



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

**Efecto del sulfato de amonio, ácido acetilsalicílico y biosólidos en parámetros
edáficos, fisiológicos, bioquímicos y productivos en *Stipa caudata* en una
condición de escasez hídrica**

Tesis para optar al grado de Doctor en Recursos y Tecnologías Agrícolas

Ing. Agr. Mg. E. Cs; Mg. Sc.
JULIO ANDRÉS MOLINA KHOUZAM

Directores de tesis
Dra. Claudia Santibáñez Venero
Dr. Josep Llinares Palacios
Dra. Mónica Boscaiu Neagu

VALÈNCIA – ESPAÑA
FEBRERO 2024

DEDICATORIA

A Dios

A mis padres

A mis abuelos

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Mónica Boscaiu por confiar en mí desde el primer día para realizar mi doctorado. Me abrió las puertas de su laboratorio confiando en mi propuesta de investigación, cuando todos me las cerraron. Pese a la distancia geográfica, idiomática y cultural, Mónica me acogió siempre más que como un alumno, sino como un hijo. Estaré el resto de mi vida agradecido, no he encontrado alguien con tanta calidad humana en ninguna otra Universidad en la que he participado.

A la Dra. Claudia Santibáñez, por su apoyo incondicional en la realización de este doctorado y mucho más. Con su ejemplo logré compatibilizar mi trabajo de académico, junto con la realización de mis estudios. Claudia ha sido un ejemplo permanente de liderazgo y ética a la hora de enderezar mi reciente vida profesional e investigadora.

Al Dr. Josep Llinares, por acogerme en Gandía, abrirme las puertas de su hogar, presentarme a su padre y hacerme sentir como un hijo. Josep es para mí el mejor profesional que he conocido en cuanto a sus conocimientos, no había materia en su área que no dominara, y fue capaz de bajar intelectualmente siempre, con paciencia, para enseñarme con cariño, lo cual es impensado y casi imposible en estas ciencias. He conocido una persona con un nivel profesional y humano como pocas en mi vida, quien me ha apoyado con su ejemplo en lo personal también.

A mis padres y abuelos. Sin ellos no habría llegado tan lejos. Mis padres, pese a las desdichadas situaciones que han enfrentado en sus vidas, me han transmitido un ejemplo vivo de esfuerzo y perseverancia para poder llevar un Doctorado junto con mi trabajo, bajo condiciones de salud adversas.

A Marjorie Millanao y Fernando Silva, quienes con su apoyo profesional y desinteresado me tendieron una mano en los peores momentos personales experimentados durante estos años. Estaré en deuda con ustedes toda mi vida.

RESUMEN

La escasez hídrica afecta gran parte Chile desde hace aproximadamente 15 años. *Stipa caudata* es una especie nativa adaptada a condiciones de aridez. Por su parte, el ácido acetyl salicílico y sulfato de amonio alivian el estrés hídrico en plantas, mientras que los biosólidos mejoran las características fisicoquímicas del suelo. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del ácido acetilsalicílico (AAS), sulfato de amonio (SA) y biosólidos (BS) en parámetros edáficos, fisiológicos, bioquímicos y productivos en *Stipa caudata* tratada bajo una condición de escasez hídrica. Se realizaron cuatro experimentos, dos durante la temporada 2018-2019 y dos durante la temporada 2019-2020. Se emplearon diseños experimentales de Parcelas Divididas en Bloques al Azar (PDBA). En la temporada 2018-2019, en el primer experimento se determinó el efecto de AAS y SA en macetas de 10 L al aire libre durante el mes de septiembre, como ensayo preliminar, instaurando un segundo y similar experimento en noviembre. En la temporada 2019-2020, se determinó el efecto de ácido acetyl salicílico y de biosólidos provenientes de plantas de aguas residuales en macetas de 1 L en invernadero durante julio. En los tres experimentos se evaluaron los tratamientos en condiciones de riego y escases hídrica. Se evaluaron parámetros edáficos como: pH, CE, contenido volumétrico del agua en el suelo contenido de carbonatos y materia orgánica; referentes a la producción de biomasa: altura y grosor de tallos, número de hojas, peso fresco y seco de la parte aérea y radical. Por otra parte, se evaluaron parámetros vinculados a la resistencia a la escases hídrica, como lo es, a nivel fisiológico, la producción de clorofilas, mientras que a nivel bioquímico la actividad de enzimas antioxidantes como la catalasa (CAT), superóxido dismutasa (SOD), ascorbato peroxidasa (APX) y glutatión peroxidasa (GR) junto a antioxidantes no enzimáticos como fenoles totales (TPC), flavonoides totales (TF) y osmoprotectantes como prolina (Pro) y contenido de iones en el material vegetal. La escasez hídrica aumentó la actividad APX y malondialdehído (MDA), mientras que la presencia de AAS o SA incrementó el contenido de prolina, flavonoides y clorofilas. Los resultados sugieren que la presencia de AAS o SA podrían ser una estrategia efectiva para aliviar los efectos negativos de la escasez hídrica en el crecimiento de *Stipa caudata*.

RESUM

L'escassetat hídrica afecta gran part Xile des de fa aproximadament 15 anys. *Stipa caudata* és una espècie nativa adaptada a condicions d'aridesa. Per part seua, l'àcid acetil salicílic i sulfat d'amoni alleugen l'estrés hídric en plantes, mentre que els biosólidos milloren les característiques físicoquímiques del sòl. L'objectiu d'este treball va ser avaluar l'efecte de l'àcid acetilsalicílic (AAS), sulfat d'amoni (SA) i biosólidos (BS) en paràmetres edàfics, fisiològics, bioquímics i productius en *Stipa caudata* tractada sota una condició d'escassetat hídrica. Es van realitzar quatre experiments, dos durant la temporada 2018-2019 i dos durant la temporada 2019-2020. Es van emprar dissenys experimentals de Parcel·les Dividides en Blocs a l'Atzar (PDBA). En la temporada 2018-2019, en el primer experiment es va determinar l'efecte de AAS i SA en tests de 10 L a l'aire lliure durant el mes de setembre, com a assaig preliminar, instaurant un segon i similar experiment al novembre. En la temporada 2019-2020, es va determinar l'efecte d'àcid acetil salicílic i de biosólidos provinents de plantes d'aigües residuals en tests d'1 L en hivernacle durant juliol. En els tres experiments es van avaluar els tractaments en condicions de reg i escases hídrica. Es van avaluar paràmetres edàfics com: pH, CE, contingut volumètric de l'aigua en el sòl contingut de carbonats i matèria orgànica; referents a la producció de biomassa: altura i gruix de tiges, nombre de fulles, pes fresc i sec de la part aèria i radical. D'altra banda, es van avaluar paràmetres vinculats a la resistència a la escases hídrica, com ho és, a nivell fisiològic, la producció de clorofil·les, mentre que a nivell bioquímic l'activitat d'enzims antioxidants com la catalasa (CAT), superóxido dismutasa (SOD), ascorbato peroxidasa (APX) i glutatió peroxidasa (GR) al costat d'antioxidants no enzimàtics com a fenols totals (TPC), flavonoides totals (TF) i osmoprotectants com prolina (Pro) i contingut d'ions en el material vegetal. L'escassetat hídrica va augmentar l'activitat APX i malondialdehído (MDA), mentre que la presència de AAS o SA va incrementar el contingut de prolina, flavonoides i clorofil·les. Els resultats suggerixen que la presència de AAS o SA podrien ser una estratègia efectiva per a alleujar els efectes negatius de l'escassetat hídrica en el creixement de *Stipa caudata*.

ABSTRACT

Water scarcity has affected a large part of Chile for about 15 years. *Stipa caudata* is a native species adapted to arid conditions. Acetylsalicylic acid and ammonium sulphate alleviate water stress in plants, while biosolids improve the physicochemical characteristics of the soil. The aim of this work was to evaluate the effect of acetylsalicylic acid (AAS), ammonium sulphate (SA) and biosolids (BS) on edaphic, physiological, biochemical and productive parameters in *Stipa caudata* treated under water stress conditions. Four experiments were conducted, two during the 2018-2019 season and two during the 2019-2020 season. Experimental Randomised Block Divided Plot (RBDP) designs were used. In the 2018-2019 season, the first experiment determined the effect of AAS and SA in 10 L pots outdoors during the month of September, as a preliminary trial, with a second and similar experiment set up in November. In the 2019-2020 season, the effect of acetylsalicylic acid and ton-ha⁻¹ of sewage sludge was evaluated in 1 L pots in a greenhouse during July. In all three experiments, treatments were evaluated under irrigated and water deficit conditions. Soil parameters such as pH, EC, volumetric water content in the soil, carbonate and organic matter content, biomass production: height and thickness of stems, number of leaves, fresh and dry weight of the aerial and root parts were evaluated. On the other hand, parameters linked to resistance to water scarcity were evaluated, such as, at the physiological level, chlorophyll production, while at the biochemical level the activity of antioxidant enzymes such as catalase (CAT), superoxide dismutase (SOD), superoxide dismutase (SOD), superoxide dismutase (SOD), superoxide dismutase (SOD), ascorbate peroxidase (APX) and glutathione peroxidase (GR) along with non-enzymatic antioxidants such as total phenols (TPC), total flavonoids (TF) and osmoprotectants such as proline (Pro) and ion content in the plant material. Water scarcity increased APX and malondialdehyde (MDA) activity, while the presence of AAS or SA increased proline, flavonoids and chlorophyll content. The results suggest that the presence of AAS or SA could be an effective strategy to alleviate the negative effects of water scarcity on *Stipa caudata* growth.

ÍNDICES

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Distribución geográfica e importancia ecológica y económica de la especie.....	11
1.3. Características climáticas de Sudamérica y Chile	12
1.3.1. Características climáticas de Sudamérica.....	12
1.3.2. Características climáticas de Chile.....	13
1.3.3. Características climáticas de la Provincia de Aconcagua.....	14
1.3.4. Características climáticas de la Provincia de Santiago.....	15
1.3.5. Características climáticas de la Provincia de San Felipe.....	16
1.3.6. Características climáticas de la Región Metropolitana	16
1.3.7. Efecto del calentamiento global sobre el clima de Chile	17
1.4. Características edáficas relacionadas con el estudio.....	18
1.4.1. Características físicas	18
1.4.2. Características físico-químicas y químicas	20
1.4.3. Características biológicas	22
1.4.4. Agua en el suelo y relaciones hídricas	23
1.4.5. Sistema de clasificación de capacidad de uso de los suelos y taxonomía	24
1.5. Elementos químicos y compuestos bioquímicos analizados en el estudio	28
1.5.1. Nitrógeno.....	28
1.5.2. Potasio	28
1.5.3. Calcio	28
1.5.4. Osmoprotectores.....	29
1.5.5. Estrategias antioxidantes no-enzimáticas.....	30
1.5.6. Estrategias antioxidantes enzimáticas	31
1.5.7. La asimilación del N	33

1.5.8. Ácido Salicílico y su efecto sobre las plantas	35
1.5.9. Los biosólidos y su uso agronómico	37
1.6. El estrés hídrico en plantas	39
1.6.1.Principales efectos	39
1.6.2.Efectos en la acumulación de biomasa	39
1.6.3.Estrategias para el control interno del contenido hídrico	40
1.6.4.Evidencia de efectos en plantas	40
2. OBJETIVOS DEL TRABAJO.....	41
2.1. Objetivo general	42
2.2. Objetivos específicos	42
3. MATERIALES Y MÉTODOS	43
3.1. Periodo 2018-2019	44
3.1.1. Ubicación del estudio y condiciones experimentales.....	44
3.1.2. Ensayo preliminar	44
3.1.3. Ensayo final.....	45
3.2. Período 2019-2020	47
3.2.1. Ubicación del estudio y condiciones experimentales.....	47
3.2.2. Ensayo preliminar	49
3.2.3. Ensayo final.....	49
3.3. Evaluaciones de variables climáticas.....	50
3.4. Análisis edáficos.....	52
3.4.1. pH del suelo.....	52
3.4.2. Conductividad eléctrica del suelo.....	52
3.5. Análisis de los parámetros de crecimiento de las plantas	52
3.5.1. Crecimiento de brotes.....	52
3.5.2. Grosor de hojas.....	53
3.5.3. Número de espigas	53

3.5.4. Biomasa fresca y seca	53
3.6. Análisis de variables fisiológicas y bioquímicas	53
3.6.1. Temperatura de la cobertura vegetal	53
3.6.2. Concentración de clorofila total.....	53
3.6.3. Determinación del contenido de iones en el material vegetal	54
3.6.4. Evaluación del sistema oxidativo y sistemas antioxidantes	54
3.7. Análisis estadístico de los datos	57
4. RESULTADOS	58
4.1. Análisis climático histórico según localidad	59
4.1.1. Rinconada de Los Andes.....	59
4.1.2. Análisis Ombrotérmico y clasificación climática UNESCO-FAO.	61
4.1.3. La Platina.....	62
4.1.4. Análisis Ombrotérmico y clasificación climática UNESCO-FAO.	68
4.2. Temporada 2018-2019.....	68
4.2.1. Ensayo preliminar	68
4.2.1.1. Variables edáficas	68
4.2.1.3. Variables productivas y fisiológicas	70
4.2.2. Ensayo final.....	73
4.2.2.1. Variables productivas y fisiológicas	73
4.2.2.2. Análisis de componentes principales entre las variables respuesta del estudio	83
4.3. Temporada 2019-2020.....	86
4.3.1. Ensayo preliminar	86
4.3.1.1. Variables edáficas	86
4.3.1.2. Variables productivas y fisiológicas	87
4.3.2. Ensayo final.....	90
4.3.2.1. Variables edáficas	90
4.3.2.2. Variables productivas y fisiológicas	93
5. DISCUSIÓN	108
5.1. Parámetros climáticos.....	109
5.1.1. Rinconada de Los Andes.....	109
5.1.2. La Platina.....	109

5.2. Parámetros edáficos, productivos y fisiológicos.....	110
5.2.1. Ensayo final temporada 2018-2019.....	110
5.2.2. Temporada final 2019-2020	116
6. CONCLUSIONES	123
6.1. Temporada 2018-2019.....	124
6.2. Temporada 2019-2020.....	125
7. BIBLIOGRAFÍA CITADA.....	127
ANEXO	162
Registro de progresión semanal plantas Irrigated ensayo final temporada 2019-2020.....	171
Registro de progresión semanal plantas WR ensayo final temporada 2019-2020	172

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Mapa de los tipos climáticos de Koppen-Geiger para Sudamérica (adaptado por Carver et al., 2002)	13
Figura 2. Triangulo textural para la determinación de la textura de un suelo. (Honorato, 2000).19	
Figura 3. Esquema del ciclo GS-GOGAT. (Capone et al., 2008).....	35
Figura 4. Temperaturas mínimas, máximas y medias por año, desde la temporada 2010 hasta 2018.	61
Figura 5. Precipitación promedio mensual desde la temporada 2010 hasta la 2018.	61
Figura 6. Precipitación promedio mensual desde la temporada 2010 hasta la 2018.	62
Figura 7. Temperaturas mínimas, máximas y medias por año, desde la temporada 2013 hasta 2021.	64
Figura 8. Precipitación acumulada (mm) por mes y temporada, desde 2013 hasta 2021.....	65
Figura 9. Precipitación promedio por mes desde la temporada 2013 hasta la 2021.....	66
Figura 10. Humedad relativa (%) promedio del ambiente por mes para cada temporada desde 2010 hasta 2018.	67
Figura 11. Diagrama Ombrotérmico desde los períodos 2013 hasta 2021.....	68
Figura 12. pH acumulado de la solución suelo en <i>Stipa caudata</i> medido durante el experimento.	69
Figura 13. CE acumulada de la solución suelo en <i>Stipa caudata</i> medido durante el experimento.	70
Figura 14. Largo acumulado de tallos de <i>Stipa caudata</i> medido durante el experimento.....	71
Figura 15. Número de espigas por planta de <i>Stipa caudata</i> medido al final del experimento. ...	71
Figura 16. Temperatura acumulada de canopia en <i>Stipa caudata</i> medida durante el experimento.	72
Figura 17. Interacción entre Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para el largo acumulado de tallos de <i>Stipa caudata</i> medidos durante el experimento.....	73
Figura 18. Clorofila total de brotes de <i>Stipa caudata</i> medida al final del experimento.	74
Figura 19. Interacción Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para el contenido de Ca^{2+} en brotes de <i>Stipa caudata</i> medido al final del experimento.....	76

Figura 20. Interacción Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para el contenido del Total de Compuestos Fenólicos (TFC) en brotes de <i>Stipa caudata</i> medido al final del experimento.....	78
Figura 21. Total de Flavonoides (TF) en brotes de <i>Stipa caudata</i> medido al final del experimento.	78
Figura 22. Contenido de Prolina (Pro) en brotes de <i>Stipa caudata</i> medido al final del experimento.	79
Figura 23. Contenido de Malondialdehído (MDA) en brotes de <i>Stipa caudata</i> medido al final del experimento.....	80
Figura 24. Interacción Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para la actividad de Catalasa (CAT) en brotes de <i>Stipa caudata</i> medida al final del experimento.....	82
Figura 25. Actividad Ascorbato Peroxidasa (APX) en brotes de <i>Stipa caudata</i> medida al final del experimento.....	82
Figura 26. Interacción Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para la actividad de Superóxido Dismutasa (SOD) en brotes de <i>Stipa caudata</i> medida al final del experimento.	83
Figura 27. Análisis de componentes principales entre las variables respuesta del estudio.	85
Figura 28. pH de la solución suelo acumulado en <i>Stipa caudata</i> medido durante el experimento.	86
Figura 29. Conductividad eléctrica acumulada en <i>Stipa caudata</i> medidas durante el experimento.	87
Figura 30. Largo acumulado de tallos de <i>Stipa caudata</i> medidos durante el experimento, según condición hídrica.....	88
Figura 31. Largo acumulado de tallos de <i>Stipa caudata</i> durante el experimento.....	89
Figura 32. Grosor acumulado de hojas de <i>Stipa caudata</i> medidos durante el experimento.....	89
Figura 33. pH de la solución suelo acumulado en <i>Stipa caudata</i> medidos durante el experimento.	90
Figura 34. CE acumulada de la solución suelo en <i>Stipa caudata</i> medidas durante el experimento.	91
Figura 35. Conductividad eléctrica acumulada en la solución suelo de <i>Stipa caudata</i> medidos durante el experimento, según condición hídrica.	91
Figura 36. Contenido volumétrico acumulado del agua en el suelo en <i>Stipa caudata</i> durante el experimento.....	92

Figura 37. Contenido volumétrico de agua en el suelo de <i>Stipa caudata</i> , según condición hídrica.	92
Figura 38. Contenido volumétrico de agua en el suelo de <i>Stipa caudata</i> , según condición hídrica.	93
Figura 39. Largo acumulado de tallos de <i>Stipa caudata</i> durante el experimento.	94
Figura 40. Largo acumulado de tallos de <i>Stipa caudata</i> medidos durante el experimento, según condición hídrica.	94
Figura 41. Grosor acumulado de hojas de <i>Stipa caudata</i> durante el experimento, según condición hídrica.	95
Figura 42. Temperatura acumulada de canopia en <i>Stipa caudata</i> medidas durante el experimento.	95
Figura 43. Pese seco de canopia en <i>Stipa caudata</i> al final del experimento.	96
Figura 44. Peso fresco de raíces en <i>Stipa caudata</i> al final del experimento.	97
Figura 45. Peso seco de raíces en <i>Stipa caudata</i> medidos al final del experimento.	97
Figura 46. Contenido acumulado de Na^+ en brotes de <i>Stipa caudata</i> medidos al final del experimento, según condición hídrica.	99
Figura 47. Interacción entre Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para la acumulación de Na^+ en brotes de <i>Stipa caudata</i> medidos al final del experimento.	101
Figura 48. Interacción entre Tratamientos x Condición hídrica para el contenido acumulado de Cl^- en brotes de <i>Stipa caudata</i> .	102
Figura 49. Contenido total de Prolina en brotes de <i>Stipa caudata</i> medida al final del experimento.	104
Figura 50. Contenido de Malondialdehído en brotes de <i>Stipa caudata</i> al final del experimento.	104
Figura 51. Contenido de Malondialdehído en brotes de <i>Stipa caudata</i> al final del experimento.	105
Figura 52. Análisis de componentes principales entre las variables respuesta del estudio.	107

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Análisis del suelo empleado en ambos períodos.....	46
Tabla 2. Diseño experimental empleado en el ensayo final.....	47
Tabla 3. Análisis de biosólidos empleados.	48
Tabla 4. Diseño experimental empleado en el ensayo final.....	50
Tabla 5. Parámetros de clasificación climática UNESCO-FAO.....	51
Tabla 6. Promedios de precipitación media (mm), humedad relativa (%) y temperaturas mínimas, máximas y promedio (°C) de cada año para la localidad de Rinconada de Los Andes, entre las temporadas 2010 y 2018.	59
Tabla 7. Promedios de precipitación (mm), humedad relativa (%) y temperaturas mínimas, máximas y promedio (°C) de cada mes, entre las temporadas 2010 y 2018.	60
Tabla 8. Promedios de precipitación (mm), humedad relativa (%) y temperaturas mínimas, máximas y promedio (°C) de cada año, entre las temporadas 2013 y 2021.	63
Tabla 9. Promedios de precipitación (mm), humedad relativa (%) y temperaturas mínimas, máximas y promedio (°C) de cada mes, entre las temporadas 2013 y 2021.	63
Tabla 10. Contenido de iones Ca^{2+} , K^{+} , Na^{+} y Cl^{-} en brotes de <i>Stipa caudata</i> medido al final del experimento temporada 2028-2019.	75
Tabla 11. Contenido del Total de Compuestos Fenólicos (TFC), Total Flavonoides (TF), Prolina (Pro) y Malondialdehído (MDA) en brotes de <i>Stipa caudata</i> medido al final del experimento. ..	77
Tabla 12. Actividad de Enzimas Catalasa (CAT), Ascorbato Peroxidasa (APX), Superóxido Dismutasa (SOD) y Glutación Reductasa (GR) en brotes de <i>Stipa caudata</i> tras 14 días de aplicados los tratamientos y restricción hídrica temporada 2018-2019.....	81
Tabla 13. Coeficientes de Pearson y variables con diferencias significativas.	84
Tabla 14. Contenidos de Na^{+} , Cl^{-} y K^{+} , en brotes de <i>Stipa caudata</i> medidos al final del experimento temporada 2019-2020.	98
Tabla 15. Contenidos de Na^{+} , Cl^{-} y K^{+} , en raíces de <i>Stipa caudata</i> temporada 2019-2020.	100
Tabla 16. Contenidos de Na^{+} , Cl^{-} y K^{+} , en raíces de <i>Stipa caudata</i> medidos al final del experimento durante la temporada 2019-2020.	103
Tabla 17. Coeficientes de Pearson y variables con diferencias significativas.	106

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.

Fotografía 1. Diseño experimental del ensayo	163
Fotografía 2. <i>Stipa caudata</i> Regadasy AAS.....	163
Fotografía 3. <i>Stipa caudata</i> RH sin tratamientos	163
Fotografía 4. <i>Stipa caudata</i> RH y AAS.....	163
Fotografía 5. <i>Stipa caudata</i> RH y SA.....	164
Fotografía 6. <i>Stipa caudata</i> y succionador de solución suelo	164
Fotografía 7. Aplicación del riego.....	164
Fotografía 8. Medición de clorofila.....	164
Fotografía 9. Plantas RH e Regadas al final del ensayo.....	165
Fotografía 10. Maceta representativa de <i>Stipa caudata</i> clorótica RH con tratamiento AAS, al final del experimento.....	165
Fotografía 11. Diseño experimental de la temporada 2019-2020 recién establecido.....	166
Fotografía 12. Corte transversal de una corona de <i>Stipa caudata</i> al final del experimento tratada con BS e Regadas.....	166
Fotografía 13. Suelo tratado con BS e Regadas visto al término del ensayo final.....	167
Fotografía 14. Raíces de dos macetas de <i>Stipa caudata</i> tratadas con BS e Regadas vistas al término del ensayo final.	168
Fotografía 15. Raíces de <i>Stipa caudata</i> Regadas sin BS vistas al término del ensayo final	169
Fotografía 16. Biosolidos secados y tamizados junto con la mezcla final ocupada en los tratamientos correspondientes.....	170
Fotografía 17. Detalle de estados fenológicos de <i>Stipa caudata</i>	170
Registro de progresión semanal plantas Irrigated ensayo final temporada 2019-2020.....	171
Registro de progresión semanal plantas Irrigated ensayo final temporada 2019-2020.....	172

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El cambio climático es un fenómeno que lleva años modificando los patrones naturales climáticos, causando daños variados a gran parte de la población mundial, producidos por el calentamiento del planeta, siendo la principal fuerza impulsora la acumulación en la atmósfera de gases de efecto invernadero, emitidos principalmente por acción de la actividad humana (Fawzy et al., 2020). En el verano del 2018 se registraron valores récord en cuanto a temperaturas en gran parte del hemisferio norte, los cuales generaron varios desastres climáticos, tales como sequías, incendios forestales de gran envergadura y derretimiento del permafrost (Hofmockel, 2020), siendo uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad (Rolnick et al., 2022).

En Sudamérica, el calentamiento global afecta directamente los diversos ecosistemas, modificando los tipos de climas específicos de cada latitud. Uno de los fenómenos que mayormente han sido estudiado son “EL Niño y La Niña”, debido al impacto directo que poseen en el clima, sobre todo de los países limitantes al océano Pacífico y los interiores cercanos. La oscilación de El Niño del sur (ENSO) altera las temperaturas y precipitaciones de forma directa e indirecta, causando impactos socioeconómicos negativos en diversas actividades como la agricultura (Cai et al., 2020).

Las últimas proyecciones realizadas en Chile respecto al cambio climático sostienen que se producirán aumentos en las temperaturas y disminución en las precipitaciones en gran parte de la zona norte y central del país, generando desertificación y menor disponibilidad de agua para las plantas (IPCC, 2000; IPCC, 2018). Recientes investigaciones empleando Modelos Generales de Circulación (GCMs) proyectan para el escenario RCP8s aumentos en las temperaturas mínimas entre 2°C y 6°C al final del siglo XXI, mientras que las precipitaciones de invierno disminuirán en torno a un 40% en la zona centro sur, pero se proyecta un incremento del 60% en el interior de Los Andes del norte (Araya-Osses et al., 2020; Verichev et al., 2020).

La disminución en el contenido de agua del suelo afecta diversos procesos fisiológicos de las plantas como la turgencia y la presión osmótica, el contenido de clorofila con los consiguientes problemas en cuanto a reducción en la tasa fotosintética, la captura y asimilación de carbono, el intercambio gaseoso y la reducción en la producción de biomasa (Wang et al., 2010). El estrés hídrico se produce por la disminución del contenido de agua del suelo, con lo cual las plantas

pierden su capacidad de absorber agua y sustancias minerales del suelo (Bhat et al., 2020). Frente a esta situación, las plantas pueden responder mediante diferentes mecanismos antiestrés, ya sea aumentando la síntesis de hormonas como el etileno y ácido abscísico, modificando la morfología de raíces y brotes, aumentando la producción de osmolitos o solutos compatibles y activando los mecanismos antioxidantes frente a la acumulación de las Especies Reactivas al Oxígeno (ROS) (Ahluwalia et al., 2021). Existen evidencias contundentes de que todas las plantas utilizan los mismos mecanismos básicos de respuesta a condiciones ambientales adversas. Sin embargo, por lo general, estas respuestas no conducen a la tolerancia al estrés -excepto en el caso de un pequeño porcentaje de especies adaptadas a diferentes tipos de estrés abiótico en sus hábitats naturales, como las plantas de las marismas saladas (Al Hassan et al., 2017). Estas respuestas conservadas incluyen, entre otras, el control del transporte de iones, la compartimentación de iones tóxicos en vacuolas con la concomitante acumulación de osmolitos en el citosol para mantener el equilibrio osmótico celular, y la activación de sistemas antioxidantes, tanto enzimáticos como no enzimáticos (Zhu, 2001; Munns, 2002; Vinocur y Altman, 2005; Munns y Tester, 2008; Pollastri y Tattini, 2011; Ozgur et al., 2013; Bose et al., 2014).

El estrés abiótico se asocia a una mayor producción de especies reactivas del oxígeno (ROS). En un principio, las ROS se consideraban únicamente subproductos tóxicos del metabolismo aéreo que causaban estrés oxidativo, pero en la actualidad está bien establecido su papel esencial como mensajeros de señalización en varios procesos fisiológicos clave (Apel y Hirt, 2004; Foyer y Noctor, 2005; Das y Roychoudhury, 2014). Las ROS, incluyendo, por ejemplo, el O_2 molecular, el O_3 , el H_2O_2 y los radicales libres altamente reactivos, cuando están en exceso, tienen efectos perjudiciales sobre los ácidos nucleicos, los lípidos y las proteínas, induciendo graves disfunciones y, finalmente, la muerte celular (Apel y Hirt, 2004). Varias ROS provocan la peroxidación lipídica, que afecta a la selectividad y permeabilidad de las membranas, provocando la pérdida de iones y otros metabolitos (Ozgur et al., 2013). El peróxido de hidrógeno (H_2O_2) junto con el malondialdehído (MDA), un marcador de la peroxidación lipídica de la membrana, se utilizan ampliamente para estimar el nivel de estrés oxidativo experimentado por las plantas y su grado de sensibilidad a un tipo particular de estrés (por ejemplo, Chakraborty y Pradhan, 2012; Moussouraki et al., 2019; Zhu et al. 2020). En condiciones de estrés hídrico aumenta la producción de radicales libres como el oxígeno singlete (1O_2); con limitada captura de carbono en el ciclo de Calvin se

reduce el NADP^+ que sirve como aceptor de electrones en la fotosíntesis; a su vez, debido a una reducción de la ferredoxina durante el transporte de electrones, los electrones son transferidos al oxígeno en el fotosistema I (PSI) generando superóxido (O_2^-) (Wu et al., 2013). Otras ROS que se acumulan bajo condiciones de estrés, son el hidroxilo (OH^-) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Este último es producido en los peroxisomas cuando el glicolato es oxidado a ácido glioxílico durante la fotorrespiración (Jaleel et al., 2007). La acumulación en exceso de ROS produce daños en macromoléculas como proteínas, lípidos y en el material genético (Munné-Bosch et al., 2013; Demidchik, 2015).

Respecto al daño celular ocasionado por las ROS, la peroxidación de algunos ácidos grasos, especialmente los poliinsaturados que forman la mayor parte de las membranas plasmáticas de las células vegetales, son especialmente afectados por $^1\text{O}_2$ y OH^- . Una excesiva peroxidación de los ácidos grasos insaturados disminuye la fluidez de la membrana, causando fuga de iones, entre otros (Mueller, 2004; Halliwell, 2006). Por su parte, el ADN es dañado dependiendo de la ROS que se presente, O_2^- y H_2O_2 no reaccionan, mientras que HO^- es la que posee mayor reactividad, por su parte $^1\text{O}_2$ ataca principalmente a guanina, especialmente a la 8-hidroxiguanina. A su vez, el ADN puede oxidarse, mutar o producirse metilaciones en las citocinas, importantes en la regulación de la expresión génica (Wiseman y Halliwell, 1996; Halliwell, 2006). En la misma dirección, ocurre oxidación de azúcares por OH^- mientras que varias otras ROS pueden oxidar directamente también diversas proteínas (Ghezzi y Bonetto, 2003; Juszczuk et al., 2007).

Las plantas resistentes a estrés controlan la producción de ROS mediante diversos mecanismos enzimáticos y no enzimáticos. Entre las enzimas con actividad antioxidante las más conocidas son la superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), ascorbato peroxidasa (APX), glutatión reductasa (GR). Además de intensificar la actividad enzimática, las plantas pueden acumular diversos compuestos químicos antioxidantes, como ácido ascórbico (AsA), tocoferoles, glutatión, compuestos fenólicos, y especialmente flavonoides. Al respecto, enzimas como SOD, dependientes de iones como el Zn, Fe y Mn convierten en el citosol el O_2^- en H_2O_2 o en los cloroplastos, la matriz mitocondrial y peroxisomas. Por su parte las CAT y APX, mayormente ubicadas en peroxisomas, convierte el H_2O_2 en $2 \text{H}_2\text{O}$ (Reddy y Prasanth, 2018). GR ubicada en los estromas de cloroplastos y mitocondrias, citosol y peroxisomas cataliza NADPH^+ , importante

para mantener la integridad del glutatión y también en la detoxificación del H_2O_2 (Dalal y Khanna-Chopra, 2001). Respecto a los mecanismos no enzimáticos, el glutatión forma parte esencial en el ciclo ascorbato-glutatión para reducir dehidroascorbato y regenerar ácido ascórbico, siendo clave también para la regeneración de otros antioxidantes; de igual manera actúa directamente como un potente antioxidante eliminando H_2O_2 reaccionando con otras ROS como el oxígeno singlete, radicales superóxido e hidroxilos (Millar et al., 2003).

Los metabolitos secundarios como compuestos fenólicos tales como flavonoides y polifenoles poseen una estructura química ideal para eliminar radicales libres. Los polifenoles poseen gran reactividad como donador de electrones estabilizando y deslocalizando electrones desapareados (chain-breaking function) junto a su habilidad para quelar iones metálicos (Rice-Evans et al., 1997). Sin embargo, una de sus mayores propiedades es la de, en el caso de flavonoides, generar peroxidaciones cinéticas que modifican el orden de agrupamiento de lípidos disminuyendo la fluidez de las membranas; estos cambios impiden la difusión de radicales libres evitando peroxidaciones (Ahmad et al., 2010).

