

# **EFICIENCIA DEL USO DE MUROS VERDES PARA DISMINUIR LOS EFECTOS NEGATIVOS DE LA PERDIDA DE ÁREAS VERDES EN LAS CIUDADES CON EL USO DE MATERIALES RECICLADOS**



**Tesis Doctoral**

**Yair Andrey Rivas Sánchez**

**Universidad de Córdoba**

**2019**



TITULO: *EFICIENCIA DEL USO DE MUROS VERDES PARA DISMINUIR LOS EFECTOS NEGATIVOS DE LA PÉRDIDA DE ÁREAS VERDES EN LAS CIUDADES CON EL USO DE MATERIALES RECICLADOS*

AUTOR: *Yair Andrey Rivas Sánchez*

---

© Edita: UCOPress. 2020  
Campus de Rabanales  
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A  
14071 Córdoba

<https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/ucopress@uco.es>

---



Departamento de Agronomía

Programa de Doctorado en Recursos Naturales y Gestión Sostenible

Tesis Doctoral

EFICIENCIA DEL USO DE MUROS VERDES PARA DISMINUIR LOS EFECTOS  
NEGATIVOS DE LA PERDIDA DE ÁREAS VERDES EN LAS CIUDADES CON EL  
USO DE MATERIALES RECICLADOS

Autor

Yair Andrey Rivas Sánchez

Dr. José Roldan Cañas

Dra. María Fátima Moreno Pérez

Universidad de Córdoba

2019





**TÍTULO DE LA TESIS: Eficiencia del uso de muros verdes para disminuir los efectos negativos de la pérdida de áreas verdes en las ciudades con el uso de materiales reciclados**

**DOCTORANDO/A: Yair Andrey Rivas Sánchez**

**INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS**

(se hará mención a la evolución y desarrollo de la tesis, así como a trabajos y publicaciones derivados de la misma).

El origen, evolución y desarrollo de la presente tesis ha venido marcado por la dedicación parcial del doctorando al proyecto, principalmente en su primera etapa, dado que no reunía la condición de becario ni contaba con fondos de un proyecto que amparara su trabajo de investigación. Ello provocó que, hasta tres años después, no se pudieran reunir los fondos necesarios para montar el trabajo experimental que soportara los estudios teóricos previos y que diera los resultados adecuados para su publicación. De ahí que los mejores artículos, incluido el que ha permitido la presentación de la tesis indexado en *Science Citation Reports*, no hayan sido publicados hasta 2019.

Ello, no obstante, y de ahí su mérito, se han alcanzado los objetivos marcados al principio, esto es, encontrar materiales alternativos a los que habitualmente se usan como sustratos en muros verdes, con menor impacto ambiental, y desarrollar un sistema automatizado de riego localizado controlado de forma remota, utilizando materiales de bajo coste y fáciles de programar como los sistemas Arduino y Raspberry Pi.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, 21 de agosto de 2019

Firma de los directores

Fdo.: José Roldán Cañas

Fdo.: María Fátima Moreno Pérez

## INFORME SOBRE APORTACIONES DERIVADAS DE LA TESIS DOCTORAL EN REVISTAS Y COMUNICACIONES PRESENTADAS EN CONGRESOS.

### **Capítulo I de la tesis doctoral:**

#### **Publicación en capítulo de libro**

Rivas-Sánchez Y, Moreno-Pérez, M.F, Roldán-Cañas, J. 2019. The effect of green walls on buildings. En: D.A. Krawczyk (Ed.). Buildings 2020+. Constructions, materials and installations. Printing House of Bialystok University of Technology. Poland, 92-99.

Doi: 10.24427/978-83-65596-71-0

### **Capítulo II de la tesis doctoral:**

#### **Presentada en congreso internacional**

Presentada en congreso internacional

Rivas Y, Moreno-Pérez, M.F, Roldán-Cañas, J. 2017. Use of the rice husk as an alternative substrate for growing media on green walls drip irrigation. European Geosciences Union General Assembly 23–28 April, Vienna, Austria, EGU2017-4604. Póster

<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/sessionprogramme>

### **Capítulo III de la tesis doctoral:**

#### **Publicación en revista científica**

Rivas-Sánchez, Y.A.; Moreno-Pérez, M.F.; Roldán-Cañas, J. Environment Control with Low-Cost Microcontrollers and Microprocessors: Application for Green Walls. *Sustainability* 2019, 11, 782

Doi: 10.3390/su11030782

Factor de Impacto: 2.592

Posición de la revista en relación con su categoría específica:

Environmental Sciences: 105/250; segundo cuartil (Q2), segundo tercil (T2)

### **Capítulo IV de la tesis doctoral:**

### **Publicación en revista científica**

Rivas-Sánchez, Y.A., Moreno-Pérez, M.F., Roldán-Cañas, J. Mejora en la retención y distribución de agua en muros verdes usando materiales alternativos como medio de crecimiento. Ingeniería del Agua, 2019. 23 (1), 19-31.

Doi: 10.4995/Ia.2019.9736

Categorías de Web of Science: (ENGINEERING CIVIL). Indexed in Emerging Sources Citation Index

### **Otras comunicaciones en Congresos**

#### **Comunicaciones presentadas en Congresos Internacionales**

Rivas-Sánchez, Y.A., Moreno-Pérez, M.F., Roldán-Cañas, J. 2018. Uso de sustratos alternativos para mejorar la retención y distribución de agua en muros verdes. XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Buenos aires Argentina. Comunicación oral.

Actas del Congreso Latinoamericano de Hidráulica, 2549-2559.

[https://www.ina.gob.ar/congreso\\_hidraulica/Congreso\\_libro/TC\\_TEMA\\_7.pdf](https://www.ina.gob.ar/congreso_hidraulica/Congreso_libro/TC_TEMA_7.pdf)

#### **Comunicaciones presentadas en Congresos Nacionales**

Rivas-Sánchez, Y.A., Moreno-Pérez, M.F., Roldán-Cañas, J. 2017. Estudio de la retención y distribución de agua en muros verdes usando materiales alternativos como medio de crecimiento. V Jornadas de ingeniería del agua. A Coruña. Comunicación oral.

[http://geama.org/jia2017/wp-content/uploads/ponencias/tema\\_C/c5.pdf](http://geama.org/jia2017/wp-content/uploads/ponencias/tema_C/c5.pdf)

Rivas-Sánchez, Y.A.; Moreno-Pérez, M.F.; Roldán-Cañas, J. 2017. Puesta en marcha de un sistema inteligente de riego por goteo para muros verdes con el uso de microcontroladores y microprocesadores. XXXV congreso nacional de riegos Tarragona. Comunicación oral

Doi: 10.25028/CNRiegos.2017.B05





## AGRADECIMIENTOS

Esta tesis doctoral, si bien ha requerido de esfuerzo y mucha dedicación por parte del autor y sus directores de tesis, no hubiese sido posible su finalización sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas que a continuación citaré y muchas de las cuales han sido un soporte muy fuerte en todo momento.

Agradecer hoy y siempre a mi familia porque a pesar de no estar presentes físicamente, sé que procuran mi bienestar desde mi país, Colombia, y está claro que, si no fuese por el esfuerzo realizado por ellos, mis estudios doctorales no hubiesen sido posible. A mi madre Ana Romelia Sánchez y a mi tía Feliza Armero, porque a pesar de la distancia, el ánimo, apoyo y alegría que me brindan me dan la fortaleza necesaria para seguir adelante.

De igual manera mi más sincero agradecimiento a mis directores de tesis, el Dr. José Roldan Cañas y la Dra. María Fátima Moreno Pérez a quienes debo el realizar el doctorado en una Universidad tan prestigiosa como lo es la Universidad de Córdoba.

Se agradece a María Benlloch González y a Manuel Benlloch Marín, profesores del área de producción vegetal de la Universidad de Córdoba, la colaboración prestada en los ensayos de laboratorio.

Esta investigación fue soportada con fondos propios de la línea de investigación “Sostenibilidad de Recursos Naturales” integrada en el Programa de Doctorado “Recursos Naturales y Gestión Sostenible” de la Universidad de Córdoba.

En general quisiera agradecer a todas y cada una de las personas que han vivido conmigo la realización de esta tesis doctoral, con sus altos y bajos y que no necesito nombrar porque tanto ellas como yo sabemos que desde lo más profundo de mi corazón les agradezco el haberme brindado todo el apoyo, colaboración, ánimo y sobre todo cariño y amistad.

# ÍNDICE

1. RESUMEN
  - 1.1. Abstract
2. INTRODUCCIÓN
  - 2.1. Contexto de la tesis doctoral
  - 2.2. Clasificación de los muros verdes
  - 2.3. Substratos
  - 2.4. Vegetación
  - 2.5. Riego
3. OBJETIVOS
4. MATERIALES Y MÉTODOS
  - 4.1. Área de estudio
  - 4.2. Prototipos de muros verdes de sistemas modulares utilizados
  - 4.3. Vegetación
    - 4.3.1. *Lampranthus spectabilis*
    - 4.3.2. *Lavandula stoechas*
    - 4.3.3. *Aptenia cordifolia*
  - 4.4. Sustratos
  - 4.5. Análisis de agua
  - 4.6. Microcontrolador y microprocesador
    - 4.6.1. Toma y almacenamiento de datos de los sensores
  - 4.7. Sistema de riego
  - 4.8. Ensayos de laboratorio
  - 4.9. Análisis estadístico
5. CAPITULO 1: THE EFFECT OF GREEN WALLS ON BUILDINGS.
  - 5.1. Introduction
  - 5.2. Benefits of green walls
    - 5.2.1. Environmental benefits
    - 5.2.2. Economic benefits
    - 5.2.3. Social benefits
  - 5.3. Effects of green walls

5.4. Conclusions

5.5. References

**6. CAPITULO 2: USE OF THE RICE HUSK AS AN ALTERNATIVE SUBSTRATE FOR GROWING MEDIA ON GREEN WALLS DRIP IRRIGATION.**

6.1. Introduction

6.2. Materials and methods

6.2.1. Green wall systems and location

6.2.2. Plantation, Irrigation and fertilization

6.2.3. Growing media

6.2.4. Water análisis

6.2.5. Statistical análisis

6.3. Results and discussion

6.3.1. Statistical tests

6.3.2. Water distribution inside the prototypes

6.3.3. Plant development

6.4. Conclusions

6.5. References

**7. CAPÍTULO 3: LOW-COST MICROCONTROLLERS AND MICROPROCESSORS TO ENVIRONMENT CONTROL IN GREEN WALL. APPLICATION TO SMART DRIP IRRIGATION SYSTEM.**

7.1. Introduction

7.2. Materials and methods

7.2.1. Green Wall Prototype Structure

7.2.2. Environmental Control System

7.2.3. Environmental Sensors

7.3. Results

7.4. Discussion

7.5. Conclusions

7.6. Appendix

7.7. References

**8. CAPITULO 4: MEJORA EN LA RETENCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN MUROS VERDES USANDO MATERIALES ALTERNATIVOS COMO MEDIO DE CRECIMIENTO.**

8.1. Introducción

8.2. Material y métodos

8.2.1. Localización y sistemas de muros verdes

8.2.2. Medios de crecimiento

8.2.3. Plantación, Irrigación y fertilización

8.2.4. La escorrentía y la retención de humedad

8.2.5. Crecimiento de plantas

8.2.6. Análisis estadístico

8.3. Resultados

8.4. Discusión

8.5. Conclusiones

8.6. Agradecimientos

8.7. Referencias

**9. DISCUSIÓN**

**10. CONCLUSIONES**

**11. REFERENCIAS**

**12. ANEXOS**

## ABREVIATURAS

**°C:** Grado Celsius.

**μm:** micrómetro.

**AMPS:** Amperio.

**ANOVA:** Análisis de Varianza.

**API:** Interfaz de Programación de Aplicaciones.

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de carbono.

**Csa:** Clima Mediterráneo verano cálido.

**ET<sub>o</sub>:** Evapotranspiración de referencia.

**GL:** Grados de libertad total.

**GPRS:** Servicio general de paquetes vía radio.

**GPU:** Unidad de procesamiento gráfico.

**GSM:** Sistema global para las comunicaciones móviles.

**H:** Humedad.

**HDMI:** Interfaz multimedia de alta definición.

**HR:** Humedad Relativa.

**HTML:** Lenguaje de marcas de hipertexto.

**HTTP:** Protocolo de transferencia de hipertexto.

**IDE:** Entorno de Desarrollo Integrado.

**IOT:** Internet de las cosas.

**K:** Potasio.

**kΩ:** Kiloohmios.

**Kc:** Coeficiente de cultivo.

**Kj:** Coeficiente de jardín.

**LAMP:** Linux, Apache, MySQL, PHP.

**LDR:** Resistencia dependiente de luz.

**LED:** Diodo emisor de luz.

**LSD:** Diferencia mínima significativa.

**MATLAB:** Laboratorio de matrices.

**mV** = milivoltios.

**N:** Nitrógeno.

**nm:** nanómetro.

**NO<sup>2</sup>:** Dióxido de nitrógeno.

**P:** Fosforo.

**PHP:** Preprocesador de hipertexto.

**PM:** Polvo fino.

**PVC:** Policloruro de vinilo.

**RAM:** Memoria de acceso aleatorio.

**RCA:** Radio Corporation of America.

**RDBMS:** Sistema de gestión de bases de datos relacionales.

**SD:** Secure Digital.

**SO<sup>2</sup>:** Dióxido de azufre.

**SQL:** lenguaje de consulta estructurada.

**TAS:** Thermal simulation software.

**TCP:** Protocolo de control de transmisión.

**TDS:** Solidos totales disueltos.

**USB:** Bus Universal en Serie.

**volt:** Voltios.

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Introducción

**Figura 1.** Clasificaciones muros verdes (Córdoba, España).

### Materiales y métodos

**Figura 1.** Prototipo de muros verdes modulares utilizados en el proyecto.

**Figura 2.** Material vegetal utilizado en los prototipos de muros verdes: a) *Lampranthus spectabilis*, b) *Lavandula stoechas*, c) *Aptenia cordifolia*.

### Capítulo I

**Figura 1.** A photo of a facade covered in Boston ivy (*Parthenocissus*) planted on the ground and grown directly up the facade. On the right: a photo of the same location, taken with an infrared camera (Delft, Netherlands, summer 2009, 12 p.m. air temperature 21°C) (Source: Ottele, 2010). Fotografía de una fachada cubierta por hiedra de Boston (*Parthénicusus*) plantada en el suelo y aplicada directamente contra la fachada, fotografía tomada con cámara infrarroja (Delft, Países Bajos, verano 2009, 12 p.m., temperatura del aire 21 °C) Ottele, 2010

**Figura 2.** Microphotography of particles on the upper part of a leaf (*Hedera Helix*) (Source: Stemberg, 2010)

### Capítulo II

**Figura 1.** Location of the green wall prototypes, University of Cordoba, Rabanales Campus.

**Figura 2.** Diagram of the prototype irrigation system for green walls.

**Figura 3.** Chemical properties of the water after passing through each of the prototypes, as compared to the water fed into the system, measured over 10 weeks a) pH, b) Electrical conductivity dS/m, c) Total dissolved solids mg/L

**Figura 4.** Water distribution inside the prototypes a) Coconut coir, b) Rock wool, c) Rice husk.

**Figura 5.** *Lampranthus spectabilis* y *lavándula stoechas* a) first month, b) two months after installation.

**Figura 6.** Comparison between the three different substrates—a) rice husk, b) coconut coir, c) rock wool—with *Lampranthus spectabilis*, at the end of the test period.

### Capítulo III

**Figura 1.** Layout of the green walls.

**Figura 2.** Layout of the Environmental Control System for green walls.

**Figura 3.** (a) FC-28 soil moisture sensor; (b) Schematic sensor design.

**Figura 4.** (a) DHT22 temperature and relative humidity sensor; (b) Schematic sensor design.

**Figura 5.** (a) Light dependent resistor (LDR) photo-resistor; (b) Schematic sensor design.

**Figura 6.** (a) YL-83 rain sensor; (b) Schematic sensor design.

**Figura 7.** (a) YF-S402 water flow sensor; (b) Schematic sensor design.

**Figura 8.** Flux diagram of the pump control.

**Figura 9.** Sensor data of (a) temperature and relative humidity, (b) light, and (c) soil moisture.

**Figura 10.** Sensor output of rain.

**Figura 11.** Sensor data of (a) soil moisture and rain and (b) water flow.

**Figura A1.** Real-time display of the green wall from the mobile application (APP) on a mobile device.

**Figura A2.** (a); Web visualization in ThingSpeak

**Figura A3.** Database display of the green-wall prototype from the computer.

## **Capítulo IV**

**Figura 1.** Prototipos de muros verdes.

**Figura 2.** Sustrato para prototipos de muro verde a) musgo *Sphagnum*, b) sustrato compuesto de cascarilla de arroz y fibra de coco.

**Figura 3.** Material vegetal a) *Aptenia cordifolia* y b) *Lampranthus spectabilis*.

**Figura 4.** Liberación de agua de los dos sustratos utilizados en el experimento.

**Figura 5.** Escorrentía en los sustratos compuestos de fibra de coco y arroz en comparación con el musgo *Sphagnum*.

**Figura 6.** Homogeneidad de la distribución del agua en la parte superior e inferior de los prototipos con los dos sustratos utilizados como medio de crecimiento para muros verdes.

**Figura 7.** Desarrollo del material vegetal para muros verdes con sustrato de *Sphagnum*.



**Figura 8.** Desarrollo del material vegetal para muros verdes con sustrato de mezcla de cascarilla de arroz y fibra de coco.

**Figura 9.** Efecto de los dos sustratos en las plantas sobre la biomasa (a), el contenido hídrico absoluto (b) y la suma de las clorofilas A&B (c).

## ÍNDICE DE TABLAS

### Capítulo II

**Tabla 1.** Physical and chemical characteristics of the substrates.

**Tabla 2.** Anovas: pH, electrical conductivity and total dissolved solids.

**Tabla 3.** Estimated sample means for pH, electrical conductivity and total dissolved solids.

**Tabla 4.** Multiple range tests for pH, electrical conductivity and total dissolved solids.

**Tabla 5.** Irrigation and run-off times for each substrate

**Tabla 6.** Analysis of dead plants during the experiment.

### Capítulo III

**Tabla 1.** Water flow sensor calibration tests.

**Tabla 2.** Alternative irrigation system prices.

### Capítulo IV

**Tabla 1.** Caudal en función de la presión.

**Tabla 2.** Propiedades físicas y químicas de los sustratos analizados para muros verdes.

# **1. RESUMEN**

## RESUMEN

Los sistemas de naturaleza urbana, como los muros verdes, se utilizan con frecuencia como una característica estética en los edificios, sin embargo, esta tecnología también puede ofrecer diversos beneficios ambientales. A grandes escalas, los muros verdes contribuyen a la introducción de vegetación en el espacio urbano sin ocupar ningún espacio a ras del suelo. La implementación de muros puede mejorar el entorno urbano contribuyendo a la gestión de aguas pluviales, a la calidad del aire, a la reducción de la temperatura y mitigación del efecto isla de calor. Al mismo tiempo, la aplicación de sistemas de naturaleza urbana también genera beneficios sociales y económicos.

Esta tesis se divide en cuatro capítulos, donde se ofrecen alternativas para la preparación de muros verdes tanto en lo relativo a los medios de crecimiento como al sistema de riego, puesto que los sistemas de muros verdes comercialmente disponibles en el mercado son poco sustentables y costosos. Se diseñó un prototipo para este estudio que fue instalado en el Campus Rabanales de la Universidad de Córdoba entre abril 2016 y agosto de 2017. El proyecto utilizó ocho prototipos de muro verde construidos en aluminio, los cuales poseían canales de recolección de agua de PVC y revestimiento de fieltro para mantener la humedad.

El primer capítulo abarca el efecto de los muros verdes en las edificaciones mostrando los diferentes beneficios de la implantación de estos, haciendo énfasis tanto en los beneficios ambientales, temperatura, ruido y aire, como en los beneficios económicos y sociales que el establecimiento de esta tecnología ofrece a las edificaciones.

El segundo capítulo busca encontrar materiales alternativos disponibles en Andalucía que puedan utilizarse como medio de crecimiento en muros verdes, utilizando residuos orgánicos generados por la agricultura como en este caso la cáscara de arroz, en comparación con los materiales convencionales ya usados como medio de cultivo, en muros verdes como fibra de coco y lana de roca. En este capítulo se estudiaron las características fisicoquímicas de estos materiales y también se analizó el agua mediante la recolección del exceso de agua de riego, luego de pasar por los prototipos de muros verdes. Tras un proceso de selección, se eligieron dos especies diferentes de material vegetal *Lampranthus spectabilis* y *Lavandula stoechas*,

teniendo en cuenta la exposición solar del lugar de establecimiento del prototipo de muro verde y la fácil adquisición de estas plantas en la región. Los resultados demostraron que los sustratos utilizados en los prototipos del experimento con lana de roca y fibra de coco tuvieron una influencia significativa en las características del agua, mientras que el efecto del sustrato de cáscara de arroz fue mínimo.

Los resultados obtenidos también en este capítulo recomiendan el uso de una mezcla de fibra de coco y cascarilla de arroz, debido a que sus características y su desarrollo son apropiadas para el uso en medios de cultivo en los muros verdes, brindando así una alternativa ambiental utilizando subproductos agrícolas.

En el tercer capítulo se buscó una solución para la reducción de costos para el sistema de riego inteligente donde se propuso el uso de programadores de riego de bajo coste automatizados, mediante herramientas como el Arduino Uno y Raspberry Pi utilizando sensores de humedad del suelo, humedad relativa, temperatura, intensidad lumínica, lluvia y actuadores como relé los cuales ayudaron a las plantas a alcanzar su máximo potencial y el uso eficiente del agua. El sistema se diseñó de tal manera que los sensores encendían el sistema de riego dependiendo de la información recolectada por estos sobre el estado del sustrato o las condiciones climáticas y enviados al Arduino para activar el relé de la electroválvula según el estado del sustrato o las condiciones climáticas. Esto no solo proporcionó comodidad, sino que también ayudó a reducir el consumo de energía, aumentó la eficiencia del riego y ahorró tiempo. A esto también se le agregó la tecnología de *internet de las cosas* para recopilar los datos del desempeño del muro verde a través de la plataforma ThingSpeak, la cual recogió los datos y los gráficos de forma sencilla lo que permite realizar un monitoreo en tiempo real desde internet.

El sistema de automatización de riego para muros verdes con Arduino y Raspberri Pi cumplió con los objetivos definidos, pues mantuvo el bajo coste en su implementación, en comparación con los sistemas de riego automatizados disponibles en el mercado. También cumplió con el objetivo de acceder con cualquier dispositivo móvil que disponga de conexión a internet.

En el cuarto capítulo se estudió la diferencia entre sustratos alternativos elegidos, como la cascarilla de arroz mezclada con cascara de coco, ya analizados en el segundo capítulo, comparándolos con el musgo *Sphagnum*, sustrato comercial habitual, como medio de crecimiento en muros verdes para la región de Andalucía, puesto que el musgo *Sphagnum* tiene un alto coste y dificultad de adquisición en la región. En este capítulo se estudiaron las características fisicoquímicas de los dos medios de crecimiento, se analizaron parámetros como la retención de agua en los sustratos establecidos en el muro verde y la homogeneidad en la distribución del agua dentro de los prototipos por medio de sensores electrónicos, además se comparó el desarrollo de las plantas *Aptenia cordifolia* y *Lampranthus spectabilis* en cada uno de los sustratos.

Los resultados obtenidos demostraron que el medio de crecimiento de arroz mezclado con fibra de coco puede ser utilizado con éxito en la implementación como medio de cultivo en muros verdes, ofreciendo alternativas para reducir el impacto ambiental generado por la explotación de musgo *Sphagnum* a largo plazo.

Por último, el experimento ofrece directrices para la aplicación a cualquier sistema de control ambiental, siendo el riego de precisión uno de los más importantes, ya que mejora la gestión de los recursos hídricos en áreas con poca agua.

## **1.1 ABSTRACT**

## ABSTRACT

Urban nature systems, such as green walls, are often used as an aesthetic feature in buildings, however, this technology can also offer various environmental benefits. At large scales, the green walls contribute to the introduction of vegetation into the urban space without occupying any space at ground level. The implementation of walls can improve the urban environment contributing to rainwater management, air quality, temperature reduction and mitigation of the heat island effect. At the same time, the application of urban nature systems also generates social and economic benefits

This thesis is divided into four chapters, which offer alternatives for the development of green walls in both growth media and irrigation systems, since the green wall systems commercially available in the market are not very sustainable and expensive. A prototype was designed for this study which was installed in the Campus Rabanales of the University of Córdoba between April 2016 and August 2017. The project used eight green-wall prototypes built in aluminum, which had PVC and water collection channels. felt coating to keep moisture.

The first chapter covers the effect of green walls in buildings showing the different benefits of the implementation of these, emphasizing environmental benefits such as temperature, noise and air, as well as the economic and social benefits that the establishment of this technology offers to buildings.

The second chapter seeks to use alternative materials available in Andalusia that can be used as a growth medium in green walls, using organic waste generated by agriculture as in this case the rice husk, compared to conventional materials already used as a culture medium, in green walls such as coconut fiber and rock wool, where the physico-chemical characteristics of these materials were studied and water was also analyzed by collecting excess irrigation water, after going through the prototypes of green walls. After to the selection process two different species of plant material, *Lampranthus spectabilis* and *Lavandula stoechas*, were used, taking into account the solar exposure of the green wall prototype establishment and the easy acquisition of these plants in the region. The results showed that the substrates used



in the prototypes of the experiment with rock wool and coconut fiber had a significant influence on the characteristics of the water, while the effect of the rice husk substrate was minimum.

The results obtained in this chapter recommend a mixture of coconut fiber and rice husk, because its characteristics and its development are appropriate for use in growing media on green walls, thus providing an environmental alternative using agricultural products.

In the third chapter a solution was sought for the reduction of costs for the intelligent irrigation system where the use of automated low-cost irrigation programmers was proposed, using tools such as the Arduino Uno and Raspberry Pi by means of soil moisture sensors, humidity relative, temperature, light intensity, rain and relay actuators which helped the plants to reach their maximum potential and the efficient use of water. The system was designed in such a way that the sensors turned on the irrigation system depending on the information collected by them and sent to the Arduino to activate the relay of the solenoid valve according to the state of the substrate or the climatic conditions. This not only provides comfort, but also helps reduce energy consumption, increase irrigation efficiency and save time. This was also added the technology of Internet of things to collect the performance data of the green wall through the ThingSpeak platform, which collected the data and graphs in a simple way to perform real-time monitoring from the Internet. The irrigation automation system for green walls with the Arduino and Raspberri Pi system complied with the defined objectives, because it maintained the low cost in its implementation, in comparison with the automated irrigation systems available in the market. It also met the goal of access with any mobile device that has Internet connection.

In the fourth chapter, the difference between alternative substrates chosen, such as rice husks mixed with coconut husks, was studied, which were analyzed in the second chapter, to compare them with Sphagnum moss as a growth medium in green walls for the region of Andalusia, since the Sphagnum moss has a high cost and difficulty of acquisition in the region. In this chapter, the physicochemical characteristics of the two growing media were studied, parameters such as the water retention in the substrates established in the green wall and the homogeneity in the water distribution within the prototypes by means of electronic

sensors were also analyzed. The development of *Aptenia cordifolia* and *Lampranthus spectabilis* plants in each of the substrates was also compared.

The results obtained showed that the growth medium of rice mixed with coconut fiber can be used successfully in the implementation as a growing medium in green walls, offering alternatives to reduce the environmental impact generated by the long-term exploitation of *Sphagnum* moss.

The experiment also offers guidelines for application to any environmental control system, with precision irrigation being one of the most important, since it improves the management of water resources in areas with water scarcity.

## **2. INTRODUCCIÓN**

# INTRODUCCIÓN

## 2.1 Contexto de la tesis doctoral

Poco tiempo atrás, las ciudades estaban rodeadas de amplias extensiones de áreas rurales. Hoy en día, las poblaciones rurales están disminuyendo, mientras que las poblaciones urbanas están en continuo aumento, lo que lleva a una rápida expansión de las ciudades. La discusión del cambio climático ha dado un gran potencial a las plantas para ayudar a mitigar algunos de los problemas de la falta de áreas verdes en las ciudades, el desarrollo urbano masivo está alterando la superficie de la tierra mediante la concentración de materiales que retienen el calor y crean superficies impermeables, lo que afecta el clima local urbano y la hidrología urbana (Francis y Lorimer, 2011).

Los muros verdes son herramientas que han demostrado sus diversos beneficios mejorado la gestión de las aguas de lluvia por la retención y la evapotranspiración, pero también tienen otros beneficios potenciales, como la limpieza del aire, los efectos psicológicos positivos y las mejoras estéticas. En esta tecnología las plantas tienen sus raíces directamente en un medio de cultivo vertical o en un sistema hidropónico y una cubierta vegetal bien establecida (Raji et al, 2015). Actualmente los muros verdes ofrecen el potencial para mejorar la arquitectura tradicional, pero también para incorporar materiales avanzados y otras tecnologías para promover funciones de construcción sostenible como puede ser en el uso de materiales alternativos en lo que se refiere, por ejemplo, a los sustratos utilizados en estos.

Los sistemas comercialmente disponibles para los muros verdes están fabricados comúnmente en módulos pequeños, que pueden ser unidos para cubrir áreas más grandes (Manso et al, 2015), que utilizan medios de cultivo especiales como la lana de roca, fibra de coco, musgos o polímeros. Estos medios son bien conocidos e idóneos para el crecimiento vegetal, especialmente la capacidad de retención de agua y su peso, debido a que estos sustratos son ligeros y tienen una alta porosidad lo que significa menor frecuencia en los riegos (Evans y Stamps, 1996). La finalidad de los sustratos alternativos como medio de cultivo es producir una planta de calidad, reduciendo costes de producción y la carga ambiental. Además, la obtención y eliminación del sustrato, una vez utilizado, no debería provocar un impacto

negativo sobre el medio ambiente, por esta razón es de gran importancia evaluar la posibilidad de utilizar materiales alternativos y eco compatibles para reemplazar el musgo Sphagnum, comercialmente usado, como sustrato de los muros verdes, ya que la tecnología de muros verdes podría potenciarse en el entorno urbano.

Con los avances de la tecnología, los sistemas que usamos en nuestro día a día están cada vez más automatizados, y los sistemas de riego para muros verdes no pueden ser la excepción, puesto que esta también es prácticamente una tecnología nueva que aún se está desarrollando. Existen en el mercado varios sistemas de riego que ya han sido probados e implementados, sin embargo, la mayoría de estos sistemas son bastante caros y, generalmente, los sistemas existentes requieren que el usuario controle la bomba de agua manualmente. La necesidad de realizar mediciones meteorológicas espacialmente distribuidas, especialmente en terrenos complejos como los muros verdes, han dado impulso al desarrollo de sensores de bajo costo cada vez más utilizados en la obtención de una alta cobertura espacial (Hubbart et al, 2005).

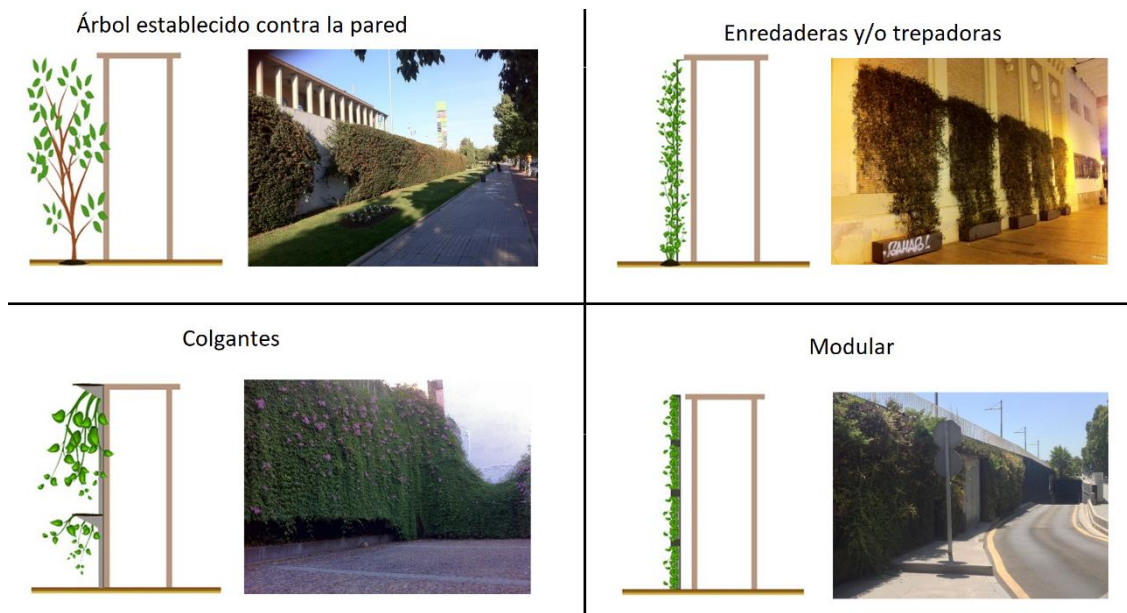
Existen en la actualidad dispositivos industriales de alta calidad disponibles en el mercado, sin embargo, su alto costo y la complejidad han limitado su adopción en la tecnología de muros verdes, llevando así progresivamente al desarrollo de instrumentos alternativos de bajo costo (Mahan y Yeater, 2008). Estos autores compararon algunos sensores industriales de alta calidad con otros de bajo costo en entornos agrícolas y demostraron que las mediciones de las dos categorías eran similares en un rango de 13-35 ° C, que es el rango de la mayoría de las regiones templadas, por lo que los dispositivos de bajo costo podrían ser una buena alternativa en muchas aplicaciones agrícolas. El principal inconveniente de los sensores dieléctricos es su sensibilidad a la conductividad eléctrica del suelo y la temperatura, que a menudo requiere de procedimientos específicos de calibración (Scudiero et al, 2012).

Dado que muchos de los sistemas de muros verdes existentes carecen de sistemas de automatización debido al costo, tamaño de los sensores y microcontroladores, en los últimos años existe la oportunidad de aumentar la efectividad de los muros verdes al integrar sensores de bajo costo.

