 50 unidades SPAD (Figura 60). Se observa que según cambian las estaciones el índice de verdor aumenta o disminuye a través del tiempo. El sustrato con menor unidad Spad a lo largo del tiempo fue RVC+FC, los demás sustratos estuvieron cercanos al testigo, aunque la tendencia en todos fue la misma. Si se compara este parámetro con LG, PF y PS observados en el **apartado 4.2.5.5**, es notable que durante la época de menor crecimiento y elongación de la especie (junio 2012 y 2013), mayor ha sido la medida SPAD, época en la que los días son más largos y en que la planta requiere mayor aporte hídrico. Dwyer *et al.* (1991) y Piekielec *et al.* (1995) relacionaron valores de SPAD a la condición hídrica de la planta. Esta afirmación se constata con los resultados obtenidos por Hassanzadeh *et al.* (2009), donde en 27 genotipos de sésamo observaron que la clorofila a fue mayor en tratamientos regados que en los sometidos a estrés.

Figura 60. Valores promedios* de unidades SPAD en *Pachysandra terminalis* durante su desarrollo en el jardín vertical, según el sustrato y su evolución según la fecha de muestreo.

CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido (testigo), RVC=Restos vegetales compostados.

4.2.6. Indicadores de crecimiento en derivados de muestreos destructivos en *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis*

En este apartado se presentan **parámetros biométricos: longitud (LG), peso fresco (PF) y peso seco (PS)** evaluados en la parte aérea y radicular de *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis*, obtenidos en **muestreos destructivos** realizados en el jardín vertical en **julio 2013, julio 2014 y diciembre 2014 (final del ensayo)**.

4.2.6.1. Longitud, peso fresco, peso seco aéreo y radicular según la fecha de evaluación

La longitud aérea obtenida en *Frankenia* tuvo su mayor incremento ($p \leq 0,05$) al segundo año de establecido el jardín vertical (julio 2014), alcanzando los 49 cm. Sin embargo, *Pachysandra* mantuvo la igualdad ($p \leq 0,05$) entre fechas de muestreos con 19 cm el primer año, 24 cm el segundo año y 23 cm al final del ensayo. En cuanto al peso fresco, al inicio del ensayo fue bajo en las dos especies vegetales (>10 g planta⁻¹ en *Frankenia*; >20 g planta⁻¹ en *Pachysandra*). Al segundo año el incremento fue elevado, principalmente en *Frankenia*, alcanzando los 77 g planta⁻¹ (Figura 61). El desarrollo en el área radicular medida a través de la longitud, tuvo un comportamiento similar en *Frankenia* con respecto a *Pachysandra*. Inicialmente, en la raíz principal la longitud fue menor al primer año ($>16,5$ cm en *Frankenia*; >11 cm en *Pachysandra*) y superior al final del ensayo (hasta los 31 cm en *Frankenia* y 23 cm en *Pachysandra*). En cuanto a los pesos fresco y seco, no hubo diferencias entre el segundo año y el final del ensayo en las dos especies (Figura 62). Estos resultados parecen indicar que a partir del primer año en el jardín vertical hay un aumento inicial de la vida vegetal, la cual pasa a ser menor con el tiempo, debido a que surge la competencia entre plantas (Nagase y Dunnett, 2013), los nutrientes se reducen y algunos individuos luchan por sobrevivir en las distintas condiciones a las que están expuestas.

Figura 61. Valores medios* de longitud (arriba), peso fresco (centro) y peso seco (abajo) de la parte aérea derivados de muestreos destructivos en *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis* en el jardín vertical, según la fecha de muestreo.

*Medias con una letra común en una misma especie vegetal no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD.

Figura 62. Valores medios* de longitud (arriba), peso fresco (centro) y peso seco (abajo) de la parte radicular derivados de muestreos destructivos en *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis* en el jardín vertical, según la fecha de muestreo.

*Medias con una letra común en una misma especie vegetal no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD.

4.2.6.2. Longitud, peso fresco, peso seco aéreo y radicular según el sustrato

En la Tabla 23 y Tabla 24 se presenta la **longitud (LG)**, **peso fresco (PF)** y **peso seco (PS)** aéreo y radicular en *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis*, respectivamente, evaluados al primer año (julio 2013) de establecido el jardín vertical, **según el sustrato**.

Tabla 23. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea y radicular de *Frankenia laevis* al primer año de establecidas en el jardín vertical, según el sustrato.

Sustrato	Parte aérea			Zona radicular		
	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco
FC+PE (testigo)	24,9 ab	9,2 ab	3,1 ab	17,8 ab	22,6 ab	5,5 ab
CPC+FC	27,3 b	15,9 b	4,2 b	20,3 b	27,1 b	8,0 b
FC+CPC	24,6 ab	10,3 ab	2,9 ab	15,0 ab	19,8 ab	4,8 ab
RVC+CPC	21,0 a	7,4 a	2,0 a	12,9 a	17,6 a	4,3 a
RVC+FC	24,2 ab	9,4 ab	2,3 ab	16,5 ab	21,2 ab	5,1 ab

Tabla 24. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea y radicular de *Pachysandra terminalis* al primer año de establecidas en el jardín vertical, según el sustrato.

Sustrato	Parte aérea			Zona radicular		
	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco
FC+PE (testigo)	19,2 ab	18,3 ab	3,1 ab	13,3 ab	9,1 ab	2,9 ab
CPC+FC	21,2 b	27,1 b	3,8 b	15,6 b	13,5 b	4,9 b
FC+CPC	20,4 ab	15,9 ab	2,5 ab	12,7 ab	7,3 a	2,5 a
RVC+CPC	16,4 a	11,1 a	1,7 a	10,4 a	8,2 a	1,5 a
RVC+FC	18,6 ab	13,0 ab	2,1 ab	11,0 ab	9,4 ab	2,4 ab

En Tabla 23 y Tabla 24: Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados.

Cuantitativamente, el sustrato CPC+FC produce la mayor longitud aérea y radicular, tanto en *Frankenia* como en *Pachysandra*, contrario con lo que ocurre en RVC+CPC donde se produce el menor desarrollo foliar y radicular (Tabla 23 y Tabla 24). Las plantas de *Frankenia* generaron un follaje vegetal que se extendió hasta 27 cm de longitud y con una masa vegetal de hasta 16 g planta⁻¹. La raíz principal alcanzó los 20,3 cm de longitud y una masa radicular en torno a los 27 g planta⁻¹ (Tabla 23). En cuanto a *Pachysandra*, se produjo una longitud de hasta 21 cm y una masa foliar de hasta 27 g planta⁻¹. El sistema radicular alcanzó los 16 cm de longitud y un peso fresco de 13,3 g planta⁻¹ (Tabla 24).

En la Tabla 25 y Tabla 26 se muestran los valores de **LG, PF y PS aéreo y radicular** en *Frankenia* y *Pachysandra*, respectivamente, **al segundo año de su desarrollo en el jardín vertical, según el sustrato.**

Tabla 25. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea y radicular de *Frankenia laevis* al segundo año de establecidas en el jardín vertical.

Sustrato	Parte aérea			Zona radicular		
	Longitud	Peso fresco	Peso seco	Longitud	Peso fresco	Peso seco
	(cm)	(g planta ⁻¹)		(cm)	(g planta ⁻¹)	
FC+PE (testigo)	51,0 a	76,0 a	15,7 a	27,7 a	12,2 a	3,8 a
CPC+FC	52,9 a	84,4 a	27,9 a	24,4 a	15,3 a	4,4 a
FC+CPC	50,7 a	82,4 a	26,4 a	29,2 a	14,2 a	4,2 a
RVC+CPC	46,7 a	78,6 a	18,2 a	26,4 a	10,5 a	3,5 a
RVC+FC	48,6 a	83,2 a	24,1 a	25,3 a	10,6 a	3,3 a

Tabla 26. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea y radicular de *Pachysandra terminalis* al segundo año de establecidas en el jardín vertical.

Sustrato	Parte aérea			Zona radicular		
	Longitud	Peso fresco	Peso seco	Longitud	Peso fresco	Peso seco
	(cm)	(g planta ⁻¹)		(cm)	(g planta ⁻¹)	
FC+PE (testigo)	21,8 a	19,1 a	7,4 a	17,4 a	25,0 a	5,7 a
CPC+FC	36,1 b	37,8 b	15,5 b	29,3 b	86,0 b	18,0 b
FC+CPC	33,5 b	32,9 b	12,1 b	30,1 b	83,1 b	13,0 b
RVC+CPC	18,2 a	15,2 a	6,7 a	15,8 a	14,8 a	2,7 a
RVC+FC	19,3 a	16,2 a	7,4 a	16,1 a	11,0 a	2,1 a

En Tabla 25 y Tabla 26: *Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados.

El segundo año de establecidas las especies en el jardín vertical, se observa un incremento en la longitud aérea de *Frankenia* más de 60% con respecto al primer año. Este desarrollo podría estar afectado por la rápida respuesta de la *Frankenia* a la asimilación de nutrientes proveniente de la fertirrigación realizada para el mantenimiento del jardín. Los resultados de desarrollo aéreo y radicular mostraron uniformidad en los sustratos cuanto a longitud, peso fresco y peso seco, debido a que no hubo diferencias ($p \leq 0,05$) entre tratamientos. El desarrollo vegetal aéreo en *Frankenia* alcanzó una longitud de hasta 53 cm (CPC+FC) y una masa vegetal de 84 g planta⁻¹. La longitud radicular tuvo un crecimiento de hasta 28 cm observado en el sustrato testigo (Tabla 25).

En *Pachysandra* se observó un mayor desarrollo aéreo y radicular en CPC+FC y FC+CPC, siendo estos tratamientos significativamente superiores ($p \leq 0,05$) que el resto de los resto de sustratos. En cuanto a la longitud aérea se encontraron rangos entre 18,2 cm y 36,1 cm. En ese sentido, los rangos de longitud radicular oscilaron entre 15,8 cm y 30,1, valores superiores a los del primer año de establecido el jardín vertical (Tabla 26).

La Tabla 27 y Tabla 28 presenta valores medios de **LG, PF y PS en la parte aérea y radicular** de *Frankenia* y *Pachysandra*, respectivamente, **al final del ensayo (diciembre, 2014), según el sustrato**.

Tabla 27. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea y radicular de *Frankenia laevis* al tercer año de establecidas en el jardín vertical.

Sustrato	Parte aérea			Zona radicular		
	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco
FC+PE (testigo)	37,3 a	61,1 a	13,7 a	36,7 a	17,3 a	5,5 a
CPC+FC	43,9 a	63,6 a	14,1 a	31,4 a	20,4 a	7,1 a
FC+CPC	38,5 a	58,6 a	11,4 a	29,9 a	17,8 a	7,7 a
RVC+CPC	40,9 a	70,8 a	20,0 a	29,0 a	14,9 a	4,8 a
RVC+FC	34,7 a	70,3 a	19,1 a	30,2 a	19,0 a	6,7 a

Tabla 28. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en en la parte aérea y radicular de *Pachysandra terminalis* al tercer año de establecidas en el jardín vertical.

Sustrato	Parte aérea			Zona radicular		
	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco
FC+PE (testigo)	22,0 a	43,8 a	14,6 a	23,1 a	19,1 a	5,4 a
CPC+FC	23,9 a	61,4 a	17,8 a	43,6 b	57,5 b	14,2 b
FC+CPC	22,7 a	58,8 a	16,7 a	42,5 b	54,3 b	13,7 b
RVC+CPC	21,7 a	55,4 a	13,9 a	22,3 a	16,5 a	7,2 a
RVC+FC	21,6 a	40,1 a	10,5 a	22,8 a	11,8 a	3,0 a

En Tabla 27 y Tabla 28: *Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados.

Al final del ensayo (diciembre 2014), se observa una reducción en el desarrollo vegetal de *Frankenia* con respecto a la segunda fecha de muestreo, pudiendo deberse a que estas plantas correspondían a los cuadrantes centrales del panel de cultivo y que durante los muestreos del primer y segundo año éstos quedaron con los laterales al desnudo, lo que indica que podría tener pérdida de agua y nutrientes, mayor exposición al sol debido al período de verano (meses junio a septiembre), además de que después

del último muestreo (junio 2014) no hubo ningún aporte de nutrientes. A pesar de lo expuesto anteriormente, el desarrollo de las raíces de *Frankenia* se mantuvo e incluso tuvo un desarrollo mayor con respecto a junio 2014. Esto podría indicar que a pesar de que el jardín contaba con el mínimo mantenimiento, las condiciones del medio les eran favorables. Los resultados de desarrollo aéreo y radicular de *Frankenia* mostraron similitud en cuanto a longitud, peso fresco y peso seco de los sustratos, ya que no se observaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos. La longitud aérea osciló entre 35 (RVC+FC) y 44 cm (CPC+FC) y una masa vegetal entre 59 (FC+CPC) y 71 g planta⁻¹ (RVC+CPC). La longitud radicular tuvo un crecimiento de hasta 37 cm observado en el sustrato testigo (Tabla 27).

En *Pachysandra* se observó un mayor desarrollo radicular en CPC+FC y FC+CPC, siendo estos tratamientos significativamente superiores ($p \leq 0,05$) que el resto de los sustratos. En cuanto a la longitud aérea se encontraron rangos entre 18,2 cm y 36,1 cm. En ese sentido, los rangos de longitud radicular oscilaron entre 22 cm (RVC+CPC; RVC+FC; testigo) y 24 (CPC+FC) (Tabla 28). Al contrario que con la *Frankenia* y a pesar de recibir el mismo manejo, esta especie tuvo una mayor resistencia a las limitaciones al final del ensayo.

4.2.6.3. Longitud, peso fresco, peso seco aéreo y radicular, según la ubicación

En la Tabla 29 y en la Tabla 30 se presentan la **LG, PF, PS en la parte aérea en *Frankenia* y *Pachysandra*, respectivamente, al primer año de su desarrollo en el jardín vertical, según la ubicación del sustrato en el panel de cultivo.**

Tabla 29. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea de *Frankenia laevis* al primer año de establecidas en el jardín vertical, según su ubicación.

Sustrato	Superior			Inferior		
	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco
FC+PE (testigo)	22,9 ab A	10,3 ab A	2,7 ab A	30,7 ab B	11,6 ab A	3,7 ab A
CPC+FC	23,9 b A	10,9 b A	3,0 b A	33,3 b B	12,7 b A	4,0 b A
FC+CPC	20,7 ab A	7,9 ab A	2,2 ab A	25,9 ab A	7,3 ab A	1,7 ab A
RVC+CPC	17,8 a A	6,1 a A	2,0 a A	22,6 a A	6,7 a A	1,6 a A
RVC+FC	21,3 ab A	8,0 ab A	2,5 ab A	23,1 ab A	6,9 ab A	2,1 ab A

Tabla 30. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en parte aérea de *Pachysandra terminalis* al primer año de establecidas en el jardín vertical, según su ubicación.

Sustrato	Superior			Inferior		
	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco
FC+PE (testigo)	18,1 ab A	13,6 ab A	2,9 ab A	20,3 ab A	24,0 ab B	4,7 ab B
CPC+FC	25,2 b A	15,8 b A	5,3 b A	34,4 b A	28,4 b B	5,3 b A
FC+CPC	18,2 ab A	7,1 ab A	1,2 ab A	22,6 ab A	24,6 ab B	3,8 ab A
RVC+CPC	15,8 a A	11,4 ab A	2,4 a A	15,0 a A	20,8 a B	1,8 a A
RVC+FC	18,1 ab A	13,6 ab A	2,9 ab A	17,5 ab A	22,5 ab B	2,2 ab A

En Tabla 29 y Tabla 30:*Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Letra mayúscula en común y en una ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD/ t Student. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados.

El comportamiento de *Frankenia laevis* fue similar al de *Pachysandra terminalis* en cuanto a su ubicación en el panel o módulo de cultivo, tanto en el desarrollo aéreo como en el desarrollo radicular. En la masa aérea, los valores medios de parámetros de desarrollo y crecimiento en las dos especies fueron superiores en el saco inferior con respecto al saco superior (Tabla 29 y Tabla 30). En *Frankenia laevis* se encontraron rangos de longitud entre 17,8 cm y 23,9 cm en el saco superior y 22,6 cm y 33,3 cm en el saco inferior (Tabla 29). Mientras que, en *Pachysandra terminalis* se encontraron rangos de longitud aérea de 15,8 cm y 25,2 entre en el saco superior y 17,0 cm y 34,4 cm en el saco inferior (Tabla 30). Estadísticamente ($p \leq 0,05$) en las dos ubicaciones y en las dos especies, se observó mayor desarrollo aéreo en CPC+FC sin diferir de FC+CPC, del testigo y de RVC+FC (Tabla 29 y Tabla 30).

En la Tabla 31 y en la Tabla 32 se muestran los valores medios de **LG, PF, PS en la zona radicular en Frankenia y Pachysandra, respectivamente, al primer año de su desarrollo en el jardín vertical, según la ubicación del sustrato.**

Tabla 31. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la raíz de *Frankenia laevis* al primer año de establecida en el jardín vertical, según su ubicación.

Sustrato	Superior			Inferior		
	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco
FC+PE (testigo)	18,6 ab A	29,0 ab B	5,9 ab A	15,9 ab A	17,8 ab A	4,0 ab A
CPC+FC	19,8 b A	35,0 b B	8,2 b A	22,0 b A	19,2 b A	4,9 b A
FC+CPC	16,5 ab A	25,7 ab B	5,4 ab A	13,5 ab A	15,9 ab A	3,2 ab A
RVC+CPC	15,3 a A	20,1 a B	6,1 a A	10,5 a A	10,1 a A	2,5 a A
RVC+FC	18,5 ab A	32,4 ab B	5,8 ab A	13,3 ab A	13,4 ab A	2,3 ab A

Tabla 32. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la raíz de *Pachysandra terminalis* al primer año de establecida en el jardín vertical, según su ubicación.

Sustrato	Superior			Inferior		
	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco
FC+PE (testigo)	11,8 ab A	9,9 ab A	2,2 ab A	11,5 ab A	10,4 ab A	1,9 ab A
CPC+FC	13,8 b A	15,7 b A	4,9 b A	13,4 b A	11,3 b A	2,6 b A
FC+CPC	11,2 ab A	10,7 ab A	3,0 ab A	10,3 ab A	9,1 ab A	1,8 ab A
RVC+CPC	9,7 a A	6,0 a A	1,0 a A	9,93 a A	8,9 a A	1,2 a A
RVC+FC	10,9 ab A	11,0 ab A	2,9 ab A	12,0 ab A	9,5 ab A	1,9 ab A

En Tabla 31 y Tabla 32: *Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Letra mayúscula en común y en una ubicación no son diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD/ t Student. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados.

En la parte radicular, los parámetros de desarrollo y crecimiento en las dos especies fueron variables, en CPC+FC fue numéricamente mayor en el saco superior con respecto a los demás sustratos, repitiéndose este comportamiento en el saco inferior. En *Frankenia laevis* se encontraron rangos de longitud radicular entre 15,3 cm y 18,8 cm en el saco superior y 10,5 cm y 22,0 cm en el saco inferior. Esto indica la competencia que las especies ejercen por un espacio físico basal para el desarrollo y nutrimento radical, por el intercambio gaseoso y por la captación de la energía lumínica para la fotosíntesis. En *Pachysandra terminalis* los rangos de longitud radicular oscilaron entre 9,7 cm y 13,8 cm en el saco superior y 9,9 cm y 13,4 cm en el saco inferior. Se observa que en ambas ubicaciones, estadísticamente ($p \leq 0,05$) el mayor desarrollo de las dos especies se obtuvo en el sustrato CPC+FC, sin diferir estadísticamente ($p \leq 0,05$) de FC+CPC, del sustrato testigo (FC+PE) y de RVC+FC (Tabla 31 y Tabla 32). Las diferencias en las ubicaciones se explican debido a que en la masa inferior del panel se encuentra el aljibe, donde estuvo la acumulación de agua y donde se produjo la mayor producción de raíces en las dos especies. Por otro lado, se observó un mayor desarrollo en las plantas cultivadas en sustratos con mayor o menor proporción de fibra de coco, comparado con el sustrato con ningún contenido de fibra de coco (RVC+CPC). Meerow (1995) encontró un mayor crecimiento en *Ravenia rivularis* cuando comparó fibra de coco con sustrato a base de turba. La presencia de fibra de coco en el medio de cultivo promovió el desarrollo y crecimiento de las especies vegetales en el jardín vertical. El crecimiento aéreo en términos de peso seco en la masa aérea y radicular durante el primer año de establecimiento de *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis* fue superior en los sustratos a base de fibra de coco.

En la Tabla 33 y Tabla 34 se presentan los valores medios de **LG, PF y PS en la parte aérea en Frankenia y Pachysandra**, respectivamente, mientras que en la Tabla 35 y Tabla 36 se presentan los valores medios de **estas mismas variables** en la zona radicular. Los parámetros se evaluaron **en el segundo año** de establecido el jardín vertical, **según la ubicación del sustrato en el panel de cultivo**. La longitud, peso fresco, peso seco en la parte aérea y radicular de Frankenia y Pachysandra no mostraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en todos los sustratos, tanto en el saco superior como en el inferior (Tabla 33, Tabla 34, Tabla 35 y Tabla 36).

Tabla 33. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea de *Frankenia laevis* al segundo año de establecidas en el jardín vertical, según su ubicación.

Sustrato	Superior			Inferior		
	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco (g planta ⁻¹)	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco (g planta ⁻¹)
FC+PE (testigo)	53,9 a A	111,9 a B	37,6 a B	43,4 a A	32,4 a A	13,6 a A
CPC+FC	55,6 a A	113,0 a B	39,4 a B	50,4 a A	45,1 a A	19,1 a A
FC+CPC	53,0 a A	110,2 a B	36,4 a B	47,9 a A	41,7 a A	16,5 a A
RVC+CPC	48,0 a A	98,4 a B	33,3 a B	45,5 a A	44,3 a A	17,7 a A
RVC+FC	52,5 a A	93,8 a B	31,7 a B	48,9 a A	41,0 a A	21,0 a A

Tabla 34. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea de *Pachysandra terminalis* al segundo año de establecidas en el jardín vertical, según su ubicación.

Sustrato	Superior			Inferior		
	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco (g planta ⁻¹)	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco (g planta ⁻¹)
FC+PE (testigo)	21,4 a A	27,4 a A	7,2 a A	22,8 a A	30,7 a A	7,6 a A
CPC+FC	24,3 a A	45,8 a A	12,8 a A	30,8 a A	34,8 a A	10,2 a A
FC+CPC	22,0 a A	33,8 a A	8,6 a A	20,8 a A	32,5 a A	9,4 a A
RVC+CPC	18,8 a A	22,1 a A	6,8 a A	17,8 a A	27,5 a A	6,6 a A
RVC+FC	17,3 a A	31,0 a A	8,8 a A	20,4 a A	23,7 a A	6,8 a A

Tabla 35. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la raíz de *Frankenia laevis* al segundo año de establecidas en el jardín vertical, según su ubicación.

Sustrato	Superior			Inferior		
	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco (g planta ⁻¹)	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco (g planta ⁻¹)
FC+PE (testigo)	26,9 a A	13,9 a A	4,9 a A	28,5 a A	14,5 a A	3,7 a A
CPC+FC	29,5 a A	18,8 a A	6,6 a A	29,3 a A	15,9 a A	4,2 a A
FC+CPC	23,5 a A	15,8 a A	5,5 a A	29,0 a A	14,9 a A	3,7 a A
RVC+CPC	24,4 a A	10,1 a A	4,1 a A	28,4 a A	14,2 a A	3,0 a A
RVC+FC	25,3 a A	9,7 a A	3,8 a A	25,4 a A	11,4 a A	2,7 a A

Tabla 36. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la raíz de *Pachysandra terminalis* al segundo año de establecidas en el jardín vertical, según su ubicación.

Sustrato	Superior			Inferior		
	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco
FC+PE (testigo)	15,5 a A	27,0 a A	13,0 a A	19,3 a A	23,0 a A	9,3 a A
CPC+FC	17,3 a A	29,9 a A	14,8 a A	22,3 a A	28,2 a A	12,2 a A
FC+CPC	16,8 a A	23,1 a A	10,5 a A	16,3 a A	23,1 a A	10,3 a A
RVC+CPC	15,2 a A	28,7 a A	13,5 a A	16,3 a A	19,3 a A	8,6 a A
RVC+FC	14,0 a A	26,7 a A	13,0 a A	17,1 a A	18,1 a A	7,7 a A

En Tabla 33, Tabla 34, Tabla 35 y Tabla 36: *Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Letra mayúscula en común y en una ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD/ t Student. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados.

En todos los sustratos hubo un buen desarrollo vegetal de las dos especies vegetales estudiadas en el jardín vertical, pero los sustratos con fibra de coco en su mezcla, tanto superior como inferior, fueron los que más destacaron, principalmente CPC+FC, debido a que proporcionó un buen desarrollo vegetal. En *Frankenia* los rangos de longitud en la parte aérea oscilaron entre 48 (RVC+CPC) y 56 cm (CPC+FC) en el saco superior y entre 43 (testigo) y 50 cm (CPC+FC) y el peso fresco osciló entre 32 (testigo) y 45 g plantas⁻¹ (CPC+FC) en el saco inferior (Tabla 33). En ese sentido, en *Pachysandra* la longitud aérea estuvo entre 17 (RVC+FC) y 24 cm (CPC+FC) en el saco superior, mientras que en el inferior osciló entre 18 (RVC+CPC) y 31 cm (CPC+FC) (Tabla 34).

En la Tabla 37 y Tabla 38 se presentan los valores medios de **LG, PF y PS en la parte aérea en *Frankenia* y *Pachysandra*, respectivamente, al final del ensayo (diciembre 2014) del jardín vertical, según la ubicación del sustrato.**

Tabla 37. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea de *Frankenia laevis* al tercer año de establecida en el jardín vertical, según su ubicación.

Sustrato	Superior			Inferior		
	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco
FC+PE (testigo)	44,0 a A	95,7 a B	15,5 a B	37,5 a A	26,3 a A	8,0 a A
CPC+FC	48,0 a A	94,2 a B	16,4 a B	39,7 a A	33,0 a A	9,9 a A
FC+CPC	43,0 a A	95,1 a B	15,5 a B	34,6 a A	25,4 a A	7,9 a A
RVC+CPC	47,0 a A	91,1 a B	13,3 a A	38,8 a A	57,2 b A	18,9 b B
RVC+FC	35,0 a A	90,5 a B	13,1 a A	34,3 a A	50,1 b A	17,5 b B

Tabla 38. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la parte aérea de *Pachysandra terminalis* al tercer año de establecida en el jardín vertical, según su ubicación.

Sustrato	Superior			Inferior		
	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco (g planta ⁻¹)	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco (g planta ⁻¹)
FC+PE (testigo)	22,2 a A	44,4 a A	16,1 a A	21,5 a A	42,4 a A	11,3 a A
CPC+FC	24,8 a A	51,7 a A	10,4 A A	23,2 a A	45,6 a A	12,8 a A
FC+CPC	21,7 a A	35,5 a A	12,9 a A	23,8 a A	48,4 a A	13,0 a A
RVC+CPC	18,7 a A	49,3 a A	15,2 a A	23,3 a A	76,1 b B	21,1 b A
RVC+FC	23,6 a A	28,5 a A	5,1 a A	19,5 a A	79,1 b B	27,9 b B

En Tabla 37 y Tabla 38: *Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Letra mayúscula en común y en una ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD/ t Student. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados.

El desarrollo vegetal aéreo de las especies en el saco superior no mostró diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre los sustratos. Sin embargo, en el saco inferior desarrollo de las especies medido a través de los pesos fresco y seco destacaron los sustratos con restos vegetales compostados (RVC+CPC y RVC+FC) (Tabla 37 y Tabla 38). Estas diferencias podrían estar provocada por la orientación vertical de las paredes verdes, debido a que esto provoca un riesgo de distribución de agua desigual dentro del medio de cultivo, y por lo tanto una tensión en las raíces de las plantas. En general, los hallazgos de esta investigación parecen sugerir que para el primer par de años en el jardín vertical hay un aumento inicial de la vida vegetal, que pasa a disminuir con el tiempo ya que la competencia entre plantas surge (Nagase y Dunnett, 2013), los nutrientes se reducen y las especies luchan por sobrevivir en las diferentes condiciones.