Las plantas tolerantes pueden responder de forma efectiva al estrés hídrico mediante una serie de cambios a nivel fisiológico, como el aumento de osmoprotectores. Evitar la deshidratación celular y mantener el equilibrio osmótico en diferentes condiciones de estrés abiótico requiere generalmente la acumulación de solutos compatibles, u osmolitos, en el citosol. Además de su función primaria en la osmorregulación, los osmolitos desempeñan múltiples papeles en la tolerancia al estrés, actuando como chaperonas de bajo peso molecular, eliminadores de ROS o moléculas de señalización (Ashraf y Foolad, 2007; Sanders y Arndt, 2012; Slama et al., 2015; Sing et al., 2015). Uno de los osmolitos más comunes en las plantas es la prolina (Szabados y Savaure, 2010). Aparte de su función como soluto compatible, Pro actúa como un potente antioxidante, apagando directamente ROS, como O_2 , H_2O_2 y $\text{OH}^\cdot$, manteniendo una baja relación NADP^+ a NADPH , o estabilizando las enzimas de eliminación de ROS y de respiración mitocondrial (Szabados y Savaure, 2010; Gupta et al., 2011; Bose et al., 2014). Pro representa un excelente biomarcador de estrés para aquellas especies que acumulan este osmolito en respuesta a diferentes tratamientos de estrés. Sin embargo, Pro puede o no tener un papel directo en los mecanismos de tolerancia, dependiendo de la especie (Mansour y Ali, 2017). Cuando se comparan taxones

genéticamente relacionados, en algunos casos, existe una correlación positiva entre los niveles de Pro y el grado relativo de tolerancia, es decir, Pro se acumula a concentraciones más altas en las plantas de los genotipos relativamente más tolerantes, ya sean especies dentro del mismo género (por ejemplo, Hassan et al., 2016), o cultivares de la misma especie (Lofti et al., 2019). Sin embargo, en otros casos, la correlación es negativa, y el mayor contenido de Pro se mide en el genotipo más sensible (por ejemplo, Al Hasan et al. 2016b).

El K^+ es un nutriente esencial, que desempeña funciones críticas en la elongación celular y el mantenimiento de la integridad y estabilidad de la membrana, la actividad de muchas enzimas, la síntesis de proteínas, la fotosíntesis, la osmorregulación, el movimiento estomático, la transferencia de energía, el transporte del floema, el equilibrio catión-anión y la resistencia al estrés (Marschner, 1995). En condiciones de estrés por sequía y salinidad, el K^+ es esencial en el ajuste osmótico y la regulación de la turgencia dentro de las células de guarda durante el movimiento estomático, y el bajo K^+ suele estar relacionado con un mayor estrés oxidativo (Wang et al., 2013). Por lo tanto, los mecanismos que permiten el mantenimiento de altas concentraciones de K^+ en la hoja en condiciones de estrés, como la activación de su transporte a los brotes de las plantas, son esenciales para la tolerancia al estrés abiótico (Wu et al., 2018).

La búsqueda de diferentes especies que posean mecanismos de resistencia a las condiciones ambientales adversas ocasionadas por el calentamiento global, resulta imperiosa. El género *Stipa* habita gran parte de las zonas del planeta y, en su mayoría, son plantas que presentan gran rusticidad y resistencia a climas extremadamente adversos, como es el caso de las decenas de *Stipas* originarias de Los Andes Sudamericanos (Cabrera, 1971) o como es el caso de *Stipa purpurea* originaria de Qinghai, Tibet, a la cual se le han identificado genes de resistencia a condiciones adversas (Yang et al., 2021).

Stipa caudata Trin. es una poácea originaria de Chile, Argentina y Uruguay. En Chile, se encuentra distribuida principalmente en la zona centro, mientras que en Argentina el género *Stipa* L. se encuentra presente en el distrito de Caldén, ubicado en el centro y sur de San Luis, centro de la Pampa, hasta el sur de Buenos Aires. En estas zonas predomina la vegetación propia del bosque xerófilo con estepas y matorrales, predominando las especies *Stipa tennis* y *Stipa clarazii*; En el

distrito Pampero Oriental, *Stipa tenuissima*, *Stipa filiculmis*; en el distrito Uruguayense, *Stipa neesiana*, *Stipa tenuissima*; en el distrito Pampero Oriental, *Stipa neesiana*, *Stipa papposa*, *Stipa charruena*; mientras que en el distrito Pampero Austral, *Stipa tennis*, *Stipa ambigua*, *Stipa clarazii* y *Stipa caudata* (Cabrera, 1971; Zuccarinni y Geraldí, 2022).

Stipa caudata Trin. es una gramínea perenne, con una altura de hasta 100 cm, de tallo erecto, globosa, con nudos glabros, vainas glabras con vellosidades, láminas foliares largas, planas de hasta 3-7 mm de ancho, con espiguillas de una flor, originaria de Chile, Argentina y Uruguay, adaptada a zonas de bajas precipitaciones anuales, suelos poco fértiles y erosionados (Verloove, 2005), con gran capacidad de mantenimiento ecológico de grandes áreas, por su producción de biomasa y que podría emplearse, al igual que otras gramíneas, para la restauración de suelos y producción biocombustibles (Abdulyekeen et al., 2021).

Una vez encontrada una especie de planta con prometedora capacidad de hacer frente a condiciones estresantes, especialmente al déficit hídrico en el suelo y atmósfera, es de gran importancia lograr que esa especie pueda llegar a su máxima capacidad biológica de resistencia en condiciones adversas, para conseguir, a lo menos, mantener o, por último, minimizar respuestas como pérdida de clorofila, actividad fotosintética, secuestro de carbono y, en última instancia, pérdida de biomasa.

Al respecto, el empleo de bioestimulantes es crucial para conferir una mayor resistencia al déficit hídrico. En esta línea, elementos minerales esenciales como el azufre y amonio, junto con fitohormonas como el ácido acetilsalicílico aplicados a la planta, han mostrado promisorios efectos para cumplir este propósito. En paralelo, el uso de biosólidos aplicados al suelo, son una estrategia no solamente eficaz para mantener por mayor tiempo el contenido hídrico del agua en el suelo, sino que también, para minimizar el impacto ambiental que significa su obligada acumulación en depósitos de plantas de aguas servidas.

El azufre (S) es un elemento mineral esencial (Meselhy et al., 2021) importante en diversos parámetros de producción y calidad vegetal, el cual es absorbido desde la solución suelo principalmente como sulfato (SO_4^{2-}), el cual representa la forma química de mayor abundancia en

la planta, pero con baja movilidad en el suelo. El S es importante para muchos procesos fisiológicos, como la síntesis de clorofila, aceites aromáticos en respuesta a depredadores o agentes patogénicos, vitaminas, síntesis proteica y actividad enzimática. El S es absorbido por las raíces y transportado hacia la parte aérea, en la cual es asimilado e incorporado a sustancias ricas en nitrógeno/carbono como la cisteína o homocisteína. Dentro de la planta, el sulfato, con gasto de energía proveniente del adenosín trifosfato (ATP) es convertido a adenosina fosfosulfato (APS). El APS puede incurrir en dos rutas; por una parte, con gasto de energía proveniente del ATP puede catalizarse a fosfoadenosina fosfosulfato (PAPS) la cual es indispensable para la síntesis de ésteres de sulfuro, como polisacáridos y sulfolípidos. Por otra parte, APS puede tomar una segunda ruta donde contribuye a la transformación del sulfito a sulfuro (R-SH), el cual, mediante la acción de ferredoxinas (Fd_{red}) y acetilcisteínas sintetizará cisteína, etileno y glutatión (Schmidt y Jager, 1992; Marschner, 1995).

En adición a lo anterior, el S es indispensable para la activación de una serie de enzimas requeridas en la asimilación de nitrógeno (N), especialmente la nitrato reductasa (NR) (Marschner, 1995), junto con participar en la síntesis de glutatión, un tripéptido relacionado con la detoxificación de ROS (Shri et al., 2014).

El N también es un elemento mineral esencial con diversos roles en las plantas superiores, requerido en varios compuestos como en moléculas orgánicas, proteínas, enzimas, aminoácidos, ácidos nucleicos, purinas, pirimidinas, coenzimas y muchos otros componentes (Barker y Pilbeam, 2007).

En el suelo se encuentra en dos formas absorbidas por las plantas: nitrato (NO_3^-), el cual es muy móvil en el suelo y en la mayoría de los casos, debido a la rápida nitrificación se encuentra en mayores cantidades; y el amonio (NH_4^+) el cual es menos móvil y se encuentra en la mayoría de los suelos en menor cantidad (Marschner, 1995). Una vez absorbido por las raíces, se mueve a través del xilema para llegar a las hojas, lugar donde debe ser asimilado mediante el ciclo glutamina/glutamato sintasa (GS/GOGAT); en el cual el NO_3^- es convertido a una forma química de mayor energía, el nitrito (NO_2^-) mediante la enzima NR, y éste es reducido NH_4^+ mediante la enzima nitrito reductasa (NiR). El NH_4^+ entra al ciclo GS y en presencia de glutamato y ATP

mediante la acción de la enzima GS se sintetiza glutamina. La glutamina necesita 2-oxoglutarato + NADH o Fdred para que la enzima GOGAT, en condiciones sin estrés, sintetice 2 glutamatos + NAD⁺ o Fdred. Sin embargo, la asimilación de nitrógeno en condiciones de estrés produce Pro, aminoácido que participa también en respuestas a diversos estreses (Marschner, 1995; Nazar et al., 2015; Mansour et al., 2017). La prolina es catalizada en las mitocondrias mediante la acción de dos enzimas: la Pro dehidrogenasa (PDH) y la P5C dehidrogenasa (P5CDH), las cuales se activan mediante diversos genes hallados en *Arabidopsis thaliana*, como el P5CS y los PDH, la expresión de este último ha sido identificado especialmente bajo condiciones de estrés hídrico (Funck et al., 2010).

Cómo se ha mencionado anteriormente, la prolina es un aminoácido de bajo peso molecular que desempeña una función osmoprotectante y de ajuste osmótico frente a condiciones de escasez hídrica. La prolina disminuye los efectos de las ROS debido a que también tiene un efecto antioxidante protegiendo las membranas de celular, encontrándose genes que regulan su síntesis elevando sus niveles en condiciones de estrés (Reddy y Prasanth, 2018; Per et al., 2017).

Por otra parte, el ácido acetil salicílico (AAS) es un precursor del ácido salicílico (AS), fitohormona con un importante rol en la señalización y respuesta de las plantas frente a diversos estreses, entre ellos el hídrico (Neuberg et al., 2010; Miura y Tada, 2014; Khan et al., 2015; Li et al., 2017; Tavakoli Hasanaklou et al., 2016; Hussain et al., 2020).

La síntesis del AS puede tomar lugar en dos diferentes rutas enzimáticas, la primera mediante el corismato interviniendo como primer metabolito, el cual mediante la L-fenilalanina puede convertirse en ácido salicílico mediante una serie de procesos enzimáticos mediados por la fenilalanina amonio liasa (PAL) y, por otro lado, a través de la ruta del isocorismato en un proceso de dos pasos, en los cuales la enzima isocorismato sintasa (ICS) y la isocorismato piruvato liasa (IPL) son las principales convertidoras en AS (Vlot et al., 2009).

El AS interviene en diversos procesos bioquímicos y fisiológicos como la germinación de semillas, procesos respiratorios, apertura y cierre estomático, senescencia, termotolerancia basal, nodulación y tolerancia a diversos estreses, tanto bióticos como abióticos (Vlot et al., 2009). Los

salicatos derivados del ácido salicílico actúan como importantes señalizadores y su acumulación se ve incrementada frente a diversos estreses, con los cuales, aumenta la síntesis de proteínas aleloquimicamente defensivas, brindando protección a las plantas (Li et al., 2002).

Aplicaciones foliares de ASA producen una mayor asimilación de CO₂, aumentando la tasa fotosintética y metabolismo general aumentando la biomasa total frente a un estrés hídrico, principalmente debido a la regulación de varias enzimas detoxificadoras como la monodihidroascorbato reductasa (DHAR), GR Y GSH, junto a componentes no enzimáticos como los relacionados a las rutas AsA-GSH y sistema glyoxalasa (Gly I y Gly II) 12 (Hasanuzzaman et al., 2017; Hussain et al., 2020). Por otro lado, el ASA interactúa directamente en la acumulación de Pro, la cual actúa como osmolito y antioxidante. Además, se ha destacado su participación en la producción de antioxidantes como el glutatión, el cual mejora la detoxificación de las ROS. A su vez, el ASA estimula la actividad de varias enzimas encargadas de reducir el impacto de los radicales libres, como la SOD, CAT, ascorbato y peroxidasas (Kovács et al., 2014).

Por su parte, los biosólidos (BS) y productos derivados han demostrado tener un importante efecto en la retención del agua y aumento de la fertilidad de los suelos tratados (Pepper et al., 2008; Roig et al., 2012; Cogger et al., 2013; Liu et al., 2017; Sharma et al., 2017; Zhang et al., 2017; Kranz et al., 2020) junto con ser una alternativa al uso de fertilizantes disminuyendo su acumulación tras el procesamiento de agua servidas (Chen et al., 2012a; Cieřlik et al., 2015; Latosińska et al., 2021).

De hecho, recientemente se han establecido nuevas medidas regionales que restringen su disposición en vertederos (Collivignarelli et al., 2019). Estas matrices orgánicas, tras ser incorporadas a suelos degradados, han mostrado a mediano y largo plazo (Chen et al., 2012^a; Fernández-Getino et al., 2012; Cellier et al., 2014; Haney et al., 2015) una mejora en parámetros de fertilidad química, física y biológica especialmente si se aplican en dosis bajas (Lu et al., 2012; Bettiol y Ghini, 2011; Antilén et al., 2014), ya que si no se disponen apropiadamente pueden generar efectos negativos en forma de contaminaciones (Haynes et al., 2009; Kim y Owens, 2010; Liu et al., 2017; Zhang et al., 2017).

No obstante, a lo anterior, existe muy poca información sobre las respuestas a nivel fisiológico involucradas en el aumento de la resistencia y producción de biomasa en condiciones de escasez hídrica en *Stipa caudata*, más aún una escasa información, sobre los efectos de aplicaciones de sulfato de amonio, ácido acetil salicílico y biosólidos y sus respuestas frente a esa condición. Este estudio es una primera aproximación sobre la resistencia de *Stipa caudata* frente a déficit hídrico. En este estudio se usaron elementos minerales, fitohormonas y biosólidos de conocida influencia en reducir estrés hídrico. Por tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar los efectos de aplicaciones de sulfato de amonio, ácido acetilsalicílico y biosólidos en cuanto al aumento de la resistencia y producción de biomasa de *Stipa caudata* manejada en una condición de escasez hídrica.

1.2. Distribución geográfica e importancia ecológica y económica de la especie

Los registros fósiles del género *Stipa* dan testimonio de su presencia en la tierra desde la Era Terciaria, momento desde el cual comenzó a difundirse vastamente dado que sus lemas llenas de vellosidades facilitan tanto la vectorización de la cariósida como la penetración en el terreno (Moraldo, 1986).

A nivel filogenético el género *Stipa* actualmente se encuentra incorporado al Clado Acnateroide (AC) con origen en Sudamérica y Norteamérica (Romaschenko et al., 2012).

Matthei (1965) afirma que el género *Stipa* es de distribución mundial, se adapta a climas húmedos y templados hallándose en mayor abundancia dentro del subcontinente Sudamericano destacando a Chile, Argentina y Uruguay como los países con mayor número de representantes. Según Matthei (1965), para Chile el género se distribuye entre la provincia de Tarapacá actual Región de Tarapacá (17°40'S) hasta el extremo sur de Magallanes (54° S) poblando desde las altas cumbres Andinas (4300 m.s.n.m.) hasta el nivel marítimo. Donoso (1982), por su parte, bajo su clasificación fisionómica-ecológica de los tipos forestales de Chile, asoció a *Stipa* a la estrata de gramíneas y herbáceas de los bosques de tierras bajas planas junto con los de tierras altas y de mediana altitud que se amparan en la categoría de bosque latifoliado siempreverde esclerófila con lluvias invernales y sequía estival pronunciada.

Stipa caudata se distribuye a grandes rasgos en Chile entre la Zona Central junto con la cordillera de la costa de las provincias de Coquimbo y Valdivia, formando parte de la cubierta herbácea en asociación a otras gramíneas, encontrándose frecuentemente desde la provincia de Valparaíso hasta Malleco en orillas de caminos, calles y en alrededores rurales donde forma grandes matas pudiendo éstas alcanzar hasta 1 m de alto (Matthei, 1965). Según Caro y Sanchez (1971), esta especie es originaria de Chile y se distribuye en mayor medida hacia Argentina y luego a Uruguay. Su distribución para Sudamérica, descrita por Burkart (1975) comprende una zona mesotérmica de pradera delimitada por el borde meridional de Brasil, Uruguay, Chile y la zona central de Argentina entre los 28° y 40° S, donde se encuentra el grupo mesotérmico de praderas que se caracterizan por requerir temperaturas intermedias y crecer en áreas con una temperatura media anual de 10 a 20°C y 5 a 15°C de media invernal, asimismo como una zona microtérmica donde las temperaturas son menores a 10°C como media anual y un promedio invernal menor a 5°C, cumpliéndose estas condiciones climáticas en las alturas de la Cordillera de los Andes, la Patagonia y regiones subantárticas, destacándose particularmente a todas aquellas especies xerófilas adaptadas a las condiciones prevalentemente áridas en las montañas orientales y las regiones templadas meridionales de Sudamérica. La especie ha sido descrita como introducida en Italia, Inglaterra, España y Australia (Moraldo, 1986; Jacobs y Everett, 1996; Pyke, 2003; Verloove, 2005).

1.3. Características climáticas de Sudamérica y Chile

1.3.1. Características climáticas de Sudamérica

Según el mapa de Koppen-Geiger en Sudamérica (Figura 1) predominan tres tipos de climas: A, B y C. Al respecto, el clima tropical es el de mayor abundancia (A = 60,1%), seguido por el templado (C = 24,1%) y el árido (15,0%), mientras que el clima polar se presenta solamente en cuatro zonas en Sudamérica, dos en Los Andes debido a una alta elevación, y el otro en el extremo sur de Chile y Argentina, en el estrecho de Magallanes/Tierra del Fuego, y en las islas Falkland (Carver et al., 2002).

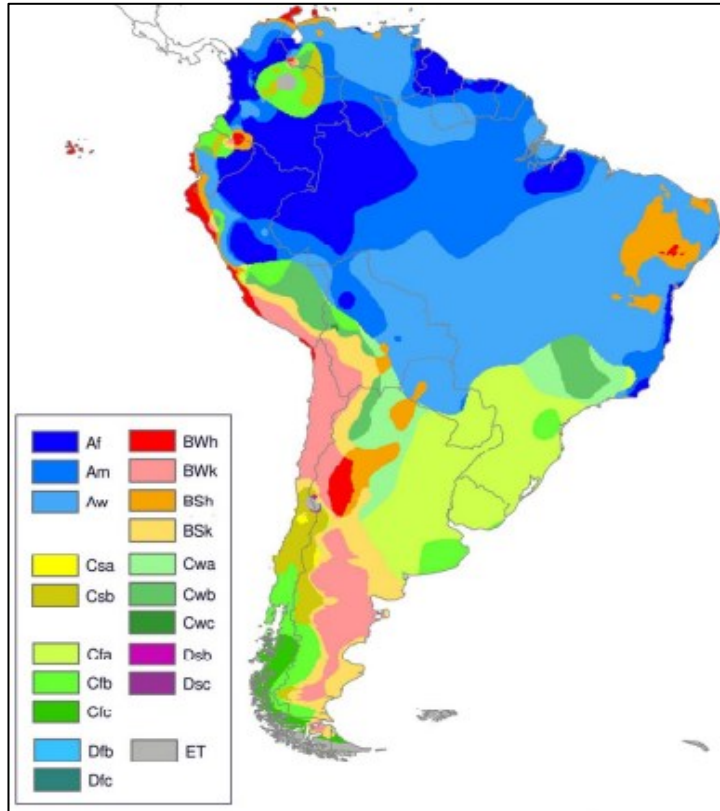


Figura 1. Mapa de los tipos climáticos de Koppen-Geiger para Sudamérica (adaptado por Carver et al., 2002)

1.3.2. Características climáticas de Chile

Chile, esta larga y angosta franja de tierra se encuentra encerrada en una especie de habitáculo que impermeabiliza los factores externos climáticos favoreciendo una identidad climática particular. Hacia el norte, se encuentra el desierto de Atacama, el más árido del mundo; hacia el este cerca de 4.000 km de costa delimitada con el océano Pacífico, y hacia el oeste, la cordillera de Los Andes cubriendo gran parte del territorio nacional.

Según el Mapa de los Tipos Climáticos de Koppen-Geiger para Sudamérica (Figura 1; adaptado por Carver et al., 2002), y la clasificación por “Grupos” y “Tipos Climáticos” (Fernández-Getino et al., 2012), Chile presenta seis tipos de clima, los cuales, desde el norte hasta el sur, son los siguientes (elaboración propia):

I. R. Arica y Parinacota R. de Atacama: clasificación BWk = “árido, desértico, frío”. El grupo de clima pertenece a “clima seco” y el tipo de clima a “clima de desierto”.

II. R. Coquimbo norte y centro: clasificación BSk = “árido, estepa, frío”. El grupo de clima pertenece a “clima seco” y el tipo de clima a “estepa”.

III. R. Coquimbo sur hasta R. Bio Bio: clasificación Csb = “templado, verano seco, verano cálido”. El grupo de clima pertenece a “templado lluvioso” y el tipo de clima a “mediterráneo o esteso”.

IV. R. Metropolitana sur interior y R. O’Higgins interior: Csa = “templado, verano seco, verano caluroso. El grupo de clima pertenece a “templado lluvioso” y el tipo de clima a “mediterráneo o esteso”.

V. R. Araucanía hasta R. de Los Lagos norte y parte interior de R. Magallanes: Cfb = “templado, sin estación seca, verano cálido”. El grupo de clima pertenece a “templado lluvioso” y el tipo de clima a “clima de las hayas”.

VI. Cordillera de Los Andes al interior de R. de Valparaíso, R. de Aysén y R. de Magallanes: ET = “polar, tundra”. El grupo de clima pertenece a “frío polar” y el tipo de clima a “clima de tundra”

1.3.3. Características climáticas de la Provincia de Aconcagua

Se caracteriza por una leve continentalismo, con un notable incremento de la amplitud térmica diaria y anual hacia los valles del interior, en donde son frecuentes las heladas invernales. Hacia la costa se presenta una humedad muy elevada. Su clima posee una tendencia hacia un mediterráneo. Sin embargo, hacia el sur de la provincia, especialmente en la localidad de Baños de Jahuel y la provincia de Los Andes, el clima podría asemejarse mayormente a un estepario del norte chico (Di Castri y Hajek., 1976).

Según el mapa de los tipos climáticos de Koppen-Geiger para Sudamérica (adaptado por Carver et al., 2002), y la clasificación por “Grupos” y “Tipos Climáticos” (Fernández-Getino et al., 2012), el valle de Aconcagua, lugar desde donde se obtuvo el suelo para el ensayo, posee una clasificación climática de 1era., 2da., y 3era., perteneciente a:

“Csb” = “templado, verano seco, verano cálido”. El grupo de clima pertenece a “templado lluvioso” y el tipo de clima a “mediterráneo o esteso”. Este tipo de climas se presenta con temperaturas medias mensuales del mes más caliente $> 18^{\circ}\text{C}$; y con temperaturas medias del mes más frío $> 0^{\circ}\text{C}$. El tipo de vegetación corresponde a “Megaterma”.

1.3.4. Características climáticas de la Provincia de Santiago

Las precipitaciones van disminuyendo en dirección costa, hacia el valle longitudinal, aumentando nuevamente desde este punto hasta la cordillera de Los Andes, presentándose inclinaciones climáticas típicas de la zona central de Chile. Su clima se asemeja a uno de estepa algo continental, similar al del sector sur de Aconcagua, sin embargo, en Colina el clima es más parecido a uno más árido con fluctuaciones térmicas. La presencia de una cordillera de la costa alta actúa como una barrera natural impidiendo la influencia de condiciones climáticas marítimas. La humedad relativa decrece progresivamente hacia el este (Di Castri y Hajek., 1976).

Según el mapa de los tipos climáticos de Koppen-Geiger para Sudamérica (adaptado por Carver et al., 2002), y la clasificación por “Grupos” y “Tipos Climáticos” (Fernández-Getino et al., 2012), la R. Metropolitana sur, donde se obtuvo el material vegetal del ensayo, posee una clasificación climática de 1era., 2da., y 3era., perteneciente a:

“Csa” = “templado, verano seco, verano caluroso”. El grupo de clima pertenece a “templado lluvioso” y el tipo de clima a “mediterráneo o esteso”. Este tipo de climas se presenta con temperaturas medias mensuales del mes más caliente $> 18^{\circ}\text{C}$; y con temperaturas medias del mes más frío $> 0^{\circ}\text{C}$. El tipo de vegetación corresponde a “Megaterma”.

1.3.5. Características climáticas de la Provincia de San Felipe

Según Santibáñez, (2017) La temperatura varía entre un máximo en enero de 31,3 °C y una mínima de 30,3 °C dentro del distrito y un mínimo de julio de 3,3 °C (máxima de 4,8 °C y una mínima de 2°C dentro del distrito). Tiene un promedio de 249 días consecutivos libre de heladas. En el año se registra un promedio de 21 heladas. El período de temperaturas favorables para la actividad vegetativa dura 12 meses. Registra anualmente 2,066 días grado y 689 horas de frío acumuladas hasta el 31 de julio. La precipitación media anual es de 259 mm y un período seco de 9 meses, con déficit hídrico de 1,286 mm·año⁻¹. El período húmedo dura 1 mes durante los cuales se produce un excedente hídrico de 11 mm.

Localidades relevantes incluidas: Calle Larga, Chacabuco, Curimón, Huertos Familiares, Los Andes, Polpaico, Quilapilún, San Esteban, San Felipe, Santa María.

1.3.6. Características climáticas de la Región Metropolitana

La temperatura varía entre un máximo en enero de 29.5 °C y una mínima de 27.8 °C dentro del distrito y un mínimo de julio de 4.6 °C (máxima de 6.1 °C y una mínima de 3.7°C dentro del distrito). Tiene un promedio de 261 días consecutivos libre de heladas. En el año se registra un promedio de 9 heladas. El período de temperaturas favorables para la actividad vegetativa dura 11 meses. Registra anualmente 1.831 días grado y 563 horas de frío acumuladas hasta el 31 de julio. La precipitación media anual es de 407 mm y un período seco de 8 meses, con déficit hídrico de 1.098 mm/año. El período húmedo dura 2 meses durante los cuales se produce un excedente hídrico de 62 mm (Santibáñez et al., 2017).

Localidades relevantes incluidas: Buin, Colina, Lampa, Lo Barnechea, Lonquén, Paine, Peñaflor, Pirque, Puente Alto, Santiago, Tiltil.

1.3.7. Efecto del calentamiento global sobre el clima de Chile

El quinto informe sobre el cambio climático, emitido por el IPCC (*Intergovernmental Panel for Climate Change*, en inglés) que se ampara en la Organización Meteorológica Mundial de la ONU, determinó que la influencia antropogénica en el sistema climático ya es clara, y que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son los más altos en la historia de la humanidad junto con el hecho que los cambios en el clima más recientes han repercutido vastamente en los sistemas humanos y naturales (IPCC, 2000). Adicionalmente menciona que las causas del cambio climático son el aumento de las concentraciones gaseosas en la atmosfera de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso emanadas antrópicamente desde la era pre-industrial debido al crecimiento económico poblacional y que estos niveles son más altos que nunca, no evidenciándose en la tierra desde hace 800.000 años (IPCC, 2000).

Chile por su parte ha redactado a la fecha dos planes de acción nacional al Cambio climático, el más reciente fue emitido el año 2016 teniendo vigencia hasta el 2022 (MMA, 2017). Estos instrumentos buscan guiar las políticas públicas orientando la toma de decisiones para adaptarse al Cambio climático y reducir la vulnerabilidad del territorio chileno ante dicho fenómeno. El quinto reporte del cambio climático, emitido por el IPCC que se ampara en la Organización Meteorológica Mundial de la ONU determinó que la influencia antropogénica en el sistema climático ya es clara, y que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son los más altos en la historia de la humanidad junto con el hecho que los cambios en el clima más recientes han repercutido vastamente en los sistemas humanos y naturales (Pachauri, 2014). Adicionalmente menciona que las causas del cambio climático son el aumento de las concentraciones gaseosas en la atmosfera de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso emanadas antrópicamente desde la era pre-industrial debido al crecimiento económico poblacional y que estos niveles son más altos que nunca, no evidenciándose en la tierra desde hace 800.000 años (Pachauri et al., 2014).

Buscando caracterizar el cambio climático en Chile y sus implicancias en diversas materias, se recopilaron y analizaron los principales estudios y proyecciones elaboradas nacional e internacionalmente por la academia, expertos y funcionarios públicos; los resultados de la revisión apuntaron coincidir, solamente difiriendo en la intensidad de los cambios proyectados para el

territorio: respecto a la temperatura, se proyecta un aumento principalmente en la zona norte; para las precipitaciones ya se ha comprobado una disminución estadísticamente significativa en la zona centro-sur de Chile. Hacia el 2030 se proyecta una disminución en la precipitación entre 5% y 15%, agudizándose más aún hacia el 2050. Respecto a los eventos climáticos extremos, menciona que la CEPAL proyectó hacia el final de siglo una ocurrencia de sequías sobre 10 años en un periodo de 30 años. Se prevé una disminución en las noches frías y un aumento de las olas de calor, junto con la disminución de los caudales de las cuencas ubicadas entre Coquimbo y Los Lagos. Los hotspot de biodiversidad y varios pisos de vegetación chilenos se verán amenazados por el alza en la temperatura y la disminución generalizada de las precipitaciones (MMA, 2017). El mismo documento afirma con datos del INGEI (Inventario Nacional de GEI) que Chile es responsable del 0,3% de las emisiones mundiales de gases efecto invernadero. También sostiene que el territorio chileno se encuentra altamente vulnerable frente al cambio climático debido a que cumple con siete de los nueve criterios enunciados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático.

1.4. Características edáficas relacionadas con el estudio

1.4.1. Características físicas

La textura de un suelo considera cualitativamente cómo el tamaño de las partículas repercute en el comportamiento del suelo al mismo tiempo que contempla cuantitativamente los valores porcentuales de esas partículas en dicho suelo (Honorato, 2000). Dichas partículas son la arena, el limo y la arcilla en orden decreciente de tamaño, donde, por ejemplo: las partículas de arena se consideran como fragmentos de roca o minerales, los limos por su parte ya son compuestos por minerales o fragmentos de roca para finalmente llegar a las partículas más pequeñas, las arcillas, que están compuestas de minerales secundarios con diferentes grados de cristalinidad (Honorato, 2000). Las distintas cantidades porcentuales de estas tres partículas han permitido elaborar un triángulo textural que permite identificar la clase textural del suelo a partir de la abundancia de arcilla, limo o arena, tal y como se observa en la Figura 2.

A grandes rasgos, se separan primeramente los suelos arenosos que contienen predominantemente partículas de arena caracterizados por tener una textura gruesa, luego los suelos francos que poseen

cantidades intermedias de arena, limo y arcilla, donde asimismo se pueden desglosar en suelos francos de textura moderadamente gruesa, francos de textura media y francos de textura moderadamente fina para finalizar con los suelos arcillosos, caracterizados por ser texturalmente finos donde dominan las partículas de arcilla. Según Honorato (2000), las diferentes texturas provocan diferentes respuestas al manejo agronómico. Por ejemplo, las relaciones hídricas van a ser diferentes dependiendo de la textura del suelo, donde se observará una infiltración y percolación creciente a medida que se avanza desde una textura fina a una gruesa, y contrariamente se observará una capacidad decreciente de almacenamiento de agua cuando se avanza desde una textura fina a una más gruesa.

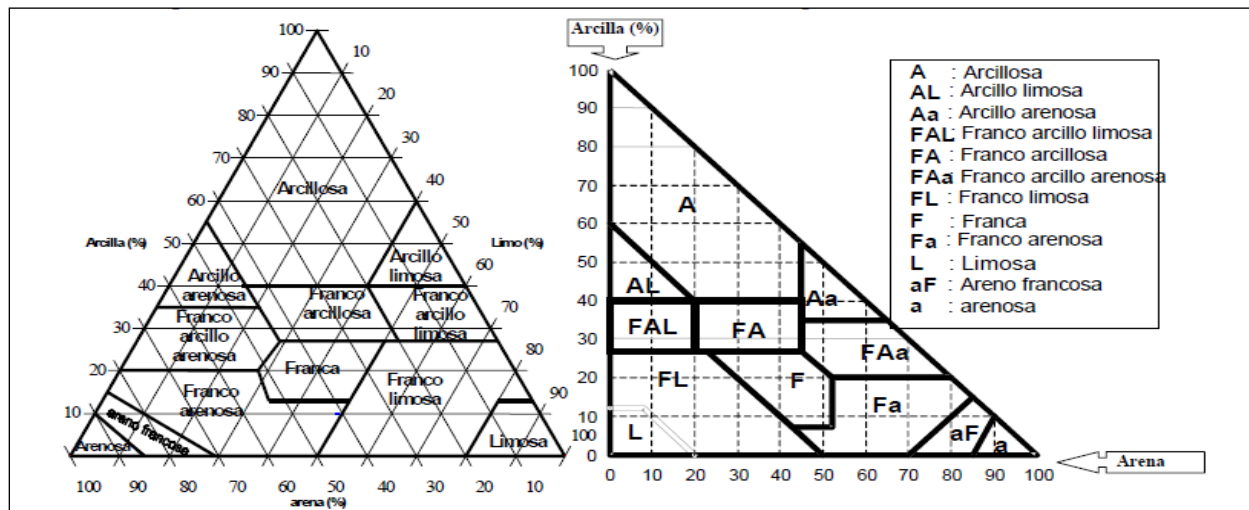


Figura 2. Triángulo textural para la determinación de la textura de un suelo (Honorato, 2000).