## **2.2 Clasificación de los muros verdes**

Los sistemas de muros verdes son básicamente plantas que crecen en superficies verticales, de forma natural o hecha por humanos, ya sea dentro o fuera de una edificación, adheridas a la pared o frente a la pared. También se entiende por sistemas de muros verdes a estructuras que soportan y pueden hacer crecer diversos tipos de plantas en diferentes tipos de superficie vertical (Perini et al, 2011).

Los sistemas de muros verdes se pueden clasificar de acuerdo a los medios de crecimiento, métodos de construcción y también por especies de plantas. Así podemos dividir los sistemas de muros verdes en cuatro categorías (ver figura 1): Árbol establecido contra la pared; enredaderas y/o trepadoras; colgantes y modular. Los tipos de árboles establecidos contra la pared no son realmente sistemas de muros verdes, pero sus beneficios son los mismos (Köhler, 2008). En los tipos enredaderas y/o trepadoras, que son comunes en la arquitectura tradicional, las plantas pueden cubrir las superficies de la pared directamente o usar enrejados para trepar. El uso de enredaderas y/o trepadoras es fácil, pero lleva tiempo cubrir todas las superficies de la fachada con vegetación. Los tipos colgantes están hechos por plantas con pedicelos largos en los balcones o en la parte superior de los edificios. Este tipo es algo entre el techo verde y los muros verdes y al utilizar el tipo de plantas colgantes en cada nivel de los edificios, todas las fachadas serán verdes en poco tiempo; Además, al usar diferentes tipos de plantas, la fachada será más colorida y visualmente atractiva. El último, tipo es el modular, el cual consisten en vegetación plantada en cajas (módulos), que tiene un medio de crecimiento propio y se puede reemplazar fácilmente puesto que tienen tamaños no superiores a 1 metro. Últimamente es la técnica más usada, con plantas de crecimiento rápido, coloridas, diversas, atractivas y fáciles de reemplazar, ofreciendo así diferentes ventajas en el establecimiento de muros verdes modulares (Mir, 2011).



**Fig 1.** Clasificaciones muros verdes (Córdoba, España).

En las clasificaciones anteriores, los medios de crecimiento o de cultivo juegan un papel importante en el tipo de sistemas de muros verdes, ya que en ellos se establecen las raíces de las plantas (Hunter et al, 2014). Los sistemas comunes para muros verdes son los sistemas modulares los cuales están elaborados con fieltros o contenedores. Los sistemas modulares son paneles pre plantados que están unidos a unas estructuras preestablecidas generalmente metálicas.

### 2.3 Substratos

Los muros verdes modulares se llenan comúnmente con un medio de crecimiento donde las raíces pueden proliferar, hechos de compuestos orgánicos o inorgánicos. En el contexto de los muros verdes, solo los sistemas modulares requieren la selección de un medio de cultivo, que debe ser liviano, considerando que cada elemento se suspenderá y se adaptará a las especies de plantas seleccionadas y a las condiciones ambientales (Bribach, 2011). La mayoría de los muros verdes modulares incluyen un medio de cultivo basado en una mezcla de sustrato ligero con un material granular, expandido o poroso, para obtener una buena capacidad de retención de agua. El sustrato puede mejorarse con nutrientes para el crecimiento de las plantas. Algunos muros verdes modulares poseen bolsas de geotextil en los medios de cultivo para evitar su desprendimiento (Lee et al, 2010). Estas bolsas pueden

ocupar todo el módulo y permitir la inserción de varias plantas o cubrir los medios de cultivo de cada planta individualmente en forma de bolsillos. Los sustratos más comúnmente utilizados para la elaboración de muros verdes son: Perlita, Vermiculita, Arlita, Lana de roca, Poliestireno expandido, humus de lombriz, turba rubia, musgos como el más utilizado en los últimos años el musgo *Spaghnum* pese a su impacto ambiental (Abad et al., 2001).

La cascarilla de arroz se ha venido utilizando, principalmente para aumentar el espacio poroso en los sustratos. No obstante, su capacidad para retener humedad puede ser relativamente baja, lo que puede corregirse al seleccionar su granulometría mezclándola con materiales como la fibra de coco y otros materiales ricos en nitrógeno (Genevini, 1997). También se ha demostrado que la fibra de coco tiene características físicas, químicas y biológicas adecuadas para ser usado como medio de cultivo pudiendo llegar a requerir ajustes tanto en los programas de riego, fertilización y mezcla con otros materiales para aumentar su porosidad (García et al., 2001)

## **2.4 Vegetación**

Seleccionar la vegetación adecuada para los sistemas de muros verdes es clave para la supervivencia de estos sistemas. Se requiere un estudio sobre la fenología de las plantas, el crecimiento y la forma en que se adaptan al medio ambiente para así decidir qué tipos de plantas son adecuadas en ciertos climas. Estos estudios son de vital importancia para las plantas exteriores, porque algunos tipos de plantas pueden vivir en un clima determinado y otras no. Además, el sistema de riego, el mantenimiento y los métodos de instalación son otras razones que influyen en el rendimiento de los sistemas de muros verdes (Ávila, 2004).

La selección de plantas adecuadas influye en el rendimiento de los sistemas de muros verdes y mejora la eficiencia de estos sistemas. También es importante el objetivo que se pretende conseguir con las mismas, por ejemplo, en nuestro caso solo se quería que los módulos estuvieran siempre verdes. La condición climática es un parámetro de vital importancia para decidir acerca de la selección de especies de plantas apropiadas para una región determinada.

El índice de área foliar es un parámetro biológico el cual también se considera al momento de elegir una especie, como también la distancia de plantación. Los criterios para medir la calidad de las plantas en sistemas de vegetación vertical son diferentes de una prueba a otra,



y están relacionados con diferentes especies de plantas, tipos de muros verdes, sustratos y otros (Laurence y Sabin, 2011).

En nuestro caso, se utilizaron tres diferentes especies, como planta tapizante *Aptenia cordifolia* y como plantas con mayor porte *Lampranthus spectabilis* y *Lavandula stoechas* (Emilsson, 2008), las cuales fueron plantadas en los prototipos para muro verde tanto en los compuestos por la fibra de coco y cascarilla de arroz como los de musgo *Sphagnum*, para identificar la mejor combinación de planta y sustrato.

## **2.5 Riego**

Las necesidades de riego dependen del tipo de sistema, plantas utilizadas y condiciones climáticas pues son las variables a tener en cuenta a la hora de diseñar un sistema de irrigación para un muro verde y conociéndolas se puede alcanzar un alto grado de uniformidad de agua en toda la pared y reducir al mínimo las pérdidas de agua que sería el objetivo principal (Köhler, 2008). Los muros verdes modulares requieren un sistema de riego para proporcionar el agua necesaria para el desarrollo de las plantas. El agua de riego puede enriquecerse con nutrientes o fertilizantes para mejorar el desarrollo de la vegetación y la vivacidad (Koumoudis, 2011).

Experimentos posteriores han demostrado cómo variables de diseño, goteros, espaciado de líneas de goteo, tipo de goteros y el flujo de cada uno de ellos, son importantes a la hora de construir un muro verde, también variables operacionales como la duración y frecuencia de riego, que se determinarán en función del tipo de muro verde y localización del muro verde (Pérez-Urrestarazu et al., 2014).

Los muros verdes continuos tienen un sistema de riego con tuberías instaladas en la parte superior y en la parte intermedia de la estructura conectado al sistema de riego central. En nuestro caso, la pantalla permeable de fieltro permite, posteriormente, la distribución uniforme de agua y nutrientes a lo largo de la superficie.

Los tubos y conectores de riego son de PE de baja densidad que llevan incorporados los goteros autocompensantes con distribución e intensidad adaptadas a las necesidades de

irrigación de las plantas. El sistema de riego también debe incluir un sistema de filtración para evitar la obstrucción.

Los orificios de drenaje ubicados en la parte inferior de las bandejas se utilizan para permitir que el exceso de agua riegue los módulos que se encuentran debajo o sea reutilizado. Los muros verdes de este proyecto tenían instalado un canalón en la base del sistema, recuperando el exceso de agua almacenándolo y reintroduciéndolo en el sistema de riego (Manso et al, 2012).

Los muros verdes también utilizan estrategias para minimizar el consumo de agua, como el uso de agua de lluvia, la reutilización del fluido recolectado en el sistema de drenaje y el monitoreo de las necesidades de suministro de agua, a través de la instalación de sensores que controlan el agua de recolección. nivel del tanque, el tiempo de riego y las condiciones climáticas (por ejemplo, cantidad de lluvia, humedad, temperatura).

## **2.6 Toma y registro de datos**

En los últimos años con los avances de internet, ha aumentado la preferencia de disponer de control y de la información en nuestros dispositivos portátiles en cualquier parte del mundo. Por esto, hoy en día, muchos de los objetos que forman parte del mundo físico se pueden comunicar por medio de internet mostrando una determinada información y pudiendo utilizar diferentes actuadores para controlarlo (Verdouw et al, 2013).

Los equipos más utilizados para el monitoreo del agua en el sustrato son los sensores de contenido de agua del suelo, estos sensores enterrados a diferentes profundidades y en múltiples ubicaciones proporcionan datos útiles del contenido de agua en el muro verde. Monitorear el contenido de agua en el sustrato, en conjunto con datos de otros sensores, es de gran importancia para aplicaciones orientadas al buen uso del agua en los muros verdes. El número de sensores y las distancias son de gran importancia para obtener estimaciones representativas sobre la disponibilidad de agua en el sustrato del muro verde (Thalheimer, 2013).

Los recientes avances en el campo de los componentes de "hardware abierto" abren nuevas vías para el desarrollo de sistemas de riego inteligente, que pueden conectarse a dispositivos

de transmisión vía internet para conseguir una alta cobertura espacio temporal de datos de agua del sustrato y de otros múltiples sensores instalados en los muros verdes (Jayaraman et al, 2006). La filosofía de hardware abierto en analogía con el concepto de software abierto tiene como objetivo proporcionar acceso libre y transparente al diseño de hardware, proyectos y códigos para que los usuarios puedan compartir, personalizar y actualizar sus sistemas fácilmente (Fisher, 2012). En esta tesis, se utilizó el microcontrolador Arduino y el microprocesador Raspberry Pi que son plataformas informáticas para desarrollar objetos interactivos autónomos o que se conectan a un ordenador. En Arduino y en Raspberry Pi tanto el hardware como el software son de código abierto (Banzi y Shiloh, 2016; Ray, 2016).

El microcontrolador Arduino UNO está programado para detectar los niveles de humedad del suelo o presencia de lluvia, y encender el relé de la electroválvula cuando el contenido de humedad del suelo sea menor o supere el umbral de humedad predefinido, de acuerdo con las necesidades de las plantas, o apagarlo en caso contrario o cuando esté lloviendo (Sathiesh et al, 2016).

Se utilizó un microprocesador Raspberry Pi el cual almacenó los datos durante el experimento para el posterior análisis del desarrollo del muro verde. El proyecto proporciona directrices para la reproducción y actualización de un sistema de riego inteligente, personalizado y de bajo coste para el uso en muros verdes. Así en relación con la ideología de código abierto, mediante la cual se puede compartir información sobre diseños de equipos y software, se facilita la adopción y mejora continua de las tecnologías existentes en el mercado (Ray, 2016).

El sistema de automatización analizará los sensores y comunicará la información recogida por medio de internet donde se podrá consultar fácilmente en forma de gráfica mediante la plataforma ThingSpeak.com. Una de las partes importantes de este proyecto es el servidor web, para el que se ha utilizado uno de los esquemas más comunes, el LAMP, que es el acrónimo para Linux, Apache, MySQL, PHP que estará funcionando en la Raspberry pi (Monk, 2015).

El microcontrolador es el componente principal del circuito de control y el microprocesador Raspberry Pi es el componente principal de almacenamiento y procesamiento de datos. La

plataforma está equipada con sensores dieléctricos de bajo coste, disponibles en el mercado, lo que reduce aún más el costo de adquisición de datos. Por lo tanto, las mediciones en varios sitios resultan más asequibles, lo que permite aumentar la densidad espaciotemporal de datos requeridos para aplicaciones dirigidas al ahorro de agua en los muros verdes.

## **3.OBJETIVOS**

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

El objetivo general de esta investigación es por un lado, usar materiales alternativos encontrados en Andalucía que sean adecuados para el uso como medios de crecimiento en muros verdes utilizando residuos orgánicos generados por la agricultura, y, por otro lado, desarrollar un sistema automatizado de riego supervisado y controlado de forma remota, utilizando materiales de bajo coste y fáciles de programar como los sistemas Arduino y Raspberry Pi que serán responsables de la automatización del riego y de la recopilación de datos ambientales para los muros verdes.

En cada capítulo se pretenden alcanzar los siguientes objetivos específicos:

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para alcanzar dicho objetivo general se llevarán a cabo los siguientes estudios científicos:

#### **Capítulo 1.**

- I. Abordar por separado los beneficios ambiental, económico y social de los sistemas de los muros verdes.

#### **Capítulo 2.**

- I. Emplear materiales alternativos encontrados en Andalucía, provenientes de residuos agrícolas, que sean adecuados para su uso como medios de cultivo en muros verdes.
- II. Analizar las características fisicoquímicas del agua drenada para comparar el comportamiento del sustrato alternativo frente a materiales convencionales actualmente usados.

#### **Capítulo 3.**

- I. Crear un sistema de riego automatizado que se supervise y controle de forma remota desde cualquier teléfono móvil, computadora o tableta con conexión a Internet
- II. Utilizar materiales de bajo costo fáciles de programar, instalar y adquirir como Arduino UNO y Raspberry.
- III. Recopilar datos ambientales en prototipos de paredes verdes para análisis posteriores usando el sistema Raspberry Pi.

#### **Capítulo 4.**

- I. Comparar el sustrato de los materiales alternativos identificados en el capítulo 2 con el sustrato comercial Spaghnum para reconocer la mejor combinación de sustrato-planta en dos diferentes especies vegetales.
- II. Estudiar la retención y distribución de agua en muros verdes usando diferentes sustratos.
- III. Conocer el crecimiento y productividad en los muros verdes determinando el contenido de clorofila, la biomasa y la cantidad de agua en el material vegetal.

## **4. MATERIALES Y MÉTODOS**



## **MATERIALES Y MÉTODOS**

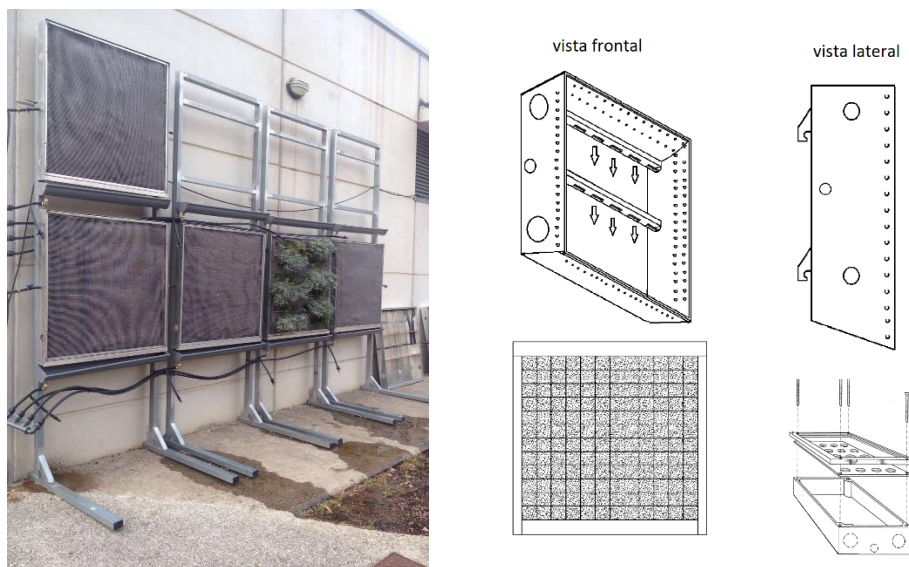
### **4.1 Área de estudio**

La siguiente tesis se realizó en la ciudad de Córdoba en las instalaciones del Campus de Rabanales de la Universidad de Córdoba (España), específicamente el dispositivo experimental se instaló junto a la fachada sur del edificio de experimentación animal (37°54'51.3"N 4°43'28.5"W). La ciudad de Córdoba posee una población de 325.708 habitantes (instituto de estadística y cartografía de la junta de Andalucía 2019) y se encuentra a 111 metros sobre el nivel del mar. Córdoba tiene una extensión superficial de 1.254 km<sup>2</sup> y se ubica en los márgenes del río Guadalquivir, que lo atraviesa de este a oeste formando meandros. Posee unas condiciones climáticas medias anuales de 17.8 °C de temperatura, pluviosidad de 612 mm y humedad relativa de 60%. El clima en Córdoba es cálido y templado, mediterráneo continental con una clasificación de Csa de Köppen – Geiger. En los meses cuando se llevó a cabo el experimento (abril del 2016 a agosto 2017), las temperaturas oscilaron entre un máximo de 45°C y un mínimo de 7°C, con una precipitación promedia anual de 566 mm.

### **4.2 Prototipos de muros verdes de sistemas modulares utilizados**

Los muros verdes modulares utilizados en este proyecto se instalaron en un marco fijado cerca de la pared, dejando un espacio vacío entre el muro verde y la superficie de la pared. Este marco sostiene el panel y protege la pared de humedad. El muro verde modular está cubierto con capas permeables, flexibles y a prueba de raíces. La capa externa del módulo cubierto con fieltro se cortó para formar bolsillos para la introducción de plantas individualmente.

Los muros verdes modulares están compuestos de varias partes entrelazadas, hechas de láminas de metal (aluminio). Para garantizar la continuidad del sistema, cada módulo incluye un sistema de acoplamiento en los lados para conectarse entre sí, estos elementos modulares también contienen una cubierta frontal en forma de rejilla para evitar que las plantas se caigan. La superficie posterior de los muros verdes modulares incluye soportes de montaje para su suspensión en el marco para mantenerlos en posición vertical (ver figura 1).



**Fig 1.** Prototipo de muros verdes modulares utilizados en el proyecto.

### 4.3 Vegetación

El material vegetal seleccionado siguiendo las directrices anteriormente nombradas fueron *Lampranthus spectabilis*, *Lavandula stoechas* y *Aptenia cordifolia* teniendo en cuenta además la fácil adquisición de estas plantas en la región (ver figura 2).

#### 4.3.1. *Lampranthus spectabilis*

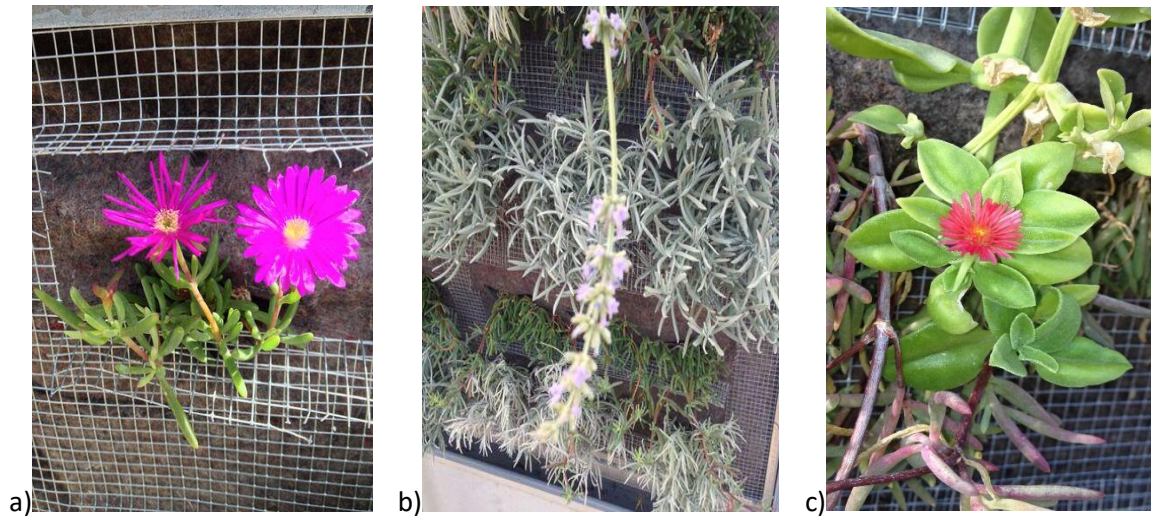
Es una especie de planta suculenta perteneciente a la familia de las aizoáceas incluye 127 géneros con 2500 especies de las cuales la mayoría son endémicas de las zonas áridas o semiáridas del sur de África, y algunas se encuentran en Australasia y América. Alcanza un tamaño de 25 cm de altura, sus tallos son rastreros y pueden alcanzar 3m de largo teniendo una excelente cobertura del suelo para amplias y reducidas zonas formando alfombras. Las hojas son de color verde azuladas, trianguladas o curvadas de 1.5 cm de largo o más. Las flores son brillantes, coloridas y llamativas con variaciones de color rosa a purpura (Henricot et al, 2009).

#### 4.3.2. *Lavandula stoechas*

Es un arbusto ramoso, muy aromático, de hasta un metro de altura de la familia de las lamiáceas. Es una especie nativa de la Cuenca mediterránea y Macaronesia y está naturalizada en Australasia. Forma una mata muy ramificada que puede alcanzar 1 m de altura. Sus tallos son de color verde o rojizo, blanquecinos por la presencia de pilosidad, más o menos abundante. Las hojas de color algo grisáceo sobre todo por el envés, tomentosas, nacen enfrentadas, son largas y estrechas, de borde entero. Inflorescencia compacta, de sección cuadrangular. Las flores están apiñadas en densas espigas terminales de forma cuadrangular, que llevan en su terminación un conjunto de brácteas estériles de color violeta o rojizo. El cáliz, pequeño y recorrido por 13 venas, queda oculto por la bráctea. Corola de color morado oscuro. Las flores forman líneas verticales que recorren el conjunto de la inflorescencia. Posee dos esporofilos de 4-8 mm de largo, acorazonados-romboidales, de color violeta amarronado, membranosos, tomentosos de gris en 4 hileras, los superiores agrandados, sin flores axilares, de 1-5 cm de largo, ovalados, púrpuras hasta violeta azulado (Benabdelkader, 2014).

#### 4.3.3. *Aptenia cordifolia*

Es una especie de planta ornamental perteneciente a la familia de las aizoáceas. Es una planta rastrera que forma una alfombra de hierbas perennes de formación plana en grupos sobre el terreno a partir de una base. Los tallos pueden alcanzar unos 3 metros de largo. Las hojas de color verde brillante, carnosas, tienen generalmente forma de corazón de unos 3 centímetros de largo o más. Tiene brillantes flores de color rosa a púrpura que aparecen en las axilas de la hoja y están abiertas durante el día. Estos verticilos colorados no son pétalos, sino estaminodios no funcionales, como en todos los Aizoaceae. Tiene cuatro tépalos (2+2) acrescentes en la fructificación. El fruto es una cápsula de poco más de un centímetro de largo con semillas tuberculadas milimétricas de color pardo (Zamoglu et al, 2009)



**Fig 2.** Material vegetal utilizado en los prototipos de muros verdes: a) *Lampranthus spectabilis*, b) *Lavandula stoechas*, c) *Aptenia cordifolia*.

Después de llevar a cabo nuestro primer experimento (artículo 2) se observó que la especie *Lavandula stoechas*, no tuvo un desarrollo satisfactorio en los prototipos de muros verdes, por lo cual no se continuó usando en los experimentos posteriores.

#### 4.4. Sustratos

Las funciones más importantes de un sustrato para muros verdes son proporcionar un medio ambiente idóneo para el crecimiento de las plantas y el libre crecimiento de las raíces, y facilitar una base adecuada para el anclaje o soporte mecánico del material vegetal. Es importante que el material elegido posea un suministro continuo y abundante disponibilidad. El precio del material también es importante, sin embargo, su coste no debe invalidar otros factores, ya que el sustrato elegido deberá ser apto para la instalación en un muro verde ofreciendo calidad con los mínimos riesgos o inconvenientes. Las propiedades físicas, químicas y biológicas de los materiales igualmente son factores limitantes, que determinan el manejo posterior del sustrato.

El musgo sphagnum es un componente muy común en la elaboración de muros verdes que, generalmente, se utiliza para aumentar la capacidad de retención de agua y también debido a su poco peso. El musgo sphagnum está constituido por restos de musgos y de otras plantas,

que no se han descompuesto totalmente a causa del exceso de agua y de la falta de oxígeno, por lo que conservan parcialmente su estructura anatómica durante largos periodos de tiempo. Aquellos restos vegetales se acumulan en los terrenos encharcados principalmente en las regiones frías, con altas precipitaciones y humedad relativa elevada.

La cascarilla de arroz se ha utilizado, principalmente, para aumentar el espacio poroso en los sustratos y, a pesar de ser un compuesto orgánico, consisten principalmente en lignina, cutina y sílice insoluble, lo que proporciona una lenta descomposición de las partículas y, por lo tanto, se convierte en un sustrato apropiado para el uso en muros verdes (Cabrera, 1999).

La cascara de coco es un medio de crecimiento relativamente nuevo que se usa principalmente en la industria de invernaderos. Se ha sugerido como un sustituto potencial para el musgo sphagnum. La materia prima, que se parece al musgo sphagnum pero es más granular, se deriva de la cáscara del coco. Una de las características importantes para el uso en muros verdes es que puede contener hasta nueve veces su peso en agua y es más resistente a la descomposición microbiana y, por lo tanto, puede encogerse menos, otro aspecto importante es que es más fácil de volver a humedecer después del secado (Arenas et al, 2002).

La lana roca se ha utilizado ampliamente en Europa y se utiliza de forma limitada en el mercado de invernaderos. Al igual que la perlita y la vermiculita, se origina a partir de un mineral natural (silicatos de aluminio con algo de calcio y magnesio) que se calienta a altas temperaturas para formar fibras que se utilizan para hacer bloques o cubos. Los diseñadores de muros verdes suelen utilizarlas debido a su peso y a que es fácil de moldear (Burdett et al, 1983).

#### **4.5. Análisis de agua**

Las muestras de agua se colectaran todos los días dos veces al día durante 10 semanas del primer experimento (capítulo 2), tomando una muestra del agua excedente de escorrentía de cada uno de los prototipos de muros verdes, por medio de canalones ubicados en la parte inferior de cada prototipo que conducen el agua hasta cada uno de los 6 recipientes correctamente etiquetados para su posterior análisis en el laboratorio, utilizando un pH metro multiparámetro portátil MM 40: pH - conductividad - TDS - temperatura, CRISON.

## **4.6. Microcontrolador y microprocesador**

El microcontrolador es un Arduino uno utilizado para interactuar con una gran variedad de interruptores o sensores para el control de motores y otras salidas físicas. Los experimentos llevados a cabo con Arduino pueden ser autónomos o pueden comunicarse con el software que se ejecuta a través de un ordenador (Anexo 1).

El microprocesador es una Raspberry pi, que posee un chip Broadcom BCM2835 con procesador ARM hasta a 1 GHz de velocidad. Es un pequeño ordenador que es utilizado para el almacenamiento y procesamiento de datos adquiridos en los prototipos de muros verdes mediante internet.

### **4.6.1. Toma y almacenamiento de datos de los sensores**

El sistema de recolección de datos del prototipo de muro verde se programó por medio de LAMP, acrónimo que significa (Linux, Apache, MySQL y PHP) que es una configuración de servidor común para muchas aplicaciones web. LAMP es una plataforma de desarrollo web de código abierto que utiliza Linux como sistema operativo, Apache como servidor Web, MySQL como sistema de gestión de bases de datos relacionales y PHP como lenguaje de script orientado a objetos (Dennis, 2013). La recolección mediante LAMP se ejecutó en la Raspberry pi la cual utilizó una tarjeta SD con una capacidad de 16 Gbytes.

Al mismo tiempo se utilizó la página web ThingSpeak para el Internet de las cosas por su facilidad de programación y su popularidad, con API (Interfaz de programación de aplicaciones) y aplicaciones para el envío y almacenamiento de datos de los sensores, usando HTTP a través de Internet o a través de una red de área local. ThingSpeak se utilizó para crear aplicaciones para el registro de los datos tomados por los sensores del experimento (Anexo 2). También se integró el cálculo numérico MATLAB para permitir que los usuarios puedan analizar y visualizar los datos obtenidos más fácilmente.

## **4.7. Sistema de riego**

El sistema de riego es un sistema de riego por goteo. Los tubos de riego de polietileno de 16 mm de diámetro están en la parte superior y en la zona media de cada módulo, con 12 goteros regulables de 4 l/h por cada módulo para un total de 72 goteros en el prototipo experimental

de muro verde instalados cada 15 centímetros de tubo, el cual proporcionará agua a cada prototipo. Las gotas de agua en cada una de las filas irrigarán de arriba hacia abajo para garantizar que todas las plantas reciben la humedad adecuada. Las tuberías están unidas a una bomba centrífuga horizontal CRI mhb-3/03m con las siguientes características (H 24m, Q 3 m<sup>3</sup>/h, volt 230V, AMPS 3.6)

Para el primer experimento (capítulo 2) la frecuencia de riego se realizó 5 veces por día cada 3 horas (9:00-21:00), empleando 20 litros de agua necesaria por día para cada módulo de 1 m<sup>2</sup> de acuerdo con las necesidades hídricas de las plantas. Para el segundo experimento (capítulo 4) la bomba de riego está controlada por un relé, que se activa de forma autónoma al recibir las señales producidas por el Arduino cuando los sensores de humedad del suelo o el sensor de lluvia han pasado el umbral determinado en su programación. Esto permite el uso eficiente de agua por medio de sensores irrigando solamente cuando el sustrato de los muros verdes se encuentre seco o húmedo (Srbínovska et al, 2015)

La fertilización se realizó con el riego adicionando al agua N, P, K en el contenedor de agua utilizando el fertilizante natural guano para la floración 1 vez cada 2 semanas con baja dosificación (1.5 decilitros de guano para el contenedor de 450 litros).

#### **4.8. Ensayos de laboratorio**

La caracterización física y química de los sustratos se realizó según las metodologías propuestas por Abad et al (2005) realizándose las determinaciones de pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, densidad aparente, densidad real y porosidad.

Los ensayos de laboratorios para el equipo de riego se realizaron siguiendo la norma ISO 9261:2004 : Emisores y tuberías emisoras. Especificaciones y métodos de ensayo.

La calibración de los sensores de humedad del suelo siguió el procedimiento general para calibrar sensores (Starr y Paltineanu, 2002). La calibración de la fotorresistencia se llevó a cabo estableciendo valores máximos y mínimos de intensidad lumínica, adquiridos in situ, y la calibración de los sensores de flujo se realizó volumétricamente, tomando un volumen de referencia conocido y analizando las vueltas del sensor hall (Anexo 3).

La determinación de clorofila en tejidos vegetales se realizó mediante extracción con acetona a 85 %, y el contenido de agua y de biomasa se determinó por medio del método del secado a horno.

#### **4.9. Análisis estadístico**

Los análisis estadísticos para las muestras de agua serán examinados mediante el uso de ANOVA de dos factores usando las pruebas de normalidad y homogeneidad de las varianzas, para lo que se utilizara el paquete estadístico STATGRAPHICS® (Egea et al., 2014). El análisis estadístico se llevará a cabo tomando los sustratos y sus respectivas repeticiones de cada uno (fibra de coco, cascarilla de arroz, Sphagnum y lana de roca)

Para estudiar la influencia del tipo de sustrato en el crecimiento y desarrollo de las plantas, se analizarán los datos obtenidos en laboratorio para cada una de las especies vegetales y cada uno de los sustratos utilizados realizando un análisis de la varianza ANOVA al 5% de nivel de significación ( $\alpha = 0.05$ ). Los datos estudiados serán sometidos a un análisis estadístico completamente al azar, utilizando el software estadístico STATISTIX8®, con el objetivo de observar si existen diferencias significativas dentro de los sustratos utilizados. El test de Tukey se utilizará para estudiar la diferencia entre las medias.





## **5. CAPITULO 1**

**EI EFECTO DE LOS MUROS VERDES EN LAS  
EDIFICACIONES**

**THE EFFECT OF GREEN WALLS ON BUILDINGS**

## **5. THE EFFECT OF GREEN WALLS ON BUILDINGS**

Rivas-Sánchez Y, Moreno-Pérez, M.F, Roldán-Cañas, J. 2019. The effect of green walls on buildings. En: D.A. Krawczyk (Ed.). Buildings 2020+. Constructions, materials and installations. Printing House of Bialystok University of Technology. Poland, 92-99.

Doi: 10.24427/978-83-65596-71-0

### **5.1. INTRODUCTION**

When it comes to the greening of buildings, there are a number of approaches used nowadays, such as facades covered with climbing plants or green-wall systems (built with prefabricated modular panels). These offer economic, environmental and social benefits. Given the growing interest in restoring the environmental balance of urban areas, technological innovations have emerged in environmentally-beneficial building practices. The implementation of green walls is not a new concept and can offer many advantages as a part of urban landscaping, such as environmental benefits and energy savings in buildings. Incorporating vegetation could be a sustainable approach for greening both new and existing buildings.

Green-wall systems, also known as vertical gardens, are built using modular panels, each one containing its own soil or other growing media, such as coconut coir, rice husks, felt, perlite or rock wool. These technologies are based on hydroponic cultivation, using balanced nutritional solutions to provide all or part of the nutritional and watering requirements of the plant (Rivas-Sánchez et al., 2017).

### **5.2 BENEFITS OF GREEN WALLS**

The benefits of green walls can be categorised as aesthetic, environmental and economic, or a combination thereof. The greening of buildings improves visual, aesthetic and social aspects of urban areas, which in turn has a great effect on the financial value of a building and helps to improve human health. Urban greening is recognised as having a therapeutic effect, as demonstrated in a series of studies; for example, hospital inpatients who can see

vegetation from their windows recover more quickly than those who cannot (Ulrich & Simons, 1986).

The environmental benefits of greening buildings operate on various levels. Some depend on there being a large surface area, and so the benefits only become evident with large buildings or large areas, while others work in line with the scale of the building.