En la Tabla 39 y Tabla 40 se presentan los valores medios de **LG, PF y PS en la zona radicular en *Frankenia* y *Pachysandra*, respectivamente, final del ensayo (diciembre 2014) del jardín vertical, según la ubicación del sustrato.**

Tabla 39. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la raíz de *Frankenia laevis* al final del ensayo del jardín vertical, según la ubicación del sustrato en el panel de cultivo.

Sustrato	Superior			Inferior		
	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco (g planta ⁻¹)	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco (g planta ⁻¹)
FC+PE (testigo)	35,5 a A	18,2 a A	6,0 a	48,4 b A	36,1 b B	15,5 b B
CPC+FC	30,8 a A	19,9 a A	6,0 a	32,1 a A	20,8 a A	8,2 a A
FC+CPC	34,0 a A	14,5 a A	4,6 a	26,3 a A	20,7 a A	7,5 a A
RVC+CPC	35,4 a A	14,4 a A	4,5 a	22,6 a A	15,3 a A	4,8 a A
RVC+FC	29,9 a A	16,1 a A	5,2 a	30,4 a A	21,8 a A	9,8 a A

Tabla 40. Valores medios* de parámetros destructivos determinados en la raíz de *Pachysandra terminalis* al final del ensayo del jardín vertical, según la ubicación del sustrato en el panel de cultivo.

Sustrato	Superior			Inferior		
	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco (g planta ⁻¹)	Longitud (cm)	Peso fresco (g planta ⁻¹)	Peso seco (g planta ⁻¹)
FC+PE (testigo)	28,2 a A	6,9 a A	3,3 a A	27,1 a A	10,1 a A	2,5 a A
CPC+FC	28,8 a A	46,6 b A	13,5 b A	27,2 a A	95,7 b B	34,8 b B
FC+CPC	29,7 a A	49,6 b A	17,3 b A	25,7 a A	94,9 b B	31,1 b B
RVC+CPC	24,5 a A	7,6 a A	2,2 a A	26,3 a A	20,9 a A	9,7 a A
RVC+FC	23,6 a A	13,9 a A	3,9 a A	22,2 a A	10,1 a A	2,3 a A

En Tabla 39 y Tabla 40: *Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Letra mayúscula en común y en una ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD/ t Student. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados.

La longitud de la raíz principal de *Frankenia* y *Pachysandra* ubicada en los sustratos del saco superior no mostró diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre sustratos. En cuanto a *Frankenia* en el saco inferior destacó el sustrato testigo, el cual fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) que los demás sustratos evaluados, en cuanto a longitud, peso fresco y peso seco (Tabla 39). En *Pachysandra* destacaron CPC+FC y FC+CPC por mostrar valores de peso fresco y seco significativamente superiores ($p \leq 0,05$), tanto en el saco superior como en el inferior (Tabla 40). Jørgensen *et al.* (2014) en un estudio sobre el crecimiento de raíces en diferentes especies en vertical y con tres medios de cultivo comerciales (100% fibra de coco (Quick-Plug) y dos tipos de medios de cultivo a base de lana de roca (Grodan PP100 y Grodan TT100) en techos verdes, encontraron que *Campanula poscharskyana* tuvo el mayor peso en seco cuando se cultiva en la parte superior de un sustrato de fibra de coco comercial “Quick-Plug”.

4.2.6.4. Número y diámetro de tallo y raíz principales

En este apartado, se muestran los **parámetros biométricos correspondientes a número de tallos, número de raíces, diámetro de tallo principal y diámetro de raíz principal, obtenidos de evaluaciones destructivas** en *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis* durante el establecimiento del jardín vertical. En la Figura 63 se presenta el **número de tallos y raíces** y en la Figura 64 muestra el **diámetro de tallo principal (DTP) y diámetro de raíz principal (DRP)**, respectivamente.

Figura 63. Número de tallos (arriba) y número de raíces (abajo) cuantificados en *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis* durante el periodo de desarrollo en el jardín vertical (valores medios*).

Figura 64. Diámetro de tallo principal (arriba) y diámetro de raíz principal (abajo) medidos en *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis* durante el periodo de desarrollo en el jardín vertical.

En Figura 63 y Figura 64: *Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados.

En cuanto al número de tallos en *Frankenia* y *Pachysandra*, el análisis estadístico arrojó diferencias significativas entre el sustrato testigo con respecto a CPC+FC y FC+CPC. Mientras que en las diferencias entre el número de raíces fueron significativamente menores los sustratos con restos vegetales compostados. El rango de número de tallos en *Frankenia* osciló entre 10,1 y 12,9 unidades y en *Pachysandra* entre 7,5 y 9,7 unidades. Los valores mínimos y máximos de número de raíces oscilaron entre 15,5 y 16,5 en *Frankenia* y entre 14,3 y 22,8 en *Pachysandra* (Figura 63). En referencia al DTP y DRP, se observa mayor engrosamiento en estas variables en el sustrato testigo (FC+PE) tanto en *Frankenia* (5,4 mm y 5,2 mm, respectivamente) como en *Pachysandra* (5,1 mm y 5,9 mm, respectivamente). Los valores mínimos en DTP en *Frankenia* se registraron en RVC+CPC (4,0 mm) y para DRP en CPC+FC (4,0 mm), mientras que en *Pachysandra* los mínimos se registraron en sustratos con mayor contenido de restos vegetales compostados, siendo éstos estadísticamente similares a CPC+FC y FC+CPC (Figura 64).

En la Figura 65 se presentan los valores de **PF y PS en estolones** desarrollados a partir del tallo principal de *Pachysandra terminalis* durante su establecimiento en el jardín vertical.

Figura 65. Valores medios* de peso fresco (masa fresca) y seco (masa seca) en estolones desarrollados en *Pachysandra terminalis* durante su establecimiento en el jardín vertical, según el sustrato.

*Medias con una letra común en una misma variable no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados.

Se registraron valores medio de PF de estolones entre 14,4 g y 37,28 g por planta. Se observa que en CPC+FC hubo un mayor crecimiento de estolones estadísticamente significativo y diferente ($p \leq 0,05$) a RVC+CPC. Cabe destacar que no hubo desarrollo de estolones en RVC+FC. Larson (2000), Tworkoski (2001), Sánchez-Sánchez (2006) reportaron que la producción de estolones son caracteres que si bien están determinados por el genotipo, estos son influenciados por factores ambientales, sobre todo por la altura, temperatura, luz solar y estado nutricional del medio.

La Tabla 41 y Tabla 42 presentan valores medios de **número de tallos (TA)**, **número de raíces (RC)**, **respectivamente** de *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis*, respectivamente, **según la ubicación de los sustratos**. Mientras que, la Tabla 43 y Tabla 44 presentan valores medios de **diámetro de tallo principal (DTP)** y **diámetro de raíz principal (DRP)**, **respectivamente** de *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis*, respectivamente, **según la ubicación de los sustratos**. Estos resultados revelan que no hubo diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0,05$) en los sustratos ubicados en la parte superior ni inferior con respecto al número de tallos, número de raíces, diámetros de tallo y raíz principal, tanto en *Frankenia* como en *Pachysandra* (Tabla 41, Tabla 42, Tabla 43 y Tabla 44, respectivamente). En *Frankenia*, el número de tallos ubicados en el saco superior fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) con respecto a la ubicación inferior. Entre sustratos no hubo diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en las dos ubicaciones en cuanto al número de tallos y raíces. El número de tallo osciló entre 12 (CPC+FC) y 20 unidades (Testigo) en el saco superior, mientras que en el inferior estuvo entre 5 (RVC+CPC) y 8 unidades (RVC+FC). Las raíces estuvieron en el rango de 10 (RVC+CPC) y 17 unidades (testigo) en el superior y entre 15 (FC+CPC; RVC+FC) y 17 unidades (testigo) en el inferior (Tabla 41).

Tabla 41. Valores medios* de número de tallos en *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis* durante el periodo de desarrollo en el jardín vertical, según su ubicación.

*Sustrato	Frankenia		Pachysandra	
	Superior	Inferior	Superior	Inferior
	N° Tallos		N° Tallos	
FC+PE (testigo)	19,5 a B	7,3 a A	11,8 a B	7,3 a A
CPC+FC	11,5 a B	5,5 a A	10,3 a A	10,0 a A
FC+CPC	13,8 a B	5,1 a A	14,7 a B	10,0 a A
RVC+CPC	15,8 a B	5,0 a A	10,0 a A	9,0 a A
RVC+FC	18,3 a B	7,5 a A	12,7 a B	7,5 a A

Tabla 42. Valores medios* de número de raíces en *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis* durante el periodo de desarrollo en el jardín vertical, según su ubicación.

*Sustrato	Frankenia		Pachysandra	
	Superior	Inferior	Superior	Inferior
	Nº Raíces		Nº Raíces	
FC+PE (testigo)	16,5 a A	16,5 a A	11,3 a A	23,3 a B
CPC+FC	15,3 a A	15,3 a A	8,5 a A	21,5 a B
FC+CPC	10,8 a A	14,8 a A	6,0 a A	26,3 a B
RVC+CPC	10,3 a A	14,8 a A	11,0 a A	27,5 a B
RVC+FC	11,5 a A	16,3 a A	12,0 a A	26,0 a B

Tabla 43. Valores medios* de diámetro de tallo principal en *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis* durante el periodo de desarrollo en el jardín vertical, según su ubicación.

*Sustrato	Frankenia		Pachysandra	
	Superior	Inferior	Superior	Inferior
	Diámetro tallo (mm)		Diámetro tallo (mm)	
FC+PE (testigo)	4,85 a A	4,05 a A	5,33 a A	4,85 a A
CPC+FC	5,18 a A	4,26 a A	5,05 a A	4,75 a A
FC+CPC	4,87 a A	3,33 a A	4,89 a A	4,76 a A
RVC+CPC	4,49 a A	3,48 a A	4,75 a A	4,46 a A
RVC+FC	6,46 a A	4,33 a A	4,49 a A	4,59 a A

Tabla 44. Valores medios* de diámetro de raíz principal en *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis* durante el periodo de desarrollo en el jardín vertical, según su ubicación.

*Sustrato	Frankenia		Pachysandra	
	Superior	Inferior	Superior	Inferior
	Diámetro raíz (mm)		Diámetro raíz (mm)	
FC+PE (testigo)	6,36 a A	4,01 a A	4,44 a A	4,79 a A
CPC+FC	4,25 a A	4,14 a A	4,50 a A	5,31 a A
FC+CPC	5,66 a A	3,21 a A	3,89 a A	5,09 a A
RVC+CPC	5,58 a A	3,67 a A	4,22 a A	4,69 a A
RVC+FC	4,76 a A	4,74 a A	4,04 a A	5,19 a A

En Tabla 41, Tabla 42, Tabla 43 y Tabla 44: *Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Letra mayúscula en común y en una ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD/ t Student. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales compostados.

En *Pachysandra*, en la variable número de tallos, el saco superior fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) en el testigo, en FC+CPC y en RVC+FC con respecto a la ubicación inferior. En el número de raíces la ubicación inferior fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$). Entre sustratos no hubo diferencias significativas en las dos ubicaciones. (Tabla 42). En cuanto a los diámetros de tallo y raíz principal no hubo diferencias entre ubicaciones ni entre sustratos para cada una de las especies de interés (Tabla 43; Tabla 44).

Valores mínimos y máximos de diámetro de tallo y raíz principal del saco superior se encontraron entre 4,5 (RVC+FC) y 5,3 (Testigo) unidades y entre 3,9 (FC+CPC) y 4,5 (CPC+FC) unidades, respectivamente. Así también, en la ubicación inferior estos rangos estuvieron entre 4,5 (RVC+CPC) y 4,9 (Testigo) unidades y entre 4,7 (RVC+CPC) y 5,3 unidades (CPC+FC), respectivamente (Tabla 43; Tabla 44).

4.2.7. Elementos en el tejido vegetal de *Frankenia laevis* y *Pachysandra terminalis*

En este apartado se presentan resultados correspondientes a las concentraciones de: **Sodio (Na), Magnesio (Mg), Calcio (Ca) y Potasio (K)**, así como también de: **Hierro (Fe), Zinc (Zn), Manganeso (Mn) y Cobre (Cu)** encontradas en el tejido vegetal de *Frankenia* y *Pachysandra*.

4.2.7.1 Sodio, Magnesio, Calcio y Potasio en el tejido vegetal de las especies

La Figura 66 muestra los valores medios de Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} y K^+ en la parte aérea de *Frankenia* (Figura 66, arriba) y *Pachysandra* (Figura 66, abajo) según el sustrato. Atendiendo a los valores arrojados en el testigo (FC+PE) destaca del resto por tener los valores medios más altos de estos macro-elementos en *Frankenia* (Figura 66, arriba). Esto posibilita o incluso retrasa el aporte de dichos nutrientes al inicio del desarrollo, debido a que contiene reservas de nutrientes suficientes. En *Pachysandra* destaca el K en RVC+CPC, el Mg en CPC+FC y RVC+CPC, el Na en el sustrato testigo y el Ca en los sustratos con alto contenido de restos de poda compostados (RVC+CPC y RVC+FC) (Figura 66, abajo). El valor de Na registrado en CPC+FC en *Pachysandra* se acerca al valor encontrado por López-Cuadrado *et al.* (2006) en una mezcla de corteza de pino compostada + fibra de madera (80%) y turba rubia (20%) (39,07 ppm de Na). Los valores de K y Ca en CPC+FC en *Pachysandra*, fueron inferiores a valores reportados por López-Cuadrado *et al.* (2006), mientras que el Mg fue mayor.

Elemento	*Nivel de referencia
Na ⁺	1-10
Mg ²⁺	0,1-0,4
Ca ²⁺	1-10
K ⁺	1-5

Figura 66. Concentración media* de nutrientes disponibles en parte aérea de *Frankenia laevis* (arriba) y *Pachysandra terminalis* (abajo) según sustrato (expresada en ppm).

Elemento	*Nivel de referencia
Ca ²⁺	1-10
K ⁺	1-5
Mg ²⁺	0,1-0,4

Figura 67. Concentración media* de nutrientes disponibles en zona radicular de *Frankenia laevis* (arriba) y *Pachysandra terminalis* (abajo), según sustratos (en ppm).

En Figura 66 y Figura 67: *Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. Mg=Magnesio, K=Potasio, Ca=Calcio. CPC=corteza de pino, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales.*Fuente: Bennett (1993); niveles de referencia ($\text{g } 100\text{g}^{-1} \text{ Ms}$).

La Figura 67 muestra los valores de **Ca, K, Mg y en raíces de Frankenia** (Figura 67, arriba) y **Pachysandra** (Figura 67, abajo), **según sustrato**. En Frankenia, el mayor de contenido de Ca y K se registró en RVC+FC, sin ser estadísticamente diferente del testigo y de RVC+CPC. El Mg destacó en RVC+CPC (Figura 67, arriba). En Pachysandra el menor contenido de Ca en las raíces se registró en el testigo; el K destacó en el testigo e igualó a los sustratos con restos vegetales compostados. En cuanto al Mg, el menor valor se registró en CPC+FC (Figura 67, abajo).

4.2.7.2 Cobre, Zinc, Manganese y Hierro en el tejido vegetal de las especies

La Figura 68 muestra las concentraciones de **Cu, Zn, Mn y Fe en parte aérea de Frankenia** (Figura 68, arriba) y **Pachysandra** (Figura 68, abajo) **según el sustrato**. Atendiendo a los valores de Cu, Zn, Mn y Fe mínimos y máximos registrados en Frankenia (masa aérea), oscilaron entre: 15,1 y 18,3 ppm, 38,0 y 58,1 ppm, 120,7 y 129,2 ppm y 131,8 154,0 ppm, respectivamente. En Frankenia, el Cu y Mn fue estadísticamente igual en todos los sustratos. El Zn y el Fe fue estadísticamente menor en FC+CPC y en RVC+CPC, respectivamente (Figura 68, arriba). En Pachysandra, se registraron valores mínimos y máximos entre: 10,0 y 15,0 ppm en Cu, 22,8 y 29,0 ppm en Zn, 123,8 y 127,0 en Mn y 130,8 y 166,2 ppm en Fe. El Cu fue estadísticamente similar en CPC+FC y FC+CPC; el Zn, fue estadísticamente menor en el testigo y en RVC+FC; el Mn, destacó en el testigo e igualó a CPC+FC y a RVC+FC. El Fe fue estadísticamente menor en CPC+FC (Figura 68, abajo).

La Figura 69 muestra las concentraciones de **Cu, Zn, Mn y Fe obtenidos en la parte radicular de Frankenia** (Figura 69, arriba) y **Pachysandra** (Figura 69, abajo) **según el sustrato**. En Frankenia, las concentraciones de Cu fueron mayores en CPC+FC y éste estadísticamente igual a FC+CPC y RVC+CPC; el Zn se destacó en el sustrato testigo, no obstante en el Mn destacaron FC+CPC, RVC+CPC y el testigo. En cuanto al Fe no hubo diferencia entre sustratos (Figura 69, arriba). En Pachysandra, las concentraciones de Cu y Fe fueron superiores en el sustrato CPC+FC, igualando a los sustratos con restos vegetales compostados. En el Zn destacó FC+CPC y en Mn el sustrato testigo. En general, según los límites de referencias para microelementos sugeridos por Bennett (1993), los valores medios registrados en masa aérea y radicular en Frankenia y Pachysandra, según el sustrato se encontró en los niveles sugeridos.

Figura 68. Concentración media* de nutrientes menores disponibles en parte aérea de *Frankenia laevis* (arriba) y *Pachysandra terminalis* (abajo) (expresada en ppm).

Figura 69. Concentración media* de nutrientes menores disponibles en zona radicular de *Frankenia laevis* (arriba) y *Pachysandra terminalis* (abajo), según sustratos (en ppm).

En Figura 68 y Figura 69: Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. Cu=cobre, Zn=Zinc, MN=Manganeso, Fe=Hierro. CPC=corteza de pino, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales.*Fuente: Bennett (1993): niveles de referencia (g 100g⁻¹ Ms).

4.2.7.3 Sodio, Magnesio, Calcio y Potasio en tejido vegetal, según ubicación del sustrato

La Figura 70 y Figura 71 muestra los valores de Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} y K^+ en la parte aérea de *Frankenia* y *Pachysandra*, respectivamente, según la ubicación del sustrato. En *Frankenia* (saco superior), el Na destacó RVC+FC mientras que en saco inferior destacó FC+CPC. En el sustrato testigo resultó con menor contenido de sodio en ambas ubicaciones. El Mg (saco superior) fue mayor en el testigo y menor en RVC+FC, mientras que en el saco inferior destacó CPC+FC igualando a RVC+CPC. El Ca tuvo igual comportamiento en las dos ubicaciones ($< \text{RVC+FC}$). El K destacó en FC+CPC (superior) y en CPC+FC (inferior) (Figura 71). En *Pachysandra*, en el saco superior en cuanto al Na destacó RVC+FC, en Mg el testigo difiriendo únicamente de RVC+FC, en Ca FC+CPC y en K CPC+FC igualando a FC+CPC. Mientras que en el saco inferior, en Na destacaron FC+CPC y el testigo; en Mg CPC+FC, igualando al testigo y a RVC+CPC; en Ca CPC+FC, igualando a FC+CPC, al testigo y a RVC+CPC y por último en el K no hubo diferencias entre sustratos (Figura 71).

Elemento	*Nivel de referencia
Na ⁺	1-10
Mg ²⁺	0,1-0,4
Ca ²⁺	1-10
K ⁺	1-5

Figura 70. Nutrientes disponibles en zona aérea de *Pachysandra terminalis* según la ubicación del sustrato en el panel de cultivo (arriba: saco superior; abajo: inferior) (expresada en ppm).

Figura 71. Nutrientes disponibles en zona aérea de *Pachysandra terminalis* según la ubicación del sustrato en el panel de cultivo (arriba: saco superior; abajo: inferior) (expresada en ppm).

En Figura 70 y Figura 71: * Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. Na=Sodio, Mg=Magnesio, K=Potasio, Ca=Calcio. CPC=corteza de pino, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales. *Fuente: Bennett (1993): niveles de referencia (g 100g⁻¹ Ms).

4.2.7.4 Contenido de Fósforo (P) en parte aérea y radicular

La Figura 72 muestra los valores medio de **concentraciones de fósforo (P)** presente en las partes **aérea** y **radicular** en **Frankenia** y en **Pachysandra**. En Frankenia se destaca mayor concentración de P en sustratos con mayor proporción de restos vegetales compostados (RVC+CPC y RVC+FC), tanto en la parte aérea como radicular, seguidamente del sustrato testigo. Los mayores contenidos de este elemento se concentraron en la parte radicular de la planta. Los valores mínimos y máximos oscilaron entre 36,9 ppm de P y 49,6 ppm de P en la masa aérea, mientras que en la parte radicular se encontraron rangos medios de 36,7 ppm de P y 56,3 ppm de P (Figura 72, arriba). En ese sentido, en la Pachysandra, el comportamiento de P fue contrario a la Frankenia, debido a que la mayor concentración se encontró en la parte aérea de la planta. Se destacan valores de P (aéreo y radicular) en sustratos con mayor proporción de fibra de coco (FC+CPC y FC+PE). Los rangos oscilaron entre 33,2 ppm de P y 48,8 ppm de P en parte aérea y 23,1 ppm de P y 41,2 ppm de P (Figura 72, abajo).

Figura 72. Concentración media* de fósforo en parte aérea y radicular de *Frankenia laevis* (arriba) y *Pachysandra terminalis* (abajo) (expresada en ppm*).

*Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, PE=poliestireno expandido, RVC=Restos vegetales.

4.3 SUSTRATOS POTENCIALES EN UNA CUBIERTA VEGETAL

A fin de conocer el **comportamiento y la evolución** de distintos **sustratos** seleccionados, se estableció un segundo ensayo en una **cubierta vegetal**, donde se determinaron las **propiedades físicas y químicas** obtenidas en **dos muestreo destructivos**: durante el **primer y segundo** año de su **establecimiento**. Además, de lo visto anteriormente a lo largo del ensayo **se estudió la respuesta de cuatro especies vegetales** como **plantas indicadoras: Teucrium, Othonna, Frankenia y Crassula** para el establecer diferencias del desarrollo vegetativo **en función de los sustratos**. El desarrollo exitoso de una cubierta vegetal no sólo dependerá de la especie vegetal y del sustrato, dependerá de otros factores de manejo, ambientales, antrópicos, entre otros. Cuando se utilizan sustratos como medio de cultivo de procedencia reciclada es difícil igualar el desarrollo en una misma especie vegetal o que la densidad plantación de las especies se mezcle y se adapten con exactitud a las condiciones del hábitat en las cubiertas vegetales (Bates *et al.*, 2015). Así que durante el primer o segundo año de desarrollo, el conjuntos de plantas (especies) tienden a cambiar a medida que las plantas bien adaptadas a las condiciones del hábitat se propaguen, mientras que las plantas mal adaptadas a las condiciones no se desarrollan y tiendan a desaparecer (Köhler, 2006; Dunnett *et al.*, 2008; Köhler y Poll, 2010; Rowe *et al.*, 2012; Lundholm *et al.*, 2014).

4.3.1 Evaluación inicial de los sustratos en la cubierta vegetal

En este apartado se presentan las **propiedades hidrofísicas representadas gráficamente con las curvas de humedad** específicas para cada uno de los sustratos **se evaluaron** antes del ensayo. En ese sentido, la **densidad aparente** y las **propiedades químicas** se obtuvieron una vez instalado el ensayo (julio 2013).

4.3.1.1. Curvas de humedad

Las curvas características de estos sustratos (Figura 73 y Figura 74) a diferentes tensiones (0, 10, 50 y 100 cm de columna de agua) muestran diferencias importantes entre sí.

Figura 73. Curvas de humedad de las mezclas i) 70% restos vegetales compostados+30% puzolana volcánica (RVC+PV) (arriba) y ii) 70% corteza de pino compostada+30% puzolana volcánica (CPC+PV) (abajo).

En comparación con muchos suelos, estos sustratos pierden a succiones bajas gran cantidad del agua retenida. Así, por ejemplo para 10 cm, tanto RVC+PV como CPC+PV, presentan un contenido volumétrico de humedad (θ) de 25 y 30%, respectivamente. A medida que incrementa la succión, estos sustratos pierden humedad con mayor rapidez, por lo que el comportamiento en estos dos sustratos es similar, debido a que las pendientes que representan las curvas, inicialmente presentan valores superiores al 65% pero estos valores disminuyen un 25%, 21% y 18% al someter el sustrato a tensiones de 10, 50 y 100 cm de columna de agua, respectivamente. Se observa que para una misma tensión de succión, la tendencia entre los sustratos con contenido de puzolana volcánica (RVC+PV y CPC+PV) es parecida, siendo los valores de CPC+PV ligeramente superiores en los diferentes puntos de tensión con respecto a RVC+PV. A una succión de cero cm de tensión de columna de agua todos los sustratos mostraron diferencias, siendo estos dos sustratos (RVC+PV y CPC+PV) los que

presentan la menor retención de humedad a bajas tensiones (Figura 73). Contrario a lo anterior, las mezclas que retienen la mayor cantidad de humedad volumétrica son los sustratos con proporciones orgánicas (CPC+FC, RVC+CPC y RVC+FC) (Figura 74).

Figura 74. Curvas de humedad de los sustratos: i) 70% corteza de pino compostada+30% fibra de coco (CPC+FC) (arriba), ii) 70% restos vegetales compostados+30% corteza de pino compostada (RVC+CPC) (centro) y iii) 70% restos vegetales compostados+30% fibra de coco (RVC+FC) (abajo).

Así, para succiones menores a 10 cm estos se mantienen en condiciones de saturación, sin embargo con un aumento de succión hasta 10 cm, el contenido de humedad cae paulatinamente. Con una succión de 10 cm, CPC+FC, presente un θ del 47% y a 50 cm del 39%. Para valores de succión de 100 cm, mientras que RVC+CPC y RVC+FC han perdido agua ($\theta = 31$ y 28%, respectivamente), CPC+FC retiene aún un 35%. Teniendo en cuenta que RVC+CPC y RVC+FC poseen una porosidad mayor que CPC+FC y que pierde el contenido de humedad de forma más brusca, se deduce que éstos tienen una mayor cantidad de macroporos.

Graceson *et al.* (2013) en estudios de simulaciones de techo verde evaluaron medios de cultivos elaborados a partir de ladrillo grueso triturado, sustrato comercial Lytag® modificado con un 10%, 20% y 30% (v/v) de compost de residuos verdes plantados con sedum y prado reportaron que la capacidad de retención de agua de los sustratos de cultivo a base de ladrillo fue más bien el doble que la de los medios de cultivo a base de azulejo grueso; y en contraste, la capacidad de retención de agua de los sustratos de cultivo elaborados con ladrillo fino sólo era mayor que la de los medios de cultivo realizados con ladrillo grueso cuando se utilizó 30% residuos verdes compostado.

4.3.1.2. Densidad aparente

Los mayores promedios de densidad aparente (D_a) correspondieron a los sustratos con 30% de puzolana volcánica, con valores de $0,57 \text{ g cm}^{-3}$. La menor D_a se mostró en los sustratos con proporciones orgánicas (Figura 75). Al inicio del ensayo los valores registrados se mantuvieron por debajo del límite inferior sugerido en este estudio para la cubierta vegetal ($0,5\text{-}1 \text{ g cm}^{-3}$). Por otro lado, solamente CPC+FC se acerca al valor óptimo ($0,4 \text{ g cm}^{-3}$) recomendado por Ansorena (1994) y Abad *et al.* (2001) (Figura 40). Los sustratos evaluados se pueden clasificar como agregados ligeros, lo cual es muy importante para cubiertas vegetales, de acuerdo a la normativa BS EN 13055-1 todos caen dentro de los límites establecidos de densidad ($\leq 1.20 \text{ kg m}^{-3}$) para este tipo de jardinería (Molineux *et al.*, 2009).

Figura 75. Densidad aparente (Da) media* en los sustratos al inicio del establecimiento de la cubierta vegetal del ensayo.

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco. Abad *et al.*, 1993: nivel de referencia: $Da = >40 \text{ g cm}^{-3}$. Niveles de referencia sugerido en este estudio: $Da = 0,5-1 \text{ g cm}^{-3}$.

4.3.1.3. pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno y relación C/N

En la Tabla 46 se presentan el pH, la conductividad eléctrica (CE), porcentajes de materia orgánica y nitrógeno y la relación carbono/nitrógeno de los sustratos seleccionados para la cubierta vegetal. En relación al pH y la CE, se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0,05$) entre los sustratos.