Por otro lado, la estructura corresponde a la ordenación en la que se agrupan las partículas de arcilla, limo y arena al interior de los agregados de suelo. Estas unidades se encuentran separadas por los espacios porosos y la interacción entre ellas genera las distintas estructuras de suelo. En este sentido, se distinguen características como la capacidad estructural que indica con cuanta espontaneidad se generan estos ordenamientos y la estabilidad estructural que guarda relación con la capacidad de estos agregados de conservar su forma tras entrar en contacto con agua o alguna fuerza física (Pérez, 1999; Honorato, 2000). Según dicho autor, el suelo bien estructurado mantiene su asociación de agregados y evita que el suelo se selle y se formen costras permitiendo que características como la capacidad de retención de agua e infiltración, intercambio gaseoso y desarrollo radical no se vean afectadas. Por el contrario, un deterioro en la estructura se verá

traducido en la compactación del suelo donde una reducción de volumen incrementa la densidad aparente a cambio de una disminución de la porosidad, lo que trae consecuencias negativas para los cultivos.

La porosidad corresponde a otro parámetro importante que guarda relación con el volumen de suelo que no se encuentra ocupado por sólidos, pudiendo albergar aire o agua, a su vez permitiendo el desarrollo de las raíces. Dicha penetración radical está relacionada con la densidad aparente y la tensión de humedad en el suelo donde un aumento de la densidad y disminución de humedad van a repercutir negativamente en el desarrollo radical. En particular, la variación de la porosidad de un suelo es la principal causa de los cambios en la densidad aparente del mismo, y su cálculo adquiere importancia especial para evaluar la efectividad de las labores culturales y su impacto en la porosidad de un suelo determinado. La porosidad repercute directamente en la capacidad de almacenamiento de agua de un suelo, la aireación y el manejo de este (Pérez, 1999; Honorato, 2000; Casanova et al., 2004).

1.4.2. Características físico-químicas y químicas

Estas propiedades se encuentran íntimamente relacionadas con los coloides inorgánicos (arcillas y limos) y orgánicos (fracción coloidal de la materia orgánica) donde destacan la capacidad de intercambio de cationes y aniones, las bases de cambio y el pH (Honorato, 2000).

La capacidad de intercambio de cationes (CIC) corresponde a una de las características más importantes de un suelo, ya que guarda relación con los procesos reversibles de intercambio de elementos con carga eléctrica entre los coloides (fase sólida) y la solución edáfica (fase líquida) tanto como entre mismos coloides en estrecho contacto, donde se intercambian los elementos nutritivos que las raíces incorporarán a la planta. Estos procesos se distinguen entre la adsorción y la desorción. El primero hace referencia a la retención de una especie iónica en la superficie de un coloide y la segunda por su parte indica el proceso inverso de liberación de dichos iones. Esta capacidad de los coloides se origina de modo permanente, a través sustituciones isomórficas entre elementos en la superficie del coloide, lo que le permite a la partícula habilitar una carga para albergar un ion y de modo dependiente del pH, con la ionización en los grupos hidroxilo de los

coloides, donde se observarán diferentes cargas en función del pH del medio, adquiriéndose cargas negativas o positivas. Esta ionización observada también se manifiesta en la materia orgánica, con la salvedad de que dichos coloides orgánicos solo generan cargas dependientes del pH. Según el autor, en los suelos a pH normal, los sitios con carga negativa son mucho más abundantes, por lo tanto, la capacidad catiónica de intercambio adquiere más importancia que la aniónica (Pérez, 1999).

A nivel químico, Pérez (1999) detalla en los modelos de distribución espacial de las cargas eléctricas alrededor de la superficie cargada de las arcillas, acordando que el fundamento de este fenómeno yace en que los cationes se encuentran sometidos a una atracción eléctrica que es generada desde la superficie cargada del mismo modo que se encuentran sometidos a una gradiente de concentración entre dicha superficie y la solución intermicelar formando un sistema de equilibrio. Esto, según el autor, explica por qué los iones no están localizados en una región particular de la solución edáfica. Por su parte, Honorato (2000) indica que este mecanismo es reversible, aun cuando los cationes polivalentes pueden resultar más difíciles de intercambiar ya que generan enlaces covalentes más fuertes, resaltando también que puede observarse un efecto de acción de masas, donde la dirección de la reacción se ve afectada por las concentraciones relativas. Dichas distribuciones de cationes entre las fases sólida y líquida en equilibrio están sujetas a las propiedades del coloide, las propiedades tanto de los cationes mismos como sus cantidades y también de la concentración de ellos. También indica que la afinidad de adsorción de los cationes es la responsable dentro de un equilibrio iónico en diferir entre la proporción entre los cationes adsorbidos y los que se encuentran en la solución edáfica.

La cuantificación de la CIC se expresa en cmol (+)/kg y donde 1 cmol (+) es equivalente a 1 me, definido como 1 mg de H^+ o la cantidad de cualquier otro ión capaz de combinarse con él o desplazarlo. Los cationes intercambiables más importantes son Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , con Al^{3+} y H^+ . Por su parte, los menos abundantes son NH_4^+ , y Fe^{2+} . Los elementos Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ son básicos y se conocen como bases de cambio, en cambio Al^{3+} y H^+ causan acidez (Pérez, 1999; Honorato, 2000).

El pH se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones H^+ en la solución del suelo y guarda relación con el grado de acidez o basicidad de éste, ya que repercute directamente en el intercambio catiónico y aniónico de un suelo determinado. Este indicador influye en procesos de formación y desarrollo de suelos, disponibilidad de nutrientes, actividad biológica del suelo y descomposición de materia orgánica, y la disponibilidad de elementos tóxicos. Según dicho autor, suelos con pH bajo 4,0 se consideran ácidos y sobre 8,5 como alcalinos (Pérez, 1999; Honorato, 2000).

1.4.3. Características biológicas

La materia orgánica consiste en residuos de plantas y animales que se depositan en los suelos, y se encuentra en constante descomposición gracias a la actividad de microorganismos, con la salvedad del humus que teniendo una estructura proteica compleja y de alto peso molecular se resiste al ataque microbiano. Dicho coloide orgánico cumple roles similares a la fracción inorgánica de arcillas y limos en los suelos facilitando la disponibilidad de nutrientes, dada su alta superficie específica e influye también en la estabilización de suelos donde, por ejemplo, en suelos arenosos incrementa la retención de agua y en suelos más pesados mejora la aireación e infiltración del agua (Pérez, 1999). A nivel químico, la materia orgánica incrementa la capacidad de intercambio catiónico y el poder tampón de los suelos, y a nivel biológico, por su parte, permite el desarrollo de la vida, reduce y secuestra sustancias tóxicas como herbicidas y favorece el control biológico de plagas y enfermedades de los cultivos. Este contenido de materia orgánica está dado por la acción conjunta del clima, la vegetación, la topografía, el material parental y la acción antrópica donde esta última a través del laboreo del suelo particularmente genera una tendencia de disminuir su contenido (Honorato, 2000).

Honorato (2000) distingue los componentes orgánicos entre sustancias húmicas y no húmicas, donde la primera solamente se considera como la fracción estabilizada de la materia orgánica como calidad de coloide. La síntesis de las sustancias húmicas se lleva a cabo gracias a los microorganismos del suelo en dos fases, la primera consiste en la mineralización de la materia orgánica y luego la humificación entendida como la síntesis de sustancias húmicas a través de procesos bioquímicos y químicos. Estructuralmente, el humus a grandes rasgos posee una

estructura altamente compleja y comprende núcleos orgánicos, grupos reactivos y unidades de puente y se distingue entre dos fracciones, los ácidos fúlvicos de naturaleza móvil y químicamente agresivos y los ácidos húmicos de comportamiento contrario.

1.4.4. Agua en el suelo y relaciones hídricas

El agua en el suelo dentro del ciclo hidrológico representa la principal fuente de hidratación de los cultivos ya que allí se logra almacenar y entregar gradualmente cuando el cultivo lo requiera. Brevemente el agua primero infiltra por los macroporos para luego quedar retenida en los microporos y el exceso de agua procede a percolar a estratas más profundas. El agua es importante para el transporte durante la génesis de suelos, es utilizada por la planta para sus procesos fisiológicos, metabolismo, y transporte de nutrientes (Pérez, 1999; Honorato, 2000; Casanova et al., 2004).

La mecánica del agua en el suelo se puede entender desde el punto de vista energético ya que la planta debe superar una cantidad de energía variable para poder extraerla del suelo para su crecimiento y desarrollo, donde además cuánta agua retendrá el suelo dependerá de las características mismas del suelo observado. Dicha energía es en realidad una medida de las fuerzas a las que se encuentra sometida el agua, repercutiendo en su disponibilidad para las plantas, su traslado y propiedades mecánicas expresado como una diferencia de potencial entre puntos. Este potencial de agua es una medida de la disminución de la energía libre del agua en el suelo tras la acción de las fuerzas que actúan sobre ella y este nivel de energía indica la tendencia del agua al cambio. Este contenido de energía se puede cuantificar en términos de presión en un punto determinado por ende una mayor presión se entenderá como una mayor tendencia del agua a moverse al poseer un mayor contenido de energía. Se distingue tres fuerzas que actúan sobre el agua en el suelo: las fuerzas asociadas a la matriz del suelo, llamadas también potencial mátrico, que guardan relación con la adhesión del agua a las partículas del suelo, la cohesión que se observa debido a los efectos capilares y las fuerzas de difusión. Luego, las fuerzas derivadas de los iones en suspensión provocada por ellos mismos al encontrarse suspendidos en la solución suelo que generan un potencial negativo y finalmente la fuerza de gravedad que generan un potencial

positivo. En conjunto, ellas tres van a repercutir en la medida de la disminución de la energía libre del agua determinando su disponibilidad para las plantas (Pérez, 1999; Honorato, 2000).

Los suelos si bien pueden retener capacidades variables de humedad en función de sus propiedades físicas tal y como la estructura o la porosidad, poseen usualmente algunas de las siguientes situaciones de humedad como por ejemplo saturación, donde todos los poros del suelo se encuentran llenos de agua, o capacidad de campo considerado como punto óptimo de humedad y aireación para las plantas donde el suelo drenó libremente el exceso de agua, o el punto de marchitez permanente entendido como el punto donde las plantas ya no son capaces de extraer el agua provocando su marchitamiento o finalmente un punto intermedio entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente llamado humedad aprovechable por las plantas (Honorato, 2000). A medida que se avanza en la sequedad del suelo desde la capacidad de campo hacia el punto de marchitez permanente, la tensión entendida como la energía requerida por la planta para obtener dicha agua incrementa del mismo modo.

La dinámica del agua en el suelo, según describe Pérez (1999) se distinguen entre movimientos de flujo saturado gobernado por la ley de Darcy donde todos los poros se encuentran llenos de agua, movimientos en suelos insaturados donde aquí el flujo de agua se establece entre dos puntos del suelo con cantidades de agua menor al estado saturado y la infiltración. En particular, Honorato (2000) caracteriza los movimientos de flujo insaturado destacando que la conductividad hidráulica entendida como la facilidad con la que un fluido se mueve por un espacio poroso va a ser mayor en suelos arenosos y menor en suelos arcillosos a bajos niveles de tensión y se observará el comportamiento opuesto bajo tensiones altas. Asimismo, el autor indica sobre la infiltración que corresponde al movimiento usualmente vertical del agua entrando al suelo en una primera etapa y que se ve afectada por las características físicas del suelo tales como porosidad y estructura, entre otros, junto con la calidad del agua.

1.4.5. Sistema de clasificación de capacidad de uso de los suelos y taxonomía

Esta clasificación agrupa los suelos en función de su capacidad productiva dentro de sistemas agrícolas y progresa desde la capacidad de uso I a la VIII con crecientes restricciones, limitaciones

y riesgos de uso. A grandes rasgos, las primeras cuatro clases (I al IV) si bien son aptos para su uso y presentan crecientes limitaciones en la elección de los cultivos dada la pendiente, la profundidad del suelo, retención de agua y drenaje, donde a modo de ejemplo la clase I es plana o casi plana, profunda, bien drenada, de fácil laboreo y la fertilidad natural es buena contrastando con la clase IV que restringe severamente la elección de cultivos por ser muy delgados, ondulados, con mala capacidad de retención de agua y drenaje. Especialmente las dos primeras clases admiten libremente cultivos sin restricciones. Desde la clase V en adelante ya no se consideran adecuados para mantener un cultivo por comenzar a tener algún riesgo de erosión y tener limitantes difíciles de resolver como pedregosidad, tendencia al anegamiento o presentes en zonas con limitaciones climáticas. La clase VI ya solo puede ser utilizada para labores de ganadería o forestal, con pendientes pronunciadas, susceptibles a erosión y excesiva humedad, entre otros. En la clase VII se hace aún más difícil asignarle un uso con las mismas limitantes del anterior, y el VIII ya carece de valor productivo en lo absoluto (Honorato, 2000).

Los principales sistemas de clasificación taxonómica de suelo corresponden a los desarrollados por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) llamado “Soil Taxonomy” y otro desarrollado por la FAO, organismo amparado en las Naciones Unidas. En Chile se adoptó la clasificación “Soil Taxonomy”.

El sistema “Soil Taxonomy” reconoce 6 categorías en jerarquía decreciente: orden, suborden, gran grupo, subgrupo, familia y serie.

Los 12 órdenes corresponden a los Entisoleless, Inceptisoleless, Aridisoleless, Mollisoleless, Espodosoleless, Alfisoleless, Ultisoleless, Oxisoleless, Vertisoleless, Histosoleless, Andisoleless y Gelisoles (Honorato, 2000). Los inceptisoles corresponden a suelos jóvenes, incipientes y se encuentran en el inicio del desarrollo de sus horizontes genéricos (Pérez, 1999). Los vertisoles corresponden a suelos “invertidos” con altas cantidades de arcillas montmorilloníticas. Los alfisoles son suelos de regiones húmedas con calcio lixiviado donde se encuentran acumulaciones de aluminio y hierro en el subsuelo (Pérez, 1999).

Luego se encuentran 53 subórdenes que guardan relación con los elementos formativos para complementar a los órdenes dado la heterogeneidad de éstos, donde se especifican por ejemplo tipos de climas, colores, texturas generales y regímenes de humedad. Luego se encuentran el gran grupo y los subgrupos que ahondan más en estas características.

Las familias componen grandes clases texturales mineralogías y temperatura del suelo para al considerar propiedades importantes en el crecimiento de las plantas (Pérez, 1999).

Las series, finalmente indican diferencias menores en textura, mineralogía y espesores complementando la clasificación de familias corresponde a una jerarquía homogénea dado que las fluctuaciones en las propiedades son marginales y puede ser fácilmente comprendido (Pérez, 1999).

Los andisoles son suelos antiguos o trumaos y provienen de cenizas volcánicas, en donde predominan las arcillas alofanas con gran actividad del aluminio por ende fijador de fosforo (Honorato, 2000).

La Base Mundial de Referencia (WRB) se encuentra basada originalmente en el mapa mundial de suelos de la FAO-Unesco, 1971-1981 y lleva tres ediciones, siendo la última publicada el año 2014 (WRB, 2015). El sistema organiza los grupos de suelos en 32 Grupos de Suelo de Referencia (RSG) y basa su clasificación en términos de los horizontes diagnóstico, propiedades de diagnóstico y materiales de diagnóstico donde los parámetros climáticos se dejan de lado para ser ocupados solamente con objetivos de interpretación por ende dichos grupos no están subordinados a información climática. Taxonómicamente, la primera jerarquía corresponde a los 32 RSG y la segunda corresponde al nombre del RSG con calificadores principales y suplementarios.

Los cambisoles corresponden a un grupo de referencia que combina suelos con un horizonte superficial incipiente (WRB, 2015). Brevemente, los cambisoles contienen al menos un inicio de horizonte de diferenciación en el subsuelo el cual es evidente por cambios estructurales, en el color o en los contenidos de carbonatos y arcillas (WRB, 2015). Se caracterizan por tener en su perfil una leve a moderada meteorización del material parental y de una ausencia de arcillas aluviales,

materia orgánica e iones de Al y Fe. Regionalmente se distribuyen en lugares templados o boreales que fueron sujetos a glaciaciones durante el Pleistoceno, en parte dado que el material parental está todavía joven y también por los lentos procesos de formación de suelo en zonas templadas, pudiendo encontrarse también en zonas áridas (WRB, 2015).

El calificante “Calcico” (cc) corresponde a la particularidad de un suelo que tiene un horizonte cálcico comenzando en los primeros 100 cm de perfil desde la superficie del suelo (WRB, 2015).

Tras contrastar las características del suelo de la V Región de Chile utilizado en este trabajo con ambas claves taxonómicas se puede afirmar que existen similitudes suficientes entre los andisoles de “Soil Taxonomy” y los Cambisoles cálcicos de la WRB de la FAO para establecer una equivalencia entre ambas.

En líneas generales, Casanova et al. (2004) señalan que Chile posee suelos jóvenes en su evolución debido a la influencia de la Cordillera de Los Andes y la fuerte pendiente que forma contra el océano Pacífico. En este sentido a grandes rasgos, la depresión intermedia posee suelos con origen de depósitos glaciares, fluvio-glaciales y aluviales, dando origen a los suelos más explotados y poblados a nivel nacional. En particular, los suelos de la Región de Valparaíso son parte de suelos de la zona mediterránea árida, donde la depresión intermedia se encuentra como la zona de mayor actividad agropecuaria (Luzio, 2010). Los suelos que componen esta zona provienen de las alturas de la Cordillera de los Andes que los acarreó como masa de hielo, lahares o arrastres aluvionales para ser depositados como relleno en los valles. Esta depresión plana hasta levemente ondulada se considera una fosa tectónica (graben) flanqueada por la Cordillera de Los Andes hacia el oriente y una Cordillera de la Costa hacia el poniente y no corresponde a una unidad continua; está constituida de varias cuencas de origen tectónico con diversas dimensiones y sedimentos de diverso origen (Luzio, 2010). Para la Depresión Intermedia de dicha región, según Casanova et al. (2004), se hayan suelos: aluviales en terrazas o planicies, de cuencas aluviales sobre diferentes sedimentos o “rojos arcillosos”.

1.5. Elementos químicos y compuestos bioquímicos analizados en el estudio

1.5.1. Nitrógeno

Es uno de los elementos más requeridos al interior de la planta al cumplir papeles críticos en el metabolismo como por ejemplo constituir diversas biomoléculas, ser parte de moléculas como la clorofila o mensajeros y metabolitos celulares (Hawkesford et al., 2011) y la enzima Rubisco (Nowicka et al., 2018). Tras ser absorbido como nitrato u amonio, el N es asimilado por la planta en forma de aminoácidos en las raíces o los tallos, y se movilizará al interior de ella como nitrato o aminoácidos (Hawkesford et al., 2011).

1.5.2. Potasio

El ion potasio es el catión de mayor abundancia en la célula vegetal y cumple un rol crítico en la regulación de la apertura estomática (Hawkesford et al., 2011). Un adecuado balance de K^+ bajo condiciones de estrés abiótico permite que las plantas mantengan el balance de ROS en tejidos sin generar daños en ellos protegiendo a su vez la actividad fotosintética (Cakmak, 2005). Bajo condiciones de estrés hídrico, además el ion K^+ aplicado exógenamente reduce el estrés hídrico al proteger la clorofila y mantener la integridad de las membranas regulando el flujo de protones en los canales de K^+ junto con inducir la fotosíntesis (Ahmad et al., 2018). Este ion también cumple un rol relevante en el mantenimiento del crecimiento bajo condiciones salinas de suelo ya que proporciones altas de K^+/Na^+ le permitirán a la planta proseguir su crecimiento (Shabala y Cuin 2008).

1.5.3. Calcio

En los vegetales el calcio es un catión cumple un rol importante en la percepción de estrés hídrico ya que al interior de la célula actuará como mensajero secundario y activará la señalética necesaria para responder al estrés hídrico modulando el equilibrio redox y la protección antioxidante contra las ROS a través las señales de traducción vía CDPKs (Ilyas et al., 2021).

1.5.4. Osmoprotectores

Los osmoprotectores son moléculas de diversa naturaleza química que se acumulan al interior de ellas bajo condiciones particulares de estrés como por ejemplo el estrés hídrico y cumplen diversos roles al interior de la célula (Singh et al., 2015).

La prolina es un aminoácido y la glicinbetaína es un aminoácido cuaternario (Singh et al., 2015). La prolina es un aminoácido que se sintetiza desde el glutamato o la ornitina (Zhang y Becker, 2015) y la glicinbetaína es un compuesto del amonio cuaternario que proviene de la unión de los aminoácidos colina y glicina (Sakamoto y Murata, 2002).

La trehalosa, manitol, sorbitol y fructano son osmolitos azucarados o alcoholes azucarados que del mismo modo cumplen funciones osmoreguladoras (Hayat et al., 2012; Singh et al., 2015).

Se ha visto que los osmoreguladores prolina y glicinbetaína son capaces de secuestrar los radicales libres que se generan durante procesos oxidativos al interior de la célula (Shabala y Shabala, 2011). Por ejemplo, La prolina actúa como un eficiente secuestrador directo de los radicales hidroxilo ($\text{HO}^\bullet$) y oxígeno singular ($^1\text{O}_2$) junto con inhibir el daño por peroxidación de lípidos (Das y Roychoudhury, 2014).

Los osmoreguladores poseen la capacidad de mantener una presión de turgor lo suficientemente negativa para impedirle a la célula entrar en un estado de deshidratación (Blum, 2017). Por ejemplo, tras ocho semanas de mantener plantas de *Lolium perenne* sin riego se evidenció una acumulación de fructano y prolina en los tejidos aéreos la cual decreció drásticamente tras el riego (Thomas, 1991). No obstante, también se ha visto que en la misma especie, diferentes ecotipos no acumularon prolina sino más bien los osmoprotectores azucarados (Foito et al., 2009). Recientemente se ha visto que acumulaciones de prolina en maíz han incrementado la eficiencia fotosintética del PSII y retardado la degradación de la clorofila (Altuntaş et al., 2020). Respecto a los efectos en el estrés salino, prolina permite a las plantas activar las estrategias antioxidantes junto con una mayor incorporación de K^+ en desmedro de los iones Na^+ y Cl^- (El Moukhtari et al., 2020). Para el caso de *Stipa* ya se ha detectado una retroalimentación positiva en los genes de esta

especie que codifican para la síntesis de prolina cuando la planta se encuentra bajo estrés hídrico (D. Yang et al., 2021). Finalmente, también se ha visto que en *Stipa caudata* este osmolito aumenta cuando éstas se han sometido a escasez hídrica (Molina et al., 2022).

Si bien la producción de radicales libres como parte del metabolismo celular es un proceso necesario para el crecimiento y desarrollo, cuando este equilibrio se rompe, los radicales libres no logran ser neutralizados adecuadamente y comienzan a dañar el interior de la célula impidiendo su normal funcionamiento (Mittler, 2017). Entre estos estímulos negativos se encuentran los estreses abióticos como el causado por la escasez hídrica (Das y Roychoudhury, 2014).

Para mantener el balance electroquímico, la célula goza de un complejo sistema que neutraliza las especies reactivas de oxígeno que está conformado por dos componentes: las estrategias antioxidantes enzimáticas se componen de enzimas que catalizarán el secuestro de los radicales libres y las estrategias no enzimáticas se compondrán de moléculas que tomarán el rol de sustrato como cofactores y buffers o también directamente secuestrando los radicales libres (Das y Roychoudhury, 2014).

1.5.5. Estrategias antioxidantes no-enzimáticas

El ciclo de AsA-GSH es el principal mecanismo de neutralización de radicales libres que le permite a la célula protegerse del daño estructural provocado por estas moléculas (Sharma et al., 2019). Este ciclo permite neutralizar principalmente el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y los radicales oxígeno singular ($O_2^{\bullet}$) junto con el radical hidróxilo ($HO^{\bullet}$ y $HO_2^{\bullet}$) al fijarlos y estabilizarlos al interior de moléculas de agua y oxígeno atmosférico.

El ácido ascórbico, molécula hidrosoluble de bajo peso molecular que actúa como cofactor enzimático, modulando la expansión y división celular, influye en la floración y es un regulador de genes. Su estado oxidado es el ácido ascórbico (AsA) y sus estados reducidos son el monodehidroascorbato (MDHA) y el dehidroascorbato (DHA) (Sharma et al., 2019).

Glutación, es un tripéptido no proteico de bajo peso molecular, actuando como buffer en el balance redox y actuando en el transporte y almacenamiento del sulfuro. Dado su alto poder reductor le permite a la célula llevar a cabo síntesis aminoacídica y proseguir con el crecimiento y desarrollo. Es también capaz de secuestrar directamente radicales libres. Su estado reducido es el glutación (GSH), así como su estado oxidado es el GSSG (glutación disulfhidro) (Sharma et al., 2019).

Los tocoferoles funcionan como secuestradores directo de especies reactivas de oxígeno debido a la presencia de su anillo benzoquinonico y cadena de fitilos reducidos que actúan como reductores (Sharma et al., 2019).

Los carotenoides son isoprenoides capaces de secuestrar directamente los radicales libres debido a su gran número de enlaces dobles en su cadena de residuos isoprénicos (Sharma et al., 2019).

Por otra parte entre los compuestos fenólicos se distinguen los flavonoides, los fenilpropanoides y los ácidos fenólicos. Se encargan de secuestrar directamente los radicales libres a través de sus anillos aromáticos con grupos hidroxilo (-OH) y metoxi (-OCH₃) (Sharma et al., 2019).

Los flavonoides se destacan por también ser oxidados por la GPX formando parte del ciclo AsA-GSH.

Por su parte los compuestos fenólicos son capaces de quelar metales en tejidos vegetales cuando estos han sido expuestos a estrés por toxicidad de metales pesados (Sharma et al., 2019).

1.5.6. Estrategias antioxidantes enzimáticas

Albergan las enzimas encargadas de mantener el balance de radicales libres al interior de la célula manteniendo estas moléculas en niveles no tóxicos (Sharma et al., 2019).

Guaiaacol peroxidasa pertenece a la familia de peroxidasas. Las peroxidasas vegetales que comúnmente utilizan guaiaacol son llamadas GPX. Su rol es convertir H₂O₂ en H₂O y O₂. Poseen 4 puentes sulfidro y dos iones estructurales Ca²⁺ (Sharma et al., 2019). Se ha evidenciado que en

plantas de maíz una mayor actividad antioxidante incluyendo una mayor actividad de POD ha sido relacionada con un menor daño estructural y un mayor contenido de agua (Moussa y Abdel-Aziz, 2008). También en trabajos con trigos tolerantes y sensibles midiendo actividades enzimáticas similares se han constatado resultados similares (Weng et al., 2015; Khayatnezhad y Gholamin, 2021).

La superóxido (SOD) dismutasa es una metalo-enzima característica de los organismos aeróbicos, presente a través de tres isoenzimas, Cu/ZnSOD, MnSOD y FeSOD. Se ha visto que la actividad de la enzima incrementa en plantas bajo condiciones de estrés hídrico y toxicidad de metales (Pessarakli, 2020). Se ha observado que los genotipos de trigo tolerante al estrés hídrico han incrementado sus concentraciones de SOD (Weng et al., 2015) como también clorofila (Khayatnezhad y Gholamin, 2021) en sus tejidos en comparación con aquellos trigos sensibles. Respuestas similares se han evidenciado también en maíz (Moussa y Abdel-Aziz, 2008).

La catalasa (CAT) es una enzima que contiene un grupo heme-tetramérico. La CAT convierte directamente el peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno, el cual proviene principalmente de la oxidación fotorrespiratoria. Existen tres clases de CAT, cada una sintetizada en diferentes tejidos dependiendo de su actividad fotosintética (Sharma et al., 2019). En plantas de trigo se ha evidenciado que un aumento de la presencia de CAT en conjunto con otras enzimas podría estar relacionado con la tolerancia al estrés hídrico en genotipos resistentes (Weng et al., 2015). Respuestas similares se han evidenciado en maíz (Moussa y Abdel-Aziz, 2008).

La enzima ascorbato peroxidasa (APX) es una peroxidasa con grupo heme, que utiliza dos moléculas de AsA para convertir H_2O_2 en H_2O y generar dos moléculas de MDHA. Tiene una mayor afinidad al H_2O_2 . Se ha visto que su actividad incrementa bajo estrés hídrico (Sharma et al., 2019). Estudios con variedades de frijol tolerantes y sensibles al estrés hídrico mostraron que las variedades que incrementaron su actividad antioxidante, entre ellas la actividad de la enzima APX correspondían a las mismas variedades tolerantes a la escasez hídrica (Kusvuran y Dasgan, 2017).

La monodehidroascorbato reductasa es la enzima encargada de reciclar el AsA, catalizando su reducción desde el MDHA. Los electrones donados para la reducción provienen del citocromo, de

la ferredoxina reducida o del NAD(P)H. Se ha visto que la actividad de esta enzima ha incrementado cuando las plantas se han sujeto a estrés hídrico (Sharma et al., 2019).

La dehidroascorbato reductasa es la enzima tiol monomérica que tiene como función el reducir la DHA de vuelta a AsA. Esto se lleva a cabo usando el GSH como sustrato reductor dando como resultado la AsA y GSSG. La actividad de esta enzima se ha visto incrementada cuando los tejidos vegetales han sido expuestos a estrés hídrico (Sharma et al., 2019).

La glutatión reductasa (GR) es una enzima dependiente de NAD(P)H y que encuentra principalmente en tejidos fotosintéticos en isoformas cloroplásticas. La catálisis que media involucra dos pasos y utiliza flavinas para llevarse a cabo, y ocupa la GSSG y NAD(P)H para dar como resultado glutatión y NAD(P). Se ha observado que bajo condiciones de estrés hídrico, la actividad de esta enzima ha incrementado (Sharma et al., 2019).

Como consecuencia del estrés hídrico, las plantas muestran un desbalance en la producción de ROS dado por un exceso de especies reactivas de oxígeno que a nivel celular va a causar un daño en las macromoléculas al interior de ella e incluso en algunos casos la muerte celular (Cruz de Carvalho, 2008, Singh et al., 2015). Incrementos en la concentración de antioxidantes bajo estrés hídrico se han observado en maíz (*Zea mays*) (Jiang y Zhang, 2002) soya (*Glycine max*) (Hassan et al., 2011) y plantas de *Festuca rubra* y *Lolium perenne* (Bandurska y Józwiak, 2010). No obstante, los niveles crecientes de escasez hídrica al que las plantas se someten no indican necesariamente una respuesta lineal (Kavas et al., 2013).

1.5.7. La asimilación del N

Las raíces y hojas absorben activamente el nitrato para luego ser reducido a nitrito (NO_2^-) en el citosol. Las hojas también son capaces de asimilar el nitrato. Las plantas adquieren el nitrato desde las raíces gracias a la acción de transportadores de membrana que participan en la absorción, el transporte y el almacenamiento de esta molécula (Chamizo-Ampudia et al., 2017).

Nitrato reductasa es un homodimero con tres grupos prostéticos (Masclaux-Daubresse et al., 2010). Esta enzima tiene como función el catabolizar la reducción del nitrato citosólico en nitrito (Tejada-

Jimenez et al., 2019, Kishorekumar 2020). Actualmente se propone que esta enzima es la principal responsable de la producción de NO en vegetales (Chamizo-Ampudia et al., 2017; Tejada-Jimenez et al., 2019). NR se considera como la primera enzima encargada de la asimilación del N en aminoácidos (Kishorekumar et al., 2020).

El óxido nítrico es una molécula gaseosa que cumple un rol crítico como mensajero secundario en la señalización celular sujeta a estrés (Tejada-Jimenez et al., 2019) actuando como co-mensajero del ion Ca^{2+} (Besson-Bard et al., 2008).

Esta molécula tiene como roles de mensajero secundario el controlar el crecimiento y desarrollo de la célula vegetal, la cascada de expresión génica frente a patógenos, mediar la muerte celular programada, promover la actividad enzimática de enzimas secuestradoras de ROS y promover el cierre estomático (Verma et al., 2020).

El ciclo GS-GOGAT es la cadena de reacciones que permite la incorporación del N en aminoácidos a través de reacciones de transaminación involucrando glutamato y glutamina (Kishorekumar et al., 2020). En este ciclo se ocupan los esqueletos carbonatados provenientes de los intermediarios de la glicolisis y el ciclo del ácido cítrico. Brevemente, los sustratos nitrogenados (NO_3^- , NH_4^+ , N_2) reaccionan primeramente con una molécula de glutamato generando glutamina (Gln) a través de una reacción catalizada por la Glutamina Sintasa (GS) (Hawkesford et al., 2011). Posteriormente Gln reacciona con el esqueleto carbonatado 2-oxoglutarato proveniente del ciclo del ácido tricarboxílico para generar dos moléculas de glutamato (Glu) catalizado por la Glutamato Sintasa (GOGAT) (Hawkesford et al., 2011). El glutamato producido será posteriormente transaminado para dar origen a las primeras formas de aminoácidos ensamblados en la célula (Hawkesford et al., 2011). La Figura 3 resume las transformaciones clave de este ciclo.