This review separately addresses three benefits of vertical urban greening systems: environmental, economic and social

### **5.2.1 ENVIRONMENTAL BENEFITS**

#### **Temperature**

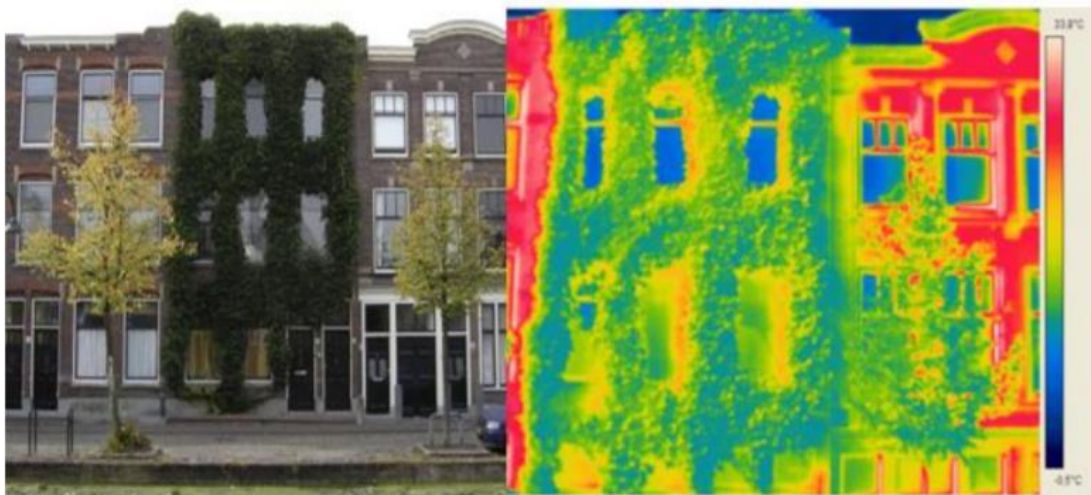
Temperature is an important criterion when it comes to comfort, which can be affected by lifestyles. Several factors such as function, culture, aesthetics, environment and technology influence the greening design of a building (Oral et al, 2004), but compared with rural areas, modern building materials such as concrete retain more heat during the day. The construction of green areas in cities is the key to reducing the effects of urban heat islands, since plants absorb shortwave radiation (Kleerekoper et al, 2012). Moreover, they help keep their surroundings cooler thanks to the shade the plants provide (Newton, 2004), and by evaporation and transpiration (Alexandri & Jones, 2008; Sheweka & Mohamed, 2012). The implementation, therefore, of vertical vegetation systems is an appropriate way to reduce urban heat islands in urban areas (Taib et al, 2010).

The urban heat island phenomenon can result in city temperatures being 2-5°C higher than those in rural areas, primarily due to the number of artificial surfaces compared to plant coverage. Surfaces with vegetation intercept radiation, reducing the warming of urban surfaces. In urban areas, the effect of evapotranspiration and shade created by plants used in green walls can significantly reduce reflected heat. A study carried out by Onishi et al. (2010) shows a temperature reduction of 2-4°C due to vegetation coverage.

Evapotranspiration, shade, humidity levels and temperature also affect the microclimate of the building, both inside and out. In warmer climates, the cooling potential can result in significant energy savings on air conditioning (Alexandri & Jones, 2008). The cooling

potential of green walls has been a topic of discussion in numerous studies. Field measurements carried out by Bartfelder & Köhler (1987) in Germany, on a wall covered in vegetation and a bare wall, show a temperature reduction in the green wall of between 2 and 6°C when compared to the bare wall. Another study by Wong et al. (2010a) on buildings in Hortpark (Singapore) one with plant coverage, the other without shows a maximum reduction of 11.6°C. Figure 1 shows a photograph taken using an infrared camera in the Netherlands during the summer, where it can be seen that the bare surfaces appearing as red are warmer than the area covered in vegetation which appears in green and blue.

Green walls and green facades have different characteristics that can influence the abovementioned cooling potential, and can also affect insulation properties. Among other aspects, it depends on the depth of the foliage (creating a layer of air and shade on the facade), water content, properties of the material and possible air cavities between the different layers.



**Fig 1.** A photo of a facade covered in Boston ivy (*Parthenocissus*) planted on the ground and grown directly up the facade. On the right: a photo of the same location, taken with an infrared camera (Delft, Netherlands, summer 2009, 12 p.m. air temperature 21°C) (Source: Ottelé, 2010).

## Noise

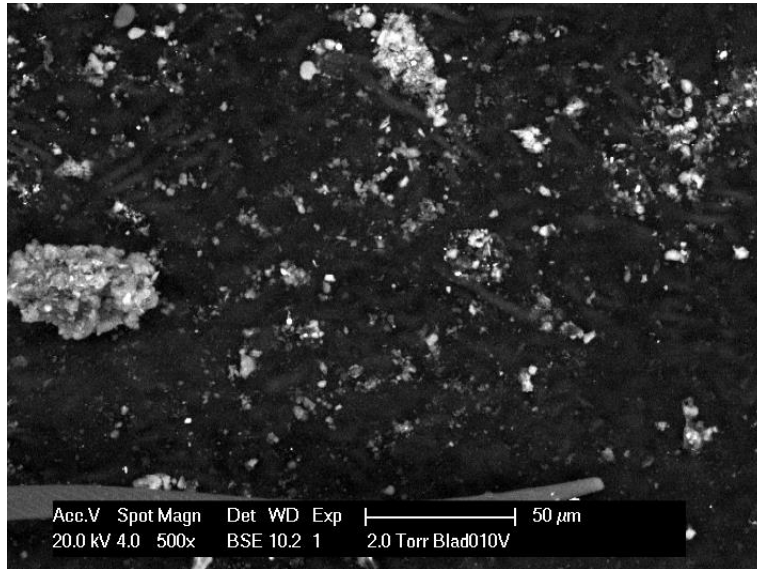
Another major environmental benefit of green walls is their capacity to control noise and their potential use as a noise-reduction barrier (Van Renterghem and Botteldooren, 2009;

Wong, 2010b). They can also reduce sound reflection and noise disturbance (Shiah et al, 2011).

## **Air**

Green-wall systems provide several environmental benefits. For example, the plants in the vegetation cover on buildings absorb dust and clean the air (Donahue, 2011), thus acting as a natural air filter. Furthermore, during photosynthesis, the plants take in carbon dioxide and release oxygen (Darlington et al, 2001). This freshens the air and reduces carbon dioxide emissions.

The larger scale benefits primarily centre on improvements in air quality, biodiversity in the city as well as the mitigation of the urban heat island effect (Köhler, 2008). The air quality improvement is primarily due to the fact that vegetation absorbs fine dust particles as well as gaseous pollutants such as CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub>. Carbon dioxide is used by plants for photosynthesis, releasing oxygen and producing biomass; nitrogen and sulphur dioxide are converted into nitrates and sulphates in the plant tissue. Fine dust particles, especially the smallest sizes (<10 µm), primarily sticks to the outside of the foliage (Ottelé et al, 2010; Stemberg et al, 2010) as can be seen in Figure 2. Dust particles smaller than 2.5 µm have significant effects, mainly in densely populated urban areas, as they can get into the respiratory system, causing damage to human health (Powe & Willis, 2004).



**Fig 2.** Microphotography of particles on the upper part of a leaf (*Hedera Helix*) (Source: Stemberg, 2010)

### **5.2.2 ECONOMICS BENEFITS**

In recent years, growing attention has been focused on the economic benefits of green-wall systems. One way to use these systems is to set them on the windows of buildings so that the vegetation creates shade (Bass et al, 2003). The efficient use of daylight and the reduction of problematic glare are some of the benefits of green-wall systems that provide enough shade (Kim et al, 2012), thus leading, over time, to lower electricity demand. Due to the capacity of green-wall systems to reduce temperature, they are an appropriate solution for reducing the energy demand for cooling buildings, improving their energy efficiency and subsequently cutting costs.

Furthermore, green walls can act as permeable surfaces and control rain water. The use of green-wall systems can reduce water consumption in the building given that they act like a filter for the rain water and, when using certain materials, it has been shown that they do not interfere with the physical or chemical properties of the water (Rivas-Sánchez et al, 2017). This allows the water to be reused for purposes that do not require potable water, such as in toilets and for irrigation. Green-wall systems are suitable to eco-retrofitting projects that aim to improve people's lives and the environment, and are less expensive than demolishing and reconstructing buildings (Birkeland, 2009).

### **5.2.3 SOCIAL BENEFITS**

The use of green-wall systems with their associated social benefits date back to ancient times. Take for example the Hanging Gardens of Babylon, which is one of the best-known examples from antiquity (Binabid, 2010). Connecting with nature is a biologically innate process: in ancient times, landscapers would use greening in buildings and recreational areas in diverse ways for their aesthetic qualities. Plants create spaces for recreational and leisure activities. It has also been proved that contact with nature has a psychological impact, and improves the health and welfare of humans (White et al, 2011). Moreover, reduced stress is achieved through proximity to green zones (Nielsen & Hansen, 2007). It can thus be seen that human beings naturally need vegetation in cities and urban areas, changing grey areas into green spaces. A study consisting in an online survey compared a house with no vegetation to others with different types of vegetation. It showed that for all those surveyed, houses with green-wall technology were aesthetically more appealing than those without (White et al, 2011).

### **5.3 EFFECTS OF GREEN WALLS**

#### **Temperature reduction and cooling effects on buildings using green-wall systems**

Temperature reduction is one of the key properties of green-wall systems. In addition to creating shade, the cooling effects of plants are effective at lowering temperatures. This in turn helps to reduce the demand for cooling energy and energy use. Energy efficiency refers to the capacity of a building to operate with minimum levels of energy consumption (Perini & Rosasco, 2013). This section reviews several studies on vertical vegetation systems used to reduce temperature, energy consumption and the demand for cooling energy. Various research papers have sought to determine the effectiveness of green-wall systems and their influence on the thermal transfer value, energy use, cooling effect, temperature variance, etc. These studies vary depending on the different climate conditions.

In an experiment with traditional green walls, Köhler (2007, 2008) found that the magnitude of the shade effect depends on the density of the foliage. Ivy is the species that provides the maximum cooling effect, comparable to the shade of trees, with differences of up to 3°C in interior temperature (Stec et al, 2004).



In the Mediterranean region of Greece during the winter months, a thermal comparison was carried out on a bare wall and a green wall to show the dynamics of the thermal properties and the temperature variation. The results show that covering the wall surface with plants has thermal benefits for both exterior and interior surfaces, and reduces loss of heat flow (Eumorfopoulou & Kontoleon, 2009).

In the “Bioshader” experiment carried out at the University of Brighton (United Kingdom) (Miller, 2007), a green wall was positioned on an office window, and was then compared to another office without plants. The green wall resulted in interior temperatures 3.5-5.6°C lower than the exterior ones. Solar transmittance measurements ranged from 0.43 for one layer of leaves, to 0.14 with five layers of leaves. This equates to a 37% reduction in solar radiation crossing one layer of leaves, and up to an 86% reduction with five layers of leaves.

The thermal effects of green walls on buildings were tested in an experiment in Singapore to better understand the temperature and power consumption of green-wall systems. TAS simulation software was used to simulate a hypothetical ten-storey building in three different scenarios: one with opaque walls, one with seven windows on each floor and another with an all-glass facade. These scenarios were compared with similar set-ups with the addition of a green-wall system. Measurements of the mean radiant temperature and the cooling load were taken, based on a hypothetical building in a tropical climate. It was found that the heat transfer through the concrete wall is reduced by using green walls (Wong et al., 2009). Green-wall systems reduce excessive solar energy on the building wall; they are thus useful for concrete buildings and also they reduce the thermal transfer of transparent surfaces. Indeed, glass facades 100% covered by a green-wall system can effectively reduce the mean radiant temperature (Wong et al., 2009).

The above studies show that green walls can provide a cooling potential on the surface of the building, which is very important during hot periods of the year, especially in warm climates. Consequently, green-wall systems are a good way to create natural shading that reduces the temperature, they protect the facades of building against direct solar radiation and they provide shade. Moreover, the natural cooling effects of plants through evaporation reduce the temperature, heat flow, thermal transfer, etc., and lead to the reduction in the energy

demand for climate control in buildings. Ultimately, therefore, green walls reduce energy consumption.

### **Change in the effect of wind on buildings due to green walls acting as a block**

Green-wall systems on buildings act as a barrier against the wind and thus block the effects of the wind on the building facade. This effect depends on the density and penetrability of the foliage, as well as the orientation of the facade and the direction and speed of the wind.

One way to increase the energy efficiency of a building is to block winter winds, given that cold wind plays a key role in reducing the temperature inside buildings. Dinsdale et al. (2006) showed that using green walls to protect buildings against cold winds reduces heating demand by 25%.

McPherson et al. (1988) used computer simulation to test the effects of irradiation and wind reduction due to vegetation. They analysed energy performance in comparable dwellings in four American cities from four different climate zones. They showed that the planting for cold climates should be designed to reduce the impact of winter winds while providing solar access to southern and eastern facing walls. The same criteria also apply in temperate climates, although it is important to avoid blocking summer winds (McPherson et al., 1988).

Furthermore, when considering the use of vegetation to modify the effect of the wind on buildings, care should be taken not to obstruct ventilation in the summer nor to facilitate air circulation in the winter.

## **5.4 CONCLUSIONS**

The installation of green-wall systems to block solar radiation and the use of plants with natural cooling properties through evaporation and transpiration can lead to notable reductions in temperature. Furthermore, plants reduce the effects of solar radiation and reduce ambient temperature.

The cooling effects of green-wall systems reduce the demand for cooling energy and result in energy efficiency in buildings, namely the ability of the building to operate and function

with minimum levels of consumption. These features of green-wall systems offer several environmental and economic benefits.

A comparison of related studies reveals that thermal performance is commonly evaluated using small-scale models. Employing this method means that the variables are easier to manage, and the results are entirely attributable to the effect of the green-wall systems.

Furthermore, there is limited research into the energy-saving capacity of green-wall systems in real-world case studies. Studying the parameters that have the greatest effect on the thermal performance of green-wall systems could help optimise their thermal efficiency.

Temperature reduction and the economic benefits of green-wall systems are not as widely valued as their aesthetic impact, and people generally use these systems for decorative reasons. There need to be greater incentives to use these systems for their economic and environmental benefits, namely to use them more effectively to reduce energy demand.

Raising public awareness about the application and benefits of these systems is needed if more green walls are to be used on buildings. The lack of publicly-available information about the economic and environmental benefits is the reason why owners and investors do not request the implementation of green-wall systems due to the initial outlay despite the fact that installing them is actually relatively cheap and offers numerous advantages.

## **5.5 REFERENCES**

Alexandri E, Jones P. 2008. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Build Environ.* 43:480–93.

Bartfelder, F., Köhler, M., 1987. Experimentelle untersuchungen zur function von fassadenbegrünungen, Dissertation TU Berlin 612S.

Bass B, Liu K, Baskaran B. 2003. Evaluating rooftop and vertical gardens as an adaptation strategy for urban areas, CCAF impacts and adaptation progress report, April 1, 1999–March 31;. p. 1–106.

Binabid J. 2010. Vertical garden: the study of vertical gardens and their benefits for low-rise buildings in moderate and hot climates [1476132]. United States – California: University of Southern California.

Birkeland J. 2009. Eco-retrofitting with building integrated living systems. In: Proceedings of the 3rd CIB international conference on Smart and Sustainable Built Environment (SASBE09). Delft, Netherlands: Aula Congress Centre, Delft University of Technology. p. 1–9.

Darlington AB, Dat JF, Dixon MA. 2001. The biofiltration of indoor air: air flux and temperature influences the removal of toluene, ethylbenzene, and xylene. *Environ Sci Technol*; 35:240–6.

Donahue J. 2011. An empirical analysis of the relationships between tree cover, air quality, and crime in urban areas [1491329]. United States – District of Columbia: Georgetown University.

Eumorfopoulou EA, Kontoleon KJ. 2009. Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. *Build Environ*; 44:1024–38.

Kim G, Lim HS, Lim TS, Schaefer L, Kim JT. 2012. Comparative advantage of an exterior shading device in thermal performance for residential buildings. *Energy Build*; 46:105–11.

Kleerekoper L, van Esch M, Salcedo TB. 2012. How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. *Resour Conserv Recycl*; 64:30–8.

Köhler M., 2008, Green façades-a view back and some vision, *Urban Ecosyst* 11:423-436, doi 10.1007/s11252-008-0063-x

Köhler M. 2007. Rain water management with green roofs and living walls.

McPherson G.E, Herrington L.P, 1988. Heisler Gordon M. Impacts of vegetation on residential heating and cooling. *Energy Build*;12:41–51.

Miller A, Shaw K, Lam M. 2007. Vegetation on building facades: “Bioshader”. Case Study Report.

Newton JJJ. 2004. Building green – a guide to using plants on roofs, walls and pavements. City Hall, The Queen's Walk, London SE1 2AA: Greater London Authority;

Nielsen TS, Hansen KB. 2007. Do green areas affect health? Results from a Danish survey on the use of green areas and health indicators *Health Place*;13:839–50.

Onishi, A., Cao, X., Ito, T., Shi, F., Imura, H., 2010. Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots. *Urban Forestry & Urban Greening* 9 p. 323-332.

Oral GK, Yener AK, Bayazit NT. 2004. Building envelope design with the objective to ensure thermal, visual and acoustic comfort conditions. *Build Environ*;39:281–7.

Ottelé M. Van Bohemen H., Fraaij, A.L.A., 2010, Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls, *Ecological Engineering* 36 154- 162.

Perini K, Rosasco P. 2013. Cost–benefit analysis for green façades and living wall systems, *Building and Environment* 70, 110-121

Powe, N.A., Willis, K.G., 2004, Mortality and morbidity benefits of air pollution (SO<sub>2</sub> and PM<sub>10</sub>) adsorption attributable to woodland in Britain, *Journal of Environmental Management* , 70, 119-128.

Rivas Y, Moreno-Pérez, M.F, Roldán-Cañas, J. 2017a. Use of the rice husk as an alternative substrate for growing media on green walls drip irrigation. European Geosciences Union General Assembly 2017, 23–28 April, Vienna, Austria, EGU2017-4604.

Sheweka SM, Mohamed NM. 2012. Green facades as a new sustainable approach towards climate change. *Energy Procedia*;18:507–20.

Shiah K, Kim JW, Oldridge S. 2011. An investigation into the application of vertical garden at the New SUB Atrium. Vancouver, Canada: The University of British Columbia.

Stec WJ, Van Paassen AHC, Maziarz A. 2004. Modelling the double skin façade with plants. *Energy Build*;37:419–27.

Stenberg, T., Viles, H., Carthersides, A., Edwards, M., 2010. Dust particulate absorption by Ivy (*Hedera Helix L.*) on historic walls in urban environments. *Science of the Total Environment*, 409 p. 162-168.

Taib N, Abdullah A, Fadzil S, Yeok F. 2010. An assessment of thermal comfort and users' perceptions of landscape gardens in a high-rise office building. *J Sustain Dev.* 3:153.

Ulrich, R.S., Simons, R., 1986, Recovery from stress during exposure to every day outdoor environments. In Wineman, J., Barns, R., Zimring, C., *The costs of not knowing*, proceedings of the seventieth annual conference of the environmental research association, Washington DC.

Van Renterghem T, Botteldooren D. 2009. Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. *Build Environ*; 44:1081–7.

White EV, Gatersleben B. 2011. Greenery on residential buildings: does it affect preferences and perceptions of beauty? *J Environ Psychol* 31:89–98.

Wong NH, et al., 2009, Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls, *Building and Environment*, doi:10.1016/j.buildenv.2009.08.005

Wong NH, Tan AYK, Tan PY, Wong NC. 2009. Energy simulation of vertical greenery systems. *Energy Build*; 41:1401–8.

Wong NH, Kwang Tan AY, Tan PY, Chiang K, Wong NC. 2010. Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Build Environ*; 45:411–20.

## **6 CAPITULO 2**

**USO DE LA CÁSCARA DE ARROZ COMO SUSTRATO  
ALTERNATIVO PARA MEDIOS DE CULTIVO EN MUROS  
VERDES CON RIEGO POR GOTEO**

**USE OF THE RICE HUSK AS AN ALTERNATIVE  
SUBSTRATE FOR GROWING MEDIA ON GREEN WALLS  
DRIP IRRIGATION**

## **USE OF THE RICE HUSK AS AN ALTERNATIVE SUBSTRATE FOR GROWING MEDIA ON GREEN WALLS DRIP IRRIGATION**

Rivas Y, Moreno-Pérez, M.F, Roldán-Cañas, J. 2017. Use of the rice husk as an alternative substrate for growing media on green walls drip irrigation. European Geosciences Union General Assembly 23–28 April, Vienna, Austria, EGU2017-4604. Póster

<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/sessionprogramme>

### **ABSTRACT**

Commercially- available green wall systems are commonly made with sphagnum, rock wool or polymers, which are unsustainable materials. In the design of the green wall, local components such as agricultural by-products should be considered more often. The objective of this research is to use alternative materials available in Southern Spain, which are suitable for use as a growing medium in green walls, specifically organic agricultural residues such as, in this case, rice husk. This paper compares rice husk to conventional and widely used green-wall growing media such as coconut coir and rock wool. The physicochemical characteristics of the excess irrigation water were analysed, after it had passed through the green-wall prototypes, installed at the Rabanales Campus of the University of Cordoba between April and July 2016. The results reveal the feasibility of using rice husk as an alternative material. Differences in pH, electrical conductivity, turbidity and total dissolved solids of the treatments were examined by means of an ANOVA, with a test for normality and homogeneity of variances. It was observed that the rock wool and coconut coir substrates used in the experiment prototypes had a significant effect on the water characteristics, whereas the effect of the rice husk substrate was minimal. These results confirm that rice husk is a valid substitute for the substrates conventionally used in green walls. The use of rice husk as a growing medium can replace the use of less sustainable substrates such as sphagnum moss and other polymers.

### **Keywords**

Sphagnum; Alternative substrates; Green walls; rock wool; coconut fiber; rice husk.



## 6.1 INTRODUCTION

The current debate concerning climate change has encouraged the use of plants to help mitigate some of the problems associated with a lack of green areas in cities, such as rising temperatures (Francis and Lorimer, 2011). This lack of green spaces has led to a reduction in evapotranspiration and the normal infiltration of water into the soil, creating a heat island effect in large cities. The resulting demand for air conditioning drives up energy usage. Parks, gardens and green roofs are tools that can be used to expand urban green areas, and green walls have proven to be of benefit by improving storm water management through water retention and evapotranspiration. There are, however, other potential advantages such as cleaner air, positive psychological effects and aesthetic improvements (Franken, 2007). Green walls (also referred to as green façades or vertical gardens) provide a way of increasing green spaces in urban areas. With this technology, the plants are rooted directly in a vertical growing medium or in a hydroponic system, with well-established plant cover (Raji et al, 2015).

In recent years, a search has been underway for alternatives to traditional growing media such as sphagnum moss, vermiculite and perlite. Since transport and costs are an important factor in establishing a green wall, green-wall designers should consider more local components, such as agricultural by-products.

Commercially-available green-wall systems are commonly manufactured in small modules, which can be joined together to cover larger areas (Manso et al, 2015). They use special growing media such as rock wool, coconut coir, moss or polymers. These media are widely-recognized as suitable for plant growth, especially in terms of their water retention capacity and their weight; they are light and highly porous which means less frequent irrigation (Evans and Stamps, 1996). In our experiment, we use an alternative substrate that is considered somewhat unconventional for creating green walls, but which is readily available in the region: rice husk. For comparison, we also use other substrates that are more widely-used in this type of technology; namely, rock wool and coconut coir (Abad et al., 2001).

To date, rice husk has mainly been used to increase the porous space in the substrates. However, its ability to retain moisture can be relatively limited, although this can be corrected by mixing it with products such as coconut coir and other nitrogen-rich materials to adjust

the granulometry (Genevini, 1997). Coconut coir has also been shown to have the appropriate physical, chemical and biological characteristics to be used as a growing medium, though it may require adjustments in irrigation and fertilization as well as mixing with other materials to increase its porosity (García et al., 2001)

The vertical orientation of the growing medium increases the risk of water and air being unevenly distributed, underlining the importance of gravitational potential. Given the increased vertical coverage of the medium in green-wall modules, there is a greater risk of localized dry spots or waterlogging, which could have a negative effect on root growth and development (Jørgensen et al., 2014).

Previous experiments have demonstrated the importance of design variables such as drippers, drip line spacing, dripper type and flow, when building a green wall. Similarly critical are operational variables such as the duration and frequency of irrigation, which are determined according to the type of green wall (passive / active) and its location (interior / exterior) (Pérez-Urrestarazu et al., 2014). Other variables that should be considered when designing a green-wall irrigation system are the environmental conditions (exposure to sunlight, evapotranspiration); an understanding of these conditions will help achieve a high degree of uniformity of water throughout the wall and, most importantly, minimize water losses (Köhler, 2008).

It is also important to take the plant material into account, as each species has different water requirements. To create a good green wall design, it is important to know the characteristics of the species to be used and their crop coefficients ( $K_c$ ), as this allows their individual water requirements to be determined. However, the wide range of species that can be found in a garden makes it very difficult to determine the overall crop coefficient value, which is why a garden coefficient ( $K_j$ ) is estimated. This value is calculated with reference to the species used, plant density and any microclimates that exist (Ávila, 2004). Unlike in agriculture, water requirements in green walls are not determined in order to maximize production. The real aim is to keep them looking aesthetically acceptable by roughly calculating the water requirements that allow such an aesthetic to be maintained, taking into account the parameters of the green wall.

Given that the ideal approach is to group species with similar irrigation needs, it is important to ensure a proper distribution of the plant material over the face of the green wall. The wall

has different irrigation zones and so plants should be set in a suitable part of the wall according to where there is more or less water. In this way, the aesthetics of the green wall will be determined by the irrigation zones (Pérez-Urrestarazu et al., 2014). In our experiment, we use a number of different tools to achieve efficient water distribution and thus maintain an acceptable aesthetic for the green wall.

One aim of this research is to employ alternative materials found in Andalusia, sourced from organic agricultural residues, which are suitable for use as growing media in green walls; in this case, rice husk.

An additional aim is to analyse the physicochemical characteristics of the irrigation water in order to compare the alternative substrate with conventional materials already used as growing media in green walls, such as coconut coir and rock wool. We do so by collecting the excess water from each irrigation, after it has passed through the prototypes. This allows us to ascertain whether this alternative material, which is a by-product of no or minimal value, can be used and thus respond to an increasing demand for growing media for green walls.

## **6.2 MATERIALS AND METHODS**

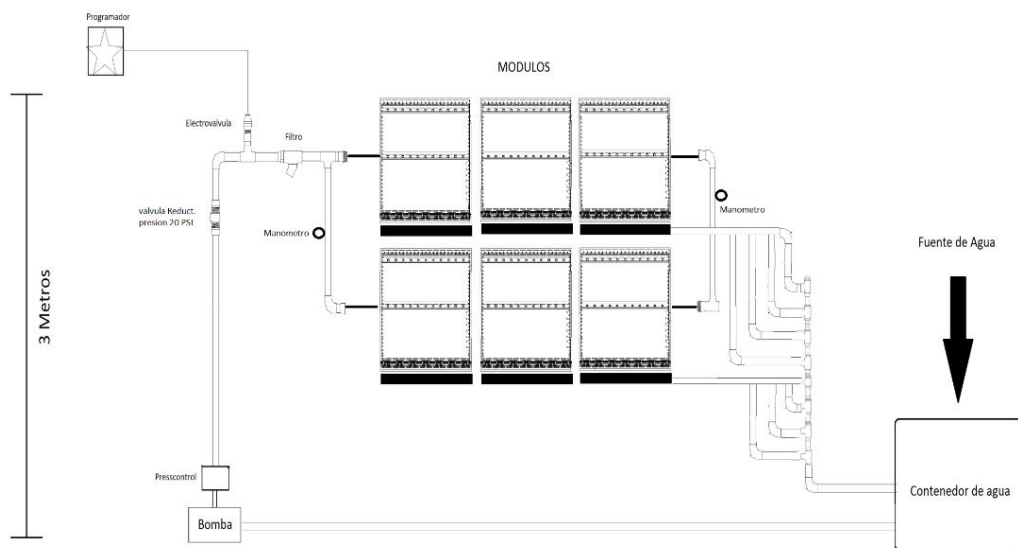
### **6.2.1 Green wall systems and location**

The test prototypes were 1m<sup>2</sup> green walls based on a drain-to-waste system, similar to commercially-available products. They were installed at the Rabanales campus of the University of Cordoba in Cordoba (Spain) (37°54'51.3"N 4°43'28.5"W) and were south facing (see Figure 1). The climate in Cordoba is warm and temperate, continental Mediterranean with a Köppen–Geiger classification of Csa. In the months of April through July, when the experiment was carried out, the temperatures ranged from a maximum of 45°C to a minimum of 7°C. The materials included six boxes without a back cover, constructed of silver aluminium plate with electro-welded wire cloth, and with a rear bracket for fixing them to an existing structure. (Gerhardt and Vale 2010). A drip irrigation system was used. The 16 mm-diameter polyethylene irrigation pipes were set in the upper and middle area of each module. In order to provide water to each prototype, 12 adjustable drippers of 4 l/h were installed in each module, 15 cm apart along the irrigation pipes, giving a total of 72 drippers

in the experimental green wall. The water drops in each row irrigated from top to bottom to ensure that all plants received sufficient water (Pérez-Urrestarazu et al., 2014). The experiment was set on a galvanized pipe structure in the shape of a goal post with 4 horizontal pipes on which to attach the prototypes, which were welded into place. It was located 5 cm away from the concrete wall of the animal experimentation centre of the University of Cordoba. The pipes were connected to a CRI mhb-3/03m horizontal centrifugal pump (H 24m, Q 3 m<sup>3</sup>/h, voltage 230V, AMPS 3.6), which supplied water to each of the green wall prototypes at the highest point above ground level. The pump was connected to a Rain Bird ESP RZX4i programmer, as shown in Figure 2.



**Fig 1.** Location of the green wall prototypes, University of Cordoba, Rabanales Campus.



**Fig 2.** Diagram of the prototype irrigation system for green walls.

### **6.2.2 Plantation, Irrigation and fertilization**

Two different species of plant material were used: *Lampranthus spectabilis* for its coverage and *Lavandula stoechas* as a larger flowering plant. The two species were selected taking into account the exposure to sunlight in the place where the green wall prototype was set up, and the ease of acquiring these plants locally. The planting density was 36 plants per prototype, in 6 rows  $\times$  6 columns, spaced equidistantly between the edges of the box. Plants were randomly assigned to each prototype but each prototype contained the same number of plants (Egea et al., 2014). The irrigation frequency was 5 times a day, every 3 hours (9:00-21:00), using 20 litres of water a day for each 1 m<sup>2</sup> module, in line with the water requirements of the plants. Fertilization was carried out along with the irrigation by adding N, P and K to the water, in the water container. The natural fertilizer guano was used for the flowering, once every 2 weeks. Since it was a green wall with a drain-to-waste system, a low dosage of fertilizer was used.

### **6.2.3 Growing media**

The first stage of an agronomic evaluation of a residue is to examine its characteristics in order to determine its physical properties (porosity, density, etc.) and physicochemical properties (pH, conductivity, etc.), since these are important factors that dictate how the substrate will subsequently be treated.

Three different types of substrates were used. Coconut coir and rock wool were chosen as their characteristics make them among the most widely-sold substrates for green walls in Andalusia, and rice husk was selected since it is a low-cost agricultural by-product with similar physicochemical properties to those of the "ideal", most-widely used substrate, sphagnum moss. The physical and chemical characteristics of the substrates were determined according to the methods proposed by Abad et al (2005), measuring pH, electrical conductivity, total dissolved solids, apparent density, bulk density and porosity (Table1).

Substrate	pH	Electrical conductivity dS/m	Total dissolved solids mg/L	Apparent density g/m <sup>3</sup>	Bulk density g/m <sup>3</sup>	Porosity %
<b>Rice husk</b>	7.245	431.5	275.5	0.098	0.61	84
<b>Coconut coir</b>	6.605	1332	852	0.105	0.35	70.7
<b>Rock wool</b>	7.195	83.5	53.45	0.093	1.29	92

**Table 1.** Physical and chemical characteristics of the substrates.

#### 6.2.4 Water analysis

Water samples were collected twice a day for the 10-week duration of the experiment. A sample of excess runoff water was taken from each of the green wall prototypes through the guttering located at the bottom of each prototype, which drained the water to each of the six duly labelled containers. The subsequent laboratory analysis was carried out with a portable CRISON multimeter MM40: pH, conductivity, Total dissolved solids, temperature.

#### 6.2.5 Statistical analysis

Differences in pH, electrical conductivity, turbidity, total dissolved solids of each of the treatments were examined by means of two-way ANOVA, after a test for normality and homogeneity of variances had been carried out, using the statistical package STATGRAPHICS® (Egea et al., 2014). The statistical analysis was carried out on the three substrates and the respective replications of each, where the substrate was denoted A and its replicate denoted B, resulting in a total of six prototypes:

- Coconut coir A and coconut coir B,
- Rock wool A and rock wool B,
- Rice husk A and rice husk B.

### 6.3 RESULTS AND DISCUSSION

#### 6.3.1 Statistical tests

An ANOVA table was generated to determine whether or not the group means differ significantly from one other, to which end an analysis of variance was carried out. Thus, the table divides the variance that exists in the n measurements into two components: “within group” and “between group”, which measures the variability of the different substrates.

Of particular importance is the F-ratio, which tests the hypothesis that the mean response for all levels of X is the same.

The results of the test for normality and homogeneity of variances are shown in Table 2.

<i>Source</i>	<b>pH</b>			<b>electrical conductivity (ds/m)</b>			<b>total dissolved solids (mg/L)</b>		
	<i>Sum of Squares</i>	<i>DF</i>	<i>Mean Square</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>DF</i>	<i>Mean Square</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>DF</i>	<i>Mean Square</i>
Between group	3.01501	6	0.502501	519.549	6	86.5915	206.593	6	34.4322
Within group	1.1117	63	0.017646	374.774	63	5.94879	137.473	63	2.18212
Total (Corr.)	4.12671	69		894.323	69		344.067	69	

**Table 2** – Anovas: pH, electrical conductivity and total dissolved solids.

The F-ratio, which was 28.4767 for pH, 14.5562 for electrical conductivity and 15.7793 for total dissolved solids, is the ratio between the estimated between-group value and the estimated within-group value. Since the P-value of the F-test is less than 0.05, there is a statistically significant difference between each of the means of the seven variables, at the 5% significance level (Table 2).

