

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**Profesor Patrocinante: Álvaro Suazo Schwencke**

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE  
SUELO EN EL DESARROLLO DE PALMETAS DE  
CÉSPED UTILIZANDO BIOSÓLIDOS**

**Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el  
Título de Ingeniero Civil**

**MAURICIO ANDRÉS PONCE CHANDÍA**

**Concepción, Septiembre de 2015.**

*Dedicado a mis padres, hermanos  
y sobrinos que me han apoyado  
siempre.*

***Agradecimientos:***

*Primero que todo quiero dar gracias a Dios por entregarme la fortaleza, sabiduría y confianza para hacer posible este sueño, que en un principio se vio inalcanzable.*

*Dar gracias a mis padres Adán y Rutty, por su incondicional apoyo, cariño y palabras de aliento, por entregarme las herramientas necesarias para salir adelante, además de soportar mi mal genio cuando las cosas no salían bien. A la familia Pedreros Flores que durante gran parte de mi vida universitaria fueron una fuente de aliento y que en muchas oportunidades me abrieron las puertas de su hogar en mis arduas noches de estudios.*

*A las personas que colaboraron en la elaboración de este proyecto de título, a Don Darío, Don Miguel y por supuesto a mi profesor guía Álvaro Suazo por todo su apoyo.*

*A todos ustedes muchísimas gracias!*

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUCCIÓN .....	3
1.1. Objetivos .....	5
1.1.1. Objetivo General.....	5
1.1.2. Objetivos Específicos .....	5
1.2. Antecedentes Generales.....	6
1.2.1. Biosólidos .....	6
1.2.2. Clasificación Sanitaria.....	6
2. METODOLOGÍA .....	8
2.1. Lugar de Trabajo .....	8
2.2. Tratamientos .....	8
2.3. Caracterización de Suelos .....	9
2.4. Caracterización de Biosólidos .....	10
2.5. Parámetros de Control .....	10
2.5.1. Ubicación de Palmetas.....	10
2.5.2. Dimensiones .....	11
2.5.3. Semillas .....	11
2.5.4. Biosólidos .....	11
2.5.5. Cantidad de Agua .....	12

2.6.	Confección de Palmetas .....	12
2.7.	Otras Consideraciones .....	13
2.8.	VARIABLES A MEDIR .....	13
2.8.1.	Altura del Césped .....	13
2.8.2.	Biomasa .....	13
2.8.3.	Peso de las Palmetas y Traslado .....	14
2.8.4.	Registro Fotográfico .....	14
2.9.	MÉTODOS ESTADÍSTICOS .....	14
2.9.1.	Estudio Exploratorio .....	14
2.9.2.	Diseño de Experimento Completamente Aleatorio (DCA) .....	15
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	17
3.1.	Caracterización de Suelos .....	17
3.2.	Cambios en la Dosificación de Riego .....	18
3.3.	Análisis Descriptivo de la Altura del Césped.....	19
3.3.1.	Desde la germinación hasta el primer corte .....	19
3.3.2.	Entre primer y segundo corte .....	20
3.3.3.	Entre segundo y tercer corte .....	21
3.4.	Biomasa .....	23
3.5.	Peso de las Palmetas y Traslado .....	24
3.5.	Registro Fotográfico .....	25
3.6.	Análisis Inferencial de la Altura del Césped .....	27
3.6.1.	Primer corte .....	27

3.6.2. Segundo corte .....	27
3.6.3. Tercer corte.....	28
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	30
4.1. Conclusiones .....	30
4.2. Recomendaciones .....	31
BIBLIOGRAFÍA .....	32
ANEXOS .....	35
ANEXO A: Marco Teórico .....	36
ANEXO B: Ensayos de Mecánica de Suelos .....	39
ANEXO C: Cálculos y Mediciones de Alturas de Césped.....	43
ANEXO D: Variabilidad de la Altura de Césped entre las Réplicas de los Tratamientos .....	59
ANEXO E: Métodos Estadísticos .....	65
ANEXO F: Registro Fotográfico .....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución aleatoria de los tratamientos .....	9
Figura 2. Variables climáticas.....	18
Figura 3. Palmetas antes del primer corte .....	19
Figura 4. Evolución de altura promedio antes del primer corte.....	20
Figura 5. Evolución de altura promedio entre el primer y segundo corte.....	21
Figura 6. Evolución de altura promedio entre el segundo y tercer corte .....	22
Figura 7. Palmetas una vez sembradas.....	25
Figura 8. Palmetas 2 días antes del tercer corte .....	26

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dosificaciones de semillas mezcla estadio .....	11
Tabla 2. Clasificación de suelos.....	17
Tabla 3. Clasificación visual.....	17
Tabla 4. Peso promedio de biomasa por tratamiento .....	23
Tabla 5. Peso de palmetas enrolladas y raicillas .....	24
Tabla 6. Prueba de Kruskal-Wallis: Altura (cm) vs. Tratamiento .....	27
Tabla 7. ANOVA del Modelo Lineal Aplicado al Segundo Corte .....	28
Tabla 8. Test de Tukey Aplicado al Segundo Corte .....	28
Tabla 9. ANOVA del Modelo Lineal Aplicado al Tercer Corte.....	28
Tabla 10. Test de Tukey Aplicado al Tercer Corte.....	29

## **EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE SUELO EN EL DESARROLLO DE PALMETAS DE CÉSPED UTILIZANDO BIOSÓLIDOS**

**Autor:** Mauricio Andrés Ponce Chandía

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío - Bío

Correo electrónico: [mauponce@alumnos.ubiobio.cl](mailto:mauponce@alumnos.ubiobio.cl)

**Profesor Patrocinante:** Álvaro Suazo Schwencke

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío - Bío

Correo Electrónico: [asuazo@ubiobio.cl](mailto:asuazo@ubiobio.cl)

### **RESUMEN**

El presente proyecto de título, se desarrolla en base a la necesidad de buscar la reutilización de la gran cantidad de biosólidos que en la actualidad producen las plantas de tratamientos de aguas servidas. Una de las alternativas para lidiar con este problema es la inclusión de estos biosólidos en el desarrollo de palmetas de césped y analizar la influencia del tipo de suelo en el desarrollo de estas. Para esto, se confeccionaron doce palmetas de césped con mezclas de suelos y biosólidos en igual proporción, los cuales incluían cuatro tratamientos por suelo distinto, con tres repeticiones cada uno. Una vez construidas las palmetas, se analizaba su desarrollo cada tres días, en donde se realizaban mediciones de altura de césped y se efectuaba cortes una vez que éstos superaban los 10 centímetros de altura. Adicionalmente, se utilizaron métodos estadísticos con el fin de identificar un mejor desarrollo de los tratamientos. Finalmente, no se logró apreciar una diferencia significativa, debido al crecimiento constante y parejo del césped en la totalidad de las palmetas.

**Palabras Claves:** Biosólidos, Tratamientos, Suelos, Métodos Estadísticos.

5452 Palabras Texto + 18 Figuras/Tablas\*250+0 Figuras/Tablas\*500=9952 total de palabras.

## **EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE TYPE OF SOIL IN THE DEVELOPMENT OF GRASS CARPETS USING BIOSOLIDS**

**Author:** Mauricio Andrés Ponce Chandía

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío

E-mail: [mauponce@alumnos.ubiobio.cl](mailto:mauponce@alumnos.ubiobio.cl)

**Advisor:** Álvaro Suazo Schwencke

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío

E-mail: [asuazo@ubiobio.cl](mailto:asuazo@ubiobio.cl)

### **ABSTRACT**

This research project has been developed in order to find out the reutilization of the huge amount of biosolids that nowadays the sewage water treatment plants provide. One of the alternatives to cope with this problem is the inclusion of biosolids in the elaboration of grass carpet and to analyse the influence of the type of soil in the development of these grass carpets. To implement this option, twelve grass carpets were created using different kinds of soil and biosolids in equal proportions, including four treatments with three repetitions each. Moreover, the development of the grass carpets were analysed every three days, in that process, the grass height was measured and the grass was cut when it was more than 10 centimetres height. Furthermore, statistics methods were implemented in this research in order to identify in a precisely way the development of these treatments. Finally, there was not a significant difference because of the constant and similar growth of the grass in the grass carpets.

**Key words:** Biosolids, treatments, soil, statistics methods.

## 1. INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento de las ciudades, ha llevado a que las plantas de tratamientos de aguas servidas aumenten la producción de biosólidos, comúnmente llamados lodos activos. Actualmente Chile cuenta con una cobertura urbana de tratamiento de aguas servidas a diciembre de 2014 de un 99,93%, con un total de 280 plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) de las cuales el 59,6% trabajan con lodos activos, generando alrededor de 600 mil metros cúbicos de lodos al año (SISS, 2015).

La disposición final de estos lodos en la mayoría de las PTAS del país los dispone en rellenos sanitarios disminuyendo su vida útil y además volviéndose un problema relevante de carácter ambiental. También existen casos de PTAS en que los lodos se disponen en monorellenos o se aplican como un mejorador de suelos agrícolas (Castillo, 2009).

Estos lodos son materiales orgánicos ricos en nutrientes como el N, P y K. Ellos contienen también trazas de metales y pequeñas cantidades de otros elementos y pueden ser tratados como un residuo o como un recurso susceptible de ser utilizado (Leppe, 2002).

Por lo comentado anteriormente, surge la necesidad de buscar sistemas de transformación y reutilización simples y eficientes que aprovechen el contenido nutricional de estos biosólidos, permitiendo su retorno al suelo y por lo tanto su reinserción en los grandes ciclos ecológicos vitales del planeta (Concha, 2012).

Es por esto que en el presente proyecto de título se propone el desarrollo de palmetas de césped con mezclas de suelos y biosólidos de manera de transformar estos desechos en un subproducto sustentable y amigable con el medio ambiente.

Cabe mencionar que en investigaciones anteriores (Muñoz, 2014), se determinó que dosificaciones entre el 25% y 50% de biosólidos, es una cantidad adecuada para asegurar un buen desarrollo de las palmetas, en el caso de utilizar un suelo orgánico. Pero con el fin de no limitar el desarrollo de palmetas a un solo tipo de suelo, y el cual por ser orgánico debiese tener una gran cantidad de nutrientes, se propone la utilización, ya no solo de suelo orgánico, sino además suelos característicos de la zona.

Para ello, se desarrolla un estudio experimental, que consiste en la elaboración de palmetas de césped utilizando 4 tratamientos, los cuales estarán constituidos por 4 tipos de suelos (cada tratamiento con un suelo distinto), además de la incorporación de biosólidos. La dosificación de las palmetas contempla un 50% de suelo y un 50% de biosólidos. Esto permite identificar el tipo de suelo en cual se desarrolla de mejor manera césped, para la dosificación de biosólidos específica.

Finalmente, este estudio entrega una estrategia para la utilización del biosólido tanto doméstica como industrial de fácil aplicación que puede llegar a comercializarse (Muñoz, 2014).

## **1.1 Objetivos**

### 1.1.1. Objetivo General

- Analizar la influencia del tipo de suelo en el desarrollo de palmetas de césped con mezclas de suelo y biosólidos, húmedos en igual proporción.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Clasificar los suelos a utilizar en los tratamientos.
- Construir palmetas de césped con mezclas de suelos y biosólidos.
- Analizar experimentalmente el desarrollo de las palmetas de césped bajo diferentes mezclas de suelos y biosólidos.
- Comparar los distintos tratamientos a través del tiempo utilizando métodos estadísticos.

## 1.2 Antecedentes Generales

Las palmetas o rollos de césped natural es una forma más rápida de obtener un césped. Si bien resulta más costoso que la siembra, se aventaja debido a su efecto inmediato (llegar y usar), se instala con mucha facilidad y una vez instalada una manta compacta de césped, este ahoga las posibles hierbas que pudiera haber (Parracia, 2012).

Lo anteriormente mencionado, agregado al uso de biosólidos como mejorador de suelos, hace que el desarrollo de palmetas con mezclas de suelo y biosólidos, sea de sumo interés en la búsqueda de reutilización de estos lodos. Tal cual lo demuestra Muñoz (2014), se obtiene resultados positivos en relación al crecimiento y aspecto del césped (tonalidad y crecimiento parejo).

### 1.2.1. Biosólidos

Los biosólidos son definidos por el D.S. N°4, 2009, Ministerio Secretaría General de la Presidencia, como “residuos semisólidos generados durante el tratamiento de aguas servidas.

Estos poseen un alto contenido de compuestos orgánicos, nitrógeno, fósforo y potasio, además de otros elementos metálicos y patógenos. Es por ello que resulta muy interesante utilizar sus características orgánicas en favor de aquellos suelos degradados, siendo el nitrógeno el elemento que tiene una mayor capacidad como mejorador de suelos.

### 1.2.2. Clasificación Sanitaria

Los parámetros a considerar para la clasificación sanitaria de lodos corresponden a la reducción del potencial de atracción de vectores (organismos capaces de transportar y transmitir agentes infecciosos) y la presencia de patógenos (D.S. N°4,2009, Ministerio Secretaría General de la Presidencia). Rigiéndose por lo anterior se distinguen dos tipos de lodos:

**Lodo Clase A:** Lodo sin restricciones sanitarias para aplicación al suelo. Los cuales deben cumplir con la reducción de atracción de vectores y adicionalmente tener una densidad de

coliformes fecales menos a 1.000 Número Más Probable (NMP) por gramo de sólidos totales, base materia seca, o tener una densidad de Salmonella sp. menor a 3 NMP en 4 gramos de sólidos totales, base materia seca.

Tener un contenido de ova helmíntica viable menor a 1 en 4 gramos de sólidos totales, base materia seca, (D.S. N°4,2009, Ministerio Secretaría General de la Presidencia).

**Lodos Clase B:** Son aquellos lodos aptos para la aplicación benéfica al suelo, con restricciones sanitarias de aplicación según tipo y localización de los suelos o cultivos. Lodos Clase B deberán cumplir el siguiente requisito: la media geométrica de la densidad de coliformes fecales, producto del análisis de un número de muestras no inferior a siete, tomadas al momento de su uso, debe ser menor que 2.000.000 NMP por gramo de lodos en base seca (D.S. N°4,2009, Ministerio Secretaría General de la Presidencia).

## **2. METODOLOGÍA**

A continuación se presenta la metodología adoptada que permitirá alcanzar los objetivos antes mencionados. Considerando que la experiencia se basa en la confección de palmetas de césped con mezclas de suelos y biosólidos, en igual proporción, se emplea diferentes suelos característicos de la zona, además de biosólidos procedentes directamente desde la planta de tratamiento de aguas residuales ubicada en el sector Gran Bretaña de la Comuna de Hualpén.

Cabe señalar que se adoptará una metodología similar a la desarrollada por Muñoz (2014).

### **2.1 Lugar de Trabajo**

La experiencia se llevó a cabo en el campus Concepción de la Universidad del Bío Bío, precisamente a un costado del invernadero. El lugar elegido ofrece condiciones de luz y sombra constante para todas las palmetas, además del nulo riesgo de inundación de éstas en periodos de lluvia.

### **2.2 Tratamientos**

La experiencia contempla 4 tratamientos con distintos suelos y biosólidos. Cada uno tendrá 3 repeticiones. Además se elaborarán 3 palmetas en las cuales no se empleará biosólidos, éstas no se incluyen en el análisis cuantitativo, solo se utilizan con fines comparativos.

Cada tratamiento estará compuesto con un 50% de suelo y 50% de biosólidos.

Los suelos a utilizar son suelos característicos de la zona, estos son:

- Arena Biobío (T1)
- Batolito Costero, Penco (T2)
- Batolito Costero, UBB (T3)
- Tierra de Hoja (T4)

Las palmetas constituidas solamente por suelos serán T'2 (batolito costero, Penco), T'3 (batolito costero, UBB) y T'4 (tierra de hoja). Estas no tendrán réplicas.

La distribución de los tratamientos se realizó de manera aleatoria, quedando establecida como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1. Distribución aleatoria de los tratamientos.**

Cabe señalar que la simbología indica el tratamiento y su réplica, por ejemplo T1R1 (tratamiento 1, réplica 1).

### 2.3 Caracterización de Suelos

Los suelos a utilizar serán sometidos a variados ensayos normalizados en el Manual de Carreteras Vol. 8 (MOP, 2014), con el fin de clasificarlos y caracterizarlos. Los ensayos a realizar son:

- Granulometría (LNV 105 Volumen N° 8 Manual de Carreteras 2003)
- Límite Líquido
- Límite Plástico
- Contenido de Humedad
- Porcentaje de Materia Orgánica

## **2.4 Caracterización de Biosólidos**

Los grandes potenciales para la utilización de biosólidos, ya sea como fertilizantes o como elemento mejorador de suelo, se fundamentan en el alto contenido de compuestos orgánicos, nitrógeno, fósforo y potasio que estos lodos poseen, además de otros elementos metálicos y patógenos.

Los biosólidos utilizados en esta experiencia, se originan en la PTAS de ESSBIO, ubicada en la Comuna de Hualpén. El tipo de tecnología que se utiliza en esta planta es de lodos activos. Este proceso se basa en generar contacto directo entre las aguas residuales y los lodos biológicos, los que se desarrollan de manera inicial por aireación, generando condiciones favorables para el crecimiento de organismos, los cuales tienen la capacidad de oxidar la materia orgánica presente en las aguas servidas. Luego del tratamiento primario, se pasa a un sedimentador, donde los flóculos biológicos precipitan en él. Una parte es recirculada hacia el tanque de aireación, con el objetivo de renovar la población de microorganismos y el resto se elimina por una corriente de purga, quedando en las zonas altas aguas más clarificadas las cuales pasan por un efluente secundario (Cabrera, 2014).

Según el contenido de nutrientes y metales pesados indicados en el Anexo A.1, los biosólidos generados en la PTAS de ESSBIO, ubicada en la Comuna de Hualpén, corresponden a biosólidos clase A.

## **2.5 Parámetros de Control**

Para lograr la homogeneidad de las palmetas, se establecieron los siguientes parámetros de control:

### **2.4.1. Ubicación de Palmetas**

Se estableció una ubicación estratégica, para que la cantidad de sol y de sombra fuese homogénea para la totalidad de las palmetas.

#### 2.4.2. Dimensiones

Las palmetas tendrán dimensiones de 1 metro de largo, por 0,5 metro de ancho y 5 centímetros de espesor.

#### 2.4.3. Semillas

El tipo de semilla utilizada fue mezcla estadio, la cual contiene 4 especies y en diferentes dosificaciones. La formulación de la mezcla estadio es la detallada en la Tabla 1.