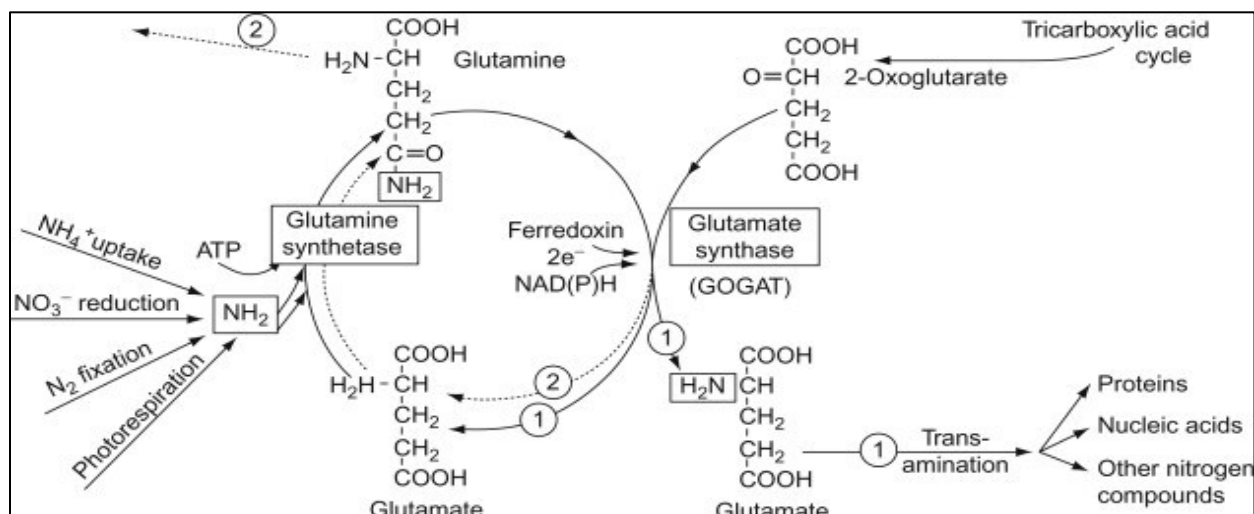


Figura 3. Esquema del ciclo GS-GOGAT. (Capone et al., 2008).

Las aplicaciones de N foliar a hojas o como fertilizante aplicado al suelo han repercutido positivamente en situaciones de estrés hídrico en girasoles (Ahmad et al., 2014). Efectos similares se han visto también en cultivos oleaginosos, donde se indica que la aplicación de enmiendas con aportes nitrogenados generan una reducción del estrés hídrico (El Sabagh et al., 2019). En maíz se indica que una fertilización nitrogenada adecuada desencadena la mayor reactivación de la enzima NR hasta cierto punto si las plantas se encuentran bajo un estrés hídrico moderado (Song et al., 2019). Respecto a la actividad enzimática encargada de la asimilación del N, si bien el estrés hídrico disminuye la actividad de la nitrato reductasa, las aplicaciones de N exógeno han probado incrementar su actividad (Song et al., 2019).

1.5.8. Ácido Salicílico y su efecto sobre las plantas

El ácido salicílico (SA) corresponde a un compuesto fenólico con presencia de anillo aromático que pertenece a la familia de los salicilatos donde también se halla el ácido acetil salicílico (ASA), el metil salicilato (MeSA), la saligenina (SA alcoholizado) y otros glucósidos. Esta familia de compuestos ha sido conocida desde las culturas clásicas por sus propiedades médicas desde donde se asoció a la corteza y hojas de *Salix sp.* Los primeros aislamientos del fenol, su síntesis en laboratorio y la síntesis del AAS que constituye un hidrolizado menos irritante para el sistema digestivo humano se remontan al siglo XIX (Vlot et al., 2009; An y Mou, 2011).

En vegetales se han propuesto dos posibles vías metabólicas para su biosíntesis que finalizan en ácido salicílico; en un principio el corismato podría ser isomerizado por la isocorismato sintasa (ICS) o con ayuda de la fenilalanina amonio liasa (FAL) (Davies, 2004; Chen et al., 2009; Miura y Tada, 2014). La ruta metabólica que genera el ácido salicílico dentro de las plantas más reciente fue propuesta por Khan et al. (2015).

Se ha observado que la incubación de plantas de tomate con SA provocó en ellas un incremento en su tolerancia a la salinidad (Tari et al., 2002), mientras que en maíz tanto su aplicación foliar (Khodary, 2004) como al suelo (Gunes et al., 2005) disminuyen los efectos negativos de estos estreses aumentando el crecimiento. En plantas de maíz bajo estrés salino se observó adicionalmente un mejor control de la concentración de cloro en tejidos (Gunes et al., 2007). Adicionalmente se ha visto que la aplicación de SA a las semillas de plántulas de melón o la aplicación foliar disminuye el daño por estrés hídrico (Korkmaz et al., 2007). En trigo (*Triticum aestivum*) se ha observado que aplicaciones foliares de SA a bajas concentraciones ha alcanzado los mayores rendimientos bajo estrés hídrico midiendo valores de clorofila y conductancia estomática (Kareem et al., 2017). Kabiri y Naghizadeh (2015), por su parte, realizaron un experimento con plantas de cebada (*Hordeum vulgare*) donde evidenciaron diferencias significativas en el crecimiento, acumulación de biomasa y contenido de agua para aquellos tratamientos hormonales sometidos a escasez hídrica.

Entre otros roles adicionales del SA, se establece que aplicaciones exógenas adecuadas incrementan la tolerancia al estrés de toxicidad provocado por metales pesados al repercutir en la modulación de la cascada de estrategias antioxidantes, la estimulación de síntesis de osmoprotectores, metabolitos secundarios y compuestos quelantes de metales pesados (Kohli et al., 2017). En este sentido, se ha visto que aplicaciones conjuntas de SA y óxido nítrico han mitigado los efectos negativos en el crecimiento de plantas de cártamo sujetas a estrés por toxicidad de zinc, observándose un incremento de la actividad enzimática de GSH y APX (Namdjoyan et al., 2017).

1.5.9. Los biosólidos y su uso agronómico

Los biosólidos corresponden a un producto del tratamiento de aguas servidas siendo un subproducto residual que presentan acumulaciones de sólidos orgánicos sedimentables y semisólidos o líquidos producidos durante el proceso de tratamiento mecánico, biológico y/o químico de purificación de éstas (Pepper et al., 2008; Zhang et al., 2017; Palansooriya et al., 2020).

Los biosólidos presentan una composición mineral suficiente como para ser utilizado como abono (Sharma et al., 2017, Palansooriya et al., 2020). En este sentido, se ha visto que estos agregan tanto N como P necesario para los cultivos, pero a pesar de esto cada cultivo presenta una respuesta específica frente a la aplicación de lodos, pudiendo ser beneficiosa o perjudicial (Haney et al., 2015). Los biosólidos por su alto contenido de materia orgánica suelen ser utilizados en suelos degradados o perturbados (Lu et al., 2012) para mejorar los parámetros físicos, químicos y biológicos de los suelos (Fernández-Getino et al., 2012; Lu et al., 2012). Experiencias de su utilización para fitoremediación de relaves mineros, han reportado efectos positivos no solo en la fertilidad del suelo sino también en el crecimiento de las especies vegetales que se han establecido (Verdugo et al., 2010; Santibañez et al., 2012).

En Chile la producción de lodos activados se desglosa en dos clases: Clases A y Clase B, distinguiéndose la primera de la segunda principalmente por un mayor proceso de esterilización de elementos vivos potencialmente dañinos para la población (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2009) y cada planta de tratamiento tiene ya preestablecido sus prerrogativas en producción de los lodos. Los biosólidos particularmente utilizados en esta investigación fueron obtenidos en la PTAS “La Farfana” de la ciudad de Santiago, Chile. Las indicaciones vigentes para la producción y directrices del monitoreo establecen que allí se generan lodos activados de Clase B (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2019).

De acuerdo a Sharma et al. (2017) los biosólidos pueden mejorar las características físicas del suelo como lo son la densidad aparente, porosidad y la retención de agua lo que podría afectar la estabilidad nutricional de un cultivo en el suelo. Kranz (2020) en su estudio comprensivo también indica que la aplicación de biosólidos a suelos provoca una reducción de la densidad aparente, una

mayor infiltración de agua, conductividad hidráulica, contenido de agua y agua disponible para las raíces.

Los biosólidos pueden presentar también metales pesados tóxicos por lo que su uso debe ser cuidadosamente manejado al ser agregados a los suelos (Collivignarelli et al., 2019). En este sentido, el pH es una propiedad relevante al momento de aplicar los biosólidos debido a la presencia de metales pesados (Smith, 2009; Latosińska et al., 2021) pudiendo provocar aumentos en las concentraciones del suelo a enmendar (Verdugo et al., 2010).

Asimismo, los biosólidos con tratamientos de estabilización previa presentarán bajo contenido de sales disueltas, por lo que el lavado previo de los biosólidos lixiviará las sales disminuyendo la CE (Weggler-Beaton et al., 2000). Sin embargo, el aumento de la CE dependerá del contenido de sales que son transmitidas al suelo (Hosseinpour 2013; Pease et al., 2022).

Cuando en los suelos agrícolas se han aplicado desechos orgánicos, estos han mostrado una mejora significativa en las propiedades del suelo como la capacidad de almacenamiento de C orgánico del suelo (Torri et al., 2014). No obstante a esto, la composición química de los biosólidos también provoca que los microbios del suelo se sometan a condiciones tóxicas lo que lleva a su inactivación o muerte pudiendo disminuir la fertilidad del suelo enmendado (Buta et al., 2021).

Los biosólidos contienen contaminantes inorgánicos que provienen de los efluentes de las aguas residuales donde destacan mayoritariamente los metales pesados Cu, Zn, Cd, Pb, Ni, Cr y As (Haynes et al., 2009). Tanto los biosólidos como los lodos municipales presentan una cantidad de metales pesados suficientemente alta para comenzar una acumulación a largo plazo en suelos sin historial previo de contaminaciones (Smith, 2009).

Diversos trabajos han evaluado en Chile los efectos de la incorporación de biosólidos en suelos degradados (Guerra et al., 2007; Celis et al., 2011; Antilén et al., 2014) y suelos contaminados con metales pesados (Verdugo et al., 2010; Santibañez et al., 2012). Investigaciones previas han reportado que los biosólidos mejoran principalmente parámetros biológicos al incrementar el

contenido de carbono orgánico en el suelo (Santibañez et al., 2012) y la cantidad de materia orgánica en los suelos tratados (Guerra et al., 2007; Antilén et al., 2014).

En parámetros químicos, se observó un incremento en la biodisponibilidad de los metales pesados (Ahumada et al., 2014) quizás debido a las concentraciones de ácido fúlvico que pueden incrementar la solubilidad de los metales y por ende su biodisponibilidad (Verdugo et al., 2010; Santibañez et al., 2012).

En plantas de *Lolium arundinaceum* sometidas a estrés hídrico se observó que la presencia de biosólidos con similares cantidades de macronutrientes en el suelo incrementó la tolerancia a la falta de agua, concomitantemente con un incremento significativo de la actividad antioxidante de POD y CAT (Zhang et al., 2012).

1.6. El estrés hídrico en plantas

1.6.1. Principales efectos

El estrés hídrico en vegetales es una condición desfavorable que repercute en la fotosíntesis, la acumulación de biomasa y finalmente en los rendimientos vegetales de los cultivos (Ahmad et al., 2014). La respuesta vegetal al estrés hídrico para poder sobrellevar el estímulo negativo que involucra principalmente cambios morfo-fisiológicos, bioquímicos, celulares y moleculares (Ilyas et al., 2021).

1.6.2. Efectos en la acumulación de biomasa

El estrés hídrico repercute en la fijación de esqueletos carbonatados por el cierre estomático, viéndose disminuida la producción de biomasa (Ahmad et al., 2018).

1.6.3 Estrategias para el control interno del contenido hídrico

En vegetales existen diversos modos para regular el estado hídrico: la distinción se hace en función de si la planta logra o no gestionar el contenido hídrico en los tejidos, donde están los organismos homoiohídricos que sí tienen control y los poiquilohídricos que no lo tienen (Kranner et al., 2008). Actualmente para los vegetales terrestres se hace una distinción entre las estrategias isohídrica y la anisohídrica donde la primera busca mantener constante el potencial hídrico foliar independiente del contenido de agua en el suelo solamente reduciendo su conductancia estomática para limitar la transpiración y la segunda modifica el potencial hídrico foliar manteniendo los estomas abiertos y la maquinaria fotosintética funcional por periodos de tiempo más largo haciendo peligrar al organismo bajo condiciones de riego deficitario severo (Sade et al., 2012). Si bien este modelo ha sido ya estudiado extensamente (Schultz, 2003; Attia et al., 2015), todavía se encuentra en discusión la importancia agronómica de estas estrategias (Sade et al., 2012).

1.6.3. Evidencia de efectos en plantas

En cultivos como el trigo, el desarrollo de raíces es un foco de atención para los mejoradores genéticos por mostrar potencial para aumentar los rendimientos (Farooq et al., 2014). Adicionalmente, la cantidad de raíces de la cebada también ha sido relacionada directamente con una mayor tolerancia al estrés hídrico (Chloupek et al., 2010). En poáceas perennes, un comportamiento que le permite a la planta la sobrevivir al estrés hídrico es el desarrollo de raíces en profundidad y densidad lo que le permite retrasar la deshidratación (Norton et al., 2016). Esta proliferación de raíces ha sido ya caracterizada a largo de la temporada de crecimiento en gramíneas invasivas de clima mediterráneo (Reyes y Aguiar, 2017).

2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

2.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es evaluar el efecto del sulfato de amonio, ácido acetilsalicílico y biosólidos en parámetros edáficos, fisiológicos, bioquímicos y productivos en *Stipa caudata* tratada bajo una condición de escasez hídrica.

2.2. Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de los tratamientos en la acumulación de iones en raíces y parte aérea en plantas tratadas bajo riego y escasez hídrica.
- Evaluar el efecto de los tratamientos en la producción de biomasa, altura de plantas, ancho y grosor de hojas en plantas tratadas bajo riego y escasez hídrica.
- Comparar el efecto de los tratamientos en la acumulación de osmolitos y MDA en plantas tratadas bajo riego y escasez hídrica.
- Comparar el efecto de los tratamientos en la actividad de enzimas relacionadas con la detoxificación de especies reactivas al oxígeno (ROS) en plantas tratadas bajo riego y escasez hídrica.
- Evaluar la dinámica hídrica edáfica en los sustratos en plantas tratadas bajo riego y escasez hídrica.
- Analizar el comportamiento histórico climático y agroclimático de las zonas en donde se obtuvo el suelo y material vegetal del ensayo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron cuatro experimentos independientes en las temporadas 2018-2019 y 2019-2020. En ambas temporadas se realizaron ensayos preliminares antes de los ensayos finales.

3.1. Periodo 2018-2019

3.1.1. Ubicación del estudio y condiciones experimentales

El ensayo preliminar se realizó en agosto, mientras que el ensayo final se realizó en septiembre, ambos al aire libre en las dependencias del bosque Santiago, Ministerio de Vivienda y Urbanismo, gobierno de Chile, ubicado en camino La Pirámide 6,000, Huechuraba, Región Metropolitana, Chile (33° 22' 38,6" S 70° 36' 3,6,8" O). Las temperaturas en agosto oscilaron entre -1 a 17,8 °C, con un promedio de 10°C, y una humedad relativa promedio de 66,4%. Las temperaturas durante septiembre oscilaron entre 2,8 a 31,6°C, con 12,6°C promedio, y una humedad relativa de 67,2% promedio (Agromet, 2018).

Los análisis se realizaron en la Facultad de Ciencias de la Universidad Mayor, Santiago de Chile en el período 2018 y COMAV, Universitat Politècnica de València, España, en el período 2019.

3.1.2. Ensayo preliminar

Se emplearon plantas de *Stipa caudata* extraídas del suelo en el mes de julio desde la comuna de La Pintana, Región Metropolitana, Santiago de Chile (33°57'18,39"S 70°63'15,75"O), donde crecen espontáneamente. Posteriormente, se transfirieron a macetas de 10 L con suelo del pie de monte de la comuna Rinconada de Los Andes, Región de Valparaíso, Chile (32°52'00,4"S 70°43'37,2"O; Tabla 1).

Previo al ensayo preliminar, se realizó una fertilización basal a los 23 días después del trasplante con una solución nutritiva a base de 0,1% N total y 3% K a una dosis de 1,5 L ha⁻¹. La misma dosis se repitió el día 37 después del trasplante. Las plantas se podaron dos veces y se cortaron a la altura de 10 cm del suelo de las macetas; la primera poda se realizó el mismo día de la primera fertilización basal y la segunda el día de inicio del ensayo preliminar en el mes de agosto, el cual

duró seis semanas consistiendo únicamente en tratamientos con ácido acetilsalicílico (AAS) y sulfato de amonio (SA) en plantas irrigadas hasta capacidad de campo (CC), con agua de riego de las instalaciones de Bosque Santiago.

3.1.3. Ensayo final

Las plantas fueron tratadas al inicio de ambos experimentos (preliminar y final) en macetas plásticas de 10 L que poseían una clase textural del tipo Franco Arenosa, que contenían 19% arcilla, 26% limo y 55% arena de un suelo Andisol (pH = 7,2, CE = 0,47 dS/m, materia orgánica = 1,5%; N, P, B ((deficientes); Ca, Mg, Mn (en exceso)) Tabla 1) con AAS 0,5 mM (0,09 g planta⁻¹) diluido en 30 mL de agua destilada y 2 g por maceta (20 g m⁻²) de SA aplicados ambos tratamientos al suelo (misma dosis empleada en el ensayo preliminar), pero esta vez en grupos de plantas Irrigadas (Regadas) y con restricción hídrica (RH). En el tratamiento Regadas, las plantas se regaron cada dos días hasta alcanzar el peso de maceta correspondiente a Capacidad de Campo y para el tratamiento RH, el período de restricción hídrica consistió en suspender el riego durante 14 días, deteniendo el ensayo cuando el 90% de las plantas RH presentaron síntomas de clorosis generalizada severa.

El diseño experimental utilizado para el ensayo final fue un diseño de parcelas de bloques al azar (PDBA) con cuatro repeticiones por tratamiento. La parcela principal correspondió al estado hídrico, Regado o falta de riego (RH), y la subparcela a los tratamientos con SA y AAS. Hubo 4 tratamientos con dos niveles por factor (4 tratamientos) con 8 repeticiones por tratamiento. Cada planta de *Stipa caudata* en maceta representó una unidad experimental (n = 32). En la Tabla 2 se indica el diseño experimental del ensayo final.

Tabla 1. Análisis del suelo empleado en ambos períodos.

Fertilidad	
pH	7,6
Conductividad eléctrica (dS/m)	0,47
Materia orgánica (%)	1,5
Nitrógeno disponible (mg/kg)	18
Fósforo disponible (mg/kg)	10
Potasio disponible (mg/kg)	125
Cationes intercambiables	
Calcio (meq/100 g)	17,1
% CIC	80
Magnesio (meq/100 g)	4,2
% CIC	20
Potasio (meq/100 g)	0,32
% CIC	1,5
Sodio (meq/100 g)	0,09
% CIC	0,42
Suma de bases ($\text{Ca}^+ \text{Mg}^+ \text{K}^+ \text{Na}$)	21,7
CIC (Cap. Intercambio cationico; meq/100 g)	21,5
Microelementos disponibles	
Hierro (mg/kg)	6,5
Manganeso (mg/kg)	25,5
Zinc (mg/kg)	2,2
Cobre (mg/kg)	6,7
Boro (mg/kg)	0,04
Textura	
Arena (2,00 - 0,05 mm; %)	55

Limo (0,05 - 0,002 mm; %)	26
Arcilla (< 0,002 mm; %)	19
Clase textural	Franco Arenosa

Tabla 2. Diseño experimental empleado en el ensayo final.

Bloque 1		Bloque 2		Bloque 3		Bloque 4	
Regadas	R.H.	Regadas	R.H.	Regadas	R.H.	Regadas	R.H.
T1	T3	T4	T2	T3	T3	T1	T2
T4	T4	T1	T1	T2	T1	T4	T4
T2	T2	T2	T4	T1	T2	T2	T1
T3	T1	T3	T3	T4	T4	T3	T3

T1 = AAS + SA; T2 = AAS; T3 = SA; T4 = Control

3.2. Período 2019-2020

3.2.1. Ubicación del estudio y condiciones experimentales

Se utilizaron plantas de *Stipa caudata* provenientes de la Comuna de La Pintana, Región Metropolitana, Santiago de Chile (33°26'40,42"S 70°39'3,43"O). Las plantas fueron desenterradas en el mes de abril directamente desde el suelo en sectores donde crecen espontáneamente. Posteriormente fueron instauradas en macetas de 1 L en suelo Andisol proveniente de pie de monte (que contenían 19% arcilla, 26% cal, 55% de arena con pH = 7,2, CE = 0,47 dS/m materia orgánica = 1,5 %, Tabla 1) de la comuna de Rinconada de Los Andes, Región de Valparaíso, Chile (32° 52'00,42' S 70°43'37,29' O).

Los biosólidos “clase B” (BS) agregados a los tratamientos fueron obtenidos de la planta de tratamiento de aguas servidas “El Trebal” perteneciente a la empresa Aguas Andinas, ubicada en la comuna de Padre Hurtado, Santiago de Chile (Tabla 3). Previo a su incorporación al suelo, los lodos activados fueron secados, disgregados y llevados a un tamaño menor a 2 mm con un tamiz.

Los análisis se realizaron en la Facultad de Ciencias de la Universidad Mayor, Santiago de Chile en la temporada 2019 y COMAV, Universitat Politècnica de València, España, en la temporada 2020.

Tabla 3. Análisis de biosólidos empleados.

Sólidos totales (%)	25,5
Sólidos volátiles (%)	62,5
Sólidos volátiles (g/L)	15,9
pH	8,6
Conductividad eléctrica (dS/m)	2,57
Macroelementos	
Nitrógeno total (g/kg)	54,45
Fosforo total (g/kg)	22,99
Potasio total (g/kg)	1,68
Calcio total (g/kg)	50,27
Magnesio total (g/kg)	7,58
Molibdeno total (mg/kg)	10,28
Sulfuro (g/kg)	119,25
Microelementos	
Cobre total (mg/kg)	449,83
Hierro total (g/kg)	21,388
Manganeso total (mg/kg)	281,42
Molibdeno total (mg/kg)	10,28
Níquel total (mg/kg)	66
Zinc total (g/kg)	1,1
Metales de transición	
Arsénico total (mg/kg)	13,83
Cadmio total (mg/kg)	<0,1
Cromo total (mg/kg)	91,63
Mercurio total (mg/kg)	1,22
Plomo total (mg/kg)	30,83
Selenio total (mg/kg)	<0,9
Huevos Parásitos (Huevos/4g)	
Recuento helmintos	70
Recuento huevos viables	58
<i>Salmonella</i> (NMP/4g)	20500
<i>Ascaris</i> total	1

<i>Diphyllbothrium</i> total	<1,0
<i>Dipylidium</i> total	<1,0
<i>Hymenolepis</i> total	63
<i>Taenia</i> total	1
<i>Toxocara</i> total	1
<i>Trichiuris</i> total	4
<i>Trichosomoides</i> total	<1,0

3.2.2. Ensayo preliminar

Previo al establecimiento del ensayo final, se realizó un ensayo preliminar en el cual las plantas fueron acondicionadas cuatro semanas bajo invernadero, regándolas semanalmente hasta alcanzar su Capacidad de Campo. Cuatro semanas previo al inicio del ensayo preliminar, se realizó una fertilización basal al suelo con una solución nutritiva en base a 0,1% de N total y 3 % de K, en dosis de 1,5 L ha⁻¹.

El ensayo preliminar comenzó a finales del mes de mayo y tuvo una duración de 53 días, concluyéndose debido a las bajas temperaturas invernales, con las cuales las plantas no lograron alcanzar síntomas de clorosis asociadas a estrés hídrico. El ensayo se realizó en invernadero, que presentó temperaturas que oscilaron entre -1 a 17,8 °C, con 10°C en promedio y una humedad relativa promedio de 66,4%.

Al inicio de los tratamientos las plantas fueron cortadas hasta 10 cm de altura y tratadas vía foliar con 1 mM de AAS y 200 ton/ha de BS (40 g maceta⁻¹). El diseño experimental empleado fue de parcelas divididas en bloques al azar (PDBA) con 4 tratamientos (2 niveles cada factor) y 8 repeticiones por tratamiento, en los cuales cada planta de *Stipa caudata* en una maceta representó una unidad experimental (n=32) (Tabla 4).

3.2.3. Ensayo final

El ensayo final se realizó en el mes de octubre, cuando las temperaturas ambientales y del invernadero fueron mayores (25°C-20°C con un promedio de 23°C, y el promedio de humedad relativa de 53%) concluyéndose 14 días después del inicio de este, cuando el 90% de las plantas

RH presentaron síntomas de clorosis general severa. Los tratamientos, condiciones previas y metodologías empleadas fueron las mismas del en el ensayo preliminar, salvo la aplicación de un régimen RH y diseño experimental diferente para en el ensayo final respecto al previo.

Tabla 4. Diseño experimental empleado en el ensayo final.

Bloque 1		Bloque 2		Bloque 3		Bloque 4	
Regadas	R.H	Regadas	R.H	Regadas	R.H	Regadas	R.H
T4	T2	T1	T3	T2	T3	T4	T2
T1	T3	T2	T1	T1	T1	T1	T4
T2	T1	T4	T4	T3	T2	T2	T1
T3	T4	T3	T2	T4	T4	T3	T3

T1 = AAS + BS; T2 = AAS; T3 = BS; T4 = Control

3.3. Evaluaciones de variables climáticas

Se recopilaron bases de datos históricas desde el año 2010 al 2018 desde la estación meteorológica ubicada en la comuna de Rinconada de Los Andes, Región de Valparaíso, y de los años 2013 al 2021 desde la estación meteorológica ubicada en la comuna de la Pintana, Región Metropolitana. Los datos fueron recopilados desde la plataforma agroclimática del Gobierno de Chile AGROMED y desde las plataformas públicas AGROCLIMA y AGROCLIMA INIA.

Las variables recopiladas y analizadas fueron: temperaturas máximas, mínimas y promedio (C°), precipitación (mm), humedad relativa (%), por cada mes y año. Los resultados de Tablas y Figuras fueron confeccionados con los programas Excel versión 365 e InfoStat versión 2020.

Para el análisis ombrotérmico (Tabla 5), se realizó el análisis del Subgrupo de clima y tipo de climático únicamente, ya que para estimar el índice xerotérmico no se encontraron datos gubernamentales de acceso público ni de pago respecto a las variables de números de días de rocío y niebla que la ecuación requiere.

Tabla 5. Parámetros de clasificación climática UNESCO-FAO.

TIPO CLIMÁTICO	SUBTIPO CLIMÁTICO	CONDICIÓN
Axéricos: $P > 2\text{ }tm$ en todos los meses		
	Cálido ecuatorial	$tmf \geq 20$
	Cálido subecuatorial	$20 > tmf \geq 15$
	Templado cálido	$15 > tmf \geq 10$
	Templado medio	$10 > tmf \geq 0$
Monoxéricos: Los meses con $P < 2\text{ }tm$ son consecutivos		
Áridos Período seco > 9 meses	Desértico	$X > 300$
	Subdesértico acentuado	$300 \geq X > 250$
	Subdesértico atenuado	$250 \geq X > 200$
Mediterráneo Período seco de 1 a 8 meses, coincidiendo con la estación cálida de días más largos	Xeromediterráneo	$200 \geq X > 150$
	Termomediterráneo acentuado	$150 \geq X > 125$
	Termomediterráneo atenuado	$125 \geq X > 100$
	Mesomediterráneo acentuado	$100 \geq X > 75$
	Mesomediterráneo atenuado	$75 \geq X > 40$
	Submediterráneo	$40 \geq X > 0$
Tropical Período seco de 1 a 8 meses, coincidiendo con la estación de los días más cortos	Tropical acentuado	$200 \geq X > 150 (*)$
	Tropical medio	$150 \geq X > 100 (*)$
	Tropical atenuado	$100 \geq X > 40 (*)$
	Tropical de transición	$40 \geq X > 1 (*)$
Bixéricos: Los meses con $P < 2\text{ }tm$ no son consecutivos		
Período seco de 1 a 8 meses sumando dos períodos de sequía	Bixérico acentuado	$200 \geq X > 150 (**)$
	Bixérico medio	$150 \geq X > 100 (**)$
	Bixérico atenuado	$100 \geq X > 40 (**)$
	Bixérico de transición	$40 \geq X > 1 (**)$

Característica que define el subtipo	Duración del período de sequía y/o helada (meses)	SUBTIPO CLIMÁTICO
Período de helada más sequía	De 11 a 12	Desértico frío
	De 9 a 10	Subdesértico frío
	De 5 a 8	Frío de estepa
		Subaxérico frío
Período de helada	De 1 a 4	Axérico frío
	De 5 a 8	

(*) Subdivisión de los climas tropicales que no cumplen la condición de mediterráneo, y a los que se añade la calificación de cálidos (si $tmf > 15$) o de templados (si $tmf \leq 15$).

(**) Con las mismas subdivisiones que en los tropicales y a con la misma calificación de cálidos (si $tmf > 15$) o de templados (si $tmf \leq 15$).

3.4. Análisis edáficos

3.4.1. pH del suelo

Durante las temporadas se determinó el pH del suelo de cada maceta una vez por semana, mediante un pHmetro portátil (60 AF, China).

3.4.2. Conductividad eléctrica del suelo

Durante las temporadas se determinó se determinó la conductividad eléctrica del suelo de cada maceta una vez por semana, mediante un conductímetro portátil (EC-1385 ATC, China).

3.5. Análisis de los parámetros de crecimiento de las plantas

3.5.1. Crecimiento de brotes

Durante las temporadas se determinó, una vez por semana la longitud de cinco brotes vegetativos por planta desde la base del suelo, con una regla métrica.

3.5.2. Grosor de hojas

Durante las temporadas, una vez por semana se midió el grosor de la zona media de cinco hojas por planta, con un pie de metro digital.

3.5.3. Número de espigas

Durante ambas temporadas, una vez por semana, se midió el número de espigas por planta, a través de un conteo visual.

3.5.4. Biomasa fresca y seca

Al final de las temporadas, en los ensayos finales, se determinó el peso fresco y seco de los tallos y raíces. Las plantas fueron dispuestas en una estufa de secado por 72 horas a 70° C, y se les determinó la biomasa seca mediante una balanza.

3.6. Análisis de variables fisiológicas y bioquímicas

3.6.1. Temperatura de la cobertura vegetal

Durante ambas temporadas, una vez por semana se midió la temperatura de la zona media de cinco hojas por planta, mediante un termómetro de infrarrojo (320-EN-00, China).

3.6.2. Concentración de clorofila total

Al término del ensayo final de la temporada 2018-2019, se midió el contenido total de clorofila según el método de Walinga et al. (1989), expresada en $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ brotes frescos de cinco tallos por planta. Para esto, se tomaron 0,5 g de muestra de brotes de planta fresca y se homogeneizaron en 10 ml de acetona analítica al 80% como disolvente. La mezcla de muestra homogenizada se centrifugó a 6.000 rpm durante 15 minutos a 20°C. Se separó 1 ml de sobrenadante y se mezclaron con 4,5 ml del disolvente respectivo. La mezcla de solución se analizó para determinar el contenido

de clorofila-a y clorofila-b empleando un espectrofotómetro (Rayleigh UV- 9200). La lectura de la clorofila a se realizó a 663 nm y la b a 647 nm.

Al término del ensayo final de la temporada 2019-2020 se midió el contenido total de clorofila a, b y carotenoides según el método empleado por Lichtenthaler y Wellburn (1983). 0,1 g de peso fresco de brotes fueron triturados empleando nitrógeno líquido. Para la extracción se empleó 1 mL de acetona fría al 80%. Las muestras se almacenaron en un agitador a 4°C durante toda la noche. Posteriormente se centrifugaron a 12.000 rpm por 10 min. El sobrenadante fue diluido 10 veces en acetona al 80%. Para las mediciones se empleó un espectrofotómetro (VWR UV-1600PC). La ecuación empleada para la cuantificación fue la siguiente:

$$\text{Chl a (ug/mL)} = 12.21 (A_{663}) - 2.81 (A_{646})$$

$$\text{Chl b (ug/mL)} = 20.13 (A_{646}) - 5.03 (A_{663})$$

$$\text{Caro (ug/mL)} = (1000 A_{470} - (3.27 [\text{chl a}]) - (104 [\text{chl b}]) / 227$$

3.6.3. Determinación del contenido de iones en el material vegetal

Por otra parte, al término del ensayo final de las temporadas 2018-2019 y 2019-2020, se midió el contenido de iones Ca^{2+} , K^{+} , Na^{+} y Cl^{-} en tallos según el método de Weimberg (1987) en extracto líquido obtenido del calentamiento de agua (0.15 g de material vegetal seco en 10 mL de agua) en un baño de agua por 1 h a 95 °C. Los cationes fueron analizados mediante un fotómetro de llama (Corning 410 C) mientras que el Cl^{-} fue medido con un analizador de cloruros (Corning 926).

3.6.4. Evaluación del sistema oxidativo y sistemas antioxidantes

3.6.4.1. Determinación de malondialdehído (MDA)

Al término del ensayo final de las temporadas 2018-2019 y 2019-2020 se determinó el contenido de MDA de las plantas tratadas. Para dichos fines, material seco (0,01 g) fue molido en mortero hasta obtener un polvo fino y se empleó como extractante 1,5 mL de metanol al 80%. Las muestras se agitaron suavemente durante la noche a 7 °C. El sobrenadante se colectó mediante

centrifugación a 13.300 rpm por 10 minutos a 4 °C y se almacenó a -20 °C hasta su uso en los ensayos. Se cuantificó la MDA en los extractos mediante el método del ácido tricloroacético/tiobarbiturico tal y como describe Hodges et al. (1999).