To determine which sample means are significantly different from the others, the following multiple range tests were performed (see Tables 3 and 4).

Substrate	Number of observations	pH		Electrical conductivity (dS/m)		Total dissolved solids (mg/L)	
		Mean	Homogeneous groups	Mean	Homogeneous groups	Mean	Homogeneous groups
Coconut B	10	7.424	X	23.040	X	14.746	X
Coconut A	10	7.458	X	23.080	X	14.781	X
WATER	10	7.488	X	28.560	X	18.289	X
Rice A	10	7.499	X	28.650	X	18.328	X
Rice B	10	7.527	X	28.830	X	18.453	X
Wool A	10	7.910	X	28.850	X	18.462	X
Wool B	10	7.956	X	30.110	X	19.099	X

**Table 3** – Estimated sample means for pH, electrical conductivity and total dissolved solids.

Contrast	pH			Electrical conductivity (dS/m)			Total dissolved solids (mg/L)		
	Sig.	Difference	+/- Limits	Sig.	Difference	+/- Limits	Sig.	Difference	+/- Limits
Water - Coconut A		0.030	0.118716	*	5.520	2.17971	*	3.543	1.32015
Water - Coconut B		0.064	0.118716	*	5.474	2.17971	*	3.508	1.32015
Water - Rice A		-0.011	0.118716		-0.090	2.17971		-0.039	1.32015
Water - Rice B		-0.039	0.118716		-1.550	2.17971		-0.810	1.32015
Water - Wool A	*	-0.422	0.118716		-0.290	2.17971		-0.173	1.32015
Water - Wool B	*	-0.468	0.118716		-0.270	2.17971		-0.164	1.32015

**Table 4** – Multiple range tests for pH, electrical conductivity and total dissolved solids

Where:

- **Count** – the number of observations  $n_j$ .

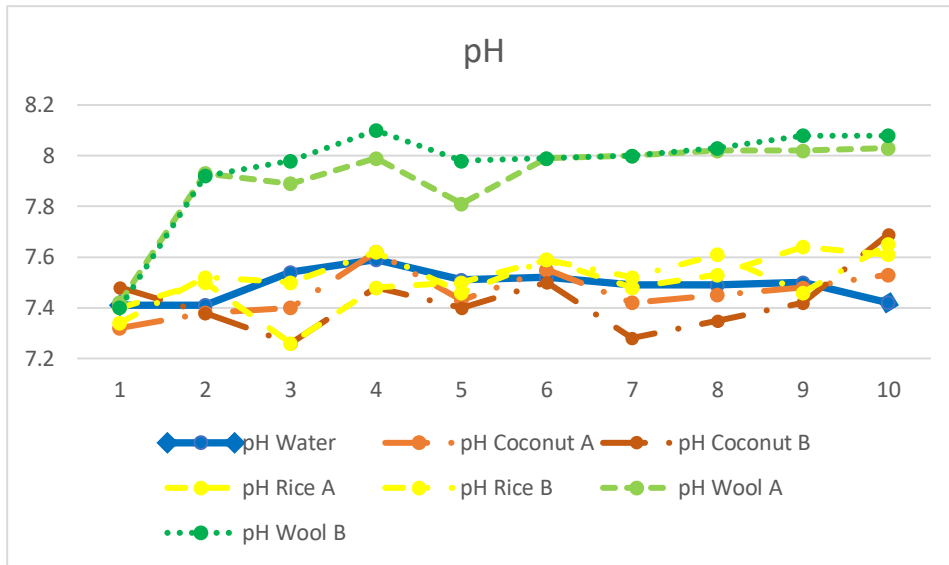


- **Mean** – the estimated sample mean  $\bar{Y}_j$ .
- **Homogeneous groups** - a graphical illustration of means that are significantly different from the others, based on the contrasts displayed. Each column of Xs indicates a group of means within which there is no statistically significant difference.
- **Difference** – the difference between the two sample means.
- **Limits** – an interval estimate of this difference, using the selected multiple comparison procedure

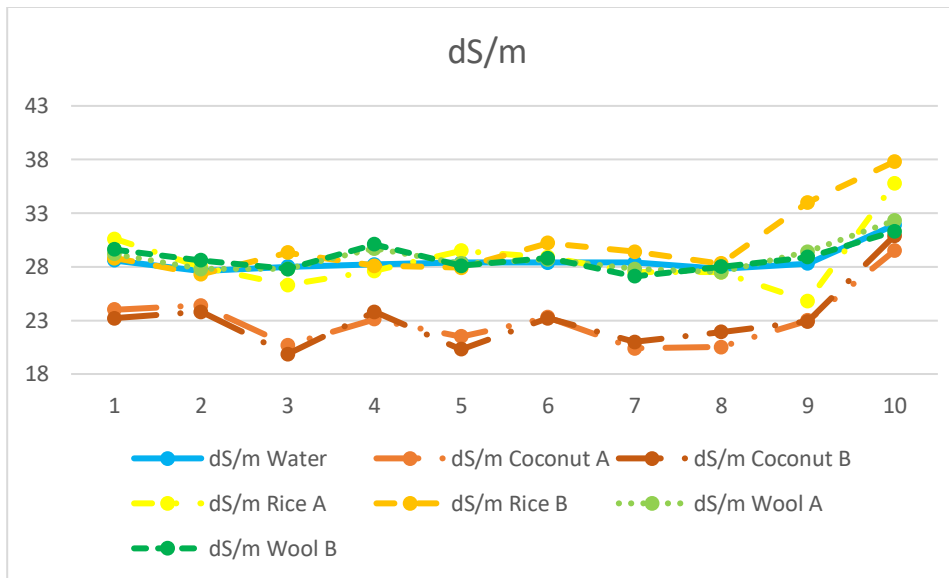
In Tables 3 and 4, the asterisk (weekly mean recorded over 10 weeks of collecting data on the water sample) indicates that these pairs show statistically significant differences at a 95.0% confidence level. Two homogeneous groups were identified in this table, according to the alignment of the Xs in the columns. There are no statistically significant differences between levels that are in the same column of Xs. The method used to differentiate between means is Fisher's least significant difference (LSD) procedure. With this method, there is a 5.0% probability of stating that a pair of means is significantly different, when in fact the values are equal.

This means that there are significant differences between the different substrates; for example, in the case of pH, the rock wool growing medium showed greater variation than the other substrates, while coconut coir differed significantly from the other substrates in terms of electrical conductivity and total dissolved solids. The multiple range tests showed that the substrates produced certain changes in the chemical properties of the water after it had passed through each of the prototypes, as compared to the water that was fed into the system. Figure 3 provides a graphical representation of the differences between the substrates under study.

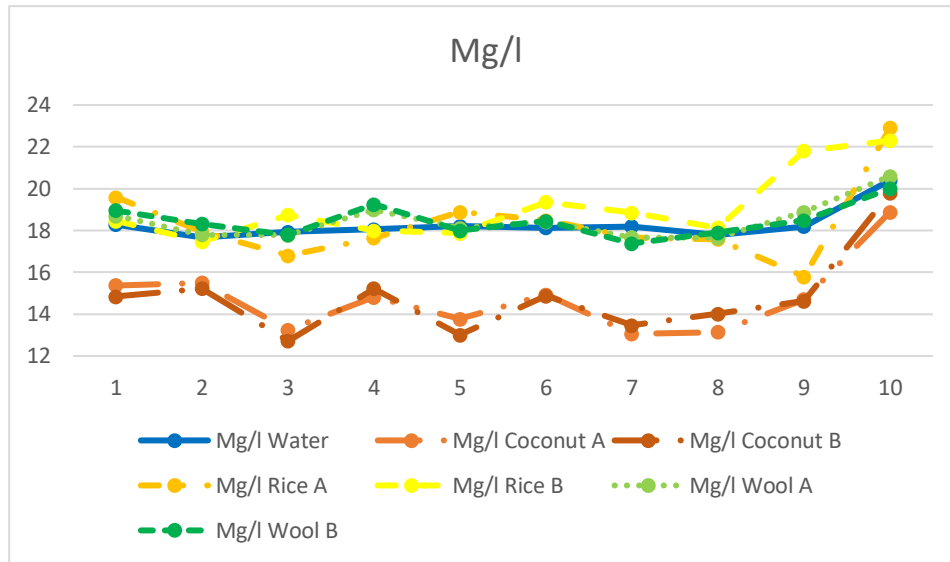
**a) pH**



**b) Electrical conductivity dS/m**



**c) Total dissolved solids mg/L**



**Fig 3.** Chemical properties of the water after passing through each of the prototypes, as compared to the water fed into the system, measured over 10 weeks a) pH, b) Electrical conductivity dS/m, c) Total dissolved solids mg/L

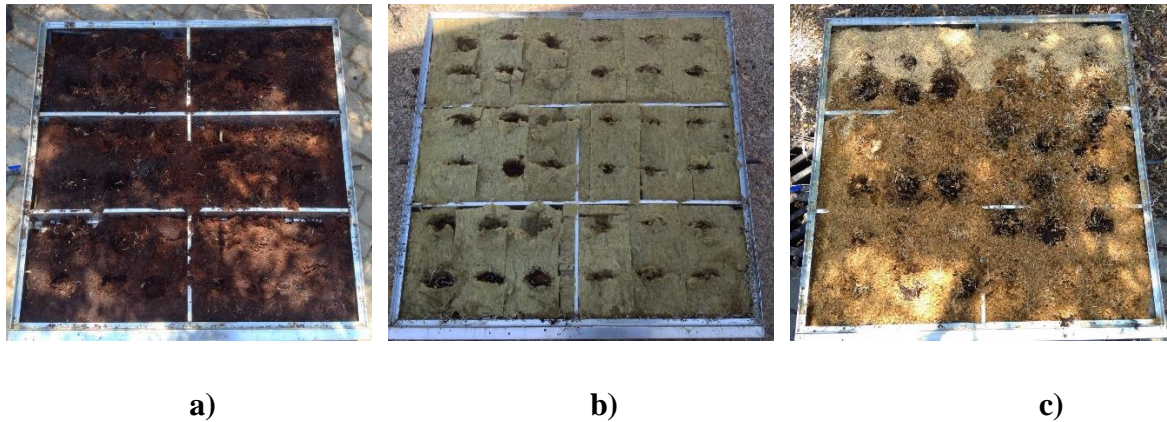
**6.3.2 Water distribution inside the prototypes**

Table 5 shows the duration of irrigation and discharge pressure registered in the run-off test for each substrate. In general, rice husk and rock wool showed shorter water retention times than coconut coir for the same discharge pressure and the same number of drippers. This can be attributed to the lower retention capacity of both rice husk and rock wool as a result of their physical characteristics (apparent density, bulk density, total porosity).

Substrate	Irrigation (Min)	Mean run-off (Min)	Drippers (l/h)	Pressure (kPa)
Coconut coir	20	9	4	100
Rice husk	20	3	4	100
Rock wool	20	5	4	100

**Table 5.** - Irrigation and run-off times for each substrate

The prototypes are built so that the front can be removed and the water distribution analysed for each substrate. This reveals greater uniformity of water distribution in the coconut coir substrate compared to the rice husk and rock wool substrates (Figure 4).



**Fig 4.** Water distribution inside the prototypes a) Coconut coir, b) Rock wool, c) Rice husk.

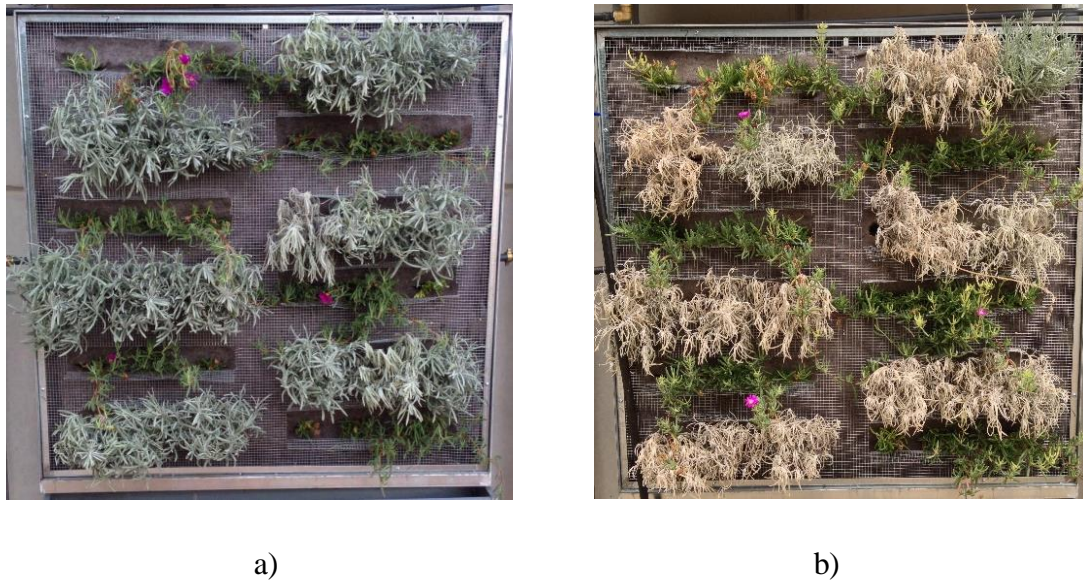
### 6.3.3 Plant development

The *Lavandula stoechas* did not survive through to second month of the experiment, in any of the prototypes. Bearing in mind that it was planted in May 2016 under normal climate conditions, with a notable increase in temperature over the following months of the experiment, it can be stated that this species is not suitable for green walls in conditions of direct exposure to sunlight and summer planting. This is despite the fact that, according to the literature (Avila, 2004), it has the same water requirements as *Lampranthus spectabilis* and is recommended for use in creating conventional gardens in the Andalusian region.

On the other hand, the analysis of the data on *Lampranthus spectabilis* revealed interesting results regarding its growth rate; although differences in growth were observed, these differences were not significant between the different substrates (Figure 5).

As for the observations regarding the quality of the plant material, chlorosis was observed to be setting in in the lower part of each prototype, where it was defined as the principal

pathology. This could have been due to the vertical positioning meaning that more water may accumulate in the lower part than in the upper part. The evaluation of the installation also showed rock wool to be the least viable substrate, particularly because of its poor malleability and the difficulty involved in its installation (Figure 6).

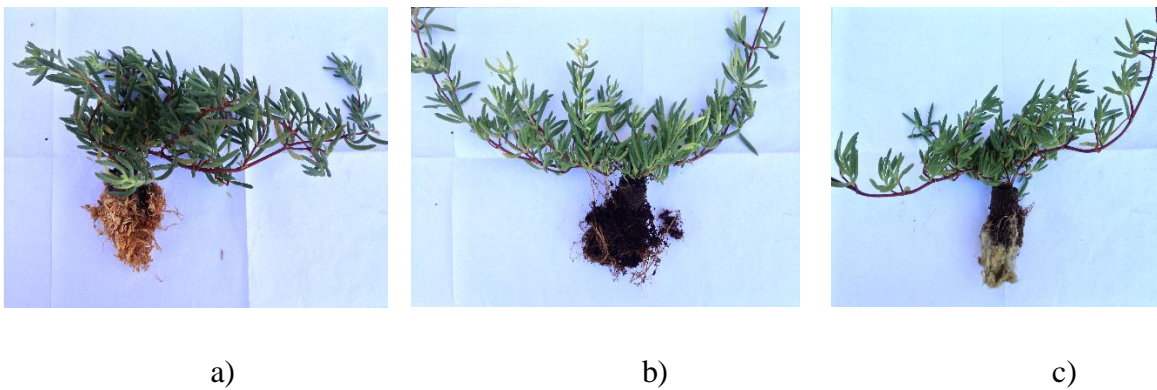


**Fig 5.** *Lampranthus spectabilis* y *lavándula stoechas* a) first month, b) two months after installation.

It should be borne in mind that the planting was done in summer and that this may have consequences in terms of plant growth, due to the extreme temperatures of the region that can negatively affect the development of the plant material. This was the case with the *Lavandula stoechas*, which did not survive the transplantation to the vertical garden and the direct exposure to the sun (Table 6).

1 Month	Coconut Coir		Rice husk		Rock wool		Total Dead plants
	Module 1	Module 2	Module 3	Module 4	Module 5	Module 6	
Lampranthus	0	0	4	0	0	0	4
Lavándula	8	6	7	2	5	6	34
2 Month	Coconut Coir		Rice husk		Rock wool		Total Dead plants
	Module 1	Module 2	Module 3	Module 4	Module 5	Module 6	
Lampranthus	0	2	4	1	0	3	10
Lavándula	11	15	13	9	12	9	69

**Table 6.** Analysis of dead plants during the experiment



**Fig 6.** Comparison between the three different substrates—a) rice husk, b) coconut coir, c) rock wool—with *Lampranthus spectabilis*, at the end of the test period.

As for the development of *Lampranthus spectabilis*, it was successful given that only 5% of plant material was lost in the three different substrates. Since there were no significant differences between them, it can be said that *Lampranthus spectabilis* successfully adapted to the coconut coir, the rock wool and the rice husk.

#### 6.4 CONCLUSIONS

Ornamental plants can be successfully grown using substrates based on agricultural by-products. Thus, materials such as rice husk and coconut coir, which are waste products, are shown to be acceptable substitutes for substrates conventionally marketed for the cultivation

of green-wall plants; the more commonly-used substrates are more expensive due to their scarcity in Andalusia.

From a landscaping perspective, the purpose of using the alternative substrates as growing media is to produce a quality plant with lower production costs. Furthermore, sourcing the substrate and disposing of it after use should not have a negative impact on the environment

It was observed that the rock wool and coconut coir substrates used in the experiment prototypes had a significant effect on the water characteristics, whereas the effect of the rice husk substrate was minimal. Rigorous quality control and testing of the physical and chemical characteristics of rice husk should be carried out prior to its use as a growing medium, as this is critical to ensuring its efficacy and performance in the construction of green walls.

In light of these initial results, it can be stated that rice husk is a valid substitute for the substrates conventionally used in green walls. The use of rice husk as a growing medium may yield better results than previously seen and it can therefore be employed in place of less sustainable substrates.

Mixing different types of substrates such as coconut coir and rice husk is recommended as a way of improving on their physicochemical characteristics for use as a medium in green walls. At the same time, this helps reduce the price of the substrate and lessens its environmental impact, since the use of coconut coir is complicated by the fact that it is not readily available in the province of Cordoba.

## **6.5 REFERENCES**

Abad M, Noguera P, Bures 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.. 2005. Physical Properties of Various Coconut Coir Dusts Compared to Peat. *HortScience* Vol. 40(7), 2138-2144.

Ávila, Alabarces, R. 2004. Manual de Riego de Jardines. E. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca. Sevilla, España, in spanish.

Egea, G., Pérez-Urrestarazu L., González-Pérez J., Franco-Salas A, Fernández-Cañero R. 2014. lighting systems evaluation for indoor living walls, *Urban Forestry & Urban Greening*, 13, 475-483.

Evans, M., Stamps, R. 1996. Growth of Bedding Plants in Sphagnum Peat and Coir Dust-Based Substrates, *Journal of Environmental Horticulture*, 14, 187-190.

Francis, A., Lorimer, J. 2011. Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls, *Journal of environmental management* 92 (6), 1429-1437.

García C., O, Alcántar, G., G., Cabrera, R. I., Gavi, R. F., Volke, H. V. 2001. Evaluación de sustratos para la producción de *Epipremnum aureum* y *Spathiphyllum wallisii* cultivadas en maceta, *Terra Latinoamericana*, 19, 3, 249-258, in spanish.

Genevini, P. 1997. Rice hull degradation by co-composting with dairy cattle slurry. *Soil Sci. Plant Nutrition* 43, 135-147.

Gerhardt, C., Vale, B. 2010. Comparison of resource use and environmental performance of green walls with façade greenings and extensive green roofs. SB10 New Zealand. Te Papa, Wellington, 1-12.

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, 31–41.

Köhler, M. 2008. Green facades - a view back and some visions, *Urban Ecosystem*, 11, 423–436.

Margot Franken. 2007. Gestión de aguas. Conceptos para el nuevo milenio. Plural editores, La paz, Bolivia, in spanish.

Manso, M., Castro-Gomes, J. D., Silva, P., Virtudes, A., Delgado, F. 2013. Modular system design for vegetated surfaces, a proposal for energy-efficient buildings, BESS-SB13 CALIFORNIA: Advancing Towards Net Zero. Pomona, California, USA. 24-25



Pérez-Urrestarazu, L., Egea, G., Franco-Salas, A., and Fernández-Cañero, R. 2014. Irrigation Systems Evaluation for Living Walls. *J. Irrig. Drain Eng.*, 140(4), 04013024.

Pérez-Urrestarazu, L., Egea, G., Franco-Salas, A., and Fernández-Cañero, R, 2014 Influence of different variables on living wall irrigation. 1st International Green Wall Conference.

Raji B, Tenpierik M.J., Dobbeltten A., 2015. The impact of greening systems on building energy performance: a literature review *Renew. Sustain. Energy Rev*, 45, 610–623.

## **7 CAPÍTULO 3**

**MICROCONTROLADORES Y MICROPROCESADORES DE BAJO  
COSTO PARA EL CONTROL AMBIENTAL EN MUROS VERDES.  
APLICACIÓN A UN SISTEMA DE RIEGO LOCALIZADO INTELIGENTE**

**LOW-COST MICROCONTROLLERS AND MICROPROCESSORS TO  
ENVIRONMENT CONTROL IN GREEN WALL. APPLICATION TO  
SMART DRIP IRRIGATION SYSTEM**

# **LOW-COST MICROCONTROLLERS AND MICROPROCESSORS TO ENVIRONMENT CONTROL IN GREEN WALL. APPLICATION TO SMART DRIP IRRIGATION SYSTEM**

Rivas-Sánchez, Y.A.; Moreno-Pérez, M.F.; Roldán-Cañas, J. Environment Control with Low-Cost Microcontrollers and Microprocessors: Application for Green Walls. *Sustainability* 2019, 11, 782

Doi: 10.3390/su11030782

## **ABSTRACT**

Green wall irrigation procedures are a particularly important and hard task, given that the quality of the green wall depends on them. There is currently a wide variety of irrigation programmers available, with a range of functions and prices, thereby replacing manual activities and making it easier to maintain green walls. This paper proposes the use of low-cost automated irrigation programmers via a freeware called Arduino. The system is based on air and substrate measurements to ensure optimal plant growth and high water use efficiency. At certain thresholds the irrigation system is activated. This not only makes irrigation more convenient but also helps to reduce energy consumption, increases irrigation efficiency and saves time. The data is then sent via TCP/IP protocol using Internet of Things technology, in this case ThingSpeak. The platform compiles the data and presents them in simple graphical format, thus enabling real-time monitoring from wherever there is Internet access. Together with Arduino, the project incorporates the Raspberry pi system that operates like a database via HTTP Wi-Fi received by a MySQL server using PHP. These data are used for the subsequent analysis of green wall performance.

## **Keywords**

Smart irrigation; Green walls; low-cost; Internet of Things; Microcontroller and microprocessor.

## **7.1 INTRODUCTION**

The current debate concerning climate change has encouraged the use of plants to help mitigate some of the problems associated with a lack of green areas in cities, such as rising temperatures (Bussi et al, 2016). This lack of green spaces has led to a reduction in evapotranspiration and the normal infiltration of water into the soil, creating a heat island effect in large cities. Green walls have proven to be of benefit by improving storm water management through water retention and evapotranspiration. There are, however, other potential advantages such as cleaner air, positive psychological effects, and aesthetic improvements. Green walls (also referred to as green façades or vertical gardens) provide a way of increasing green spaces in urban areas.

With the progress made in technology, the systems that we use daily have become ever-more automated, and green wall irrigation systems are no exception, given that this is a relatively recent technology that is still under development. There are various irrigation systems on the market that have already been tested and implemented (Sathiesh et al, 2016). Common drawbacks of these systems are that they tend to be expensive and often require the user to control the water pump in situ (Groener et al, 2015).

The need to improve the irrigation efficiency of green walls has resulted in the use of precision irrigation techniques. Precision irrigation scheduling is based on determining the irrigation needs of the green wall in real time and specifying a location. These measurements are recorded and used to activate the irrigation system when a threshold in the substrate water content is reached. Optimizing the number of sensors and distances between them is essential for obtaining representative estimations of the amount of available water in the substrate at wall level.

Monitoring the changes in substrate water content in green walls at different depths provides key information about the plants' water uptake rates and strategies. Variability between plants and heterogeneity of the substrate results in spatial variability of soil water content. Therefore, strategies to increase water efficiency require water content information with a high resolution in space as well as time (Oates et al, 2017).

The most commonly used equipment to monitor water in the substrate are soil water content sensors. These sensors, which are buried at different depths and in multiple locations, provide

useful data about water content in the green wall. Monitoring substrate water content, together with the data from other sensors, plays an important role in applications focused on the effective use of water in green walls. The number of sensors and the distance between them are key to ensuring representative estimations of the availability of water in the green wall substrate (Thalheimer, 2013).

There are currently high quality industrial devices available on the market; however, they are costly and complex, which has limited their adoption in green-wall technology. In response, alternative low-cost instruments have gradually been developed (Scudiero et al, 2012).

In any field experiment, regardless of its particular objective (in our case, green walls), air temperature and humidity are the environmental parameters that are measured frequently as they indicate conditions affecting plant phenology and growth. The need to take spatially distributed meteorological measurements, especially in complex sites such as green walls, has given rise to the development of low-cost sensors, which are increasingly used to achieve high spatial coverage (Hubbart et al, 2005).

Recent breakthroughs in open-source hardware components open the door to new ways of developing smart irrigation systems that can connect to transmission devices via the Internet, thus providing high space-time data coverage of substrate water and of other multiple sensors installed in the green walls (Jayaraman et al, 2006).

There is growing need for multiplier devices, together with the applicable technologies for storing, recovering, and remotely transmitting large volumes of data (Garcia-sanchez & Garcia-haro, 2011). The wireless transmission technologies reviewed (Ruiz-Garcia et al, 2009) include Zigbee and Bluetooth communication protocols and modem-based connections such as GPRS and GSM, often together with Internet applications (Pierce & Elliott, 2008).

The cost of data loggers and sensors limits the number of sensors and the frequency of measurements. Recent breakthroughs in the field of open hardware components provide fresh opportunities to develop measuring stations that can connect to wireless transmission devices to achieve high space-time data coverage with multiple sensors. The philosophy behind open-source hardware, like open-source software, is to provide free and transparent access to the

design of hardware, projects, and code so that users can easily share, customize, and update their systems (Fisher, 2012).

A UNO microcontroller is used and is programmed to detect the soil moisture levels or the presence of rain, and switch on the electro valve relay when the soil moisture content is below or surpasses the pre-set humidity threshold based on plant requirements or switch it off in other cases or when it is raining (Groener et al, 2015).

A microcontroller is an electronic device within a pod containing numerous components, such as resistors, condensers, etc., interconnected in such a way that it can autonomously execute a series of instructions specified beforehand by a programmer. The microcontroller is the primary component of the processing and control circuit (Artero, 2016).

Arduino microcontroller, which is a physical open-source IT platform for developing interactive autonomous objects or objects which connect to the computer, can be used. With Arduino both hardware and software are open source (Banzi y Shiloh, 2016). A Raspberry Pi processor was also used, which stored the data from the three-month experimental period for the subsequent analysis of the development of the green wall. The project provides guidelines for reproducing and updating a low-cost, customizable smart irrigation system for green walls. It depends on open-source ideology, through which information can be shared about the design of equipment and software, thus facilitating the adoption and ongoing improvement of technologies currently available on the market (Ray, 2016).

With the Arduino UNO chip, all the electronic components and software to program the microcontroller are available for free. The user-friendliness and simple programming are in keeping with the affordable prices of the electronic components, thus forming part of the so-called democratized technological practice (Tanenbaum & Williams, 2013).

The automation system will analyze the sensors and communicate the information collected via the Internet, where it can be easily browsed in real time in a graphic format through the ThingSpeak.com.

An essential aspect of this project is the web server; in this case, one of the most popular Internet infrastructure systems, LAMP, is used. The name is taken from the acronym for Linux, Apache, MySQL, PHP. It will operate on the Raspberry Pi (Monk, 2015).

The platform is equipped with low-cost dielectric sensors currently available on the market, which further reduces the cost of data acquisition. Measurements taken from a number of sites are therefore more affordable, enabling an increase in time-space data density required for applications aiming to save water in green walls. Therefore, the decision was made to use the Internet of Things (IoT) technology on green walls and their irrigation systems and thus to be able to view the data in real time. The aim is to ensure that the green wall is connected to the Internet and is accessible from anywhere and by anyone who so wishes. The application of the Internet of Things in precision irrigation can save money and maximize the performance of green walls.

The main objective of this work is to create an automated irrigation system that is remotely supervised and controlled from any mobile phone, computer, or tablet with internet connection using low cost materials that are easy to program, install, and acquire as Arduino UNO and Raspberry Pi systems, which are responsible for automating irrigation and collecting environmental data for green wall prototypes. Our hypothesis was to be able to implement low-cost sensor technology to green wall systems.

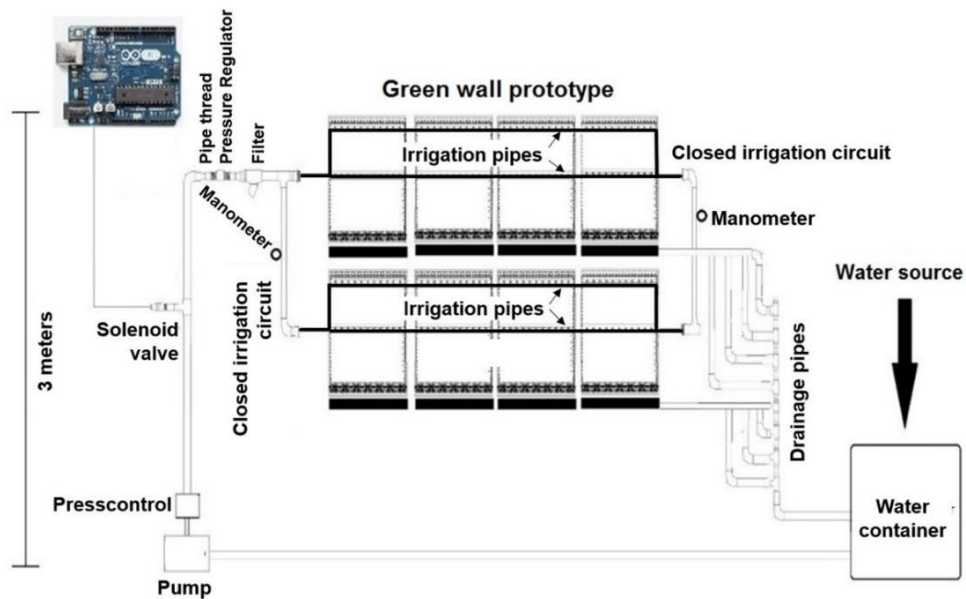
## **7.2 MATERIALS AND METHODS**

### **7.2.1 Green Wall Prototype Structure**

The green wall prototype consists of 8 open-backed boxes made using aluminum sheeting with electro-welded mesh, and with a rear bracket for fixing them to an existing structure. The prototypes boxes are 1 m<sup>2</sup> by 10 cm deep. They have been completely filled with two different types of substrates, four with sphagnum moss and four with coconut coir and rice husk, south-facing green walls similar to commercially available products. The green wall prototype was anchored in place next to the wall of a building with a 5-cm separation to allow

for air to freely circulate behind. They are located on the Rabanales Campus at the University of Cordoba, Spain (37°54J51.3” N 4°43J28.5” W).

The green wall prototype uses a drip irrigation system. The irrigation pipes are in the upper and middle areas of each module, with 4l/h adjustable drippers every 20 cm along the pipe. The pipes in each of the rows will irrigate from the top down to ensure that all the plants receive sufficient moisture. The pipes are connected to an irrigation pump controlled by a relay, which will enable it to supply water to each of the green wall prototypes positioned at the highest point above ground level, as can be seen in Figure 1. Two different species of plant material were selected based on the similar water requirements, *Lampranthus spectabilis* and *Aptenia cordifolia* (Ávila, 2004), taking into account the exposure to sunlight in the place where the green wall prototype was set up and the ease of acquiring these plants locally.



**Fig 1.** Layout of the green walls.

### 7.2.2 Environmental Control System

As can be seen in Figure 2, the environmental control system of the variables that control irrigation are the following:



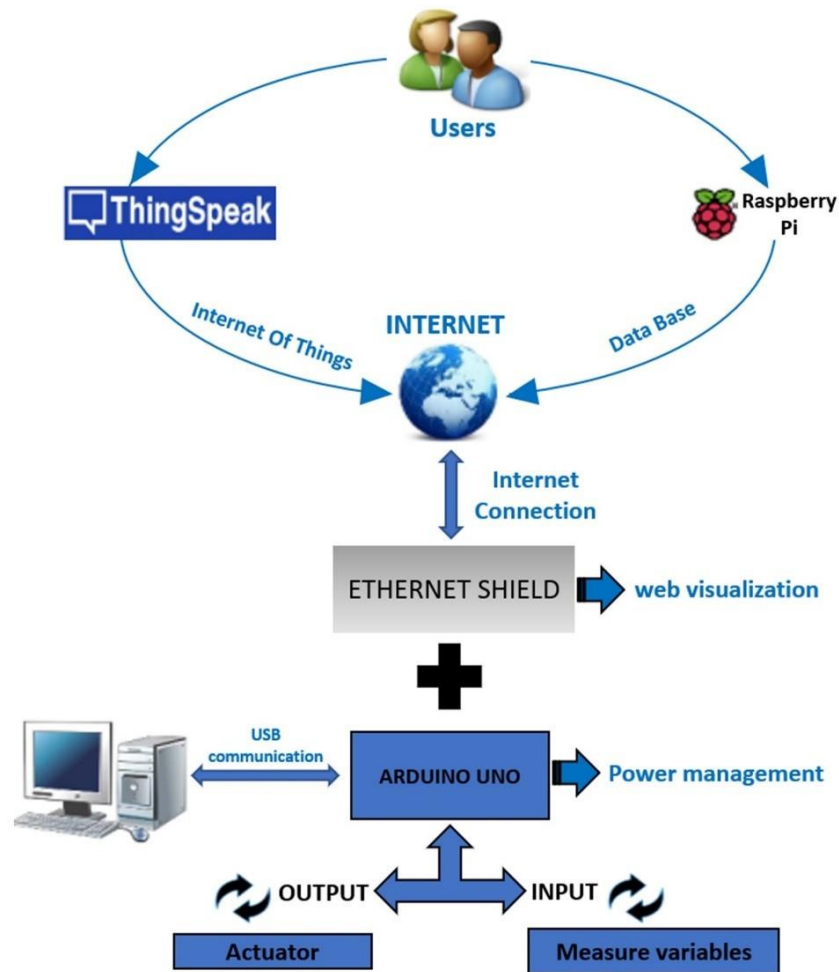
Arduino UNO is made by Arduino® (<https://www.arduino.cc/>) and is a small microcontroller based on the ATmega328 microchip and a development environment for writing of the software onto the board. Arduino can be used to interact with objects and/or a wide variety of switches and sensors to control motors and other physical outputs. The experiments carried out using Arduino can be independent or communicate with software that is executed via a computer. The boards can be hand mounted or purchased ready for use (Blum, 2014).