**Tabla 1. Dosificaciones de semillas mezcla estadio.**

<b>Especie</b>	<b>Variedad</b>	<b>% pp</b>
Lolium	Linn	84
Poa Pratensis	Balin	10
Festuca Arundinacea	Titanium	3
Bermuda Grass	Unhulled	3

Fuente: Elaborado en base a lo indicado por ERGO.

Para la determinación de la cantidad de semilla por palmeta se tomó en consideración la especificación de la mezcla de semillas, donde se consideraba un rendimiento de entre 20 a 25 metros cuadrados por kilo de semilla, dando una dosificación óptima por palmeta de 20 gramos. Pero para buscar una amplia cobertura vegetal se utilizó una dosificación de 50 gramos por palmetas.

#### 2.4.4. Biosólidos

En los diferentes tratamientos, se utilizaron biosólidos extraídos desde la planta de tratamiento de aguas residuales de Hualpén, teniendo éste en el momento de confección de las palmetas, 487% de humedad, respecto al peso seco.

La totalidad de las palmetas tendrán una dosificación de biosólidos correspondiente al 50% del peso seco.

#### 2.4.5. Cantidad de Agua

La cantidad de agua fue variando a medida que se desarrollaba la experiencia, debido a los cambios climáticos. Se aplico una dosificación de 2400 ml por palmeta días por medio durante toda la experiencia, a no ser que las condiciones climáticas provoquen algún cambio a esta dosificación. En días de lluvia las palmetas fueron cubiertas con un plástico transparente, para evitar su anegamiento y así poder mantener la homogeneidad en la dosificación.

### 2.6 Confección de Palmetas

Para la confección de las palmetas se reutilizaron las parcelas que empleó Muñoz (2014) en el desarrollo de su experiencia. Estas parcelas estaban construidas con madera de 2x1 pulgada y con las dimensiones anteriormente mencionadas. A las parcelas se les colocó polietileno perforado para aislar las palmetas del suelo existente y permitir la filtración del agua al regar.

Para el llenado de las parcelas se comenzó llenando solamente con suelo las 3 parcelas correspondientes al primer tratamiento (Arena Biobío), registrando su peso promedio y vaciando las parcelas, se realizó el mismo procedimiento con el biosólido. Una vez teniendo dichos pesos promedios y considerando que cada palmeta estará constituida con un 50% de suelo y un 50% de biosólidos, se aplica la mitad del peso promedio de suelo en cada palmeta. Lo anterior considerado en peso húmedo. Posteriormente se instala el filamento en cada palmeta, siendo este una malla plástica que se utiliza para que la raíz del césped se agarre y facilite el enrollamiento. Luego se regó y se esparcieron las semillas de manera homogénea por todas las palmetas. Finalmente se aplica la mitad del peso promedio de biosólido y se vuelve a regar, completando así el llenado de las palmetas. Este procedimiento se repite para el resto de los tratamientos (batolito costero Penco, batolito costero UBB y tierra de hoja).

Los tratamientos que no contienen biosólidos (T'2, T'3 y T'4) se llenaron de manera similar, considerando que la capa correspondiente a biosólidos se reemplazó por una segunda capa de suelo.

El procedimiento de llenado se realizó según las recomendaciones dadas por Darío (2015) y que se encuentran especificadas en el Anexo A.2.

## 2.7 Otras Consideraciones

- La construcción de las palmetas se realizó en abril del 2015, sembrando el día 25.
- Se decidió realizar tres cortes de césped a las palmetas, para así darles mayor firmeza. Los cortes se realizaron al momento de que las palmetas superan los 10 cm de alturas.

## 2.8 Variables a Medir

A continuación se muestran las variables medidas y con qué frecuencia fue registrada cada una de ellas. Con ello se logró definir cuál de los tratamientos es el óptimo.

### 2.8.1. Altura del césped

Para el estudio descriptivo se realizaron 5 mediciones por palmetas (esquinas y centro). Estas mediciones se realizaron cada 3 días a partir del día de germinación de la semilla.

Para el estudio inferencial se realizaron 10 mediciones por palmetas (totalmente aleatorio). Esta medición se realizó antes de cada corte de césped.

En ambas mediciones se utilizó una regla graduada cada 1 mm.

### 2.8.2. Biomasa

Al realizar los cortes respectivos, se extrajo el césped de cada palmeta por separado y así registrar su peso, ya sea recién cortado el césped (húmedo) y una vez seco.

El método de secado, consistió en depositar el césped en bandejas y dejar secar en la cercanía de una estufa, a una temperatura que oscilaba entre los 30 a 35°C, por un periodo de 2 semanas, para así evitar el incinerado.

### 2.8.3. Peso de las Palmetas y Traslado

Una vez finalizada la experiencia se procedió a enrollar las palmetas para así poder trasladarlas. Las palmetas fueron evaluadas descriptivamente si es que lograban o no el ser enrolladas y trasladadas, sin destruirse.

Las palmetas que pudieron ser enrolladas fueron pesadas.

### 2.8.4. Registro Fotográfico

De manera de complementar los resultados obtenidos por los métodos estadísticos, se tomaron fotografías periódicamente durante el transcurso de la experiencia, registrando el crecimiento del césped y observando el comportamiento de las palmetas.

## **2.9 Métodos Estadísticos**

Para realizar el análisis de los datos medidos se utilizaron dos métodos estadísticos, uno exploratorio para observar de forma descriptiva el crecimiento del césped durante el tiempo y otro a través de un diseño completamente aleatorio de manera de elegir inferencialmente el tratamiento apropiado.

### 2.9.1. Estudio Exploratorio

Este método permite analizar la tendencia de las variables medidas de una forma descriptiva mediante la utilización de gráficos, los cuales permiten observar el crecimiento del césped para cada tratamiento. Para el estudio exploratorio se utilizó el software Microsoft Excel, el que entrega los gráficos respectivos.

### 2.9.2. Diseño de Experimento Completamente Aleatorio

Para el desarrollo de este método se utiliza el software Minitab 16, en el cual se ingresa los datos de alturas de césped obtenidos antes de realizar cada uno de los cortes.

El método de Diseño de Experimento Completamente Aleatorio (DCA) también conocido como ANOVA, permite estudiar si existe una relación entre dos variables, en este caso la altura del césped y el tipo de suelo. El DCA se considera como un modelo estadístico lineal para el cual es necesario la verificación de las siguientes hipótesis:

i) Hipótesis Nula:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$$

Considera que todas las medidas son iguales, por lo que el suelo no influye en el crecimiento del césped.

ii) Hipótesis Alternativa:

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j \text{ para } i \neq j$$

Considera que las medidas difieren en al menos dos de los niveles y que el suelo influye en el crecimiento del césped.

Ahora, si la hipótesis nula es rechazada es necesario aplicar un test estadístico que permita comparar las alturas del césped para cada tipo de suelo. En esta oportunidad se utiliza el test Tukey, el que permite dilucidar que suelo es el que faculta un mayor crecimiento del césped y por el contrario cual es el de menor crecimiento.

Cabe mencionar que antes de la aplicación del ANOVA es necesario probar si existe normalidad en los datos medidos, utilizando el Test de Ryan-Joiner para esto. Se considera un nivel de confianza del 95%.

En el caso de no cumplir con la normalidad, se trabaja con las pruebas no Paramétricas (llamadas también de libre distribución). Una de las pruebas para analizar datos no paramétricos es la desarrollada por Kruskal Wallis, la cual se basa en las siguientes hipótesis:

- i) Hipótesis Nula: La mediana de las  $k$  tratamientos considerados son iguales
  
- ii) Hipótesis Alternativa: Al menos una de los tratamientos tiene mediana distinta a las otras.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se darán a conocer los resultados y análisis, obtenidos de los ensayos y mediciones que se realizaron tanto para la caracterización de los suelos, como para el estudio descriptivo e inferencial.

#### 3.1 Caracterización de Suelos

Según la granulometría y límites de Atterberg obtenidas en laboratorio y rigiéndose por los sistemas de clasificaciones ASSHTO y USCS se obtuvieron los resultados que observan en la Tabla 2.

**Tabla 2. Clasificación de suelos.**

Suelo	Límites de Atterberg			Clasificación	
	LL (%)	LP (%)	IP (%)	ASSHTO	USCS
Arena Biobío	N/P	N/P	N/P	Gravas y Arenas	Arenas Pobremente Graduadas
Batolito Costero, Penco	37,7	35,3	2,4	Gravas y Arenas	Arena Limosa
Batolito Costero, UBB	39,7	33,7	5,9	Suelo Limoso	Arena Limosa
Tierra de Hoja	121,7	N/P	N/P	N/P	N/P

N/P: No Procede.

Cabe señalar que la muestra de suelo correspondiente a tierra de hoja se clasificó mediante una clasificación visual debido a que corresponde a un suelo con gran contenido de materia orgánica.

En la Tabla 3 se resumen las características que presenta la muestra de tierra de hoja, por lo cual se definió como un suelo de carácter orgánico.

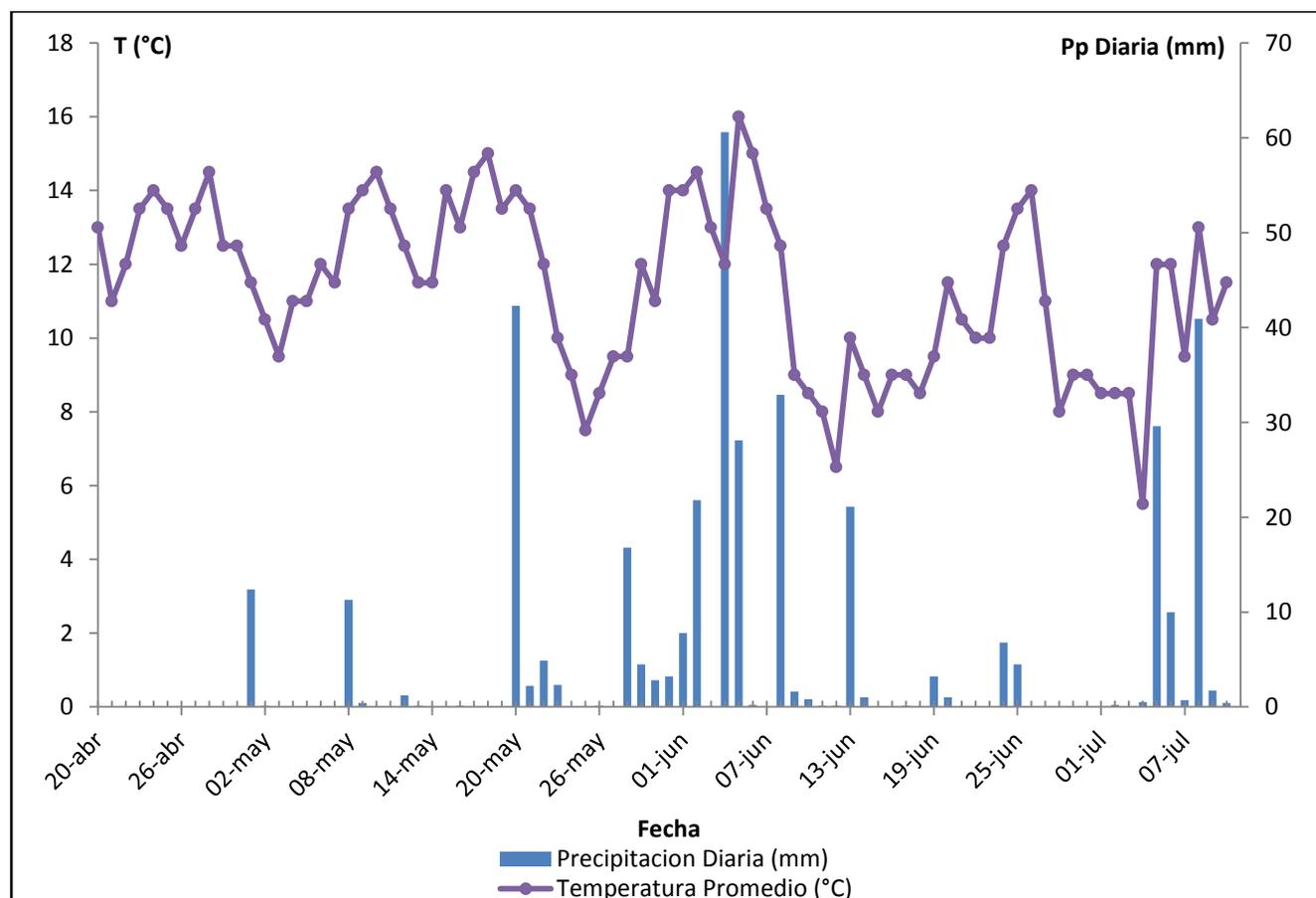
**Tabla 3. Clasificación visual.**

Muestra	Dilatancia (Plástico/No Plástico)	Tenacidad (Plástico/No Plástico)	% de Materia Orgánica	Color	Olor	Nombre
Tierra de hoja	No Plástico	No Plástico	41,82	Marrón Oscuro	Orgánico	Orgánico

### 3.2 Cambios en la Dosificación de Riego

Se comenzó aplicando una dosificación de 2400 ml de agua por palmeta, día por medio, durante el primer mes. Esto debido a que Mayo fue un mes de buen clima, con temperaturas agradables.

En la Figura 2 se logra apreciar que, una vez entrando el mes de Junio, las lluvias fueron más frecuentes, por lo que las palmetas conservaban de buena manera la humedad, no siendo necesario el riego día por medio, sino solamente en días de buen climas.



**Figura 2. Variables climáticas.**

Los datos de precipitaciones fueron adquiridos desde la página web de la DGA, correspondiente a la estación ubicada en el río Biobío, sector desembocadura. Mientras que los datos de temperatura fueron adquiridos desde la página web de accuweather.

### 3.3 Análisis Descriptivo de la Altura del Césped

Para analizar la evolución de la altura del césped se utilizaron los datos de alturas medidos para cada tratamiento, promediando las alturas de las réplicas de cada uno de éstos. Estas alturas promedios se grafican para cada corte.

#### 3.3.1. Desde la germinación hasta el primer corte

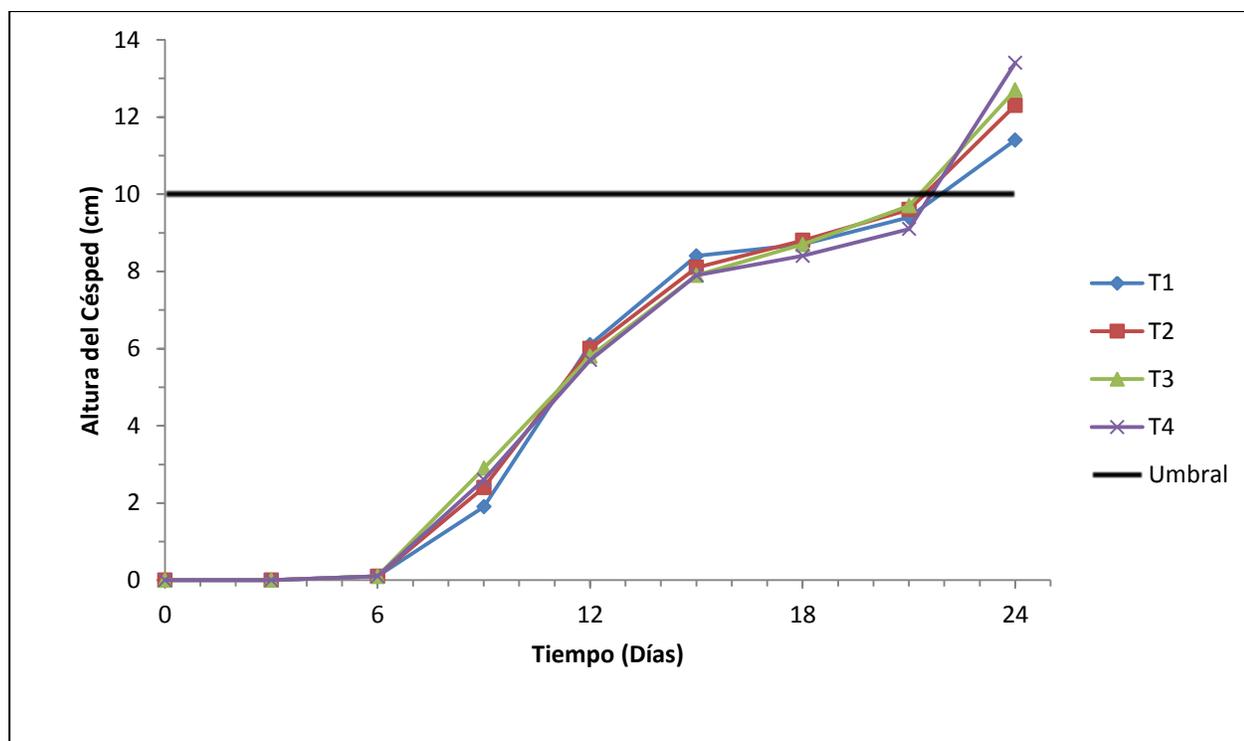
La germinación del césped en la totalidad de las palmetas se produjo al sexto día, logrando un crecimiento rápido y relativamente parejo, hasta superar los 10 centímetros de altura (altura umbral). En la Figura 3 se puede apreciar la altura de césped en las palmetas antes del primer corte, además del retraso en el crecimiento del césped en las palmetas que no contienen biosólidos (T'2 y T'3) en comparación a los tratamientos que sí lo contienen.



**Figura 3. Palmetas antes del primer corte.**

Cabe señalar que los cuatro tratamientos superan la altura umbral a los 24 días de haber sembrado el césped.

En la figura 4 se presentan las alturas promedios de los cuatros tratamientos al momento de realizar el primer corte.