Tabla 45. Valores medios* de pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica, nitrógeno y relación carbono/ nitrógeno en sustratos al inicio del ensayo de la cubierta vegetal.

**Sustrato	pH	CE (mS m ⁻¹)	MO (%)	N (%)	C/N
RVC+PV	7,7 d	30,07 b	36,0 a	1,23 c	23,3 a
CPC+PV	5,7 b	22,67 a	33,0 a	1,05 c	24,7 a
CPC+FC	5,5 a	46,13 d	58,7 c	0,98 b	48,0 b
RVC+CPC	8,0 e	49,17 e	52,3 b	0,80 a	52,7 c
RVC+FC	7,4 c	40,17 c	55,9 bc	0,81 a	55,2 c
¹ Nivel sugerido en este estudio	6-7,5	40-80	10-40	-	< 40
Nivel de referencia	5,5-6,82	15,1-50,03	>80%	-	20-402

*Medias con una letra común en una misma fila y para una misma variable no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco. CE=conductividad eléctrica, MO=materia orgánica, N=nitrógeno, C/N=relación carbono/nitrógeno. ¹Según normativa UNE-EN 2000-2008. Fuente: ²Abad *et al.*, (1993); ³Carmona y Abad (2008), en extracto de saturación.

Los sustratos con mayor contenido de corteza de pino compostada (CPC+PV y CPC+FC) presentaron pH ácidos, mostrando los menores valores medio de 5,7 y 5,5, respectivamente (Tabla 46). Sin embargo, los sustratos con mayor contenido de restos vegetales compostados, mostraron pH alcalinos y por encima de los valores medios recomendados por Abad *et al.* (1993). La corteza de pino, por lo general suele presentar pH ácido (alrededor de 5), por lo general, cuando este material entra en proceso de compostaje el pH normalmente aumenta, por lo que en algunas ocasiones y por esta razón, este material como compost solo, no se recomiendan como sustratos de cultivo. Algunos valores de pH encontrados en corteza de pino compostada arrojan valores de 7,0 (Hernández-Apaolaza *et al.*, 2005), de 6,2 y 5,5 (Barral-Silva *et al.*, 2007), 5,6 en corteza de pino (Ostos *et al.*, 2008). Los sustratos con contenido de restos vegetales compostados en mayor proporción presentaron pH alcalinos desde 7,4 (RVC+FC) hasta 8,0 (RVC+CPC). López-Cuadrado *et al.*, (2006) encontró valores de 7,6 en sustratos compostados en base a RSU + restos vegetales. En ese sentido, Ostos *et al.* (2008) encontraron pH de 7,0 y 7,3 por Barral-Silva *et al.* (2007). Molineux *et al.* (2009) en un estudio de caracterización sustratos para su uso en techos verdes extensivos elaborados a partir de materiales reciclados (ladrillo rojo triturado (como control) y tres sustratos alternativos hechos de arcilla y lodos de depuradora, cenizas de papel (de periódicos reciclados) y calizas carbonatadas, encontraron que el pH varió considerablemente en los cuatro agregados y que los valores medios más bajos fueron para el sustrato de arcilla (pH 8,53) que mostró una alcalinidad leve, seguidos de pellets de ceniza de papel (pH 9,33) y de ladrillo rojo (pH 9,71). Los mayores valores medios fueron para pellets carbon (pH 11,80).

La CE media osciló entre rangos mínimos y máximos de 22,7 y 49,2 mS m⁻¹, cifras ajustadas en los valores de referencias reportadas por Carmona y Abad (2008) (Tabla 46). La incorporación de compost a los medios de cultivos, suele verificar por lo general, aumentar la salinidad de los sustratos debido a que la propia CE los materiales compostados (Masaguer *et al.*, 2015). Pérez-Murcia *et al.* (2006) y Wilson *et al.* (2006) emplearon lodos compostados que presentaban una CE de 204 mS m⁻¹ (en extracto 1:6) y 1120 mS m⁻¹ (en extracto 1:2), respectivamente.

Con respecto a la MO los sustratos con puzolana volcánica tuvieron un porcentaje significativamente menor ($p \leq 0,05$) y significativamente superior ($p \leq 0,05$) en CPC+FC (Tabla 46). Molineux *et al.* (2009) encontraron efectos significativos en el contenido orgánico así como el tipo de sustrato y una interacción significativa entre las dos variables. Estos autores sugieren que si se consideran nuevos materiales procedentes de fuentes recicladas como “nuevos sustratos” para terrazas verdes, debe haber una cuidadosa consideración en la cantidad de materia orgánica que se agrega. Por otro lado, en estudios de diferentes sustratos en la producción de *Osteospermum eklonis*, López-Cuadrado *et al.* (2006) encontraron mayor proporción de MO en sustratos con corteza de pino. Los valores medio de MO mostraron rangos entre 33% y 59%.

El %N divide claramente dos grupos, el primero agrupa los sustratos con 30% de puzolana volcánica, los cuales fueron significativamente superiores ($p \leq 0,05$) y con un contenido de nitrógeno superior al 1% y por otro lado, los sustratos orgánicos cuyo contenido fue de 70% restos vegetales compostados, los cuales mostraron un %N significativamente inferior ($p \leq 0,05$) y de 0,8% (Tabla 46). Estos porcentajes estaban influenciados por la fertilización de fondo realizada junto con la colocación de los sustratos en los contenedores de vegetación. Por otro lado, la relación media C/N osciló entre 24 y 95. Abad *et al.* (1993) recomienda este valor entre 20 y 40. Masaguer *et al.* (2015) sugieren que si la relación de C/N de los materiales compostados es baja (menor a 15-20) en el proceso de mineralización se liberará N en formas minerales. Por lo contrario, si es una relación alta, los microorganismos que degradan el material requerirán N y otros nutrientes para su desarrollo, siendo sustraídos del sustrato los que se encuentren en la fase acuosa.

4.3.1.4. Contenido de fósforo y bases intercambiables iniciales

En la Tabla 46 se presentan **contenido de fósforo y cationes intercambiables: Ca, Mg, K y Na**) en **sustratos** y medidos al inicio del ensayo. Se aprecia que el contenido de P medio estuvo entre 57,6 ppm y 72,2 ppm, valores dentro del rango según Lemaire *et al.* (2003). Los sustratos con pH inferiores (CPC+PV y CPC+FC) destacan por la alta concentración de fósforo soluble, lo cual facilita que sean asimilables por las plantas (Peterson, 1982).

Son evidentes las diferencias de criterio entre autores sobre los valores óptimos de P en los sustratos orgánicos. Mientras Ansorena (1994) y Warncke (1986) proponen como adecuado el valor de 10 ppm, Sungro (1997) lo establece en 60 ppm. Tomando como referencia lo propuesto por los primeros autores, todos los sustratos analizados se ubican por arriba del valor óptimo, pero si se toma como referencia al segundo criterio, los sustratos que estarían fuera de dicho intervalo serían RVC+PV y CPC+PV (Tabla 46). Masaguer *et al.* (2015) reporta que muchos materiales compostados presentan contenidos de fósforo total por encima de los que suelen tener los componentes habituales (turba o corteza de pino), aún con fertilización adicional. Un mayor contenido de P total estará ligado a una mayor disponibilidad de este nutriente.

Tabla 46. Valores medios* de contenido de fósforo y bases intercambiables en los sustratos, medidos al inicio del ensayo en la cubierta vegetal.

Sustrato	P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
	⁽¹⁾ (ppm)				
RVC+PV	58,1 a	464,3 a	11,6 a	187,5 a	14,1 ab
CPC+PV	69,3 bc	450,7 a	11,8 a	178,5 a	17,6 ab
CPC+FC	72,2 c	450,6 a	17,7 b	177,8 a	23,2 b
RVC+CPC	60,9 b	434,1 a	11,4 a	191,3 a	11,6 ab
RVC+FC	57,6 a	449,5 a	11,5 a	186,1 a	10,3 a
⁴ Nivel de referencia	40-80 ⁽²⁾ ppm	>200 ⁽³⁾ ppm	30-60 ⁽²⁾ ppm	93-186 ⁽²⁾ ppm	<150 ⁽²⁾ ppm

*Medias con una letra común en una misma fila y para una misma variable no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco. P=fósforo, Ca=calcio, Mg=magnesio, K=Potasio, Na=sodio. ¹Según normativa UNE-EN 2000-2008. Fuente: ⁽²⁾ Lemaire *et al.* (2003). ⁽³⁾ Cadahía y Eymar (1993), ⁴en extracto de saturación.

Las concentraciones de elementos solubles en agua (Ca, Mg y K) en los cinco sustratos de cultivos estudiados no mostraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en Ca y K. Todos los materiales presentaron valores de Ca con concentraciones mayores a los 400 ppm. Concentraciones por debajo a las reportadas por Eggerth *et al.* (2007) en compostas de pasto, de residuos de papel y de residuos de alimentos con 875, 2800 y 2511 ppm respectivamente. Con relación al K, los sustratos con mayor proporción de restos vegetales compostados, sobrepasaron el límite superior de K referenciado por Lemaire *et al.* (1998). Al respecto, Ansorena (1994) y Warncke (1986) plantean valores óptimos de 150-249 y 250-349 ppm, mientras que Sungro (1997) establece como deseable el intervalo de 40 a 360 ppm.

En cuanto al Mg, se encontraron diferencias ($p \leq 0,05$) entre CPC+FC con respecto al resto de los sustratos, siendo el valor más alto CPC+FC (Tabla 46). La inclusión de productos compostados en las mezclas de sustratos suele aumentar la disponibilidad de estos nutrientes (Masaguer, *et al.*, 2015). Barral-Silva *et al.* (2007) indican que en composts RSU, RSU con poda, biosólidos con poda y vermicompost presentaron concentraciones en forma total (extraídos con agua regia) y en forma disponible (extraídos con agua o cloruro cálcico/DTPA) de Ca, K y Mg mucho mayores que otras materias primas, como corteza de pino compostada y turba. Moldes *et al.* (2007) encontraron que el contenido de nutrientes (P, Mg, K y Ca) fueron mayores en MSWC (compost de residuos sólidos urbanos) que en la corteza de pino compostada o turba.

El Na mostró diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre CPC+FC y RVC+FC, sin embargo, este último no fue significativamente ($p \leq 0,05$) diferente al resto de los sustratos (Tabla 46). En general, los valores de Na encontrados en este estudio se encontraron por debajo del valor de referencia. En estudios realizados con RSU y lodos de depuradora, López-Cuadrado *et al.* (2006) determinaron un contenido de Na entre 3 y 8 veces mayor que un sustrato a base de turba. Grigatti *et al.* (2007) reportaron contenidos de Na de 3,2% en compost de residuos verdes y lodos (80%+20% v/v).

4.3.1.5. Contenido en micronutrientes: Cu, Zn, Mn y Fe

En la Tabla 47 se presentan **los micronutrientes: Cu, Zn, Mn y Fe en sustratos** y medidos al inicio del ensayo. En relación a los elementos menores o micronutrientes, el Cu y el Zn no mostraron diferencias significativas ($P \leq 0,05$), sin embargo, el Mn y el Fe fueron significativamente superiores en CPC+FC (153,0 ppm y 464,3 ppm, respectivamente), seguido de CPC+PV (110,6 ppm y 244,2 ppm, respectivamente) (Tabla 47). Los sustratos basados en turba y corteza de pino, suelen presentar contenido totales de micronutrientes (hierro, cobre, zinc) inferiores a los que suelen presentar los sustratos compostados con materiales de origen urbano (RSU, biosólidos o industrial), por lo que de forma automática en un sustrato se suelen incrementar con la adición del compost. Por el contrario, compost provenientes de residuos agrícolas y hortícolas (Mazuela *et al.*, 2005), restos de podas y en general de restos vegetales, así como lo RSU de recogida selectiva, suelen presentar contenidos bajos, incluso inferiores a los

sustratos habituales. No obstante, ciertos restos vegetales como las cortezas pueden ser ricas en Fe y Mn (Masaguer, *et al.*, 2015).

Tabla 47. Valores medios* de elementos menores en los sustratos, medidos al inicio del ensayo en la cubierta vegetal.

¹ Sustrato	Cu	Zn	Mn	Fe
	⁽¹⁾ (ppm)			
RVC+PV	3,0 a	25,3 a	66,4 a	365,5 b
CPC+PV	3,6 a	26,6 a	110,6 b	244,2 b
CPC+FC	2,8 a	25,9 a	153,0 c	464,3 c
RVC+CPC	2,8 a	26,0 a	69,2 a	154,6 a
RVC+FC	3,1 a	26,7 a	79,8 a	169,3 a
³ Nivel de referencia	0,001-0,5 (2) ppm	0,3-3,0 (2) ppm	0,02-3,0 (2) ppm	0,3-3,0 (2) ppm

*Medias con una letra común en una misma fila y para una misma variable no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco. Cu=cobre, Zn=zinc, Mn=manganeso y Fe=hierro. ¹Según normativa UNE-EN 2000-2008. ²Cadahía y Eymar (1993). ³En extracto de saturación.

4.3.2 Evolución de los sustratos ensayados en la cubierta vegetal

En el siguiente apartado se presentan los resultados correspondientes al **comportamiento** y la **evolución** temporal de las **propiedades físicas y químicas** en los **cinco sustratos orgánicos seleccionados para el ensayo en la cubierta vegetal**. Las **propiedades** se evaluaron a partir de dos muestreos destructivos realizados al **primer y segundo año** (abril (2014 y 2015), respectivamente) de su establecimiento.

4.3.2.1 Densidad aparente

La Figura 76 muestra la densidad aparente (Da) registrada al inicio, primer y segundo año de establecida la cubierta vegetal y compara estos valores según la fecha de muestreo. En ese sentido, la Figura 77 presenta el comportamiento y la evolución de la Da media en los sustratos según la fecha de muestreo. La densidad aparente da una buena indicación de la porosidad, lo que determina la velocidad a la cual el aire y el oxígeno pueden moverse a través del sustrato. La Da fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) al inicio del ensayo. Los valores obtenidos mostraron una disminución a medida que pasó el tiempo, presentando una Da de $0,50 \text{ g cm}^{-3}$ al inicio del establecimiento del ensayo (julio 2013), $0,47 \text{ g cm}^{-3}$ en abril 2014 y $0,44 \text{ g cm}^{-3}$ en abril 2015.

Figura 76. Densidad aparente media* en la cubierta vegetal, según la fecha de muestreo.

*Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. Da= densidad aparente. Abad *et al.*, 1993: nivel de referencia: Da= 40 g cm⁻³. Niveles de referencia sugerido en este estudio: Da= 0,5-1 g cm⁻³.

Figura 77. Densidad aparente (Da) media* en los sustratos ensayados en la cubierta vegetal, según la fecha de muestreo.

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco. Abad *et al.*, 1993: nivel de referencia: Da= 0,40 g cm⁻³. Niveles de referencia sugerido en este estudio: Da= 0,5-1 g cm⁻³.

Por otro lado, el comportamiento de la Da en los sustratos en el tiempo mostró una Da significativamente mayor ($p \leq 0,05$) en los sustratos con contenido de puzolana volcánica (RVC+PV y CPC+PV) al inicio y al primer año de establecida la terraza con valores superiores a 0,64 g cm⁻³. Notoriamente se destacan grupos de sustratos, por un lado los de densidad significativamente alta por su naturaleza (30% puzolana volcánica:

RVC+PV y CPC+PV), seguidamente de aquellos que en su contenido tienen un 70% de restos vegetales compostados (RVC+CPC y RVC+FC) y por último el sustrato más ligero por su contenido de fibra de coco en la composición de la mezcla (CPC+FC). Los valores mínimos y máximos de Da oscilaron entre 0,36 y 0,64 g cm⁻³ al inicio del ensayo (julio 2013); 0,31 y 0,61 g cm⁻³ al primer año de establecida la terraza (abril 2014) y entre 0,28 y 0,51 g cm⁻³ al final del ensayo (abril 2015) (Figura 77). Estos valores son superiores a los propuestos por las normas españolas (2001-2002) como estándar en corteza de pino compostada (190,6 kg m⁻³), pero se adaptan a los niveles propuestos en este estudio para cubierta vegetal (0,5-1 g cm⁻³).

4.3.2.2 pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno y relación C/N

En la Tabla 48 se muestran valores medios de **pH y conductividad eléctrica (CE)**, obtenidos en los **sustratos al primer (Abril 2014) y segundo año (Abril 2015) de establecida la cubierta vegetal**.

Tabla 48. Valores medios* de pH y conductividad eléctrica (CE) en sustratos ensayados en la cubierta vegetal según la fecha de evaluación.

Sustrato	pH ₂₀₁₄	pH ₂₀₁₅	CE ₂₀₁₄ (mS m ⁻¹)	CE ₂₀₁₅ (mS m ⁻¹)
RVC+PV	6,6 d	7,4 d	30,21 a	23,89 ab
CPC+PV	5,9 c	6,6 c	29,93 a	21,75 a
CPC+FC	4,1 a	4,5 a	44,19 c	28,72 b
RVC+CPC	5,6 c	6,6 c	38,18 b	26,23 ab
RVC+FC	5,2 b	6,2 b	39,67 b	25,46 ab
Nivel sugerido	6,0-7,5		40-80	
⁽³⁾Nivel de Referencia	⁽¹⁾ 5,5-6,8		⁽²⁾ 15,1-50,0	

*Medias con una letra común en una misma columna y para una misma ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco. ¹Abad *et al.*, (1993), ²Carmona y Abad (2008). ³En extracto de saturación.

Los valores medios de **pH** encontrados en los sustratos al año del establecimiento de la cubierta vegetal fueron relativamente inferiores con respecto a los valores medios al final del ensayo (abril 2015), registrando valores mínimos y máximos entre 4,1 (CPC+FC) y 6,6 (RVC+PV); pasando a pH más alcalinos en sustratos con mayor proporción de restos vegetales compostados y manteniendo la acidez en sustratos con mayor proporción de corteza de pino compostada. Al segundo año los valores mínimos y máximos de pH oscilaron entre 4,5 (CPC+FC) y 7,4 (RVC+PV).

Según Moldes *et al.* (2007) el pH de algunos materiales compostados podría ser neutral a ligeramente ácido (6,5 a 7,5) y debe reducirse si excede cerca a pH 8,0. Estos autores encontraron valores de pH neutro en la corteza de pino compostada y ligeramente alcalino en un Compost de RSU y ácido un sustrato de turba.

Al inicio del ensayo la **CE** fue significativamente menor ($p \leq 0,05$) en RVC+PV ($30,2 \text{ mS m}^{-1}$) y CPC+PV ($29,93 \text{ mS m}^{-1}$) en abril 2014 y superior en CPC+FC ($44,19 \text{ mS m}^{-1}$). En cuanto a la CE, el efecto más significativo es un descenso importante en la salinidad al final del ensayo con respecto a la primera evaluación. Ninguno de los valores de CE representa un problema con respecto al desarrollo de la planta y se ajustan a los valores sugeridos en este estudio.

En la Tabla 49 se muestran valores medios de **materia orgánica (MO)**, **nitrógeno (N)** y **la relación C/N** obtenidos en los **sustratos** al al **primer (Abril 2014)** y **segundo año (Abril 2015)** establecida la **cubierta vegetal**. El **%MO** fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) en los sustratos con mezclas orgánicas, tanto en el primer como en el segundo año de establecida la cubierta vegetal (Tabla 49). CPC+FC, RVC+CPC y RVC+FC se mostraron aceptables. Los valores medios de MO en CPC+FC, RVC+CPC y RVC+FC comparados con los del primer año tuvieron un ligero incremento en su contenido. Este aumento puede deberse a la presencia de materiales orgánicos (raíces) después del desarrollo de las especies vegetales. Es útil informar sobre la MO inicial y final, ya que esto da una idea de la magnitud de la descomposición. Moldes *et al.* (2007) reportaron MO de 98% en corteza de pino compostada, 99% en turba y 46% en RSU.

Tabla 49. Valores medios* de materia orgánica (MO), carbono orgánico (CO) y relación carbono/nitrógeno (C/N) en sustratos ensayados en la cubierta vegetal según la fecha de evaluación.

Sustrato	%MO ₂₀₁₄	%MO ₂₀₁₅	%N ₂₀₁₄	%N ₂₀₁₅	C/N ₂₀₁₄	C/N ₂₀₁₅
RVC+PV	46,4 a	39,5 a	1,14 c	1,04 d	24,5 a	22,1 a
CPC+PV	42,0 a	38,9 a	1,01 c	0,89 c	24,0 a	25,4 a
CPC+FC	64,8 b	66,6 b	0,84 b	0,79 b	46,7 b	49,3 b
RVC+CPC	60,1 b	62,4 b	0,72 a	0,68 a	51,3 b	54,1 c
RVC+FC	63,1 b	63,9 b	0,69 a	0,66 a	54,0 b	56,3 c
Nivel sugerido	10-40		-		> 40	
¹ Nivel de Referencia	>80%		-		20-40	

*Medias con una letra común en una misma columna y para una misma ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco. ¹Abad *et al.*, (1993), en extracto de saturación.

El **nitrógeno** mantuvo la misma tendencia del contenido inicial, mostrando un mayor porcentaje en las mezclas con puzolana volcánica y menor en sustratos con mezclas orgánicas con 70% de restos vegetales compostados (Tabla 49). Sin embargo, mostró un descenso de %N al final del ensayo, producido por la absorción de nutrientes por las plantas o por los lavados en las evaluaciones de recogida de lixiviados durante todo el experimento.

La **relación C/N** fue significativamente superior ($p \leq 0,05$) en los sustratos con mayor porcentaje restos vegetales compostados (RVC+PV y RVC+FC), tanto en la primera evaluación como en la segunda (Tabla 49). La relación C/N al igual que la MO en CPC+FC, RVC+CPC y RVC+FC comparados con los del primer año también experimentaron un incremento. Según, los criterios de Abad *et al.* (1993) con respecto a la relación C/N, los sustratos con mezclas orgánicas se salen del intervalo óptimo, debido a que indican que una relación C/N entre 20 y 40 es considerada adecuada para el cultivo en sustratos orgánicos.

4.3.3 Modificación de los sustratos según la especie vegetal

En la Tabla 50, Tabla 51, Tabla 52 y Tabla 53 se muestran valores medios de **pH** y **conductividad eléctrica (CE)** en los sustratos obtenidos en el primer y segundo año de establecida la cubierta vegetal, **según la especie vegetal**. La tendencia en el **pH** fue similar en las especies evaluadas. Es notorio como se refleja un pH fuertemente ácido en CPC+FC en las cuatro especies tanto en el primer como en el segundo año (Tabla 50, Tabla 51, Tabla 52 y Tabla 53). Kaudal *et al.* (2016) reportaron pH de 5,3 en un sustrato testigo compuesto por corteza de pino compostada (80%) y fibra de coco (20%). Sin embargo, este pH aumentó a medida que añadieron biochar urbano como sustituto de la fibra de coco. A lo inverso, RVC+PV fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) a lo largo del desarrollo de las especies vegetales en la cubierta vegetal. En la mayoría de los sustratos de cultivo la adición de fertilizantes puede causar una disminución en el pH.

Tabla 50. Valores medios* de pH y conductividad eléctrica (CE) en sustratos ensayados en la cubierta vegetal con *Teucrium chamaedrys* en distintas fechas de evaluación.

Sustrato	pH ₂₀₁₄	pH ₂₀₁₅	CE ₂₀₁₄ (mS m ⁻¹)	CE ₂₀₁₅ (mS m ⁻¹)
RVC+PV	6,8 c	7,8 c	29,83 a	24,75 a
CPC+PV	5,9 b	6,6 b	34,23 a	21,63 a
CPC+FC	4,1 a	4,4 a	37,30 b	30,23 b
RVC+CPC	5,6 b	6,6 b	37,48 b	26,18 b
RVC+FC	5,2 b	6,5 b	38,83 b	27,83 b
Nivel sugerido	6,0-7,5		40-80	
⁽³⁾ Nivel de Referencia	⁽¹⁾ 5,5-6,8		⁽²⁾ 15,1-50,0	

Tabla 51. Valores medios* de pH y conductividad eléctrica (CE) en sustratos ensayados en la cubierta vegetal con *Othonna cheirifolia* en distintas fechas de evaluación.

Sustrato	pH ₂₀₁₄	pH ₂₀₁₅	CE ₂₀₁₄ (mS m ⁻¹)	CE ₂₀₁₅ (mS m ⁻¹)
RVC+PV	6,8 c	7,4 c	28,78 a	21,88 a
CPC+PV	5,9 b	6,4 b	27,88 a	20,00 a
CPC+FC	4,2 a	4,5 a	41,40 b	28,98 b
RVC+CPC	5,7 b	6,6 b	38,20 b	28,78 b
RVC+FC	5,6 b	6,1 b	37,80 b	28,20 b
Nivel sugerido	6,0-7,5		40-80	
⁽³⁾ Nivel de Referencia	⁽¹⁾ 5,5-6,8		⁽²⁾ 15,1-50,0	

Tabla 52. Valores medios* de pH y conductividad eléctrica (CE) en sustratos ensayados en la cubierta vegetal con *Frankenia thymifolia* en distintas fechas de evaluación.

Sustrato	pH ₂₀₁₄	pH ₂₀₁₅	CE ₂₀₁₄ (mS m ⁻¹)	CE ₂₀₁₅ (mS m ⁻¹)
RVC+PV	6,3 c	7,1 d	32,90 a	23,57 a
CPC+PV	5,9 b	6,9 c	30,81 a	23,38 a
CPC+FC	4,3 a	4,7 a	47,30 b	36,68 b
RVC+CPC	5,6 b	6,4 b	42,23 b	29,00 b
RVC+FC	5,1 b	6,1 b	42,78 b	28,35 b
Nivel sugerido	6,0-7,5		40-80	
⁽³⁾ Nivel de Referencia	⁽¹⁾ 5,5-6,8		⁽²⁾ 15,1-50,0	

Tabla 53. Valores medios* de pH y conductividad eléctrica (CE) en sustratos ensayados en la cubierta vegetal con *Crassula lycopodioides* en distintas fechas de evaluación.

Sustrato	pH ₂₀₁₄	pH ₂₀₁₅	CE ₂₀₁₄ (mS m ⁻¹)	CE ₂₀₁₅ (mS m ⁻¹)
RVC+PV	6,7 d	7,2 c	29,33 a	20,30 a
CPC+PV	6,0 c	6,4 b	26,83 a	17,98 a
CPC+FC	3,8 a	4,3 a	40,75 b	28,04 b
RVC+CPC	5,5 b	6,7 b	38,80 b	29,92 b
RVC+FC	5,9 c	6,3 b	39,28 b	30,52 b
⁽¹⁾ Nivel sugerido	6,0-7,5		40-80	
⁽²⁾ Nivel de Referencia	⁽³⁾ 5,5-6,8		⁽⁴⁾ 15,1-50,0	

En Tabla 50, Tabla 51, Tabla 52 y Tabla 53. *Medias con una letra común en una misma columna y para una misma ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=restos vegetales compostados, PV=puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco. ¹Nivel sugerido en este estudio para esta cubierta vegetal. ²En extracto de saturación. ³Abad *et al.* (1993), ⁴Carmona y Abad (2008).

Los sustratos con restos de podas compostada en las mezclas orgánicas (RVC+CPC y RVC+FC) mostraron igualdad en cuanto al pH en *Teucrium*, *Othonna* y *Frankenia* en los dos años de evaluación. Sin embargo, en *Crassula* solamente el primer año RVC+FC fue significativamente superior ($p \leq 0,05$) a RVC+CPC, por lo que el segundo año se igualaron. Estos sustratos se ajustan a los valores de referencia de Abad *et al.* (1993), así como a los niveles sugeridos en este estudio.

La CE media se presentan como adecuadas para el desarrollo de las especies en todos los sustratos, sin embargo es significativamente superior en CPC+FC, RVC+CPC y RVC+FC (Tabla 50, Tabla 51, Tabla 52 y Figura 50). Notoriamente se observan dos grupos de sustratos en cada una de las especies, en primer lugar los que contienen puzolana volcánica y que su CE fue significativamente menor ($p \leq 0,05$) y en segundo lugar los sustratos de mezclas orgánicas (CPC+FC, RVC+CPC y RVC+FC) con una CE superior. Kaudal *et al.* (2016) reportaron una CE de 28 mS m^{-1} en un sustrato testigo compuesto por corteza de pino compostada (80%) y fibra de coco (20%). Este valor aumentó en la medida que adicionaban biochar urbano en 40% y 60% como sustituto de la fibra de coco. Cabe destacar que la respuesta de las plantas a la salinidad depende en gran parte de la especie, de su estadio de desarrollo, de las condiciones ambientales y por supuesto del manejo agronómico. Durante el tiempo de la cubierta vegetal y en el siguiente orden *Crassula* y *Othonna* fueron las especies más tolerantes en cuanto a la salinidad se refiere. Sin embargo, *Teucrium* y *Frankenia* tuvieron menor tolerancia a la salinidad y estuvieron más sensibles durante la fase inicial de su desarrollo.