Open-source Integrated Development Environment (IDE) is the term given to a set of software tools that enables programmers to easily and conveniently develop their own programs as it can be executed from Windows, Mac OS X, and Linux (Calaza, 2014) and downloaded free of charge. The program comes with a specific set of instructions, all suitably ordered and grouped together to achieve a particular outcome.

The boards are programmable, which means users can permanently write to memory until a new program is recorded, namely the program that we want the microcontroller to execute. It runs in a Java environment and is based on the avr-gcc process, which is also open source.

The Ethernet Shield board is an extension Shield for the Arduino and is used to create web displays of the automating as it can connect to a cabled TCP/IP network. Just plugging the module onto the Arduino UNO Board. This is achieved thanks to a W5100 chip incorporated into Shield. The code of our program was configured using a program library called Ethernet, that by default is part of the official Arduino language (Artero, 2016).

ThingSpeak was the website used for the Internet of Things for the simplicity of its programming and its popularity with API (Application Programming Interface) and applications for the sending and storage of data from the sensors using HTTP via the Internet or via a LAN. ThingSpeak was used to build applications to record the data from the sensors during the experiment. The ThingSpeak channel used 179863, allows up to eight fields such as relative humidity, temperature, soil moisture, flow of water, and location of the experiment. The MATLAB App was also incorporated for numerical computation to allow users to analyze and display the data with greater ease (Hertzog & Swart, 2015).



**Fig 2.** Layout of the Environmental Control System for green walls.

Raspberry Pi model B made for raspberry foundation is a microprocessor manufacture in the UK, equipped with a Broadcom BCM2835 chip with an ARM processor up to 1 GHz, GPU VideoCore IV and 512 MB RAM. The project used Raspbian, a Linux delivery system based on Debian. The model chosen was the Raspberry Pi B+ with HDMI and RCA video output ports, mini audio jack, as well as a USB 2.0 port to which we connect a mini Wi-Fi antenna for the reception of data sent from Arduino. To store data in the Raspberry Pi, an 16GB class 10 SD card was used (Blum, 2014).

The Raspberry Pi is located at the university facilities, given that it uses the same Wi-Fi network as Arduino, and is not required to be located next to the green wall and exposed to the outside elements. Users can access the database from any terminal via an IP address provided by the University server.

The data collection system of the green wall prototype was programmed with LAMP, an acronym that stands for “Linux, Apache, MySQL, and PHP,” which is a common server configuration for many web applications. LAMP is an open-source web development platform with Linux as its operating system, Apache as the web server, MySQL as the RDBMS, and PHP as the object-oriented script language (Dennis, 2013).

Apache is a web server application that can be installed on the Raspberry Pi so that it can serve web pages. On its own, Apache can serve HTML files via HTTP and, with additional modules, can serve dynamic web pages using programming languages such as PHP (Dennis, 2013).

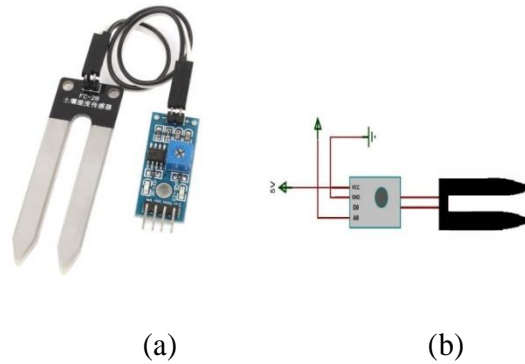
PHP is the code that is executed when the server receives a web page request. Upon execution, PHP determines what needs to be shown on the page, and then sends the page to the browser. Contrary to static HTML, PHP can show different contents under different conditions (Golden, 2013). Two PHP files were created: config.php and iot.php. The config.php file contains the information required to make a connection with the database. The iot.php file oversees uploading the data received from the sensors database. Data is sent via a GET request.

MySQL is an open-source relational database management system (RDBMS) based on Structured Query Language (SQL). MySQL works on multiple platforms, including Linux, UNIX, and Windows. Although it can be used in a wide range of applications, MySQL is more associated with web-based applications and on-line publishing (Tanenbaum and Williams, 2013).

### **7.2.3 Environmental Sensors**

Soil moisture was measured using two FC-28 soil moisture sensors (Arduino Accessory) in each green wall module. The FC-28 moisture sensor detects moisture in the soil and generates a value based on the level of moisture (See Figure 3). The sensor operates between 3.3 and 5 volts and has the LM393 which is an analog voltage comparator chip, as a small voltmeter with integrated switches to deliver both digital and analogue values, if a greater precision is required. The sensor has a pair of electrodes which are pushed into the substrate. The sensor incorporates an LED in the board that directly shows if the soil moisture level is above or

below the predefined threshold (Bajer & Krejcar, 2015). The fundamental principle is to facilitate the recording of voltage values, in our case analogue values, which are used to estimate the soil moisture levels



**Fig 3.** (a) FC-28 soil moisture sensor; (b) Schematic sensor design.

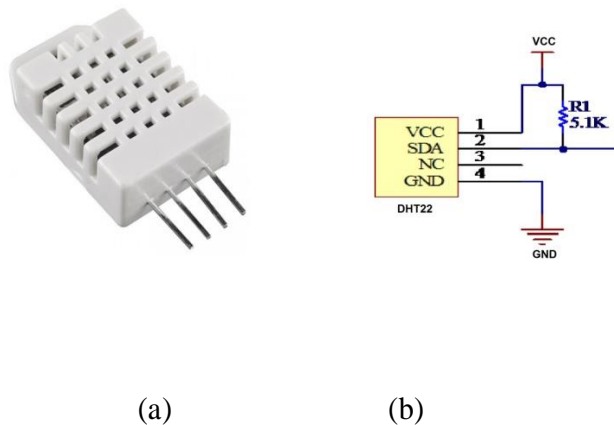
Two FC-28 soil moisture sensors are positioned in each green wall module, one in the upper part and the other in the lower part to record moisture levels in both parts. The lower part of the 1-m<sup>2</sup> prototype tends to have more water than the upper part of the module, for a total of eight FC-28 sensors in four different modules of the experimental green wall.

The FC-28 soil moisture sensors measure the volumetric substrate water content by measuring the dielectric constant of the soil. This varies according to water content, however, not all substrates share the same electrical properties due to variations in soil density, mineralogy, texture and salinity. Factory calibration of the soil moisture sensors has an accuracy of  $\pm 3\text{--}4\%$  for most mineral substrates and approximately  $\pm 5\%$  for growing substrates such as sphagnum, coconut coir etc. Nevertheless, accuracy increases to  $\pm 1\text{--}2\%$  for all substrates with specific soil-type calibration (Czarnomski et al., 2005).

It is recommended that users of the FC-28 carry out a specific soil-type calibration to get the most accurate volumetric reading for the water content. Studies carried out by Czarnomski et al. (2005), show that specific soil-type calibration of the sensors achieves comparable performance results to those of commercial sensors but at a much more affordable price. The calibration of the soil moisture sensor was carried out on laboratory using standard sensor calibration procedures (Starr y Paltineanu, 2002).

From the calibration performed, four different value ranges were defined according to the soil moisture in a range of 0 to 1000 mV: where from 0 to 370 (very moist substrate), from 370 to 600 (moist substrate), and from 600 to 800 (dry substrate), and from 800 to 1000 (totally dry substrate).

The air temperature and relative air moisture parameters should be considered when setting up an outdoor green wall. Relative humidity and temperature are measured using a basic digital low-cost DHT22 sensor using digital output as can be seen in Figure 4. It uses a capacitive moisture sensor and a thermistor to measure the surrounding air sending a digital signal to the Arduino data pin (Laskar et al, 2016). The connections are simple, an initial 3-5V pin, the second pin for data input, and the pin furthest to the right, the Ground. The features are as follows: measuring temperature between  $-40$  and  $125$  °C, with an accuracy of  $0.5$  °C, moisture measurement between 0 and 100%, with an accuracy of 2–5% and the sampling frequency of two samples per second (0.5 Hz) (Bitella et al, 2014).



**Fig 4.** (a) DHT22 temperature and relative humidity sensor; (b) Schematic sensor design.

The DHT22 sensors cannot be calibrated, but the specification ensures sufficient precision for this project and accuracy. Although there are different articles available on the web that appear to be about the same device, there is no guarantee that they are all from the same manufacturer. So, to verify this, four DHT22 sensors were tested in the laboratory and the

results showed no significant differences. It should be remembered, nevertheless, that the accuracy of these sensors can vary over time.

The light dependent resistor (LDR) is the sensor used to determine the light intensity that is reaching the green wall (see Figure 5). It is a component whose resistance varies considerably with the amount of light it receives (Mohanraj et al, 2016). With a 220-ohm 1/4 W resistance, it is possible to share the voltage supplied by the source between the terminals. The analogue-digital conversion is carried out by converting the magnitude of light that shines on the green wall to a digital signal to facilitate handling by Arduino and to be able to numerically process it (Artero, 2016).

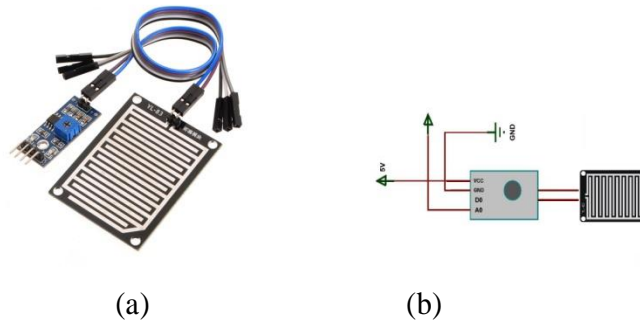
The photo-resistor is calibrated by determining the maximum and minimum light intensity readings, taken in situ, thus setting ranges of <10% (totally dark), between 10% and 30% (low light), >30% (ample light), ready for subsequent programming.



**Fig 5.** (a) Light dependent resistor (LDR) photo-resistor; (b) Schematic sensor design.

The YL-83 Rain Sensor detects rain drops and subsequently carries out specific operations such as switching the system off when it rains. For this paper, a YL-83 sensor was used given that it is a low-cost sensor that is easy to use and program. This module consists of a series of conductive strands printed onto a Bakelite plaque. The separation between the lines is very small as can be seen in Figure 6. What this model does is create a short-circuit each time it rains; the water generates a low resistance between the lines with a positive polarity and the lines connected to the ground (Artero, 2016). The current that flows through

these lines is subject to 10 k $\Omega$  resistance in each conductor, which stops the short-circuit from damaging the Arduino when the plaque gets wet.



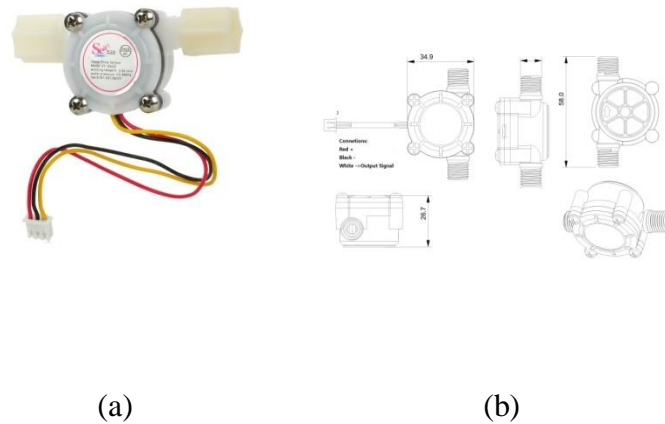
**Fig 6.** (a) YL-83 rain sensor; (b) Schematic sensor design.

As the YL-83 rain sensor is only configured to switch the pump off if it rains, it was calibrated with the values (ON/OFF), such that the pump would be switched off when water is detected on the sensor.

The DHT22 moisture and temperature sensor, the LDR Photo-resistor and the YL-83 rain sensor were installed in close proximity to the green wall to capture the environmental conditions of its surroundings. The sensors were protected by a plastic container given that they are open to the elements and are susceptible to malfunction due to the weather conditions, such as the rain and the sun. Readings are taken every five minutes by Arduino (Ceballos et al, 2015) located at 2 m in a weather-resistant compartment, where signals are received via basic 3.5 mm stereo jacks attached to the wall of the compartment and then sent via the Internet to the database (Ripoll et al, 2019).

The YF-S402 water flow sensor measures the flow of water in the green wall prototypes during the experiment, and indicates the level of green wall water consumption and therefore the moisture retention of the different substrates by closing the water balance (see Figure 7). Accordingly, four water flow sensors were positioned in the water collection system of four different green wall prototypes. The sensor consists of a magnetized blade which, when rotated by the flow of water, stimulates a magnetic sensor found on the other side of the tube.

Using this system, the sensor can measure the number of rotations made by the blade, which depend on the amount of the circulating flow (Oxer y blemings, 2009).



**Fig 7.** (a) YF-S402 water flow sensor; (b) Schematic sensor design.

Calibration of the flow sensors was carried out volumetrically in the laboratory, taking a known reference volume and analyzing the rotations of the Hall sensor. The YF-S402 flow sensor registered 14 pulses per liter of water which will be used for programming all the sensors, since no differences were found between the four flow sensors analyzed.

A calibration procedure should be carried out to ensure greater precision. Even if not required, it is important to do so to improve performance and to check that everything is working properly. The sampling rate is determined by performing several tests to see how many pulses are emitted using a known volume of water. The experiment is repeated several times to obtain an average. A total of six analyses were carried out: three tests with 500 mL and three with 1000 mL, as can be seen in Table 1.

Test No.	Volume	Pulses
1	500 mL	422
2	500 mL	430
3	500 mL	427
4	1000 mL	840
5	1000 mL	854
6	1000 mL	845

**Table 1.** Water flow sensor calibration tests..

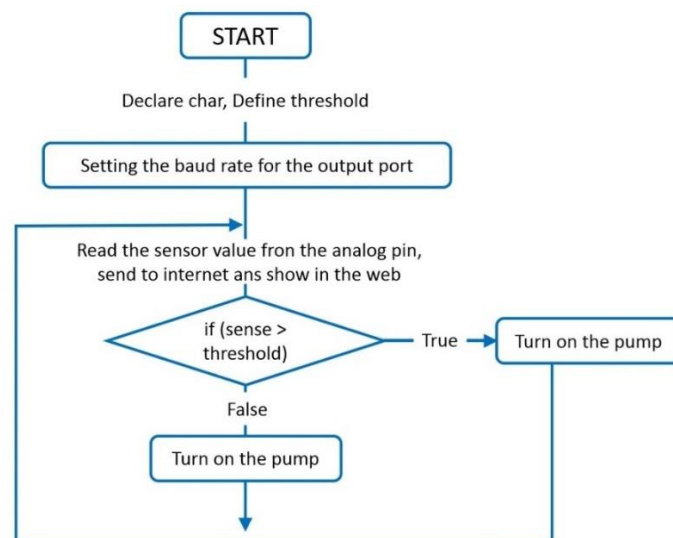


For each litre of water that passed through the YF-S402 flow sensor, approximately 850 pulses were recorded, which equals 14.1 pulses / sec or 14 Hz.

The Relay Actuator is a sensor that enables Arduino to control charges at much higher voltage or intensity levels than its electronic components can handle. In our experiment, a relay was used that switched on the electrovalve of the pump to control the automated irrigation in the green wall (Jiménez-Carvajal et al, 2017).

A diode connected to the 5V power supply is used to protect the control part of the circuit when an inductive charge is converted.

Similarly, a relay is a “switch” that is independently activated when it receives signals from Arduino when the soil moisture sensors or the rain sensor surpass the established threshold in its programming. This allows for an efficient use of water using sensors and actuators, only irrigating when the green wall substrate is dry or slightly moist (Srbinovska et al, 2015), as we can see in the flow diagram of the Figure 8.



**Fig 8.** Flux diagram of the pump control.

### 7.3 RESULTS

As already stated above, the monitoring system displays the readings of multiple sensors for the measurements and the remote transmission of data, such as the soil water content, together with other relevant parameters about the green wall and the atmosphere.

The developed environmental control system allows intelligent irrigation through its automation. Controlling the data relative to the moistness of the green wall substrate and the climatic characteristics of its environment will have the necessary information to adopt the appropriate management measures such as the remote control of the drip irrigation system. Users would therefore be able to control the microenvironment of their green wall and consequently increase green wall production and quality.

The integrated use of micro-controllers, sensors and actuators optimizes the green wall drip irrigation system, given that it reduces water and energy consumption as users can check green wall water content in real time whenever they choose. Such a solution also optimizes the quality of the plant material growing on the green walls and may result in operational savings in green wall maintenance in the future.

In the Figure A1 it can be observed a real-time display of the measured variables on the green wall from the APP installed on a mobile device. This display system allows knowing at all times the status of the green wall, in terms of water needs, lighting, evapotranspiration etc, and therefore decision-making in real time, being able to access from any terminal by means of connection to Internet and without needing to go to the place where the green wall is located. It was also possible to know what was happening in a certain part of the green wall, for example if the water was reaching a specific area or if this area where different species have been planted require a greater amount of water or lighting and this way to adequately manage the necessary requirements for the green wall.

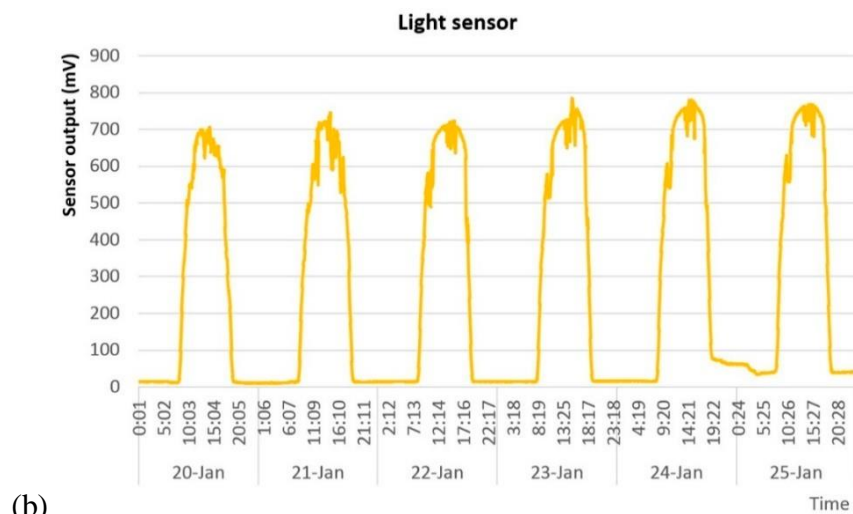
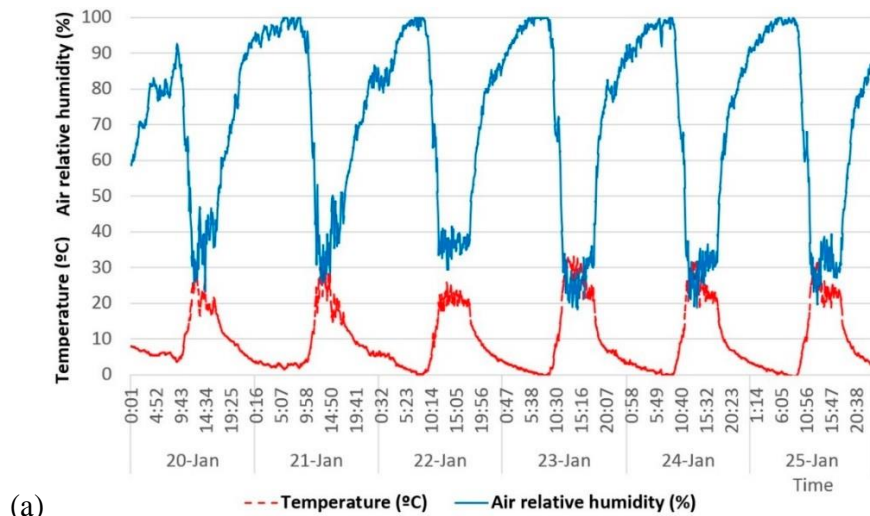
As you can see in Figures A2 and A3, the Arduino UNO platform is a very affordable solution to automate the irrigation of green walls, since there are no important functional problems with the control of the actuators, the measurement of the sensors, the screen web, or with the database.

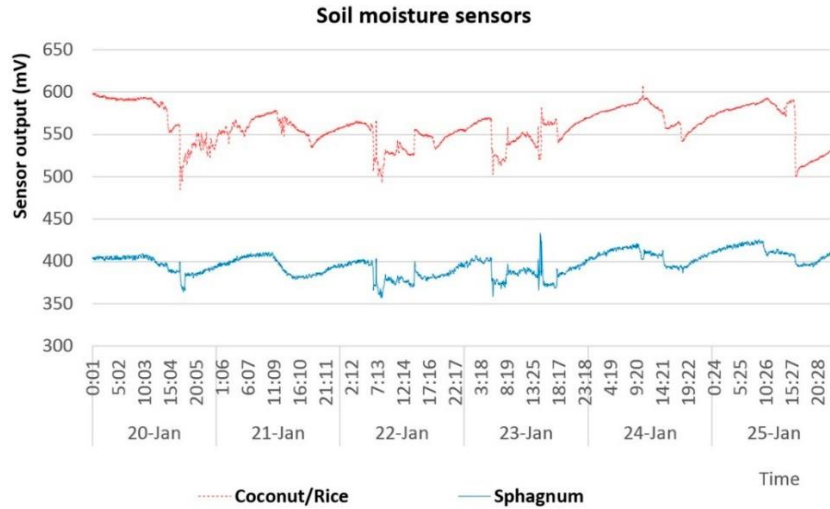
In addition to sending data to the ThingSpeak web page, our data collection system is able to store and have data available for as long as necessary by using MySQL, and thus we were able to do an analysis during the entire time that the wall green was established. The storage system used is quite friendly, since it is both easy to understand and program, allows adding

more sensor data, and has an organized data storage, offering other information such as date and time of each data sending and name and location of the sensor.

## 7.4 DISCUSSION

The Figure 9 shows the evolution of the readings taken during several consecutive days by the sensors of temperature and relative humidity of the air, humidity of the soil and precipitation. As can be seen, the outputs correspond to the expected responses of the sensors, that is, maximum values of humidity of the air in hours in which the temperature reaches its minimum, maximum readings of light at noon, as well as the fluctuations of the humidity of the substrate in response to the irrigation.



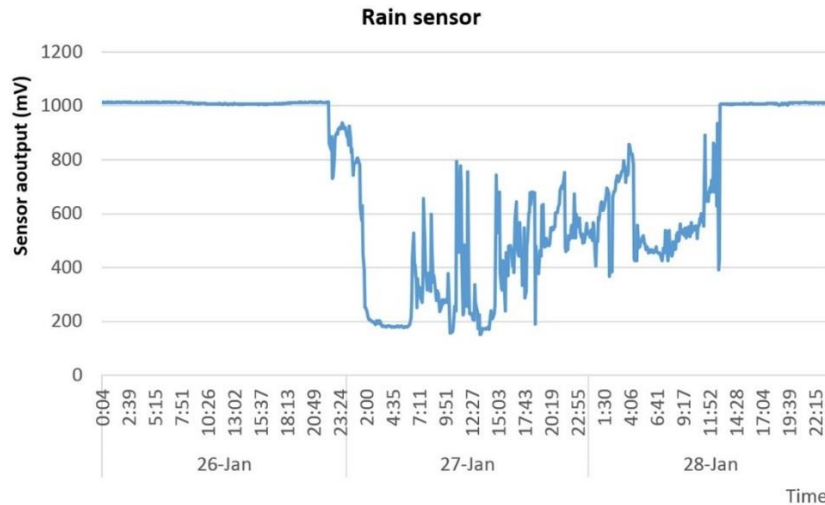


(c)

**Fig 9.** Sensor data of (a) temperature and relative humidity, (b) light, and (c) soil moisture.

As a fundamental part of the irrigation management in the green wall, it was tried to maintain the humidity of the substrates around a certain value in order that the plants developed in them could grow without problems. In the case of the coconut coir/rice husk substrate, with more draining characteristics, it was tried to maintain values within the range 500–600 mV, while for the sphagnum, material with greater capacity of water retention, the used interval was 370–450 mV.

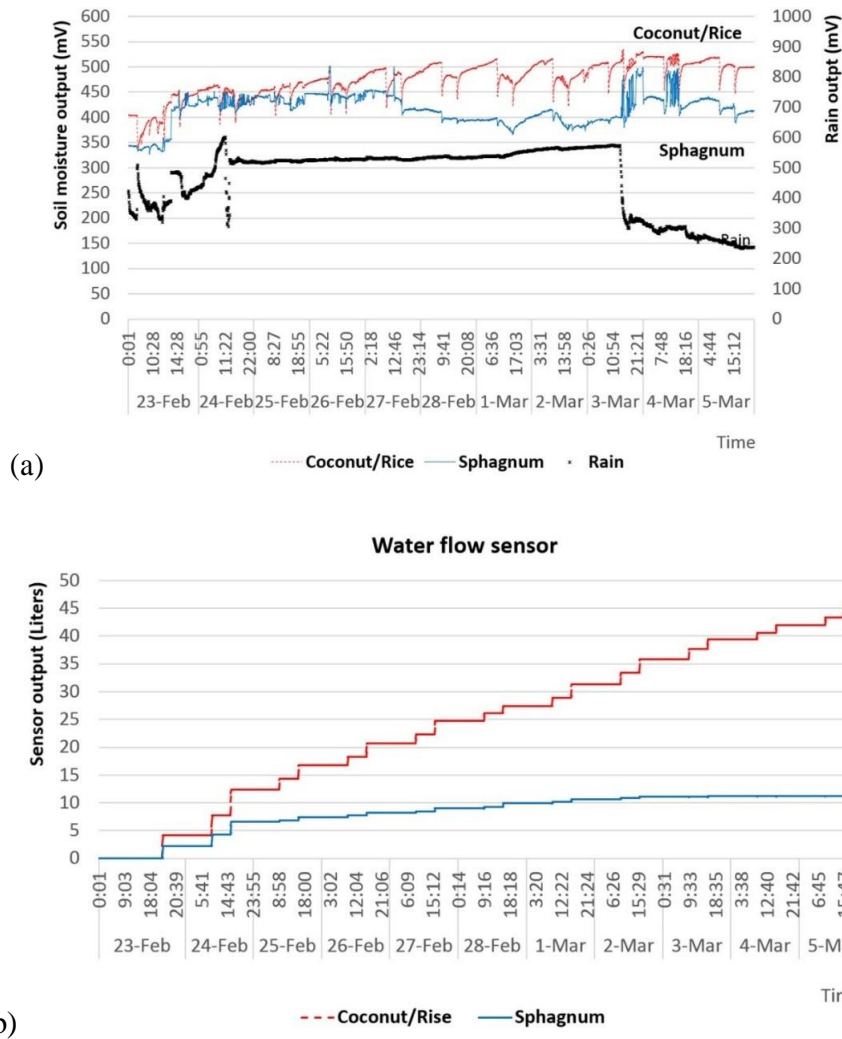
The Figure 10 show the data measured by the rain sensor during a rainfall recorded on January 26 to 28 in which 17.2 L/m<sup>2</sup> were collected according to the weather station located in the vicinity (37°51J25JJ N, 04°48J10JJ W).



**Fig 10.** Sensor output of rain.

Finally, the Figure 11 shows the measured moisture values in of the substrates together with the values obtained by the rain sensor, as well as those measured by the water flow sensor during several consecutive days in which two rain events were produced.

As can be observed, as a consequence of the precipitation produced during the 23rd and 24th of February, the moisture content of the substrates is equalized, re-separating after the cessation of the rain, due to the maintenance of the irrigation strategy established. However, on March 3, after another rainy event, the moisture values of the substrates are again equalized. At the same time, the water contained in them is drained, being able to observe how the substrate formed by coconut coir and rice husk, being more draining, produces more runoff, while the volume of water drained by the sphagnum is significantly lower.



**Fig 11.** Sensor data of (a) soil moisture and rain and (b) water flow.

The main contributions of our work have been to use different types of sensors to control an automatic irrigation system. While other authors, such as (Oates et al, 2017 - Bajer & Krejcar, 2015), have only used soil moisture sensors, in our case we also used the rain sensor for the irrigation, as well as the storage in a microprocessor. Also, while other authors such as (Groener et al, 2015 - Fisher, 2012 - Bajer & Krejcar, 2015 - Bitella et al, 2014), have used storage in SD cards or just direct delivery to web pages, in our case we used our own storage system as a relational database management system MYSQL, to have a better and more storage of data for its later analysis. Also, the project uses a web easy to understand for the user which graphs in real time the data. Finally, the system was applied in green walls which

is a system of difficult access because of their location, giving a new use to the system of sensors of low cost.

The total cost of the irrigation system and the database was about €58 (See Table 2), making it less expensive compared to commercial components like the system used in the prototype, which are around €200 without an Internet connection or approximately €400 with one. Field installations require other essential equipment such as plastic tubing, Ethernet cable, a weatherproof electric cabinet and clamps. These costs (which together, on average, come to under €50) are not listed in detail as different materials can be purchased depending on size requirements and the estimated development timeline of the green wall.

Sensors	Measurement	Use	Cost (€)
Arduino	Microcontroller	Control sensors	12
Shield	Arduino extension	Internet connection	12
DHT22	Humidity and relative air temperature sensor	Agronomic and irrigation	3
YL-83	Rain sensor	Agronomic and irrigation	2
FC-28	Soil moisture sensor	Hydrology, soil physics, irrigation	8
Photo-resistor	Light intensity	Agronomics, plant growth and phenology	1
YF-s402	Hall flow sensor	Agronomics, hydrology and irrigation	5
Raspberry pi	Microprocessor	Data processing	15
Total			58

**Table 2.** Alternative irrigation system prices.

## 7.5 CONCLUSIONS

In this experiment, the Arduino microcontroller was used for very specialized applications that were adapted to the we need ins this project, enabling constant monitoring of environmental parameters, such as temperature, relative humidity, hours of sunlight, soil moisture, and flow of water, to ensure ideal conditions for the green wall.

Choosing low-cost equipment does not mean reducing measurement costs per se; rather, it means that a greater data density is achieved for the same value as a high-quality sensor. As a result, showed in our experiment, the space-time variability of the green-wall development and processes can be better covered.

Given that the prototype is located at the university, a cable connection is used, though as a general guideline. We suggest implementing a wireless system, for future research orientations. In this way, Wi-Fi or GSM systems can be installed in different places where there is no access to wired internet, and more sensors can be added covering more extensive areas to have a more localized control of irrigation.

Our experiment can be applied to any environmental control system, with precision irrigation being one of the most important since it improves the management of water resources in areas with little water.

The existing setup can be expanded in several ways: it is possible to add new sensors like CO<sub>2</sub>, barometric pressure, conductivity “nutrients,” water temperature, soil temperature sensors, communication modules, etc; at the same time, users can decide how the information will be stored or transmitted; they can also set up the Raspberry Pi to store and transmit information considering a specific time interval and also select the accuracy of data. Therefore, the solution could be adapted to another’s environmental projects.

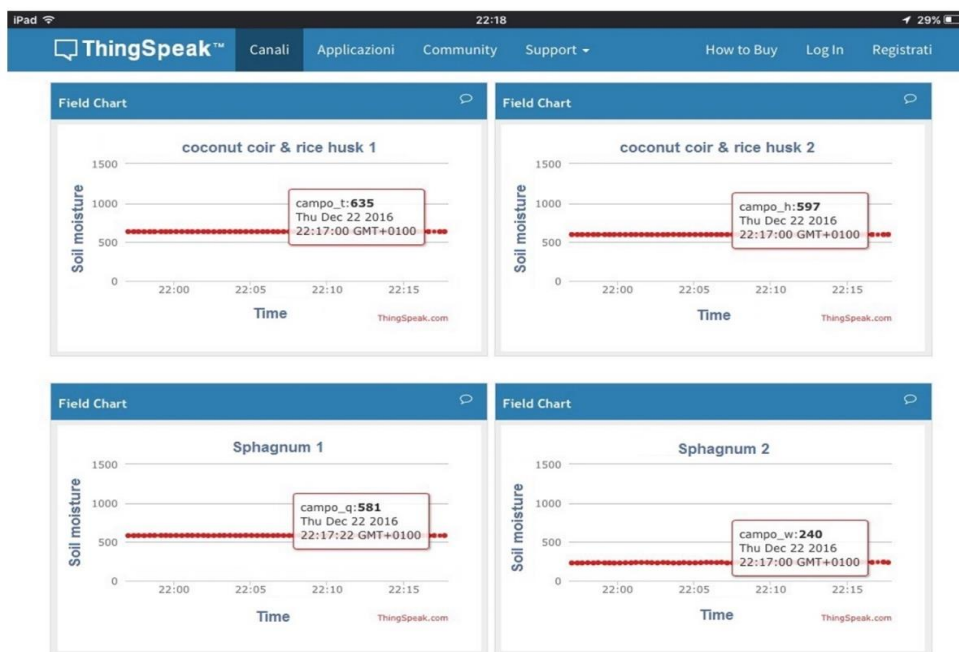
Individual users like researchers and farmers could use this system, collecting in-field data to improve their production in another’s areas like agriculture or technologies like living walls and share data with their professional advisors. Likewise, government agencies could use the system to monitor the environmental parameters and influences.