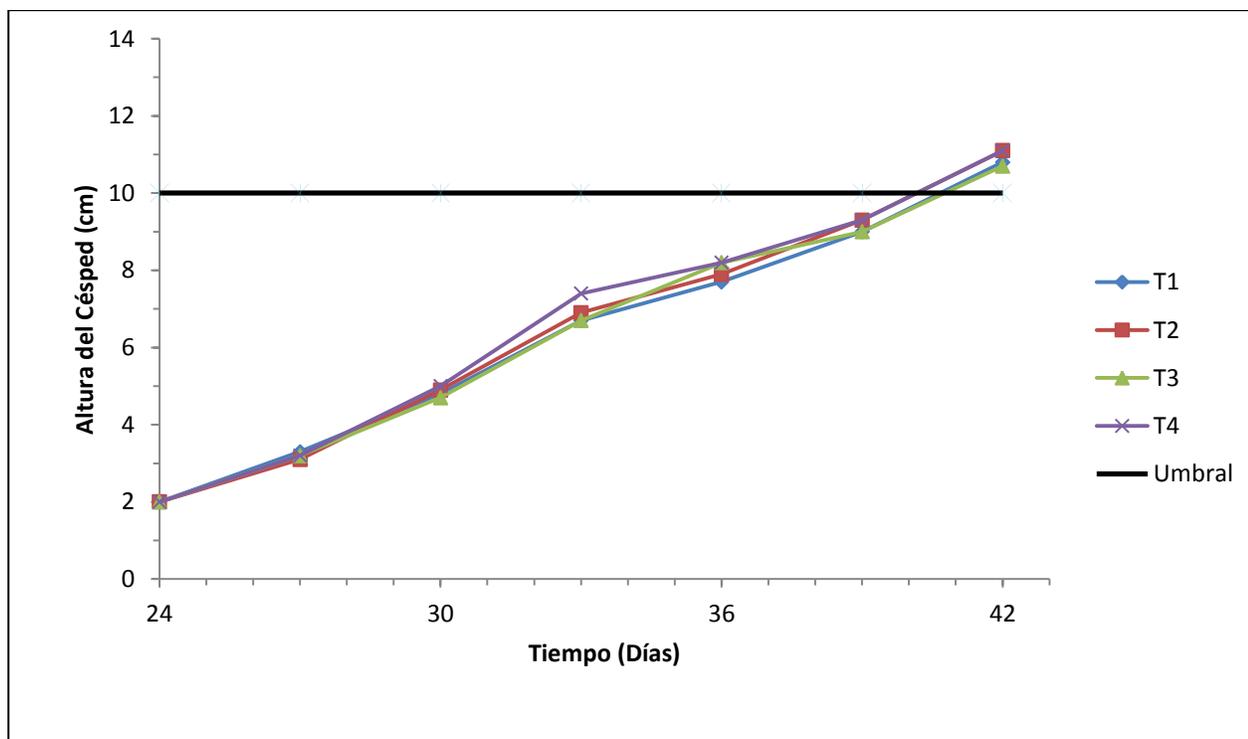


**Figura 4. Evolución de altura promedio antes del primer corte.**

En relación a la variabilidad de las réplicas de los tratamientos, en el Anexo D.1 se aprecia que en los cuatros tratamientos no existe una mayor variabilidad, siendo la réplica número 3 (R3) en la totalidad de los tratamientos la que alcanza una pequeña diferencia en alturas de césped.

### 3.3.2. Entre primer y segundo corte

Entre el primer y segundo corte el crecimiento del césped siguió siendo similar en los cuatros tratamientos, siguiendo la misma tendencia, tal como se aprecia en la figura 5. Fueron T2 y T4 quienes alcanzan las mayores alturas promedios, con 11,1 cm cada uno.



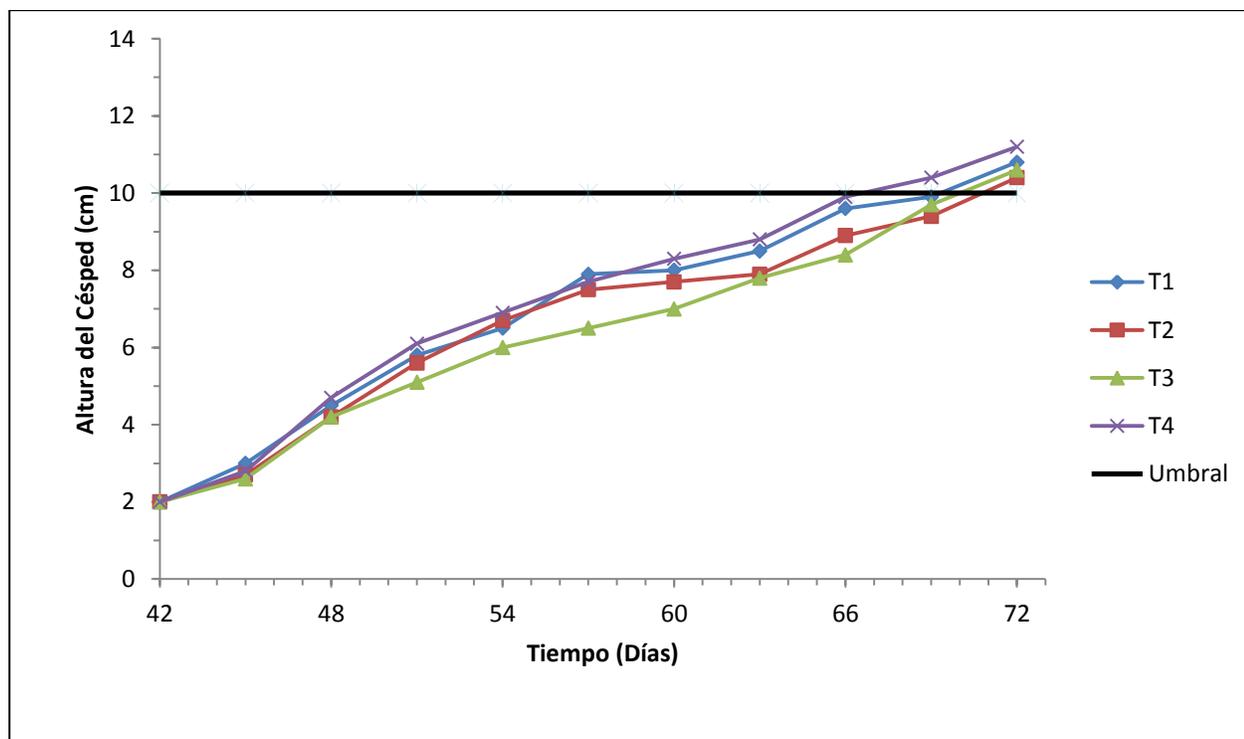
**Figura 5. Evolución de altura promedio entre el primer y segundo corte.**

El césped en la totalidad de los tratamientos supera la altura umbral 18 días después de realizado el primer corte (a 42 días de sembrado el césped).

La variabilidad entre las réplicas continúa siendo mínima, para todos los tratamientos. Se mantiene la tendencia en que las réplicas 3 son las que alcanzan mayores alturas. Esto se puede observar en detalle en el Anexo D.2.

### 3.3.3. Entre segundo y tercer corte

En este periodo de tiempo el césped continua su crecimiento sin mayores diferencias entre los tratamientos, siendo el T4 el con mayor altura al momento de realizar el tercer corte, con una altura de 11, 2 cm (Figura 6).



**Figura 6. Evolución de altura promedio entre el segundo y tercer corte.**

Los cuatro tratamientos superan el umbral 30 días después de realizar el segundo corte (a 72 días de sembrado el césped).

El retraso en el crecimiento del césped en el tercer periodo, en comparación a los periodos anteriores, se debe principalmente por las condiciones climáticas, siendo las bajas temperaturas que han afectado a la zona durante gran parte del tercer periodo (mes de Junio, Figura 2), la principal culpable de este retraso (Darío, 2015).

Al igual que en los periodos anteriores la variabilidad entre las réplicas sigue siendo mínima, y siendo las réplicas 3 (R3) las que alcanzan una mayor altura.

### 3.4 Biomasa

El análisis de la biomasa permitirá de cierto modo definir el tratamiento con mayor cobertura vegetal, y así definir que tratamiento es que entrega mejores resultados considerando que la variabilidad de los tratamientos en lo que respecta a las alturas es mínima.

En la Tabla 4 se logra observar que una vez realizado el primer corte, el tratamiento con mayor biomasa promedio es el T2. Una vez realizado el segundo corte, el tratamiento que logra mayor biomasa promedio es el T4, manteniéndose esta tendencia en el tercer corte.

**Tabla 4. Peso promedio de biomasa por tratamiento.**

Tratamiento	Peso verde (gr)			Peso seco (gr)		
	1	2	3	1	2	3
T1	279,3	176,0	270,3	59,0	45,7	60,0
T2	335,0	220,7	263,0	70,0	48,3	58,7
T3	332,0	152,7	170,3	66,7	40,7	44,7
T4	305,3	234,0	283,0	58,0	50,0	64,3

Cabe destacar que aun realizando el análisis de la biomasa, no existe tratamiento que sobresalga en comparación al resto.

Los datos de biomasa obtenidos en las mediciones de cada réplica, se observan en el Anexo C.1.

### 3.5 Peso de las Palmetas y Traslado

Para esta etapa de la experiencia, las palmetas que fueron pesadas y transportadas, son aquellas que lograron ser enrolladas. Siendo el tratamiento 4 en la totalidad de sus réplicas (T4R1, T4R2 y T4R3), el T2R1, y las palmetas que no contenían biosólidos (T'2, T'3 y T'4), las que se lograron enrollar. Obteniendo los resultados que se observan en la Tabla 5.

Tabla 5. Peso de palmetas enrolladas y raicillas

Tratamiento	Se enrolló	Peso de palmeta (kg)	Promedio	Peso de raicillas seca (gr)	Promedio
T1R1	No	-	-	0,37	1,05
T1R2	No	-		1,90	
T1R3	No	-		0,88	
T2R1	Sí	23,5	23,54	3,07	1,43
T2R2	No	-		1,01	
T2R3	No	-		0,21	
T3R1	No	-	-	1,28	0,68
T3R2	No	-		0,34	
T3R3	No	-		0,41	
T4R1	Sí	13,5	13,99	1,56	2,04
T4R2	Sí	13,4		1,81	
T4R3	Sí	15,1		2,75	
T'2	Sí	40,9	40,94	2,90	2,90
T'3	Sí	31,3	31,26	3,86	3,86
T'4	Sí	17,7	17,72	2,42	2,42

Cabe mencionar, que el peso de las palmetas correspondiente al tratamiento 4 cumple con los estándares de mercado, que fluctúa entre 17 y 20 kilogramos, según lo establecido por “Verde Andino”. En el caso de la palmeta T2R1, que a pesar de lograr ser enrollada, sufrió gran deterioro al ser transportada, además de no cumplir con los estándares de peso, al igual que las palmetas T'2 y T'3.

Para determinar el peso de las raicillas se tomaron muestras de las palmetas, con dimensiones de 7x7 centímetros aproximadamente, las cuales fueron lavadas hasta lograr separar las raicillas del suelo. En la Tabla 5 se logra apreciar que las palmetas que lograron ser enrolladas contenían mayor cantidad de raicillas, destacando que las palmetas que no contenían biosólidos fueron las con mayor cantidad.

### 3.6 Registro Fotográfico

La Figura 7 corresponde al momento de finalizar el sembrado de las palmetas, donde las que presentan una tonalidad más clara son aquellas que no contienen biosólidos.



**Figura 7. Palmetas una vez sembradas.**

En cuanto al desarrollo de las palmetas durante la experiencia, se pudo apreciar que el crecimiento del césped en la totalidad de los tratamientos fue relativamente parejo, sin diferencias significativas. Pero en comparación a las palmetas que no contenían biosólidos, una vez finalizando la experiencia (con el tercer corte), se pudo observar un crecimiento más acelerado, además de una tonalidad verdosa más intensa, como se evidencia en la Figura 8.



**Figura 8. Palmetas 2 días antes del tercer corte.**

En el Anexo F, se podrá acceder a un registro más exhaustivo del desarrollo de las palmetas.

### 3.7 Análisis Inferencial de la Altura del Césped

El análisis inferencial se basó en la aplicación del DCA, para lo cual se utilizaron las mediciones de alturas especificadas en el Anexo C.3.

#### 3.7.1. Primer corte

Se aprecia que al aplicar el Test de Ryan-Joiner para probar la normalidad de los datos, se obtiene que los datos no se comportan normalmente (Anexo D). Por ello el ANOVA no es válido en este caso, y se debe aplicar una prueba para datos no paramétricos. En esta oportunidad se utilizó el Test de Kruskal-Wallis, el cual arrojó un p-valor igual a  $0,024 < 0,05$  por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los tratamientos no son todos iguales. Es decir; al menos uno de los tratamientos tiene mediana distinta a los otros. Además, tal como se muestra en la Tabla 6 el tratamiento 3 es el que se comporta de mejor manera alcanzado un mayor valor en mediana (12,3 cm).

**Tabla 6. Prueba de Kruskal-Wallis: Altura (cm) vs. Tratamiento.**

Tratamiento	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z
1	30	11	46	-2,6
2	30	11,9	64,9	0,8
3	30	12,3	72,6	2,19
4	30	11,9	58,5	-0,36
General	120		60,5	

#### 3.7.2. Segundo corte

Para el segundo corte los datos medidos cumplen con una distribución normal, ya el p-valor obtenido por el Test de Ryan-Joiner es igual a  $0,1 > 0,05$ . Por eso en esta oportunidad sí es posible aplicar el ANOVA, el cual arroja los resultados mostrados en Tabla 7, donde el p-valor es igual a  $0,045 < 0,05$ . Por lo tanto se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) es decir, las medias difieren en al menos dos de los niveles y los tratamientos influyen en el crecimiento del césped.

**Tabla 7. ANOVA del Modelo Lineal Aplicado al Segundo Corte.**

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
Tratamiento	3	12,666	12,666	4,222	2,68	0,045
Error	116	182,639	182,639	1,574		
Total	119	195,305				

Una vez rechazada la hipótesis nula (H0), se aplica el Test de Tukey para poder representar las diferencias entre los tratamientos, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 8. Cabe señalar que si el test arroja letras distintas indica que hay diferencias significativas y si las letras son iguales quiere decir que la diferencia entre ellos es mínima. En esta oportunidad se puede apreciar que a pesar de que el tratamiento 4 es el con mayor media con 11,5 cm de altura, el test agrupa a los 4 tratamientos en la misma letra (A), por lo que no existe diferencias significativas entre los tratamientos.

**Tabla 8. Test de Tukey Aplicado al Segundo Corte.**

Tratamientos	N	Media	Agrupación
4	30	11,500	A
2	30	11,147	A
3	30	10,770	A
1	30	10,683	A

### 3.7.3. Tercer corte

Al igual que el corte anterior, los datos medidos cumplen con una distribución normal según el Test de Ryan-Joiner, obteniendo un p-valor igual a  $0,1 > 0,05$ . El ANOVA arroja los resultados presentados en la Tabla 9, con un p-valor igual a  $0,00 < 0,05$ . Por lo tanto se rechaza la hipótesis nula (H0) y se acepta la hipótesis alternativa (H1), existiendo medias difieren en al menos dos de los niveles y los tratamientos influyen en el crecimiento del césped.

**Tabla 9. ANOVA del Modelo Lineal Aplicado al Tercer Corte.**

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
Tratamiento	3	26,565	26,565	8,855	7,31	0,000
Error	116	140,608	140,608	1,212		
Total	119	167,173				

Como la hipótesis nula fue rechazada, se aplica el Test de Tukey para representar las diferencias entre los tratamientos, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 10, en donde nuevamente el tratamiento 4 es el con mayor media con 11,467 cm de altura, pero en esta oportunidad sí existen diferencias significativas, debido a que el test agrupa a los tratamientos en diferentes letras, a excepción de tratamiento 2 y 3 que ambas se encuentran agrupadas en B.

**Tabla 10. Test de Tukey Aplicado al Tercer Corte.**

Tratamientos	N	Media	Agrupación
4	30	11,467	A
1	30	10,800	AB
2	30	10,513	B
3	30	10,190	B

Es importante mencionar que dichas letras van ordenadas de mayor a menor en donde la letra “A” representa al mejor tratamiento.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

A partir de la investigación realizada se llegó a las siguientes conclusiones:

- Producto de los ensayos de laboratorio realizados a las muestras de suelos, se logró entregar una clasificación a los suelos utilizados en la experiencia, identificando los suelos como arena pobremente graduada (Arena Biobío), arena limosa (Batolito costero, Penco y UBB) y suelo orgánico (Tierra de hoja). Además se confirmó que los suelos utilizados diferían en la cantidad de materia orgánica presente en ellos, considerando que la Arena Biobío corresponde a un suelo completamente inerte con un porcentaje de materia orgánica de 0,64%, en cambio la Tierra de hoja presenta un porcentaje de materia orgánica de 41,82%, considerándose un suelo orgánico.
- Desde el punto de vista del desarrollo vegetal en superficie, las características del suelo no influyen, puesto que la altura del césped es relativamente similar en todos los tratamientos.
- En cambio al analizar la transportabilidad de las palmetas, la plasticidad de los suelos utilizados toma relevancia, ya que debido a la baja plasticidad hizo imposible el enrollado de las palmetas, a excepción del tratamiento que contiene tierra de hoja, en el cual la abundante presencia de materia orgánica (raicillas, ramas, hojas, etc.) facilitó el desarrollo de las raicillas entregándole mayor consistencia a las palmetas y permitiendo su enrollamiento.
- En cuanto al desarrollo de las palmetas, se pudo confirmar que el uso de biosólidos favorece el desarrollo vegetal, con un crecimiento más rápido y constante en las palmetas que lo contenían. Además se identificó una diferencia en la tonalidad de césped, ya que las palmetas que contenían biosólidos, presentan una tonalidad verdosa más intensa en comparación a las que no lo contenían. Esto se debe a la falta de nutrientes presentes en los suelos (fósforo y potasio), los que son aportados por los biosólidos, favoreciendo la maduración y formación de tejidos más resistentes a la sequía y heladas.

- Al enfocarse solamente en el desarrollo de las palmetas que contenían biosólidos, se observó, que a pesar de que ningún tratamiento sobresaliera en comparación al resto, fue la mezcla de tierra de hoja y biosólidos la que alcanzó un mayor crecimiento, en todos los cortes. Además de ser el único tratamiento en cumplir con el enrollamiento y con un peso promedio de 14 kg aproximadamente, estando dentro de los estándares de mercado.
- La aplicación del DCA de cierto modo corroboró lo descrito por el análisis descriptivo, considerando que en dos de los tres cortes (segundo y tercer corte), el tratamiento con tierra de hoja y biosólidos fue el que arrojó mejores alturas. Así como también dejó en claro que las diferencias existentes entre los distintos tratamientos no son significativas.

#### **4.2 Recomendaciones**

- Debido a la mínima variabilidad que presentan los distintos tratamientos, se recomienda realizar nuevas investigaciones con menores dosificaciones de biosólidos, para así asegurar la manifestación del tipo de suelo en el desarrollo del césped.