En la Tabla 54, Tabla 55, Tabla 56 y Tabla 57 se muestran valores medios de **materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y la relación C/N** obtenidos en sustratos el **primer y segundo año** de establecida en la cubierta vegetal, **según la especie vegetal**. El tipo de sustrato es un factor muy influyente en las propiedades químicas. El hecho de que se observaron dos grupos significativamente diferentes (en el nivel $P < 0,05$) con respecto a la composición del sustrato, así como de la especies vegetales evaluadas están estrechamente relacionados con la composición del sustrato sobre el que se desarrollaron.

Tabla 54. Valores medios* de materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y la relación C/N en sustratos ensayados en la cubierta vegetal con *Teucrium chamaedrys* en distintas fechas de evaluación.

Sustrato	%MO ₂₀₁₄	%MO ₂₀₁₅	%N ₂₀₁₄	%N ₂₀₁₅	C/N ₂₀₁₄	C/N ₂₀₁₅
RVC+PV	43,5 a	37,8 a	1,09 b	1,07 c	23,1 a	20,6 a
CPC+PV	50,2 a	37,7 a	1,08 b	0,86 b	27,0 a	25,6 a
CPC+FC	67,6 b	64,0 b	0,69 a	0,66 a	57,3 b	48,9 b
RVC+CPC	62,1 b	61,3 b	0,61 a	0,61 a	59,5 b	57,1 c
RVC+FC	66,9 b	65,9 b	0,63 a	0,62 a	62,1 b	62,1 d
⁽¹⁾ Nivel sugerido	10-40		-		> 40	
⁽²⁾ Nivel de Referencia	>80%		-		20-40	

Tabla 55. Valores medios* de materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y la relación C/N en sustratos ensayados en la cubierta vegetal con *Othonna cheirifolia* en distintas fechas de evaluación.

Sustrato	%MO ₂₀₁₄	%MO ₂₀₁₅	%N ₂₀₁₄	%N ₂₀₁₅	C/N ₂₀₁₄	C/N ₂₀₁₅
RVC+PV	40,7 a	40,8 a	1,24 c	0,99 b	19,0 a	23,9 a
CPC+PV	38,6 a	41,2 a	1,01 b	0,93 b	22,7 a	25,8 a
CPC+FC	64,1 b	69,4 b	0,99 b	0,75 a	37,2 b	53,9 b
RVC+CPC	65,4 b	62,8 b	0,69 a	0,69 a	55,8 d	52,7 b
RVC+FC	61,3 b	61,5 b	0,86 a	0,68 a	41,6 c	52,5 b
⁽¹⁾ Nivel sugerido	10-40		-		> 40	
⁽²⁾ Nivel de Referencia	>80%		-		20-40	

Tabla 56. Valores medios* de materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y la relación C/N en sustratos ensayados en la cubierta vegetal con *Frankenia thymifolia* en distintas fechas de evaluación.

Sustrato	%MO ₂₀₁₄	%MO ₂₀₁₅	%N ₂₀₁₄	%N ₂₀₁₅	C/N ₂₀₁₄	C/N ₂₀₁₅
RVC+PV	48,4 a	40,2 a	1,14 c	1,11 c	24,6 a	23,2 a
CPC+PV	42,2 a	39,7 a	0,94 c	0,93 c	26,1 a	24,8 a
CPC+FC	66,0 b	64,6 b	0,71 b	0,81 b	54,3 b	46,3 b
RVC+CPC	61,8 b	61,5 b	0,61 a	0,64 a	58,9 b	56,5 c
RVC+FC	63,9 b	65,1 b	0,64 a	0,65 a	57,6 b	58,3 c
⁽¹⁾ Nivel sugerido	10-40		-		> 40	
⁽²⁾ Nivel de Referencia	>80%		-		20-40	

Tabla 57. Valores medios* de materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y la relación C/N en sustratos ensayados en la cubierta vegetal con *Crassula lycopodioides* en distintas fechas de evaluación.

Sustrato	%MO ₂₀₁₄	%MO ₂₀₁₅	%N ₂₀₁₄	%N ₂₀₁₅	C/N ₂₀₁₄	C/N ₂₀₁₅
RVC+PV	52,9 b	39,1 a	1,08 c	1,09 c	31,4 b	20,9 a
CPC+PV	37,0 a	37,0 a	1,06 c	0,85 b	20,2 a	25,2 a
CPC+FC	61,5 b	68,4 b	0,95 b	0,83 b	37,9 b	47,9 b
RVC+CPC	51,0 b	63,9 b	0,99 b	0,76 a	31,1 b	50,4 b
RVC+FC	60,5 b	63,3 b	0,65 a	0,71 a	54,8 c	52,1 b
⁽¹⁾ Nivel sugerido	10-40		-		> 40	
⁽²⁾ Nivel de Referencia	>80%		-		20-40	

En Tabla 54, Tabla 55, Tabla 56 y Tabla 57: *Medias con una letra común en una misma columna y para una misma ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=restos vegetales compostados, PV=puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco. ¹Nivel sugerido en este estudio para esta terraza ajardinada. ²Abad *et al.* (1993), en extracto de saturación.

La **MO** en los sustratos muestra el mismo comportamiento en *Teucrium*, *Othonna* y *Frankenia*. Refleja valores medios significativamente inferiores ($p \leq 0,05$) en los sustratos con puzolana volcánica, dada a la naturaleza de la mezcla. Por otro lado, los porcentajes de MO en las mezclas orgánica superaron el 60% en las dos evaluaciones y en estas tres especies (Tabla 54, Tabla 55, Tabla 56). En el primer año, en *Crassula* RVC+PV se igualó a los sustratos con mezclas orgánicas; sin embargo el segundo año de evaluación la MO fue similar a CPC+PV (Tabla 57).

En cuanto al **%N**, su comportamiento varió según la especie vegetal. En **Teucrium** fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) en RVC+PV y CPC+PV en 2014 y en RVC+PV seguido de CPC+PV en 2015. Los valores de N oscilaron entre 0,61% (RVC+CPC) y 1,09% (RVC+PV) en 2014 y entre 0,61% (RVC+CPC) y 1,79% (RVC+PV) en 2015 (). En **Othonna**, el primer año destacó RVC+PV, sin embargo, se observaron dos grupos: las mezclas con 70% de corteza de pino compostada y las mezclas orgánicas con 70% restos de poda compostada. En el segundo año, el nitrógeno se redujo en todos los sustratos, excepto en RVC+CPC y destacó en los sustratos con puzolana volcánica (Tabla 55). En **Frankenia**, las proporciones orgánicas con 70% restos vegetales compostados mantuvieron valores significativamente bajos ($p \leq 0,05$) en 2014 y 2015. Todos los sustratos mostraron un ligero descenso en el %N, excepto CPC+FC que incrementó su contenido final en 10 unidades (Tabla 56). En **Crassula**, se encontraron contenidos de N bajos en RVC+FC en 2014 y 2015, mostrando un aumento en este último año (Tabla 57). Con estos resultados se observa que en los sustratos con restos de poda compostada el nitrógeno no sufre un cambio importante en el tiempo. Masaguer, *et al.* (2015) indican que la fertilidad de los materiales compostados puede ser muy diversa, enfatizan en que algunos casos los composts de cortezas de diferentes especies arbóreas presentan una fertilidad baja. En ese sentido, resaltan que otros materiales como los restos de poda tienen un nivel de fertilidad media o incluso baja. Por otro lado, Jackson *et al.* (2009) afirman que los sustratos con contenido de madera o restos vegetales pueden ser susceptibles a la degradación por parte de los microorganismos.

La **relación C/N** fue significativamente inferior ($p \leq 0,05$) en sustratos con contenido de puzolana volcánica en la mezcla (RVC+PV; CPC+PV) en **Teucrium**, **Othonna** y **Frankenia**, en 2014 y 2015. Esta relación viene dada por el nitrógeno disponible en estos sustratos. En **Othonna**, la relación C/N destacó en RVC+FC en 2014. Sin embargo, al final del ensayo esta variable mantuvo el mismo comportamiento que hubo con las demás especies. Los sustratos que contienen puzolana volcánica están más mineralizados (contenido de carbono orgánico menor) que los sustratos con mezclas orgánicas. Esto podría ser una ventaja para evitar inmovilización de N debido a la alta relación C: N (García *et al.*, 1992). Abad, Noguera y Carrión (1998) indican que una relación C/N de hasta 30 que es adecuada para el cultivo en sustratos orgánicos y es un índice de un material maduro y estable.

4.3.4 Indicadores de crecimiento derivados de muestreo destructivo

En este apartado, se presentan **parámetros biométricos** derivados de la producción vegetal de las especies vegetales indicadoras establecidas en la cubierta vegetal: *Teucrium chamaedrys*, *Othonna cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula poliploides*, a fin de establecer la evolución de los sustratos de acuerdo al crecimiento vegetativo. Por lo que, se presentan resultados correspondientes a: longitud (LG), peso fresco (PF) y peso seco (PS) en la parte aérea y radicular obtenidos al primer (2014) y segundo año (2015) del ensayo.

4.3.4.1 Longitud, peso fresco y peso seco en la parte aérea, según la fecha de evaluación

En la Figura 78 se muestra la **longitud (LG) en la parte aérea** de *Teucrium*, *Othonna*, *Frankenia* y *Crassula* medida al **primer y segundo año** de establecido el ensayo de la cubierta vegetal, **de acuerdo al sustrato**. En **Teucrium**, se observan longitudes entre 9,2 (CPC+FC) y 32,5 cm (RVC+FC) en el primer año, mientras que en el segundo año las variaciones en esta variable oscilan entre 17,5 (CPC+FC) y 35,0 cm (RVC+FC). En **Othonna**, el crecimiento supera los 35 cm de longitud durante el primer año y alcanza un poco más de 50 cm en el segundo año. En **Frankenia** destacaron RVC+CPC y RVC+FC en los dos años de evaluación y **Crassula** presentó una tendencia homogénea debido a que no hubo diferencias entre tratamientos.

Figura 78. Logitud (LG) media* en la parte aérea de *Teucrium chamaedrys*, *Othonna Cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula lycopodioides* en sustratos ensayados en la cubierta vegetal, según la fecha de evaluación.

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco.

En *Teucrium*, *Othonna* y *Frankenia* los valores más altos se destacaron en RVC+CPC y RVC+FC (Figura 78). Todas las especies registraron el valor mínimo significativo ($p \leq 0,05$) de LG en CPC+FC, el mismo podría estar asociado a las altas conductividades y al bajo pH. García-Gómez *et al.* (2002) en un estudio de crecimiento de las plantas ornamentales en dos compost preparados a partir de residuos agroindustriales compostados encontraron que después de tres meses del experimento, la altura de las plantas de caléndula fue similar en las dieciséis mezclas de sustratos evaluados que van desde 8,8 cm a 12,6 cm en C1 + CS (25%).

Beattie y Berghage (2004) señalan que la altura de la planta puede no ser tan importante como la biomasa para determinar el éxito de desarrollo de una especie vegetal en un techo verde, debido a que factores como la velocidad del viento y la competencia por la luz del sol puede ser un factor limitante para el desarrollo de las plantas.

En la Figura 79 se muestra el **peso fresco (PF) en la parte aérea** de *Teucrium*, *Othonna*, *Frankenia* y *Crassula* evaluada al **primer y segundo año** de establecido el ensayo de la cubierta vegetal, **de acuerdo al sustrato**.

Figura 79. Peso fresco (PF) medio* en la parte aérea de *Teucrium chamaedrys*, *Othonna Cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula lycopodioides* en sustratos ensayados en la cubierta vegetal, según la fecha de evaluación.

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco.

En **Teucrium**, el comportamiento de los sustratos fue similar entre un año y otro. CPC+FC fue significativamente inferior ($p \leq 0,05$) en los dos años evaluados con respecto a los demás sustratos. La longitud media en *Teucrium* osciló entre 9,0 (CPC+FC) y 15,7 cm (RVC+FC) en 2014 y entre 17,3 (CPC+FC) y 29,6 cm (RVC+FC) en 2015. **Othonna** mostró igualdad entre RVC+PV, CPC+PV y CPC+FC durante el primer año, siendo en éstos significativamente menor ($P \leq 0,05$). Sin embargo, los sustratos incrementaron en más de un 50% para el segundo año de evaluación, destacando los sustratos de restos vegetales compostados con mezclas orgánicas, seguido de los sustratos con puzolana volcánica. En **Frankenia** y **Crassula** destacaron, también los sustratos de restos vegetales compostados con mezclas orgánicas (Figura 79). La caída en el rendimiento medido como peso fresco en CPC+FC puede haber sido debido a un exceso de salinidad, que, en este caso, puede haber causado un desequilibrio osmótico, o el alto nivel de un ion particular tal como el cloruro (François y Maas, 1994). Es probable que en este sustrato el cloruro fuera el anión principal responsable del bajo rendimiento de las especies cultivadas en este sustrato, por efectos aditivos de estrés osmótico y toxicidad específica de iones.

En la Figura 80 se muestra el **peso seco (PS) en la parte aérea** de *Teucrium*, *Othonna*, *Frankenia* y *Crassula* medida al **primer y segundo año** de establecido el ensayo de la cubierta vegetal, **de acuerdo al sustrato**. Se puede observar una tendencia similar con el sustrato CPC+FC en cuanto al peso seco en las especies vegetales, indicando que fue el que peor desarrollo mostró con respecto al resto de sustratos. Además de los bajos pH y alta CE, pudo estar relacionado con la pérdida rápida de agua, bien sea por evapotranspiración o escape o por la falta de riego, los cuáles se extendieron en tiempo debido a que se esperaba que la terraza tuviese un manejo sostenible. Berghage *et al.* (2007) sostuvieron que la pérdida de agua a partir de módulos de vegetación en un invernadero fue más rápida que la pérdida de agua de los módulos sin vegetación durante los primeros tres a seis días después de la irrigación, debido a que las plantas utilizan toda el agua fácilmente disponible rápidamente. Después de esto, las plantas son propensas a sufrir estrés hídrico y dejar de aumentar la biomasa en función de su capacidad para tolerar condiciones de sequía (Handreck y Black, 2002).

Figura 80. Peso seco (PS) medio* en la parte aérea de *Teucrium chamaedrys*, *Othonna Cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula lycopodioides* en sustratos ensayados en la cubierta vegetal, según la fecha de evaluación.

*Medias con una letra común en una misma fecha de evaluación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco.

4.3.4.2 Diámetro de tallo principal, según el sustrato

En la Figura 81 se presentan valores medios de **diámetro de tallo principal (DTP)** en de *Teucrium*, *Othonna*, *Frankenia* y *Crassula* medida al **primer y segundo año** de establecido el ensayo de la cubierta vegetal, **de acuerdo al sustrato**. En ***Teucrium***, durante el primer año de evaluación se registraron valores medios mínimos y máximos de 0,31 mm (CPC+FC) y 0,44 mm (RVC+PV), mientras que en el segundo año, surgió un comportamiento similar debido a que estos rangos aumentaron en 4 y 3 unidades más, respectivamente, para los mismos sustratos.

Figura 81. Valores medios* de diámetro de tallo principal (DTP) (mm) en *Teucrium chamaedrys*, *Othonna Cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula lycopodioides* en sustratos ensayados en la cubierta vegetal, según la fecha de evaluación.

*Medias con una letra común en una misma fecha de evaluación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV=puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco. DTP=diámetro de tallo principal.

En relación a **Othonna**, los valores medios de DTP en el RVC+PV (0,36 mm) fueron superiores el primer año, seguido de CPC+PV (0,32 mm), sin embargo este último destacó el segundo año debido a que registró el mayor DTP con relación a los demás sustratos.

En **Frankenia**, el comportamiento de esta variable fue similar los dos años de muestreo, debido a que en el 2014 se registró un valor mínimo de 0,17 mm en RVC+PV, CPC+PV y RVC+FC, y un valor máximo de 0,40 mm en RVC+CPC. En ese sentido, en abril 2015, se registró un valor mínimo de 0,34 mm en RVC+PV y RVC+FC, seguido de 0,35 mm en CPC+PV, y un valor máximo de 0,42 mm en RVC+CPC. En **Crassula** destacó RVC+FC con 0,49 mm durante el primer año, seguido de RVC+CPC (0,44 mm) y CPC+PV (0,42 mm). Mientras que en el segundo año, CPC+FC (0,54 mm) alcanzó el máximo valor medio de DTP, seguido de RVC+FC (0,50 mm) (Figura 81).

4.3.4.3 Longitud, peso fresco y peso seco en la parte radicular, según la fecha de evaluación

En la Figura 82, Figura 83 y Figura 84 se muestra la **longitud (LG)**, **Peso fresco (PF)** y **peso seco (PS)**, respectivamente, en la parte radicular de *Teucrium*, *Othonna*, *Frankenia* y *Crassula* medida al **primer y segundo año** de establecido el ensayo de la cubierta vegetal, **de acuerdo al sustrato**. El **desarrollo radicular** medido a través de la longitud destaca el sustrato CPC+FC por tener el menor crecimiento en todas las especies, tanto en el primer año de muestreo como en el segundo. García-Gómez *et al.*, (2002) afirman que altas conductividades y pH ácidos pueden dar lugar a un mal desarrollo radicular. En **Teucrium**, durante el primer año no se mostraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre sustratos y la longitud estuvo entre 4,5 (CPC+FC) y 6,3 cm (RVC+FC). En el segundo año, fue significativamente superior ($p \leq 0,05$) en los sustratos con contenido de restos vegetales compostados (RVC). En **Othonna**, durante el primer año de establecida la terraza ajardina, también destacaron los RVC. En 2015 mostró RVC+CPC un incremento, de 22 cm registrado en 2014 a 37 cm. En **Frankenia** destacaron CPC+PV, RVC+CPC y RVC+FC, tanto en 2014 como en 2015. Las longitudes oscilaron entre 12,3 (CPC+FC) y 20,3 cm (RVC+CPC) en la evaluación del primer año (2014) y entre 15,6 (CPC+FC) y 22,2 cm (RVC+CPC) en el segundo año (Figura 82). Los sustratos con restos vegetales compostados propiciaron el mejor desarrollo de la raíz en *Teucrium*, *Othonna* y *Frankenia* porque crearon un ambiente favorable.

Este hecho probablemente se debe a la adecuada relación entre aire, agua y disponibilidad de nutrientes, y peor desarrollo en la mezcla corteza de pino compostada y fibra de coco, donde la liberación de nutrientes podría ser más lenta (Jørgensen *et al.*, 2014). **Othonna** no mostró diferencias de longitudes entre sustratos en ninguno de los dos periodos. Los valores mínimos y máximos oscilaron entre 17,1 cm (CPC+FC) y 20,5 cm (RVC+FC) durante el primer año y entre 15,6 cm (CPC+FC) y 18,9 cm (RVC+CPC) durante el segundo año de evaluación (Figura 82).

Figura 82. Valores medios* de longitud (cm) radicular en *Teucrium chamaedrys*, *Othonna Cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula licopodioides* en sustratos ensayados en la cubierta vegetal, según la fecha de evaluación.

*Medias con una letra común en una misma fecha de evaluación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV=puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco. LG=longitud.

En cuanto al **peso fresco y seco radicular** obtenido en CPC+FC, se encontró por debajo del resto de los sustratos en las diferentes especies indicadoras. En **Teucrium** y **Othonna** mostró igualdad estadística ($p \leq 0,05$) con RVC+PV y CPC+PV, tanto en 2014 como en 2015 (Figura 83, Figura 84, respectivamente). En **Frankenia** y **Crassula** esta igualdad se mantuvo solo en 2014. Este bajo “rendimiento foliar” en CPC+FC se puede atribuir al pH y a la CE, debido a que durante el transcurso del ensayo, dichos parámetros se mantenían altamente ácidos y con conductividades por encima de los valores recomendados para el buen desarrollo vegetal, pudiendo ser debidos a un error durante la aplicación de fertilizante al inicio del ensayo. Valores mínimos y máximos de PF radicular (en gramos por planta) obtenidos al primer año de evaluación oscilaron entre 4,7 y 14,0 g planta⁻¹ en **Teucrium**, 2,2 y 6,6 g planta⁻¹ en **Othonna**, 1,0 y 1,8 g planta⁻¹ en **Frankenia** y 3,1 y 6,7 g planta⁻¹ en **Crassula**. Sin embargo, al **segundo año** se registraron rangos mucho mayores, los cuáles oscilaron entre 13,3 y 32,1 g planta⁻¹ en **Teucrium**, 11,0 y 28,5 g planta⁻¹ en **Othonna**, 2,5 y 5,9 g planta⁻¹ en **Frankenia** y 16,7 y 40,6 g planta⁻¹ en **Crassula** (Figura 83). Es evidente que el tipo de material que se utilice en una mezcla (orgánico o inorgánico) como medio de cultivo afectará al rendimiento medido a través del crecimiento de las plantas y de su biomasa (masa fresca/ seca) en función del tipo de sustrato utilizado (Beattie y Berghage, 2004). Como se muestra en este ensayo los resultados indican que ciertos sustratos consiguieron un menor desarrollo vegetal, como el sustrato corteza de pino compostada con fibra de coco, o podrían ir muy bien en el crecimiento de la planta, como los sustratos restos vegetales que podrían ser utilizados como materiales alternativos en cubiertas vegetales techos verdes.

Figura 83. Peso fresco (PF) medio* en la parte radicular de *Teucrium chamaedrys*, *Othonna cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula lycopodioides* en sustratos ensayados en la cubierta vegetal, según la fecha de evaluación. *Peso en g planta⁻¹

*Medias con una letra común en una misma columna y sustrato no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, RVC=Restos vegetales compostados, PV=puzolana volcánica. *Peso en g planta⁻¹

Figura 84. Peso seco (PS) medio* en la parte radicular de *Teucrium chamaedrys*, *Othonna cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula licopodioides* en sustratos ensayados en la cubierta vegetal, según la fecha de evaluación.

En ambas figuras: *Medias con una letra común en una misma columna y sustrato no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV=puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco. *Peso en g planta⁻¹

4.3.5 Elementos en tejido vegetal de las especies indicadoras de la cubierta vegetal

Además de un buen sustrato, otros factores importantes para el buen crecimiento y desarrollo de plantas en una cubierta vegetal son los elementos nutricionales, tales como P, Mg, K y Ca. Las concentraciones de estos elementos pueden ser expresados como formas totales o disponibles. En este apartado se presentan los contenidos de **Fósforo (P)** y **Nitrógeno (N)** en el tejido vegetal aéreo y radicular de *Teucrium*, *Othonna*,

Frankenia y Crassula, además de las concentraciones en las bases intercambiables: **Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K) y Sodio (Na)**. En ese sentido, también se muestran los micronutrientes considerados en este trabajo para la cubierta vegetal: **Cobre (Cu), Zinc (Zn), Manganeso (Mn) y el Hierro (Fe)**.

4.3.5.1 Fósforo y nitrógeno en tejido vegetal: parte aérea y radicular

Los contenidos de **Fósforo (P)** y **Nitrógeno (N)** en la **parte aérea y radicular** de **Teucrium, Othonna, Frankenia y Crassula**, según el sustrato se muestran en la Figura 85 y Figura 86, respectivamente. En relación al **contenido de P** en la **parte aérea**, en **Teucrium** CPC+PV ($38,6 \text{ mg L}^{-1}$) fue significativamente inferior ($P \leq 0,05$), sin embargo, este mismo sustrato fue el que más destacó con $76,8 \text{ mg L}^{-1}$ de P en **Crassula** junto con CPC+FC ($67,6 \text{ mg L}^{-1}$). En **Othonna** destacó en CPC+FC ($91,4 \text{ mg L}^{-1}$) y en **Frankenia** superó RVC+FC ($118,7 \text{ mg L}^{-1}$). En las **raíces** destacaron RVC+PV ($72,3 \text{ mg L}^{-1}$) y RVC+CPC ($59,6 \text{ mg L}^{-1}$) en **Teucrium**; RVC+CPC ($88,0 \text{ mg L}^{-1}$) en **Othonna**; en **Frankenia** destacaron los sustratos con corteza de pino compostada en 70% (CPC+PV y CPC+FC con $29,1$ y $33,1 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente) y por último en **Crassula** no hubo diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre sustratos (Figura 85). López-Cuadrado *et al.* (2006) encontraron que la mezcla 80% corteza de pino fue uno de los sustratos que presentó mayor concentración de P en la planta.

En cuanto al **%N** en la **parte aérea** destacaron CPC+FC y RVC+FC en las cuatro especies indicadoras. En el resto de los sustratos el **%N** fue significativamente menor ($p \leq 0,05$) que estos dos sustratos. En la **parte radicular**, en **Teucrium** destacaron CPC+PV (2,9%) y CPC+FC (3,3%), sin embargo en **Othonna, Frankenia y Crassula**, CPC+FC fue significativamente mayor ($P \leq 0,05$). En general, los valores medios de **%N** oscilaron entre 2,2 y 4,0% en la parte aérea y entre 2,0 y 4,4% en raíces (Figura 86). López-Cuadrado *et al.* (2006) reportaron que el contenido de nitrógeno en *Pelargonium zonale* fue mayor en sustratos con corteza de pino compostada.

Figura 86. Valores medios* de Nitrógeno en la parte aérea (izquierda) y radicular (derecha) de *Teucrium chamaedrys*, *Othonna cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula lycopodioides* en sustratos ensayados en la cubierta vegetal.

*Medias con una letra común en una misma columna y sustrato no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, RVC=Restos vegetales compostados, PV=puzolana volcánica. Expresado en $\text{g } 100\text{g}^{-1}$ de materia seca.

4.3.5.2 Concentraciones de Sodio, Magnesio, Calcio y Potasio

Las concentraciones de elementos solubles, principalmente: **Sodio (Na)**, **Magnesio (Mg)**, **Calcio (Ca)** y **Potasio (K)** obtenidos en el tejido vegetal **aéreo** y **radicular** de **Teucrium**, **Othonna**, **Frankenia** y **Crassula**, se muestran en la Figura 87, Figura 88, Figura 89 y Figura 90, según el sustrato.

Figura 87. Valores medios* de Sodio (Na) en tejido vegetal aéreo (izquierda) y radicular (derecha), en *Teucrium chamaedrys*, *Othonna cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula poliploides* en sustratos ensayados en la cubierta vegetal.

*Medias con una letra común en una misma columna y para una misma ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, RVC=Restos vegetales compostados, PV=puzolana volcánica. *Expresado en g/100g de materia seca. *Bennett (1993): niveles de referencia ($\text{g } 100\text{g}^{-1} \text{ Ms}$): 1-10 ppm o mg L^{-1} de Na.

Los valores medios de **sodio (Na)** registrados en la **parte aérea** de **Teucrium** y **Crassula** superaron los niveles sugeridos por Bennett (1993), sin embargo, **Othonna** y **Frankenia** acumularon menor cantidad de sodio. Valores de Na en **Teucrium** y **Crassula** con CPC+FC superaron los 31,0 y 45,4 mg L^{-1} , respectivamente. Estas altas concentraciones podrían atribuirse a la alta conductividad eléctrica ($44,19 \text{ mS m}^{-1}$) que presenta en el año en que se recolectó el material vegetal (abril 2014). **Othonna** y **Frankenia** acumularon menor contenido de Na en el tejido aéreo oscilando entre 3,4 (RVC+FC) y 10,6 mg L^{-1} (CPC+FC) en la primera y entre 2,7 (RVC+FC) y 7,7 mg L^{-1} (CPC+PV) (Figura 87). En las **raíces** la acumulación de Na fue generalmente superior con respecto a la parte aérea, pero mantuvo la tendencia, donde, en **Teucrium** y **Crassula** fue mayor que en **Othonna** y **Frankenia** donde hubo menor cantidad de sodio.