## 7.6 APPENDIX



**Fig A1.** Real-time display of the green wall from the mobile application (APP) on a mobile device.



**Fig A2.** Web visualization in ThingSpeak.

Mostrando filas 25 - 49 (total de 7191. La consulta tardó 0.0085 segundos.)

```
SELECT * FROM `valores`
```

Ordenar según la clave: Ninguna

ID	valor	valor2	valor3	valor4	valor5	valor6	valor7	valor8	valor9	valor10	tiempo
26	5.5	84.2	605	567	558	245	1016	34	0.08	0	2017-01-19 18:50:02
27	5.7	84.9	605	567	557	246	1016	23	0.08	0	2017-01-19 18:55:03
28	6.1	83.5	605	569	557	242	1016	16	0.08	0	2017-01-19 19:00:04
29	6.5	81	606	570	556	242	1017	15	0.08	0	2017-01-19 19:05:05
30	6.4	80.6	607	571	557	242	1016	14	0.08	0	2017-01-19 19:10:06
31	6.2	79.9	606	570	558	245	1016	13	0.08	0	2017-01-19 19:15:08
32	5.9	82.4	607	573	556	241	1017	14	0.08	0	2017-01-19 19:20:09
33	6	81.2	608	574	556	240	1016	14	0.08	0	2017-01-19 19:25:10
34	5.6	84.3	607	574	556	240	1017	13	0.08	0	2017-01-19 19:30:11
35	5.2	85.6	621	574	556	241	1017	14	0.08	0	2017-01-19 19:35:12
36	5	86.9	622	576	556	239	1016	13	0.08	0	2017-01-19 19:40:13
37	5.1	86.5	622	576	556	238	1016	14	0.08	0	2017-01-19 19:45:14
38	5.1	86.7	621	575	557	242	1017	14	0.08	0	2017-01-19 19:50:15
39	5.3	85.7	621	575	557	243	1017	14	0.08	0	2017-01-19 19:55:17
40	5.4	84.8	622	576	557	241	1016	14	0.08	0	2017-01-19 20:00:18
41	5.2	86.1	621	574	557	244	1016	14	0.08	0	2017-01-19 20:05:19
42	5.3	85.3	621	574	558	245	1016	15	0.08	0	2017-01-19 20:10:20
43	5.4	84.5	621	573	558	247	1016	15	0.08	0	2017-01-19 20:15:21
44	5.5	83.7	622	576	557	241	1016	15	0.08	0	2017-01-19 20:20:22
45	5.5	84.3	621	573	558	246	1016	15	0.08	0	2017-01-19 20:25:23
46	6.2	82.1	622	574	558	243	1017	15	0.08	0	2017-01-19 20:30:24
47	6.3	82.1	621	574	558	244	1017	15	0.08	0	2017-01-19 20:35:25
48	6.1	82.5	622	575	558	245	1017	15	0.08	0	2017-01-19 20:40:26
49	6	83.1	622	576	557	242	1017	14	0.08	0	2017-01-19 20:45:28
50	5.9	83.8	622	576	558	242	1016	15	0.08	0	2017-01-19 20:50:29

**Fig A3.** Database display of the green-wall prototype from the computer.

## 7.7 REFERENCES

Bussi, G.; Janes, V.; Whitehead, P.; Dadson, S.; Holman, I. Dynamic response of land use and river nutrient concentration to long-term climatic changes. *Sci. Total Environ.* 2017, 590–591, 818–831.

Sathiesh Kumar, V.; Gogul, I.; Deepan Raj, M.; Pragadesh, S.K.; Sarathkumar Sebastin, J. Smart Autonomous Gardening Rover with Plant Recognition using Neural Networks. *Procedia Comput. Sci.* 2016, 93, 975–981.

Groener, B.; Knopp, N.; Korgan, K.; Perry, R.; Romero, J.; Smith, K.; Stainback, A.; Strzelczyk, A.; Henriques, J. Preliminary Design of a Low-Cost Greenhouse with Open Source Control Systems. *Procedia Eng.* 2015, 107, 470–479.

Oates, M.J.; Fernández-López, A.; Ferrández-Villena, M.; Ruiz-Canales, A. Temperature compensation in a low-cost frequency domain (capacitance based) soil moisture sensor. *Agric. Water Manag.* 2017, 183, 86–93.

Thalheimer, M. A low-cost electronic tensiometer system for continuous monitoring of soil water potential. *J. Agric. Eng.* 2013, 44. [CrossRef]

Scudiero, E.; Berti, A.; Teatini, P.; Morari, F. Simultaneous monitoring of soil water content and salinity with a low-cost capacitance-resistance probe. *Sensors* 2012, 12, 17588–17607.

Hubbart, J.; Link, T.; Campbell, C.; Cobos, D. Evaluation of a low-cost temperature measurement system for environmental applications. *Hydrol. Process* 2005, 19, 1517–1523.

Jayaraman, P.; Yavari, A.; Georgakopoulos, D.; Morshed, A.; Zaslavsky, A. Internet of Things Platform for Smart Farming: Experiences and Lessons Learnt. *Sensors* 2006, 16, 1884.

Garcia-Sánchez, F.; Garcia-Haro, J. Wireless sensor network deployment for integrating video-surveillance and data-monitoring in precision agriculture over distributed crops. *Comput. Electron. Agric.* 2011, 75, 288–303.

Ruiz-Garcia, L.; Lunadei, L.; Barreiro, P.; Robla, I. A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: State of the art and current trends. *Sensors* 2009, 9, 4728–4750.

Pierce, F.J.; Elliott, T.V. Regional and on-farm wireless sensor networks for agricultural systems in Eastern Washington. *Comput. Electron. Agric.* 2008, 61, 32–43.

Fisher, D.K. Open-Source Hardware Is a Low-Cost Alternative for Scientific Instrumentation and Research. *Mod. Instrum.* 2012, 1, 8–20.

Artero, T.O. *El Mundo Genuino-Arduino: Curso Práctico de Formación*; RC libros: Madrid, Spain, 2016; p. 566.

Banzi, M.; Shiloh, M. *Introducción a Arduino*; O'Reilly media-Grupo Anaya s.a.: Madrid, Spain, 2016; p. 128.

Ray, P. A survey on Internet of Things architectures. *J. King Saud Univ. Sci. Comput. Inf. Sci.* 2018, 30, 291–319.

Tanenbaum, J.; Williams, A. Democratizing technology: Pleasure, utility and expressiveness in DIY and maker practice. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Paris, France, 27 April–2 May 2013; pp. 2603–2612.

Monk, S. Raspberry Pi 200 Ejercicios Prácticos Problemas y Soluciones de Hardware y Software; O'Reilly Media—Grupo Anaya, s.a.: Madrid, Spain, 2015; p. 415.

Ávila, A.R. Manual de Riego de Jardines; Junta de Andalucía—Consejería de Agricultura y Pesca: Sevilla, Spain, 2004; pp. 233–246.

Blum, J. Arduino a Fondo; Wiley-Grupo Anaya, s.a.: Madrid, Spain, 2014; p. 352.

Calaza, G.T. Taller de Arduino: Un Enfoque Práctico Para Principiantes; Marcombo s.a.: Barcelona, Spain, 2014; p. 376.

Hertzog, P.; Swart, A.J. The Use of an Innovative Jig to Stimulate Awareness of Sustainable Technologies among Freshman Engineering Students. *Sustainability* 2015, 7, 9100–9117.

Dennis, A.K. Raspberry Pi Home Automation with Arduino; Packt Publishing: Birmingham, UK, 2013; p. 176.

Golden, R. Raspberry Pi Networking Cookbook; Packt Publishing: Birmingham, UK, 2013; p. 204.

Bajer, L.; Krejcar, O. Design and Realization of Low Cost Control for Greenhouse Environment with Remote Control. *IFAC-Pap. OnLine* 2015, 48, 368–373.

Czarnomski, N.G.; Moore, T.; Pypker, J.; Licata, B. Precision and accuracy of three alternative instruments for measuring soil water content in two forest soils of the Pacific Northwest. *Can. J. For. Res.* 2005, 35, 1867–1876.

Starr, J.L.; Paltineanu, I.C. Methods for Measurement of Soil Water Content: Capacitance Devices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2002, 4, 463–474.

Laskar, M.R.; Bhattacharjee, R.; Sau Giri, M.; Bhattacharya, P. Weather Forecasting using Arduino Based Cube-Sat. *Procedia Comput. Sci.* 2016, 89, 320–323.

Bitella, G.; Rossi, R.; Bochicchio, R.; Perniola, M.; Amato, M. A Novel Low-Cost Open-Hardware Platform for Monitoring Soil Water Content and Multiple Soil-Air-Vegetation Parameters. *Sensors* 2014, 14, 19639–19659.

Mohanraj, I.; Ashokumar, K.; Naren, J. Field Monitoring and Automation using IOT in Agriculture Domain. *Procedia Comput. Sci.* 2016, 93, 931–939.

Ceballos, M.C.; Gorricho, J.L.; Gamboa, O.P.; Huerta, M.K.; Rivas, D.; Rodas, M.E. Fuzzy System of Irrigation Applied to the Growth of Habanero Pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) under Protected Conditions in Yucatan Mexico. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* 2015, 13.

Ripoll, A.; Viana, M.; Padrosa, M.; Querol, X.; Minutolo, A.; Hou, K.M.; Barcelo-Ordinas, J.M.; Garcia-Vidal, J. Testing the performance of sensors for ozone pollution monitoring in a citizen science approach. *Sci. Total Environ.* 2019, 651, 1166–1179.

Oxer, J.; Blemings, H. *Practical Arduino: Cool Projects for Open Source Hardware; Technology in Action*: New York, NY, USA, 2010; p. 445.

Jiménez-Carvajal, C.; Ruiz-Penalver, L.; Vera-Repullo, J.A.; Jiménez-Buendía, M.; Antolino-Merino, A.; Molina-Martínez, J.M. Weighing lysimetric system for the determination of the water balance during irrigation in potted plants. *Agric. Water Manag.* 2017, 183, 78–85.

Srbinovska, M.; Gavrovski, C.; Dimcev, V.; Krkoleva, A.; Borozan, V. Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks. *J. Clean. Prod.* 2015, 88, 297–307.

## **8 CAPITULO 4**

**MEJORA EN LA RETENCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA  
EN MUROS VERDES USANDO MATERIALES  
ALTERNATIVOS COMO MEDIO DE CRECIMIENTO**

**IMPROVEMENT IN THE RETENTION AND  
DISTRIBUTION OF WATER IN GREEN WALLS USING  
ALTERNATIVE MATERIALS AS A GROWING MEDIA**

## **MEJORA EN LA RETENCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN MUROS VERDES USANDO MATERIALES ALTERNATIVOS COMO MEDIO DE CRECIMIENTO**

Rivas-Sánchez, Y.A., Moreno-Pérez, M.F., Roldán-Cañas, J. Mejora en la retención y distribución de agua en muros verdes usando materiales alternativos como medio de crecimiento. Ingeniería del agua, 2019. 23 (1), 19-31.

Doi: 10.4995/Ia.2019.9736

### **RESUMEN**

Este trabajo muestra como la fibra de coco mezclada con cascarilla de arroz es útil como medio de cultivo en muros verdes, reduciendo el impacto ambiental de la explotación de musgo Sphagnum a largo plazo. Por esto, se diseñó un prototipo de muros verdes para analizar la diferencia entre ambos sustratos. La escorrentía y la retención hídrica de los sustratos se analizaron mediante sensores de flujo y humedad. El sustrato compuesto de cascarilla de arroz y fibra de coco mostró mayor homogeneidad en la distribución del agua de riego que el musgo Sphagnum. Los análisis de clorofila mostraron diferencias estadísticamente significativas entre el material vegetal plantado en el sustrato de fibra de coco y cascarilla de arroz y en el de Sphagnum, pero no se encontraron diferencias en biomasa y en el contenido hídrico.

### **Palabras clave**

Sphagnum; Sustratos alternativos; Jardín vertical; Flujo de agua

### **ABSTRACT**

This work shows how coconut fiber mixed with rice husk is useful as a growing medium in green walls, reducing the environmental impact of the Sphagnum moss exploitation in the long term. For this, a prototype of green walls was designed to analyze the difference between both substrates. The runoff and the water retention of the substrates were analyzed by flow and humidity sensors. The substrate composed of rice husk and coconut fiber showed greater

homogeneity in the distribution of irrigation water than Sphagnum moss. The chlorophyll analyzes showed statistically significant differences between the plant material planted in the coconut fiber substrate and rice husk than in the Sphagnum, but no differences were found in biomass and water content.

### **Key words**

Sphagnum; Alternative substrates; Vertical gardens; Water flow.

## **8.1 INTRODUCCIÓN**

Los muros verdes pasivos se clasifican, generalmente en dos tipos de sistemas: modulares y continuos (Manso y Castro-Gomes, 2015). Los sistemas modulares son actualmente los más utilizados comercialmente debido a su fácil instalación y también a su aptitud para utilizar diferentes tipos de especies vegetales, pero estas requieren sustratos especiales como musgos o materiales sintéticos que exigen un mantenimiento regular (Safikhani et al., 2014). Los sistemas modulares son, generalmente, cajas con una capa de vegetación establecida verticalmente. La mayoría de los muros verdes modulares basados en musgo Sphagnum como sustrato, son relativamente costosos de instalar en comparación con otros sistemas como los continuos. En los últimos años, se han realizados diferentes investigaciones sobre los muros verdes mostrando así algunas desventajas especialmente en los materiales utilizados en el medio de crecimiento debido a su alta carga ambiental (Ottelé et al., 2011).

Desde el punto de vista paisajístico, la finalidad de los sustratos alternativos como medio de cultivo es producir una planta de calidad, reduciendo costes de producción y la carga ambiental. Por otro lado, la obtención y eliminación del sustrato, una vez utilizado, no debería provocar un impacto negativo sobre el medio ambiente.

Existe poca investigación sobre la diversidad de muros verdes en España. Actualmente, cuando existe la necesidad de establecer un muro verde por arquitectos o paisajistas, estos los instalan siguiendo razones no ecológicas, tales como recursos estéticos, la concesión de préstamos orientados al financiamiento de proyectos que promueven el uso sostenible de los recursos naturales renovables, esto es, los denominados préstamos verdes, así como por el valor económico. No los usan como aislamiento térmico o para reducir el agua de escorrentía,



ya que las inundaciones están convirtiéndose en una problemática cada vez mayor debido a la impermeabilidad de las áreas urbanas (Francis y Lorimer, 2011). En estas condiciones, el sustrato de Sphagnum preparado en capas muy finas directamente sobre un soporte, es el habitualmente utilizado en muros verdes que, además, no permite ni la colonización vegetal natural ni la variedad ambiental. En los últimos años, los estudios se han concentrado en los beneficios económicos en vez de en la biodiversidad (Perini y Rosasco, 2013), pero, no obstante, estas investigaciones son vitales si los muros verdes se convirtieran en parte de la planificación y el desarrollo de las ciudades.

Así nace la necesidad de encontrar nuevos materiales alternativos reciclados que posean un impacto ambiental menor para una mayor sostenibilidad del medio ambiente, siendo pues el objetivo de este trabajo usar materiales alternativos tales como cascarilla de arroz, lana de roca y fibra de coco (Larcher et al., 2013), los cuales han mostrado en los últimos años que poseen características fisicoquímicas similares a las de los materiales convencionales como el Sphagnum que es, además, un material costoso (Rose y Haase., 2000; Holman et al., 2005). En este trabajo se analizarán estas alternativas sostenibles, rentables, de fácil adquisición, bajo coste y eficiencia ambiental para su uso como sustrato en muros verdes modulares en el mercado español.

En este estudio, se analizó la naturaleza del sustrato, que es la base de todo el sistema de muro verde. Se han elaborado normas para la industria del techo verde en Alemania, sin embargo, no existen normas especiales para los muros verdes en España y muchas de las normas utilizadas en el extranjero, siguiendo los estándares del Reino Unido, no siempre son compatibles con el mercado (FLL, 2002). Se ha publicado relativamente poco sobre sustratos alternativos para muros verdes, pues para conseguir un muro verde ambientalmente correcto, su sustrato debe ser adecuadamente caracterizado ya que es importante determinar si los materiales alternativos donde estará apoyada la vegetación, tendrán éxito en áreas con temperaturas extremas como el sur de España (Mickovski et al., 2013). En este trabajo, se considerarán dos objetivos, en primer lugar, utilizar materiales alternativos como sustrato en las tecnologías de muros verdes en regiones cálidas del sur de España, y, en segundo lugar, comprobar que los sustratos reciclados son alternativas viables partiendo del estudio de las propiedades físicas, químicas y de los costes económicos (Molineux et al., 2009).

Los diseñadores de muros verdes están buscando alternativas a muchos de los componentes tradicionales de los medios de cultivo, como el musgo *Sphagnum*. Debido a que los costos de transporte son un factor importante en el costo de los medios de cultivo, los diseñadores deben considerar más componentes locales, incluyendo la fibra de coco y la cascarilla de arroz.

Para ello, se diseñó un prototipo de muros verdes para analizar la diferencia entre sustratos alternativos eco-compatibles, como la cascarilla de arroz mezclada con cascara de coco de acuerdo a trabajos preliminares donde se demostró la eficiencia de estos materiales (Rivas et al., 2017a), y el musgo *Sphagnum* como medio de crecimiento en muros verdes (Vijayaraghavan y Raja, 2014) Se estudiaron las características fisicoquímicas de los dos medios de crecimiento y también se analizaron parámetros como la retención de agua en los sustratos establecidos en el muro verde y la homogeneidad en la distribución del agua dentro de los prototipos por medio de sensores electrónicos. Además, se analizó el desarrollo de las plantas en cada uno de los sustratos.

Para verificar la idoneidad de los sustratos se utilizaron sensores de humedad y de flujo conectados a un microcontrolador que registrara los datos tomados por estos, los cuales fueron instalados en los prototipos para muro verde tanto en los compuestos por la mezcla de fibra de coco y cascarilla de arroz como los de musgo *Sphagnum*, y para identificar la mejor combinación de planta y sustrato, se utilizaron dos diferentes especies, como planta tapizante *Aptenia cordifolia* y como planta de flor con mayor porte *Lampranthus spectabilis* (Emilsson, 2008).

Para conocer el efecto que el sustrato tiene sobre el crecimiento de las plantas, se determinaron el contenido de clorofila, la biomasa y la cantidad de agua en el material vegetal.

El contenido de clorofila en las hojas es un parámetro muy útil para evaluar el estado fisiológico de las plantas establecidas en los muros verdes. El contenido de pigmentos fotosintéticos puede cambiar como respuesta a factores causantes de estrés, a la capacidad fotosintética o al estado de desarrollo de la planta (Ustin et al. 1998). La determinación de clorofila en tejidos vegetales por extracción con acetona a 85 %, es un método utilizado para

estimar el estado nutrimental del cultivo (Hansmann, 1973). El cálculo del contenido de clorofilas en las plantas de los muros verdes, haciendo correlaciones con las concentraciones de clorofila extraíble, permite obtener los valores del rendimiento del material vegetal establecido en los dos tipos de sustratos utilizados en los prototipos de muros verdes.

La biomasa es una variable clave de un proceso biológico, ya que su análisis nos ayuda a comprender la eficiencia del mismo. Se trata de una variable importante para establecer las tasas de producción, de consumo de nutrientes y el cálculo de los balances de masa del proceso biológico de las plantas establecidas en los muros verdes.

El agua compone gran parte de las plantas y en solución acuosa ocurre la mayor parte de las reacciones metabólicas, además de procesos necesarios como el crecimiento celular, la fotosíntesis y, por tanto, la misma productividad (Taiz y Zeiger 2006). Por esta razón, es importante analizar el contenido de agua en el material vegetal ya que la falta de agua en la planta origina respuestas en su crecimiento y productividad en los muros verdes.

## **8.2 MATERIAL Y MÉTODOS**

### **8.2.1 Localización y sistemas de muros verdes**

El experimento se estableció en el campus de Rabanales de la Universidad de Córdoba (37°54'51.3"N 4°43'28.5"W), con unas condiciones climáticas medias anuales de 17.8 °C de temperatura, pluviosidad de 612 mm y humedad relativa de 60%. Los ocho prototipos de muro verde de 1 m<sup>2</sup> de superficie por 0.1 m de espesor, se instalaron con orientación sur, y se componen de una estructura de aluminio con una tapa de malla que tiene la función mecánica de soporte, también poseen un canal de recolección de agua de PVC que dirige el agua al recipiente contenedor para la recirculación de agua a cada prototipo y tiene un revestimiento de fieltro para mantener la humedad (Jørgensen et al., 2014). El módulo de aluminio se fija en una estructura de acero mayor instalada sobre el suelo del edificio dejando 5 centímetros de espacio entre el muro y la cubierta verde. En cada prototipo de muro verde se estableció una tubería de 16mm flexible para el riego en la parte superior, y en su parte media se han colocado 96 goteros autocompensantes de la marca ClickTif HD cada 20

centímetros de tubo, proporcionando a través de cada gotero 4 l/h. En la Figura 1 se pueden observar los prototipos.

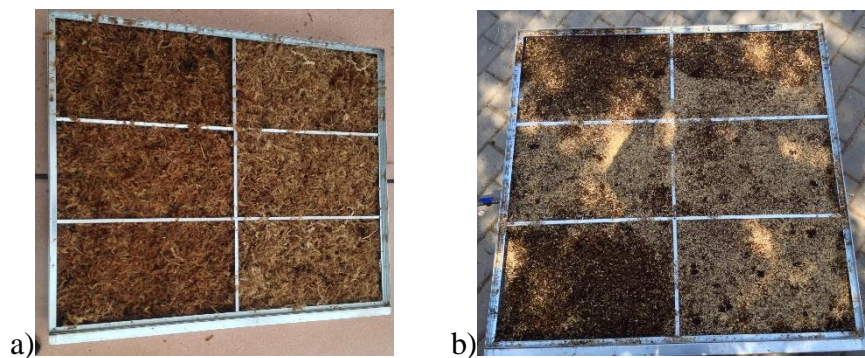
Se ha realizado un ensayo de uniformidad de los emisores del sistema de riego utilizando la norma UNE-EN-ISO 9261. En total, se analizaron 9 de los 12 emisores de cada módulo, es decir, un total de 72 goteros en los 8 módulos analizados.



**Figura 1.** Prototipos de muros verdes.

### **8.2.2 Medios de crecimiento**

Para este experimento se utilizaron dos tipos de sustrato, el sustrato alternativo compuesto de una mezcla de fibra de coco y cascarilla de arroz con un porcentaje de 50%/50%, el cual se comparó con el sustrato de referencia el musgo *Sphagnum*, uno de los sustratos comúnmente utilizados para el diseño para muros verdes de sistemas modulares como se observa en la Figura 2. Los sustratos fueron distribuidos de forma aleatoria en los 8 prototipos, de tal manera que cuatro contenían la mezcla de fibra de coco/cascarilla de arroz y cuatro el musgo *Sphagnum*.



**Figura 2.** Sustrato para prototipos de muro verde a) musgo *Sphagnum*, b) sustrato compuesto de cascarilla de arroz y fibra de coco.

Las propiedades físicas y químicas de los sustratos analizados se obtuvieron en el laboratorio por medio del fotómetro multiparamétrico hi 83200 de Hanna Instruments, tomando una muestra del sustrato y dejándolo en 100 ml de agua desionizada por 24 horas. Para su posterior análisis se cogió extracto en saturación de cada uno de los sustratos utilizados para el experimento.

### 8.2.3 Plantación, Irrigación y fertilización

En este experimento se han utilizado dos diferentes especies de material vegetal *Lampranthus spectabilis* por su cobertura y como planta de flor con mayor porte *Aptenia cordifolia* (ver Figura 3). Las dos especies fueron seleccionadas teniendo en cuenta la exposición solar del lugar de establecimiento del prototipo de muro verde y por la fácil adquisición de estas plantas en la región. La densidad de siembra de las plantas ha sido de 36 plantas por prototipo, 6 filas  $\times$  6 columnas, espaciadas de forma equidistante entre los bordes del prototipo plantadas en agosto del 2016. Se han ubicado aleatoriamente en cada prototipo, pero cada uno poseerá la misma cantidad de plantas (Egea et al., 2014). Para la irrigación se utilizó una bomba centrífuga horizontal CRI mhb-3/03m (H = 24 m; Q = 3 m<sup>3</sup>/h; 230 V; 3.6 A) que suministra agua para cada uno de los prototipos de muro verde. La bomba está conectada a un programador Rain Bird ESP RZX4i, que la activa dependiendo de la lectura de los sensores de humedad, regando por goteo de dos a tres veces por día según la humedad del sustrato. El ciclo de experimentación fue el comprendido entre el 2 de agosto del 2016 a 8 de agosto del 2017, y en los meses en los que se regó más fueron junio y julio. La fertilización

se realizará mediante el riego adicionando el fertilizante comercial orgánico de guano al agua proporcionando N, P, K en cada uno de los prototipos para muros verdes.



**Figura 3.** Material vegetal a) *Aptenia cordifolia* y b) *Lampranthus spectabilis*

#### 8.2.4 La escorrentía y la retención de humedad

La escorrentía de los sustratos se analizó mediante sensores de flujo YF-S402, que utilizan un sistema “hall” para su funcionamiento instalados en el sistema de recolección de agua, en tanto que la retención de humedad del sustrato se midió con sensores de humedad FC-28 de bajo coste los cuales miden dicha humedad dependiendo de su conductividad. Estos sensores fueron instalados en diferentes partes del sustrato en los prototipos de muro verde. Los sensores de flujo y humedad estaban conectados a internet registrando los datos para su posterior análisis (Rivas et al., 2017b).

La calibración del sensor de flujo se realizó mediante el método volumétrico, tomando un volumen de referencia y así poder calibrar la programación para el microcontrolador según cada sensor. También para evitar errores en la toma de datos por medio de los sensores de flujo se tuvo en cuenta la correcta sujeción del sensor al tubo debido a que este puede tener variaciones según la inclinación o las pérdidas de agua por una mala conexión con la tubería de agua. La calibración del sensor de humedad se realizó mediante pruebas de ensayo en los sustratos húmedos, para así determinar el nivel de humedad óptimo para las plantas (Rivas et al., 2017b).

Los dos sensores estaban conectados a un microcontrolador Arduino el cual enviaba los datos a una base de datos por medio de internet. Los datos fueron tomados cada 5 minutos durante toda la fase del experimento. Un microcontrolador es un dispositivo electrónico que integra dentro un encapsulado y un gran número de componentes, como resistencias, condensadores,

etc., conectados entre sí de forma muy específica y que tiene la característica de ejecutar de forma autónoma una serie de instrucciones previamente definidas por el programador (Rivas et al., 2017b). El microcontrolador es el componente principal del circuito de procesamiento y control (Artero, 2016). En Arduino tanto el hardware como el software son de código abierto (Banzi y Shiloh, 2016).

### **8.2.5 Crecimiento de plantas**

La recolección del material vegetal se ha hecho un año después de su implantación, agosto de 2017. Hasta entonces el crecimiento de las plantas se ha caracterizado controlando el número de marras que se ha producido en cada prototipo y con cada sustrato, así como observando visualmente el desarrollo de las plantas en cada etapa de su crecimiento.

Tras la recolección, para la determinación del contenido de clorofilas totales de la biomasa se utilizó el método espectrofotométrico propuesto por Hansmann (1973) donde las muestras de 1g de la parte aérea de las plantas se trituraron y suspendieron en un volumen de 10 ml de acetona-agua al 85% (v/v) como disolvente extractor de los pigmentos. La clorofila absorbe la energía solar necesaria para iniciar el ciclo fotosintético de muchas plantas. La principal propiedad fisicoquímica responsable de este hecho es la elevada absorbancia que presenta la clorofila en el intervalo de longitudes de onda entre 400 nm y 700 nm. La clorofila A presenta máximos de absorción en 420 nm y 663 nm, mientras que la clorofila B los presenta en 430 nm y 644 nm. La posición exacta de estos máximos depende del disolvente que se utilice. Por esto, y debido a la utilización de acetona como disolvente, se midió la densidad óptica del sobrenadante a 663 para la clorofila A y 644 para la clorofila B, comprobando que no existiera turbidez ni partículas en suspensión, como blanco se utilizó el propio disolvente.

Para la determinación de la biomasa y el contenido hídrico se utilizó el método de secado al horno tomando una muestra de 100 gramos de materia húmeda de cada uno de los prototipos de muros verdes, que se secaron durante 48 horas al horno. Finalizado este período se pesó nuevamente la muestra y se estimó el % de materia seca por diferencia de peso antes y después de la colocación en el horno (Samuelsson et al., 2006).

### **8.2.6 Análisis estadístico**

Para estudiar la influencia del tipo de sustrato en el crecimiento y desarrollo de las plantas, se han analizado los datos obtenidos en laboratorio, para cada una de las especies vegetales y cada uno de los sustratos utilizados realizando un análisis de la varianza (ANOVA) al 5% de nivel de significación ( $\alpha = 0.05$ ). Los datos estudiados fueron sometidos a un análisis estadístico completamente al azar, utilizando el software estadístico Statistix8®, con el objetivo de observar si existen diferencias significativas dentro de los sustratos utilizados. El test de Tukey se utilizó para estudiar la diferencia entre las medias.

### 8.3 RESULTADOS

Los resultados de caudal medio,  $\bar{q}_i$  (l/h), para cada una de las presiones que fija la norma  $P_i$  (kPa), obtenidos en el ensayo de los emisores del sistema de riego, se muestran en la tabla 1.

$P_i$ (kPa)	$\bar{q}_i$ (l/h)
40	3,8
80	3,9
100	4
120	3,9
140	4
<b><math>\bar{q}</math> Total</b>	<b>3,92</b>

**Tabla 1.** Caudal en función de la presión.

Seguendo la norma ISO 9261:2004 se ha calculado la desviación del caudal (ecuación 1) y su coeficiente de variación (ecuación 2).

$$Desviación\ caudal = \frac{\bar{q} - q_n}{q_n} \cdot 100 \quad (1)$$



$$C_v = \frac{S_q}{\bar{q}} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

$\bar{q}$ : Caudal medio de la muestra, en litros por hora.

$q_n$ : Caudal nominal, 4 l/h

$S_q$ : Desviación típica de los caudales de la muestra, en litros por hora.

$C_v$ : Coeficiente de variación del caudal.

En nuestro caso resulta una variación de caudal del 2% y un coeficiente de variación de caudal del 2,1 % que cumple con dicha norma, que nos dice que se consideran aceptables si la desviación de caudal no supera  $\pm 7\%$  del caudal nominal, y el coeficiente de variación de caudal tampoco excede del  $\pm 7\%$ .

También se ha calculado la ecuación de gasto del gotero para comprobar si cumple con la condición de autocompensante:

$$q = k \cdot p^x \quad (3)$$

Donde:

k: Coeficiente adimensional que depende de la geometría del gotero

x: Exponente hidráulico adimensional

Usando los datos de la Tabla 1, se obtiene un valor de  $x$  igual a 0,045, que demuestra su condición de autocompensante, y un valor de  $k$  igual a 3,75.

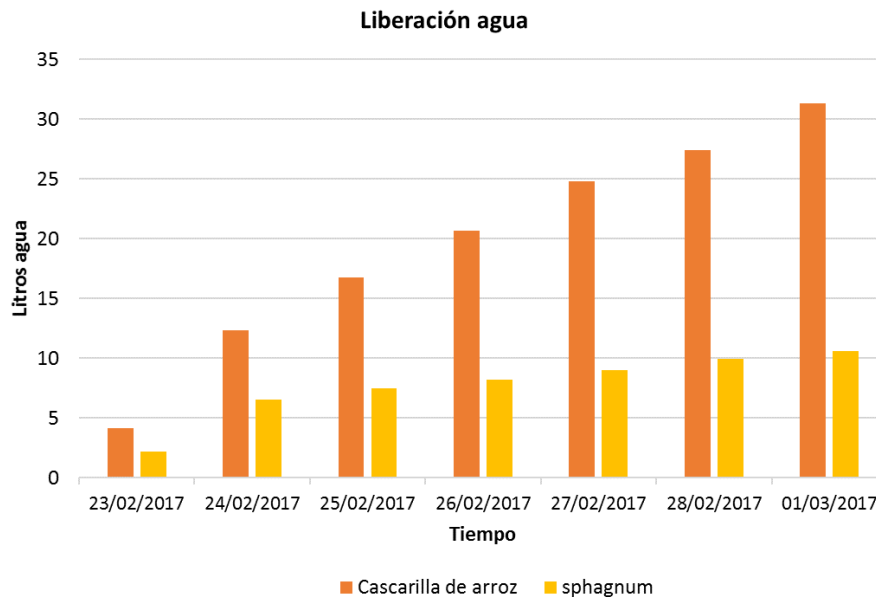
Los valores de las propiedades físicas y químicas de los sustratos analizados, obtenidos en el laboratorio, se muestran en la Tabla 2.