**BIBLIOGRAFÍA**

1. Accuweather. [en línea]< <http://www.accuweather.com/es/cl/concepcion/57655/july-weather/57655?monyr=7/1/2015>> [Acceso el 10 Agosto 2015].
2. Cabrera, C.E. (2014). Desarrollo de propuesta técnico ambiental para la aplicabilidad de biosólidos en taludes. Proyecto de título ingeniería civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
3. Castillo, M.J. (2009). Influencia de inclusión de biosólidos secos sobre un suelo en el desarrollo vegetal en la evapotranspiración del trébol. Proyecto de título ingeniería civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
4. CEE 86/278. Directiva del Consejo de 12 de junio de 1986 relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de lodos de depuradora en agricultura, Luxemburgo, junio 1986.
5. CHILE. Ley N° 19300. Ley sobre bases generales del medio ambiente. Santiago, Chile, marzo 1994.
6. CHILE. Decreto Supremo N°148, 2003, Ministerio de Salud. Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos. Santiago, Chile, junio 2009.
7. CHILE. Decreto Supremo N°4, 2009, Ministerio General de la Presidencia. Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas. Santiago, Chile, enero 2009.
8. CHILE. Decreto Supremo N°40, 2013, Ministerio del Medio Ambiente. Reglamento para el sistema de evaluación de impacto ambiental. Santiago, Chile, agosto 2013.
9. CONAMA (2001). Reglamento para el manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas. p27.
10. Concha, W.A. (2012). Efecto de biosólidos compostados en la germinación de trébol. Proyecto de título ingeniería civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.

11. Don Darío. Entrevista realizada el 15 de Abril del 2015 en la ciudad de Concepción (Chile). Entrevistador: Mauricio Ponce.
12. DGA, Dirección General de Agua. [en línea]< <http://www.dga.cl/Paginas/default.aspx>> [Acceso el 10 Agosto 2015].
13. ECOTEC 2013, Antecedentes para la regulación de olores en Chile. Informe desarrollado a solicitud de la subsecretaría del medio ambiente.
14. EPA (Estados Unidos, 2000). Folleto informativo de tecnologías de Biosólidos, aplicación del biosólido al terreno, 832-F-00-64, 2000: 1-13.
15. EPA (Victoria, 2004). Guidelines for environmental management, biosolids land application. Victoria, Australia, abril 2004.
16. EPA 40 CFR Part 503. Estados Unidos. Standards for the use or disposal of sewage sludge. Washington, Estados Unidos, enero 2013.
17. ESSBIO (2012). Memoria integrada 2014. [en línea]< <https://www.essbio.cl/inversionistas/index.php#memorias> > [Acceso el 26 Mayo 2015].
18. Leppe, A (2002). Lodos provenientes de plantas de aguas servidas: potenciales y restricciones; temores y realidades. [en línea]< <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/iii-019.pdf>> [Acceso el 26 Mayo 2015].
19. Meza, J.F. (2011). Influencia de biosólidos compostados en el desarrollo del trébol enano. Proyecto de Título Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío.
20. Muñoz, A.P. (2014). Análisis del desarrollo de palmetas de césped utilizando mezcla de biosólido y suelo. Proyecto de título ingeniería civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
21. NCh 2952 (2004). “Lodos-Requisitos y condiciones para un plan de aplicación en suelos”. Instituto de Normalización, Chile.

22. Parracia, A.N (2012). Césped: Principales especies, manejo y métodos de propagación usados en parque y jardines. Trabajo final de graduación para optar por el título de Ingeniero en Producción Agropecuaria. Pontificia Universidad Católica Argentina. Argentina. [en línea]<<http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/cesped-principales-especies-manejo.pdf>> [Acceso el 08 Julio 2015].
23. SISS (2015). Informe Anual de Coberturas año 2014. [en línea]<[http://www.siss.cl/577/articles-11624\\_recurso\\_1.pdf](http://www.siss.cl/577/articles-11624_recurso_1.pdf)> [Acceso el 26 Mayo 2015].
24. Verde Andino, Pasto alfombra y servicios de jardín, productores de pasto en alfombra. [en línea] <<http://www.verdeandino.cl/index.html>> [Acceso el 11 Mayo 2015].

# **ANEXOS**

## ANEXO A: Marco teórico

### A.1. Características de biosólidos

La Tabla 1 presenta el contenido de nutrientes de la planta PTAS de Hualpén, así como también valores típicos de nutrientes presentes en plantas de tratamiento de la C.E.E. y rangos indicados por la E.P.A. Se observa que los lodos de la planta de Hualpén tienen un alto contenido de nitrógeno y un bajo valor de fósforo; en contraste, el potasio presenta valores similares a los de Europa y Estados Unidos (Leppe, 2002). El nutriente solicitado en mayor cantidad por la vegetación es el nitrógeno. Las normativas definen la cantidad de lodos a utilizar en función del nitrógeno que consumen los cultivos (tasa agronómica), pudiendo incurrir o no, en agregar más fósforo del necesario. La relación existente en Estados Unidos y Europa en cuanto al contenido de nitrógeno y fósforo es del orden 2:1. Sin embargo, se observa que esta relación en el caso de la planta de Hualpén es del orden 11:1. De esta forma se elimina el riesgo de tener fósforo en exceso, descartándose que se tome como parámetro al momento de la aplicación el contenido de fósforo en los lodos (Leppe, 2002).

**Tabla 1. Contenido de nutrientes de lodos de PTAS.**

Elemento	Rangos		
	Planta Hualpén	C.E.E.	E.P.A.
<b>Humedad (%)</b>	83,0 – 89,0	50,0 – 87,0	-
<b>Sólidos Volátiles (%)</b>	49,7 – 78,1	-	59,0 – 88,0
<b>Materia Orgánica (%)</b>	63,7	-	-
<b>P<sub>T</sub> (g/kg)</b>	0,1 – 1,5	1,5 – 5,7	2,8 – 11,0
<b>N<sub>T</sub> (g/kg)</b>	4,2 – 8,9	1,5 – 7,2	2,4 – 5,0
<b>K(g/kg)</b>	0,25 – 1,2	0,4 – 0,7	0,5 – 0,7
<b>pH</b>	6,1 – 6,8	6,8 – 10,3	6,5 – 8,0

Fuente: Leppe (2002)

La Tabla 2 proporciona el contenido de metales pesados de los lodos de la PTAS de Hualpén así como también de la C.E.E. y E.P.A., junto a los valores límites establecidos en las normativas de cada uno de ellos. Se observa que el contenido de metales pesados presentes en los lodos de PTAS de Hualpén, son bastante inferiores a los que se encuentran en países desarrollados. Se aprecia que la normativa nacional es en promedio 3 veces más restrictiva que la Europea y 6 veces más restrictiva que la Norteamericana (Leppe, 2002).

**Tabla 2. Contenido de metales pesados en lodos de PTAS y valores límites de las normativas (en mg/kg peso seco).**

Metales	Contenidos típicos			Valores normados		
	Planta de LA Hualpén	C.E.E.	E.P.A.	Chile	C.E.E.	E.P.A.
<b>Arsénico</b>	2,2	-	9	20	-	75
<b>Cadmio</b>	1,2	6,3	87	8	20 - 40	85
<b>Cromo</b>	37,6	-	1800	-	-	-
<b>Cobre</b>	222	525	1250	1000	1000 - 1750	4300
<b>Mercurio</b>	0,34	1,84	7	10	16 - 25	57
<b>Molibdeno</b>	4,9	-	-	10	-	75
<b>Níquel</b>	14,6	99,5	410	80	300 - 400	420
<b>Plomo</b>	16,0	396	1940	300	750 - 120	840
<b>Selenio</b>	0,84	-	26	50	-	100
<b>Zinc</b>	633	2155	3843	2000	2500 - 4000	2000

Fuente: Leppe (2002)

De las tablas anteriores se puede apreciar que los lodos de la PTAS de Hualpén cumplen de forma satisfactoria con el contenido de metales pesados impuesto por la normativa nacional.

## **A.2. Recomendaciones para la confección de las palmetas**

Para la confección de las palmetas se tomaron en consideración las recomendaciones entregadas por Darío (2015), siendo las siguientes:

- Utilización de polietileno perforado, para aislar las palmetas del suelo existente y permitir la infiltración de agua al momento de regar.
- Regado de las palmetas antes y después de esparcidas las semillas.
- La utilización de malla denominada filamento, para el agarre de las raíces del césped y favoreciendo el enrollamiento.
- Instalación del biosólido en la capa superior de las palmetas, ya que al momento de regar los nutrientes descienden a las capas inferiores.
- Instalación de espanta pájaros, evitando que éstos escarben y se coman las semillas.

**ANEXO B: Ensayos de mecánica de suelos**

**B.1. Granulometría**

**Tabla B.1. Clasificación granulométrica  
Arena Biobío**

<b>Fracción Bajo 5 (mm)</b>				
Peso Seco Inicial Pasa 5 mm (C)				580,1
Peso Seco Cuarteo Lavado 5 mm (C" )				580,7
Abertura mm	Tamiz	Retenido		Pasa (%)
		Peso (g)	(%)	
9,5	(3/8")	0	0	100
5,0	(N° 4)	3,6	0,62	99,4
2,0	(N° 10)	36,1	6,22	93,2
0,84	(N° 20)	238,20	41,06	52,1
0,42	(N° 40)	240,90	41,53	10,6
0,25	(N° 60)	52,10	8,98	1,6
0,074	(N° 200)	8,00	1,38	0,2
Residuo		0,32		

**Tol.(%)** 0,25 **Máx. 3,0%**

Suelo Tipo	ASSHTO	USCS
		A1-b

**Tabla B.2. Clasificación granulométrica  
Batolito Costero, Penco**

<b>Fracción Bajo 5 (mm)</b>				
Peso Seco Inicial Pasa 5 mm (C)				580,6
Peso Seco Cuarteo Lavado 5 mm (C" )				502,5
Abertura mm	Tamiz	Retenido		Pasa (%)
		Peso (g)	(%)	
9,5	(3/8")	0	0	100
5,0	(N° 4)	31,2	5,37	94,6
2,0	(N° 10)	134,1	23,1	71,5
0,84	(N° 20)	94,80	16,33	55,2
0,42	(N° 40)	70,30	12,11	43,1
0,25	(N° 60)	49,70	8,56	34,5
0,074	(N° 200)	98,50	16,97	17,6
Residuo		21,66		

**Tol.(%)** 0,45 **Máx. 3,0%**

Suelo Tipo	ASSHTO	USCS
		A1-b

**Tabla B.3. Clasificación granulométrica  
Batolito Costero, UBB**

<b>Fracción Bajo 5 (mm)</b>				
Peso Seco Inicial Pasa 5 mm (C)				515,8
Peso Seco Cuarteo Lavado 5 mm (C" )				344,5
Abertura mm	Tamiz	Retenido		Pasa (%)
		Peso (g)	(%)	
9,5	(3/8")	0	0	100
5,0	(N° 4)	0,5	0,1	99,9
2,0	(N° 10)	2,8	0,54	99,4
0,84	(N° 20)	7,4	1,43	97,9
0,42	(N° 40)	20,5	3,97	94,0
0,25	(N° 60)	44,6	8,65	85,3
0,074	(N° 200)	205,9	39,92	45,4
Residuo		61,4		
<b>Tol.(%)</b>		0,41	<b>Máx. 3,0%</b>	
Suelo Tipo	ASSHTO	USCS		
	A-4	SM		

**B.2. Clasificación Visual**



**Figura B.1. Muestra de Tierra de hoja.**

**B.3. Porcentaje de materia orgánica**

**Tabla B.4. Porcentaje de materia orgánica en Arena Biobío**

Peso	Unidad	Crisol				
		1	2	3	4	5
Crisol	gr	38,8	38,61	19,89	20,31	37,22
Muestra Seca + Crisol	gr	57,67	60,17	38,02	39,71	61,89
Muestra Calcinada + Crisol	gr	57,55	60,02	37,91	39,58	61,74
Materia Orgánica	gr	0,12	0,15	0,11	0,13	0,15
% M. O.	%	0,64	0,70	0,61	0,67	0,61
<b>Promedio</b>	<b>%</b>	<b>0,64</b>				

**Tabla B.5. Porcentaje de materia orgánica en Batolito Costero, Penco**

Peso	Unidad	Crisol				
		6	7	8	9	10
Crisol	gr	20,6	22,09	23,79	23,92	36,1
Muestra Seca + Crisol	gr	35,9	38,4	37,92	39,7	63,91
Muestra Calcinada + Crisol	gr	35,4	37,91	37,45	39,28	63,25
Materia Orgánica	gr	0,5	0,49	0,47	0,42	0,66
% M. O.	%	3,27	3,00	3,33	2,66	2,37
<b>Promedio</b>	<b>%</b>	<b>2,93</b>				

**Tabla B.6. Porcentaje de materia orgánica en Batolito Costero, UBB**

Peso	Unidad	Crisol				
		1	2	3	4	5
Crisol	gr	38,8	38,61	19,89	20,31	37,22
Muestra Seca + Crisol	gr	60,6	59,69	30,51	33,83	56,69
Muestra Calcinada + Crisol	gr	59,43	58,39	29,89	32,99	55,44
Materia Orgánica	gr	1,17	1,3	0,62	0,84	1,25
% M. O.	%	5,37	6,17	5,84	6,21	6,42
<b>Promedio</b>	<b>%</b>	<b>6,00</b>				

**Tabla B.7 Porcentaje de materia orgánica en Tierra de Hoja**

Peso	Unidad	Crisol				
		6	7	8	9	10
Crisol	gr	20,6	22,09	23,79	23,92	36,1
Muestra Seca + Crisol	gr	25,82	29,78	31,18	30,72	45,7
Muestra Calcinada + Crisol	gr	23,51	26,83	28,05	27,74	41,83
Materia Orgánica	gr	2,31	2,95	3,13	2,98	3,87
% M. O.	%	44,25	38,36	42,35	43,82	40,31
<b>Promedio</b>	%	<b>41,82</b>				

**B.3. Porcentaje de humedad**

**Tabla B.8. Humedades**

Peso	Unidad	Muestras				
		Arena Biobío	Batolito Costero, Penco	Batolito Costero, UBB	Tierra de Hoja	Biosólido
Recipiente	gr	79,3	99,4	133,9	99,2	26,45
Muestra Húmeda + Recipiente	gr	422,2	474,5	429,5	213,9	34,02
Muestra Seca + Recipiente	gr	420,8	468,1	417	192,3	27,74
Muestra Seca	gr	341,5	368,7	283,1	93,1	1,29
Agua	gr	1,4	6,4	12,5	21,6	6,28
<b>Humedad (w)</b>	%	<b>0,41</b>	<b>1,74</b>	<b>4,42</b>	<b>23,20</b>	<b>486,82</b>

ANEXO C: Cálculos y mediciones de alturas de césped

C.1. Biomasa

Tabla C.1. Peso de biomasa por palmetas

Tratamiento	Peso promedio por corte verde (gr)			Peso promedio por corte seco (gr)		
	1	2	3	1	2	3
<b>T1R1</b>	239	132	232	52	38	50
<b>T1R2</b>	298	200	299	64	50	70
<b>T1R3</b>	301	196	280	61	49	60
<b>Promedio</b>	<b>279,3</b>	<b>176,0</b>	<b>270,3</b>	<b>59,0</b>	<b>45,7</b>	<b>60,0</b>
<b>T2R1</b>	314	182	193	64	42	46
<b>T2R2</b>	302	212	273	69	46	62
<b>T2R3</b>	389	268	323	77	57	68
<b>Promedio</b>	<b>335</b>	<b>220,7</b>	<b>263,0</b>	<b>70,0</b>	<b>48,3</b>	<b>58,7</b>
<b>T3R1</b>	334	124	73	74	36	30
<b>T3R2</b>	287	178	278	57	40	56
<b>T3R3</b>	375	156	160	69	46	48
<b>Promedio</b>	<b>332</b>	<b>152,7</b>	<b>170,3</b>	<b>66,7</b>	<b>40,7</b>	<b>44,7</b>
<b>T4R1</b>	328	208	232	57	45	52
<b>T4R2</b>	285	290	303	52	52	67
<b>T4R3</b>	303	204	314	65	53	74
<b>Promedio</b>	<b>305,3</b>	<b>234</b>	<b>283,0</b>	<b>58,0</b>	<b>50</b>	<b>64,3</b>

**C.2. Alturas promedio de cada tratamiento y sus réplicas durante toda la experiencia**

**Tabla C.2. Altura promedio desde la germinación hasta el primer corte**

Tratamiento	Repetición (parcela)	Altura Promedio (cm)							
		t	t0	t1	t2	t3	t4	t5	t6
		0	6	9	12	15	18	21	24
T1 (Arena Biobío)	R1 (1)	0	0,1	1,72	5,56	7,52	7,78	9,34	10,62
	R2 (8)	0	0,1	1,89	5,85	7,96	8,52	8,68	10,77
	R3 (13)	0	0,2	2,23	7,01	9,82	9,78	10,18	12,86
Promedio		<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>1,9</b>	<b>6,1</b>	<b>8,4</b>	<b>8,7</b>	<b>9,4</b>	<b>11,4</b>
T2 (Batolito Costero, Penco)	R1 (3)	0	0,1	2,35	6,54	8,3	9,02	9,6	11,3
	R2(9)	0	0,1	1,96	5,89	7,28	8,34	8,54	11,54
	R3 (11)	0	0,1	2,89	5,53	8,66	9,14	10,62	13,92
Promedio		<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>2,4</b>	<b>6,0</b>	<b>8,1</b>	<b>8,8</b>	<b>9,6</b>	<b>12,3</b>
T3 (Batolito Costero, UBB)	R1 (4)	0	0,1	3,02	6,21	8,28	8,96	10,22	12,62
	R2(12)	0	0,1	2,47	5,53	7,24	7,98	8,74	12,02
	R3 (14)	0	0,1	3,31	5,77	8,16	9,28	10,02	13,48
Promedio		<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>2,9</b>	<b>5,8</b>	<b>7,9</b>	<b>8,7</b>	<b>9,7</b>	<b>12,7</b>
T4 (Tierra de Hoja)	R1 (2)	0	0,1	2,93	6,41	8,18	8,66	9,32	11,08
	R2(6)	0	0,1	2,63	5,13	7,78	7,98	8,86	10,68
	R3 (10)	0	0,1	2,27	5,51	7,84	8,64	9,06	12,56
Promedio		<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>2,6</b>	<b>5,7</b>	<b>7,9</b>	<b>8,4</b>	<b>9,1</b>	<b>11,4</b>