3.6.4.2 Determinación de osmolitos

Al término del ensayo final de las temporadas 2018-2019 y 2019-2020 se determinó el contenido de prolina (Pro) en el material vegetal fresco mediante el método de ninhidrina-ácido acético descrito por Bates et al (1973). Brevemente, Pro se extrajo en ácido sulfosalicílico acuoso al 3%, el extracto se mezcló con una solución de ninhidrina ácida, se incubó durante 1 h a 95°C, se enfrió en hielo y luego se extrajo con dos volúmenes de tolueno. La absorbancia de la fase orgánica se midió a 520 nm, utilizando tolueno como blanco. La concentración de Pro se expresó como $\text{mmol g}^{-1} \text{DW}$.

3.6.4.3 Antioxidantes no enzimáticos

Al término del ensayo final de las temporadas 2018-2019 y 2019-2020 los compuestos fenólicos totales (TPC) y los flavonoides totales (TF) se midieron en los mismos extractos de metanol utilizados para la determinación de SST. Los TPC se cuantificaron midiendo la absorbancia a 765 nm después de la reacción con el reactivo de Folin Ciocalteu, según Blainski et al. (2013), y expresados como equivalentes de ácido gálico ($\text{mg eq. GA g DW}^{-1}$), utilizados para obtener la curva estándar.

Los TF se midieron siguiendo el procedimiento descrito por Zhishen et al. (1999), basado en la nitración de anillos aromáticos que llevan un grupo catecol y su reacción con AlCl_3 ; este método detecta los antioxidantes, pero también otros fenólicos que contienen un grupo catecol. Después de la reacción, la absorbancia de la muestra se midió a 510 nm, y la cantidad de flavonoides se expresó como equivalentes de catequina ($\text{mg eq. Catec. g DW}^{-1}$).

3.6.4.4 Actividad de enzimas antioxidantes

Los extractos se determinaron por el método de Bradford (1976), utilizando el reactivo Bio-Rad y la albúmina de suero bovino como estándar.

La actividad total de SOD se determinó según Beyer y Fridovich (1987) mediante el monitoreo espectrofotométrico de la inhibición de la fotorreducción de nitroazul de tetrazolio (NBT). Las mezclas de reacción (1 mL) contenían un tampón de fosfato de potasio 50 mM, pH 7,8, L-metionina 9,9 mM, 58 mM NBT, 0,025% (v / v) Triton X-100, riboflavina 2,4 mM (como fuente de radicales de superóxido) y el extracto de proteína. Después de agregar riboflavina, las mezclas de reacción se irradiaron (300 mmol m²² s²¹, proporcionadas por tres lámparas fluorescentes compactas (Osram DULUX PRO de 23 W) durante 10 min a 25 °C, y se midió la absorbancia a 560 nm utilizando una solución no irradiada mezcla como blanco. Se definió una unidad SOD como la cantidad de enzima que causa una inhibición del 50% de la fotorreducción de NBT bajo condiciones de ensayo.

La actividad de la catalasa se determinó según lo descrito por Aebi (1984), después de la disminución de la absorbancia en 240 nm que acompañó el consumo de H₂O₂ (D1 ¼ 39,4 mM 21 cm²¹) después de agregar los extractos de proteína a una solución de H₂O₂ 10 mM en Tris-HCl 50 mM (pH 7.0). Una unidad CAT se definió como la cantidad de enzima que descompondrá 1 mmol de H₂O₂ por minuto a 25 ° C.

La actividad APX se determinó de acuerdo con Nakano y Asada (1981) midiendo la disminución de la absorbancia a 290 nm a medida que el ascorbato se oxida en la reacción. Una unidad APX se definió como la cantidad de enzima requerida para consumir 1 mmol de ascorbato por minuto a 25 ° C.

La actividad del glutatión reductasa se determinó de acuerdo con Connell y Mullet (1986), después de la oxidación de NADPH, el cofactor en la reducción catalizada por GR del glutatión oxidado (GSSG). En un volumen final de 1 mL, las mezclas de reacción contenían Hepes 100 mM, pH 7,5, EDTA 1 mM, MgCl₂ 3 mM, GSSG 0,5 mM y los extractos de proteína. Las reacciones se iniciaron agregando NADPH a una concentración final de 0,2 mM. Las muestras se incubaron a 25 ° C y la

disminución de la absorbancia a 340 nm ($D1 \cdot \frac{1}{4} \cdot 6,22 \text{ mM} \cdot 21 \text{ cm} \cdot 21$) se midió después de 25 min. Las reacciones de control sin extracto de proteína se incubaron en paralelo para corregir la oxidación no enzimática de NADPH. Una unidad GR se definió como la cantidad de enzima que oxidará 1 mmol de NADPH por minuto a 25 °C. Al término del ensayo final de las temporadas 2019-2020 no se realizaron algunas mediciones para los tratamientos ASA + BS o BS debido a la pérdida de parte del material vegetal.

3.7. Análisis estadístico de los datos

Los resultados del experimento fueron analizados mediante modelos lineales y mixtos para evaluar si existen diferencias significativas entre tratamientos y un test de Fisher de comparación de medias, con un 95% de confianza, para determinar diferencias entre tratamientos. La correlación temporal existente para las variables crecimiento de brotes, ancho de brotes y número de espigas, temperatura de la cobertura, pH y CE fue considerada dentro del modelo a la hora de realizar los análisis.

Se realizaron Componentes Principales considerando las componentes que explicaban la mayor variabilidad entre los datos.

Para el análisis estadístico se empleó el programa InfoStat, versión 2018-2020 junto con la inserción del paquete para modelar Modelos Lineales y Mixtos de R Studio.

4. RESULTADOS

4.1. Análisis climático histórico según localidad

4.1.1. Rinconada de Los Andes

En las Tablas 6 y 7 se pueden observar las medias de las precipitaciones (mm), humedad relativa (%), temperaturas mínimas, máximas y promedio respecto a cada mes y cada año de las temporadas 2010 hasta 2018. Existen aumentos de las precipitaciones en las estaciones de otoño e invierno y una reducción de estas en las estaciones de primavera y verano. Similar tendencia se aprecia en la humedad relativa promedio según cada mes, siendo los periodos de primavera y verano los que presentan los menores valores, mientras que otoño e invierno los mayores. Similar tendencia presenta también las temperaturas mínimas, máximas y medias.

Tabla 6. Promedios de precipitación media (mm), humedad relativa (%) y temperaturas mínimas, máximas y promedio (°C) de cada año para la localidad de Rinconada de Los Andes, entre las temporadas 2010 y 2018.

Año	Temperatura (°C)			Precipitaciones	Humedad relativa
	mínima	máxima	promedio	(mm)	(%)
2010	13,1	14,8	14,0	15,3	65,1
2011	13,3	15,1	14,2	11,1	63,1
2012	13,9	15,6	14,8	15,9	nd ¹
2013	13,9	15,7	14,8	8,51	46,2
2014	13,6	15,3	14,5	8,5	64,5
2015	14,2	15,9	15,0	15,4	nd
2016	14,4	15,6	15,0	28,8	64,4
2017	13,9	15,3	14,4	16,6	61,5
2018	14,6	15,4	15,0	9,1	63,3

¹/ nd= no disponible

Tabla 7. Promedios de precipitación (mm), humedad relativa (%) y temperaturas mínimas, máximas y promedio (°C) de cada mes, entre las temporadas 2010 y 2018.

Mes	Temperatura (°C)			Precipitaciones (mm)	Humedad relativa (%)
	mínima	máxima	promedio		
Enero	20,8	22,5	21,7	0,49	60,7
Febrero	19,9	21,7	20,6	1,34	61,9
Marzo	17,3	19,2	18,2	1,63	61,9
Abril	12,9	14,6	13,8	10,89	67,4
Mayo	9,6	11,1	10,3	27,94	72,3
Junio	6,9	8,4	7,6	37,24	72,5
Julio	6,9	8,2	7,5	19,72	72,7
Agosto	9,0	10,3	9,6	26,74	70,1
Septiembre	12,2	13,6	12,9	10,60	64,1
Octubre	14,5	15,9	15,2	27,02	62,1
Noviembre	17,5	19,2	18,4	4,83	58,1
Diciembre	19,4	21	20,2	4,29	59,5
Promedio general	13,9	15,5	14,7	14,3	65,3

En la Figura 4 se observan las temperaturas (°C) mínimas, máximas y medias de cada mes y temporada, desde 2010 hasta 2018. Se aprecian incrementos en los valores mínimos, máximos y medios en los períodos estivales, y bajas en los invernales. Por otra parte, se observa la precipitación media mensual desde 2010 hasta 2018 excluyendo solo por temporada (Figura 5).

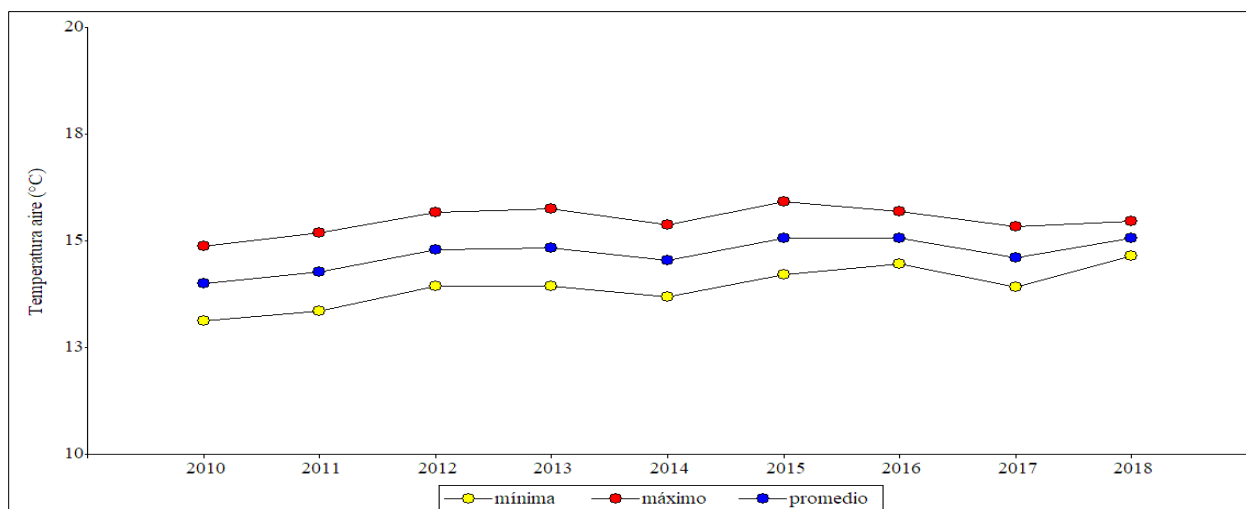


Figura 4. Temperaturas mínimas, máximas y medias por año, desde la temporada 2010 hasta 2018.

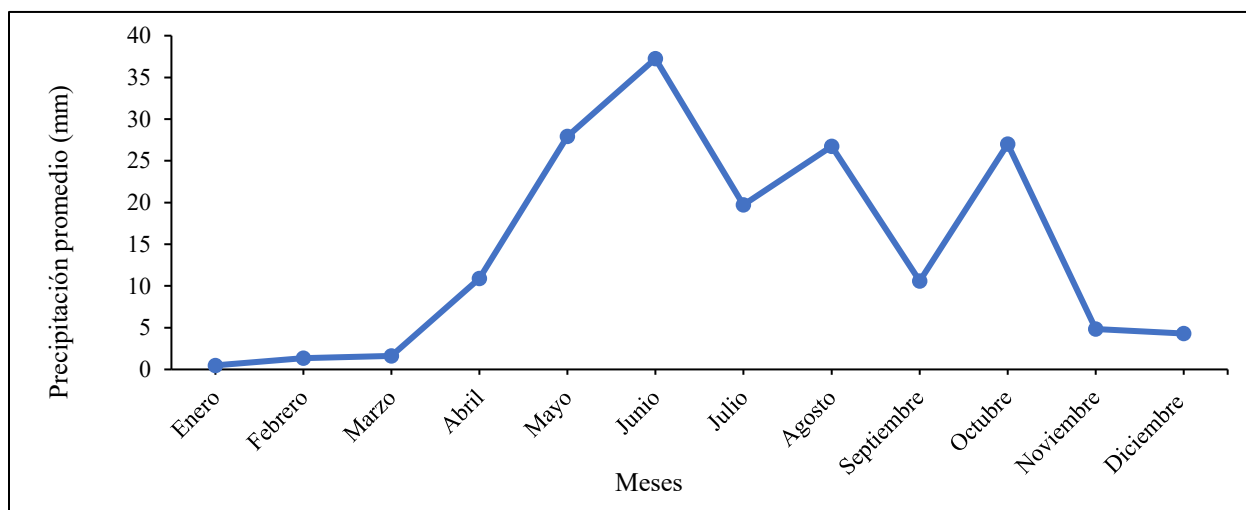


Figura 5. Precipitación promedio mensual desde la temporada 2010 hasta la 2018.

4.1.2. Análisis Ombrotérmico y clasificación climática UNESCO-FAO

En la Figura 6 se aprecia el diagrama ombrotérmico para las medias de cada mes, desde la temporada 2013 hasta la 2018. Como podemos observar en la figura en los meses de mayo, junio y agosto tenemos un exceso de agua que corresponden a los meses de invierno, por ello en el perfil del suelo existe suficiente agua. Los demás meses la precipitación es inferior a la temperatura por lo que presenta un déficit hídrico. El clima pertenece al Subgrupo 1, con un tipo de clima Monoxérico Mediterráneo ($P < 2 \text{ tm son consecutivos}$).

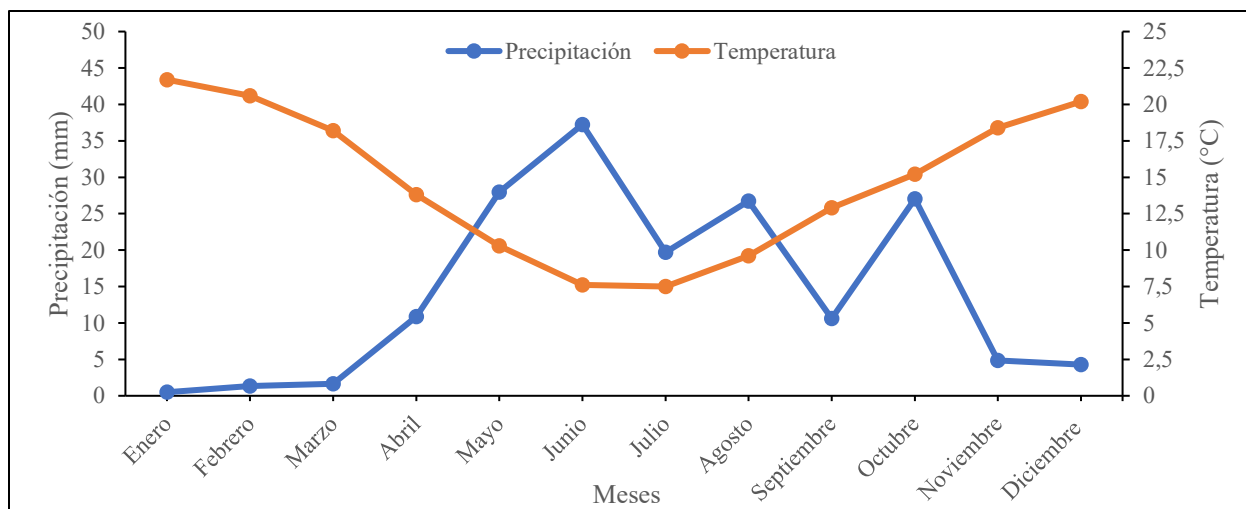


Figura 6. Precipitación promedio mensual desde la temporada 2010 hasta la 2018.

Eje X= precipitación (mm), eje Y= temperatura (°C), abscisas =meses

4.1.3. La Platina

En las Tablas 8 y 9 se pueden observar las medias de las precipitaciones (mm), humedad relativa (%), temperaturas mínimas, máximas y promedio respecto a cada mes y cada año de las temporadas 2013 hasta 2021. Existen aumentos de las precipitaciones en las estaciones de otoño e invierno y una reducción de estas en las estaciones de primavera y verano. Similar tendencia se aprecia en la humedad relativa promedio según cada mes, siendo los periodos de primavera y verano los que presenta los menores valores, mientras que otoño e invierno los mayores. Similar tendencia presenta también las temperaturas mínimas, máximas y medias (Figura 7).

Tabla 8. Promedios de precipitación (mm), humedad relativa (%) y temperaturas mínimas, máximas y promedio (°C) de cada año, entre las temporadas 2013 y 2021.

Año	Temperatura (°C)			Precipitaciones (mm)	Humedad relativa (%)
	mínima	máxima	promedio		
2013	13,9	15,0	14,5	13,5	64,9
2014	14,1	14,7	14,4	20,1	64,5
2015	14,5	15,1	14,8	20,7	63,9
2016	14,8	15,4	15,1	17,6	66,9
2017	14,4	15,0	14,8	24,7	66,0
2018	14,6	15,7	15,1	13,3	61,4
2020	15,1	16,3	15,7	16,8	58,8
2021	14,4	15,6	15,1	17,1	60,7

Tabla 9. Promedios de precipitación (mm), humedad relativa (%) y temperaturas mínimas, máximas y promedio (°C) de cada mes, entre las temporadas 2013 y 2021.

Mes	Temperatura (°C)			Precipitaciones (mm)	Humedad relativa (%)
	mínima	máxima	promedio		
Enero	20,8	21,7	21,3	2,0	56,5
Febrero	20,1	20,9	20,5	2,6	58,0
Marzo	18,0	18,9	18,6	2,7	58,7
Abril	14,2	15,1	14,6	22,9	64,6
Mayo	11,1	11,9	11,5	37,8	71,4
Junio	8,4	9,2	8,8	42,4	73,3
Julio	8,4	9,2	8,8	27,3	73,1
Agosto	9,5	10,3	10,0	44,3	73,1
Septiembre	11,9	12,7	12,3	19,7	66,6
Octubre	14,0	14,8	14,4	14,8	62,7
Noviembre	17,2	18,1	17,7	3,4	55,6
Diciembre	19,5	20,4	19,9	0,6	55,5

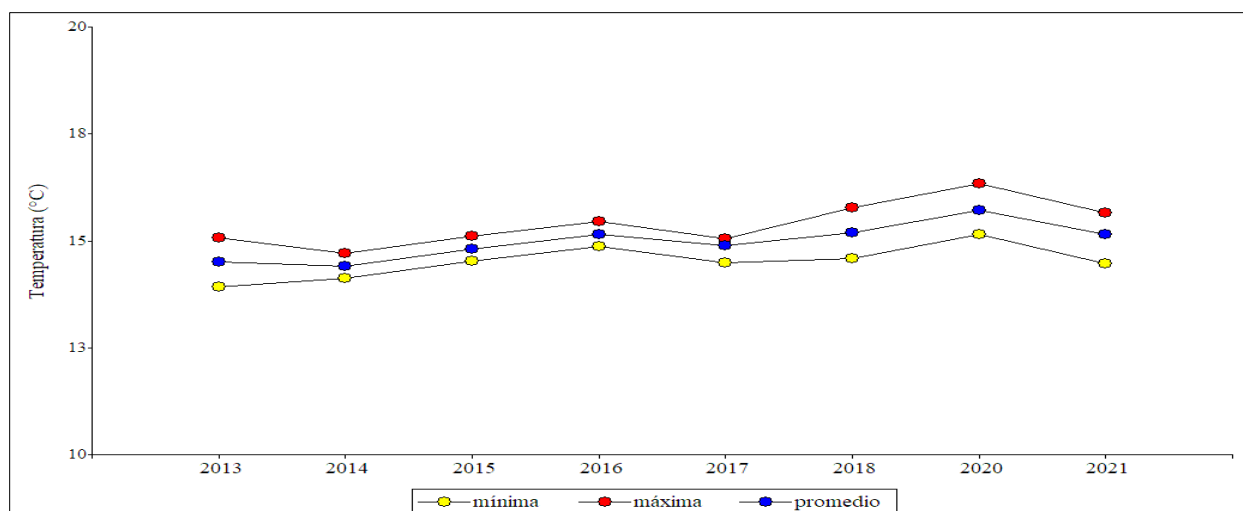


Figura 7. Temperaturas mínimas, máximas y medias por año, desde la temporada 2013 hasta 2021.

En la Figura 8 se observa la precipitación acumulada (mm) desde la temporada 2013 hasta la 2021. Es posible apreciar una disminución sostenida en los períodos 2013, hasta 2015, mientras que en las temporadas 2016 y 2017 se registraron los mayores valores, sin embargo, desde la temporada 2018 hasta la 2021, los valores han ido disminuyendo nuevamente. Similar tendencia se aprecia en la Figura 13 despejando por temporada.

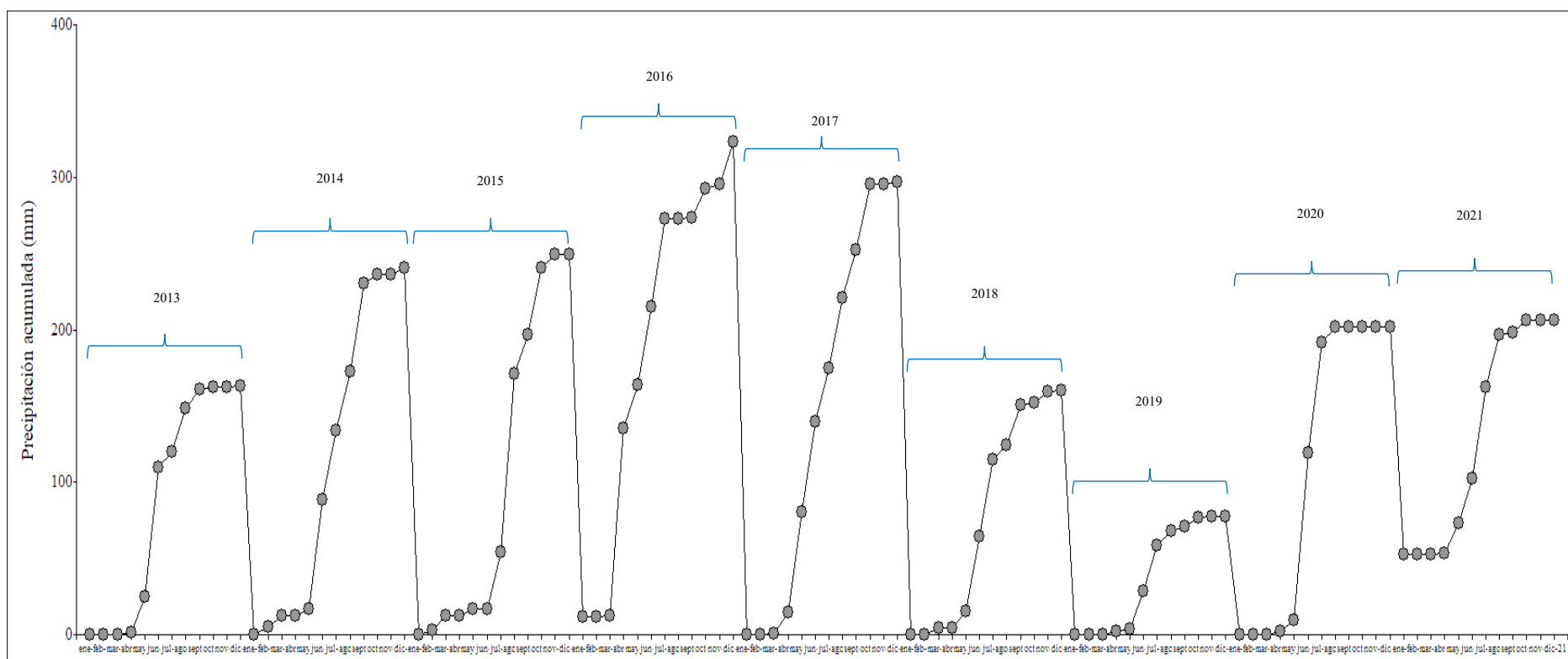


Figura 8. Precipitación acumulada (mm) por mes y temporada, desde 2013 hasta 2021.

En la Figura 9 se observa la precipitación media de cada mes desde las temporadas 2013 hasta 2021. Se observan incrementos en las precipitaciones desde el mes de marzo, alcanzando un máximo en junio, disminuyendo paulatinamente hasta estabilizarse en noviembre.

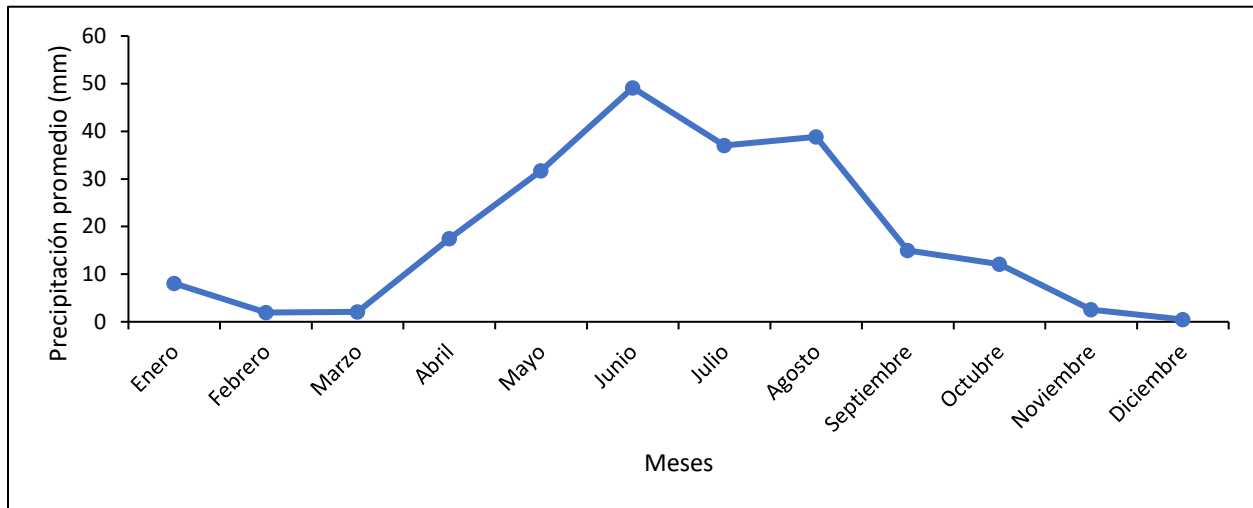


Figura 9. Precipitación promedio por mes desde la temporada 2013 hasta la 2021.

En la Figura 10 se observa la fluctuación de la humedad relativa (%) promedio del ambiente para cada mes, desde las temporadas 2013 hasta 2022. Los meses estivales concentraron los mayores valores, mientras que los meses invernales los menores. Se presentaron similares tendencias entre las temporadas 2013 y 2015, mientras que las temporadas 2016 y 2017 presentaron los mayores valores. A contar de la temporada 2018 los valores mostraron una disminución sostenida, llegando a los menores en 2022.

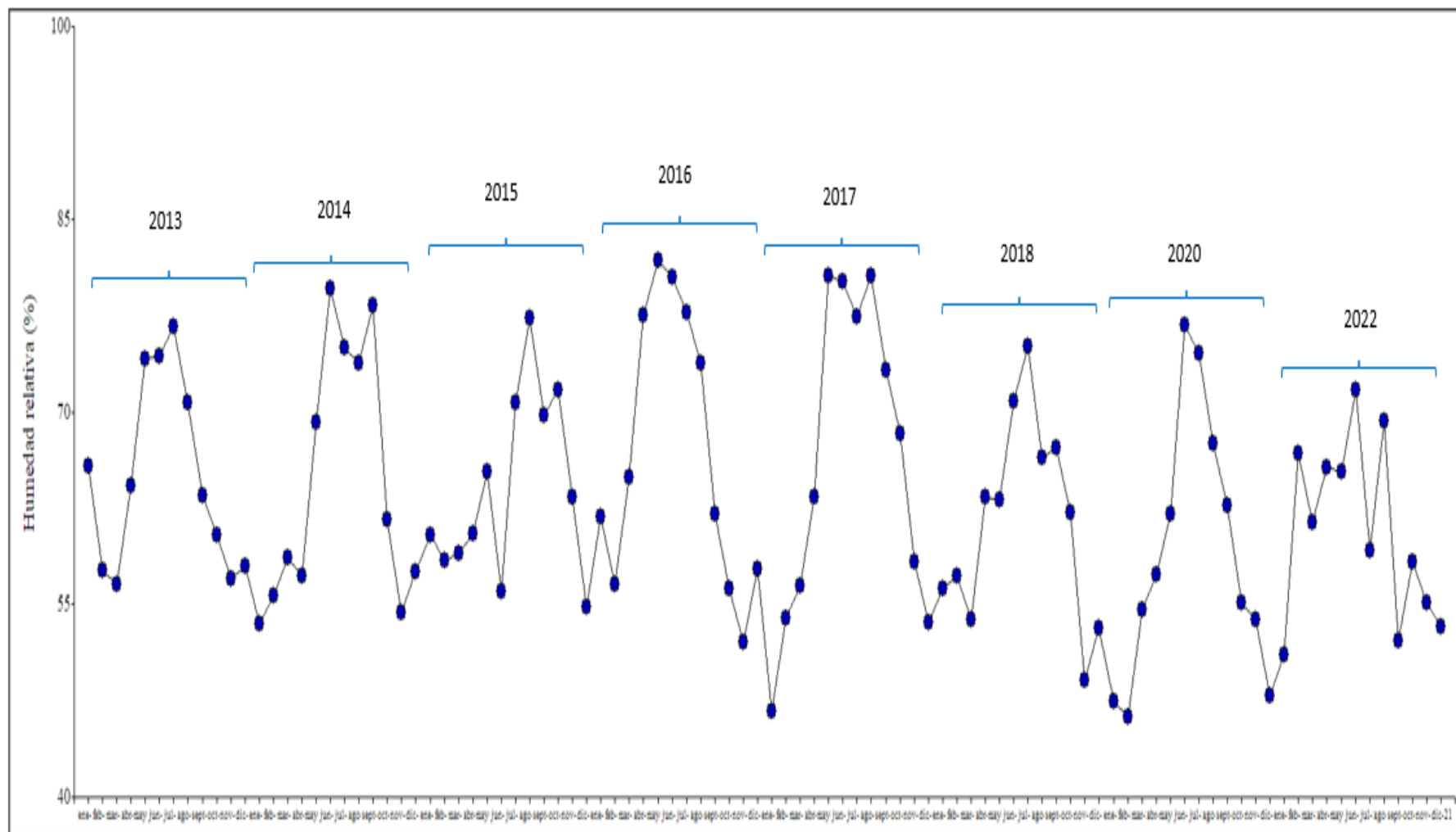


Figura 10. Humedad relativa (%) promedio del ambiente por mes para cada temporada desde 2010 hasta 2018.

4.1.4. Análisis Ombrotérmico y clasificación climática UNESCO-FAO

En la Figura 11 se aprecia el diagrama ombrotérmico para las medias de cada mes, desde la temporada 2013 hasta la 2021. Como podemos observar en la figura (similar a la figura 6) en los meses de mayo, junio y agosto tenemos un exceso de agua que corresponden a los meses de invierno, por ello en el perfil del suelo existe suficiente agua. Los demás meses la precipitación es inferior a la temperatura por lo que presenta un déficit hídrico. El clima pertenece al Subgrupo 1, con un tipo de clima Monoxérico Mediterráneo ($P < 2 \text{ tm}$ son consecutivos).

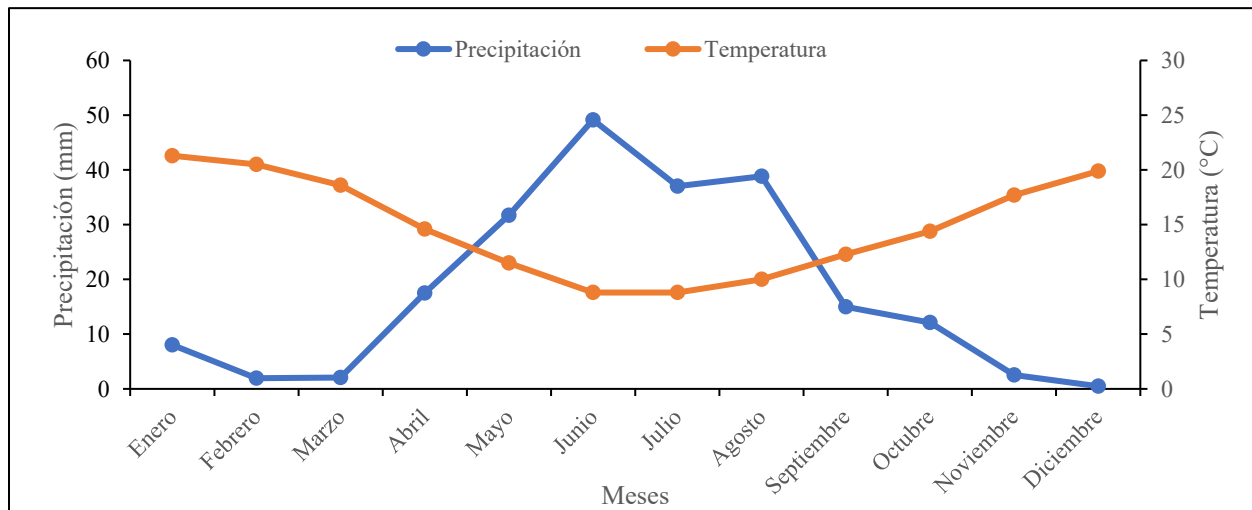


Figura 11. Diagrama Ombrotérmico desde los períodos 2013 hasta 2021.

Eje X = precipitación (mm), eje Y= temperatura (°C), abscisas =meses.