En las cuatro especies en CPC+FC el Na fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) que en el resto de los sustratos. Los rangos de Na oscilaron entre 19,5 (RVC+PV) y 30,3 mg L⁻¹ (CPC+FC) en *Teucrium*; entre 11,2 (RVC+PV) y 19,4 mg L⁻¹ (CPC+FC) en *Othonna*; entre 8,5 (RVC+FC) y 17,5 mg L⁻¹ (CPC+FC) en *Frankenia* y entre 27,0 (RVC+FC) y 56,0 mg L⁻¹ (CPC+FC) en *Crassula* (Figura 87).

En las **concentraciones de Mg** los resultados arrojaron que no hubo diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre sustratos en *Teucrium*, *Othonna*, *Frankenia* y *Crassula* ni en la parte aérea ni en la radicular. En la **parte aérea** los valores registrados fueron alrededor de 11 y 12 mg L⁻¹ de Mg, mientras que en la parte radicular oscilaron entre 12 y 14 mg L⁻¹ de Mg (Figura 88).

Figura 88. Valores medios de Magnesio (Mg) en tejido vegetal aéreo (izquierda) y radicular (derecha), en *Teucrium chamaedrys*, *Othonna cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula poliploides* en sustratos ensayados en la cubierta vegetal.

*Medias con una letra común en una misma columna y para una misma ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, RVC=Restos vegetales compostados, PV=puzolana volcánica. *Expresado en g/100g de materia seca. *Bennett (1993): niveles de referencia (g 100g⁻¹ Ms): 0,1-0,4 ppm o mg L⁻¹ de Mg.

En cuanto a las **concentraciones de Ca** en la **parte aérea de *Teucrium*, *Othonna*, *Frankenia* y *Crassula*** se observan igualdades estadísticas ($p \leq 0,05$) entre los sustratos. Los rangos de Ca oscilaron entre 396,1 y 411,3 mg L⁻¹ en *Teucrium*, entre 345,0 y 368,6 mg L⁻¹ en *Othonna*, entre 544,5 y 575,6 mg L⁻¹ en *Frankenia* y entre 459,7 y 518,5 mg L⁻¹ en *Crassula* (Figura 89). En cuanto a las **concentraciones de Ca** en las **raíces** se observaron diferencias ($p \leq 0,05$) entre tratamientos en *Teucrium*,

Frankenia y Crassula; en **Othonna** no hubo diferencias entre sustratos, encontrándose valores de Ca entre 31,2 y 42,3 mg L⁻¹. En **Teucrium** destacaron RVC+CPC (139,7 mg L⁻¹), CPC+FC (133,1 mg L⁻¹) y RVC+PV (121,1 mg L⁻¹). En **Frankenia** destaca RVC+CPC (115,2 mg L⁻¹), seguido de y CPC+FC (73,6 mg L⁻¹) y CPC+PV (65,6 mg L⁻¹). En **Crassula** los sustratos con puzolana volcánica fueron significativamente inferiores ($p \leq 0,05$) que los demás sustratos. Los contenidos de Ca mínimo y máximo estuvieron entre 21,7 (CPC+PV) y 44,5 mg L⁻¹ (RVC+CPC) (Figura 89).

Figura 89. Valores medios de Calcio (Ca) en tejido vegetal aéreo (izquierda) y radicular (derecha), en *Teucrium chamaedrys*, *Othonna cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula poliploides* en sustratos ensayados en la cubierta vegetal.

*Medias con una letra común en una misma columna y para una misma ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, RVC=Restos vegetales compostados, PV=puzolana volcánica. *Expresado en g/100g de materia seca. *Bennett (1993): niveles de referencia (g 100g⁻¹ Ms): 1-10 ppm o mg L⁻¹ de Ca.

El **contenido de K** presente en el tejido vegetal de *Teucrium*, *Othonna*, *Frankenia* y *Crassula* tuvo un comportamiento similar la parte aérea con respecto a la parte radicular. No obstante, las concentraciones de K en la parte aérea fueron muy superiores a la de la parte radicular. En **Teucrium**, no hubo diferencias significativas entre tratamientos ($P \leq 0,05$); los rangos oscilaron entre 171,4 (CPC+FC) y 185,8 mg L⁻¹ (RVC+FC) en la parte aérea y entre 31,9 (CPC+FC) y 34,9 mg L⁻¹ (RVC+FC) en la raíz. En los sustratos con contenido de puzolana volcánica (RVC+PV y CPC+PV), **Othonna** y **Crassula** tuvieron mayor ($p \leq 0,05$) contenido de K en la parte aérea y en la radicular con respecto a los sustratos con mezclas orgánicas.

Los valores mínimos y máximos de K oscilaron entre 184,4 (CPC+FC) y 210,8 mg L⁻¹ (CPC+PV) y entre 191,1 (RVC+CPC) y 203,8 mg L⁻¹ (CPC+PV) en la parte aérea de *Othonna* y *Crassula*, respectivamente. En ese sentido, en la raíz se encontraron valores que oscilaron entre 24,7 (CPC+FC) y 33,9 mg L⁻¹ (CPC+PV) en *Othonna* y entre 24,3 (CPC+FC) y 35,5 mg L⁻¹ (CPC+PV) en *Crassula*. **Frankenia** tuvo mayor concentración de K en el tejido vegetal cuando esta creció en sustratos con restos vegetales compostados (mezclas orgánicas). Los valores oscilaron entre 164,9 (CPC+PV) y 195,0 mg L⁻¹ (RVC+CPC) en la parte aérea y entre 25,5 (CPC+FC) y 36,6 mg L⁻¹ (RVC+CPC) en la raíz (Figura 90). Masaguer *et al.* (2015) indican que por lo general los materiales compostados presentan contenidos de nutrientes (Mg, Ca y K) mayores que los que se encuentran en los sustratos basados en turba y corteza de pino. Algunos composts presentan concentraciones significativamente elevadas, lo que podría reflejar una alta salinidad o CE. Young *et al.* (2002) midieron niveles de Mg, Ca y K en compost agotado de champiñón que fueron hasta 21, 31 y 137 veces mayores que los correspondientes valores en sustrato testigo a base de fibra de coco y que superaron ampliamente los niveles óptimos. Por lo que los contenidos en el tejido vegetal podrían estar asociados a las cantidades acumuladas en el sustrato.

Figura 90. Valores medios* de Potasio (K) en tejido vegetal aéreo (izquierda) y radicular (derecha), en *Teucrium chamaedrys*, *Othonna cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula poliploides* en sustratos ensayados en la cubierta vegetal.

*Medias con una letra común en una misma columna y para una misma ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, RVC=Restos vegetales compostados, PV=puzolana volcánica. *Expresado en g/100g de materia seca. *Bennett (1993): niveles de referencia (g 100g⁻¹ Ms): 1-5 ppm o mg L⁻¹ de K.

4.3.5.3 Concentración de elementos menores: Cobre (Cu), Zinc (Zn), Manganeso (Mn), Hierro (Fe)

Los composts de origen urbano o industrial, por lo general suelen presentar contenido totales de micronutrientes (cobre, hierro, zinc) y metales pesados (níquel, cadmio, plomo, mercurio) superiores a los que presentan los sustratos habituales basados en turba y corteza de pino, con lo que las concentraciones de estos elementos en un medio de cultivo aumentan directamente con la proporción de aplicación materiales compostados (Masaguer *et al.*, 2015). En la Figura 91, Figura 92, Figura 93 y Figura 94 se presenta la **concentración de elementos menores**, principalmente: **Cobre (Cu), Zinc (Zn), Manganeso (Mn) y el Hierro (Fe)**, respectivamente, **obtenidos en el tejido vegetal aéreo y radicular de Teucrium, Othonna, Frankenia y Crassula**, según el tipo de sustrato.

El **contenido de Cu en la planta** (tejido aéreo y radicular) de **Teucrium, Frankenia y Crassula** fue significativamente superior ($p \leq 0,05$) en los sustratos con proporciones de puzolana volcánica con respecto a los sustratos con proporciones orgánicas en la mezcla. Solamente **Othonna** no presentó diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos. Los rangos de **Cu en la parte aérea** oscilaron entre 2,3 (RVC+CPC) y 4,8 ppm (CPC+PV) en Teucrium, entre 1,4 (CPC+PV) y 1,9 ppm (RVC+PV) en Othonna, entre 2,4 (RVC+CPC) y 3,8 ppm (CPC+PV) en Frankenia y entre 2,5 (CPC+FC; RVC+FC) y 4,2 ppm (RVC+PV) en Crassula (Figura 91, izquierda). En la **parte radicular**, el comportamiento del Cu fue similar que en la parte aérea, registrándose **el mayor contenido de Cu** en CPC+PV y RVC+PV en **Teucrium, Frankenia y Crassula** y mostrando igualdad ($p \leq 0,05$) entre tratamientos en **Othonna**. Los rangos de **Cu en la parte radicular** oscilaron entre 1,4 (CPC+FC) y 4,5 ppm (CPC+PV) en Teucrium, entre 1,7 (CPC+FC) y 2,3 ppm (CPC+PV) en Othonna, entre 3,2 (CPC+FC; RVC+CPC) y 6,8 ppm (CPC+PV) en Frankenia y entre 1,0 (CPC+FC) y 5,4 ppm (RVC+PV) en Crassula (Figura 91, derecha).

Figura 91. Valores medios* de Cobre (Cu) en tejido vegetal aéreo (izquierda) y radicular (derecha), en *Teucrium chamaedrys*, *Othonna cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula poliploides* en sustratos ensayados en la cubierta vegetal.

*Medias con una letra común en una misma columna y para una misma ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, RVC=Restos vegetales compostados, PV=puzolana volcánica. *Expresado en g/100g de materia seca. *Bennett (1993): niveles de referencia ($\text{g } 100\text{g}^{-1} \text{ Ms}$): 5-20 ppm o mg L^{-1} de Cu.

Con respecto al **Zn registrado en la parte aérea** de las cuatro especies evaluadas en la cubierta vegetal no hubo diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre sustratos. Se encontraron valores medios de Zn entre 18,0 (CPC+FC) y 21,2 ppm (RVC+CPC) en **Teucrium**, entre 15,0 (RVC+PV) y 19,7 ppm (CPC+FC) en **Othonna**, entre 39,4 (CPC+FC) y 44,1 ppm (RVC+FC) en **Frankenia** y entre 24,8 (RVC+CPC) y 30,3 (CPC+PV) en **Crassula**. En las **raíces**, el contenido de Zn en **Teucrium** fue mayor CPC+FC (18,6 ppm), mientras que en **Othonna** destacaron RVC+CPC (26,2 ppm), CPC+FC (24,8 ppm) y RVC+FC (22,5 ppm) (Figura 92, izquierda). En **Frankenia**, los sustratos con puzolana volcánica (RVC+PV=30,3 y CPC+PV=24,7) fueron significativamente superiores ($p \leq 0,05$) que los sustratos con mezclas orgánicas. En **Crassula** el menor ($p \leq 0,05$) contenido de Zn se encontró en RVC+PV (11,1 ppm). Los valores de Zn fueron ligeramente inferiores en la parte radicular con respecto a la parte aérea, oscilando entre 12,4 (CPC+PV) y 18,6 ppm (CPC+FC) en **Teucrium**, entre 10,2 (RVC+PV) y 24,8 ppm (CPC+FC) en **Othonna**, entre 16,3 (RVC+FC) y 30,3 ppm (RVC+PV) en **Frankenia** y entre 11,1 (RVC+PV) y 24,2 ppm (CPC+FC) en **Crassula** (Figura 92, derecha).

Figura 92. Valores medios* de Zinc (Zn) en tejido vegetal aéreo (izquierda) y radicular (derecha), en *Teucrium chamaedrys*, *Othonna cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula poliploides* en sustratos ensayados en la cubierta vegetal.

*Medias con una letra común en una misma columna y para una misma ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, RVC=Restos vegetales compostados, PV=puzolana volcánica. *Expresado en g/100g de materia seca. *Bennett (1993): niveles de referencia ($\text{g } 100\text{g}^{-1} \text{ Ms}$): 20-60 ppm o mg L^{-1} de Zn.

En un estudio con compost de RSU ($\text{Cu } 170\text{-}270 \text{ mg kg}^{-1}$; $\text{Zn } 270\text{-}610 \text{ mg kg}^{-1}$) y corteza de pino como testigo, Hicklenton *et al.* (2001) no encontraron diferencias entre los contenidos foliares de micronutrientes en plantas de *Cotoneaster dammeri*, ni signos de deficiencia o toxicidad por nutrientes en sustratos con hasta 100% de compost. Por otro lado, con un compost de *Posidonia oceánica* y lodos de depuradora ($\text{Cu } 71 \text{ mg kg}^{-1}$, $\text{Zn } 214 \text{ mg kg}^{-1}$) Castaldi y Melis (2004) no encontraron aumentos en los contenidos de metales en hojas y frutos de tomate, señalando que la mayoría de elementos interaccionan fuertemente con la materia orgánica del material compostado, limitando la absorción vegetal. Por el contrario, Pérez-Murcia *et al.* (2006) con un compost de lodo de depuradora (30%) y paja ($\text{Cu } 139 \text{ mg kg}^{-1}$, $\text{Zn } 634 \text{ mg kg}^{-1}$), encontraron aumentos significativos de los contenidos de micronutrientes en la parte aérea de brócoli, aunque sin superar los límites permitidos para consumo humano. En otro estudio con un compost de lodo de depuradora (30% más compuestos lignocelósicos, $\text{Cu } 100 \text{ mg kg}^{-1}$, $\text{Zn } 275 \text{ mg kg}^{-1}$) Grigatti *et al.* (2007) encontraron que la transferencia a la raíz de varios metales (Fe, Mn, Zn, Cu, Cr y Ni) fue de 2,3 y 12,5 veces superior al sustrato control. Sin embargo, en los tejidos aéreos no se encontraron contenidos superiores al

control, por lo que el flujo de translocación desde las raíces a las partes aéreas fue muy pequeño. Según Masaguer *et al.* (2015), es probable que con el uso de materiales compostados en plantas ornamentales o forestales no ocurran problemas por presentar contenidos relativamente moderados de metales pesados, principalmente cobre y zinc.

El **contenido de Mn en la parte aérea** de *Teucrium*, *Othonna*, *Frankenia* y *Crassula* fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) en sustratos con puzolana volcánica en la mezcla (RVC+PV y CPC+PV). Los **rangos de Mn** oscilaron entre 69,6 (RVC+CPC) y 147,73 ppm (RVC+PV) en **Teucrium**, 83,4 (CPC+FC) y 145,9 ppm (CPC+PV) en **Othonna**, 79,5 (RVC+FC) y 174,7 ppm (RVC+PV) en **Frankenia** y 56,7 (CPC+FC) y 119,6 ppm (RVC+PV) en **Crassula** (Figura 93, izquierda).

Figura 93. Valores medios* de Manganeseo (Mn) en tejido vegetal aéreo (izquierda) y radicular (derecha), en *Teucrium chamaedrys*, *Othonna cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula poliploides* en sustratos ensayados en la cubierta vegetal.

*Medias con una letra común en una misma columna y para una misma ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, RVC=Restos vegetales compostados, PV=puzolana volcánica. *Expresado en g/100g de materia seca. *Bennett (1993): niveles de referencia (g 100g⁻¹ Ms): 20-300 ppm o mg L⁻¹ de Mn y entre 50-250 ppm o mg L⁻¹ de Fe.

El contenido de Mn en *Dianthus caryophyllus* se encontró entre 70 y 230 ó 100 y 300 mg kg⁻¹ (Winsor y Adams, 1987; Ortega 1997). Los valores de Mn encontrados en este estudio estuvieron dentro de los rangos de suficiencia nutrimental sugeridos por Sánchez (2009) para hojas de pepino (quinta hoja del extremo hacia abajo) con sustratos. En las **raíces** no hubo diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos con respecto al manganeso en ninguna de las cuatro especies evaluadas y los valores

registrados estuvieron por debajo cercanos a 14 ppm, muy por debajo del rango de suficiencia nutrimental para la mayoría de plantas sugerida por Bennett (1993) (Figura 93, derecha). López-cuadrado *et al.* (2006) en sustratos con i) corteza de pino compostada y fibra de madera (80%) + turba rubia (20%) (CPI), ii) corteza de pino compostada (50%) + turba rubia (50%) (CPII) y iii) restos de poda con lodo de depuradora (50%) + perlita (25%) + turba rubia (25%) (RPII) reportaron valores de manganeso en la planta de *Dianthus caryophyllus* de 196,51, 112,51 y 112,98 ppm, respectivamente, antes de la inducción de los botones florales y 150,86, 75,81 y 77,40 ppm, respectivamente, antes del inicio de la floración.

El comportamiento del **Fe en la parte aérea y radicular** de **Teucrium**, **Othonna**, **Frankenia** y **Crassula** fue significativamente similar ($p \leq 0,05$), debido a que los mayores contenidos de Fe se encontraron en los sustratos con proporciones inorgánicas (puzolana). En la **parte aérea** el Fe fue alto (< 50 ppm) con respecto a lo obtenido en las raíces, encontrándose valores entre 142,1 (CPC+FC) y 627,4 ppm (RVC+PV) en **Teucrium**, entre 151,7 (RVC+CPC) y 417,7 ppm (RVC+PV) en **Othonna**, entre 160,9 (RVC+FC) y 398,89 ppm (CPC+PV) en **Frankenia** y entre 178,4 (CPC+FC) y 675,8 ppm (CPC+PV) en **Crassula** (Figura 94, izquierda).

Figura 94. Valores medios* de Hierro (Fe) en tejido vegetal aéreo (izquierda) y radicular (derecha), en *Teucrium chamaedrys*, *Othonna cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula poliploides* en sustratos ensayados en la cubierta vegetal.

*Medias con una letra común en una misma columna y para una misma ubicación no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, RVC=Restos vegetales compostados, PV=puzolana volcánica. *Expresado en g/100g de materia seca. *Bennett (1993): niveles de referencia ($\text{g } 100\text{g}^{-1} \text{ Ms}$): 20-300 ppm o mg L^{-1} de Mn y entre 50-250 ppm o mg L^{-1} de Fe.

En las raíces los rangos estuvieron entre 21,1 (RVC+FC) y 59,6 ppm (CPC+PV) en **Teucrium**, entre 15,6 (CPC+PV) y 38,7 ppm (CPC+PV) en **Othonna**, entre 20,1 (RVC+FC) y 44,0 ppm (CPC+PV) en **Frankenia** y entre 20,6 (RVC+FC) y 54,5 ppm (CPC+PV) en **Crassula** (Figura 94, derecha). Un contenido adecuado de Fe en el tejido foliar es de 50 a 150 mg kg⁻¹. Ortega (1997) indica un nivel óptimo de 100 mg kg⁻¹. López-cuadrado *et al.* (2006) reportaron concentraciones de hierro en la planta de *D. caryophyllus* de 84,32, 72,14 y 96,78 ppm en CPI, CPII y RPII, respectivamente, antes de la inducción de los botones florales y 63,92, 52,17 y 61,33 ppm en CPI, CPII y RPII, respectivamente, antes del inicio de la floración.

4.3.6 Variables evaluadas durante el establecimiento de la cubierta vegetal

En este apartado se presentan resultados correspondientes a distintas evaluaciones realizadas a lo largo del establecimiento la cubierta vegetal. Se presenta la **intensidad de verdor (Spad) en Teucrium y Othonna**, valores de **clorofila** (cantidad particulada y total) e **índice de succulencia del mesófilo** medidos en **Crassula**, el **% drenado**, **pH** y **CE** obtenidos en la recolección de **lixiviados**, así como también, el **contenido de humedad volumétrico (θ)**, **CE** y la **temperatura** registrados en **sensores** de humedad.

4.3.6.1 Intensidad de verdor (SPAD) en *Teucrium chamaedrys* y *Othonna cheirifolia*

La intensidad de verdor o el contenido relativo de clorofila que caracteriza a una especie vegetal, se sostienen en que un color más verde dará un mayor valor en unidades Spad. Este elemento es de suma importancia en la síntesis de la clorofila, ya que es un constituyente principal de algunas proteínas y enzimas, debido a que cataliza la oxidación de los procesos de reducción en las plantas (Buchanan *et al.*, 2000). En la Figura 95 se observan los valores medios correspondientes a la intensidad de verdor (unidades Spad) o contenido relativo de clorofila determinado en **Teucrium** (arriba) y en **Othonna** (abajo) en cuatro fechas de evaluación (Junio 2013, Marzo 2014, Octubre 2014 y Abril 2015). En **Teucrium**, en el sustrato RVC+PV se observa una tendencia lineal en aumento, donde en junio 2013 se registró el menor valor (39,1 U-SPAD) y al final de las evaluaciones el mayor valor registrado (62,8 U-SPAD). CPC+PV mostró su

máximo valor en Marzo 2014 (48,3 U-SPAD), CPC+FC en octubre 2014 (47,4 U-SPAD), RVC+CPC y RVC+FC en abril 2015 (54,9 y 59,0 U-SPAD, respectivamente). En general, los valores registrados en esta especie se encontraron dentro de un margen entre 28,5 y 62,8 U-SPAD (Figura 95, arriba). Además de RVC+PV, CPC+PV y CPC+FC mostraron un menor valor SPAD en junio 2013, pudiendo estar relacionado con la época de más calor (próximo al verano) donde las plantas podrían estar más expuestas al estrés hídrico. Kotsiris *et al.* (2012) observaron resultados similares en plantas *Lavandula angustifolia* con sustratos. Determinaron que debido al crecimiento exuberante de las plantas en primavera, aquellas que crecen en sustratos de compost-modificado estuvieron más estresadas en verano.

Figura 95. Valores medios de intensidad de verdor o unidades Spad en *Teucrium chamaedrys* (arriba) y *Othonna cheirifolia* (abajo), durante su establecimiento en la cubierta vegetal, según el sustrato.

RVC=Restos vegetales compostados, PV=puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco.

Kotsiris *et al.* (2013), en un estudio de enfoque adaptativo de los techos verdes intensivos con *Pittosporum tobira* L. y *Olea europaea* L obtuvieron mejores valores SPAD y un crecimiento sustancial durante la primavera. En **Othonna**, el contenido relativo de clorofila en unidades Spad en los sustratos con mayor proporción de corteza de pino compostada (CPC+PV y CPC+FC) mostraron una tendencia similar entre los dos tratamientos durante todos los periodos de evaluación. RVC+FC, CPC+PV, CPC+FC y RVC+CPC destacaron en Octubre 2014, mientras que RVC+FC destacó en abril 2015. En general, los márgenes registrados en esta especie vegetal estuvieron entre 78,3 y 88,2 U-SPAD (Figura 95, abajo). En relación con la fisiología vegetal en sistemas de techos verdes, algunos autores (Durhman *et al.*, 2007, Thuring *et al.*, 2010 y Nektarios *et al.*, 2011) indican que la profundidad de sustrato ha de ser un factor más influyente que incluso el tipo de sustrato, por lo que sería interesante realizar evaluaciones relacionadas con la profundidad de estos sustratos en los contenedores de cultivo.

Ondoño *et al.* (2016) en un estudio con terrazas verdes extensivas y a dos profundidades (5 y 10 cm) con *Silene vulgaris* y *Lagurus ovatus* encontraron que el contenido relativo de clorofila (índice SPAD) fue mayor en *S. vulgaris* que en *L. ovatus*, para todos los sustratos probados (dos sustratos de mezcla de compost con ladrillos (CB) y dos profundidades (5 y 10 cm: CB5 y CB10), y ambas especies mostraron valores SPAD más altos en sustratos más profundos (CB10) que en 5 cm de profundidad. Este contenido se redujo de forma considerable en *L. ovatus* durante el período de medición, mientras que en *S. vulgaris* se mantuvo alta hasta julio 2013 (con mediciones en abril, mayo, junio y julio de 2013), disminuyendo significativamente ($p \leq 0,05$) sólo en el sustrato CB10.

4.3.6.2 Clorofila, índice de succulencia del mesófilo (Sm), contenido hídrico y clorofila total en *Crassula lycopodioides*

La Tabla 58 muestra el **contenido hídrico, clorofila total** (Σ clorofila-a, clorofila-b, clorofila-c) y el **índice de succulencia** registrada en **Crassula**. Los resultados indican que no hubo diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en las variables anteriores, **según el sustrato**.

El contenido hídrico fue mayor al 90%, esto se explica debido a que una de las características de esta especie es su succulencia. La clorofila total registró valores comprendidos entre 7,0 (CPC+FC) y 9,6 mg g⁻¹ (CPC+PV). En cubiertas vegetales, Mori *et al.* (2009), reportó que una reducción en la concentración total de clorofila ocurre en tres de cada cuatro especies de Sedum al estar bajo estrés. Nektarios *et al.* (2015) encontraron que el contenido total de clorofila a+b tuvo una respuesta similar durante en los dos años de estudio y alcanzó una concentración mínima durante el período de estrés hídrico y se recuperó después de la ocurrencia de las lluvias otoñales. Por lo que se sugiere hacer otras evaluaciones en este estudio para observar los cambios en contenido clorofílico en el tiempo y según las épocas estacionales para comparar los resultados, debido a que sólo se realizó una evaluación puntual.

Tabla 58. Contenido hídrico, clorofila total e índice de succulencia de *Crassula poliploides*

Sustrato	Contenido hídrico (%)	Σ Total clorofila (mg g ⁻¹)	Índice de succulencia
RVC+PV	90,4 a	7,5 a	0,12 a
CPC+PV	93,5 a	9,6 a	0,13 a
CPC+FC	91,4 a	7,0 a	0,12 a
RVC+CPC	90,9 a	8,0 a	0,11 a
RVC+FC	90,6 a	8,8 a	0,11 a

*Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco.

4.3.6.3 pH y conductividad eléctrica en lixiviados y porcentaje drenado

Los resultados correspondientes al **porcentaje recogido (drenado)**, **pH** y **CE** registrada en el **drenaje de lixiviados de los sustratos** evaluados en las diferentes especies vegetales en la cubierta vegetal se presentan en la Tabla 59 (**Teucrium** y **Othonna**) y en la Tabla 60 (**Frankenia** y **Crassula**). El **%drenado en lixiviados** fue significativamente superior ($p \leq 0,05$) en RVC+PV (18,8%) y CPC+FC (16,6%) en **Teucrium** y **Othonna**. En ese sentido, en **Frankenia** y **Crassula** solamente CPC+FC fue significativamente mayor en cuanto al %drenado en los lixiviados recolectados. Los rangos oscilaron entre 8,9 (RVC+FC) y 18,8% (RVC+PV) en **Teucrium**, entre 6,5 (RVC+CPC) y 16,8% (RVC+PV) en **Othonna**, entre 7,1 (RVC+FC) y 16,4% (CPC+FC) en **Frankenia** y entre 7,5 (RVC+FC) y 16,2% (CPC+FC) en **Crassula** (Tabla 59; Tabla 60).

El espacio poroso y la distribución de la porosidad fue diferente entre sustratos, lo cual influye en la cantidad de lixiviado por sustrato independientemente de la frecuencia de riego (Cavins *et al.*, 2005).

El **pH de los lixiviados** fue significativamente superior ($p \leq 0,05$) en los sustratos con restos vegetales compostados (RVC+PV, RVC+CPC y RVC+FC). El sustrato CPC+FC presentó un pH ácido con valores de 3,8 en *Teucrium*, 5,0 en *Othonna*, 4,4 en *Frankenia* y 4,7 en *Crassula* (Tabla 59; Tabla 60).

Tabla 59. Valores medios* de porcentaje drenado, pH y CE en lixiviados en sustratos establecidos en la cubierta vegetal con *Teucrium chamaedris* y *Othonna cheirifolia*.

Sustrato	Teucrium			Othonna		
	% Drenado	pH	CE (mS m ⁻¹)	% Drenado	pH	CE (mS m ⁻¹)
RVC+PV	18,8 b	7,6 c	57,4 a	16,8 b	7,6 c	58,5 a
CPC+PV	11,6 a	6,9 b	64,7 a	11,8 a	6,7 b	67,6 a
CPC+FC	16,6 b	3,8 a	83,7 b	15,7 b	5,0 a	93,2 b
RVC+CPC	11,8 a	7,4 c	63,1 a	6,5 a	7,8 c	60,5 a
RVC+FC	8,9 a	7,3 c	56,6 a	6,8 a	7,8 c	86,5 a

*Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco.

Tabla 60. Valores medios* de porcentaje drenado, pH y CE en lixiviados en sustratos establecidos en la cubierta vegetal con *Frankenia thymifolia* y *Crassula polipodioides*.