**Tabla C.3. Altura promedio desde el primer hasta el segundo corte**

Tratamiento	Repetición (parcela)	Altura Promedio (cm)					
		t7	t8	t9	t10	t11	t12
		27	30	33	36	39	42
T1 (Arena Biobío)	R1 (1)	3,18	4,18	5,98	7,01	8,12	10,32
	R2 (8)	3,26	5,12	6,76	7,13	9,06	10,56
	R3 (13)	3,32	5,08	7,26	8,42	9,88	11,54
Promedio		<b>3,3</b>	<b>4,8</b>	<b>6,7</b>	<b>7,5</b>	<b>9,0</b>	<b>10,8</b>
T2 (Batolito Costero, Penco)	R1 (3)	3,06	4,64	6,8	7,11	9,06	10,56
	R2(9)	3,16	4,64	6,28	7,69	9,32	10,74
	R3 (11)	3,1	5,32	7,56	8,85	9,5	11,98
Promedio		<b>3,1</b>	<b>4,9</b>	<b>6,9</b>	<b>7,9</b>	<b>9,3</b>	<b>11,1</b>
T3 (Batolito Costero, UBB)	R1 (4)	3,04	4,42	6,2	8,25	9,24	10,78
	R2(12)	3,38	4,46	6,56	7,58	8,44	10,58
	R3 (14)	3,26	5,24	7,3	8,76	9,42	10,82
Promedio		<b>3,2</b>	<b>4,7</b>	<b>6,7</b>	<b>8,2</b>	<b>9,0</b>	<b>10,7</b>
T4 (Tierra de Hoja)	R1 (2)	2,84	4,5	6,86	7,78	8,52	10,32
	R2(6)	3,54	5,48	8,12	8,73	9,88	10,96
	R3 (10)	3,18	4,88	7,16	8,14	9,48	11,9
Promedio		<b>3,2</b>	<b>5,0</b>	<b>7,4</b>	<b>8,2</b>	<b>9,3</b>	<b>11,1</b>

**Tabla C.4. Altura promedio desde el segundo hasta el tercer corte**

		<b>Altura Promedio (cm)</b>									
<b>Tratamiento</b>	<b>Repetición (parcela)</b>	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22
		45	48	51	54	57	60	63	66	69	72
T1 (Arena Biobío)	R1 (1)	2,94	4,54	5,24	6,42	8,16	8,31	8,52	9,34	9,68	10,92
	R2 (8)	3,02	4,64	6,02	6,38	7,48	7,57	8,22	9,2	9,68	10,46
	R3 (13)	2,92	4,44	6,18	6,68	8,04	8,19	8,88	10,38	10,44	11,04
Promedio		<b>3,0</b>	<b>4,5</b>	<b>5,8</b>	<b>6,5</b>	<b>7,9</b>	<b>8,0</b>	<b>8,5</b>	<b>9,6</b>	<b>9,9</b>	<b>10,8</b>
T2 (Batolito Costero, Penco)	R1 (3)	2,22	4,14	5,42	6,74	7,28	7,38	7,72	8,16	8,76	10,02
	R2(9)	2,76	4,04	5,5	6,54	7,12	7,33	7,54	8,98	9,24	10,08
	R3 (11)	3,02	4,42	5,98	6,74	7,98	8,27	8,4	9,52	10,22	11,2
Promedio		<b>2,7</b>	<b>4,2</b>	<b>5,6</b>	<b>6,7</b>	<b>7,5</b>	<b>7,7</b>	<b>7,9</b>	<b>8,9</b>	<b>9,4</b>	<b>10,4</b>
T3 (Batolito Costero, UBB)	R1 (4)	2,42	4,4	5,1	5,84	6,68	6,93	7,96	8,34	9,14	10,18
	R2(12)	2,68	3,98	5,1	6,06	6,54	7,07	7,82	8,44	9,72	10,4
	R3 (14)	2,68	4,1	5	6,04	6,28	6,89	7,56	8,44	10,22	11,2
Promedio		<b>2,6</b>	<b>4,2</b>	<b>5,1</b>	<b>6,0</b>	<b>6,5</b>	<b>7,0</b>	<b>7,8</b>	<b>8,4</b>	<b>9,7</b>	<b>10,6</b>
T4 (Tierra de Hoja)	R1 (2)	2,7	4,5	6,1	6,54	7,42	8,21	8,82	9,38	10,08	10,88
	R2(6)	2,72	4,74	6,04	7,2	7,6	8,37	8,84	9,18	10,04	10,6
	R3 (10)	2,9	4,86	6,28	6,92	8,18	8,3	8,86	11	11,2	12,22
Promedio		<b>2,8</b>	<b>4,7</b>	<b>6,1</b>	<b>6,9</b>	<b>7,7</b>	<b>8,3</b>	<b>8,8</b>	<b>9,9</b>	<b>10,4</b>	<b>11,2</b>

**C.3. Alturas de césped para el diseño completamente aleatorio**

C.3.1. Alturas de césped medidas antes del primer corte

**Tabla C.5. Altura del césped de las palmetas  
T1R1-T3R1-T4R3**

Parcela	Césped	Tratamiento	Replica	Altura (cm)
1	1	1	1	12,8
1	2	1	1	10,3
1	3	1	1	11,1
1	4	1	1	10
1	5	1	1	9,6
1	6	1	1	8,9
1	7	1	1	10,1
1	8	1	1	9,8
1	9	1	1	9,5
1	10	1	1	12,2
2	1	3	1	13,4
2	2	3	1	13,8
2	3	3	1	11,8
2	4	3	1	10,2
2	5	3	1	13,3
2	6	3	1	9,6
2	7	3	1	12,4
2	8	3	1	12,1
2	9	3	1	12,2
2	10	3	1	10,5
4	1	4	3	12,7
4	2	4	3	13,8
4	3	4	3	13,1
4	4	4	3	13,3
4	5	4	3	10,5
4	6	4	3	10,7
4	7	4	3	13,1
4	8	4	3	11,9
4	9	4	3	13,4
4	10	4	3	13,3

**Tabla C.6. Altura del césped de las palmetas  
T1R3-T4R1-T1R2**

Parcela	Césped	Tratamiento	Replica	Altura (cm)
5	1	1	3	12,5
5	2	1	3	12,4
5	3	1	3	13,6
5	4	1	3	13
5	5	1	3	13,1
5	6	1	3	11,2
5	7	1	3	12,2
5	8	1	3	12,1
5	9	1	3	12,9
5	10	1	3	10,9
6	1	4	1	12,9
6	2	4	1	12,5
6	3	4	1	9,6
6	4	4	1	9,9
6	5	4	1	10,5
6	6	4	1	11,9
6	7	4	1	11,5
6	8	4	1	12,4
6	9	4	1	10,9
6	10	4	1	10,4
8	1	1	2	11,3
8	2	1	2	9,6
8	3	1	2	9,8
8	4	1	2	10,6
8	5	1	2	11,5
8	6	1	2	10,9
8	7	1	2	11,3
8	8	1	2	10,1
8	9	1	2	10,4
8	10	1	2	9,3

**Tabla C.7. Altura del césped de las palmetas  
T2R3-T3R3-T2R1**

Parcela	Césped	Tratamiento	Replica	Altura (cm)
9	1	2	3	13,9
9	2	2	3	13,1
9	3	2	3	13,5
9	4	2	3	10,9
9	5	2	3	14,7
9	6	2	3	14,2
9	7	2	3	12,6
9	8	2	3	11,7
9	9	2	3	14,9
9	10	2	3	13,1
10	1	3	3	13,2
10	2	3	3	13,8
10	3	3	3	13,5
10	4	3	3	11,3
10	5	3	3	14,2
10	6	3	3	10,8
10	7	3	3	12,6
10	8	3	3	12,9
10	9	3	3	13,9
10	10	3	3	11,8
11	1	2	1	10,4
11	2	2	1	10,7
11	3	2	1	11,6
11	4	2	1	9,8
11	5	2	1	11,6
11	6	2	1	11,3
11	7	2	1	12,4
11	8	2	1	12,8
11	9	2	1	10,5
11	10	2	1	9,7

**Tabla C.8. Altura del césped de las palmetas  
T4R2-T2R2-T3R2**

Parcela	Césped	Tratamiento	Replica	Altura (cm)
12	1	4	2	9,9
12	2	4	2	9,3
12	3	4	2	10,8
12	4	4	2	12,7
12	5	4	2	12,1
12	6	4	2	10
12	7	4	2	10,1
12	8	4	2	9,9
12	9	4	2	12,5
12	10	4	2	12,9
13	1	2	2	10,2
13	2	2	2	9,1
13	3	2	2	9,8
13	4	2	2	10,9
13	5	2	2	12,8
13	6	2	2	13,3
13	7	2	2	12,1
13	8	2	2	12,4
13	9	2	2	12,8
13	10	2	2	11,1
14	1	3	2	11,2
14	2	3	2	10,1
14	3	3	2	12,1
14	4	3	2	9,9
14	5	3	2	12,6
14	6	3	2	12,9
14	7	3	2	10,8
14	8	3	2	11,9
14	9	3	2	13,4
14	10	3	2	13,8

C.3.2. Alturas de césped medidas antes del segundo corte

**Tabla C.9. Altura del césped de las palmetas  
T1R1-T3R1-T4R3**

Parcela	Césped	Tratamiento	Replica	Altura (cm)
1	1	1	1	10,5
1	2	1	1	10,9
1	3	1	1	11,2
1	4	1	1	8,3
1	5	1	1	8,9
1	6	1	1	10,6
1	7	1	1	9,7
1	8	1	1	9,6
1	9	1	1	9,8
1	10	1	1	11,7
2	1	3	1	11,7
2	2	3	1	7,9
2	3	3	1	10,8
2	4	3	1	9,3
2	5	3	1	11,2
2	6	3	1	11,8
2	7	3	1	10,1
2	8	3	1	12,1
2	9	3	1	10,2
2	10	3	1	10,9
4	1	4	3	11,2
4	2	4	3	11,7
4	3	4	3	12,3
4	4	4	3	14,2
4	5	4	3	13,1
4	6	4	3	13,6
4	7	4	3	10,2
4	8	4	3	9,6
4	9	4	3	12,7
4	10	4	3	12,4

**Tabla C.10. Altura del césped de las palmetas  
T1R3-T4R1-T1R2**

Parcela	Césped	Tratamiento	Replica	Altura (cm)
5	1	1	3	13,8
5	2	1	3	13,1
5	3	1	3	10,1
5	4	1	3	10,7
5	5	1	3	11,7
5	6	1	3	9,3
5	7	1	3	10,8
5	8	1	3	10,1
5	9	1	3	11,3
5	10	1	3	12,4
6	1	4	1	11,9
6	2	4	1	12,8
6	3	4	1	10,1
6	4	4	1	11,4
6	5	4	1	8,3
6	6	4	1	9,9
6	7	4	1	10,1
6	8	4	1	11,8
6	9	4	1	11,2
6	10	4	1	12,1
8	1	1	2	10,8
8	2	1	2	10,1
8	3	1	2	10,6
8	4	1	2	8,8
8	5	1	2	10,3
8	6	1	2	11,7
8	7	1	2	10,2
8	8	1	2	11,9
8	9	1	2	10,9
8	10	1	2	10,7

**Tabla C.11. Altura del césped de las palmetas  
T2R3-T3R3-T2R1**

Parcela	Césped	Tratamiento	Replica	Altura (cm)
9	1	2	3	12,4
9	2	2	3	13,7
9	3	2	3	12,1
9	4	2	3	12,6
9	5	2	3	11,2
9	6	2	3	10,1
9	7	2	3	13,4
9	8	2	3	13
9	9	2	3	10,8
9	10	2	3	10,2
10	1	3	3	10,6
10	2	3	3	12,4
10	3	3	3	11,1
10	4	3	3	11,8
10	5	3	3	10,8
10	6	3	3	9,3
10	7	3	3	9,8
10	8	3	3	12,2
10	9	3	3	10,6
10	10	3	3	11,6
11	1	2	1	9,3
11	2	2	1	8,4
11	3	2	1	10,2
11	4	2	1	10,7
11	5	2	1	11,7
11	6	2	1	12,4
11	7	2	1	11,5
11	8	2	1	10,9
11	9	2	1	10,1
11	10	2	1	9,7

**Tabla C.12. Altura del césped de las palmetas  
T4R2-T2R2-T3R2**

Parcela	Césped	Tratamiento	Replica	Altura (cm)
12	1	4	2	10,4
12	2	4	2	10,9
12	3	4	2	10,2
12	4	4	2	13,8
12	5	4	2	12,1
12	6	4	2	12,7
12	7	4	2	10,4
12	8	4	2	10,9
12	9	4	2	11,7
12	10	4	2	11,3
13	1	2	2	9,1
13	2	2	2	9,7
13	3	2	2	10,2
13	4	2	2	12,6
13	5	2	2	11,2
13	6	2	2	10,9
13	7	2	2	11,4
13	8	2	2	12,4
13	9	2	2	11,8
13	10	2	2	10,7
14	1	3	2	9,5
14	2	3	2	9,1
14	3	3	2	10,8
14	4	3	2	11,8
14	5	3	2	12,4
14	6	3	2	10,5
14	7	3	2	11,1
14	8	3	2	11,8
14	9	3	2	10,3
14	10	3	2	9,6

C.3.3. Alturas de césped medidas antes del tercer corte

**Tabla C.13. Altura del césped de las palmetas  
T1R1-T3R1-T4R3**

Parcela	Césped	Tratamiento	Replica	Altura (cm)
1	1	1	1	10,8
1	2	1	1	10,4
1	3	1	1	10,2
1	4	1	1	9,2
1	5	1	1	10,4
1	6	1	1	11,7
1	7	1	1	11
1	8	1	1	12
1	9	1	1	12,2
1	10	1	1	10,7
2	1	3	1	10,8
2	2	3	1	7,8
2	3	3	1	9,2
2	4	3	1	9,7
2	5	3	1	9,5
2	6	3	1	10,8
2	7	3	1	11,4
2	8	3	1	7,3
2	9	3	1	10
2	10	3	1	11,5
4	1	4	3	12
4	2	4	3	13,6
4	3	4	3	12,2
4	4	4	3	12,7
4	5	4	3	12,3
4	6	4	3	10,9
4	7	4	3	12,9
4	8	4	3	12,3
4	9	4	3	11,7
4	10	4	3	13,4

**Tabla C.14. Altura del césped de las palmetas  
T1R3-T4R1-T1R2**

Parcela	Césped	Tratamiento	Replica	Altura (cm)
5	1	1	3	11,2
5	2	1	3	11,9
5	3	1	3	9
5	4	1	3	10,3
5	5	1	3	11,1
5	6	1	3	11,9
5	7	1	3	11,5
5	8	1	3	9,3
5	9	1	3	12,4
5	10	1	3	12,1
6	1	4	1	10,2
6	2	4	1	12,6
6	3	4	1	10
6	4	4	1	10,9
6	5	4	1	10,4
6	6	4	1	11,8
6	7	4	1	11
6	8	4	1	9,8
6	9	4	1	12,8
6	10	4	1	12,1
8	1	1	2	10,8
8	2	1	2	9,7
8	3	1	2	10,2
8	4	1	2	10,8
8	5	1	2	11
8	6	1	2	11,5
8	7	1	2	9,8
8	8	1	2	9,5
8	9	1	2	10,5
8	10	1	2	10,9

**Tabla C.15. Altura del césped de las palmetas  
T2R3-T3R3-T2R1**

Parcela	Césped	Tratamiento	Replica	Altura (cm)
9	1	2	3	11,1
9	2	2	3	12,4
9	3	2	3	10,1
9	4	2	3	9,9
9	5	2	3	11,5
9	6	2	3	11,1
9	7	2	3	10,3
9	8	2	3	10,8
9	9	2	3	13
9	10	2	3	10,8
10	1	3	3	11,3
10	2	3	3	9,1
10	3	3	3	10
10	4	3	3	10,5
10	5	3	3	8,5
10	6	3	3	8,2
10	7	3	3	11,3
10	8	3	3	10,9
10	9	3	3	10
10	10	3	3	12,1
11	1	2	1	9,1
11	2	2	1	8,8
11	3	2	1	9,8
11	4	2	1	11,4
11	5	2	1	10,2
11	6	2	1	10,7
11	7	2	1	10
11	8	2	1	9,6
11	9	2	1	11
11	10	2	1	11,3

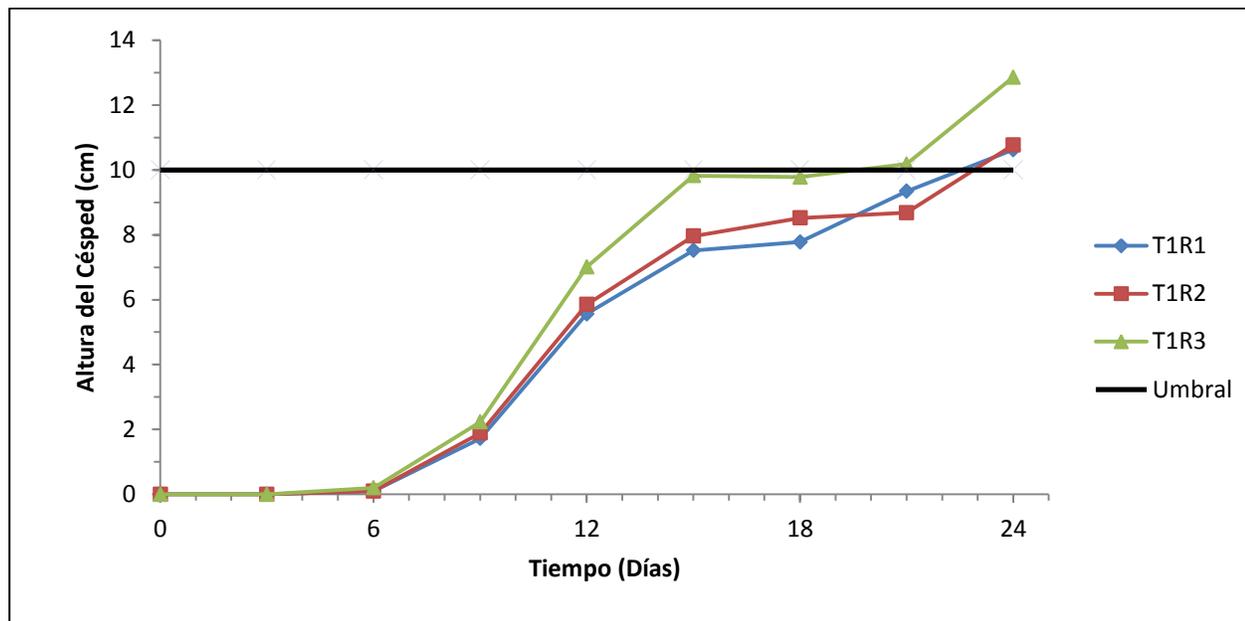
**Tabla C.16. Altura del césped de las palmetas  
T4R2-T2R2-T3R2**