4.2. Temporada 2018-2019

4.2.1. Ensayo preliminar

4.2.1.1. Variables edáficas

En la Figura 12 se presentan las diferencias estadísticamente significativas encontradas para el pH de la solución del suelo en *Stipa caudata* medido durante el experimento. Plantas en donde los tratamientos AAS o SA se aplicaron separadamente, presentaron los mayores valores respecto a

plantas en donde se aplicaron en conjunto, encontrándose el tratamiento control en una situación intermedia.

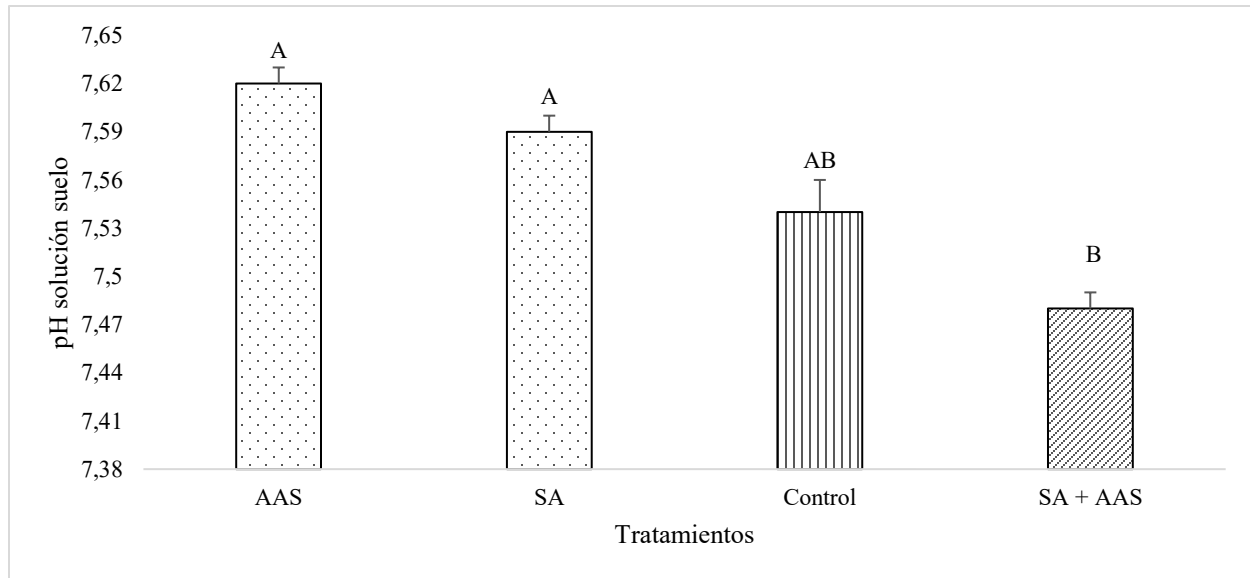


Figura 12. pH acumulado de la solución del suelo en *Stipa caudata* medido durante el experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; SA = sulfato de amonio; Control = sin tratamientos.

En la Figura 13 se presentan las diferencias estadísticamente significativas encontradas para la conductividad eléctrica acumulada de la solución del suelo en *Stipa caudata* medidas durante el experimento. Plantas tratadas con la mezcla SA/AAS y plantas SA presentaron diferencias significativas respecto a plantas control, mientras que AAS presentó una situación intermedia.

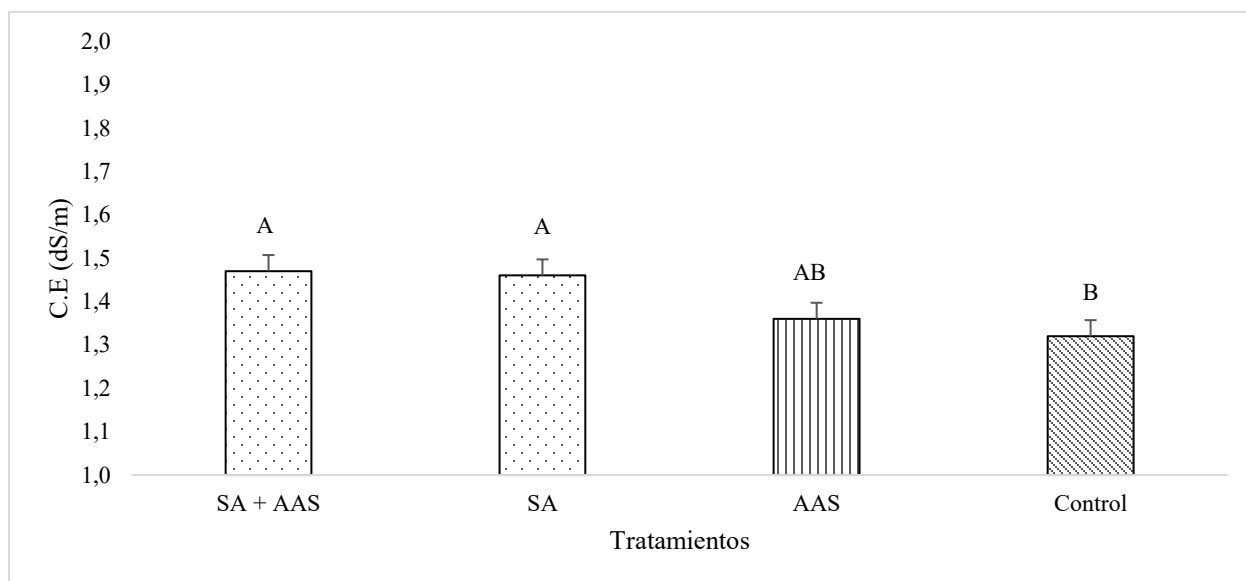


Figura 13. CE acumulada de la solución suelo en *Stipa caudata* medido durante el experimento. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; SA = sulfato de amonio; Control = sin tratamientos.

4.2.1.3. Variables productivas y fisiológicas

En la Figura 14 se presentan las significancias encontradas para el crecimiento acumulado de tallos de *Stipa caudata* medido durante el experimento. Plantas en donde AAS estuvo presente, presentaron mayor largo de tallos respecto a plantas tratadas solamente con SA y control.

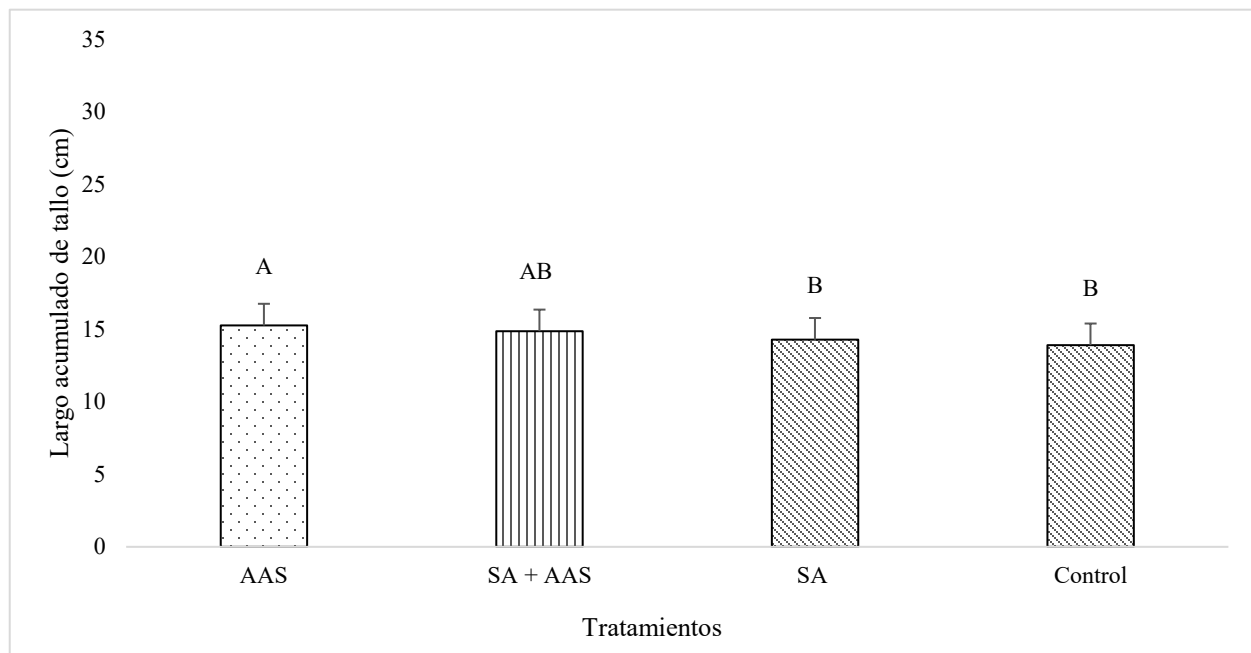


Figura 14. Largo acumulado de tallos de *Stipa caudata* medido durante el experimento.

Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas según la prueba de Fisher (p -valor $< 0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; SA= sulfato de amonio; Control = sin tratamientos

En la Figura 15 se presentan la falta de diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos encontradas para el número de espigas por planta de *Stipa caudata* al final del ensayo.

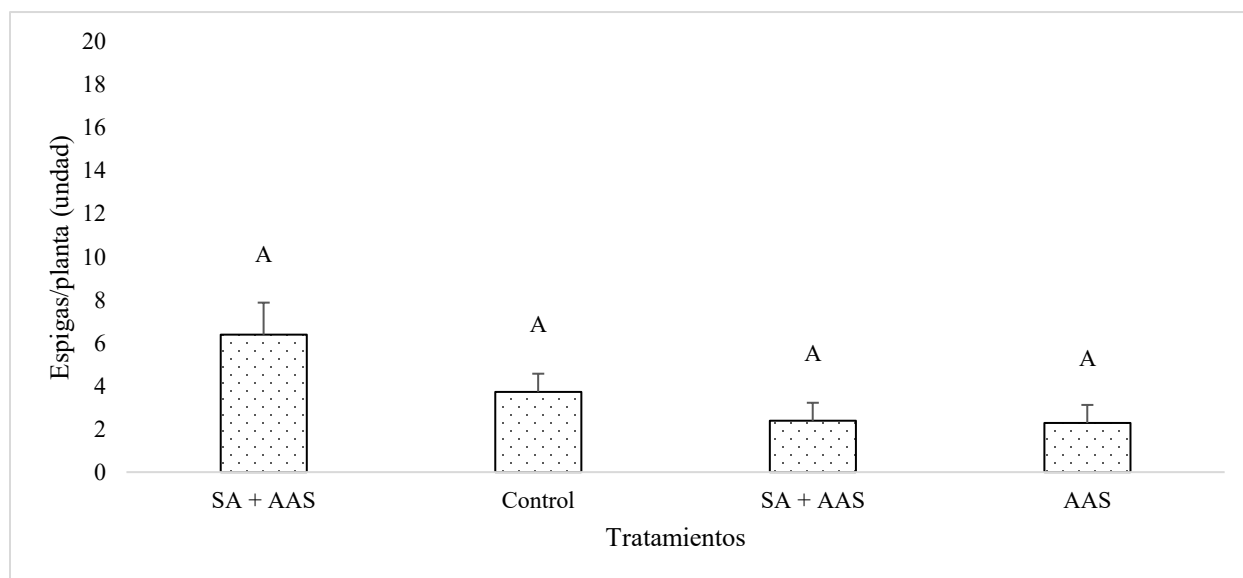


Figura 15. Número de espigas por planta de *Stipa caudata* medido al final del experimento.

Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; SA = sulfato de amonio; Control = sin tratamientos

En la Figura 16 podemos encontrar que no presentan diferencias para la temperatura acumulada de la cobertura vegetal de la *Stipa caudata* medida durante el experimento entre los diferentes tratamientos.

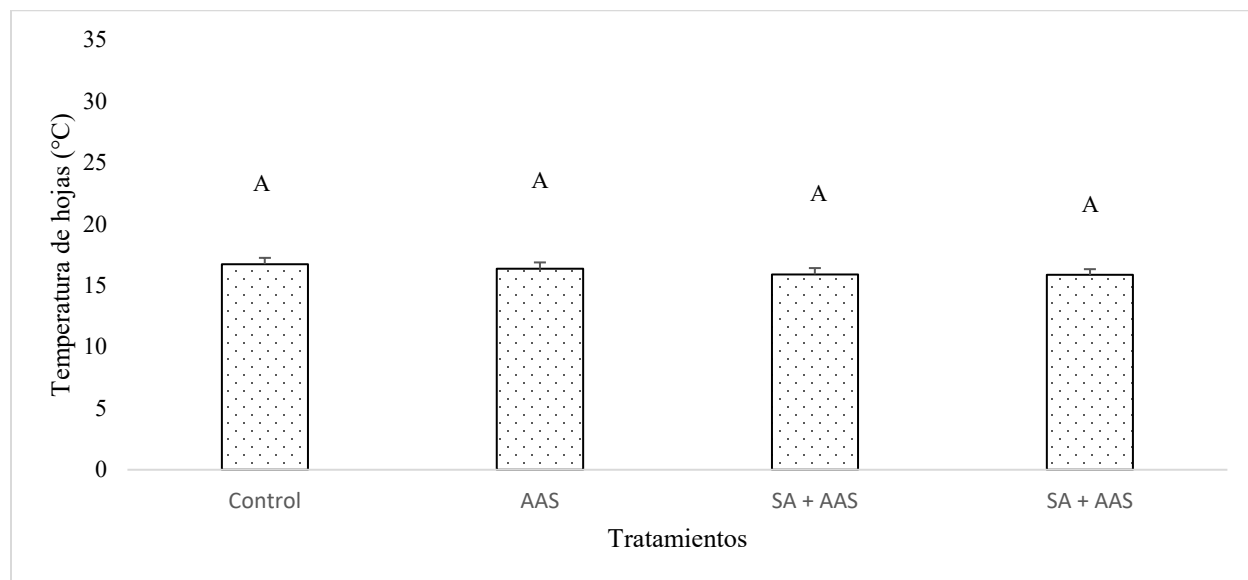


Figura 16. Temperatura acumulada de la cobertura vegetal en *Stipa caudata* medida durante el experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; SA = sulfato de amonio; Control = sin tratamientos

4.2.2. Ensayo final

4.2.2.1. Variables productivas y fisiológicas

En la Figura 17 se presenta la interacción entre Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) (p -valor 0,0149), para el largo acumulado de tallos de *Stipa caudata* medidos durante el experimento. Plantas tratadas con la SA y AAS irrigadas presentaron el mayor largo de tallos acumulado. A su vez, plantas en donde SA, AAS o la mezcla de ambos, presentaron los mayores niveles en cuanto a largo de tallos independientemente de la condición hídrica en que se encontraban. Por último, plantas control sin tratamientos y sin riego, presentaron los menores valores en cuanto a largo de tallos acumulado.

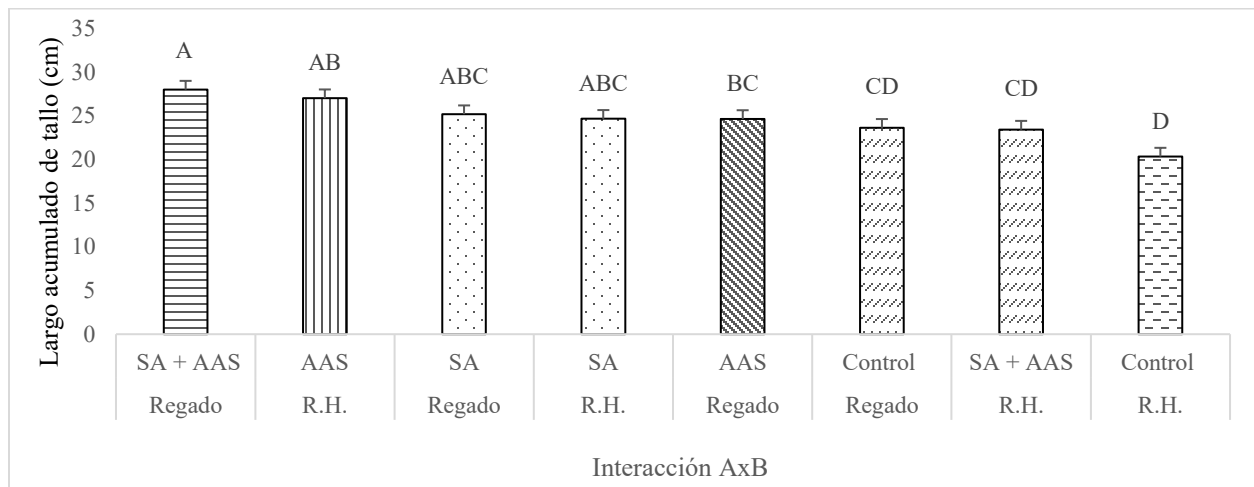


Figura 17. Interacción entre Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para el largo acumulado de tallos de *Stipa caudata* medidos durante el experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor < 0,05). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; SA = sulfato de amonio; Control = sin tratamientos. RH = restricción hídrica; Regadas= irrigadas.

En la Figura 18 se presentan las significancias encontradas para la clorofila total en tallos de *Stipa caudata* medidos al final del experimento. Plantas control presentaron mayor diámetro de tallos respecto a plantas con SA, AAS o la mezcla de ambos.

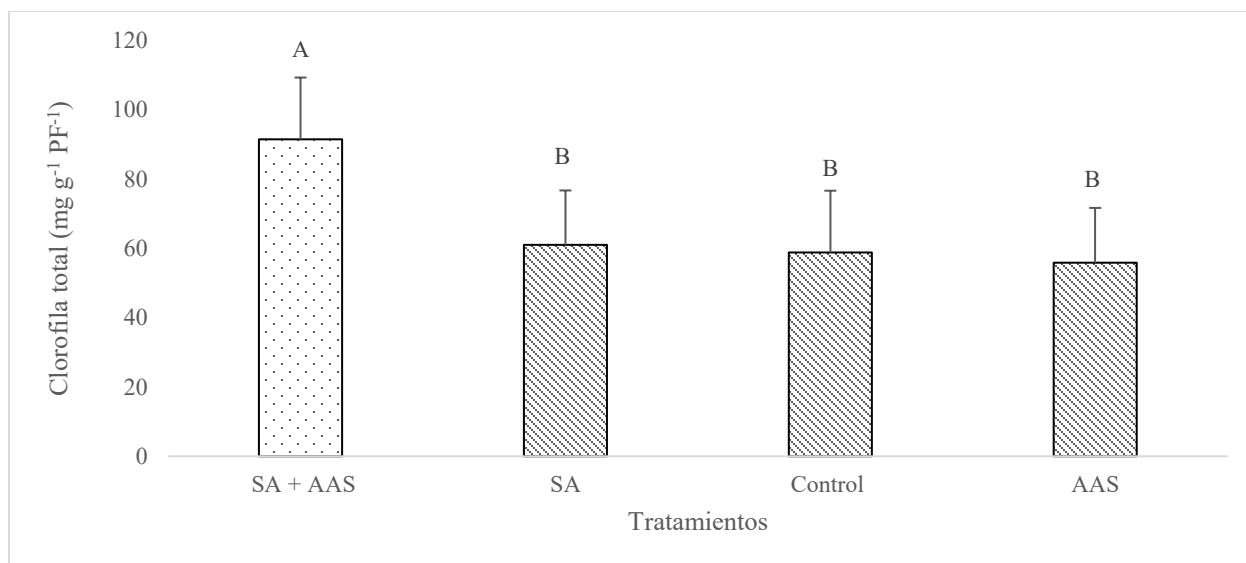


Figura 18. Clorofila total de brotes de *Stipa caudata* medida al final del experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; SA = sulfato de amonio; Control = sin tratamientos.

En la Tabla 10 se presentan las significancias encontradas para el Ca^+ , K^+ , Na^+ y Cl^- en brotes de *Stipa caudata* medidos al final del experimento. Hubo interacción entre Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para el contenido acumulado de Ca^{2+} en hojas de *Stipa caudata* medidos al final del experimento.

Tabla 10. Contenido de iones Ca^{2+} , K^{+} , Na^{+} y Cl^{-} en brotes de *Stipa caudata* medido al final del experimento temporada 2028-2019.

Condición hídrica	Tratamientos	Ca^{2+} ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{PS}^{-1}$)	K^{+} ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{PS}^{-1}$)	Na^{+} ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{PS}^{-1}$)	Cl^{-} ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{PS}^{-1}$)
Regado	AMS + ASA ¹	4,44 ± 2.75	183,59 ± 49,94	197,19 ± 38.61	85,12 ± 25.75
Regado	AMS + Control	3,9 ± 2.75	187,43 ± 49,94	121,02 ± 38.61	87 ± 25.75
Regado	Control + ASA	14,3 ± 2.75	171,07 ± 49,94	130,12 ± 21.72	115,47 ± 25.75
Regado	Control	7,09 ± 2.75	282,49 ± 67,04	199,29 ± 38.61	155,69 ± 25.75
R.H	AMS+ ASA	3,73 ± 2.75	225,43 ± 49,94	115,46 ± 38.61	84,81 ± 25.75
R.H	AMS + Control	9,62 ± 2.75	221,58 ± 49,94	175,26 ± 38.61	122,16 ± 25.75
R.H	Control + ASA	3,46 ± 2.75	150,3 ± 49,94	98,63 ± 21.72	84,81 ± 25.75
R.H	Control	3,79 ± 2.75	223,92 ± 67,04	129,7 ± 38.61	104,78 ± 25.75
Estadística					
Tratamiento	A	N.S	N.S	N.S	N.S
Condición hídrica	B	N.S	N.S	N.S	N.S
AxB		*	N.S	N.S	N.S

AAS = ácido acetilsalicílico; SA = sulfato de amonio; Control = sin tratamientos; Regadas = irrigada; RH = restricción hídrica. Medias ± error estándar. */ Indica diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor <0,05); N.S = No significativa.

En la Figura 19 se presenta la interacción entre Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para el contenido acumulado de Ca^{2+} en brotes de *Stipa caudata* medidos al final del experimento. Plantas tratadas con AAS regadas, presentaron los mayores contenidos de Ca^{2+} respecto a las demás plantas independientemente de sus tratamientos y condición hídrica.

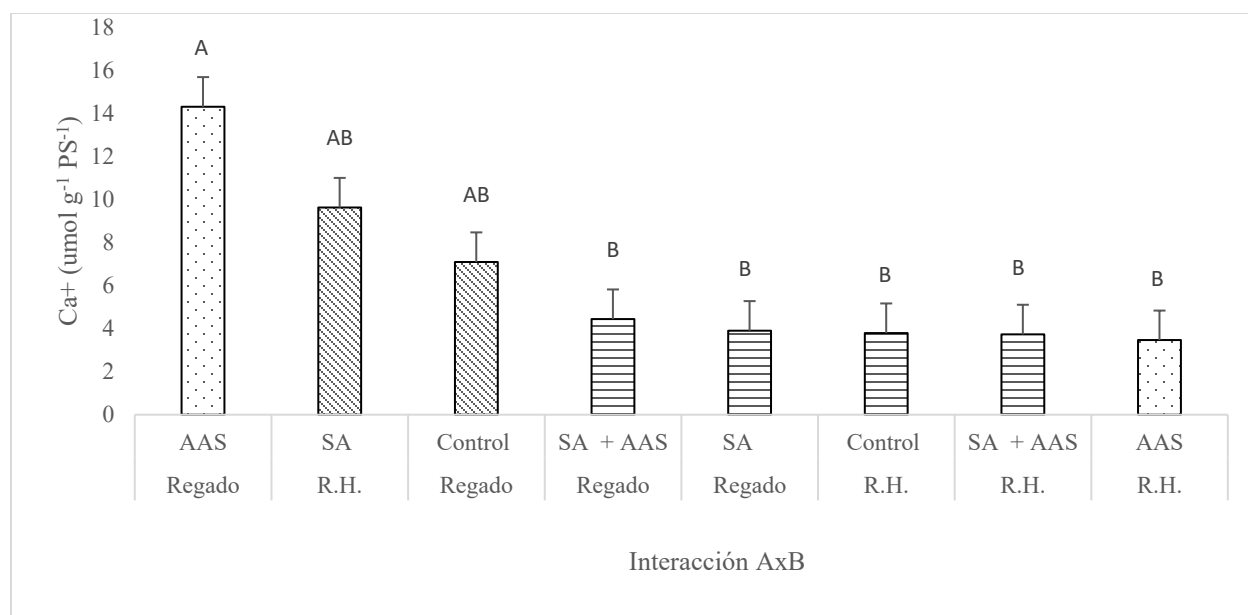


Figura 19. Interacción Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para el contenido de Ca^{2+} en brotes de *Stipa caudata* medido al final del experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; SA = sulfato de amonio; Control = sin tratamientos; Riego = irrigadas; RH = restricción hídrica.

En la Tabla 11 se presentan las significancias encontradas para el Contenido total de compuestos fenólicos (TCF), total flavonoides (TF), prolina (Pro) y malondialdehído (MDA) en brotes de *Stipa caudata* medidos al final del experimento. Se presentó interacción entre Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para el Total de Compuestos Fenólicos y diferencias significativas para los tratamientos (A) en el total flavonoides, prolina (Pro) y malondialdehído (MDA).

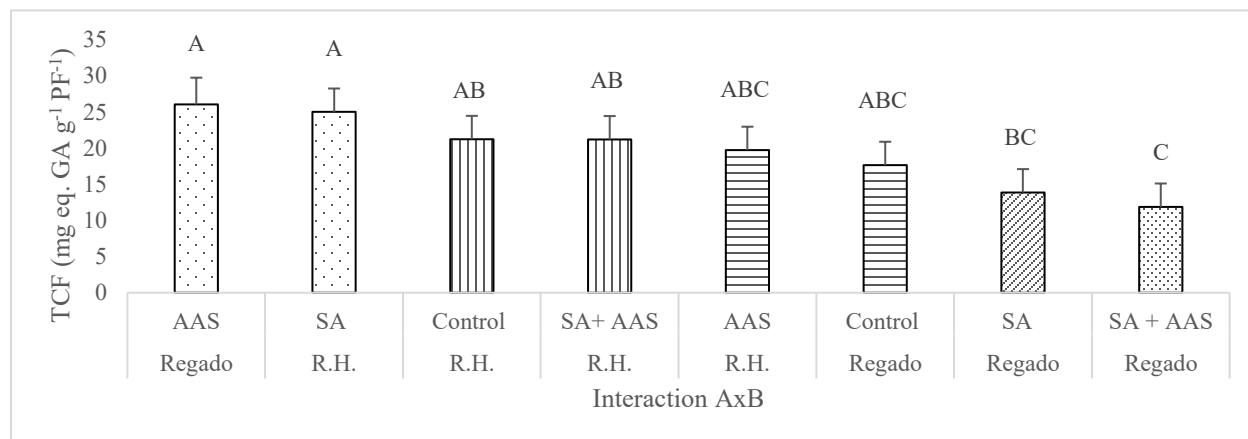
Tabla 11. Contenido del total de compuestos fenólicos (TCF), total flavonoides (TF), prolina (Pro) y malondialdehído (MDA) en brotes de *Stipa caudata* medido al final del experimento.

Condición hídrica	Tratamientos	TCF (mg eq. GA g ⁻¹ PF)		TF (catequina g ⁻¹ PF)	Pro (mg g ⁻¹ PF)	MDA (nmol g ⁻¹ PF)
Regado	SA + AAS ¹	11,87 ±	3.24	4,73 ± 1,03	1,66 ± 0,23	28,13 ± 2,92
Regado	SA + Control	13,86 ±	3.24	5,10 ± 1,03	0,58 ± 0,25	13,89 ± 2,54
Regado	Control + AAS	26,05 ±	3.70	8,45 ± 1,19	0,10 ± 0,05	48,02 ± 2,48
Regado	Control	17,65 ±	3.24	5,80 ± 1,03	0,21 ± 0,03	47,05 ± 45,54
R.H	SA+ AAS	21,20 ±	3.24	7,67 ± 1,03	5,70 ± 0,02	109,05 ± 56,48
R.H	SA + Control	25,01 ±	3.24	7,46 ± 1,03	2,65 ± 0,02	95,42 ± 45,54
R.H	Control + AAS	19,73 ±	3.24	8,27 ± 1,03	1,79 ± 0,53	120,53 ± 48,92
R.H	Control	21,23 ±	3.24	7,62 ± 1,03	5,03 ± 0,20	64,99 ± 45,54
Statistics						
Treatments	A	N.S ¹		N.S	N.S	N.S
Water Condition	B	*		*	*	*
AxB		*		N.S	N.S	N.S

¹/ AAS = ácido acetilsalicílico; SA = sulfato de amonio; Control = sin tratamientos; Regadas = irrigada; RH = restricción hídrica. Medias ± error estándar. */ Indica diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor <0,05); N.S = No significativa.

En la Figura 20 se presenta la interacción Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para el contenido del total de compuestos fenólicos (TCF) en hojas medidos al final del experimento. El total de plantas tratadas con AAS, SA o la mezcla de ambos en una condición de restricción hídrica, junto a plantas tratadas con AAS con riego, presentaron mayores niveles en de TCF respecto a plantas tratadas con la mezcla AAS/SA regadas.

Figura 20. Interacción Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para el contenido del total de compuestos fenólicos (TCF) en brotes de *Stipa caudata* medido al final del experimento.



Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $< 0,05$). Barras verticales indican error estándar. RH = restricción hídrica; Regadas = irrigadas.

En la Figura 21 se presentan las diferencias significativas detectadas para el total de flavonoides (TF) en brotes de *Stipa caudata* analizados al final del experimento. Se presentaron diferencias significativas respecto a la condición hídrica (B), en donde plantas RH presentaron mayores niveles en cuanto al TF respecto a plantas Regadas.

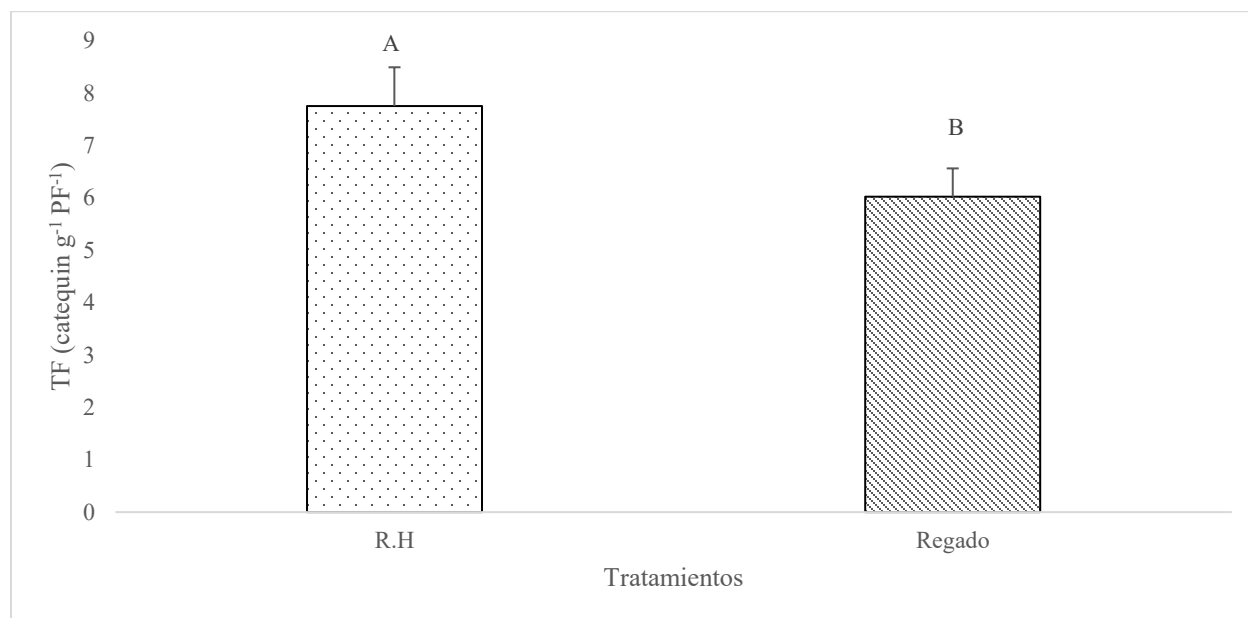


Figura 21. Total de flavonoides (TF) en brotes de *Stipa caudata* medido al final del experimento. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. RH= restricción hídrica; Regadas= irrigadas

En la Figura 22 se presentan las significancias encontradas para el contenido de prolina (Pro) total medido en brotes de *Stipa caudata* al final del experimento. Se presentaron diferencias significativas respecto a la condición hídrica (B), en donde plantas RH presentaron mayores niveles en cuanto a prolina respecto a plantas regadas.