Sustrato	Frankenia			Crassula		
	% Drenado	pH	CE (mS m ⁻¹)	% Drenado	pH	CE (mS m ⁻¹)
RVC+PV	10,9 a	7,8 c	58,9 a	8,4 a	7,2 c	50,5 a
CPC+PV	13,5 a	6,9 b	80,4 a	11,7 a	6,9 b	46,2 a
CPC+FC	16,4 b	4,4 a	124,5 b	16,2 b	4,7 a	71,7 b
RVC+CPC	10,8 a	7,9 c	67,9 a	12,5 a	7,4 c	49,3 a
RVC+FC	7,1 a	7,2 c	66,9 a	7,5 a	7,7 c	49,8 a

En Tabla 59 y Tabla 60 *Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$), Tukey HSD. RVC=Restos vegetales compostados, PV= puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC= fibra de coco.

La **conductividad eléctrica (CE)** fue significativamente mayor ($p \leq 0,05$) solo en el sustrato donde el pH fue inferior (CPC+PV) en las cuatro especies evaluadas (Tabla 59; Tabla 60). Bunt (2005) indica que a medida que se incrementa la cantidad y frecuencia de riego la concentración de sales aumenta, pero si la cantidad de agua se

aumenta, se induce a que las sales acumuladas sean lixiviadas gradualmente y por tanto aumenta la salinidad en la solución lixiviada. Zapata *et al.* (2005) en corteza de pino compostada, sola y en mezcla al 15 y 30% con compost de residuos sólidos urbanos, compost de lodo de aguas residuales urbanas, y lodo granulado deshidratado de aguas residuales urbanas, evaluados como sustratos de cultivo, encontraron que los valores de pH de los lixiviados recogidos presentaron escasa variación entre tratamientos y fueron prácticamente constantes a través del tiempo. En cambio, la CE inicialmente fue muy elevada y variable entre los tratamientos.

4.3.6.4 Contenido de humedad volumétrico, temperatura y conductividad eléctrica registrados en sensores de humedad

Los sensores dieléctricos de capacitancia proporcionan medidas instantáneas del contenido de humedad, otros incluso además de esta variable proveen la conductividad eléctrica o incluso la temperatura del medio de cultivo. Sin embargo, la exactitud de este tipo de sensores depende de si se dispone de una calibración específica para el medio donde se pretende utilizar, ya que las lecturas son susceptibles a variaciones en densidad aparente, contenido orgánico, textura, etc. En esta investigación se contó con la disponibilidad de cinco sondas: tres tipo EC-5, una 5-TE y una 5-TM. La **sonda EC-5** informa sobre el **contenido de humedad volumétrico (VWC)**, **sonda 5-TE** registra además de **VWC**, **temperatura (T)** y **conductividad eléctrica (CE)**, mientras que la **sonda 5-TM** registra **VWC** y **T**. La información proporcionada por los sensores instalados en la cubierta vegetal se presenta en este apartado. La Tabla 61 describe el tipo de sensor dieléctrico utilizado y la medida provista por la sonda según la ubicación de la misma en el tipo de sustrato donde fue instalada.

Tabla 61. Variable medida en los sensores de acuerdo al sustrato.

Sustrato	Sensor/ sonda	Medida proporcionada
RVC+PV CPC+PV RVC+FC	EC-5	Contenido de humedad volumétrica (VWC)
CPC+FC	5-TE	VWC, temperatura (T) y conductividad eléctrica (CE)
RVC+CPC	5-TM	VWC y T

La Figura 96 muestra los resultados correspondiente a las **variaciones de humedad en el tiempo**, obtenidas en los sustratos a partir de las **señales** registradas por las tres sondas utilizadas: sonda **EC-5** en RVC+PV, CPC+PV y RVC+FC; sonda **5-TE** en CPC+FC y la sonda **5-TM** en RVC+CPC.

Figura 96. Contenido de humedad volumétrica (VWC) registrado en sensores 5EC, 5TM y 5TE, con sonda tipo FDR

RVC=restos vegetales compostados, PV=puzolana volcánica, CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco.

Las **medidas de VWC** en RVC+PV y CPC+PV (EC-5) no presentan variaciones en el tiempo, sin embargo, las **medidas de VWC** en CPC+FC, RVC+FC y RVC+CPC (5-TE, 5-TM y EC-5, respectivamente) presentan valores superiores a las medidas de los sustratos con puzolana volcánica en la mezcla, los cuales presentaron valores por debajo de $0,2 \text{ m}^3$.

Estas diferencias son marcadas en estos dos sustratos, donde los valores se minimizan con respecto a aquellos con contenido orgánico en sus mezclas (Figura 96). Lo que confirma que las diferencias observadas pueden deberse a la naturaleza del sustrato y no a errores en el manejo de las sondas en los contenedores. Un mal contacto entre sensor y sustrato modifica la señal recibida al variar el agua y aire en contacto con la sonda.

La Figura 97 muestra las variaciones de **temperatura (T)** en el tiempo, obtenidas a partir de las señales emitidas por las sondas ubicadas en CPC+FC (5-TE) y RVC+CPC (5-TM). La tendencia fue similar en los sustratos, inicialmente se

presentaron valores más bajos que paulatinamente fueron aumentando hasta abril 2014 en el caso de RVC+CPC y hasta junio 2014 en CPC+FC. Las temperaturas fueron menores en CPC+FC mayo 2014, e incrementaron ligeramente hasta julio 2014 donde solapó con RVC+CPC. El rango de T en CPC+FC varió desde 11,8°C y 26,1°C y desde 14,0°C y 26,8°C en RVC+CPC, las mínimas se registraron en diciembre 2014 y las máximas en agosto 2014 (Figura 97). Temperaturas extremas en el sustrato puede perjudicar el desarrollo de las raíces.

Figura 97. Temperatura registrada en sensores 5TM y 5TE, con sonda tipo FDR

CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco, RVC=restos vegetales compostados.

La Figura 98 muestra las variaciones de **conductividad eléctrica (CE)** en el tiempo, obtenidas a partir de las señales emitidas por la sonda ubicada en CPC+FC (5-TE).

Figura 98. Conductividad eléctrica, sensor 5TE, con sonda tipo FDR

CPC=corteza de pino compostada, FC=fibra de coco.

Las conductividades registradas en este sustrato muestran valores de $98,0 \text{ mS m}^{-1}$ al inicio de las evaluaciones en el ensayo (diciembre 2013), las cuales fueron disminuyendo hasta septiembre 2014 con conductividades de $55,0 \text{ mS m}^{-1}$. A partir de esa fecha las conductividades se mantuvieron entre $6,5$ y $9,3 \text{ mS m}^{-1}$ (Figura 98). La información emitida por esta sonda es útil para estudios de lixiviación de salinidad en los sustratos. Estas diferencias se explican debido a que durante el primer año de establecimiento los contenedores tenían fertilización de liberación lenta de hasta nueve meses, y la disminución de la CE se debe a los riegos que se aplicaron durante el ensayo, por lo que pudo ocurrir lavado de sales. Comparando estos datos en los lixiviados con los datos de CE en los sustratos a lo largo del ensayo, se observa que ha subido la CE en el lixiviado porque se han lavado las sales del sustrato y por tanto ocurre una disminución en los mismos.

V- CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones basadas a partir de los resultados obtenidos en los trabajos realizados en esta tesis doctoral.

5.1. CARACTERIZACIÓN INICIAL DE SUSTRATOS POTENCIALES PARA SISTEMAS DE NATURACIÓN URBANA

Los resultados de este estudio tienen una alta relevancia ambiental, ya **que puede implicar la sustitución de un recurso no renovable (turba) por materiales reciclados** y su uso para mejorar las propiedades de fibra de coco como componente del sustrato. La determinación de las propiedades físicas e hidrofísicas de los sustratos que se emplean en las diferentes modalidades de naturación urbana (jardines verticales, terrazas vegetales, fachadas, etc.), agricultura urbana o sus variantes es esencial para garantizar el éxito del sistema. Los niveles de referencia con los que se analizan estos resultados se refieren únicamente a las propiedades físicas e hidrofísicas de los sustratos evaluados. **De las propiedades estudiadas se resalta la necesidad de bajas densidades y elevadas porosidades.**

Las variabilidades en cuanto a densidades registradas en los sustratos evaluados en este estudio podrían dar **una idea de en qué tipo de sistema de naturación urbana podrían emplearse**, debido a que dependerá mucho de su aplicación. Se debe tener en cuenta el peso de los soportes incluyendo el contenedor, el sustrato, la vegetación, etc., si es para jardinería vertical o fachada vegetal lo más recomendable es que se traten de materiales ligeros, de fácil manipulación y transporte, por lo que las mezclas a base de materiales 100% orgánicos podrían ser adecuados para jardines verticales, tomando en cuenta las densidades registradas.

La elevada Da observada en el sustrato restos vegetales compostados mezclado con puzolana volcánica puede limitar su uso. También, este sustrato presenta problemas de porosidad y baja retención de agua en comparación con el resto de sustratos, los cuales tienen valores más adecuados. Los sustratos a base de fibra de coco en 70%, 30% y el testigo (90%) presentaron las más bajas densidades, propiedad ideal para sustratos que se pueden emplear en jardines verticales, tanto interiores como

exteriores, debido a que su utilización podría mejorar significativamente la capacidad operacional del medio de cultivo y por ende, disminuir los costos por transporte y manipulación, también, reduce la menor carga estructural sobre la fachada, lo que es importante si se va a poner en un jardín vertical o incluso en una cubierta vegetal. Mientras que si se trata de cubiertas o terrazas vegetales, se requieren materiales no muy ligeros que sostengan la vegetación, permanezcan estables ante el viento y que no sean una gran carga para el edificio o estructura donde se instale, por lo que los sustratos RVC+PV y CPC+PV podrían ser adecuados para este sistema.

5.2. ENSAYO DE SUSTRATOS POTENCIALES EN UN JARDÍN VERTICAL

Las propiedades físicas de los sustratos evaluados en esta investigación inicialmente mostraron densidades y porosidades adecuadas para el establecimiento y desarrollo de plantas. Los sustratos a base de fibra de coco en 70% y 30% y el testigo (90%) presentaron bajas densidades. En ese sentido su utilización podría mejorar significativamente la capacidad operacional del medio de cultivo y por ende, disminuir los costos por transporte y manipulación de materiales, además suponen una menor carga estructural sobre la fachada de las edificaciones. Los sustratos con combinaciones corteza de pino compostados con fibra de coco en sus dos variantes y el testigo tuvieron porosidades mayores al 85%, por lo que se les atribuye una buena retención de agua y buena aireación.

En cuanto a las propiedades químicas, **los sustratos de corteza de pino compostada y fibra de coco mantienen pH y salinidad adecuados durante todo el ensayo, lo cual contribuye a una buena disponibilidad de nutrientes.** La materia orgánica en los sustratos antes y después de su instalación en el jardín vertical fue superior en los sustratos con fibra de coco como material primario. El sustrato con 90% de fibra de coco (testigo) sufrió una disminución importante de MO durante el primer año, esto indica menor estabilidad al principio del ensayo, pero durante el segundo año la degradación se ralentiza. La relación inicial C/N fue considerablemente mayor en los sustratos basados en corteza de pino compostada, con carbono orgánico presente en forma resistente en la corteza de pino utilizada. Los materiales compostados presentan buena estabilidad y correctos valores de C/N presente en los sustratos con contenidos de corteza de pino compostada.

En cuanto a las especies vegetales, la evolución en los cinco sustratos estudiados fue adecuada; sin embargo, **destacó el sustrato con un contenido del 70% de corteza de pino compostada con 30% de fibra de coco, por su mejor desarrollo.** En cambio, el sustrato con mayor contenido de **restos vegetales compostados tuvo menor respuesta en cuanto al desarrollo vegetal.** Por lo que de acuerdo a este criterio, se puede afirmar que los sustratos con contenido de corteza de pino y fibra de coco ensayados en el jardín vertical muestran características adecuadas para la producción y desarrollo de estas plantas tapizantes como *Frankenia laevis* y en *Pachysandra terminalis*. **La utilización de sustratos con componentes derivados de corteza de pino compostada y fibra de coco (en forma de chips) puede resultar una práctica adecuada para su implementación en fachadas y/o paredes verticales o muros vegetales, debido a que se componen de residuos reciclados, tiene bajas densidades, elevada porosidad (retención de agua y aire), además de ser un candidato sustitutivo a la turba, y por tanto ambientalmente sostenible.**

5.3 ENSAYO DE SUSTRATOS POTENCIALES EN CUBIERTA VEGETAL

En este estudio se evaluaron diferentes sustratos orgánicos establecidos en una cubierta vegetal. Al evaluar las propiedades físicas se observó que **la elevada densidad de los sustratos con contenido de puzolana volcánica podría limitar su uso en el jardín vertical** debido a las posibles cargas excesivas en la estructura, pero resultó ser un material excelente para la terraza porque podría evitar el vuelco de los contenedores. Por otro lado, estos sustratos presentaron limitaciones de porosidad y baja retención de agua y aire en comparación con el resto de los sustratos evaluados, los cuales tuvieron valores más adecuados de densidad, porosidad y aireación.

En cuanto a las propiedades químicas iniciales los sustratos con corteza de pino compostada tuvieron pH más adecuado con respecto a los de restos vegetales compostados, el cual fue más elevado. Este pH apropiado favorece la disponibilidad de nutrientes. Todos los sustratos mostraron una conductividad eléctrica adecuada durante el ensayo, lo que indica que ausencia de problemas por estrés hídrico debido a la salinidad.

Por otro lado, a pesar de que durante el establecimiento de la cubierta vegetal el pH aumenta y la CE se reduce debido al agua de riego utilizada, los sustratos evolucionaron adecuadamente en el tiempo.

En referencia al porcentaje de nitrógeno, inicialmente los sustratos con 70% restos vegetales compostados mezclados con corteza de pino y/o con fibra de coco tuvieron altos contenidos de N, lo que es apropiado para las plantas. Los sustratos con componentes mayoritariamente orgánicos presentaron contenidos adecuados de N, esencial para la nutrición de las plantas.

Los sustratos con restos vegetales compostados tuvieron valores adecuados de relación C/N, mientras que los de corteza de pino compostada fueron muy altos. Esto indicaría baja madurez y estabilidad estructural en los últimos, a ello se le añadirían problemas de compactación. Sin embargo, aunque la relación C/N es alta, estos sustratos podrían conservar características adecuadas en el tiempo, debido a la elevada resistencia a la degradación de las sustancias presentes en la corteza de pino.

Por otro lado, en cuanto a la **evolución de los sustratos** durante el ensayo de cultivo, la MO generalmente se mantiene durante el ensayo, lo que indica que los **materiales compostados utilizados (restos vegetales y corteza de pino) estaban suficientemente maduros** y eran capaces **de mantener sus propiedades sin llegar a la degradación prematura**, característica que los hace aptos para permanecer mucho tiempo en la cubierta vegetal.

Los resultados obtenidos indican **que la utilización de sustratos con componentes con restos vegetales compostados y corteza de pino podrían ser adecuados para su utilización en cubiertas vegetales como medio de cultivo, debido a que tienen bajas densidades, elevada porosidad (retención de agua y aire), adecuados pH y CE y con materia orgánica estable**. Además, estos sustratos se obtienen de residuos orgánicos reciclados y por tanto, corresponden a un medio de cultivo potencial y sustitutivo a la turba, tanto para cubierta vegetal como para otros sistemas de naturación urbana.

En la evolución de los sustratos **destacaron** Los sustratos **con componentes mayoritariamente orgánicos, como los de restos vegetales con corteza de pino y/o fibra de coco y el de corteza pino y fibra de coco**. Éstos mostraron **características adecuadas** para la producción y desarrollo de *Teucrium chamaedrys*, *Othonna cheirifolia*, *Frankenia thymifolia* y *Crassula lycopodioides* en la cubierta vegetal.

VI- LITERATURA CITADA

6. LITERATURA CITADA

- Abad, M. (1993). Sustratos. Características y propiedades. Cultivos Sin Suelo. F. Cánovas y J.R. Díaz. (eds.). Instituto de Estudios Almerienses. FIAPA. pp. 47-62.
- Abad, M., Martínez, P. F., Martínez, M. D., Martínez, J. (1993). Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas de horticultura*: 11: 141-154.
- Abad, M., Cánovas, F., Díaz, J. (1993). Sustratos para el cultivo sin suelo: Inventario y Características. Cultivos sin suelo. 47 p.
- Abad B.M. (1995) Sustratos para el cultivo sin suelo. En Nuez F (Ed.) El Cultivo del Tomate. Mundi-Prensa. Madrid, España. pp. 131-265.
- Abad, M., Martínez, P. (1996). Los sustratos y los cultivos sin suelo en España. Memorias Curso master internacional, aprovechamiento de residuos orgánicos. Universidad Nacional de Colombia, Palmira. pp. 22-24.
- Abad, M., Noguera, P., Noguera, V. (1997). Crecimiento de plantas ornamentales de hoja en sustratos de cultivo a base de fibra de coco (Growth of foliage ornamentals in coir dust-based substrates). *Actas de horticultura*: 17: 76-81.
- Abad, M., Noguera, P., Carrión, C. (1998). Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. Fertirrigación: cultivos hortícolas y ornamentales. Madrid: Mundi-Prensa. pp. 287-342.
- Abad M., Noguera P. (2000). Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación, pp. 287-342. In: C. Cadahía. Fertirrigación: cultivos hortícolas y ornamentales. 2a ed. revisada. Ediciones Mundi-Prensa. Barcelona, España. 475 p.
- Abad, A., Noguera, P., Burés, S. (2001). National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: case study in Spain. *Bioresource Technology*: 77: 197-200.
- Abad, M., Noguera, P., Puchades, R., Maquieira, A., Noguera, V. (2002). Physico-chemical and chemical properties of some coconut coir dusts for use as a peat substitute for containerised ornamental plants. *Bioresource Technology*: 82(3): 241-245. doi: 10.1016/S0960-8524(01)00189-4.
- Abad, M., Noguera Murray, P., Carrión-Benedito, C., Abad, N., Carrión. (2004). Los sustratos en los cultivos sin suelo. En Tratado de cultivo sin suelo. Mundi Prensa Libros SA. pp. 113-158.
- Abad, M., Noguera M., y Carrión B. (2004). Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. FERTIRRIGACION cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. 3^a Ed. Ediciones Mundi-prensa, España.

- Abad, M., Noguera, P., Carrión, C. (2004). Los sustratos en los cultivos sin suelo. Tratado de cultivo sin suelo. Madrid: Mundi-Prensa. pp. 113-158.
- Abad, M., Fornes, F., Carrión, C., Noguera, V., Noguera, P., Maquieira, Á., Puchades, R. (2005). Physical properties of various coconut coir dusts compared to peat. *HortScience*: 40(7): 2138-2144.
- Aendekerk, T. G. L., Cevat, H., Dolmans, N., Van Elderen, C., Kipp, J. A., De Kreij, C., Wever, G. (2000). International substrate manual. Doetinchem: Elsevier International Business. 94p.
- AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). (2008). Mejoradores del suelo y sustratos de cultivo. 2000-2008.
- Alexandri, E., Jones, P. (2007). Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results. *Building and Environment*: 42(8): 2835-2849. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.004>
- Alonso, J., Chanampa, M., Vidal, P., Guerra, R., Neila, F. J., Bedoya, C. (2009). Sistemas vegetales que mejoran la calidad ambiental de las ciudades. Cuadernos de Investigación Urbanística CICR, 67: 49–67.
- Alonso, J., Chanampa, M., Vidal, P., Olivieri, F., Guerra, R., Neila, F. J., Bedoya, C. (2010). Thermal and illuminance performance of a translucent green wall system as an extra flat green house space with vegetation. *Journal of Architectural Engineering*, 13p.
- Ansorena Miner, J. (1994). Sustratos: propiedades y caracterización. Mundi Prensa Libros S.A.
- Arenas, M., Vavrina, C. S., Cornell, J. a., Hanlon, J. A., Hochmuth, G. J. (2002). Coir as an alternative to peat in media for tomato transplant production. *HortScience*, 37(2): 309-312.
- Baixauli, C., Aguilar, J. (2002). Cultivo sin suelo de hortalizas: aspectos prácticos y experiencias. Valencia (España), Generalitat Valenciana.
- Banco-Mundial. (2013). Datos y cifras: crecimiento total de la población.
- Barral-Silva, M. T., Menduïña, A. M., Seijo, Y. C., Viqueira, F. D. F. (2007). Assessment of municipal solid waste compost quality using standardized methods before preparation of plant growth media. *Waste management research*: 25(2): 99-108.
- Barrio, E. P. D. (1998). Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*: 27(2): 179-193.

- Bates, A.J., Sadler, J.P., Greswell, R.B., Mackay, R. (2015). Effects of recycled aggregate growth substrate on green roof vegetation development: A six year experiment. *Landscape and Urban Planning*: 135: 22-31. doi:10.1016/j.landurbplan.2014.11.010.4.
- Beattie, D., Berghage, R. (2004). Green roof media characteristics: the basics In: Greening Rooftops for Sustainable Communities, Proc. North American Green Roof Conf., Toronto: The Cardinal Group, Portland.
- Benito, M., Masaguer, A., De Antonio, R., Moliner, A. (2004). Use of pruning waste compost as a component in soilless growing media. *Bioresource Technology*: 96: 597-603.
- Benito, M., Masaguer, A., Moliner, A., De Antonio, R. (2006). Chemical and physical properties of pruning waste compost and their seasonal variability. *Bioresource technology*: 97(16): 2071-2076.
- Benito, M., Masaguer, A., Moliner, A., De Antonio, R. (2006). Chemical and physical properties of pruning waste compost and their seasonal variability. *Bioresource Technology*, 97, 2071-2076. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2005.09.011>.
- Bennett, W. F. (1993). Nutrient deficiencies and toxicities in crop plants. American Phytopathological Society.
- Berghage, R., Jarrett, A., Beattie, D., Kelley, K., Husain, S., Rezai, F., Hunt, W. (2007). Quantifying evaporation and transpirational water losses from green roofs and green roof media capacity for neutralizing acid rain. *National Decentralized Water Resources Capacity Development Project*.
- Berghage, R.D., Beattie, D., Jarrett, A.R., Thuring, C., Razaei, F., O'Connor, T.P. (2009). Green roofs for stormwater runoff control National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati
- Bliss, D. J. (2007). Stormwater runoff mitigation and water quality improvements through the use a green roof in Pittsburgh, PA. University of Pittsburgh.
- Bliss, T. (2007). Introducing Ubalism.
- BOE (Boletín Oficial del Estado Español). (2010). Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo. Ministerio de la Presidencia. 170: 1831-61859.
- Brenneisen, S., Hänggi, A. (2006). Begrünte Dächer--ökofaunistische Charakterisierung eines neuen Habitattyps in Siedlungsgebieten anhand eines Vergleichs der Spinnenfauna von Dachbegrünungen mit naturschutzrelevanten Bahnarealen in Basel (Schweiz). *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaften beider Basel*: 9: 99-122.

- Briz, J. (1999). Evaluación del bienestar urbano mediante la naturación. In J. Briz (Ed.), *Naturación urbana: Cubiertas ecológicas y mejora medioambiental*. España: Mundi-Prensa. pp. 65-80.
- Briz, J. (2004). *Naturación urbana: cubiertas ecológicas y mejora medioambiental* (Vol. 2da.). España: Mundi-Prensa Libros.
- Briz, J., De Felipe, I. (2005). Incorporación de la naturaleza en cada rincón de la ciudad: Naturación urbana. *Arquitectura del Paisaje: Construcción y medio ambiente*: 120: 12-19.
- BOE (Boletín Oficial del Estado). (2005). Real Decreto 824/2005 sobre productos fertilizantes. Núm. 171, 19 de julio, 2005. pp. 25592-25669.
- BOE (Boletín Oficial del Estado). (2010). Real Decreto 865/2010 sobre sustratos de cultivo. 2 de julio, 2010. 29 p.
- BS EN 13055-1. (2002). *Lightweight aggregates. Part 1: Lightweight aggregates for concrete, mortar and grout*. ISBN: 0 580 39776 9.
- Buchanan, B.B., Gruissem, W., Jones, R.L. (2000). *Biochemistry and molecular biology of plants*. American Society of Plant Physiologists, Rockville, MD.
- Bunt, A. C. (1988). *Media and mixes for container-grown plants. (A manual on the preparation and use of growing media for pot plants)*. (Ed. 2).
- Bunt, A. C. (2005). Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. pp. 301-354. In: C. Cadahía L. (ed) *Fertirrigación. Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. Mundi-Prensa, Madrid España.
- Burés, S. (1997). *Sustratos*. Ediciones Agrotécnicas Madrid.
- Burés Pastor, S. (1999). Preparación y selección de sustratos. En *Tecnología de sustratos: aplicaciones a la producción viverística, ornamental, hortícola y forestal*. Universitat de Lleida. pp. 37-46.
- Burés, S. (1999). Introducción a los sustratos: aspectos generales. JN Pastor S.(ed.) *Tecnología de Sustratos: Aplicación a la Producción Viverística Ornamental, Hortícola y Forestal*. Universidad de Lleida. España, pp. 9-46.
- Cadahía, C. (2005). *Fertirrigación: cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. Mundi-Prensa Libros.
- Cánovas, F. (1993). Principios básicos de la hidroponía. Aspectos comunes y diferenciales de los cultivos con y sin suelo. Curso Superior de Especialización sobre Cultivos sin Suelo. IEA/FIAPA. Almería, España. pp. 29-42.

- Carmona, E.; Abad, M. (2008). Aplicación del compost en viveros y semilleros. En: Compostaje. Moreno, J. Moral, R. (eds). Editorial Mundi Prensa, Madrid. pp. 397-424.
- Carmona, E., Moreno, M.T., Avilés, M., Ordovás, J. (2012). Use of grape marc compost as substrate for vegetable seedlings. *Sci. Hortic.*, 137: 69–74.
- Carrasco, G., Ramírez, P. y Vogel, H. 2007. Efecto de la conductividad eléctrica de la solución nutritiva sobre el rendimiento y contenido de aceite esencial en albahaca cultivada en NFT. IDESIA (Chile). 25(2): 59-62.
- Castaldi, P., Melis, P. (2004). Growth and yield characteristics and heavy metal content on tomatoes grown in different growing media. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 35,1-2: 85-98.
- Castañeda-Nolasco, G., Vecchia, F. (2007). Sistema de techo alternativo para vivienda progresiva en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. *Ingeniería Revista Académica de la FIUADY*: 11(2): 21–30.
- Castillo, A., Silvio, H. Quarín S., Iglesias M. (2000). Caracterización química de compost de lombrices elaborados a partir de residuos orgánicos puros y combinados. *Agric. Técn.* 60: 74-79.
- Cavins, T. J., Whipker, B. E., & Fonteno, W. C. (2005). Pourthru: A method for monitoring nutrition in the greenhouse. In *International Symposium on Growing Media* 779: 289-298.
- Chanampa, M., Alonso Ojembarrena, J., Vidal Rivas, P., Guerra Aragonés, R., Olivieri, F., Neila González, F.J., Bedoya Frutos, C. (2011). Sistemas vegetales que mejoran la calidad ambiental de las ciudades. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, 67p.
- COITAC (Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Agrícolas de Cataluña). (2000). Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo. Colegio Oficial de *Ing. Téc. Agrícolas de Cataluña*.
- Corti, C., Crippa, L., Genevini, P.L., Centemero, M. (1998). Compost use in plant nurseries: hydrological and physicochemical characteristics. *Compost Science and Utilization*: 6: 35–45.
- Currie, B.A., Bass, B. (2008). Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. *Urban Ecosystems*: 11(4), 409-422. doi:10.1007/s11252-008-0054-y.
- De Boodt M., Verdonck, O. (1972). The physical properties of the substrates in horticulture. *Acta Hort.* 26:37-44.
- De Boodt, M., Verdonck, O. Cappaert, I. (1974). Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticultura*: 37: 2054-2062.