Parcela	Césped	Tratamiento	Replica	Altura (cm)
12	1	4	2	9,6
12	2	4	2	13,1
12	3	4	2	11
12	4	4	2	9,3
12	5	4	2	10,2
12	6	4	2	10,9
12	7	4	2	10,4
12	8	4	2	12
12	9	4	2	11,8
12	10	4	2	10,1
13	1	2	2	10,3
13	2	2	2	11,8
13	3	2	2	10,2
13	4	2	2	10,7
13	5	2	2	9,8
13	6	2	2	8,8
13	7	2	2	10,1
13	8	2	2	11,1
13	9	2	2	10
13	10	2	2	9,7
14	1	3	2	10,1
14	2	3	2	10,7
14	3	3	2	10
14	4	3	2	9,5
14	5	3	2	11,1
14	6	3	2	11,8
14	7	3	2	10
14	8	3	2	12,5
14	9	3	2	10,8
14	10	3	2	9,3

**ANEXO D: Variabilidad de la Altura de Césped entre las Réplicas de los Tratamientos**

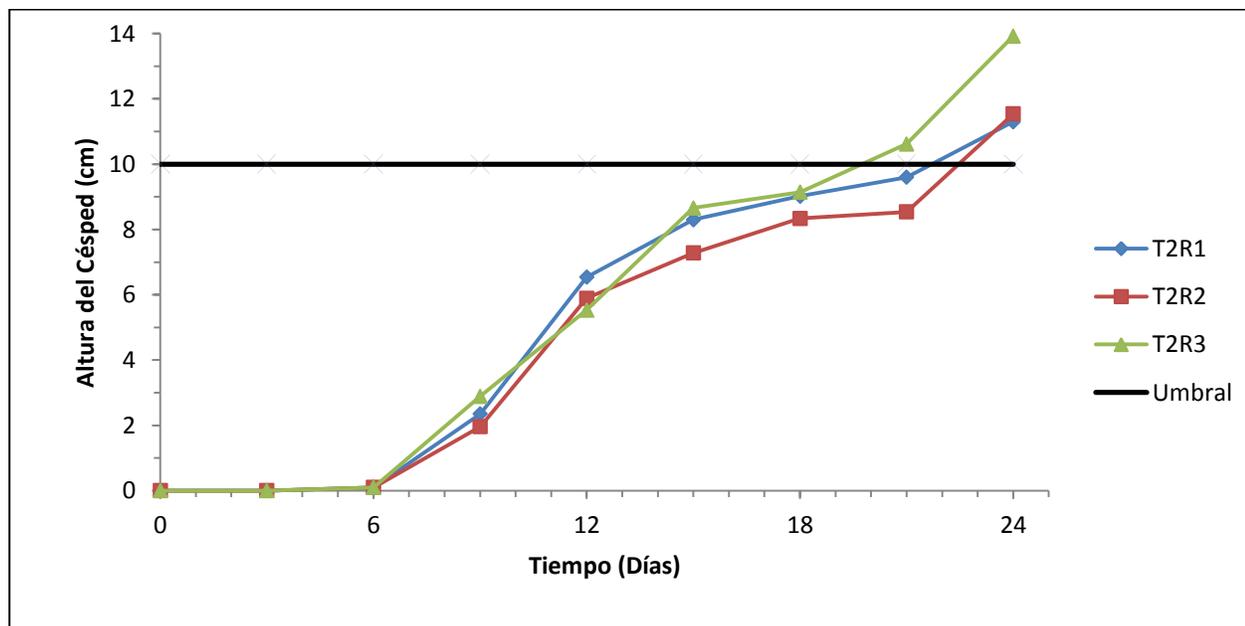
**D.1. Alturas de las réplicas de los tratamientos en el tiempo, antes del primer corte.**

D.1.1. Alturas de las réplicas tratamiento 1 (Arena Biobío)



**Figura D.1. Variabilidad de las replicas del T1.**

D.1.2. Alturas de las réplicas tratamiento 2 (Batolito Costero, Penco)



**Figura D.2. Variabilidad de las replicas del T2.**

D.1.3. Alturas de las réplicas tratamiento 3 (Batolito Costero, UBB)

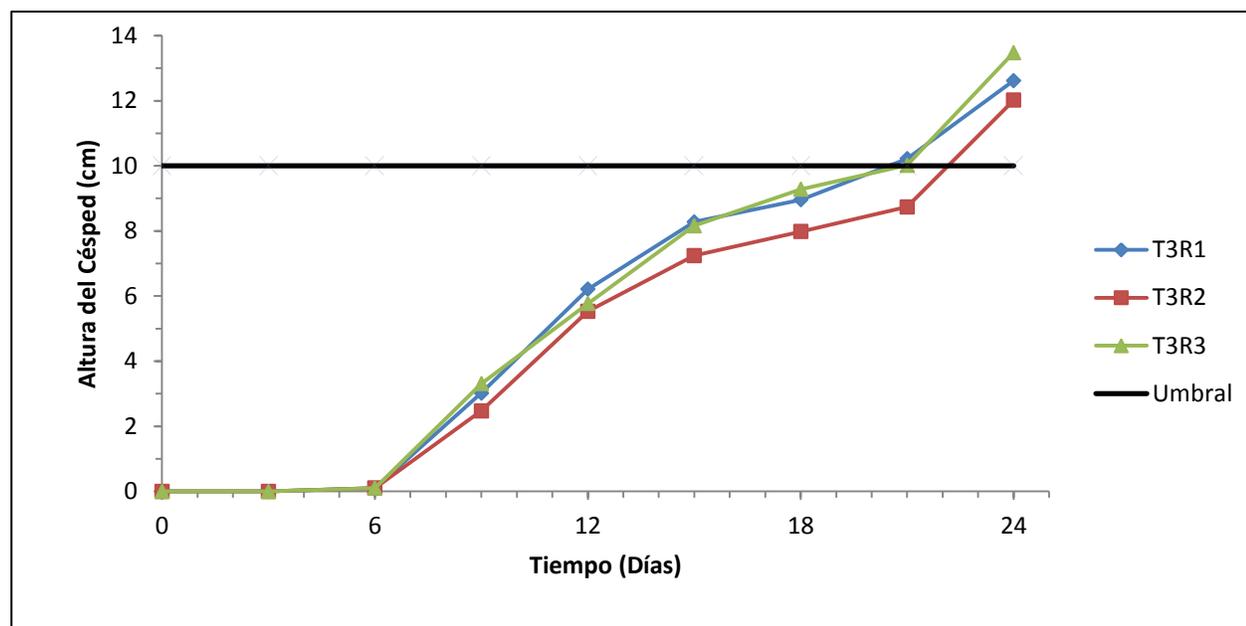


Figura D.3. Variabilidad de las replicas del T3.

D.1.4. Alturas de las réplicas tratamiento 4 (Tierra de Hoja)

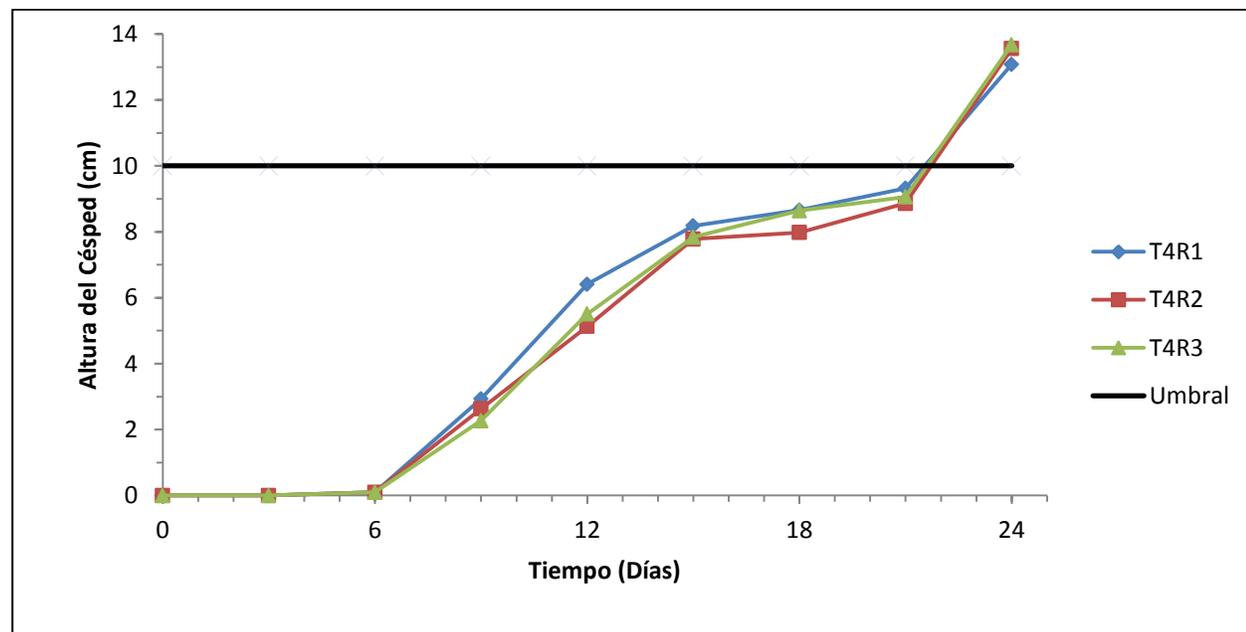
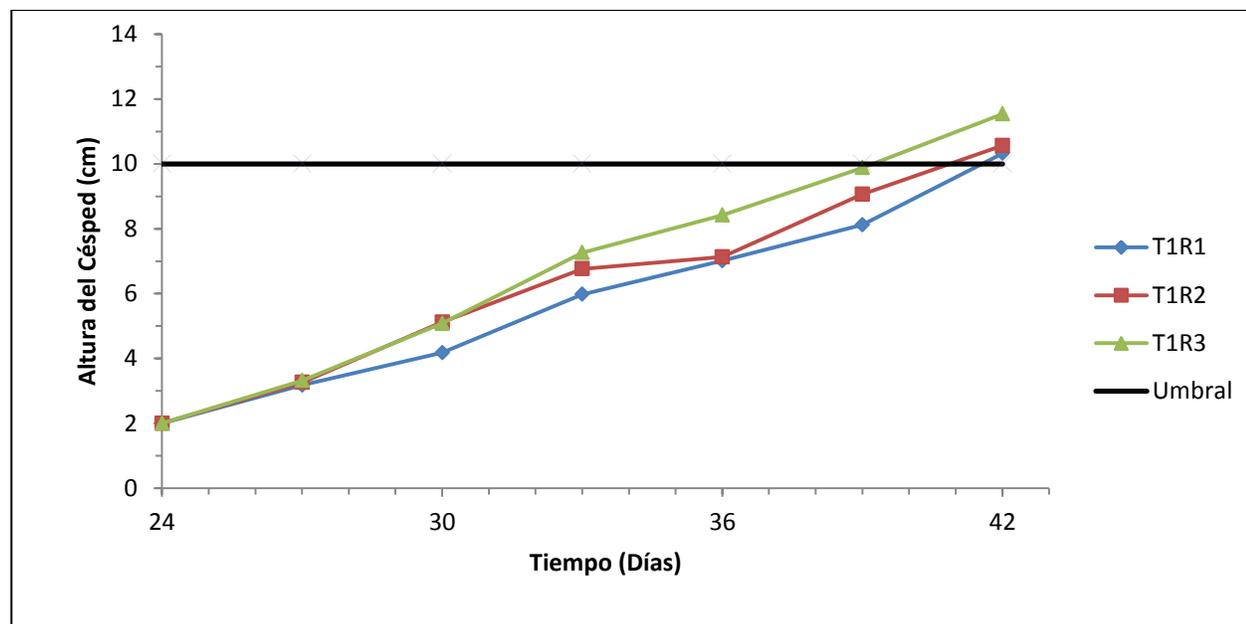


Figura D.4. Variabilidad de las replicas del T4.

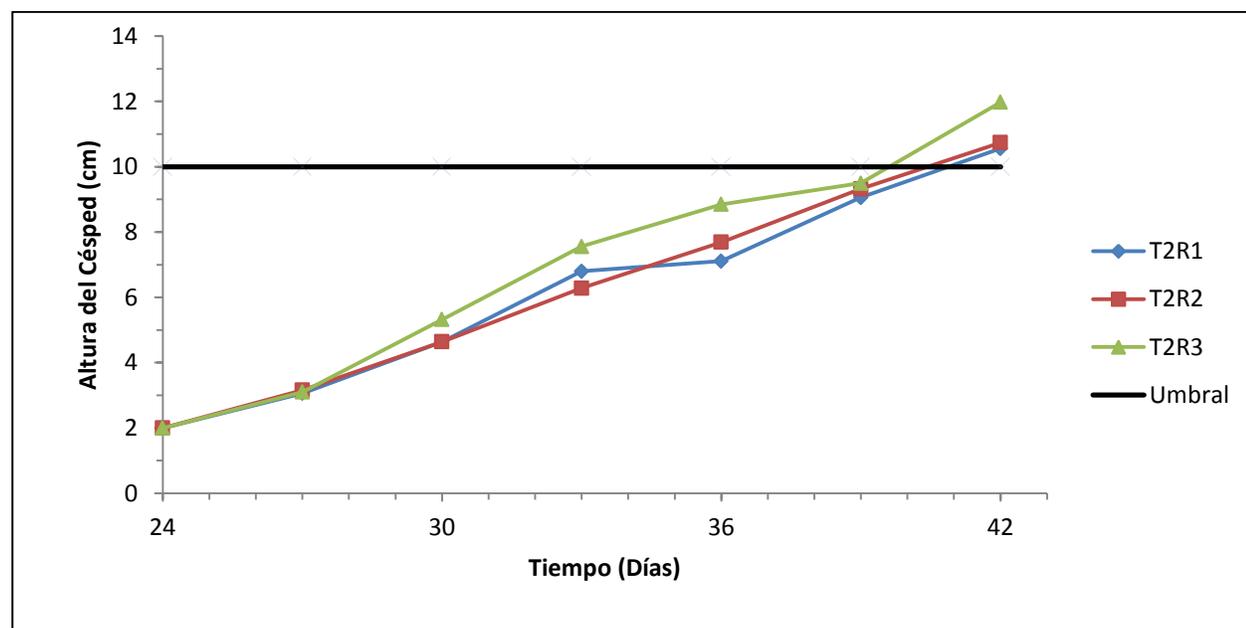
**D.2. Alturas de las réplicas de los tratamientos en el tiempo, entre el primer y segundo corte.**

**D.2.1. Alturas de las réplicas tratamiento 1 (Arena Biobío)**



**Figura D.5. Variabilidad de las replicas del T1.**

**D.2.2. Alturas de las réplicas tratamiento 2 (Batolito Costero, Penco)**



**Figura D.6. Variabilidad de las replicas del T2.**

D.2.3. Alturas de las réplicas tratamiento 3 (Batolito Costero, UBB)

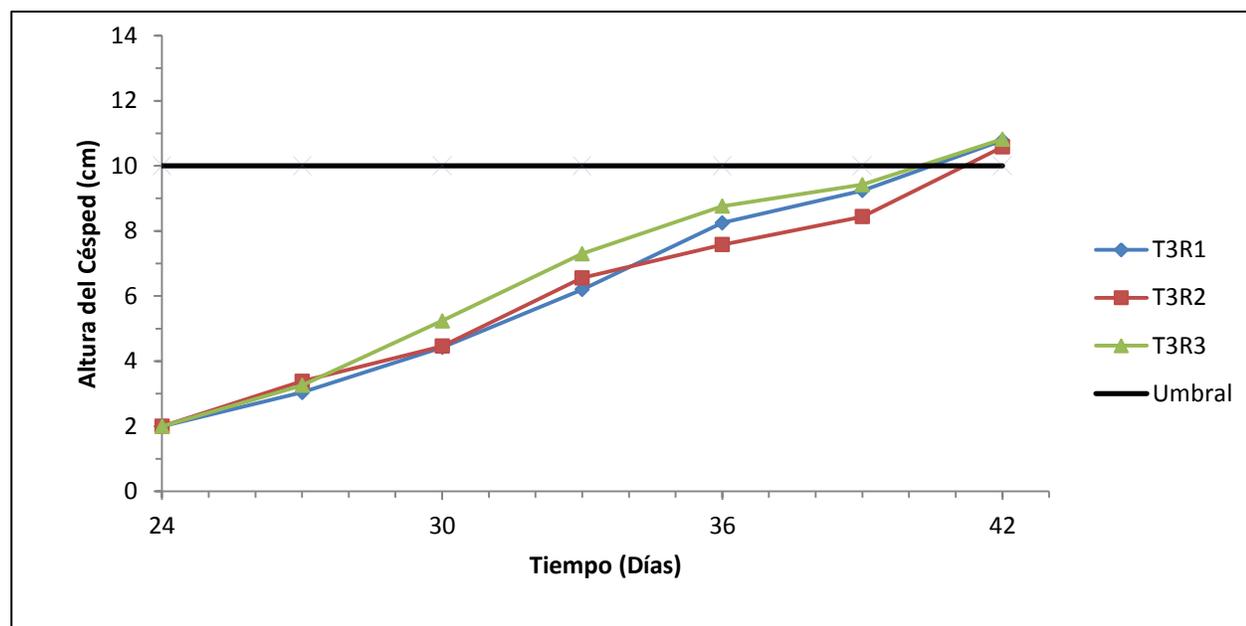


Figura D.7. Variabilidad de las replicas del T3.