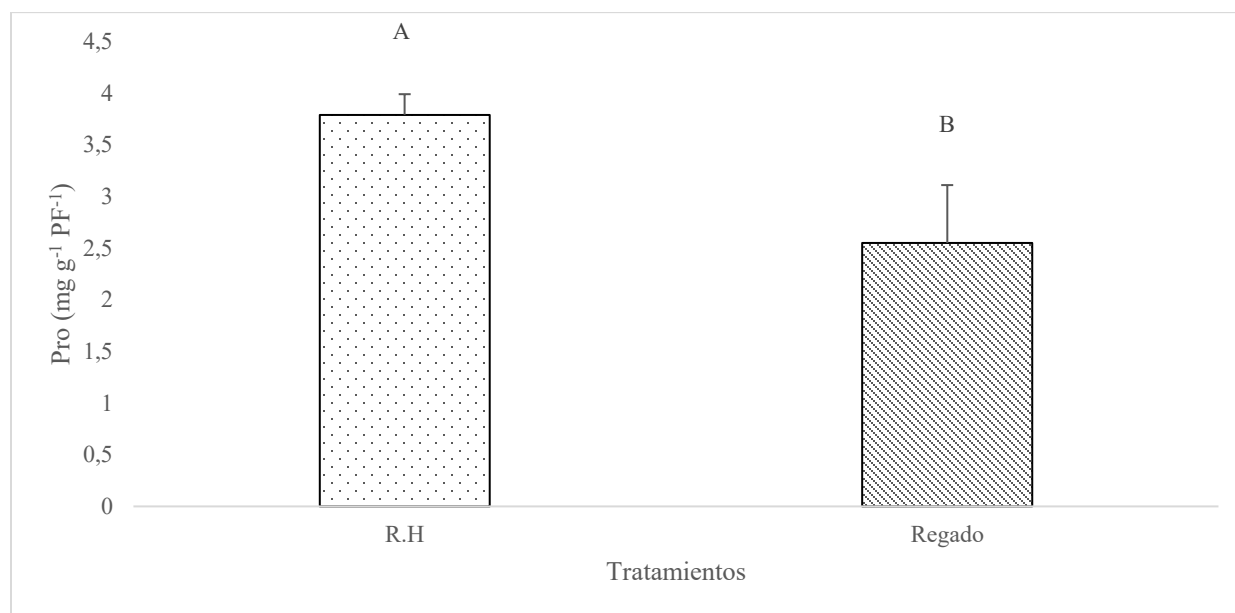
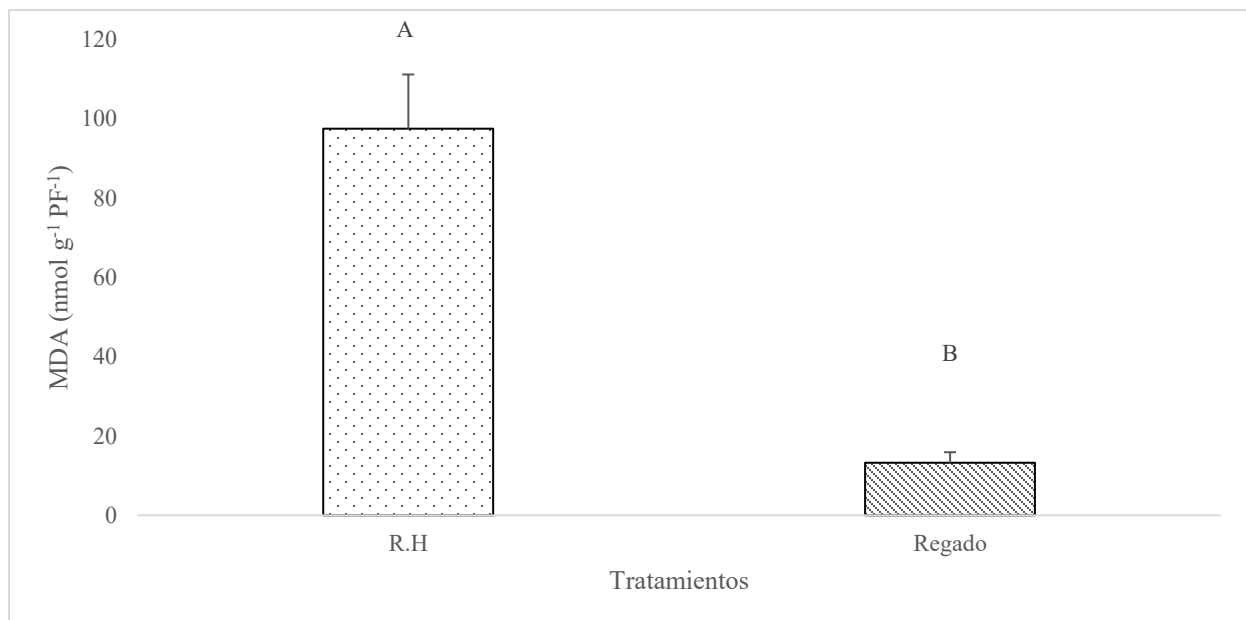


Figura 22. Contenido de prolina (Pro) en brotes de *Stipa caudata* medido al final del experimento. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. RH = restricción hídrica; Regadas = irrigadas.

En la Figura 23 se presentan las significancias encontradas para el contenido de malondialdehído (MDA) total medido en brotes de *Stipa caudata* al final del experimento. Se presentaron diferencias significativas respecto a la condición hídrica (B), en donde plantas RH presentaron mayores niveles en cuanto a MDA respecto a plantas regadas.

Figura 23. Contenido de malondialdehído (MDA) en brotes de *Stipa caudata* medido al final del experimento.



Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. RH = restricción hídrica; Regadas= irrigadas.

En la tabla 12 se presentan las significancias encontradas para la actividad de catalasa (CAT), ascorbato peroxidasa (APX), superóxido dismutasa (SOD) y glutatión reductasa (GR) en brotes de *Stipa Caudata* medidos al final del experimento. Se presentó interacción entre Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para la actividad CAT y SOD, junto a diferencias significativas para la condición hídrica (B) respecto a la actividad APX.

Tabla 12. Actividad de enzimas catalasa (CAT), ascorbato peroxidasa (APX), superóxido dismutasa (SOD) y glutatión reductasa (GR) en brotes de *Stipa caudata* tras 14 días de aplicados los tratamientos y restricción hídrica temporada 2018-2019.

Condición hídrica	Tratamientos	CAT (U mg ⁻¹ proteína)			APX (U mg ⁻¹ proteína)			SOD (U mg ⁻¹ proteína)			GR (U mg ⁻¹ proteína)		
Regado	SA + AAS ¹	17629	±	1641	ab ²	186	±	99	252	±	222	ab	4247 ± 2043
Regado	SA + Control	13848	±	824	bc	130	±	82	785	±	86	a	3371 ± 1403
Regado	Control + AAS	10633	±	1166	c	366	±	98	33	±	121	b	9670 ± 1939
Regado	Control	20030	±	2010	a	46	±	15	881	±	222	a	5556 ± 1830
R.H	SA + AAS	15505	±	824	ab	35	±	16	655	±	272	ab	5685 ± 2864
R.H	SA + Control	16622	±	583	ab	429	±	99	728	±	70	a	5165 ± 1027
R.H	Control + AAS	16946	±	824	ab	559	±	82	767	±	121	a	5665 ± 1404
R.H	Control	16193	±	1641	ab	778	±	75	849	±	221, 99	a	6018 ± 1826
Estadística													
Tratamientos	A	N.S ³			N.S			*			N.S		
Condición hídrica	B	*			*			N.S			N.S		
	AxB	*			N.S			*			N.S		

¹/ AAS = ácido acetilsalicílico; SA = sulfato de amonio; Control = sin tratamientos; Regadas = irrigada; RH = restricción hídrica. ²/ Letras diferentes en sentido vertical indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor <0,05). ³*/ Indica diferencias significativas; N.S = No significativa.

En la Figura 24 se presenta la interacción Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para el contenido del total de compuestos fenólicos (TCF) en brotes medidos al final del experimento. Plantas AAS regadas, presentaron los menores niveles en la actividad CAT respecto a los demás tratamientos. Por otra parte, tratamientos AAS, SA o la mezcla de ambos independientemente de su condición hídrica, presentaron menor actividad CAT que plantas regadas sin tratamientos.

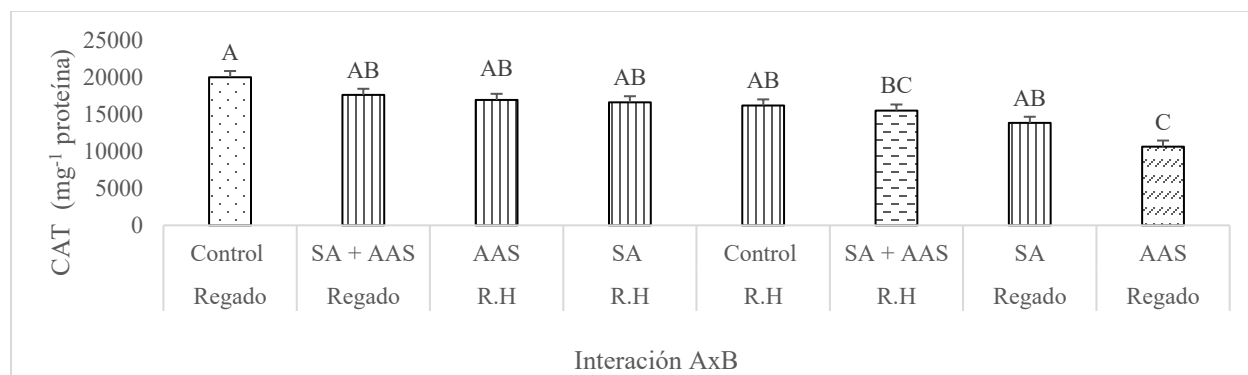


Figura 24. Interacción Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para la actividad de catalasa (CAT) en brotes de *Stipa caudata* medida al final del experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; SA = sulfato de amonio; Control = sin tratamientos; Regadas = irrigada; RH = restricción hídrica.

En la Figura 25 se presentan las significancias encontradas para la actividad APX medida en brotes de *Stipa caudata* al final del experimento. Se presentaron diferencias significativas respecto a la condición hídrica (B), en donde plantas RH presentaron mayores niveles en cuanto a APX respecto a plantas Regadas.

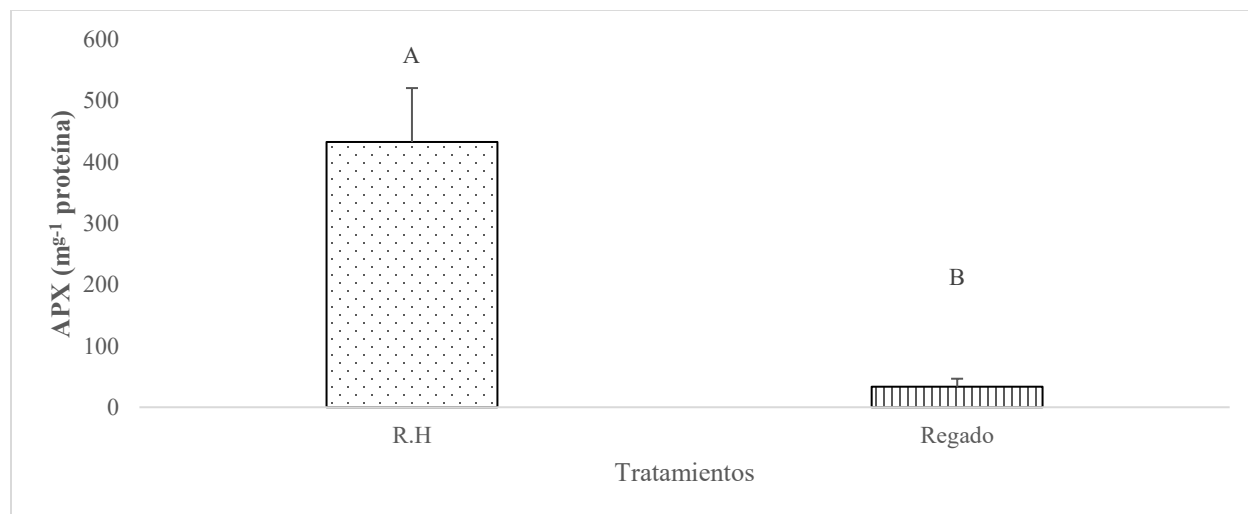


Figura 25. Actividad de la enzima ascorbato peroxidasa (APX) en brotes de *Stipa caudata* medida al final del experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. RH = con restricción hídrica, Regadas = Irrigadas

En la Figura 26 se presenta la interacción Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para la actividad Superóxido Dismutasa (SOD), en brotes medidos al final del experimento. Plantas con la mezcla AAS/SA con restricción hídrica, con la mezcla AAS/SA y AAS regadas, presentaron los menores niveles en la actividad SOD, respecto al resto de los tratamientos independientemente de su condición hídrica, siendo el tratamiento regado sin aplicaciones quien mostró una tendencia a los mayores niveles de la actividad.

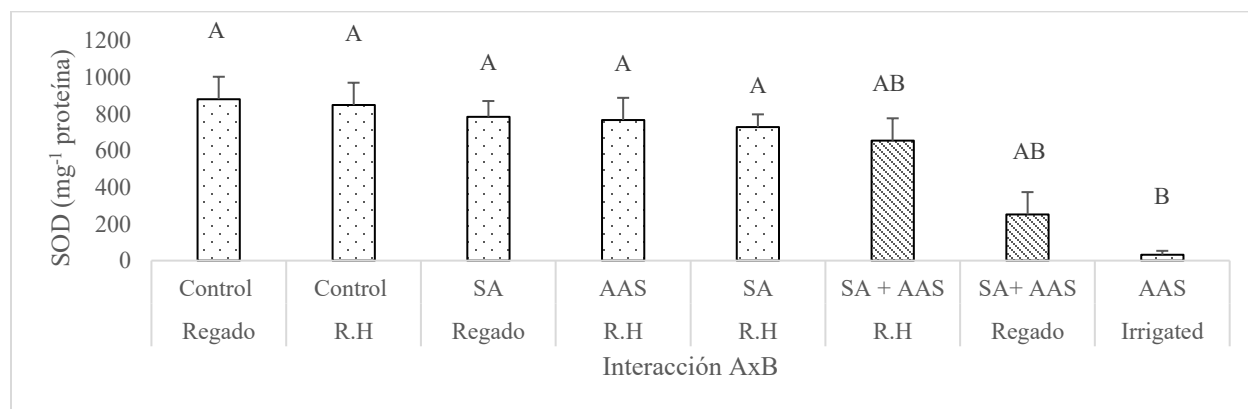


Figura 26. Interacción Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para la actividad de Superóxido Dismutasa (SOD) en brotes de *Stipa caudata* medida al final del experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; SA = sulfato de amonio; Control = sin tratamientos; Regadas = irrigada; RH = restricción hídrica.

4.2.2.2. Análisis de componentes principales entre las variables respuesta del estudio

En la Figura 27 se presenta el análisis de componentes principales efectuado para las variables respuestas edáficas, productivas y fisiológicas del estudio. El componente principal 1 (CP1) comprende el 29,1% de la variabilidad total de los datos, mientras que el componente principal 2 (CP2) el 24,8% explicando en su conjunto el 53,9% del total. Las variables con mayor inercia (Autovectores) dentro de la CP1 de mayor a menor son: Ca de hojas (0,38), GR (0,35), TCF (0,33).

Las variables con mayor variabilidad o inercia dentro de la CP2 son: MDA (0,42), Pro (0,38), SOD (0,36). En la Tabla 13 se presentan los coeficientes de Pearson y variables con diferencias significativas.

Tabla 13. Coeficientes de Pearson y variables con diferencias significativas.

Correlación	2018-2019	
	Pearson Coef.	<i>P</i> value (<0,05)
K de hojas/ Largo de brotes	-0,84	0,0090
Cl de hojas/ CE	-0,73	0,0381
TCF/ Ca de hojas	0,72	0,0423
Flavonoides/ TCF	0,89	0,0033
MDA/ TCF	0,73	0,0394
MDA/ Flavonoides	0,84	0,0098
SOD/ Pro	0,87	0,0054
GR/ TCF	0,75	0,0320
GR/ Flavonoides	0,77	0,0267

En el Cuadro 4 y Figura 27 se observan correlaciones negativas y significativas entre el contenido de K de hojas/largo acumulado de tallos y el contenido de Cl⁻ de hojas/conductividad eléctrica del suelo (CE). A su vez, se encontraron correlaciones positivas y significativas entre TCF/contenido de Ca de hojas; flavonoides/TCF; MDA/TCF; MDA/flavonoides; SOD/Pro; GR/TCF; GR/flavonoides. Tratamientos RH en donde AAS estuvo presente, se correlacionaron positivamente con acumulación de Pro y K foliar, junto con aumentos en la actividad de las enzimas SOD y APX. Tratamientos RH con SA mostraron correlación positiva MDA, flavonoides, TCF, Cl⁻ de hojas y actividad GR.

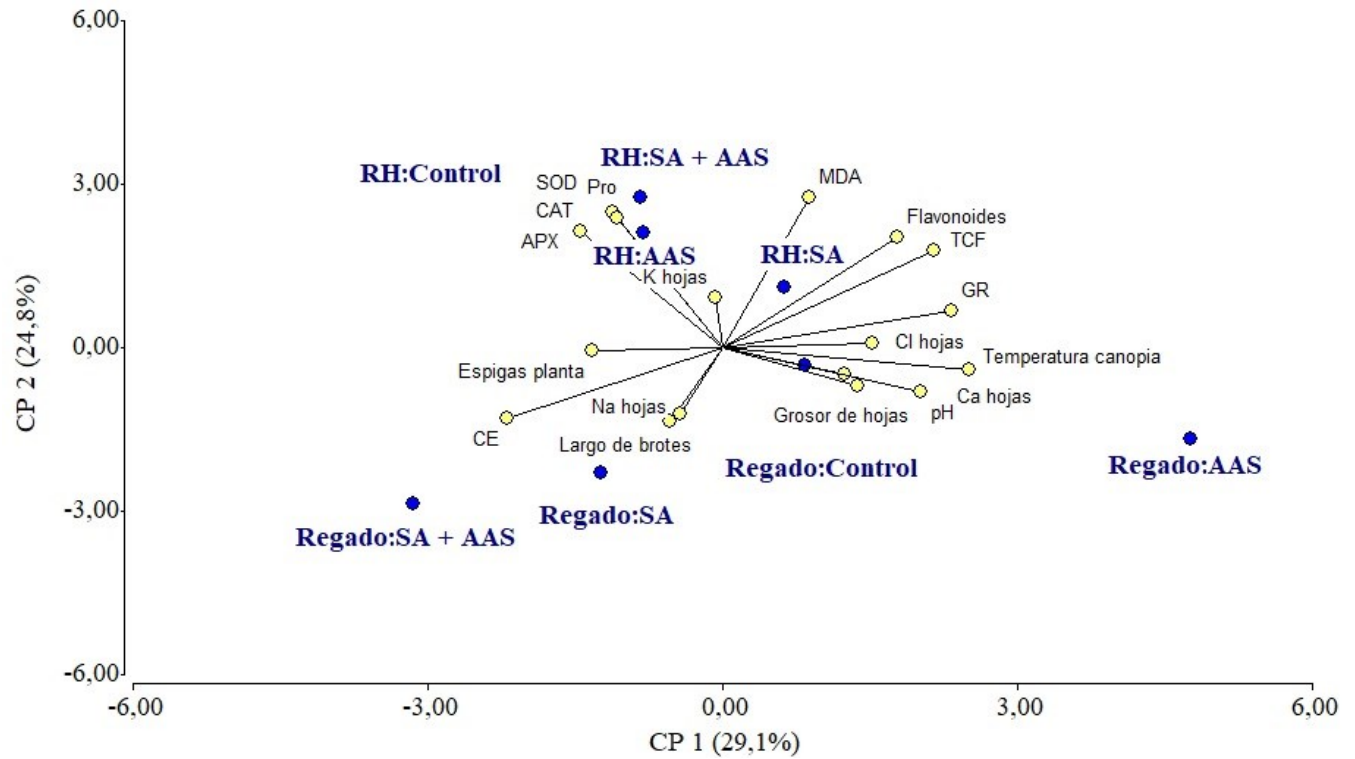


Figura 27. Análisis de componentes principales entre las variables respuesta del estudio.

MDA = Malondialdehído; SOD = superóxido dismutasa; APX = ascorbato peroxidasa; GR = glutatión reductasa; Pro = prolina; TCF = total de compuestos fenólicos; Regadas = irrigadas; RH = restricción hídrica; SA = sulfato de amonio; AAS = ácido acetilsalicílico; Control = control.

4.3. Temporada 2019-2020

4.3.1. Ensayo preliminar

4.3.1.1. Variables edáficas

En la Figura 28, se presentan las significancias encontradas para los tratamientos, respecto al pH acumulado de la solución del suelo de *Stipa caudata* medidos durante el experimento. Plantas BS y AAS/BS presentaron significativamente los mayores, mientras que plantas Control y AAS, los menores.

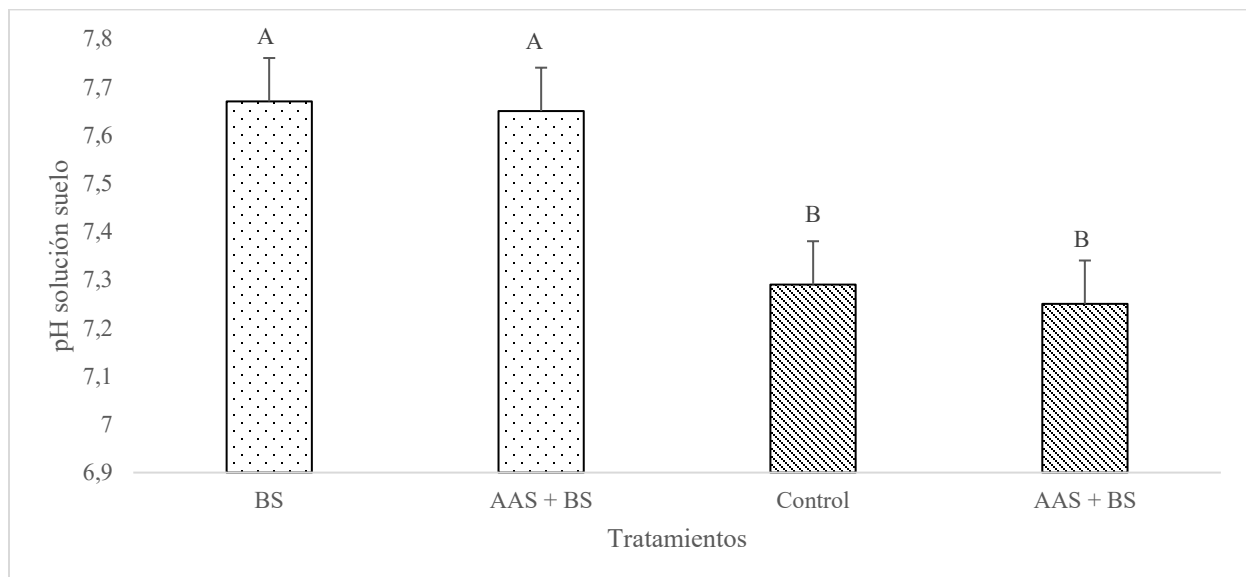


Figura 28. pH de la solución suelo acumulado en *Stipa caudata* medido durante el experimento. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; BS = biosólidos; Control = sin tratamientos.

En la Figura 29, se presentan los resultados de la interacción tratamientos (A) y condición hídrica (B) para la conductividad eléctrica acumulada de la solución suelo en *Stipa caudata* medidos durante el experimento. Plantas Irrigadas BS presentaron significativamente los mayores valores al presentar mayores contenidos en sales. Plantas AAS +BS Irrigadas, AAS +BS RH y BS RH, se

ubicaron en una posición intermedia, mientras que plantas AAS, Control Irrigadas y Control RH, obtuvieron los menores.

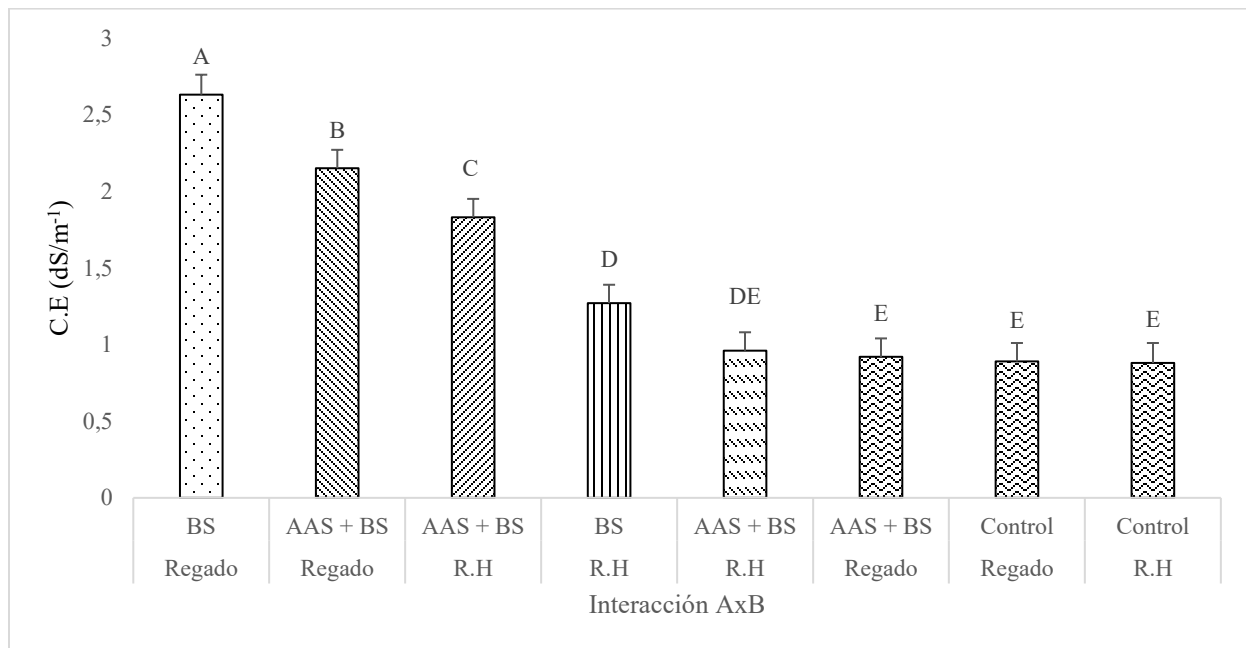


Figura 29. Conductividad eléctrica acumulada en *Stipa caudata* medidas durante el experimento. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $< 0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; BS = biosólidos; Control = sin tratamientos. RH = restricción hídrica; Regadas = irrigadas

4.3.1.2. Variables productivas y fisiológicas

En la Figura 30 se presentan las significancias encontradas para el crecimiento acumulado de tallos de *Stipa caudata* medido durante el experimento, según la condición hídrica en la que se encontraban, Regadas o RH. Plantas Regadas presentaron mayor largo de tallos acumulado respecto a plantas RH.

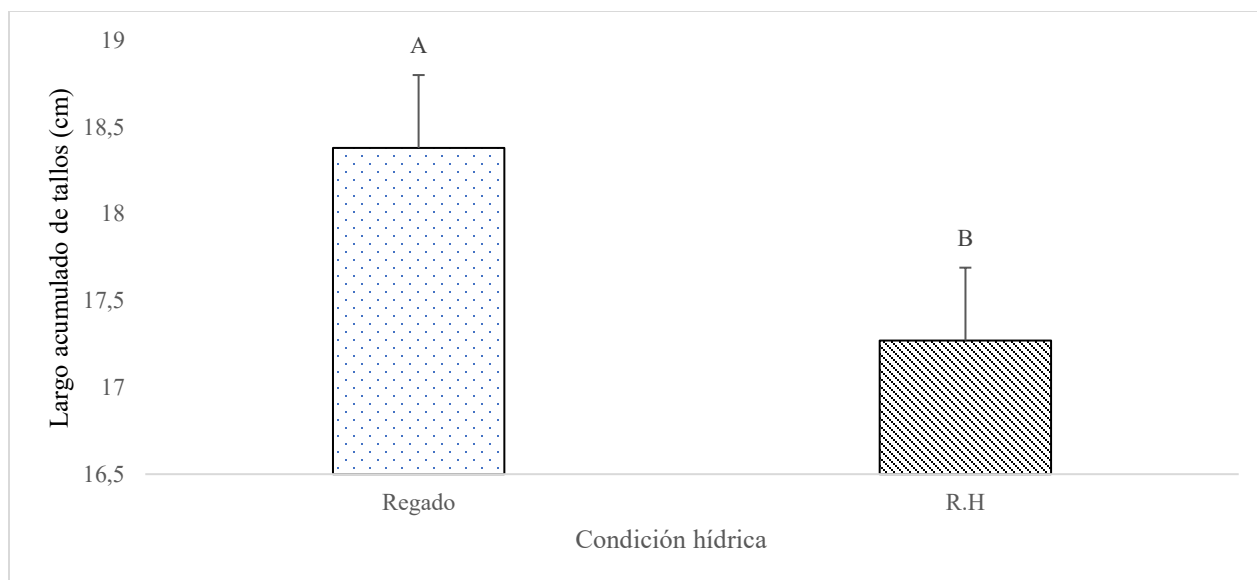


Figura 30. Largo acumulado de tallos de *Stipa caudata* medidos durante el experimento, según condición hídrica.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. RH = restricción hídrica; Regadas = irrigadas.

En la Figura 31 se presentan las significancias encontradas para el crecimiento acumulado de tallos de *Stipa caudata* medidos durante del experimento. Se presentaron diferencias significativas respecto a los tratamientos aplicados, en donde plantas Control presentaron los mayores niveles de altura, plantas AAS /BS se encontraron en una posición intermedia y plantas AAS y BS obtuvieron los menores valores.

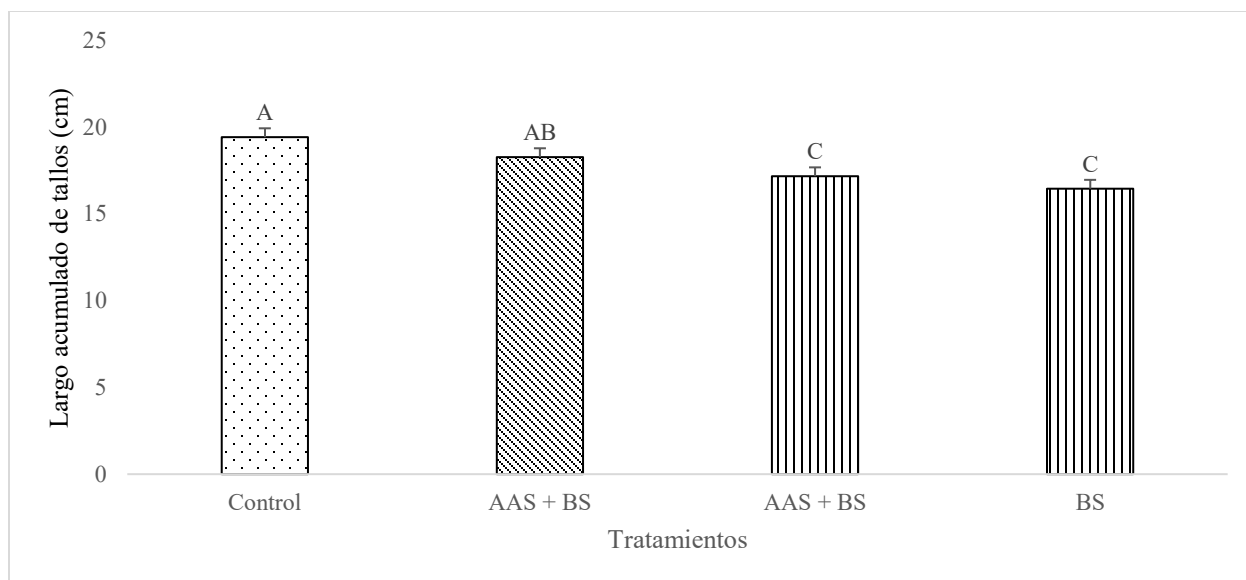


Figura 31. Largo acumulado de tallos de *Stipa caudata* durante el experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; BS = biosólidos; Control = sin tratamientos.

En la Figura 32, se presentan las significancias encontradas respecto al grosor acumulado de hojas de *Stipa caudata* medidos durante el experimento, según los tratamientos aplicados. Plantas BS presentaron los mayores valores respecto al resto de los tratamientos.

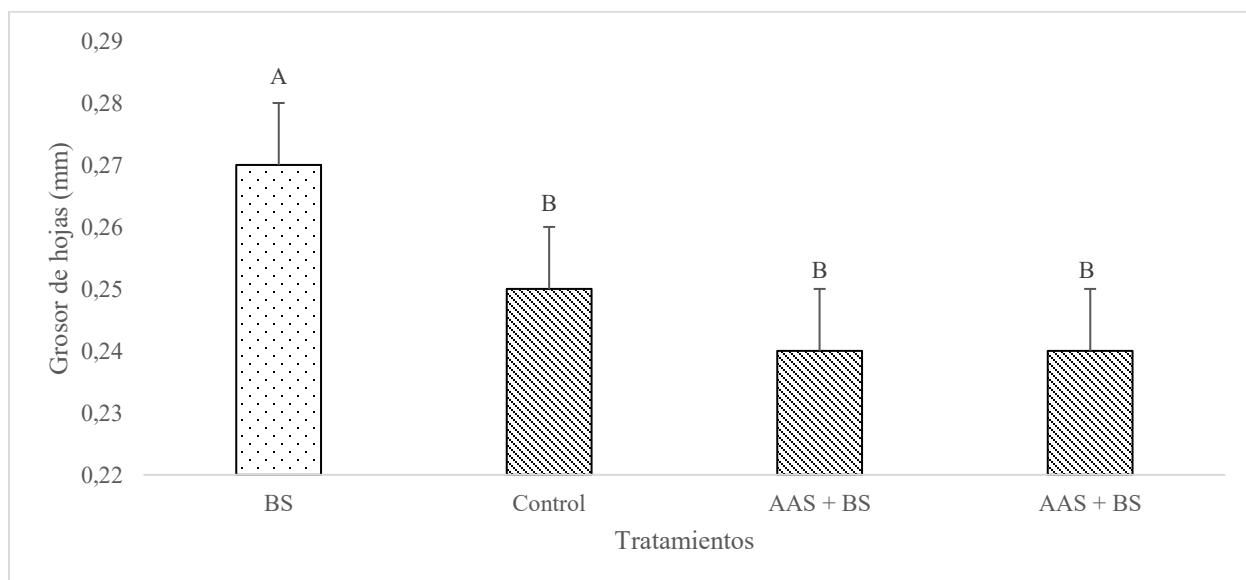


Figura 32. Grosor acumulado de hojas de *Stipa caudata* medidos durante el experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; BS = biosólidos; Control = sin tratamientos.