- De Felipe, I., Briz, J. (1998). Red Internacional de Ciudades en Naturación (RICEN). Agricultura: *Revista Agropecuaria*: 794: 695–699.
- De Kreijl, C., Van Leeuwen, G. J. L. (2001). Growth of pot plants in treated coir dust as compared to peat. *Communications in soil science and plant analysis*, 32 (13-14): 2255-2265.
- Devices, D. (2006). ECH2O Soil Moisture Sensor: Operators Manual for Models EC-20, EC-10 and EC-5 (Version 5). Pullman, Wash.: Decagon Devices.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., Robledo, y C. W. (2011). InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Domeño, I., Irigoyen, N., Muro, J. (2009). Evolution of organic matter and drainages in wood fibre and coconut fibre substrates. *Scientia horticultruae*: 122 (2): 269-274.
- Dunnett, N., Kingsbury, N. (2004). Planting green roofs and living walls. Timber Press Portland, OR, USA.
- Dunnett, N., Nagase, A., Hallam, A. (2008). The dynamics of planted and colonising species on a green roof over six growing seasons 2001–2006: influence of substrate depth. *Urban Ecosystems*: 11(4): 373-384.7.
- Durhman, A. K., Rowe, D. B., & Rugh, C. L. (2007). Effect of substrate depth on initial growth, coverage, and survival of 25 succulent green roof plant taxa. *HortScience*, 42(3), 588-595.
- Dwyer, L.M., Tollenaar, M., Houwing, L. (1991). A non-destructive method to monitor leaf greenness in corn. *Canadian Journal of Plant Science*: 71: 505-509.
- Eggerth, L., Díaz, L., Chang, M., Iseppi, L. (2007). Marketing of compost. En: Díaz L.F., Bertoldi M., Bildlingmaier W., Stentiford E. (Eds.) *Compost Science and Technology*. Elsevier. Holanda. pp. 334-351.
- Evans, M.R., Konduru, S., Stamps, R.H. (1996). Source variation in physical and chemical properties of coconut coir dust. *HortScience*, 31(6), 965-967.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2010). Crear ciudades más verdes. Programa de las Naciones Unidas para la Agricultura urbana y Periurbana. Roma.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2012). Growing greener cities in Africa. First status report on urban and peri-urban horticulture in Africa. Roma.
- Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L. G. G., Principi, P. (2010). Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building and Environment*: 45(8): 1890-1904. doi:10.1016/j.buildenv.2010.03.001.

- FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau/ Landscape, Research, Development and Construction Society). (2012). Introduction to the FLL Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing - 2008 Edition of the Green Roofing Guideline.
- Fornes, F., Carrión, C., García-de-la-Fuente, R., Puchades, R., Abad, M. (2010). Leaching composted lignocellulosic wastes to prepare container media: Feasibility and environmental concerns. *Journal of environmental management*: 91(8): 1747-1755.
- Francois, L. E., & Maas, E. V. (1994). Crop response and management on salt-affected soils. *Handbook of plant and crop stress*, 149-181.
- Gandy, M. (2010). The Ecological Facades of Patrick Blanc. *Architectural Design*, 80(3): 28-33. doi:10.1002/ad.1071.
- García, C., Hernández, T., Costa, F., Ayuso, M. (1992). Evaluation of the maturity of municipal waste compost using simple chemical parameters. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 23 (1314): 1501-1512.
- García-Gómez, A; Bernal, M. P.; Roig, A. (2002). Growth of ornamental plants in two composts prepared from agroindustrial wastes. *Bioresource Technology*: 83(2): 81-87. doi:10.1016/S0960-8524(01)00211-5.
- Gedge, D., Kadas, G. (2005). Green roofs and biodiversity. *Biologist.*; 52(3): 161-169.
- Getter, K.L., Rowe, D.B. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience*: 41(5): 1276-1285.
- Getter, K.L., Bradley Rowe, D., Cregg, B.M. (2009). Solar radiation intensity influences extensive green roof plant communities. *Urban Forestry and Urban Greening*: 8(4): 269-281. doi:10.1016/j.ufug.2009.06.005.
- Gómez-Campo, C. (2004). El componente vegetal en la naturación. Naturación urbana: cubiertas ecológicas y mejora medioambiental. Briz, JE (ed). Mundi-Prensa. Madrid, España. pp. 197-212.
- Gorbachevskaya, O., Kappis, C., Mählmann, J. (2009). Mehr Grün im urbanen Raum- Mobile Vegetations matten zur Begrünung von Straßenbahngleisen. *Stadt und Grün*, Heft, 3: 2-12.
- Graceson, A., Hare, M., Monaghan, J., Hall, N. (2013). The water retention capabilities of growing media for green roofs. *Ecological Engineering*: 61: Part A(0): 328-334. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.030.
- Graceson, A., Monaghan, J., Hall, N., Hare, M. (2014). Plant growth responses to different growing media for green roofs. *Ecological Engineering*: 69(0): 196-200. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.067.

- Grigatti, M., Giorgioni, M.E., Ciavatta, C. (2007). Compost-based growing media: influence on growth and nutrient use of bedding plants. *Bioresour.Technol.* 98:3526-3534.
- Grimm, N.B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science*: 319 (5864): 756-760.
- Groenewegen, P.P., den Berg, A. E., De Vries, S., Verheij, R. A. (2006). Vitamin G: effects of green space on health, well-being, and social safety. *BMC public health*, 6(1): 149.
- Gross, G. (2012). Numerical simulation of greening effects for idealised roofs with regional climate forcing. *Meteorologische zeitschrift*: 21(2): 173-181.
- Guerrero, F., Gascó J.M., Hernández, A.L. (2002). Use of pine bark and sewage sludge compost as components of substrates for *Pinus pinea* and *Cupressus arizonica* production. *J. Plant Nutr.*: 25: 129-141.
- Handreck, K.A. (1983). Particle size and the physical properties of growing media for containers. *Comm. Soil Sci. Plant Anal* 14: 209-222.
- Handreck, K. A. (1992). Growth of ferns in soil-less media, as affected by pH, iron and calcium/magnesium ratio. *Scientia Horticulturae*: 50 (1-2): 115-126. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0304-4238(05)80014-7.
- Handreck, K., Black, N. (2002). Growing media for ornamental plants and turf. UNSW Press. Sidney, Australia. 534 p.
- Hansmann, E. (1973). Pigment analysis. Handbook of Phycological Methods, Culture Methods and Growth Measurements. Cambridge University Press, London. pp. 359-368.
- Hartmann H., T., Kester D., E. (1974). Propagación de plantas principios y prácticas. 2 3ra ed.
- Hassanzadeh, M., A. Ebadi, M. Panahyan-e-Kiví, A.G. Eshghi, Sh. Jamaati-e-Somarin, M. Saeidi y R. Zabihi-e-Mahmoodabad (2009). Evaluation of drought stress on relative water content and chlorophyll content of sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes at early flowering stage. *Research Journal of Environmental Sciences*: 3: 345-350.
- Havis, J. R., Hamilton, W. W. (1976). Physical properties of container media. *Journal of Arboriculture*: 2(7): 139-140.
- Hernández-Apaolaza, L., Gascó, A. M., Gascó, J. M., Guerrero, F. (2005). Reuse of waste materials as growing media for ornamental plants. *Bioresource Technology*: 96(1): 125-131.

- Hicklenton, P. R., Rodd, V., Warman, P. R. (2001). The effectiveness and consistency of source-separated municipal solid waste and bark composts as components of container growing media. *Scientia Horticulturae*, 91(3), 365-378.
- Higueras, E. (1997). Urbanismo bioclimático. Criterios medioambientales en la ordenación de asentamientos. Resumen de Tesis Doctoral. ETS de arquitectura Dirección General de la Vivienda, Arquitectura y Urbanismo.
- Hopkins, G., Goodwin, C. (2011). *Living Architecture: Green Roofs and Walls*. CSIRO Publishing, Collingwood, Victoria, Australia. pp.296.
- Insuasti, J.P., Padilla, S. (2015). Techos verdes y jardines verticales. *Revista Bionatura*.
- Jackson, B. E., Wright, R. D., Browder, J. F., Harris, J. R., Niemiera, A.X. (2008). Effect of fertilizer rate on growth of azalea and holly in pine bark and pine tree substrates. *HortScience*, 43(5), 1561-1568.
- Jackson, B. E., Wright, R. D., & Seiler, J. R. (2009). Changes in chemical and physical properties of pine tree substrate and pine bark during long-term nursery crop production. *HortScience*, 44(3), 791-799.
- Jayasinghe, G.Y. (2010). Sugarcane bagasses sewage sludge compost as a plantgrowth substrate and an option for waste management. *Clean Technol. Environ. Policy* 14: 625–632.
- Jayasinghe, G.Y. (2012). Synthetic soil aggregates as a potting medium for ornamental plant production. *J. Plant Nutr.* 35: 1441–1456.
- Jim, C.Y., Peng, L.L.H. (2012). Substrate moisture effect on water balance and thermal regime of a tropical extensive green roof. *Ecological Engineering*: 47: 9-23.
- Jørgensen, L., Dresbøll, D. B., Thorup-Kristensen, K. (2014). Root growth of perennials in vertical growing media for use in green walls. *Scientia Horticulturae*: 166 (0): 31-41. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2013.12.006>.
- Kafkafi, U. (2008). Functions of the root system. *Soilless Culture: Theory and Practice*. Elsevier, 84.
- Kappis, C. (2010a). Vegetations systeme für die Gleisbettbegrünung. *Berliner Geographische Arbeiten* 116, Das Grüne GleisVegetationstechnische, ökologische und ökonomische Aspekte der Gleisbettbegrünung. pp. 41–52.
- Kappis, C. (2010b). Wirtschaftliche Aspekte Grüner Gleise. *Berliner Geographische Arbeiten* 116, Das Grüne Gleis-Vegetationstechnische, ökologische und ökonomische Aspekte der Gleisbettbegrünung. pp. 91–108.

- Kappis, C., Henze, H. J., Schreiter, H., Gorbachevskaya, O. (2010). Stadtökologische Effekte von Gleisbettbegrünungen. *Berliner Geographische Arbeiten* 116, Das Grüne Gleis- Vegetationstechnische, ökologische und ökonomische Aspekte der Gleisbettbegrünung. pp. 9–40.
- Kaudal, B. B., Chen, D., Madhavan, D. B., Downie, A., Weatherley, A. (2016). An examination of physical and chemical properties of urban biochar for use as growing media substrate. *Biomass and Bioenergy*: 84: 49-58. doi:10.1016/j.biombioe.2015.11.012.
- Kluge, M., Ting, I.P. (1978). Crassulacean acid metabolism. *Ecological Studies*, Vol. 30. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York.
- Köhler, M. (2006). Long-term vegetation research on two extensive green roofs in Berlin. *Urban Habitats*: 4(1): 3-26.
- Köhler, M. (2008). Green facades—a view back and some visions. *Urban Ecosystems*: 11(4): 423-436. doi:10.1007/s11252-008-0063-x.
- Köhler, M., Poll, P.H. (2010). Long-term performance of selected old Berlin green roofs in comparison to younger extensive green roofs in Berlin. *Ecological Engineering*: 36(5): 722-729.
- Kotsiris, G., Nektarios, P. A., Paraskevopoulou, A. T. (2012). *Lavandula angustifolia* growth and physiology is affected by substrate type and depth when grown under mediterranean semi-intensive green roof conditions. *HortScience*: 47(2): 311-317.
- Kotsiris, G., Nektarios, P. A., Ntoulas, N., Kargas, G. (2013). An adaptive approach to intensive green roofs in the Mediterranean climatic region. *Urban Forestry Urban Greening*: 12(3): 380-392. doi:10.1016/j.ufug.2013.05.001.
- Landis, T.D., Tinus, R.W., McDonald, S.E., Barnett, J.P. (1990). Containers and growing media. Vol. 2. The Container Tree Nursery Manual. Agric. Handbook 674. USDA. Forest Service. Washington, DC. EUA. 88 p.
- Landolt, E. (2001). Orchideen-Wiesen in Wollishofen (Zürich)--ein erstaunliches Relikt aus dem Anfang des 20. Jahrhunderts. *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, 146(2/3): 41-51.
- Larson, KD. 2000. Comportamiento y manejo de la fresa: Desarrollos de programas de producción para máxima calidad y rendimiento en México. Pp. 7-21. In: J. Z.
- Lazzarin, R.M., Castellotti, F., Busato, F. (2005). Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings*: 37(12): 1260-1267.
- Lemaire, F. (1997). The problem of the biostability in organic substrates. In: Proceedings of the ISHS International Symposium on Growing Media and Plant Nutrition, 2–7 September 1996. Roebur, Freising, Germany. *Acta Hort.* 450: 63–70.

- Lemaire, F., Rivièrre, L.M., Stievenard, S., Marfa, O., Gschwander, S., Giuffrida, F., (1998). Consequences of organic matter biodegradability on the physical, chemical parameters of substrates. In: Proceedings of the ISHS International Symposium on Composting and Use of Composted Materials, 5–11 April 1997. Szmidt, Auchincruive, Scotland. *Acta Hort.* 469: 129–138.
- Lemaire, F., Fatigues, A., Rivièrre, L.M., Charpentier, S., Morel, P. (2003) Cultures en Post et Conteneurs, Principes Agronomiques at Applications. 2a ed. INRA. Paris. 210 p.
- Lemaire, F. (2005). Cultivos en macetas y contenedores. Mundi-Prensa Libros.
- López-Cuadrado, M.C., Ruiz-Fernández, J., Masaguer, A. (2006). Producción de planta ornamental en contenedor con sustratos alternativos a la turba. IMIDRA, Madrid España.
- López-López, M.J., Masaguer-Rodríguez, A., Paredes-Gil, C., Roca-Pérez, L., Ros-Muñoz, M., Salas-Sanjuan, M.C., Boluda-Hernández, R. (2015). Residuos orgánicos y agricultura intensiva. Tomo 1. In: Recursos Orgánicos: Aspectos agronómicos y medioambientales. Vol.III. Mundi Prensa, España. 135 pp.
- Lundholm, J., MacIvor, J.S., MacDougall, Z., Ranalli, M. (2010). Plant species and functional group combinations affect green roof ecosystem functions. *PLoS ONE*, 5(3).
- Lundholm, J., Heim, A., Tran, S., Smith, T. (2014). Leaf and life history traits predict plant growth in a green roof ecosystem.
- Ma, Y. B., Nichols, D. G. (2004). Phytotoxicity and detoxification of fresh coir dust and coconut shell. *Communications in soil science and plant analysis*, 35(1-2), 205-218.
- MacIvor, J.S., Ranalli, M.A., Lundholm, J. T. (2011). Performance of dryland and wetland plant species on extensive green roofs. *Annals of Botany*, 107(4), 671-679.
- Maddox, N. (2014). Up on the Roof, a World of Green. *Soil Horizons*, 55(1). doi:10.2136/sh2014-55-1-f.
- Mahlau Enge, M., Merino Pacheco, M., Rudolf, W. (1995). Naturación urbana. *Agricultura: Revista agropecuaria*, (761), 1014-1016.
- Marchan, C., Regueiro, M., Rubio, J. (2010). Panorama Minero 2008-2009. Instituto Geológico y Minero de España.
- Marfà, O., Guri, S., Fernández, M.F. Gomes, I. M.C. (1999). Física de sustratos y oxigenación del medio radicular. *Cultivos sin suelo II*, 2.

- Masaguer, A. (2008). Evaluación agronómica de sustratos eco-compatibles para la producción de planta ornamentales empleando como planta testigo *Euphorbiapulcherrima*. *Actas de Horticultura*, 53: 106-113.
- Masaguer, A., Benito Capa, M. (2008). Evaluación de la calidad del compost. En Compostaje (pp. 285-304). Mundi Prensa Libros SA.
- Masaguer-Rodríguez, A., López-Fabal, A., Carmona-Chiara, E., Fornés-Sebastiá, F., Ordovás-Ascaso, J., Gómez-Sánchez, M. A., Moreno-Aguirre, M. T., Marfá-Pagès, O., Cáceres-Reyes, R., López-Núñez, R., Belda, R. (2015). Uso del compost como componente de sustratos para cultivo en contenedor. Tomo 2. In: Recursos Orgánicos: Aspectos agronómicos y medioambientales. Vol.III. Mundi Prensa, España. 244 pp.
- Matkin, O. A., Chandler, P. A., Baker, K. F. (1957). Nitrogen in nursery soils. The UC System for Producing Healthy Container-Grown Plants, Univ. of Cal. Division of Agric. Sci. Agricultural Exp. Sta.
- Mazuela, P., Salas, M.D.C., Urrestarazu, M. (2005). Vegetable waste compost as substrate for melon. *Communications in soil science and plant analysis*, 36(11-12): 1557-1572.
- Meerow, A.W. (1995). Growth of two tropical foliage plants using coir dust as a container medium amendment. *HortTechnology*, 5(3): 237-239.
- Merino Pacheco, M. (2005). Naturación de edificios: paisaje sostenible. Cuadernos de arquitectura del paisaje. Ediciones de Horticultura.
- Metselaar, K. (2012). Water retention and evapotranspiration of green roofs and possible natural vegetation types. *Climate Proofing Cities*, 64(0), 49-55. doi:10.1016/j.resconrec.2011.12.009.
- Michelot P. (1999). Relations substrat - irrigation. In: P. Michelot, C. Chambolle (Coord). L irrigation en pépinière hors sol. pp. 19-27.
- Mohr, H., Schopfer, P. 1995. Plant Physiology. Springer-Verlag, New York.
- Moldes, A., Cendón, Y., Barral, M.T. (2007). Evaluation of municipal solid waste compost as a plant growing media component, by applying mixture design. *Bioresource technology*, 98(16), 3069-3075. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2006.10.021.
- Molineux, C. J., Fentiman, C. H., Gange, A. C. (2009). Characterising alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the U.K. *Ecological Engineering*: 35(10): 1507-1513. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.06.010.
- Morel, P., Poncet, L., Rivière, L.M. (2000). Les supports de culture horticoles. INRA Editions, Paris.

- Mori, I. C., Utsugi, S., Tanakamaru, S., Tani, A., Enomoto, T., Katsuhara, M. (2009). Biomarkers of green roof vegetation: anthocyanin and chlorophyll as stress marker pigments for plant stresses of roof environments. *Journal of Environmental Engineering and Management*, 19(1): 21-27.
- Nagase, A., Dunnett, N. (2013). Establishment of an annual meadow on extensive green roofs in the UK. *Landscape and Urban Planning*: 112: 50-62.
- Nardini, A., Andri, S., Crasso, M. (2012). Influence of substrate depth and vegetation type on temperature and water runoff mitigation by extensive green roofs: Shrubs versus herbaceous plants. *Urban Ecosystems*, 15(3): 697-708.
- Neila, F. J., Bedoya, C., Britto, C. (1999). Arquitectura bioclimática y naturación urbana. In J. Briz (Ed.), *Naturación urbana: Cubiertas ecológicas y mejora medioambiental*. España: Mundi- Prensa. pp. 241– 266.
- Neila, F. J., Bedoya, C., Acha, C., Olivieri, F., Barbero, M. (2008). Las cubiertas ecológicas de tercera generación: un nuevo material constructivo. *Informes de la Construcción*, 60(511): 15-24.
- Nektarios, P. A., Amountzias, I., Kokkinou, I., Ntoulas, N. (2011). Green roof substrate type and depth affect the growth of the native species *Dianthus fruticosus* under reduced irrigation regimens. *HortScience*: 46(8): 1208-1216.
- Nektarios, P. A., Kastritsis, S., Ntoulas, N., Tsiotsiopoulou, P. (2011). Substrate amendment effects on potted plant production and dry weight partition of *Lantana camara*. *HortScience*: 46(6): 864-869.
- Nektarios, P. A., Ntoulas, N., Nydrioti, E., Kokkinou, I., Bali, E.-M., Amountzias, I. (2015). Drought stress response of *Sedum sediforme* grown in extensive green roof systems with different substrate types and depths. *Scientia Horticulturae*, 181: 52-61. doi:10.1016/j.scienta.2014.10.047.
- Noguera, P., Abad, M., Noguera, V., Puchades, R., Maquieira, A. (2000). Coconut coir waste, a new and viable ecologically friendly peat substitute. *Acta Hort.* 517: 279-286.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., ... Rowe, B. (2007). Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services. *BioScience*: 57(10): 823-833.
- Oliver-Solà, J., Josa, A., Rieradevall, J., Gabarrell, X. (2009). Environmental optimization of concrete sidewalks in urban areas. *The International Journal of Life Cycle Assessment*: 14(4): 302-312.
- Olivier, M., Goffart, J.P. Ledent, J.F. (2006). Threshold values for chlorophyll meter as decision tool for nitrogen management of potato. *Agron. J.* 98: 496-506.

- Olivieri, F., Neila, F. J., Bedoya, C. (2010). Energy saving and environmental benefits of metal box vegetal facades. Management of natural resources, sustainable development and ecological hazards II. Transactions on *Ecology and the Environment*, 127: 325–335. doi: 10.2495/RAV090291.
- Ondoño, S., Martínez-Sánchez, J. J., Moreno, J. L. (2016). The composition and depth of green roof substrates affect the growth of *Silene vulgaris* and *Lagurus ovatus* species and the C and N sequestration under two irrigation conditions. *Journal of environmental management*, 166, 330-40. doi:10.1016/j.jenvman.2015.08.045.
- Ortega, D.F. 1997. Fertirrigación en cultivos de flores. pp. 136-147. En: Silva, F. (ed.). *Fertirrigación*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá
- Ostos, J. C., López-Garrido, R., Murillo, J. M., López, R. (2008). Substitution of peat for municipal solid waste-and sewage sludge-based composts in nursery growing media: Effects on growth and nutrition of the native shrub *Pistacia lentiscus* L. *Bioresource technology*: 99(6): 1793-1800.
- Ottele, M., Perini, K., Fraaij, A. L. A., Haas, E. M., Raiteri, R. (2011). Comparative life cycle analysis for green facades and living wall systems. *Energy and Buildings*, 43(12): 3419–3429. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.09.010.
- Pérez-Murcia, M. D., Moral, R., Moreno-Caselles, J., Pérez-Espinosa, A., Paredes, C. (2006). Use of composted sewage sludge in growth media for broccoli. *Bioresource technology*, 97(1): 123-130.
- Peterson, J.C. (1982). Effects of pH upon nutrient availability in a commercial soilless root medium utilized for floral crop production. *Ohio Agr. Res. and Devel. Center Res. Cir.* 268: 16-19
- Piekielek, W.P. Fox, R.H., Toth, J.D., Macneal, K.E. (1995). Use of a chlorophyll meter at the early dent stage of corn to evaluate nitrogen sufficiency. *Agronomy Journal*, Madison, v.87, n.3, p.403-408, 1995.
- Puustjarvi, V., Robertson, R.A. (1975). Physical and chemical properties. Peat in Horticulture. DW Robinson and J. GD Lamb, eds. Academic Press, New York, 23-28.
- Raviv, M. (1986). 11. Peat and peat substitutes as growth media for container-grown plants M. Raviv, Y. Chen and Y. Inbar. *The role of organic matter in modern agriculture*. pp. 25, 257.
- Raviv, M., Chen, Y., Inbar, Y. (1986). Peat and peat substitutes as growth media for container-grown plants. In *The role of organic matter in modern agriculture*. Springer Netherlands. pp. 257-287.

- Raviv, M., Tarre, S., Geler, Z., Shelef, G. (1987). Changes in some physical and chemical properties of fibrous solids from cow manure and digested cow manure during composting. *Biological Wastes*, 19(4): 309-318. doi:10.1016/0269-7483(87)90065-6.
- Raviv, M., Tarre, S., Geler, Z., Shelef, G. (1987). Changes in some physical and chemical properties of fibrous solids from cow manure and digested cow manure during composting. *Biological Wastes*, 19(4): 309-318.
- Resh, H. M. (2002). Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower. CRC.
- Richards, D., Lane, M., Beardsell, D.V. (1986). The influence of particle-size distribution in pine bark: sand: brown coal potting mixes on water supply, aeration and plant growth. *Sci. Hort.* 29:1-14.
- Rivela, B., Cuerda, I., Olivieri, F., Bedoya, C., Neila, F. J. (2013). Análisis de ciclo de vida para el eco-diseño del sistema Intemper TF de cubierta ecológica aljibe. *Materiales de construcción*: 63(309): 131–145. doi:10.3989/mc.2013.v63.i309.
- Rowe, D. B., Getter, K. L., Durhman, A. K. (2012). Effect of green roof media depth on Crassulacean plant succession over seven years. *Landscape and Urban Planning*: 104(3): 310-319.
- Rudolf, W. (1992). De la canalización subterránea al reverdecimiento aéreo. *Agricultura: Revista Agropecuaria*: 773: 1024-1028.
- Rudolf, W., Malhau, M., Merino, M. (1995). Naturación urbana. *Agricultura: Revista Agropecuaria*, 761: 1014–1016.
- Rudolf, W., Rudolf, F. (1995). Necesidad de naturación de grandes áreas edificadas. *Agricultura: Revista Agropecuaria*, 749: 1035–1038.
- Ruiz-Caballero, F. (1999). Experiencias de cubiertas ecológicas en Madrid. En *Naturación urbana: cubiertas ecológicas y mejora medioambiental*. Mundi Prensa Libros SA. pp. 363-378.
- Sánchez- Sánchez, J.L. (2006). Producción orgánica de fresa (*Fragaria x ananasa*) en tubos de PVC. Mazatlán, Sinaloa. Universidad Autónoma de Sinaloa, Subdirección Servicios sociales, Zona del sur. 7 p.
- Sánchez-Hernández R., Ordaz Ch. M, Benedicto, V.G., Palma, L.D., Sánchez, B.J. (2007). Chemical characteristic of several vermicompost in Mexico. *Compost Sci. Util.* 15: 47-52.
- Sánchez, P. G. 2009. Manejo integral de la nutrición en el cultivo de cucurbitáceas a campo abierto. 1er Congreso Internacional de Cucurbitáceas. Guadalajara, Jalisco. México.

- Schreiter, H. (2010). The ecological potential of green tram tracks in urban areas. Presentation and Proceedings World Green Roof Congress. Mexico City.
- Schreiter, H. (2011). Grüngleisnetzwerk-zur Entwicklung innovativer Systemlösungen für intensive und extensive Begrünungssysteme auf urbanen Gleisen. In R. S. Verlag (Ed.), Jahrbuch 2011 für mehr Grün in Städten (pp. 7577). Hamburg, Germany: Rolf Soll Verlag.
- Siemens, M., Kramer E., Rudolf, W. (1999). Otras modalidades: Naturación de calles y vías férreas. In J. Briz (Ed.), Naturación urbana: Cubiertas ecológicas y mejora medioambiental. España: Mundi-Prensa. pp. 379–390
- SIGA (Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios). (2013). Disponible en: <http://sig.marm.es/siga/>
- Soto, J.L.L. (2011). El Paisaje Urbano Histórico: modas, paradigmas y olvidos. Ciudades: Revista del Instituto Universitario de Urbanística de la Universidad de Valladolid, (14): 15-38.
- Spiers, T.M., Fietje, G. (2000). Green waste compost as a component in soilless growing media. *Compost Science and Utilization*: 8(1):19-23.
- Stephenson, T., Reid, E., Avery, L. M., Jefferson, B. (2013). Media surface properties and the development of nitrifying biofilms in mixed cultures for wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection*: 91(4): 321-324. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2012.07.002>
- Strickland, J. D. H., Parsons, T. R. (1965). A manual of sea water analysis.
- SUNGRO Analytical Laboratories. 1997. Graphic interpretation guide. 177 Sanfordville Road. Warwick, New York 10990 USA.
- Tabares-Velasco, P.C., Zhao, M., Peterson, N., Srebric, J., Berghage, R. (2012). Validation of predictive heat and mass transfer green roof model with extensive green roof field data. *Ecological Engineering*, 47: 165-173.
- Tapia, P.V., Ramos, J.Z.C., García, P.S., Tijerina, L., Chávez, R.M., Romero, L., Arredondo, J. L.O. (2008). Caracterización física, química y biológica de sustratos de polvo de coco. *Revista fitotecnica mexicana*, 31(4): 375-381.
- Tapia, Y., Frutos, I., Eymar, E., Masaguer, A. (2009). Lixiviación de Cd y otros metales pesados en compost de restos de poda con biosólidos y compost de corteza de pino. *Actas de Horticultura* 53: 126-134.
- Terapia Urbana. (2013). Qué es la naturación urbana? Recuperado a partir de <http://www.terapiaurbana.es/que-hacemos/¿que-es-la-naturacion-urbana/>
- Terés, V.T. (2001). Relaciones aire agua en sustratos de cultivo como base para el control del riego. Metodología de laboratorio y modelización.