D.2.4. Alturas de las réplicas tratamiento 4 (Tierra de Hoja)

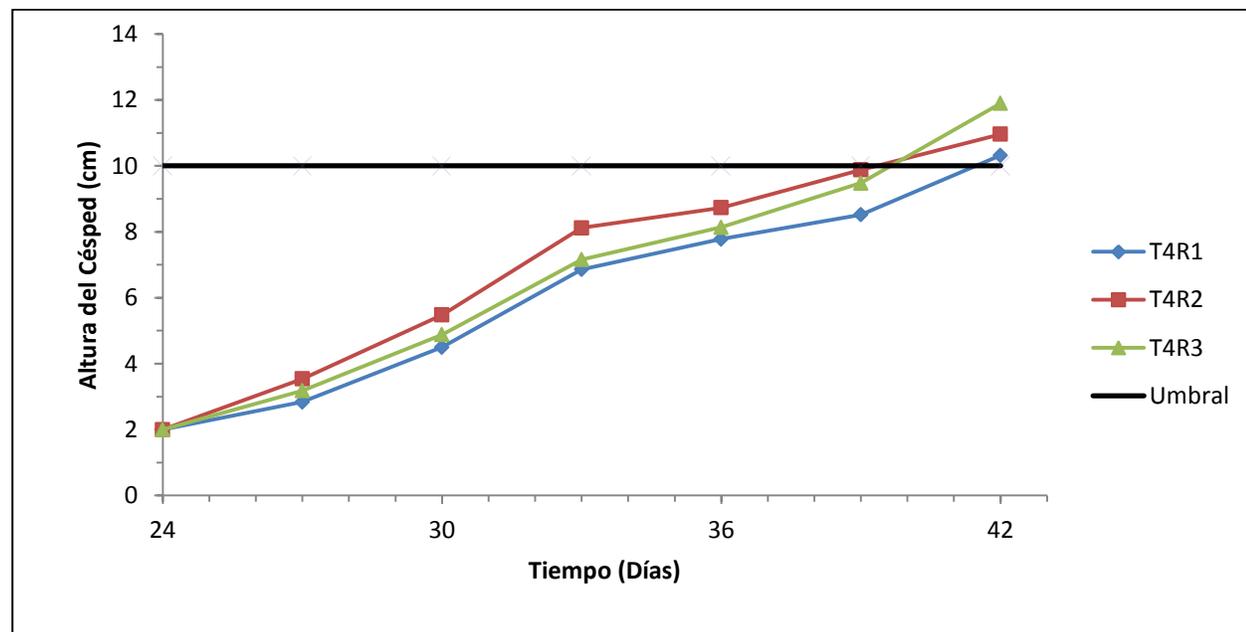
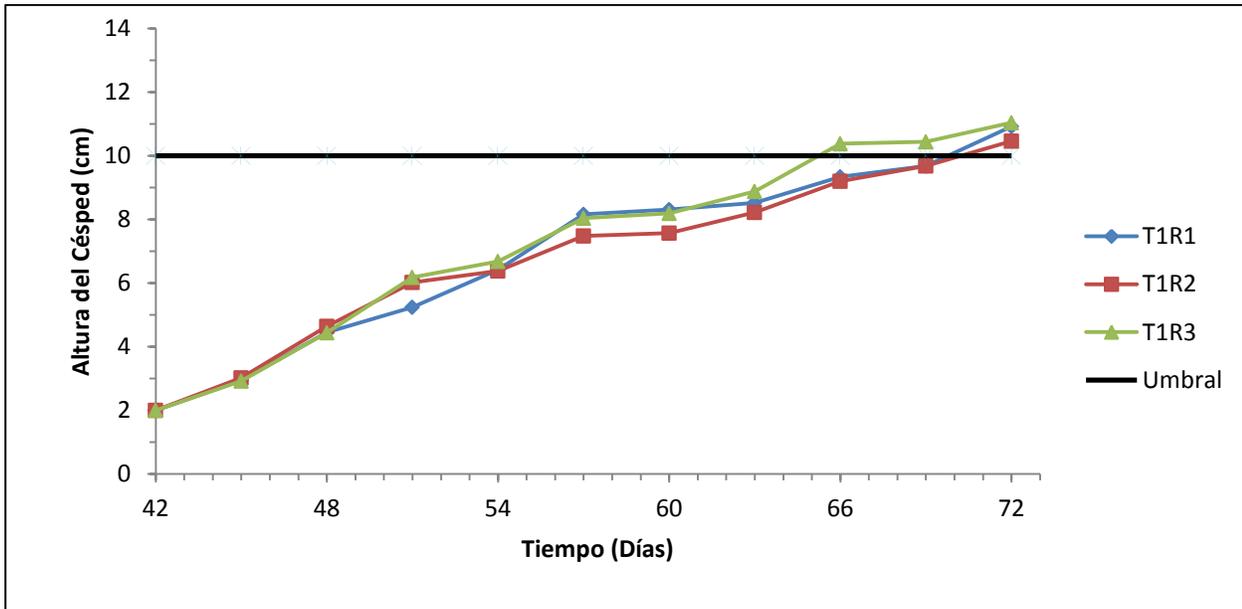


Figura D.8. Variabilidad de las replicas del T3.

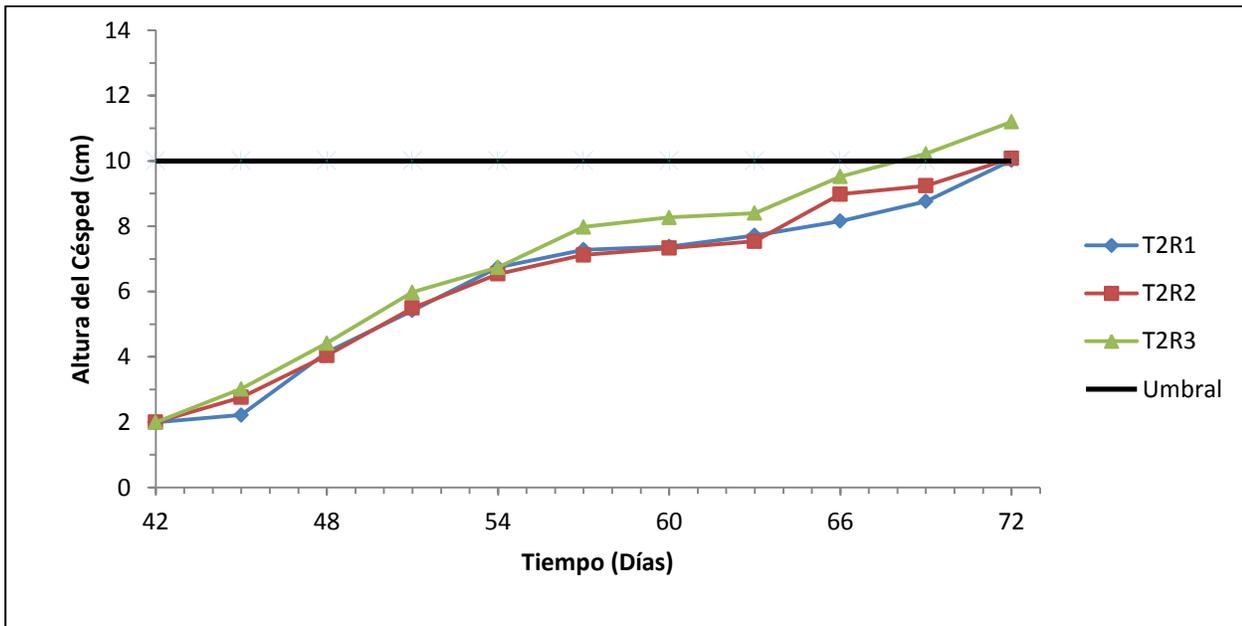
**D.3. Alturas de las réplicas de los tratamientos en el tiempo, entre el segundo y tercer corte.**

D.3.1. Alturas de las réplicas tratamiento 1 (Arena Biobío)



**Figura D.9. Variabilidad de las replicas del T1.**

D.3.2. Alturas de las réplicas tratamiento 2 (Batolito Costero, Penco)



**Figura D.10. Variabilidad de las replicas del T2.**

D.3.3. Alturas de las réplicas tratamiento 3 (Batolito Costero, UBB)

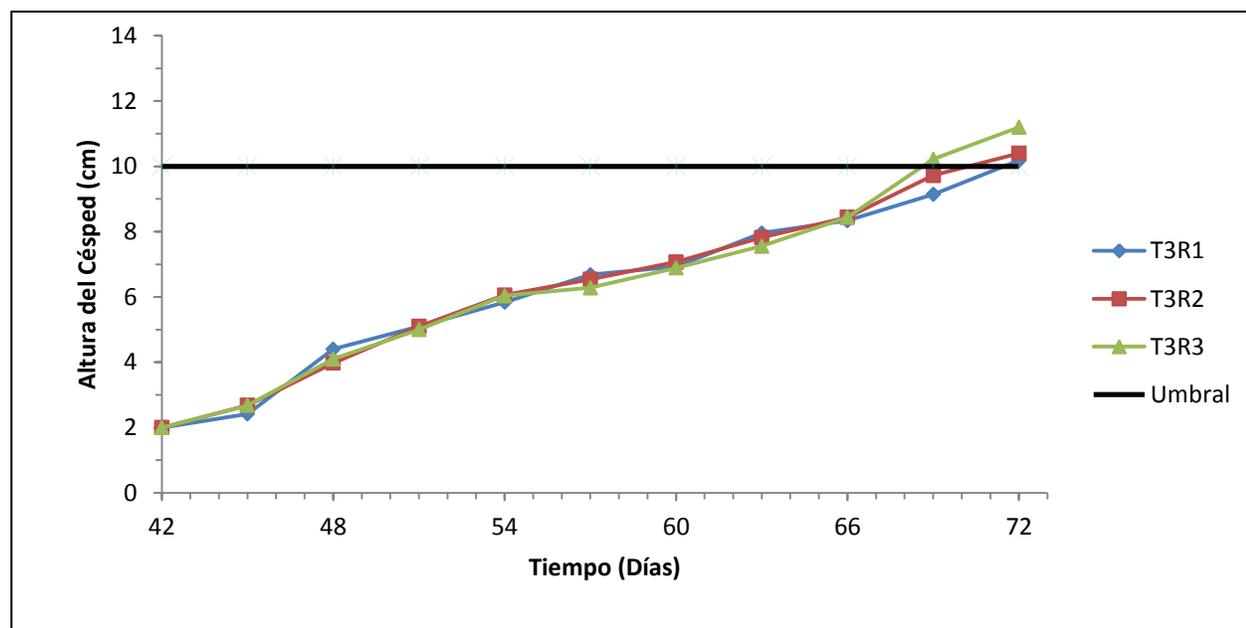


Figura D.11. Variabilidad de las réplicas del T3.

D.3.4. Alturas de las réplicas tratamiento 4 (Tierra de Hoja)

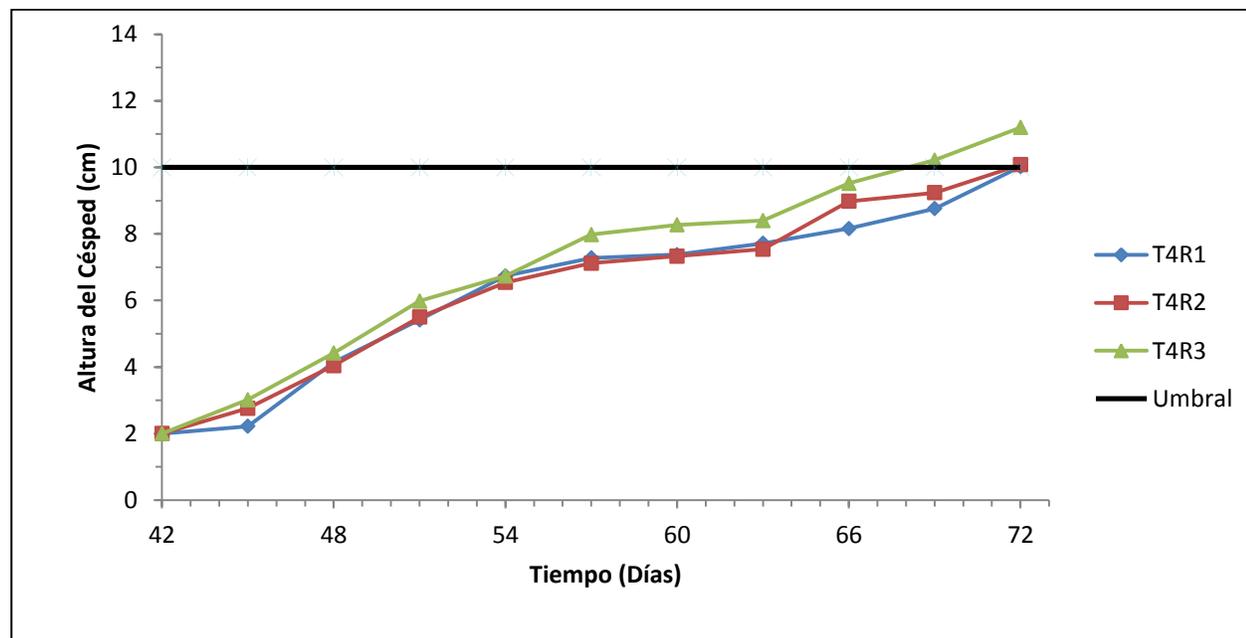


Figura D.12. Variabilidad de las réplicas del T3.

## ANEXO E: Métodos Estadísticos

### E.1. Normalidad

Antes de realizar el ANOVA es necesario probar si existe normalidad en los datos medidos para cada corte, y se utilizó el Test de Ryan-Joiner para verificar la normalidad.

El Test de Ryan-Joiner evalúa la normalidad calculando la correlación entre sus datos los valores normales de sus datos. Si el coeficiente de correlación está cerca de 1, o si bien el p-valor es mayor a 0,05, se considera que los datos son normales.

Formulas:

$$R_j = \frac{\sum Y_i * b_i}{\sqrt{S(n-1) \sum b_i^2}}$$

$$b_i = \frac{i - 0,375}{-0,25}$$

Dónde:

- $R_j$ : Coeficiente de Correlación
- $Y_i$ : Observaciones ordenadas
- $b_i$ : Puntuaciones normales de las observaciones ordenadas
- S: Varianza de la muestra

E.1.1. Resultados de normalidad para cada corte obtenidos de Minitab 16

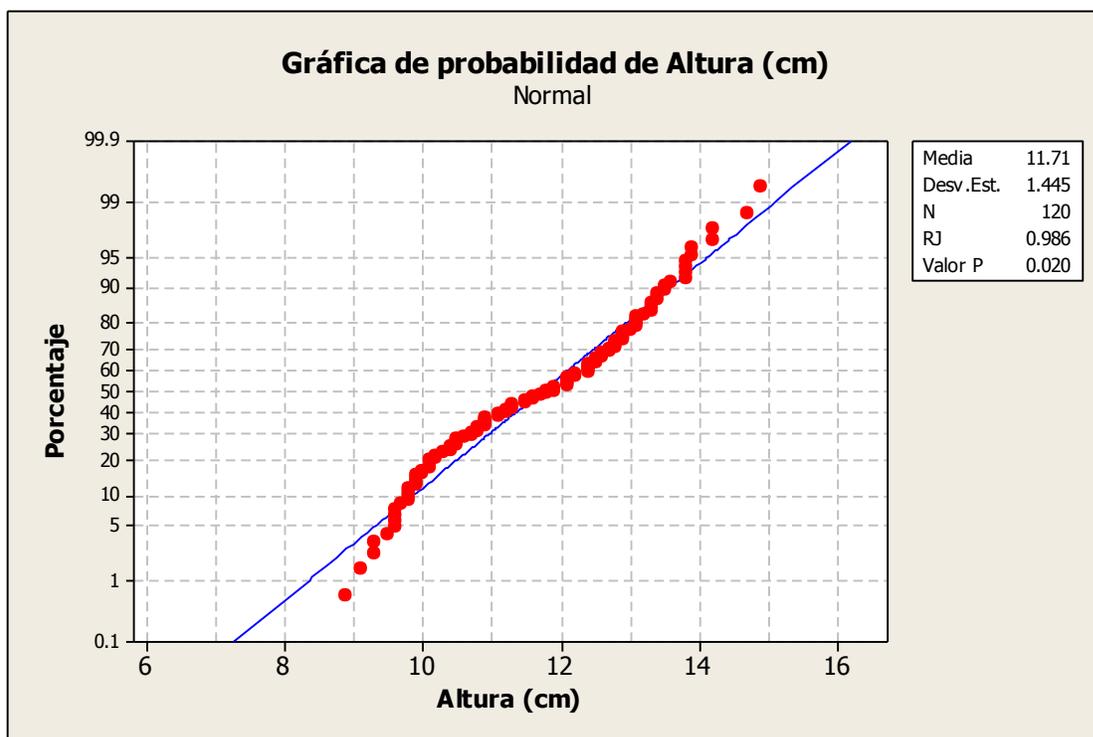


Figura E.1. Grafica de probabilidad de altura para el primer corte.

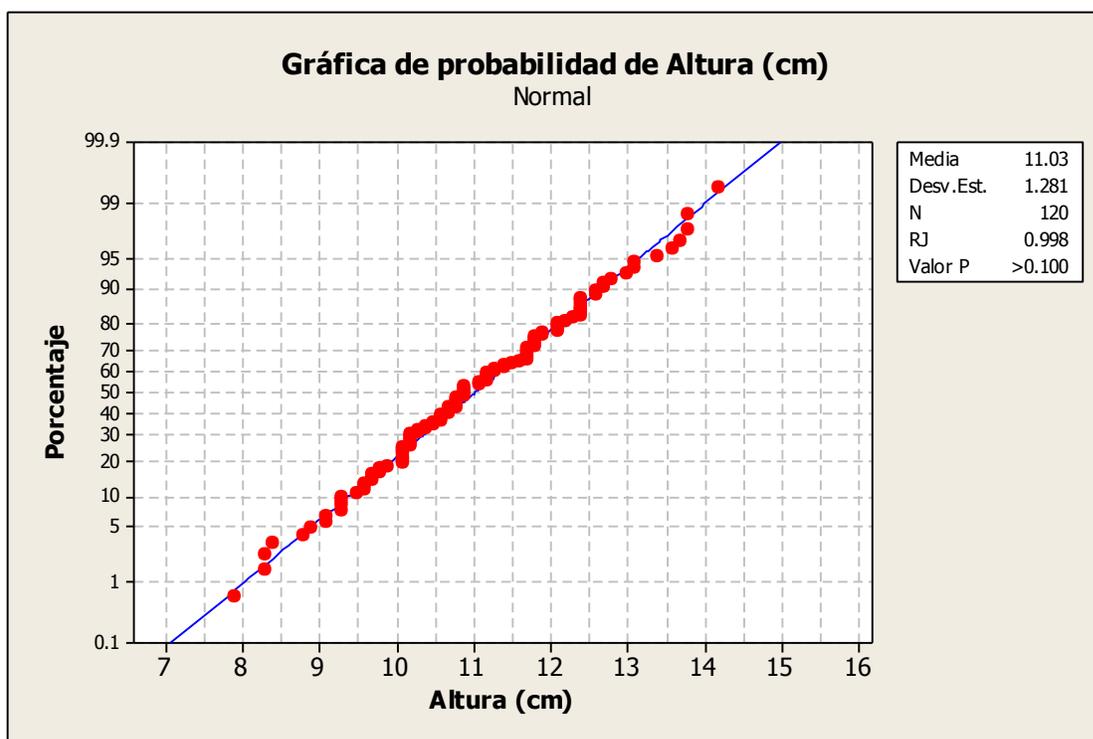
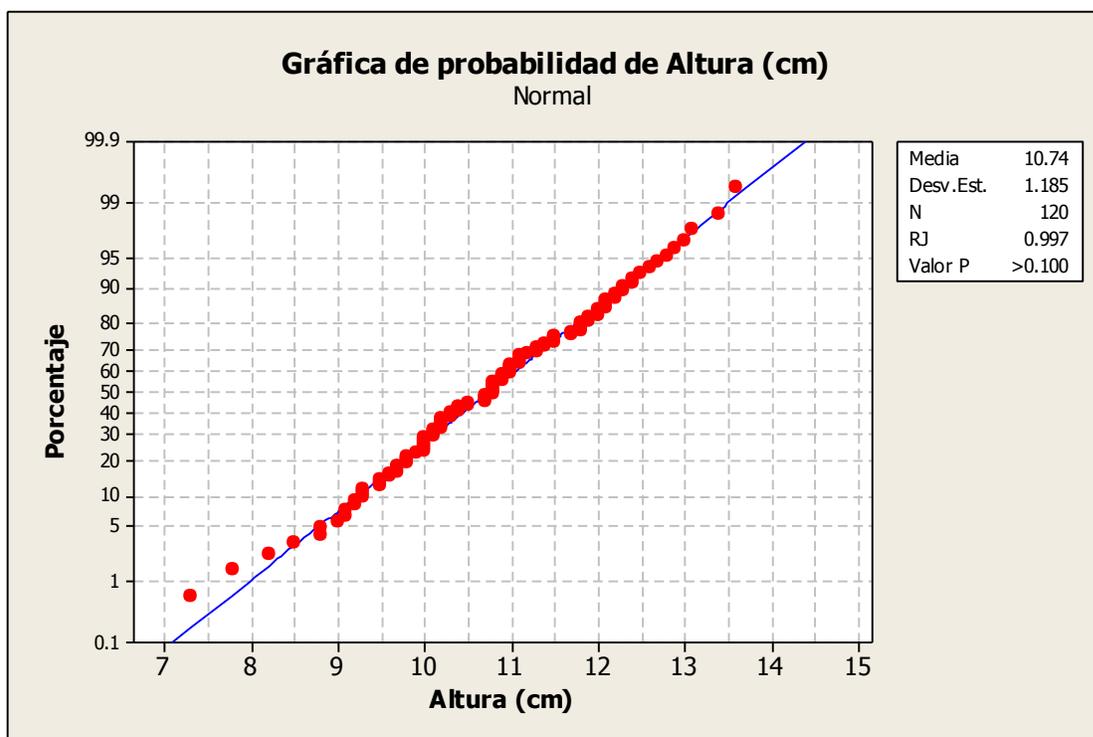


Figura E.2. Grafica de probabilidad de altura para el segundo corte.