Propiedad	Cascarilla de arroz	Fibra de coco	Mezcla	Sphagnum
Densidad aparente $\text{g/m}^3$	0,098	0,105	0,108	0,099
Densidad real $\text{g/m}^3$	0,61	0,35	0,214	0,48
Porosidad total %	84	70,7	86,2	80,2
Retención de humedad %	17	43	36	52
pH	7,245	6,605	7,1	4,2
Conductividad eléctrica $\text{dS/m}^{-1}$	0,8	3,6	2,7	0,6
N%	0,51	0,43	0,74	0,80
P $\text{mgL}^{-1}$	3,9	19	13,9	5,2
K $\text{mgL}^{-1}$	108	582	562	19

**Tabla 2.** Propiedades físicas y químicas de los sustratos analizados para muros verdes.

La figura 4 muestra la liberación de agua en los dos sustratos estudiados tomando como referencia dos prototipos por cada uno de los sustratos estudiados utilizando la misma cantidad de agua para cada prototipo en la semana del 23/02/2017 hasta el día 01/03/2017, puesto que estos días se reprogramó el sistema de riego para que el sustrato sobrepasara la capacidad de campo y así tener el excedente de agua para su análisis. En la gráfica se puede ver como el sustrato de musgo Sphagnum tiene mayor retención que el sustrato compuesto

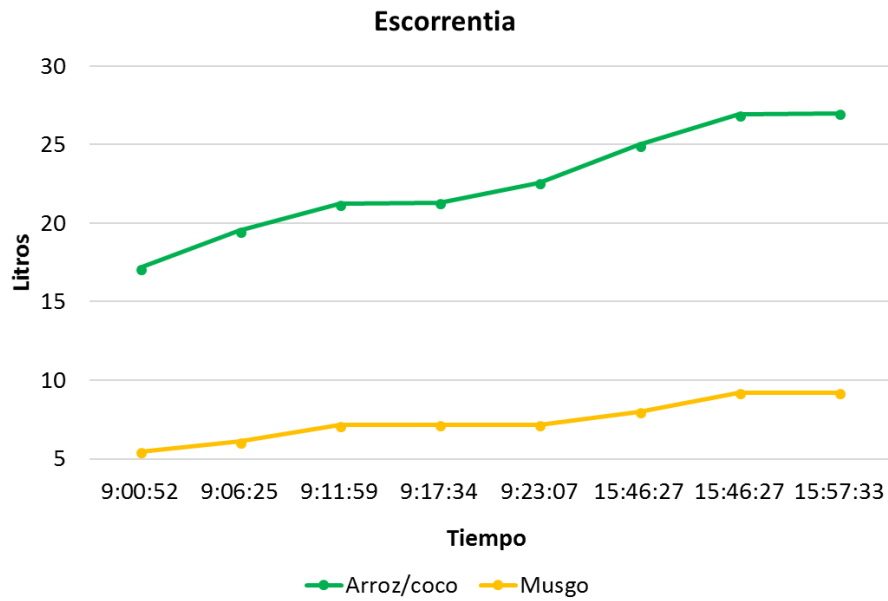
de cascarilla de arroz y fibra de coco. Ello implica que este último puede necesitar ajustes en el riego, como menor tiempo de riego e intervalos más cortos entre riegos, para mejorar su retención de agua.



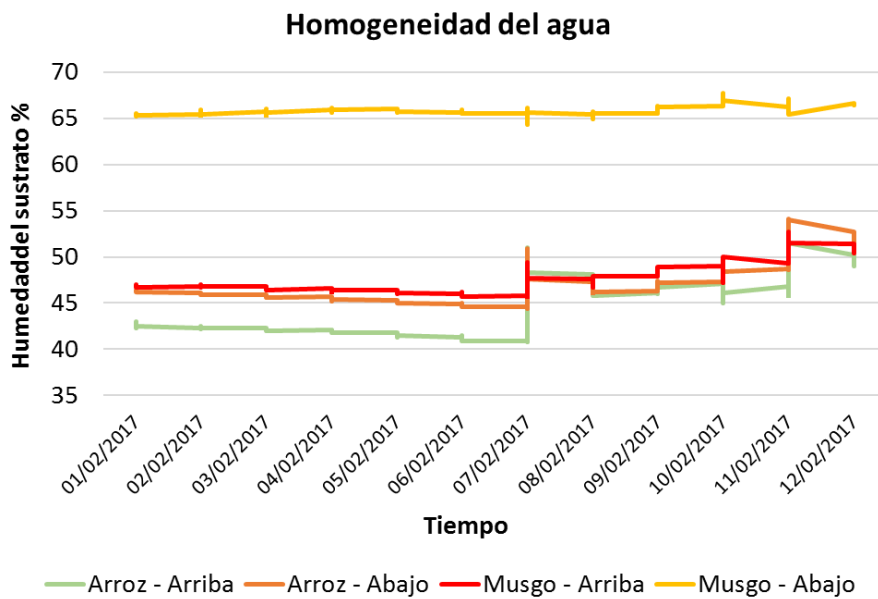
**Figura 4.** Liberación de agua de los dos sustratos utilizados en el experimento.

La Figura 5 muestra el tiempo durante el cual cada uno de los sustratos libera el agua retenida en los módulos de experimentación de muro verde. En la gráfica se puede observar como el sustrato de musgo Sphagnum libera el agua más lentamente que el sustrato compuesto de cascarilla de arroz y fibra de coco y en menor cantidad. Las muestras fueron tomadas del día 26 de febrero de 2017, a primera hora y en las horas donde existe mayor incidencia solar.

La Figura 6 muestra la homogeneidad del agua contenida en los sustratos tanto en la parte inferior como en la parte superior, observándose que el sustrato compuesto de cascarilla de arroz y fibra de coco posee más homogeneidad en la distribución del agua en todo el módulo, a diferencia de los módulos compuestos de musgo Sphagnum, donde se acumulaba más agua en la parte inferior de los prototipos compuestos de este sustrato, estos datos fueron tomados en los días correspondientes al 01/02/2017 hasta 12/02/2017.



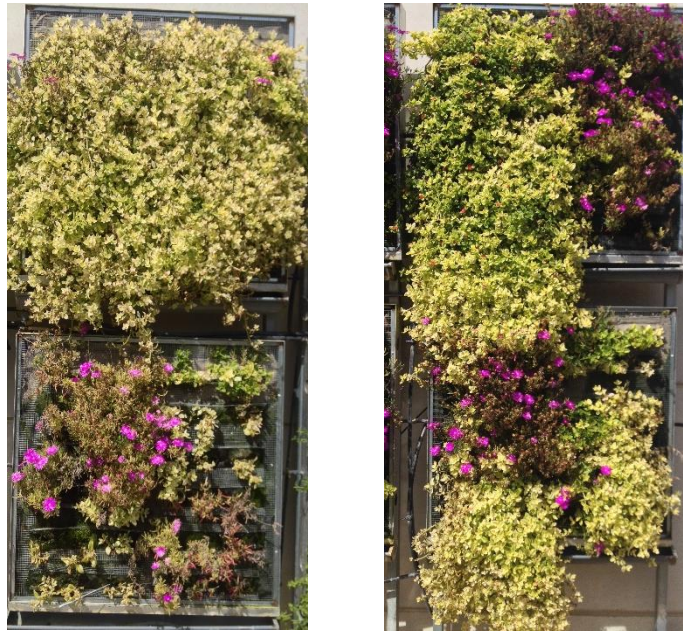
**Figura 5.** Escorrentía en los sustratos compuestos de fibra de coco y arroz en comparación con el musgo Sphagnum.



**Figura 6.** Homogeneidad de la distribución del agua en la parte superior e inferior de los prototipos con los dos sustratos utilizados como medio de crecimiento para muros verdes.

Tanto la *Aptenia cordifolia* como la *Lampranthus spectabilis* mostraron que pueden ser utilizadas en el establecimiento de muros verdes modulares. Las plantas soportaron tanto las altas temperaturas de la región que llegaron a 50C° en la época de verano y la exposición directa al sol como las heladas de invierno. El porcentaje de marras de las plantas desarrolladas no superó el 10% en cada uno de los sustratos.

Visualmente, en la figura 7 se puede apreciar la clorosis que presentan los sustratos compuestos de musgo Sphagnum. Esto demuestra que las plantas se adaptaron mejor en el sustrato compuesto por cascarilla de arroz como se ve en la Figura 8, probablemente a que estas plantas necesitan una baja cantidad de agua para su óptimo desarrollo. La acumulación de agua en la parte inferior de los módulos compuestos por musgo Sphagnum puede ocasionar problemas con las raíces afectando esto el aspecto visual de los muros verdes.

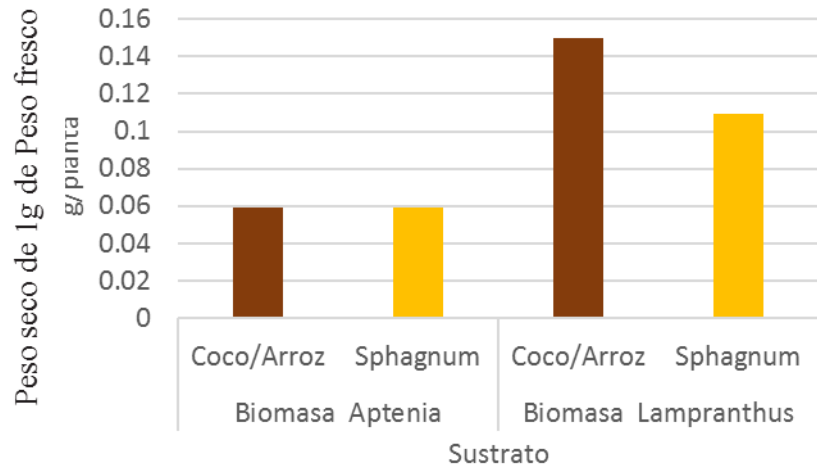


**Figura 7.** Desarrollo del material vegetal para muros verdes con sustrato de Sphagnum.

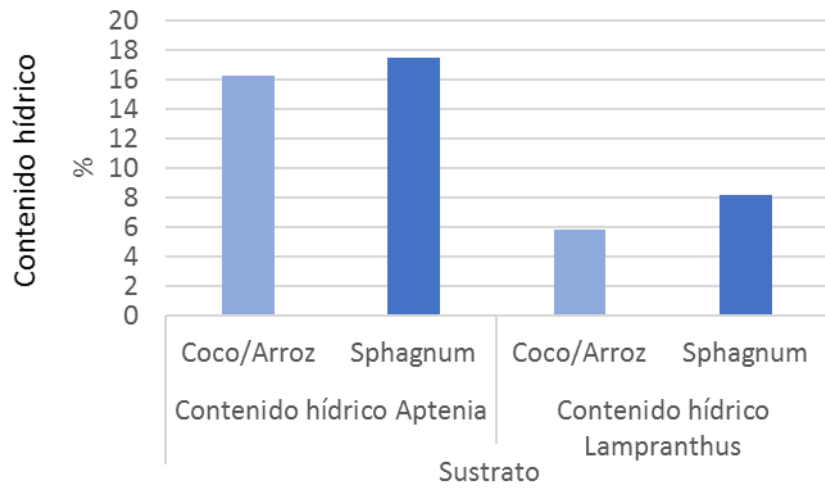


**Figura 8.** Desarrollo del material vegetal para muros verdes con sustrato de mezcla de cascarilla de arroz y fibra de coco.

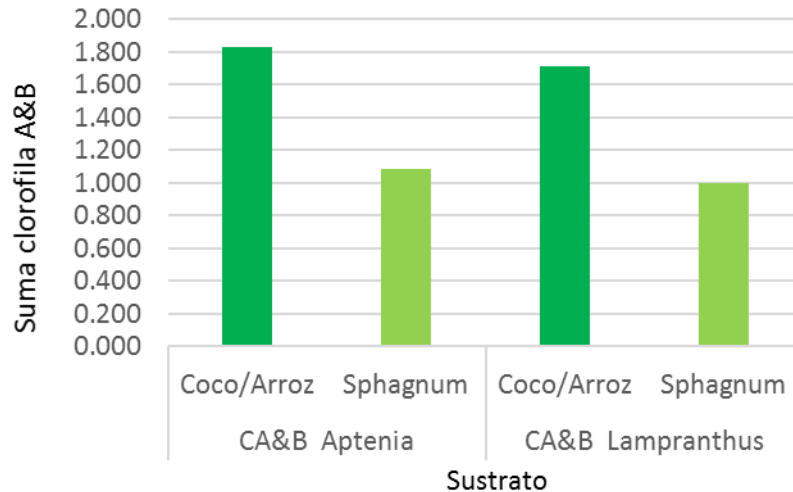
Respecto a la calidad del material vegetal (*Aptenia cordifolia* y *Lampranthus spectabilis*) plantados en los dos diferentes tipos de sustratos, en la figura 9 se muestra el efecto de los mismos sobre la biomasa, el contenido hídrico absoluto y la suma de las clorofilas A y B en las plantas. Según el test Tukey de comparaciones múltiples,  $p = 0.05$ , (Egea et al., 2014), no existen diferencias estadísticamente significativas en el caso de la biomasa y del contenido hídrico absoluto (ver figura 9 a y b).



(a)



(b)



(c)

**Figura 9.** Efecto de los dos sustratos en las plantas sobre la biomasa (A), el contenido hídrico absoluto (B) y la suma de las clorofilas A&B (C).

En el caso de la suma de clorofilas, aparecen en cambio diferencias según el medio de crecimiento. Existe una disminución en el contenido de clorofila del material vegetal plantado en el sustrato del musgo Sphagnum con respecto al material vegetal plantado en los sustratos de fibra de coco mezclado con cascarilla de arroz. El análisis estadístico reveló diferencias significativas entre el uso de los dos sustratos manifestando una mayor cantidad de clorofila en las plantas establecidas en el sustrato de fibra de coco mezclado con cascarilla de arroz, haciendo de este último una alternativa viable como sustrato para muros verdes.

#### 8.4 DISCUSIÓN

Por la influencia de la gravedad, la mayor parte de agua se acumula en la base de los prototipos de muro verde, donde se llenan los espacios porosos, reduciendo la disponibilidad de aire para las raíces. La mezcla de fibra de coco y cascarilla de arroz que es un material que posee una fuerte capilaridad, proporcionó unas condiciones de humedad más uniformes para las raíces de la parte inferior del prototipo. Este sustrato es capaz de aumentar la aireación en la base del sustrato y reducir el secamiento de la superficie cerca al fieltro de los



prototipos de muro verde, por esto la gestión de la humedad superficial del mismo es mucho más fácil ya que el material tiene la capacidad de extraer la humedad del sustrato en la parte más profunda para reemplazar las pérdidas por evaporación

El sustrato compuesto por fibra de coco y cascarilla de arroz es un material elástico con una estabilidad física excepcional con respecto al musgo *Sphagnum*. En este contexto, la estabilidad física se refiere a la capacidad del sustrato para proporcionar aire y humedad a las raíces de las plantas. Un problema que se encontró sobre el musgo *Sphagnum* fue que sus propiedades físicas cambiaban considerablemente con el contenido de humedad, cuando estaba muy húmedo, tendía a colapsarse, disminuyendo el aire disponible y cuando está seco, se contrae dejando espacios en los prototipos, en comparación con el sustrato compuesto por fibra de coco y cascarilla de arroz que no cambia mucho cuando se moja o se encoge excesivamente cuando se seca. También tuvo una buena estabilidad física a lo largo del experimento, esto asegura que la salud de las plantas no se perjudicará con el tiempo.

El hecho de que el contenido de clorofila en las plantas del sustrato mezclado de fibra de coco y cascarilla de arroz sea significativamente superior al encontrado en el musgo *Sphagnum*, podría deberse, entre otros factores, a que la mezcla de fibra de coco y cascarilla de arroz permitiría una adecuada disponibilidad de nutrientes, entre los que se podrían encontrar el nitrógeno y el magnesio, que son componentes fundamentales de la molécula de clorofila.

## **8.5 CONCLUSIONES**

El sustrato compuesto de cascarilla de arroz y fibra de coco mostró mayor homogeneidad en la distribución del agua de riego que el musgo *Sphagnum*, aunque tuvo poca retención de agua en comparación con el sustrato compuesto de musgo *Sphagnum*.

El material vegetal tuvo un óptimo desarrollo en los dos tipos de sustratos analizados. Las especies *Aptenia cordifolia* y *Lampranthus spectabilis* analizadas en este trabajo que fueron plantadas en el sustrato a base de fibra de coco y cascarilla de arroz, igualan en calidad visual y porcentaje de marras a las plantas desarrolladas en sustratos a base de musgo *Sphagnum*. Los resultados obtenidos demostraron que el medio de crecimiento de arroz mezclado con

fibra de coco puede ser utilizado con éxito en la implementación como medio de cultivo en muros verdes.

Se encontró una mayor concentración de clorofila en el material vegetal plantado en el sustrato alternativo de fibra de coco mezclado con cascarilla de arroz con respecto al material vegetal plantado en el musgo *Sphagnum*. En cuanto a los análisis de biomasa y contenido hídrico no se encontraron diferencias significativas entre el uso de los diferentes sustratos utilizados en este experimento.

## **8.6 AGRADECIMIENTOS**

Esta investigación está soportada con fondos propios de la línea de investigación “Sostenibilidad de Recursos Naturales” integrada en el Programa de Doctorado “Recursos Naturales y Gestión Sostenible” de la Universidad de Córdoba.

Se agradece a María Benlloch González y a Manuel Benlloch Marín, profesores del área de producción vegetal de la Universidad de Córdoba, la colaboración prestada en los ensayos de laboratorio.

## **8.7 REFERENCIAS**

Artero, T.O. 2016. El mundo Genuino-Arduino: Curso práctico de formación, RC libros, Madrid.

Banzi, M., Shiloh, M. 2016. Introducción a Arduino, O’Reilly media, Grupo Anaya S.A. Madrid.

Egea, G., Pérez-Urrestarazu, L., González-Pérez, J., Franco-Salas, A., Fernández-Cañero, R. 2014. Lighting systems evaluation for indoor living walls, *Urban Forestry & Urban Greening*, 13, 475-483. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.04.009>

Emilsson, T. 2008. Vegetation development on extensive vegetated green roofs: influence of substrate composition, establishment method and species mix, *Ecological Engineering*, 33(3-4), 265-277.

FLL. 2002. Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung. Landschaftsbau e.V, ISBN:393448459x, pp. 99.

Francis, A., Lorimer, J.. 2011. Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls, *Journal of environmental management*, 92(6), 1429-1437. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.012>

Hansmann, E. 1973. Pigment Analysis. In *Handbook of Phycological Methods: Culture Methods and Growth Measurements*; Stein, J.R., Ed.; Cambridge University Press: London, UK. Vol. 1, pp. 359-368.

Holman, J., Bugbee, B., Chard, J. 2005. A Comparison of Coconut Coir and Sphagnum Peat as Soilless Media Components for Plant Growth, Utah State Univ, Department of Plants, Soils, and Biometeorology.

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, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.12.006>

Larcher, F., Fornaris, A., Devecchi, M. 2013. New Substrates for Living Walls, III International conference on landscape and urban horticulture, *Acta Horticulturae*, V: 999, 277-281.

Manso, M., Castro-Gomes, J. 2015. Green wall systems: A review of their characteristics, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41(C), 863-871. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>

Mickovski, S., Buss, K., McKenzie, B., Sökmener, B. 2013. Laboratory study on the potential use of recycled inert construction waste material in the substrate mix for extensive green roofs, *Ecological Engineering*, 61C, 706-714. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.02.015>

Molineux, C., Fentiman, C., Gange, A. 2009. Characterising alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the U.K, *Ecological Engineering*, 35(10), 1507-1513. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.06.010>

Ottelé, M., Perini, K., Fraaij, L.A., Haas, E.M., Raiteri, R. 2011. Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems, *Energy and Buildings*, 43(12), 3419-3429. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.010>

Perini, K., Rosasco, P. 2013. Cost–benefit analysis for green façades and living wall systems, *Building and Environment* 70, 110- 121. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.012>

Rivas, Y., Moreno-Pérez, M.F., Roldán-Cañas, J. 2017a. Use of the rice husk as an alternative substrate for growing media on green walls drip irrigation. European Geosciences Union General Assembly 2017, 23–28 April, Vienna, Austria, EGU2017-4604

Rivas, Y., Moreno-Pérez, M.F., Roldán-Cañas, J. 2017b. Puesta en marcha de un sistema inteligente de riego por goteo para muros verdes con el uso de microcontroladores y microprocesadores. XXXV Congreso Nacional de Riegos, Tarragona, España, <https://doi.org/10.25028/CNRiegos.2017.B05>

Rose, R., Haase, D. 2000. The use of coir as a containerized growing medium for Douglas fir seedlings. *Native Plants Journal*, 1(2) 107-111. <https://doi.org/10.3368/npj.1.2.107>

Safikhani, T., Aminatuzuhariah M.A., Ossen, D.R., Baharvand, M. 2014. A review of energy characteristic of vertical greenery systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40(C), 450-462. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.166>

Samuelsson, R., Burvall, J., Jirjis, R. 2006. Comparison of different methods for the determination of moisture content in biomass, *Biomass & Bioenergy*, 30(11), 929-934. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.004> Taiz, L., Zeiger, E. 2006. *Plant physiology*. 4th Edition, Sinauer Associates, Inc., Sunderland.

Ustin, S.L., Smith, M.O., Jacquemoud, S., Verstraete, M.M., Govaerts, Y. 1998. GeoBotany: Vegetation mapping for Earth sciences, in *Manual of Remote Sensing, Remote Sensing for the Earth Sciences*, edited by A. N. Rencz, 3rd ed., John Wiley, Hoboken, N. J. 3:189248.

Vijayaraghavan, K., Raja, F. 2014. Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: plant growth experiments and adsorption, *Water Research*, 63, 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.06.012>



## **9 DISCUSIÓN**

## DISCUSIÓN

### Capítulo 1.

#### THE EFFECT OF GREEN WALLS ON BUILDINGS

Existe un potencial importante en la reducción de las temperaturas urbanas con la implementación de muros verdes en los edificios. Se puede concluir que cuanto más cálido y seco es el clima, mayor es el efecto de los muros verdes en las temperaturas del edificio. Sin embargo, se ha señalado que también los climas húmedos pueden beneficiarse con los muros verdes.

Los muros verdes establecidos en el edificio han demostrado su potencial para mejorar la calidad del aire y reducir la temperatura de la superficie en el entorno construido. Sin embargo, los cambios de temperatura, ruido y la mejora de la calidad del aire, son significativos según el área que ocupan los muros verdes en la edificación.

### Capítulo 2.

#### USE OF THE RICE HUSK AS AN ALTERNATIVE SUBSTRATE FOR GROWING MEDIA ON GREEN WALLS DRIP IRRIGATION

La *Lavándula stoechas* no sobrevivió al segundo mes del experimento en todos los prototipos. Teniendo en cuenta que la temporada de plantío fue en mayo de 2016, donde las características climáticas fueron normales, aumentando la temperatura considerablemente en los próximos meses del experimento, es posible decir que esta especie no es adecuada para muros verdes en condiciones de exposición directa al sol y el plantío en verano, aunque en la literatura (Ávila, 2004), posea las mismas necesidad hídricas de la *lampranthus spectabilis* y sea recomendada para la elaboración de jardines convencionales en la zona de Andalucía.

Se debe tener en cuenta que la plantación se realizó en verano y que esto puede tener consecuencias en el desarrollo de las plantas, debido o las temperaturas extremas de la región,

desfavoreciendo el desarrollo del material vegetal como en este caso la *lavándula stoechas* la cual no sobrevivió al trasplante al jardín vertical y a la exposición directa al sol.

Por otro lado, el análisis de datos en cuanto al *lampranthus spectabilis* ha demostrado resultados interesantes en lo que respecta a su tasa de crecimiento, a pesar de que se observaron diferencias en crecimiento en los diferentes sustratos, estas no eran significativas como también fue demostrado en los experimentos realizados por Genevini, (1997).

En cuanto a los reconocimientos de la calidad del material vegetal, se observó un inicio de clorosis en la parte inferior de cada prototipo lo que se definió como la principal patología debida quizás a la posición vertical donde en la parte inferior se acumularía más agua que en la parte superior. También se encontró al evaluar la instalación, que la lana de roca puede ser considerada el sustrato menos viable, en particular por su poca maleabilidad y dificultad para su instalación en los prototipos de muro verde utilizados en el experimento en contraste con los estudios realizados por Abad et al., (2001) el cual no la utiliza sobre espacios verticales.

### **Capítulo 3.**

#### **LOW-COST MICROCONTROLLERS AND MICROPROCESSORS TO ENVIRONMENT CONTROL IN GREEN WALL. APPLICATION TO SMART DRIP IRRIGATION SYSTEM**

En el experimento se observó la evolución de las lecturas tomadas durante varios días consecutivos por los sensores de temperatura y humedad relativa del aire, humedad del suelo y precipitación. Se demostró que los datos se corresponden con las respuestas esperadas de los sensores, es decir, valores máximos de humedad del aire en horas en las que la temperatura alcanza sus mínimos, lecturas máximas de luz a medio día, así como las fluctuaciones de la humedad del sustrato en respuesta a los riegos realizados coincidiendo con los resultados de Sathiesh et al (2016).

Se intentó mantener la humedad de los sustratos alrededor de un determinado valor para que las plantas en ellos desarrolladas pudieran crecer sin problemas. En el caso del sustrato formado por fibra de coco y cascarilla de arroz, material más drenante, se mantuvieron los



valores en el intervalo 500-600 mV, en tanto que para el sphagnum, material con mayor capacidad de retención de agua, el intervalo usado fue 370-450 mV. Lo anterior se comprobó tras un suceso de lluvia ya que hubo una mayor escorrentía en los sustratos formados por fibra de coco y cascarilla de arroz.

La principal contribución de este trabajo ha sido usar diferentes tipos de sensores para controlar un sistema de riego automático. Mientras que otros autores (Oates et al., 2017; Bajer and Krejcar, 2015) han usado únicamente sensores de humedad del suelo, en nuestro caso también se usaron un sensor de lluvia para el riego, así como el almacenamiento de los datos en un microprocesador. También, en tanto que otros autores (Groener et al., 2015; Fisher, 2012; Bajer and Krejcar, 2015; Bitella et al., 2014) han usado almacenamiento en tarjetas SD o directamente los han volcado a páginas web, en nuestro caso se usó nuestro propio sistema de almacenamiento como un sistema de manejo de base de datos relacional MYSQL, para tener un mejor y mayor almacenamiento de datos para su posterior análisis. También el proyecto usa una web fácil de entender por el usuario que grafica los datos en tiempo real. Finalmente, el sistema se aplicó en muro verdes que es un sistema de difícil acceso a causa de su localización, dando un nuevo uso a un sistema de sensores de bajo coste.

#### **Capítulo 4.**

##### **MEJORA EN LA RETENCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN MUROS VERDES USANDO MATERIALES ALTERNATIVOS COMO MEDIO DE CRECIMIENTO**

Por la influencia de la gravedad, la mayor parte de agua se acumula en la base de los prototipos de muro verde, donde se llenan los espacios porosos, reduciendo la disponibilidad de aire para las raíces. La mezcla de fibra de coco y cascarilla de arroz que es un material que posee una fuerte capilaridad, proporcionó unas condiciones de humedad más uniformes para las raíces de la parte inferior del prototipo. Este sustrato es capaz de aumentar la aireación en la base del sustrato y reducir el secamiento de la superficie cerca al fieltro de los prototipos de muro verde, por esto la gestión de la humedad superficial del mismo es mucho más fácil ya que el material tiene la capacidad de extraer la humedad del sustrato en la parte más profunda para reemplazar las pérdidas por evaporación

El sustrato compuesto por fibra de coco y cascarilla de arroz es un material elástico con una estabilidad física excepcional con respecto al musgo *Sphagnum*. En este contexto, la estabilidad física se refiere a la capacidad del sustrato para proporcionar aire y humedad a las raíces de las plantas. Un problema que se encontró sobre el musgo *Sphagnum* fue que sus propiedades físicas cambiaban considerablemente con el contenido de humedad, cuando estaba muy húmedo, tendía a colapsarse, disminuyendo el aire disponible y cuando está seco, se contrae dejando espacios en los prototipos, en comparación con el sustrato compuesto por fibra de coco y cascarilla de arroz que no cambia mucho cuando se moja o se encoge excesivamente cuando se seca. También tuvo una buena estabilidad física a lo largo del experimento, esto asegura que la salud de las plantas no se perjudicará con el tiempo.

El hecho de que el contenido de clorofila en las plantas del sustrato mezclado de fibra de coco y cascarilla de arroz sea significativamente superior al encontrado en el musgo *Sphagnum*, podría deberse, entre otros factores, a que la mezcla de fibra de coco y cascarilla de arroz permitiría una adecuada disponibilidad de nutrientes, entre los que se podrían encontrar el nitrógeno y el magnesio, que son componentes fundamentales de la molécula de clorofila.

## **10 CONCLUSIONES**

## CONCLUSIONES

Los resultados expuestos en la presente memoria de Tesis Doctoral no solo demuestran la efectividad de los muros verdes para el aumento de áreas verdes que ayudan a mitigar los efectos adversos del cambio climático en las ciudades, sino que también ofrecen directrices para el uso de materiales alternativos que pueden encontrarse en la región de Andalucía tanto para los sistemas de crecimiento como para el control de los sistemas de riego.

Pero sus cualidades no sólo quedan restringidas a los muros verdes, sino que también pueden ser usadas tanto en sistemas de horticultura como en cultivos convencionales y otros tipos de naturaleza urbana.

Estas conclusiones generales se sustentan en las siguientes conclusiones particulares:

### Capítulo 1.

#### THE EFFECT OF GREEN WALLS ON BUILDINGS

- I. Atendiendo a estas premisas se obtiene una herramienta eficaz para luchar contra la pérdida de áreas verdes con el uso de materiales alternativos para la construcción de muros verdes y que aporta importantes beneficios sociales y ambientales de forma globalizada.
- II. La instalación de sistemas de muros verdes para el bloqueo de la radiación solar extrema y el uso de plantas naturales con efectos de refrigeración basados en la evaporación y la transpiración puede reducir la temperatura notablemente.
- III. Los efectos de enfriamiento de los sistemas de muros verdes reducen la demanda de energía de enfriamiento y causan una eficiencia energética en edificios, que es la habilidad del edificio para operar y funcionar con un consumo mínimo de energía. Estas habilidades de los sistemas de muros verdes ofrecen numerosos beneficios ambientales y económicos.
- IV. Es necesario sensibilizar al público sobre la aplicación y los beneficios de los muros verdes en los edificios. La falta de información disponible sobre los

beneficios económicos y ambientales es la razón por la que los propietarios y los inversores no solicitan la implementación de sistemas de muros verdes debido al desembolso inicial, a pesar de que su instalación es relativamente barata y ofrece numerosas ventajas posteriores.

## **Capítulo 2.**

### **USE OF THE RICE HUSK AS AN ALTERNATIVE SUBSTRATE FOR GROWING MEDIA ON GREEN WALLS DRIP IRRIGATION**

- I. Materiales como la cascarilla de arroz y la fibra de coco que son productos residuales, son sustitutos aceptables para los sustratos comercializados convencionalmente para el cultivo de plantas de muros verdes, debido a que los sustratos normalmente utilizados tienen un mayor coste por su escasez en la zona de Andalucía.
- II. Debe hacerse siempre un riguroso análisis de las características físicas y químicas de los sustratos de origen de subproductos agrícolas antes de utilizarse para medio de crecimiento lo que resulta indispensable para asegurar su utilidad y desempeño en la construcción de muros verdes.
- III. La finalidad de los sustratos alternativos como medio de crecimiento debe ser producir una planta de calidad, reduciendo los costes de producción, además de una fácil obtención y eliminación del sustrato, una vez utilizado, para no provocar un impacto negativo sobre el medio ambiente.

## **Capítulo 3.**

### **LOW-COST MICROCONTROLLERS AND MICROPROCESSORS TO ENVIRONMENT CONTROL IN GREEN WALL. APPLICATION TO SMART DRIP IRRIGATION SYSTEM**

- I. El sistema Arduino se adaptó a las necesidades del proyecto, lo que permitió un monitoreo continuo de los parámetros ambientales como temperatura, humedad relativa, horas de luz solar, humedad del suelo y flujo de agua para asegurar unas óptimas condiciones del muro verde.

- II. El uso de microcontroladores y microprocesadores de bajo costo puede aplicarse a diferentes sistemas de control ambiental, siendo el riego de precisión uno de los más importantes, ya que mejora la gestión de los recursos hídricos en áreas con escasez de agua.
- III. Elegir equipos de bajo coste, no significa reducir el coste de las mediciones en sí, sino más bien significa que se puede lograr una mayor densidad de datos por el mismo valor que un sensor de alta calidad, y de esta forma la variabilidad espacio temporal del desarrollo y los procesos del muro verde o de otros cultivos se pueden cubrir mejor.
- IV. El manejo del riego es un ejemplo de la aplicación de la tecnología low-cost a muros verdes, sin embargo, el manejo se puede modificar en función de las condiciones climáticas o las necesidades de las especies vegetales instaladas en ellos.

#### **Capítulo 4.**

##### **MEJORA EN LA RETENCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN MUROS VERDES USANDO MATERIALES ALTERNATIVOS COMO MEDIO DE CRECIMIENTO**

- I. El sustrato compuesto de cascarilla de arroz y fibra de coco posee una mayor homogeneidad en la distribución del agua de riego que el sustrato convencional compuesto de musgo *Sphagnum*, aunque tuvo poca retención de agua.
- II. Las especies *Aptenia cordifolia* y *Lampranthus spectabilis* plantadas en el sustrato a base de fibra de coco y cascarilla de arroz, igualan en calidad visual y porcentaje de marras a las plantas desarrolladas en sustratos a base de musgo *Sphagnum*.
- III. Se encontró una mayor concentración de clorofila en el material vegetal plantado en el sustrato alternativo de fibra de coco mezclado con cascarilla de arroz con respecto al material vegetal plantado en el musgo *Sphagnum*.
- IV. Los resultados obtenidos demostraron que el medio de crecimiento de arroz mezclado con fibra de coco puede ser utilizado con éxito como medio de cultivo en muros verdes.