- Thuring, C.E., Berghage, R.D., Beattie, D.J. (2010). Erratum to Green roof plant responses to different substrate types and depths under various drought conditions. *HortTechnology*, 20(3): 395-401.
- Tremblay, N., Wang, Z., Belec, C. (2010) Performance of Dualex in spring wheat for crop nitrogen status assessment, yield prediction and estimation of soil nitrate content. *J Plant Nutr.*: 33: 57–70.
- Tworowski, T.J., Benassi, T.E., Takeda, F. (2001). The effect of nitrogen on stolon and ramet growth in four genotypes of *Fragaria chiloensis* L. *Scientia Horticulturae*: 88 (2): 97-106.
- Uddling, J., Gelang-Alfredsson, J., Piikki K., Pleijel, H. (2007). Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. *Photosynth Res*: 91: 37–46.
- UNE-EN 12579. (2000). Mejoradores de Suelo y Sustratos de Cultivo: Toma de muestras. AENOR. Madrid, España. 14 p.
- UNE-EN 12580. (2000). Mejoradores de Suelo y Sustratos de Cultivo: Determinación de cantidad. AENOR. Madrid, España. 14 p.
- UNE-EN 13037. (2001). Mejoradores de Suelo y Sustratos de Cultivo: Determinación de pH. AENOR. Madrid, España. 12 p.
- UNE-EN 13038. (2001). Mejoradores de Suelo y Sustratos de Cultivo: Determinación de la conductividad eléctrica. AENOR. Madrid, España. 12 p.
- UNE-EN 13039. (2001). Mejoradores de Suelo y Sustratos de Cultivo: Determinación del contenido en materia orgánica y de las cenizas. AENOR. Madrid, España. 12 p.
- UNE-EN 13040. (2008). Mejoradores de Suelo y Sustratos de Cultivo: Preparación de Muestras para Ensayos Químicos y Físicos, Determinación del Contenido de Materia Seca, Contenido de Humedad y Densidad Aparente Compactada en Laboratorio. AENOR. Madrid, España. 20 p.
- UNE-EN 13041. (2001). Mejoradores de Suelo y Sustratos de Cultivo: Determinación de Propiedades Físicas, Densidad Aparente Seca, Volumen de Aire, Volumen de Agua, Valor de Contracción y Porosidad Total. AENOR. Madrid, España. 26 p.
- UNE-EN 15428. (2008). Mejoradores de Suelo y Sustratos de Cultivo: Determinación de la granulometría de las partículas. AENOR. Madrid, España. 22 p.
- UNE-EN 13652. (2002). Mejoradores de Suelo y Sustratos de Cultivo: Extracción de nutrientes y elementos solubles en agua. AENOR. Madrid, España. 20 p.
- UNE-EN 13654. (2002). Mejoradores de Suelo y Sustratos de Cultivo: Determinación de nitrógeno. Parte 1: Método Kjeldahl modificado.. AENOR. Madrid, España. 16 p.

- UN-Habitat (United Nations Human Settlements Programme). (2011). Cities and climate change: Global report on human settlements 2011. London: Earthscan Ltd. Obtenido de http://www.unhabitat.org/downloads/docs/GRHS2011_Full.pdf
- Urbano, B., Briz, J. (2004). Investigación de mercados de Naturación. In J. Briz (Ed.), *Naturación urbana: Cubiertas ecológicas y mejora medioambiental*. España: Mundi-Prensa. pp. 81–101
- Urbano-López, B. (1999). Sistema comparativo de áreas urbanas naturadas. In J. Briz (Ed.), *Seminarios del Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Centro y Canarias*. Madrid, España: Editorial Agrícola Española. pp. 238–256.
- Urbano-López. (2013). Naturación Urbana, Un Desafío a La Urbanización. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*: XIX (2): 225-235. doi:10.5154/r.chscfa.2013.01.004.
- Urrestarazu, M., Burés, S. (2009). Aplicación de cultivos sin suelo en arquitectura. *Horticultura Internacional*, 10, 70.
- Urrestarazu, M., Burés, S. (2012). Sustainable green walls in architecture. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 10(1): 792-794.
- Urrestarazu, M., Castillo, J. D.E. L., Sádaba, S., Muro, Y. J. (2004). Fibra de pino : un sustrato ecológico Copersa.
- Valdés, A. L. (2008). Azoteas Verdes. Doble valor. *Obras*, 36(422): 48-53.
- Valenzuela O. (2006). Los sustratos como medio de crecimiento para los cultivos sin suelo. Seminario taller de sustratos para plantas en contenedores. Ciudad de Corrientes. Corrientes. 7.
- VanWoert, N. D., Rowe, D. B., Andresen, J. A., Rugh, C. L., Xiao, L. (2005). Watering regime and green roof substrate design affect Sedum plant growth. *HortScience*: 40(3): 659-664.
- Warncke D.D. (1986). Analyzing greenhouse growth media by the saturation extraction method. *HortScience*: 21:223-225.
- Weiler, S. K., Scholz-Barth, K. (2009). Green roof systems: A guide to the planning, design, and construction of landscapes over structure. Hoboken, N. J., USA: John Wiley Sons.
- Winsor, G., Adams, P. (1987). Glasshouse crops. En: Robinson, J.B.D. (ed.). *Diagnosis of mineral disorders in plants*. Vol. 3. Her Majesty's Stationery Office, Londres.
- Whitcomb, C. E. (1988). Plant production in containers. Lacebark Publications.

- White, E.V., Gatersleben, B. (2011). Greenery on residential buildings: Does it affect preferences and perceptions of beauty? *Journal of environmental psychology*: 31(1): 89-98. doi:10.1016/j.jenvp.2010.11.002.
- Wilson, S.B., Meca, L.K., Danielson, H.E., Graetz, D.A., Stoffella, P.J. (2006). Container and field evaluation of three native shrubs grown in compost-based media. *Compost science utilization*: 14 (3): 178-183.
- Wolf, D., Lundholm, J. T. (2008). Water uptake in green roof microcosms: Effects of plant species and water availability. *Ecological Engineering*: 33 (2): 179-186.
- Wong, N.H., Kwang Tan, A.Y., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P.Y., Chan, D. ... Wong, N. C. (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*: 45(3): 663-672. doi:10.1016/j.buildenv.2009.08.005.
- Yang, J., Yu, Q., Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*: 42 (2008): 7266-7273. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.07.003.
- Yang, H. S., Kang, J., Choi, M.S. (2012). Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level. *Building and Environment*: 50, 44-55. doi:10.1016/j.buildenv.2011.10.004.
- Young, J.R, Holcomb, E.J., Heuser, C.W. (2002). Greenhouse growth of marigolds in three leached sources of spent mushroom substrate over a 3-year period. *HortTechnology*: 12: 701-705.
- Zapata, N., Guerrero, F., Polo, A. (2005). Evaluación de corteza de pino y residuos urbanos como componentes de sustratos de cultivo. *Agricultura técnica*: 65 (4): 378-387.

VII-ANEXOS

7. ANEXOS

ANEXO 1. PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS DOCTORAL

Artículos en revista internacional arbitrada

López-Rodríguez, G.; Pérez-Esteban, J.; Ruiz, J.; Masaguer, A. (2016). Behavior and evolution of sustainable organic substrates in a vertical garden. **Publicado en:** *Ecological Engineering*. 93:129-134. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857416302476>

López-Rodríguez, G.; Pérez-Esteban, J.; Ruiz, J.; Masaguer, A. (2016). Comportamiento de sustratos orgánicos sostenibles en una cubierta vegetal para la naturalización urbana. **Sometido en:** Revista Mexicana Agrociencia.

López-Rodríguez, G.; Pérez-Esteban, J.; Ruiz, J.; Masaguer, A. (2016). Caracterización física e hidrofísica de sustratos orgánicos sostenibles para sistemas de naturación urbana. **Aceptado en:** Revista electrónica *Innovación Tecnológica*. Centro de Innovación Tecnológica y Ambiental (CITMA). Noviembre 11, 2015. Las Tunas, Cuba.

Resumen y comunicaciones In extenso en congresos

López-Rodríguez, G.; Ruíz-Fernández, J.; Masaguer A. (2014). Utilización de sustratos orgánicos sostenibles ensayados en una cubierta vegetal: preliminar. **IV Jornadas de la Red Española de Compostaje**. Del 12 al 14 de Noviembre. Murcia, España.

Disponible en: <http://www.recompostaje.com/divulgacion/leer/de-residuo-a-recurso-estrategias-de-gestion-tratamiento-y-valorizacion>

López-Rodríguez, G.; Ruíz-Fernández, J.; Masaguer A. (2014). Evolución de sustratos orgánicos sostenibles en jardinería vertical. **Actas de la XI Jornadas del Grupo de Sustratos de la SECH**. Del 25 al 27 de Junio, Escuela Agraria IES Fraisoro (Zizurkil, Gipuzkoa), España.

Disponible en:

<http://www.sech.info/ACTAS/Acta%20nº%2067.%20%20XI%20Jornadas%20de%20Sustratos/67%20XI%20jornadas%20de%20Sustratos.pdf>

López-Rodríguez, G.; Ruíz-Fernández, J.; Masaguer A. (2013). Estudio comparativo de sustratos orgánicos sostenibles para sistemas de naturación urbana: presentación preliminar. **Memorias del VII Congreso Ibérico de Agro-ingeniería y Ciencias Hortícolas**. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. Pp.

Disponible En: [http://sechaging-](http://sechaging-madrid2013.org/geystiona/adjs/comunicaciones/272/C03940002.pdf)

[madrid2013.org/geystiona/adjs/comunicaciones/272/C03940002.pdf](http://sechaging-madrid2013.org/geystiona/adjs/comunicaciones/272/C03940002.pdf)

López-Rodríguez, G.; Ruíz-Fernández, J.; Masaguer A. (2013). Sustratos orgánicos sostenibles para sistemas de jardines verticales. **Memorias del VI Congreso de Estudiantes de Ciencia, Tecnología e Ingeniería Agronómica**. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

Disponible en: <http://blogs.upm.es/congresoestudiantesagronomos/wp-content/uploads/sites/79/2015/03/librodeactas2013.pdf>

ANEXO 2. DETERMINACIONES ANALÍTICAS SEGÚN NORMAS UNE-EN.

a) Toma de muestras (UNE-EN 12579: 2000). Esta norma establece la forma de preparación de la muestra de un sustrato de cultivo antes de realizar las determinaciones analíticas, tanto para las propiedades físicas como para las químicas. Una vez las muestras fueron recibidas se trasladaron al laboratorio, se almacenaron tratando de no alterarla ni compactarla y posteriormente se codificaron.

b) Determinación de cantidad (UNE-EN 12580: 2000). Dado a que este material se comercializa por volumen y debido a que el contenido de humedad puede afectar considerablemente el peso del material, esta norma describe un método para la determinación de una cantidad de sustratos a granel y en envases. El material se pesó, se le determinó la densidad aparente y se le calculó el volumen a partir de los valores obtenidos.

c) Determinación del pH y CE (UNE-EN 13037/ 13038: 2001). La medida del pH realizó con una solución acuosa preparada a partir de una muestra homogénea en una relación de 1:5 sustrato: agua destilada (v/v), para su lectura se empleó un medidor de pH-metro modelo Crison micro pH 2000, previamente calibrado a pH 4 y 7. También se midió la salinidad específica del extracto acuoso en un medidor de CE con compensación automática de temperatura, modelo Crison microcm 2200.

d) Determinación del contenido de materia orgánica (MO) y cenizas (UNE-EN 13039: 2001). Las muestras se secaron en estufa a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y posteriormente se calcinaron en un horno eléctrico de mufla hasta una temperatura de $550^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las cenizas se determinaron como el residuo de la ignición y como materia orgánica se tomó la pérdida de masa por ignición, ambos resultados se expresaron como porcentaje en peso de muestra seca. El procedimiento utilizado se explica a continuación: se utilizaron cápsulas de sílice fundido (crisoles), los cuáles se calentaron durante 16h en un horno mufla a $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura para asegurar la eliminación de cualquier material volátil que pudiera contaminar la muestra. Se dejaron enfriar en un desecador con agente secante activo y posteriormente se pesaron en una balanza analítica con precisión de 0,001g (m_0). Las muestras se distribuyeron sobre la superficie de las cápsulas a razón de 5 g y se secaron en estufa a una temperatura de 105°C durante 4h.

Las cápsulas con las muestras se colocaron en un desecador hasta su enfriamiento a temperatura ambiente, luego se pesaron y se colocaron nuevamente en el horno durante 1h a 105°C. La operación de calentar, enfriar y pesar se repitió hasta que la diferencia entre dos pesadas sucesivas fue menor a 0,001g. Se anotó el peso de cada cápsula con la muestra seca (m_1). En una segunda etapa las muestras se colocaron en un horno de mufla frío elevando la temperatura de forma gradual durante aproximadamente 1h hasta alcanzar 450°C $\pm$ 10 °C y luego se mantuvo la temperatura durante 6h. Posteriormente, las muestras se enfriaron en el desecador, se pesaron con una precisión de 0,001g y se colocaron en el horno mufla durante 1h más a 450°C $\pm$ 10 °C. La operación de calentar, enfriar y pesar se repitió hasta que la diferencia entre dos pesadas sucesivas fue menor a 0,01g. Se anotaron los pesos correspondientes a las cápsulas con las muestras tras la combustión (m_2). El contenido de materia orgánico (MO) expresado como porcentaje en peso de muestra seca se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$W_{mo} (\%) = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 - m_0)} \times 100 \quad \text{Ecuación 14}$$

El contenido de cenizas expresado como porcentaje en peso de muestra seca se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$W_{cenizas} (\%) = \frac{(m_2 - m_0)}{(m_1 - m_0)} \times 100 \quad \text{Ecuación 15}$$

Dónde:

- W_{mo} : contenido en materia orgánica expresada en % m/m.
- $W_{cenizas}$: contenido en cenizas en % m/m.
- m_0 : peso de la cápsula (en g).
- m_1 : peso de la cápsula tras el secado (en g).
- m_2 : peso de la cápsula tras su combustión (en g).

e) Preparación de la muestra para los ensayos físicos y químicos (UNE-EN 13040: 2001). Para los procedimientos analíticos físicos se utilizaron muestras de sustratos sin secar, mientras que para los análisis químicos se utilizaron muestras secadas al horno a ~105°C y previamente molida.

f) Contenido de materia seca y humedad: se pesan aproximadamente 50 g de muestra fresca con una precisión de 0,01 g (m_w), se coloca la muestra en una estufa a 105 °C y se deja secar hasta obtener un peso constante. El contenido de materia seca se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$D_M(\%) = \frac{(m_D - m_T)}{(m_w - m_T)} \times 100 \quad \text{Ecuación 16}$$

Dónde:

- D_M : contenido en materia seca de la muestra expresada como % en peso.
- m_D : masa (en gramos) de la muestra seca más la bandeja de muestra.
- m_T : masa (en gramos) de la bandeja de muestra seca y vacía.
- m_w : masa (en gramos) de la muestra fresca más la bandeja de muestra.

El **contenido de humedad** se calculó a partir de:

$$W_M(\%) = \frac{(m_w - m_D)}{(m_w - m_T)} \times 100 \quad \text{Ecuación 17}$$

Dónde:

- W_M : contenido de humedad de la muestra expresada como porcentaje en peso.
- m_D : masa (en gramos) de la muestra seca más la bandeja de muestra.
- m_T : masa (en gramos) de la bandeja de muestra seca y vacía.
- m_w : masa (en gramos) de la muestra fresca más la bandeja de muestra.

g) Densidad aparente compactada de laboratorio (DACL): Este método permite calcular y expresar los resultados analíticos en una relación peso en volumen, cuando estos se han obtenido del análisis de un peso conocido de submuestra. La DACL corresponde al cociente entre el peso de la muestra húmeda y el volumen total de la muestra. La misma se determinó a partir del peso de la muestra compactada en unas condiciones definidas y los resultados se expresaron en g/L de sustrato fresco. El procedimiento consistió en llenar un cilindro rígido con capacidad de 1000 mL $\pm$ 30 mL de material (sustrato) fresco, acompañado por otro cilindro de menor altura (~13 mm) como collar. Los sustratos se pasaron a través un tamiz sujeto por un embudo (Figura 99). Una vez llenado el cilindro, el tamiz y el embudo se quitaron, se eliminó el material en exceso y con una regla se enrasó al borde superior del cilindro de menor tamaño. Se colocó un pistón (pesa) suavemente sobre el material y se dejó actuar durante 180

segundos. Transcurrido ese tiempo, se retiraron el pistón y el collar desmontable, el material se niveló evitando compactaciones adicionales y luego se pesó con precisión de 0,1 g (m_x). Los cálculos se realizaron con la masa del sustrato compactado y el volumen del cilindro normalizado, y se aplicó la siguiente ecuación:

$$L_D = \frac{m_L - M_0}{V} \quad \text{Ecuación 18}$$

Dónde:

- L_D : densidad aparente compactada de laboratorio en gramos por litro.
- m_0 : masa en gramos del cilindro de ensayo vacío con la base.
- m_L : media aritmética de la masa de la muestra y el cilindro con la base en gramos.
- V : volumen en litros del cilindro de ensayo.

h) Determinación de las propiedades físicas (UNE-EN 13041: 2001). Esta norma europea describe un método instrumental para la determinación de densidad aparente seca, volumen de aire y agua, valor de contracción y porosidad total para los sustratos de cultivos. El principio de esta metodología considera que se utilice un volumen aproximado de 10 litros de sustrato, se sature con agua y se equilibre a una presión menor a 50 cm de columna de agua en un lecho de arena. En una primera etapa, se transfirió aproximadamente dos litros de sustrato a envases de plásticos sin fondo (tarros), provisto en el mismo por una malla tensada fijada por cinta adherente y se colocaron en un baño de agua en seco. Manteniendo un flujo constante, el baño de agua se llenó lentamente (durante ~30 minutos) hasta que el nivel estuviera un cm por debajo del borde superior de los tarros. Los sustratos se saturaron por capilaridad y se dejaron reposar hasta la humidificación total de la muestra (durante un período máximo de 36h) (Figura 100). Si los tarros flotaban se colocaba una bandeja pesada encima de ellos, asegurando que el aire pudiera salir y que no se produjera compactación en la muestra. Una vez pasadas las 36h los tarros se retiraron del baño de agua e inmediatamente fueron transferidos a una mesa de succión (lecho de arena) de la firma holandesa Eijkelkamp (Figura 101). Se aseguró de que el fondo de los tarros estuviera completamente en contacto con la arena. Se aplicó una presión hidrostática menor a 50 cm de columna de agua medidos a partir del fondo del tarro durante un período de 48h.

En una segunda etapa, la muestra húmeda equilibrada (menos de 50 cm) y homogenizada se transfirió con una cuchara a cilindros de muestra formados por dos anillos (m_1 : masa del anillo inferior) de $\sim 100\text{mm} \pm 1\text{mm}$ de diámetro interior (d_1) y de $50\text{mm} \pm 1\text{mm}$ de altura, fijados mediante cinta adhesiva. Los cilindros se llenaron completamente (cuatro cilindros por sustrato) cuidando de no compactar la muestra, se llevaron a un baño de agua en seco, se llenó lentamente (durante ~ 30 minutos) hasta que el nivel estuviera un cm por debajo del borde superior del cilindro y se saturaran, durante unas 24h (Figura 102). Pasadas las 24h los cilindros con la muestras rehúmedadas se transfirieron de inmediato a la mesa de succión y se aseguró el contacto con la arena. Se aplicó una presión hidrostática de menos de 10 cm de columna de agua a partir de la mitad del anillo inferior durante un período de 36h. Se comprobó regularmente la ausencia de burbujas de aire en los tubos de regulación del nivel de succión. Los cilindros con las muestras se retiraron de la mesa de succión, se colocaron en una superficie plana, se retiró el anillo superior y el anillo inferior se niveló evitando compactar la muestra. Se cortó el exceso de material con unas tijeras tratando de evitar perturbaciones en la muestra y se eliminó todo material adherido al exterior del anillo y se anotó el peso húmedo (m_2). La muestra húmeda se secó en estufa a $103^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ hasta masa constante, se anotó el peso seco (m_3), la altura (h_2) y el diámetro medio (d_2) de la muestra (Figura 103). Después de la presión hidrostática de menos 10 cm, se tomaron muestras nuevas y se aplicaron presiones hidrostáticas de menos 50 cm y de menos 100 cm para la obtención de la curva de humedad a bajas succiones y se repitió el procedimiento anterior para cada una de las succiones. Se realizaron los siguientes cálculos:

a) Volumen del anillo de muestra:

$$V_1 = (\pi * (0,5d_1)^2 * h_1)$$

Ecuación 19

Dónde:

- V_1 : volumen del anillo inferior en la muestra.
- d_1 : diámetro del anillo inferior en la muestra.
- h_1 : altura del anillo inferior en la muestra.

b) Densidad aparente seca:

$$D_{BD} = \frac{(m_3 - m_1)}{V_1} * 100$$

Ecuación 20

Dónde:

- D_{BD} : densidad aparente seca en kg/m³.
- m_3 : masa del anillo inferior de la muestra más la muestra seca en gramos.
- m_1 : masa del anillo inferior de la muestra en gramos.
- V_1 : volumen del anillo de muestra inferior en cm³

c) Valor de la contracción:

$$S\% = \frac{(V_1 - V_m)}{V_1} * 100$$

Ecuación 21

Dónde:

- $S\%$: valor de la contracción de la muestra después del secado, en % de volumen.
- V_1 : volumen del anillo de muestra inferior en cm³.
- V_m : volumen medio de la muestra seca cm³, se calcula con: $V_1 = (\pi * (0,5d_2)^2 * h_2)$
- d_2 : diámetro de la muestra seca en cm.
- h_2 : altura de la muestra seca en cm.

d) Densidad de partícula:

$$P_D = \frac{1}{[W_{mo}/(100 \times 1500)] + [W_{cenizas}/(100 \times 2650)]}$$

Ecuación 22

Dónde:

- P_D : densidad de partícula expresada en kg m⁻³.
- W_{MO} : contenido en materia orgánica, expresado como porcentaje en masa. Se calcula como (100 - % de cenizas).
- $W_{Cenizas}$: contenido en cenizas, expresado como porcentaje en masa.
- 1550 se considera la densidad de la materia orgánica, expresada en kg m⁻³.
- 2650 es se considera la densidad de las cenizas, expresada en kg m⁻³.

e) Porosidad total:

$$P_s = 1 - (D_{BD}/P_D) * 100$$

Ecuación 23

Dónde:

-PS: porosidad total, expresada en porcentaje de volumen de la muestra húmeda, % (v/v) para una presión hidrostática de menos 10 cm.

-DBD: densidad aparente Seca en kg m⁻³.

-PD: densidad de partícula expresada en kg m⁻³.

f) Volumen de agua:

$$W_v \text{ a presión hidrostática de menos de 10 cm} = \frac{(m_2 - m_5)}{V_1} * 100 \quad \text{Ecuación 24}$$

$$W_v \text{ a presión hidrostática de menos de 50 cm} = \frac{(m_3 - m_5)}{V_1} * 100 \quad \text{Ecuación 25}$$

$$W_v \text{ a presión hidrostática de menos de 100 cm} = \frac{(m_4 - m_5)}{V_1} * 100 \quad \text{Ecuación 26}$$

Dónde:

-W_v: contenido de volumen de agua expresado en porcentaje de volumen de la muestra húmeda % (v/v) para una presión hidrostática de menos 10 cm, menos 50 cm y menos 100 cm.

-m₂: masa en gramos de la muestra húmeda más la del anillo de la muestra para una presión hidrostática de menos 10 cm.

-m₃: masa en gramos de la muestra húmeda más la del anillo de la muestra para una presión hidrostática de menos 50 cm.

-m₄: masa en gramos de la muestra húmeda más la del anillo de la muestra para una presión hidrostática de menos 100 cm.

-m₅: masa en gramos de la muestra seca más la del anillo de la muestra.

-V₁: volumen del anillo de muestra inferior en cm³.

g) Volumen de aire:

$$A_v \text{ a presión hidrostática de - 10 cm} = P_s - W_v \text{ a presión hidrostática de - 10 cm}$$

[Ecuación 27]

Av a presión hidrostática de - 50 cm = Ps - Wv a presión hidrostática de - 50 cm

[Ecuación 28]

Av a presión hidrostática de - 100 cm = Ps - Wv a presión hidrostática de - 100 cm

[Ecuación 29]

Dónde:

-Av: contenido de volumen de aire expresado en porcentaje de volumen de la muestra húmeda, % (v/v), para una presión hidrostática de menos 10 cm, menos 50 cm o menos 100 cm.

-Ps: porosidad total, expresada en porcentaje de volumen de la muestra húmeda, % (v/v) para una presión hidrostática de menos 10 cm.

-Wv: contenido de volumen de agua expresado en porcentaje de volumen de la muestra húmeda % (v/v) para una presión hidrostática de menos 10 cm, menos 50 cm y menos 100cm. Con los cálculos anteriores se obtuvieron los parámetros (Terés, 2001; Raviv et al., 2002) con los cuales se construyó la curva retención de humedad:

▪ **La Capacidad de Aireación (CA):**

$$CA\% = A_{V10\text{ cm}} = P_s - W_{V10\text{ cm}}$$

Ecuación 30

▪ **El Agua Fácilmente Disponible (AFD):**

$$AFD (\%) = W_{V10\text{ cm}} - W_{V50\text{ cm}}$$

Ecuación 31

▪ **El Agua de Reserva (AR):**

$$AR = W_{V50\text{ cm}} - W_{V100\text{ cm}}$$

Ecuación 32

▪ **El Agua Difícilmente Disponible (ADD):**

$$ADD = P_s W - CA - AFD - AR$$

Ecuación 33

i) Determinación de la granulometría de partículas (UNE-EN 15428: 2008).

Esta norma europea describe un método instrumental para la determinación de la distribución del tamaño de partícula de la muestra de sustrato secada al aire. Para ello se tamiza sobre gaun tamiz mecánico de movimiento vibratorio vertical, con ajuste de amplitud y temporizador de intervalos (Figura 104). Se utilizaron tamices de ensayo específicos con 16, 8, 4, 2, 1, 0,5 y 0,25 mm de diámetro de luz de malla y se ordenan de mayor a menor y al final se coloca una bandeja de recepción.

La muestra se coloca sobre el primer tamiz, previamente tapada, con 7 minutos de tiempo con 10 s de agitado y 1 s de reposo, con una amplitud en un rango de 0,5 mm y 1,5 mm. Para el tamizado se utilizaron unos 125 gramos de muestra secada al aire, pesada con una precisión de 0,01 g, a partir del peso retenido en cada uno de los tamices se calcula el porcentaje en peso correspondiente a cada una de las fracciones granulométricas. Se realizaron los siguientes cálculos:

$$Z_x = \frac{A_x}{\sum A_x} * 100 \quad \text{Ecuación 34}$$

Dónde:

- X es el número de tamiz. Varía de 1 a 8, siendo el 1 el tamiz de 16 mm, 2 el del tamiz de 8 mm, 3 el de 4 mm, 4 el de 2mm, 5 el de 1 mm, 6 el de 0,5 mm, 7 el de 0,25 mm y 8 la bandeja de recepción.

- Z_x es el porcentaje en peso de las partículas retenidas en cada tamiz (x) respecto de la masa total.

- A_x es la masa en gramos de las partículas retenidas en el tamiz x. Es la suma de las masas (en gramos) retenidas en cada uno de los tamices, o lo que es lo mismo, la masa inicial que se coloca en la batería de tamices.

j) Extracción de nutrientes y elementos solubles en agua (UNE-EN 13652: 2002). Para los procedimientos analíticos físicos se utilizaron muestras de sustratos sin secar, mientras que para los análisis químicos se utilizaron muestras secadas al horno a ~105°C.

k) Determinación de Nitrógeno. Método Kjeldahl modificado (UNE-EN 13654: 2002). Para los procedimientos analíticos físicos se utilizaron muestras de sustratos sin secar, mientras que para los análisis químicos se utilizaron muestras secadas al horno a ~105°C y previamente molida.

Figura 99. Instrumentación utilizada para la determinación de DACL.

Figura 100. Humectación y saturación de sustratos para la determinación de propiedades físicas.

Figura 101. Mesa de succión (lecho de arena) utilizada para la determinación de propiedades físicas de los sustratos evaluados.

Figura 102. Rehúmedecación y saturación de las muestras húmedas en equilibrio en cilindros de muestreo.

Figura 103. Muestras de sustratos secadas a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figura 104. Juego de tamices de diferentes diámetros para distribución de partículas