**Figura E.3. Grafica de probabilidad de altura para el tercer corte.**

### **E.2. Análisis exploratorio de datos**

Este análisis permite analizar el comportamiento y tendencias de las variables en estudio. De ellas se obtienen las medidas de tendencia central y de dispersión, las que ayudan a observar el comportamiento distribucional de las variables. Con la aplicación de este análisis se podrá observar de forma descriptiva el crecimiento promedio de la altura del césped en el tiempo.

### **E.3. Diseño de Experimento Completamente Aleatorio**

El ANOVA es una técnica balanceada y que permite estudiar si existe una relación entre el valor medio de la variable respuesta (altura del césped) y una variable cualitativa o factor (tratamiento). Con la aplicación de esta técnica se determinará si existen diferencias significativas entre la variable respuesta media de los distintos tratamientos. Este diseño utiliza la Ec. (1) del modelo estadístico lineal.

## Modelo Estadístico Lineal

$$y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} \quad \text{para } i = 1, \dots, T \text{ y } j = 1, \dots, n_i \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde:

- $y_{ij}$ : j-ésima observación de la variable respuesta (altura del césped), en el i-ésimo tratamiento ( $cm$ ).
- $\mu_i$ : i-ésima media del tratamiento.
- $\varepsilon_{ij}$ : Errores. Variables independientes con distribución  $N(0, \sigma^2)$ .
- $T$ : Número de tratamientos.
- $n_i$ : Número de observaciones de la respuesta para el nivel  $i$  del factor.

Luego es necesaria la comprobación de las hipótesis que plantea el ANOVA:

i) Hipótesis Nula:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$$

Considera que todas las medidas son iguales, por lo que el suelo no influye en el crecimiento del césped.

ii) Hipótesis Alternativa:

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j \text{ para } i \neq j$$

Considera que las medidas difieren en al menos dos de los niveles y que el suelo influye en el crecimiento del césped.

Una vez aplicado el ANOVA, para cuantificar y clasificar el orden de las diferencias de los tratamientos se aplica el Test de Tukey.

## Test de Tukey

Es un test de comparaciones múltiples que permite saber cuál de los tratamientos tiene mayor y menor crecimiento. Para esto se utiliza la Ec. (1) con el fin de representar el Modelo de los Efectos del Tratamiento, el cual se expresa en la ecuación Ec. (2):

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

- $\mu$ : Media global.  $\mu_i = \mu + \tau_i$
- $\tau_i$ : Efecto del tratamiento  $i$ -ésimo, que debe cumplir el supuesto de:  $\sum_1^5 \tau_i = 0$

Tukey considera las siguientes hipótesis:

i) Hipótesis Nula:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = \tau_5 = 0$$

Considera que los efectos de los tratamientos son cero y con ello todas las medias son iguales. Esto es, que el factor no influye en el crecimiento del césped.

ii) Hipótesis Alternativa:

$$H_1: \tau_i \neq 0 \quad \text{para al menos una } i$$

Considera que al menos uno de los efectos de los tratamientos es diferente de cero, por lo tanto el factor influye en el crecimiento del césped.

Si es rechazada la hipótesis nula, es necesario determinar la presencia de diferencias significativas entre las medias de los tratamientos. Para ello se ordenan de mayor a menor los promedios de los efectos de los tratamientos. Para así determinar el estadístico  $q$  utilizando la Ec. (3).

$$q = \frac{\hat{t}_{mayor} - \hat{t}_{menor}}{\sqrt{\frac{CM_{\varepsilon}}{n_i}}} \quad \text{Ec. (3)}$$

Dónde:

- $(\hat{t}_{mayor} - \hat{t}_{menor})$ : Diferencia de los promedios.
- $CM_{\varepsilon}$ : Cuadrado medio del error.
- $n_i$ : Número de datos dentro de cada nivel.

El valor resultante será comparado con la diferencia mínima necesaria o diferencia honestamente significativa ( $DHS$ ), calculado con el valor del rango studentizado ( $q_{tabla}$ ), el  $CM_{\varepsilon}$  y el  $n_i$ , como se muestra en la Ec. (4).

$$DHS = q_{tabla} \cdot \sqrt{\frac{CM_{\varepsilon}}{n_i}} \quad \text{Ec. (4)}$$

El valor de  $q_{tabla}$  está determinado por el nivel de significancia ( $\alpha$ ), los grados de libertad del error ( $g.l$ ) y  $n_i$ , el cual se encuentra en la tabla VII del apéndice Diseño de Experimento (Kuelh, 2000).

Una vez determinado el valor de  $q$  y el de  $DHS$  se dice que existen diferencias significativas entre los dos niveles comparados cuando:

$$q > DHS$$

#### E.4. No Paramétricos

Si al realizar la experiencia, los datos medidos no siguen una distribución de probabilidades normal. En estos casos, no se cumpliría con los supuestos para trabajar con pruebas de hipótesis Paramétricas. Entonces se trabaja con las pruebas no Paramétricas (llamadas también de libre distribución).

Una de las pruebas para analizar datos no paramétricos es la desarrollada por Kruskal Wallis, la cual se basa en las siguientes hipótesis:

- iii) Hipótesis Nula: La mediana de las k tratamientos considerados son iguales
  
- iv) Hipótesis Alternativa: Al menos una de los tratamientos tiene mediana distinta a las otras.

Este test lo que hace es calcular el estadístico  $H$  a partir de la fórmula:

$$H = \frac{12}{N(N-1)} \sum_{i=1}^k \left( \frac{R_i^2}{n_i} \right) - 3(N+1) \quad \text{Ec. (5)}$$

Dónde:

- $N$ : es el tamaño total de la muestra.
- $n_i$ : es el tamaño de la muestra de cada grupo.

En el caso de que hubiera ligaduras (valores repetidos) la fórmula se corrige dividiendo la anterior:

$$H = \frac{\frac{12}{N(N-1)} \sum_{i=1}^k \left( \frac{R_i^2}{n_i} \right) - 3(N+1)}{1 - \frac{\sum_{i=1}^g (t_i^3 - t_i)}{N^3 - N}} \quad \text{Ec. (6)}$$

Dónde:

- $g$ : Denota el número de grupos de ligaduras
- $t_i$ : El total de números de orden ligados en el  $i$ -ésimo grupo.

Si el tamaño muestral es mayor a 5, el estadístico  $H$  sigue una distribución  $\chi^2$  con  $k-1$  grados de libertad.

#### E.4.1. Resultados de Kruskal Wallis obtenidos de Minitab 16 para el primer corte

Debido a que los datos medidos antes del primer corte no se rigen por una distribución de probabilidades normal, se aplicó la prueba de Kruskal Wallis obteniendo los resultados que se muestran en la Figura E.4.

<b>Prueba de Kruskal-Wallis: Altura (cm) vs. Tratamiento</b>				
Prueba de Kruskal-Wallis en Altura (cm)				
Tratamiento	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z
1	30	11.00	46.0	-2.64
2	30	11.90	64.9	0.80
3	30	12.30	72.6	2.19
4	30	11.90	58.5	-0.36
General	120		60.5	
H = 9.40 GL = 3 P = 0.024				
H = 9.41 GL = 3 P = 0.024 (ajustados para los vínculos)				

**Figura E.4. Prueba de Kruskal-Wallis para el corte 1.**

## ANEXO F: Registro Fotográfico

### F.1. Confección de palmetas



**Figura F.1. Palmetas antes de agregar el biosólido.**



**Figura F.2. Palmetas con el biosólido agregado.**

**F.2. Palmetas antes del primer corte**



**Figura F.3. Palmetas T1R1-T1R2-T1R3.**



**Figura F.4. Palmetas T2R1-T2R2-T2R3.**



**Figura F.5. Palmetas T3R1-T3R2-T3R3.**



**Figura F.6. Palmetas T4R1-T4R2-T4R3.**



**Figura F.7. Palmetas T'2-T'3-T'4.**

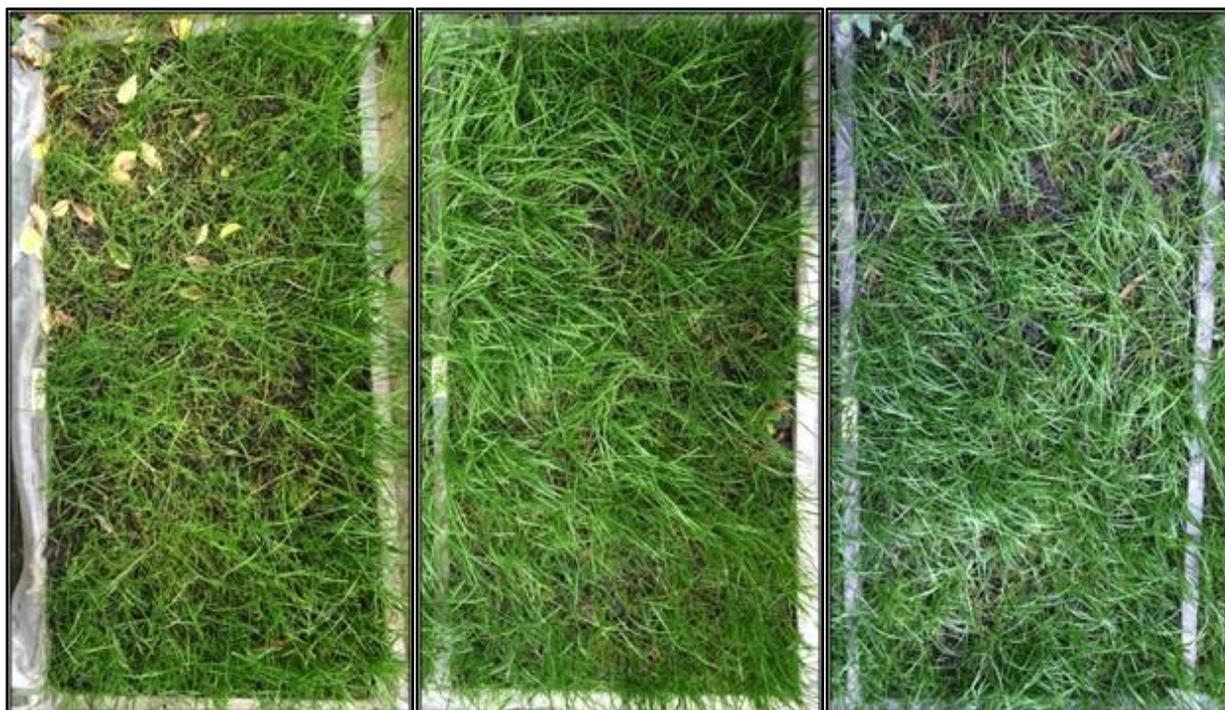
**F.3. Palmetas antes del segundo corte**



**Figura F.8. Palmetas T1R1-T1R2-T1R3.**



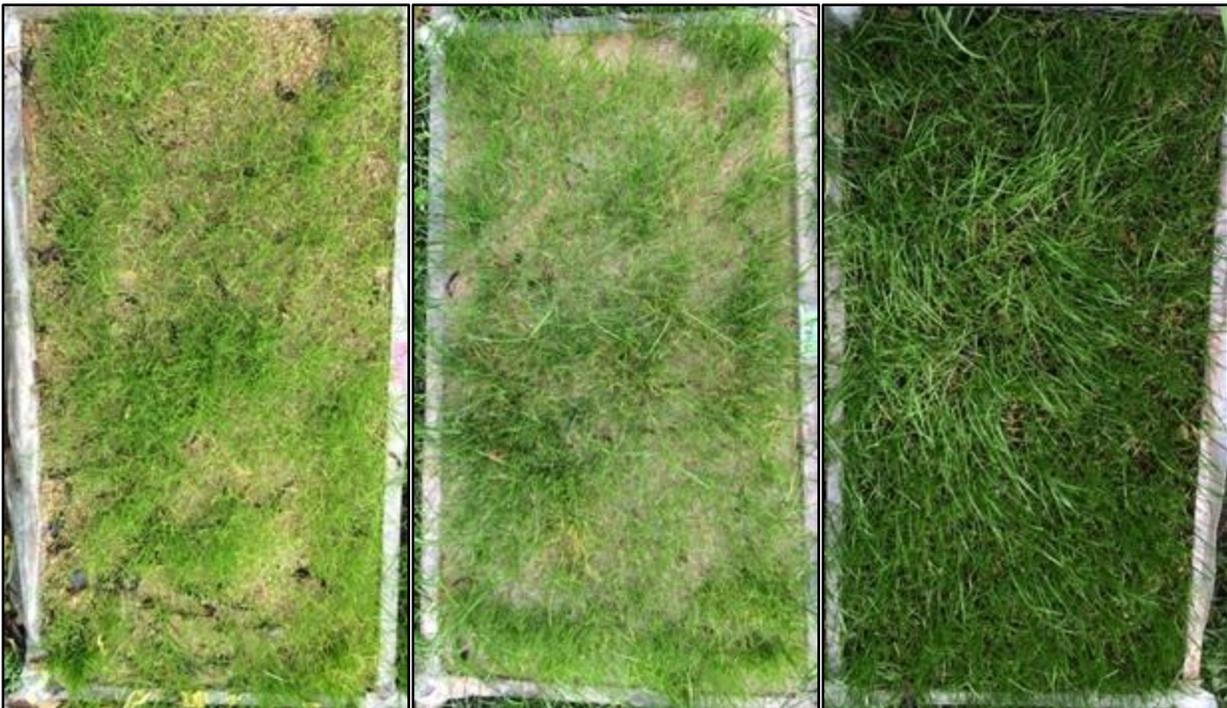
**Figura F.9. Palmetas T2R1-T2R2-T2R3.**



**Figura F.10. Palmetas T3R1-T3R2-T3R3.**



**Figura F.11. Palmetas T4R1-T4R2-T4R3.**



**Figura F.12. Palmetas T'2-T'3-T'4.**

**F.4. Palmetas antes del tercer corte**



**Figura F.13. Palmetas T1R1-T1R2-T1R3.**



**Figura F.14. Palmetas T2R1-T2R2-T2R3.**



**Figura F.15. Palmetas T3R1-T3R2-T3R3.**



**Figura F.16. Palmetas T4R1-T4R2-T4R3.**



**Figura F.17. Palmetas T'2-T'3-T'4.**

**F.5. Traslado e instalación**



**Figura F.18. Palmetas T4R1-T4R2-T4R3 enrolladas.**



**Figura F.19. Palmetas T'2-T'3-T'4 enrolladas.**



**Figura F.20. Palmetas que no lograron ser enrolladas.**



**Figura F.21. Palmetas instaladas.**

**F.6. Otras**



**Figura F.22. Palmetas protegidas de la lluvia.**



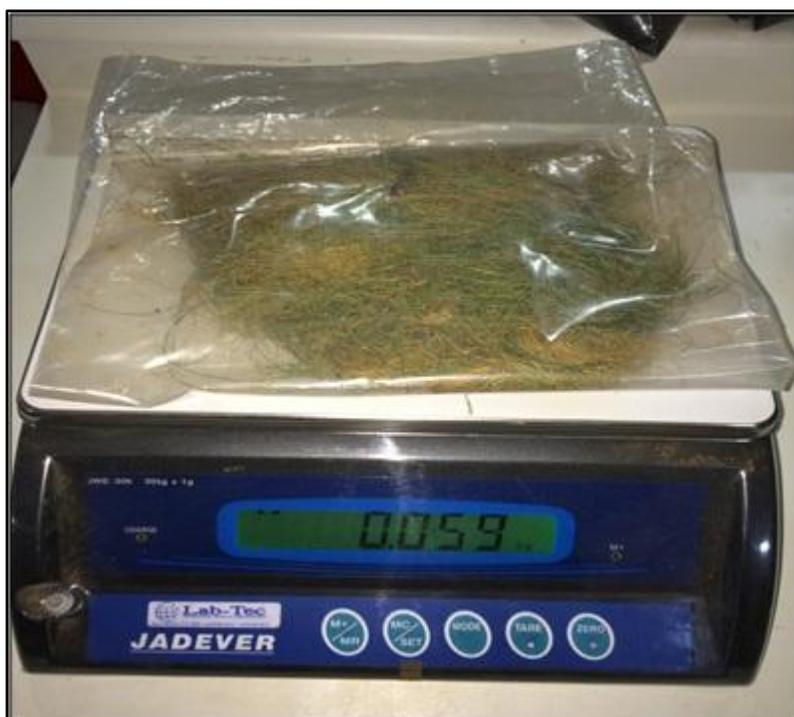
**Figura F.23. Palmetas una vez realizado el tercer corte.**



**Figura F.24. Biomasa en proceso de secado.**



**Figura F.25. Biomasa seca.**



**Figura F.26. Pesaje de biomasa .**