## **11 REFERENCIAS**

## REFERENCIAS

- Abad M, Noguera P, Bures S, 2001 National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant producción: case study in Spain. *Bioresource Technology*. 77, pp. 197-200
- Abad, M. 2005. Physical Properties of Various Coconut Coir Dusts Compared to Peat. *HortScience* Vol. 40(7). Pp.2138-2144.
- Alexandri E, Jones P. 2008. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Build Environ*;43:480–93.
- Arenas, M., Vavrina, C.S., Cornell, J.A., Hanlon, E.A., Hochmuth, G.J.. 2002. Coir as an alternative to peat in media for tomato plant production. *HortScience* 37:309-312
- Artero, T. O. 2016. *El mundo Genuino-Arduino: Curso práctico de formación*; RC libros, Madrid,; pp, 566, ISBN 9788494345029.
- Ávila Alabarces, R. 2004. *Manual de Riego de Jardines*. E. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca.
- Bajer, L.;Krejcar, O. 2015. Design and Realization of Low Cost Control for Greenhouse Environment with Remote Control. *IFAC-PapersOnLine*, 48-4, 368–373.
- Banzi, M.; Shiloh, M. 2016. *Introducción a Arduino*, O'Reilly media, Grupo Anaya s.a., Madrid,; pp, 128, ISBN 9788441531772.
- Bartfelder, F., Köhler, M., 1987. *Experimentelle untersuchungen zur function von fassadenbegrünungen*, Dissertation TU Berlin 612S.
- Bass B, Liu K, Baskaran B. 2003. Evaluating rooftop and vertical gardens as an adaptation strategy for urban areas, CCAF impacts and adaptation progress report, April 1, 1999–March 31; p. 1–106.
- Benabdelkader, T. 2014. Biodiversité, Bioactivité et Biosynthèse des Composés Terpéniques Volatils des Lavandes Ailées, *Lavandula stoechas* Sensu Lato, un Complexe d'Espèces Méditerranéennes d'Intérêt Pharmacologique, thèse en biologie et Ecophysiologie végétale



de l'Ecole Normale Supérieure de Kouba-Alger, Algérie & de l'Université Jean-Monet de Saint-Etienne, France. P. 259.

Binabid J. 2010. Vertical garden: the study of vertical gardens and their benefits for low-rise buildings in moderate and hot climates [1476132]. United States – California: University of Southern California.

Birkeland J. 2009. Eco-retrofitting with building integrated living systems. In: Proceedings of the 3rd CIB international conference on Smart and Sustainable Built Environment (SASBE09). Delft, Netherlands: Aula Congress Centre, Delft University of Technology; p. 1–9.

Bitella, G. Rossi, R. Bochicchio, R. Perniola, M. Amato, M. 2014. A Novel Low-Cost Open-Hardware Platform for Monitoring Soil Water Content and Multiple Soil-Air-Vegetation Parameters, *Sensors* 14, 19639-19659.

Blum, J. 2014. *Arduino a fondo*, Wiley, Grupo Anaya, s.a., Madrid, pp. 352, ISBN 9788441536524.

Bribach C. 2011. Vertical garden panel. US 2011/0059518 A1; 10 March 2011.

Burdett, A.N., Simpson, D.G., Thompson, C.F., 1983. Root development and plantation establishment success. *Plant Soil* 71, 103–110

Bussi, G.; Janes, V.; Whitehead, P.; Dadson, S.; Holman, I. 2017. Dynamic response of land use and river nutrient concentration to long-term climatic changes. *Sci. Total Environ.* 590–591, 818–831.

Cabrera R., I. 1999. Propiedades, uso y manejo de sustratos decultivo para la producción de plantas en maceta. *Revista Chapingo-Serie Horticultura.* 5: 5-11

Calaza, G.T. 2014. *Taller de Arduino: Un enfoque práctico para principiantes*, Marcombo s.a., Barcelona, pp. 376, ISBN 9788426721501.

Ceballos, M, C. Gorricho, J, L. Gamboa, O, P. Huerta, M, K. Rivas, D. Rodas, M, E. 2015. Fuzzy System of Irrigation Applied to the Growth of Habanero Pepper (*Capsicum chinense*

Jacq.) under Protected Conditions in Yucatan, Mexico, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, pp. 13, ID 123543, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/123543>

Czarnomski, N. G.; Moore, T.; Pypker, J.; Licata, B. 2005. Precision and accuracy of three alternative instruments for measuring soil water content in two forest soils of the Pacific Northwest. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(8): 1867-1876.

Darlington AB, Dat JF, Dixon MA. 2001. The biofiltration of indoor air: air flux and temperature influences the removal of toluene, ethylbenzene, and xylene. *Environ Sci Technol*; 35:240–6.

Dennis, A.K. 2013. *Raspberry Pi home automation with Arduino*, Packt Publishing, Birmingham, United Kingdom, pp. 176, ISBN 9781849695862.

Dinsdale S, Pearen B, Wilson C. 2006. Feasibility study for green roof application on Queen's University campus. Queen's Physical Plant Services.

Donahue J. 2011. An empirical analysis of the relationships between tree cover, air quality, and crime in urban areas [1491329]. United States – District of Columbia: Georgetown University.

Egea G, Pérez-Urrestarazu L., González-Pérez J, Franco-Salas A, Fernández-Cañero R. 2014. Lighting systems evaluation for indoor living walls, *Urban Forestry & Urban Greening*, 13, 475-483.

Emilsson T. 2008. Vegetation development on extensive vegetated green roofs: influence of substrate composition, establishment method and species mix, *Ecological Engineering*, 33 (3–4) 265–277.

Eumorfopoulou EA, Kontoleon KJ. 2009. Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. *Build Environ*;44:1024–38.

Evans M, Stamps R, 1996. Growth of Bedding Plants in Sphagnum Peat and Coir Dust-Based Substrates, *Journal of Environmental Horticulture*, 14, 187-190.

Fisher, D.K. 2012. Open-Source Hardware Is a Low-Cost Alternative for Scientific Instrumentation and Research. *Modern Instrumentation*, 1, 8–20.

FLL. 2002. Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung. Landschaftsbau e.V, ISBN:393448459x, pp. 99.

Francis A, Lorimer J. 2011. Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls, *Journal of environmental management* 92 (6), 1429-1437.

García C. O.; Alcántar G., G.; Cabrera, R. I.; Gavi R., F.; Volke H., V. 2001, Evaluación de sustratos para la producción de *Epipremnum aureum* y *Spathiphyllum wallisii* cultivadas en maceta, *Terra Latinoamericana*, vol. 19, núm. 3, pp. 249-258

Garcia-Sánchez, F.; Garcia-Haro, J. 2011. Wireless sensor network deployment for integrating video-surveillance and data-monitoring in precision agriculture over distributed crops. *Computers and electronics in agriculture*, 75, 288–303.

Genevini, P. 1997, Rice hull degradation by co-composting with dairy cattle slurry. *Soil Sci. Plant Nutrition* 43: 135-147.

Gerhardt C, Vale B. 2010, Comparison of resource use and environmental performance of green walls with façade greenings and extensive green roofs. SB10 New Zealand. Te Papa, Wellington.

Golden,R. 2013. *Raspberry Pi Networking Cookbook*, Packt Publishing, Birmingham, United Kingdom, , pp. 204, ISBN 1849694605.

Groener, B.;Knopp, N.;Korgan,K.;Perry,R.; Romero, J.; Smith, K.;Stainback, A.;Strzelczyk, A.;Henriques, J. 2015. Preliminary Design of a Low-Cost Greenhouse with Open Source Control Systems. *Procedia Engineering*, 107, 470–479.

Hansmann, E. 1973. Pigment Analysis. In *Handbook of Phycological Methods: Culture Methods and Growth Measurements*; Stein, J.R., Ed.; Cambridge University Press: London, UK. Vol. 1, pp. 359-368.

Henricot, B., Denton, G., Denton, J., Scrace, J., Spooner, B., 2009. First report of *Albugotrianthemae* on *Delosperma* and *Lampranthus* in the UK. *Plant Pathology* 58, 803.

Hertzog, P.; Swart, A.J. 2015. The Use of an Innovative Jig to Stimulate Awareness of Sustainable Technologies among Freshman Engineering Students. *Sustainability*, 7, 9100–9117.

Holman J, Bugbee B, Chard J. 2005. A Comparison of Coconut Coir and Sphagnum Peat as Soilless Media Components for Plant Growth, Utah State Univ, Department of Plants, Soils, and Biometeorology.

Hubbart, J.; Link, T.; Campbell, C.; Cobos, D. 2005. Evaluation of a low-cost temperature measurement system for environmental applications. *Hydrological Processes*, 19, 1517–1523.

Hunter A.M, Williams N.S.G, Rayner J.P, Aye L, Hes D, Livesley S.J. 2014. Quantifying the thermal performance of green façades: a critical review. *Ecol Eng*; 63:102–13.

Jayaraman, P.; Yavari, A.; Georgakopoulos, D.; Morshed, A.; Zaslavsky, 2006. A. Internet of Things Platform for Smart Farming: Experiences and Lessons Learnt, *sensors*, 16, 1884.

Jiménez-Carvajal, C.; Ruiz-Penalver, L.; Vera-Repullo, J.A.; Jiménez-Buendía, M.; Antolino-Merino, A.; Molina-Martínez, J. M. 2017. Weighing lysimetric system for the determination of the water balance during irrigation in potted plants. *Agricultural Water Management*, 183, 78–85.

Jørgensen L, Dresbøll DB, Thorup-Kristensen K. 2014. Root growth of perennials in vertical growing media for use in green walls, *Scientia Horticulturae* 166, 31–41.

Kim G, Lim HS, Lim TS, Schaefer L, Kim JT. 2012. Comparative advantage of an exterior shading device in thermal performance for residential buildings. *Energy Build*; 46:105–11.

Kleerekoper L, van Esch M, Salcedo TB. 2012. How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. *Resour Conserv Recycl*; 64:30–8.

Köhler M. 2007. Rainwater management with green roofs and living walls.

Köhler M., 2008, Green façades-a view back and some vision, *Urban Ecosyst* 11:423-436, doi 10.1007/s11252-008-0063-x

Koumoudis S. 2011. Green wall planting module, support structure and irrigation control system. US 2011/0088319 A1;

Larcher F, Fornaris A, Devecchi M. 2013. New Substrates for Living Walls, III International conference on landscape and urban horticulture, *Acta Horticulturae*, V: 999, 277-281.

Laskar,M.R.;Bhattacharjee,R.;Sau Giri, M.; Bhattacharya, P. 2016. Weather Forecasting using Arduino Based Cube-Sat, *Procedia Computer Science*, 89, 320–323.

Laurence M, Sabin R. 2011. Plant wall and modules for growing plants. US 2011/ 0107667 A1;.

Lee A, Sian G, Greaves H. 2010. Green Wall System. WO 2010/009505 A1; 28 January.

Mahan, J.R.; Yeater, K.M. 2008. Agricultural applications of a low-cost infrared thermometer. *Computers and electronics in agriculture*. 64, 262–267.

Manso M, Virtudes A, Castro-Gomes J. 2012. Development of a modular system for vegetated surfaces in new buildings and retrofitting. *World Green Roof Congress*, Copenhagen, Denmark.

Manso M, Castro-gomes J, D. silva P, Virtudes A, Delgado F, 2013. Modular system design for vegetated surfaces, A proposal for energy-efficient buildings, BESS-SB13 CALIFORNIA: Advancing Towards Net Zero. Pomona, California, USA. 24-25 June.

Manso M, Castro-Gomes J. 2015. Green wall systems: A review of their characteristics, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, issue C, p. 863-871.

Margot Franken. 2007. *Gestión de aguas. Conceptos para el nuevo milenio*.

McPherson G.E, Herrington L.P, Heisler Gordon M. 1988. Impacts of vegetation on residential heating and cooling. *Energy Build*;12: 41–51.

Mickovski S, Buss K, McKenzie B, Sökmener B. 2013. Laboratory study on the potential use of recycled inert construction waste material in the substrate mix for extensive green roofs, *Ecological Engineering*, 61C, 706–714.

Miller A, Shaw K, Lam M. 2007. Vegetation on building facades: ‘‘Bioshader’’. Case Study Report;.

Mir M.A. 2011. Green facades and building structures. Delft: Delft University of Technology.

Mohanraj, I. Ashokumar,K. Naren, J. 2016. Field Monitoring and Automation using IOT in Agriculture Domain, *Procedia Computer Science*, 93, 931–939.

Molineux C, Fentiman C, Gange A. 2009. Characterising alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the U.K, *Ecological Engineering.*, 35 (10), 1507–1513.

Monk, S. 2015. Raspberry Pi 200 Ejercicios prácticos problemas y soluciones de hardware y software, O'Reilly Media, Grupo Anaya,s.a, Madrid, pp. 415, ISBN 9788441536289.

Newton JJJ. 2004. Building green – a guide to using plants on roofs, walls and pavements. City Hall, The Queen's Walk, London SE1 2AA: Greater London Authority.

Nielsen TS, Hansen KB. 2007. Do green areas affect health? Results from a Danish survey on the use of green areas and health indicators *Health Place*,13:839–50.

Oates, M.J.; Fernández-López, A.; Ferrández-Villena, M.; Ruiz-Canales, A. 2017. Temperature compensation in a low-cost frequency domain (capacitance based) soil moisture sensor. *Agricultural Water Management*, 183, 86–93.

Onishi, A., Cao, X., Ito, T., Shi, F., Imura, H., 2010. Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots. *Urban Forestry & Urban Greening* 9, 323-332.

Oral, GK, Yener, AK, Bayazit, NT. 2004. Building envelope design with the objective to ensure thermal, visual and acoustic comfort conditions. *Build Environ*;39:281–7.

Ottelé, M, Perini, K, Fraaij, LA, Haas, EM, Raiteri, R. 2011. Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems, *Energy and Buildings* 43 (12), 3419-3429.

Ottelé M. Van Bohemen H., Fraaij, A.L.A., 2010, Quanti- fyng the deposition of particulate matter on climber vege- tation on living walls, *Ecological Engineering* 36 154- 162.

Ottele, M. 2010. Vertical greened surfaces and the potential to reduce air pollution and the improvement of the insulation value of buildings. Delft University of Technology.

Oxer, J.; Blemings, H. 2010. *Practical Arduino: cool projects for open source hardware*, Technology in Action, New York, EEUU, pp, 445, ISBN 9781430224778.

Pérez-Urrestarazu, L., Egea, G., Franco-Salas, A., and Fernández-Cañero, R, 2014. Influence of different variables on living wall irrigation. 1st International Green Wall Conference.

Pérez-Urrestarazu, L., Egea, G., Franco-Salas, A., and Fernández-Cañero, R. 2014. Irrigation Systems Evaluation for Living Walls. *J. Irrig. Drain Eng.*, 140(4), 04013024.

Perini K, Rosasco P. 2013. Cost–benefit analysis for green façades and living wall systems, *Building and Environment* 70, 110-121

Pierce, F.J.; Elliott, T.V. 2008. Regional and on-farm wireless sensor networks for agricultural systems in Eastern Washington. *Computers and electronics in agriculture*, 61, 32–43.

Powe, N.A., Willis, K.G., 2004, Mortality and morbidity benefits of air pollution (SO2 and PM10) adsorption attrib- utable to woodland in Britain, *Journal of Environmental Management*, 70, 119-128.

Raji B, Tenpierik M.J., Dobbelteen A., 2015, the impact of greening systems on building energy performance: a literature review *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 45, pp. 610–623.

Ray, P. 2016. A survey on Internet of Things architectures. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 1-29.

Ripoll, A.; Viana, M.; Padrosa, M.; Querol, X.; Minutolo, A.; Hou, K.M.; Barcelo-Ordinas, J.M.; Garcia-Vidal, J. 2019. Testing the performance of sensors for ozone pollution monitoring in a citizen science approach. *Sci. Total Environ.* 651, 1166–1179.

Rivas Y, Moreno-Pérez, M.F, Roldán-Cañas, J. 2017a. Use of the rice husk as an alternative substrate for growing media on green walls drip irrigation. European Geosciences Union General Assembly 2017, 23–28 April, Vienna, Austria, EGU2017-4604

Rivas Y, Moreno-Pérez, M.F, Roldán-Cañas, J. 2017b. Puesta en marcha de un sistema inteligente de riego por goteo para muros verdes con el uso de microcontroladores y microprocesadores. XXXV Congreso Nacional de Riegos, Tarragona, España, DOI: <http://dx.doi.org/10.25028/CNRiegos.2017.B05 B-05>

Rivas-Sánchez Y, Moreno-Pérez, M.F, Roldán-Cañas, J. 2019. The effect of green walls on buildings. En: D.A. Krawczyk (Ed.). *Buildings 2020+. Constructions, materials and installations*. Printing House of Bialystok University of Technology. Poland, 92-99. Doi: 10.24427/978-83-65596-71-0

Rivas-Sánchez, Y.A.; Moreno-Pérez, M.F.; Roldán-Cañas, J. Environment Control with Low-Cost Microcontrollers and Microprocessors: Application for Green Walls. *Sustainability* 2019, 11, 782 Doi: 10.3390/su11030782

Rivas-Sánchez, Y.A., Moreno-Pérez, M.F., Roldán-Cañas, J. Mejora en la retención y distribución de agua en muros verdes usando materiales alternativos como medio de crecimiento. *Ingeniería del Agua*, 2019. 23 (1), 19-31. Doi: 10.4995/Ia.2019.9736

Rose R, Haase D. 2000. The use of coir as a containerized growing medium for Douglas fir seedlings. *Native Plants Journal*, 2: 107-111.

Ruiz-García, L.; Lunadei, L.; Barreiro, P.; Robla, I. 2009. A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: State of the art and current trends. *Sensors*, 9, 4728–4750.



Safikhani, Tabassom, Abdullah, Aminatuzuhariah Megat, Ossen, Dilshan Remaz and Baharvand, Mohammad. 2014. A review of energy characteristic of vertical greenery systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, issue C, p. 450-462.

Samuelsson, R., Burvalla, J., Jirjis, R. 2006. Comparison of different methods for the determination of moisture content in biomass, *Biomass & Bioenergy*; 30, 929–934.

Sathiesh Kumar, V.; Gogul, I.;Deepan Raj, M.;Pragadesh, S.K.;Sarathkumar Sebastin, J. 2016. Smart Autonomous Gardening Rover with Plant Recognition using Neural Networks. *Procedia Computer Science*, 93, 975–981.

Scudiero, E.; Berti, A.; Teatini, P.; Morari, F. 2012. Simultaneous monitoring of soil water content and salinity with a low-cost capacitance-resistance probe. *Sensors*, 12, 17588–17607.

Sheweka, SM, Mohamed, NM. 2012. Green facades as a new sustainable approach towards climate change. *Energy Procedia*;18:507–20.

Shiah K, Kim JW, Oldridge S. 2011. An investigation into the application of vertical garden at the New SUB Atrium. Vancouver, Canada: The University of British Columbia.

Srbinovska, M. Gavrovski, C. Dimcev, V. Krkoleva A. Borozan, V. 2015 Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks, *Journal of Cleaner Production*, 88, 297-307.

Starr, J.L.; Paltineanu, I.C. 2002. Methods for Measurement of Soil Water Content: Capacitance Devices. p. 463-474,. In J.H.Dane, and G.C.Topp (ed.) *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*. Soil Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc.

Stec WJ, Van Paassen AHC, Maziarz A. 2004. Modelling the double skin façade with plants. *Energy Build*, 37:419–27.

Stenberg, T., Viles, H., Carthersides, A., Edwards, M., 2010. Dust particulate absorption by Ivy (*Hedera Helix L.*) on historic walls in urban environments. *Science of the Total Environment*, 409, 162-168.

Taib N, Abdullah A, Fadzil S, Yeok F. 2010. An assessment of thermal comfort and users' perceptions of landscape gardens in a high-rise office building. *J Sustain Dev*, 3:153.

Taiz, L. and Zeiger, E. 2006. *Plant physiology*. 4th Edition, Sinauer Associates, Inc., Sunderland.

Tanenbaum, J.; Williams, A. 2013. Democratizing technology: Pleasure, utility and expressiveness in DIY and maker practice. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Paris, France, 27 April–2 May 2013; pp. 2603–2612.

Thalheimer, M. 2013. A low-cost electronic tensiometer system for continuous monitoring of soil water potential. *Journal of Agricultural Engineering*, 44, doi:10.4081/jae.2013.211.

Ulrich, R.S., Simons, R., 1986, Recovery from stress during exposure to every day outdoor environments. In Wineman, J., Barns, R., Zimring, C., *The costs of not knowing*, proceedings of the seventieth annual conference of the environmental research association, Washington DC.

Ustin, S.L., Smith, M.O., Jacquemoud, S., Verstraete, M.M., y Govaerts, Y. 1998. GeoBotany: Vegetation mapping for Earth sciences, in *Manual of Remote Sensing, Remote Sensing for the Earth Sciences*, edited by A. N. Rencz, 3rd ed., John Wiley, Hoboken, N. J. 3:189248.

Van Renterghem T, Botteldooren D. 2009. Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. *Build Environ*;44:1081–7.

Vijayaraghavan K, Raja F. 2014. Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: plant growth experiments and adsorption, *Water Research*., 63, 94–101.

White EV, Gatersleben B. 2011. Greenery on residential buildings: does it affect preferences and perceptions of beauty? *J Environ Psychol*;31:89–98.

Wong NH, et al., 2009, Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls, *Building and Environment*, doi:10.1016/j.buildenv.2009.08.005

Wong NH, Kwang Tan AY, Tan PY, Chiang K, Wong NC. 2010. Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Build Environ*, 45:411–20.

Wong NH, Tan AYK, Tan PY, Wong NC. 2009. Energy simulation of vertical greenery systems. *Energy Build*, 41:1401–8.

Zamoglu, Z; Erdogan, R; Kekec, S; Sucu, MY; Budak, F. 2009. Heavy metal uptake by *Aptenia cordifolia* as utility for sewage sludge compost recuperation using leachate. *Asian Journal of Chemistry*. 2 : 1081-1089.

## **12 ANEXOS**

## Anexo 1 Programación en IDE Arduino

```
#include <SPI.h>
#include <Ethernet.h>
#include <ThingSpeak.h>
#include <DHT.h>
#include "DHT.h" //cargamos la librería DHT
#define DHTPIN 2 // El pin al que se conecta el sensor DHT22
#define DHTTYPE DHT22 // Definimos el tipo de sensor DHT22 o DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); //Se inicia una variable que será usada por Arduino para
comunicarse con el sensor
// Pin de lectura para el sensor de flujo
#define FLOWSENSORPIN1 3
#define FLOWSENSORPIN2 5

// Protocolo conexión a internet,
String apiKey = "1Y0QT045PUULVEIF";
const char* server = "api.thingspeak.com";
const char* serverPi = "172.21.146.27";
byte mac[]={0x90,0xA2,0xDA,0x0D,0xE4,0x6B}; //MAC
IPAddress myDns(150,214,110,3);//dns
IPAddress ip(192,168,128,216); //IP

// Pulsos sensor de flujo!
volatile uint16_t pulses = 0;
volatile uint16_t pulses2 = 0;
// Rastrea el estado del pin del pulso
volatile uint8_t lastflowpinstate;
volatile uint8_t lastflowpinstate2;
// Se mantiene el tiempo entre pulsos
volatile uint32_t lastflowratetimer = 0;
volatile uint32_t lastflowratetimer2 = 0;
// y se usa para calcular un caudal
volatile float flowrate;
volatile float flowrate2;
// ¡La interrupción se llama una vez por milisegundo, se buscan pulsos del sensor!
SIGNAL(TIMER0_COMPA_vect) {
  uint8_t x = digitalRead(FLOWSENSORPIN1);
  if (x == lastflowpinstate) {
    lastflowratetimer++;
    return; // No cambia nada!
  }
  if (x == HIGH) {
```

```

// transición de low para high
pulses++;
}
lastflowpinstate = x;
flowrate = 1000.0;
flowrate /= lastflowratetimer; // en hertz
lastflowratetimer = 0;
}
SIGNAL(TIMER1_COMPA_vect) {
uint8_t x = digitalRead(FLOWSSENSORPIN2);
if (x == lastflowpinstate2) {
lastflowratetimer2++;
return; // No cambia nada!
}
if (x == HIGH) {
// transición de low para high
pulses2++;
}
lastflowpinstate2 = x;
flowrate2 = 1000.0;
flowrate2 /= lastflowratetimer2; // en hertz
lastflowratetimer2 = 0;
}
void useInterrupt(boolean v) {
if (v) {
// Timer0 ya se usa en millis () - interrumpimos en alguna parte del medio y llamar a la función
"Compar A" que se mostró arriba
OCR0A = 0xAF;
TIMSK0 |= _BV(OCIE0A);
} else {
// no se llama de nuevo la funcion COMPA
TIMSK0 &= ~_BV(OCIE0A);
}
}
void useInterrupt2(boolean w) {
if (w) {
// Timer0 ya se usa en millis () - interrumpimos en alguna parte del medio y llamar a la función
"Compar A" que se mostró arriba
OCR0A = 0xAF;
TIMSK1 |= _BV(OCIE0A);
} else {
// no se llama de nuevo la funcion COMPA
TIMSK1 &= ~_BV(OCIE0A);
}
}

```

```

}
}
EthernetClient client;

void setup() {
Ethernet.begin(mac, ip, myDns);
delay(10);
Serial.begin(9600);
pinMode(A0, INPUT); // Sensor de humedad del suelo 1
pinMode(A1, INPUT); // Sensor de humedad del suelo 2
pinMode(A2, INPUT); // Sensor de humedad del suelo 3
pinMode(A3, INPUT); // Sensor de humedad del suelo 4
pinMode(A4, INPUT); // Sensor de lluvia
pinMode(A5, INPUT); // fotorresistencia
dht.begin();
pinMode(FLOWSENSORPIN1, INPUT);
digitalWrite(FLOWSENSORPIN1, HIGH);
lastflowpinstate = digitalRead(FLOWSENSORPIN1);
useInterrupt(true);
pinMode(FLOWSENSORPIN2, INPUT);
digitalWrite(FLOWSENSORPIN2, HIGH);
lastflowpinstate = digitalRead(FLOWSENSORPIN2);
useInterrupt2(true);
}

void loop() {
float h = dht.readHumidity();
float t = dht.readTemperature();
if (isnan(h) || isnan(t)) {
Serial.println("Falla al leer el sensor DHT22!");
return;
} else {
Serial.print("Humedad: ");
Serial.print(h);
Serial.print(" %\t");
Serial.print("Temperatura: ");
Serial.print(t);
Serial.println(" *C");
}
int s = analogRead(A0); //sensor de humedad
Serial.print(s); Serial.print(" - ");
if(s >= 1000) {
Serial.println("Sustrato Totalmente seco");
}
}

```

```

}
if(s < 1000 && s >= 600) {
Serial.println("Sustrato seco");
}
if(s < 600 && s >= 370) {
Serial.println("Sustrato Humedo");
}
if(s < 370) {
Serial.println("Sustrato muy Humedo");
}
int u = analogRead(A1); // sensor de humedad
Serial.print(u); Serial.print(" - ");
if(u >= 1000) {
Serial.println("Sustrato Totalmente seco");
}
if(u < 1000 && u >= 600) {
Serial.println("Sustrato seco");
}
if(u < 600 && u >= 370) {
Serial.println("Sustrato Humedo");
}
if(u < 370) {
Serial.println("Sustrato muy Humedo");
}
int q = analogRead(A2); // sensor de humedad
Serial.print(q); Serial.print(" - ");
if(q >= 1000) {
Serial.println("Sustrato Totalmente seco");
}
if(q < 1000 && q >= 600) {
Serial.println("Sustrato seco");
}
if(q < 600 && q >= 370) {
Serial.println("Sustrato Humedo");
}
if(q < 370) {
Serial.println("Sustrato muy Humedo");
}
int w = analogRead(A3); // sensor de humedad
Serial.print(w); Serial.print("\n");
if(w >= 1000) {
Serial.println("Sustrato Totalmente seco");
}
}

```



```

if(w < 1000 && w >= 600) {
Serial.println("Sustrato seco");
}
if(w < 600 && w >= 370) {
Serial.println("Sustrato Humedo");
}
if(w < 370) {
Serial.println("Sustrato muy Humedo");
}
int sensorValue = analogRead(A4); // sensor de lluvia
Serial.print(sensorValue); Serial.print("\n");
if(sensorValue >= 800) {
Serial.println("No llueve - Regar");
}
if(sensorValue < 800 && sensorValue >= 600) {
Serial.println("Poca lluvia - Regar");
}
if(sensorValue < 600 && sensorValue >= 300) {
Serial.println("Mucha lluvia - No Regar");
}
if(sensorValue < 300) {
Serial.println("Tormenta - No Regar");
}
int luz = analogRead(A5); //take a sample
Serial.print(luz); Serial.print(" - ");
if(luz >= 200) {
Serial.println("mucha luz");
}
if(luz < 200 && luz >= 10) {
Serial.println("luz");
}
if(luz < 10) {
Serial.println("oscuro");
}
float liters = pulses;
liters /= 14;
liters /= 60.0;
float liters2 = pulses2;
liters2 /= 14;
liters2 /= 60.0;
Serial.print(liters); Serial.println("L Sensor de flujo 1");Serial.print("\n");
Serial.print(liters2); Serial.println("L Sensor de flujo 2");Serial.print("\n\n");

```

```

// Envio de datos a thingspeak
if (client.connect(server,80)) { // "184.106.153.149" or api.thingspeak.com
String postStr = apiKey;
postStr += "&field1=";
postStr += String(t);
postStr += "&field2=";
postStr += String(h);
postStr += "&field3=";
postStr += String(s);
postStr += "&field4=";
postStr += String(u);
postStr += "&field5=";
postStr += String(q);
postStr += "&field6=";
postStr += String(w);
postStr += "&field9=";
postStr += String(sensorValue);
postStr += "&field7=";
postStr += String(liters);
postStr += "&field8=";
postStr += String(liters2);
postStr += "\r\n\r\n";

client.print("POST /update HTTP/1.1\n");
client.print("Host: api.thingspeak.com\n");
client.print("Connection: close\n");
client.print("X-THINGSPEAKAPIKEY: "+apiKey+"\n");
client.print("Content-Type: application/x-www-form-urlencoded\n");
client.print("Content-Length: ");
client.print(postStr.length());
client.print("\n\n");
client.print(postStr);

Serial.print("Temperatura: ");
Serial.print(t);
Serial.print(" Humedad grados celsius: ");
Serial.print(h);
Serial.println("% enviado a Thingspeak");
Serial.print("Humedad suelo 1: ");
Serial.print(s);
Serial.print(" Humedad suelo 2: ");
Serial.print(u);
Serial.println(" enviado a Thingspeak");

```

```
Serial.print("Humedad suelo 3: ");
Serial.print(q);
Serial.print(" Humedad suelo 4: ");
Serial.print(w);
Serial.println(" enviado a Thingspeak");
Serial.print(" Lluvia: ");
Serial.print(sensorValue);
Serial.println(" enviado a Thingspeak");
Serial.print("luz: ");
Serial.print(luz);
Serial.print("Sensor de flujo 1: ");
Serial.print(liters);
Serial.print(" Sensor de flujo 2: ");
Serial.print(liters2);
Serial.println(" enviado a Thingspeak");
}
client.stop();
```

```
// ENVIO A RASPBERRY
```

```
// Proceso de envio de muestras al servidor
```

```
Serial.println("Connecting RaspBerry \n\n");
```

```
if (client.connect(serverPi, 80)>0) { // Conexion con el servidor
client.print("GET /iot.php?valor="); // Enviamos los datos por GET
```

```
client.print(t);
```

```
client.print("&valor2=");
```

```
client.print(h);
```

```
client.print("&valor3=");
```

```
client.print(s);
```

```
client.print("&valor4=");
```

```
client.print(u);
```

```
client.print("&valor5=");
```

```
client.print(q);
```

```
client.print("&valor6=");
```

```
client.print(w);
```

```
client.print("&valor7=");
```

```
client.print(sensorValue);
```

```
client.print("&valor8=");
```

```
client.print(luz);
```

```
client.print("&valor9=");
```

```
client.print(liters);
```

```
client.print("&valor10=");
```

```
client.print(liters2);
```

```
client.println(" HTTP/1.0");
client.println("User-Agent: Arduino 1.0");
client.println();
Serial.println("Conectado Insertando datos RaspBerry");
} else {
Serial.println("Fallo en la conexion RaspBerry");
}
if (!client.connected()) {
Serial.println("Disconnected!");
}
client.stop();
/*****/

Serial.println("Waiting...");
// thingspeak necesita minimo 15 sec delay entre los envios
delay(300000);
}
```

## Anexo 2 Archivos en PHP

Archivo config.php

```
<?php
// config.php
// Credenciales
$dbhost = "localhost";
$dbuser = "user";
$dbpass = "pass";
$dbname = "sensores";
// Conexión con la base de datos
$con = mysqli_connect($dbhost, $dbuser, $dbpass, $dbname);
?>
```

Archivo iot.php

```
// iot.php
// Importamos la configuración
require("config.php");
// Leemos los valores que nos llegan por GET
$val1 = mysqli_real_escape_string($con, $_GET['valor1']);
$val2 = mysqli_real_escape_string($con, $_GET['valor2']);
$val3 = mysqli_real_escape_string($con, $_GET['valor3']);
$val4 = mysqli_real_escape_string($con, $_GET['valor4']);
$val5 = mysqli_real_escape_string($con, $_GET['valor5']);
$val6 = mysqli_real_escape_string($con, $_GET['valor6']);
$val7 = mysqli_real_escape_string($con, $_GET['valor7']);
$val8 = mysqli_real_escape_string($con, $_GET['valor8']);
$val9 = mysqli_real_escape_string($con, $_GET['valor9']);
$val10 = mysqli_real_escape_string($con, $_GET['valor10']);
// Esta es la instrucción para insertar los valores
$query = "INSERT INTO
valores(valor,valor2,valor3,valor4,valor5,valor6,valor7,valor8,valor9,valor10)
VALUES('".$val1."','".$val2."','".$val3."','".$val4."','".$val5."','".$val6."','".$val7."','".$val8."','".$val9."','".$val10."')";
// Ejecutamos la instrucción
mysqli_query($con, $query);
mysqli_close($con);
?>
```

### Anexo 3 Calibración pulsos sensor de flujo

volatile int pulsos; // Cantidad de pulsos del sensor. Como se usa dentro de una interrupcion debe ser volatile

```
#define sensorDeFlujo 2
```

```
void flujo () // Funcion de interrupcion
```

```
{
```

```
pulsos++; // Simplemente sumar el numero de pulsos
```

```
}
```

```
void setup()
```

```
{
```

```
pinMode(sensorDeFlujo, INPUT);
```

```
Serial.begin(9600);
```

```
attachInterrupt(0, flujo, RISING);
```

```
interrupts();
```

```
}
```

```
void loop ()
```

```
{
```

```
Serial.print("Pulsos: ");
```

```
Serial.println(pulsos);
```

```
}
```