4.3.2. Ensayo final

4.3.2.1. Variables edáficas

En la Figura 33, se presentan los resultados del pH acumulado de la solución suelo de *Stipa caudata* medidos durante el experimento. Plantas con la mezcla AAS /BS presentaron los menores valores respecto a plantas control y AAS, situándose BS en una posición intermedia.

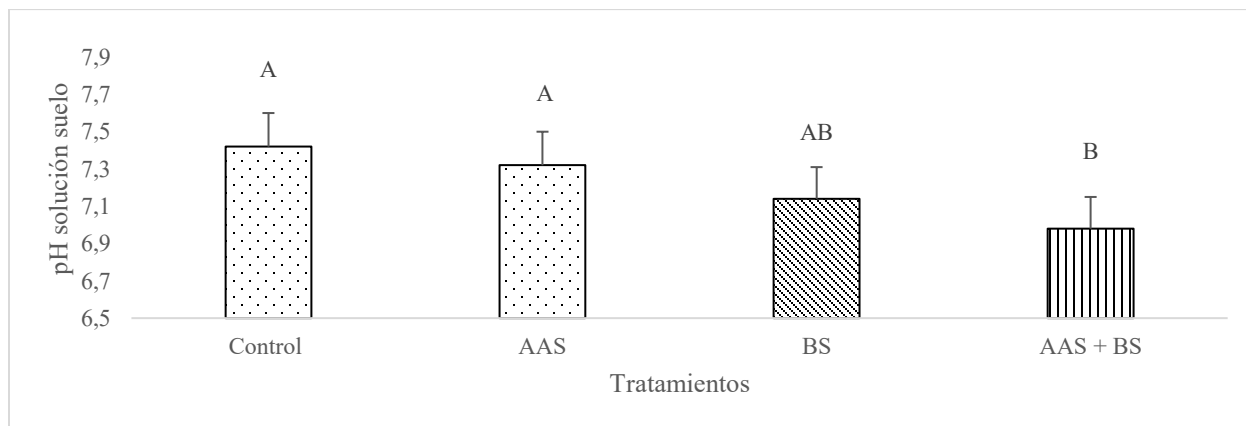


Figura 33. pH de la solución del suelo acumulado en *Stipa caudata* medidos durante el experimento. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; BS = biosólidos; Control = sin tratamientos

En la Figura 34, se presentan los resultados de la conductividad eléctrica acumulada de la solución suelo en *Stipa caudata* medidos durante el experimento. Plantas control y AAS presentaron significativamente menores valores respecto a los tratamientos BS y AAS /BS.

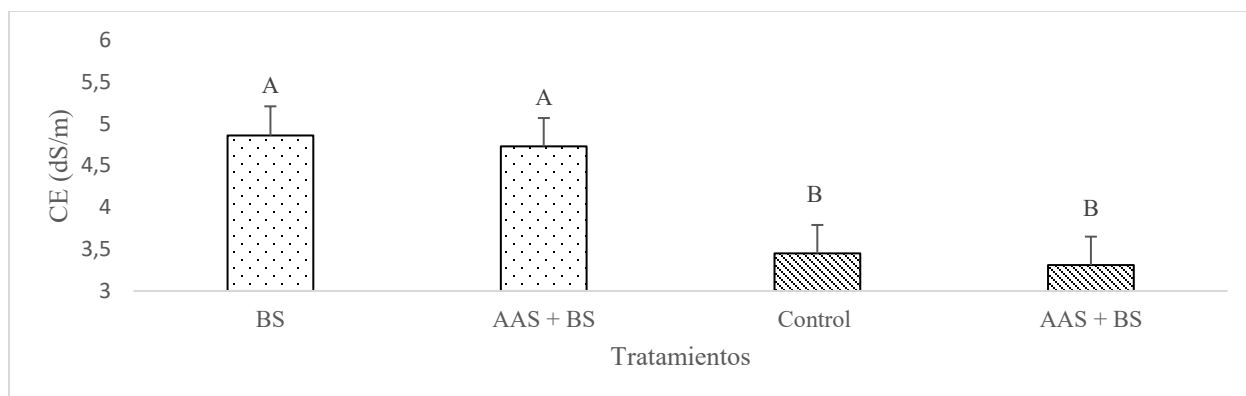


Figura 34. CE acumulada de la solución del suelo en *Stipa caudata* medidas durante el experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; BS = biosólidos; Control = sin tratamientos.

En la Figura 35 se presenta la conductividad eléctrica acumulada de la solución suelo de *Stipa caudata* medidos durante el experimento. Se presentaron diferencias significativas respecto a la condición hídrica, en donde plantas RH presentaron mayores niveles en cuanto a esta variable respecto a plantas Regadas debido a que el irrigado existe un lavado de las sales presentes en el suelo.

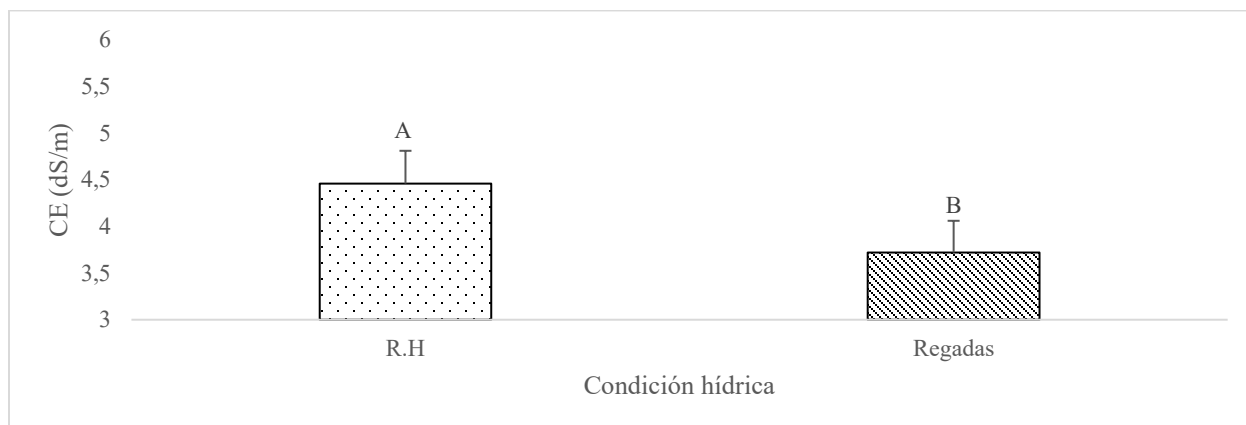


Figura 35. Conductividad eléctrica acumulada en la solución del suelo de *Stipa caudata* medidos durante el experimento, según condición hídrica.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. RH = con restricción hídrica, Regadas = Irrigadas.

En la Figura 36, se presentan los resultados del contenido volumétrico acumulado del agua en el suelo en *Stipa caudata* medidos durante el experimento. Plantas BS y AAS /BS presentaron significativamente mayores valores respecto a tratamientos control, mientras que AAS se ubicó entre valores intermedios.

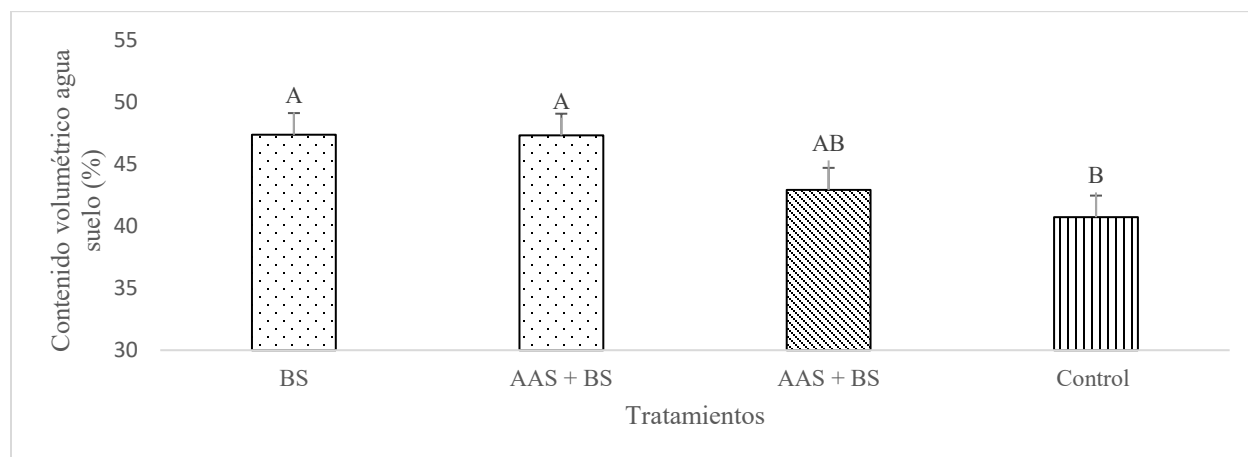


Figura 36. Contenido volumétrico acumulado del agua en el suelo en *Stipa caudata* durante el experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $< 0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; BS = biosólidos; Control = sin tratamientos.

En la Figura 37 se presenta el contenido volumétrico acumulado de agua en el suelo de *Stipa caudata* medidos durante del experimento. Se presentaron diferencias significativas respecto a la condición hídrica, en donde plantas RH presentaron menores niveles en cuanto a esta variable respecto a plantas Regadas.

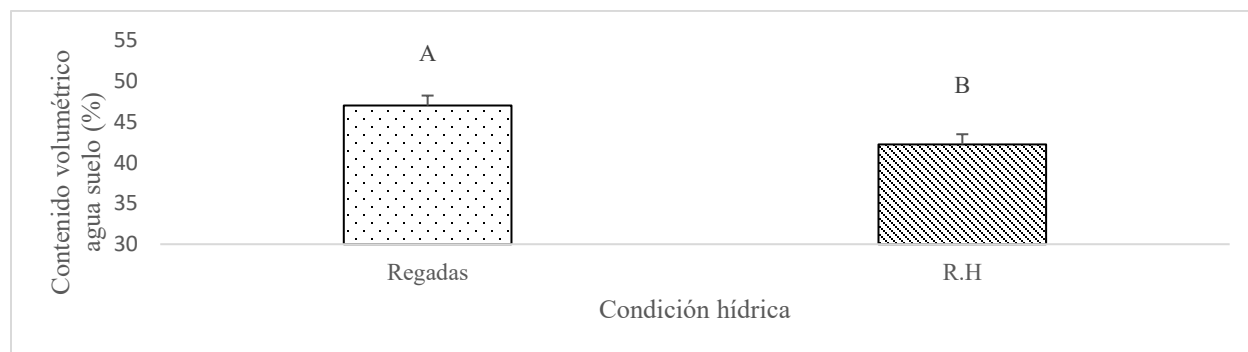


Figura 37. Contenido volumétrico de agua en el suelo de *Stipa caudata*, según condición hídrica. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. RH = con restricción hídrica, Irrigadas = irrigadas.

En la Figura 38 se presenta el contenido volumétrico de agua en el suelo de *Stipa caudata* medidos durante del experimento. Sustratos RH control presentaron los menores valores, mientras que sustratos Irrigados los mayores. Sustratos RH BS presentaron mayores valores que Irrigados Control, como consecuencia que los BS aportan mayor contenido de materia orgánica y retienen más agua.

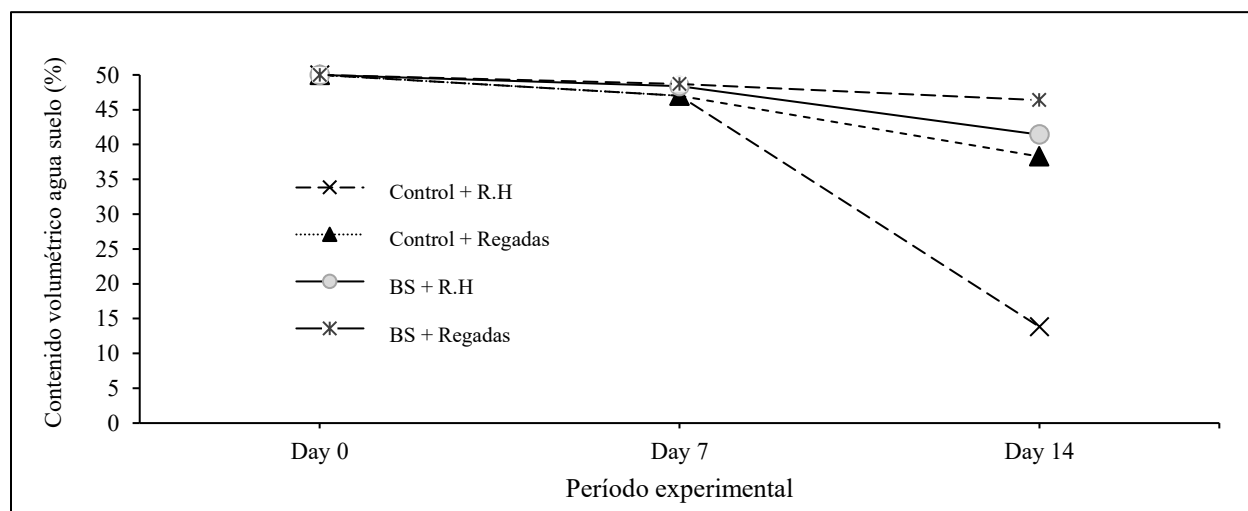


Figura 38. Contenido volumétrico de agua en el suelo de *Stipa caudata*, según condición hídrica. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. RH = con restricción hídrica, Regadas = irrigadas. BS = biosólidos, Control = sin tratamientos.

4.3.2.2. Variables productivas y fisiológicas

En la Figura 39, se presentan los resultados del crecimiento acumulado de tallos de *Stipa caudata* medidos durante el experimento. No hubo diferencias significativas entre los tratamientos.

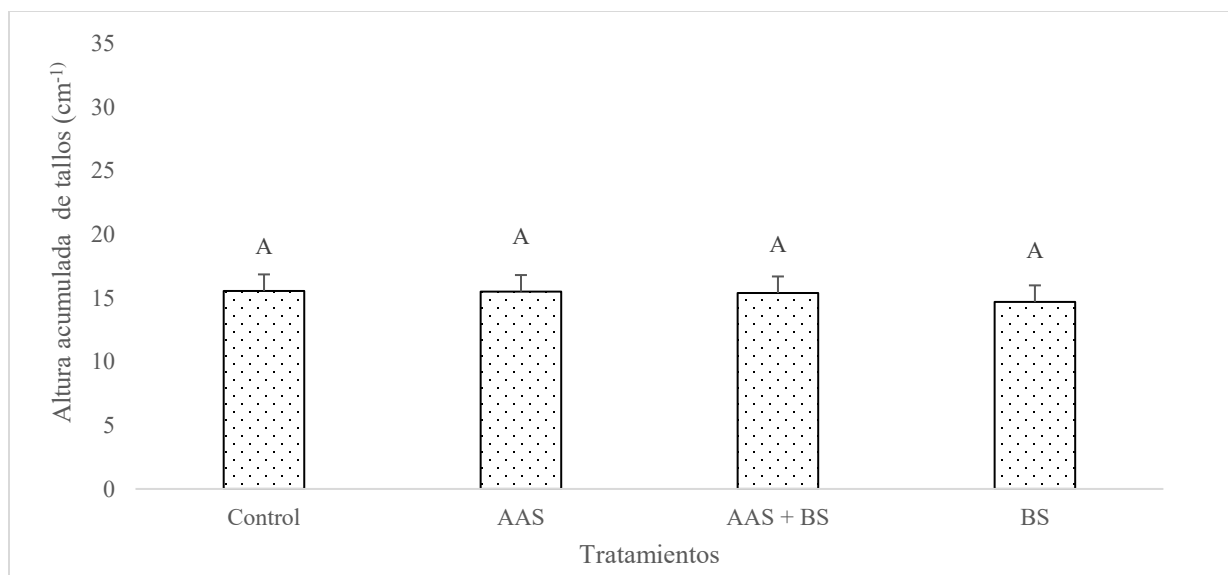


Figura 39. Largo acumulado de tallos de *Stipa caudata* durante el experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; BS = biosólidos; Control = sin tratamientos.

En la Figura 40 se presenta el crecimiento acumulado de tallos de *Stipa caudata* durante el experimento. Se presentaron diferencias significativas respecto a la condición hídrica, en donde plantas RH presentaron menores niveles respecto a plantas Regadas.

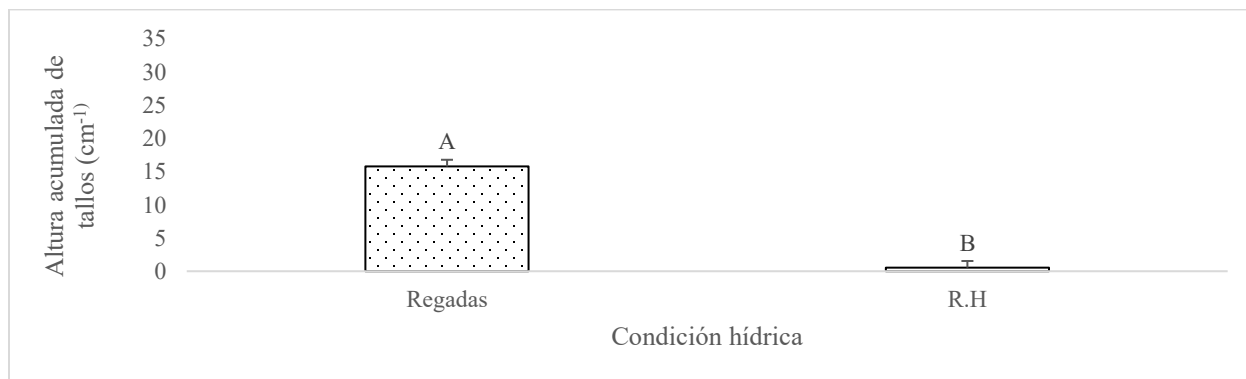


Figura 40. Largo acumulado de tallos de *Stipa caudata* medidos durante el experimento, según condición hídrica.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. RH = restricción hídrica; Regadas = irrigadas.

En la Figura 41, se presentan los resultados del grosor acumulado de hojas de *Stipa caudata* medidos durante el experimento. No se presentan diferencias significativas entre los tratamientos.

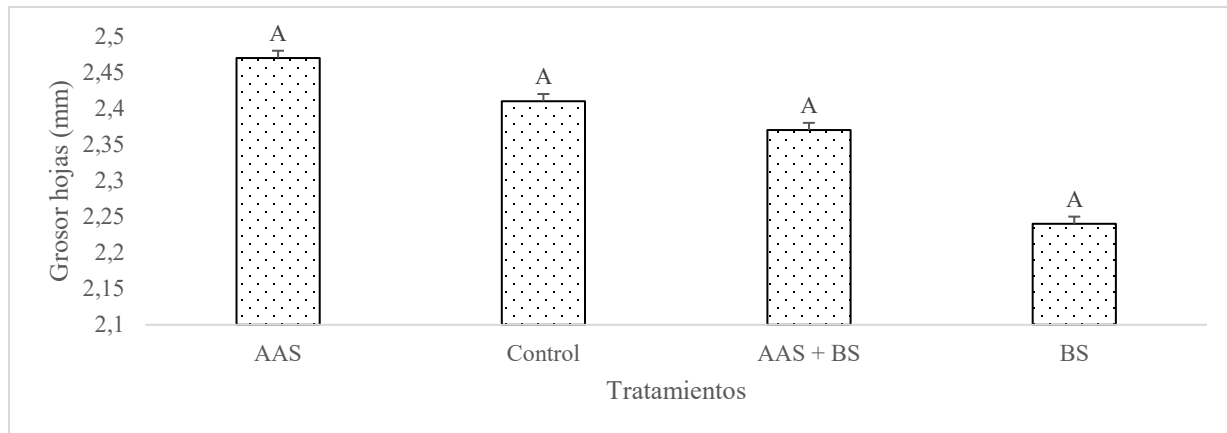


Figura 41. Grosor acumulado de hojas de *Stipa caudata* durante el experimento, según condición hídrica.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; BS = biosólidos; Control = sin tratamientos. En la Figura 42 se presentan las significancias encontradas para la temperatura acumulada de canopia en *Stipa caudata* medida durante el experimento. No se presentan diferencias significativas entre los tratamientos.

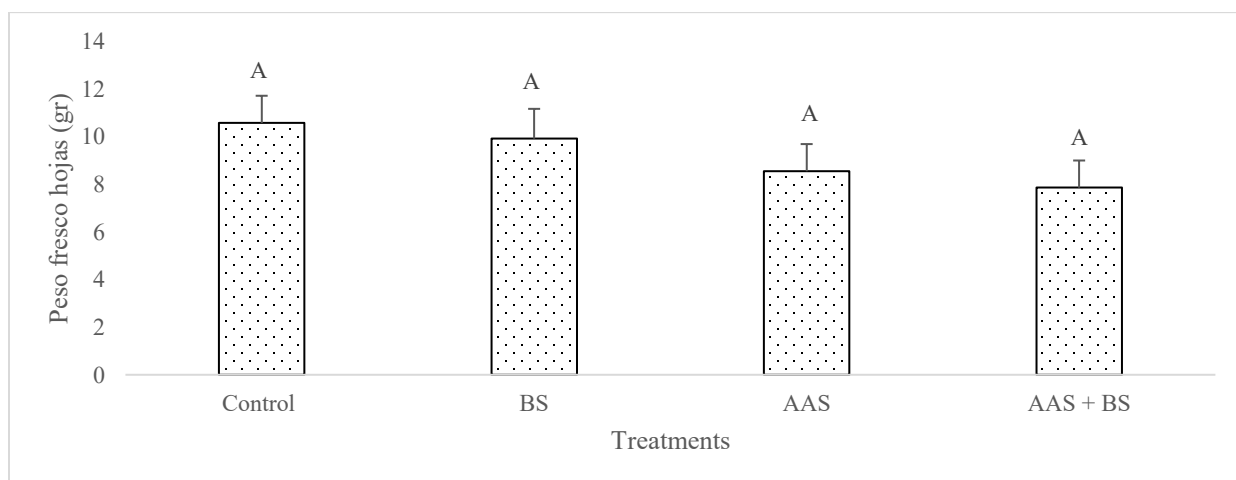


Figura 42. Peso fresco de las plantas de *Stipa caudata* al final del experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; BS = biosólidos; Control = sin tratamientos.

En la Figura 43, se presentan los resultados del peso seco de la cobertura vegetal de *Stipa caudata* medidos al final del experimento. Plantas tratadas con la mezcla AAS /BS o BS presentaron menores valores de materia seca de canopia respecto a plantas control, encontrándose AAS en una situación intermedia.

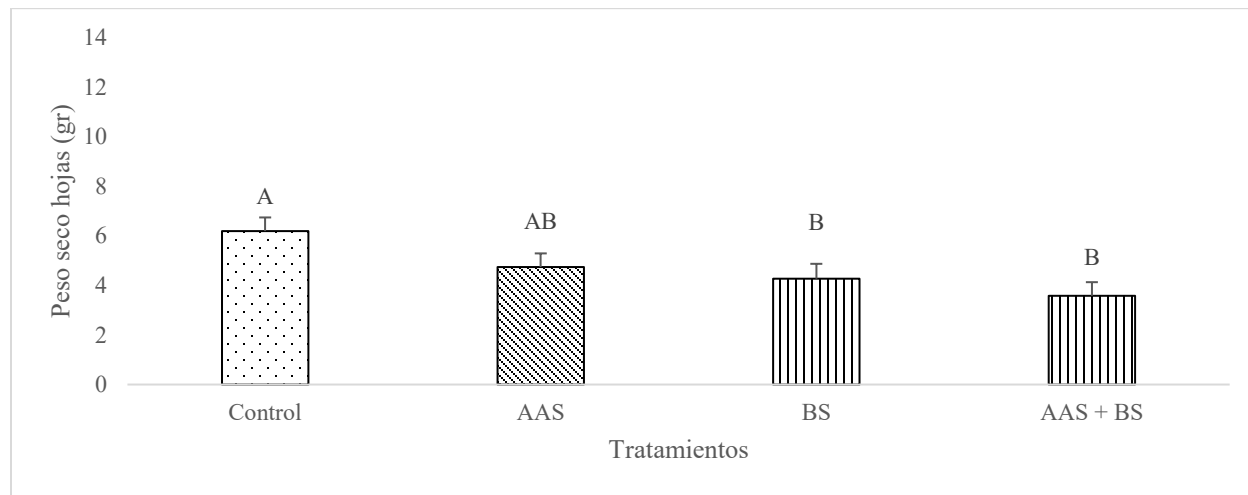


Figura 43. Pese seco de las plantas de *Stipa caudata* al final del experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; BS = biosólidos; Control = sin tratamientos.

En la Figura 44, se presentan los resultados del peso fresco de raíces de *Stipa caudata* medidos al final del experimento. Plantas tratadas con la mezcla AAS /BS y plantas AAS presentaron significativamente las menores medias respecto a plantas Control, mientras que el tratamiento BS presentó una situación intermedia.

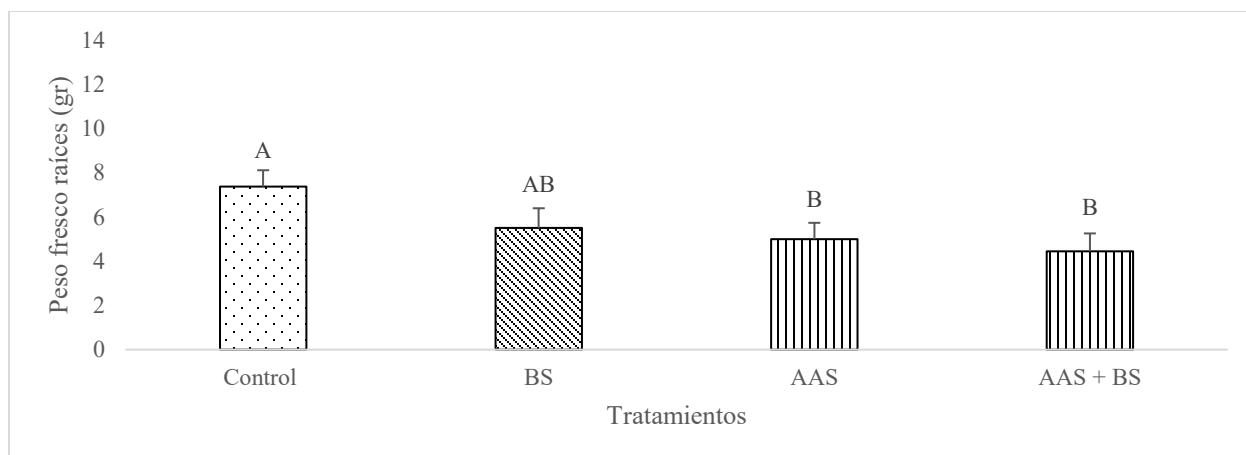


Figura 44. Peso fresco de raíces en *Stipa caudata* al final del experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; BS = biosólidos; Control = sin tratamientos.

En la Figura 45, se presentan los resultados de la interacción del peso seco de raíces de *Stipa caudata* medidos al final del experimento. Plantas control RH presentaron los mayores valores respecto al resto de los tratamientos, mientras que la mezcla AAS /BS en RH presentaron los menores. El resto de los tratamientos se situó en posiciones intermedias.

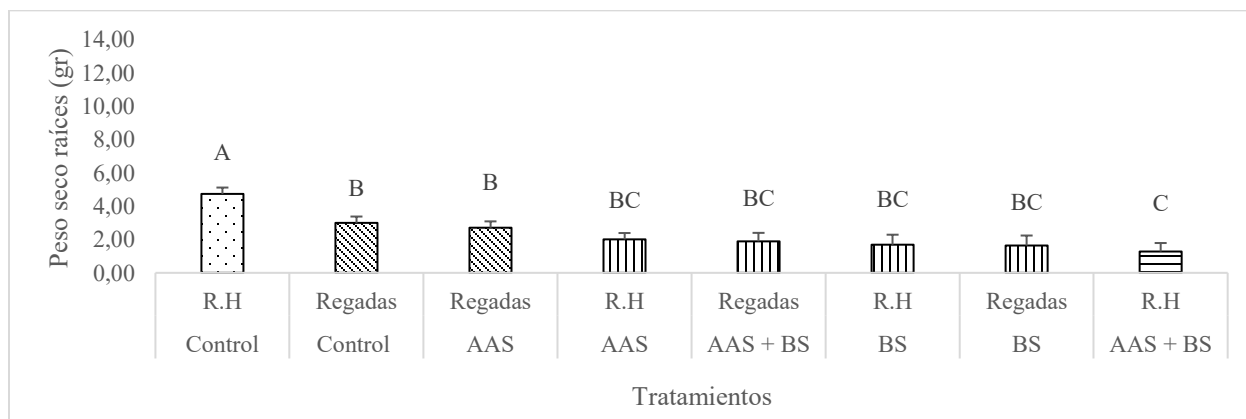


Figura 45. Peso seco de raíces en *Stipa caudata* medidos al final del experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; BS = biosólidos; Control = sin tratamientos. RH = restricción hídrica; Regadas = irrigadas.

En la Tabla 14, se presentan los resultados de los contenidos de Na⁺, Cl⁻ y K⁺, en brotes de *Stipa caudata* al final del experimento. Hubo diferencias significativas para las condiciones hídricas: Regadas y RH para el contenido acumulado de Na⁺ en brotes de *Stipa caudata*.

Tabla 14. Contenidos de Na⁺, Cl⁻ y K⁺, en brotes de *Stipa caudata* medidos al final del experimento temporada 2019-2020.

Condición hídrica	Tratamiento	Na ⁺ (μmol g ⁻¹ PS ⁻¹)	Cl ⁻ (μmol g ⁻¹ PS ⁻¹)	K ⁺ (μmol g ⁻¹ PS ⁻¹)
Regado	ASA + BS			
Regado	ASA	247,51 ± 13,79	330,02 ± 60,25	695.91 ± 106,85
Regado	BS			
Regado	Control	252,14 ± 13,79	373,7 ± 7,81	621.33 ± 48,14
R.H	ASA + BS			
R.H	ASA	313,41 ± 15,92	369,94 ± 18,92	754.91 ± 106,85
R.H	BS			
R.H	Control	269,51 ± 15,92	378,02 ± 60,25	577.69 ± 180,72
Estadística				
Tratamientos	A	N.S	N.S	N.S
Condición hídrica	B	*	N.S	N.S
AxB		N.S	N.S	N.S

^{1/} AAS = ácido acetilsalicílico; BS = biosólidos; Control = sin tratamientos; Regadas = irrigada; RH = restricción hídrica. Medias ± error estándar. */ Indica diferencias significativas según la prueba de Fisher (*p*-valor <0,05); N.S = No significativa.

En la Figura 46 se presenta el contenido acumulado de Na⁺ en brotes de *Stipa caudata* analizados al final del experimento. Se presentaron diferencias significativas respecto a la condición hídrica, en donde plantas RH presentaron mayores niveles de Na⁺ respecto a plantas Regadas.

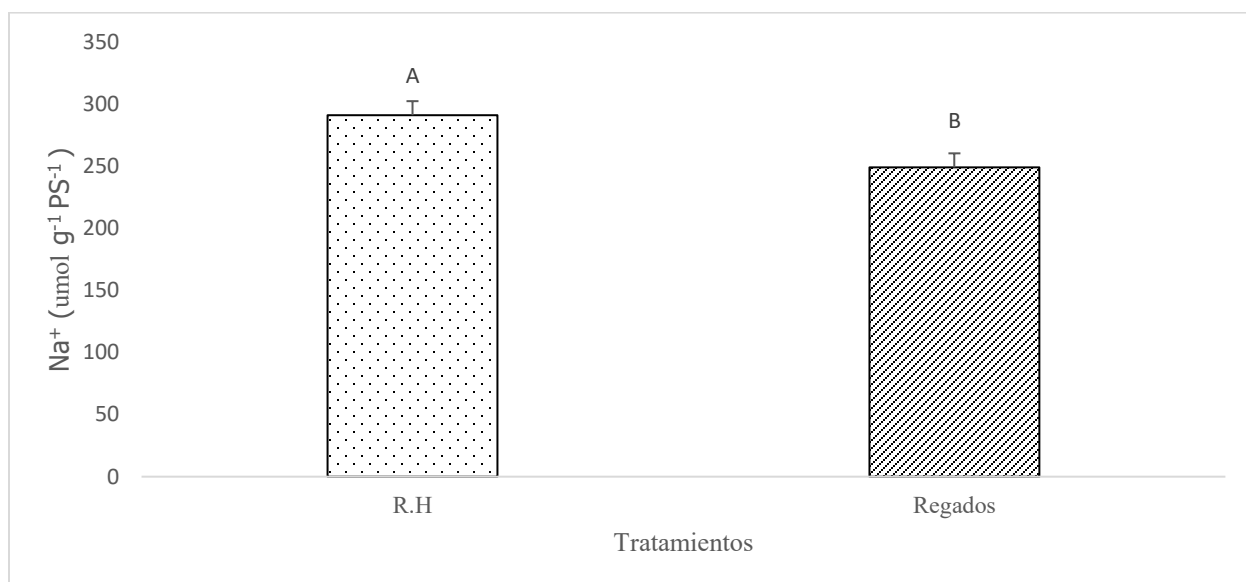


Figura 46. Contenido acumulado de Na⁺ en brotes de *Stipa caudata* medidos al final del experimento, según condición hídrica.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor <0,05). Barras verticales indican error estándar. RH = con restricción hídrica, Regadas = Irrigadas.

En la Tabla 15, se presentan los resultados de los contenidos de Na⁺, Cl⁻ y K⁺, en raíces de *Stipa caudata* medidos al final del experimento, donde diferencias significativas para la interacción entre los tratamientos (A) y condición hídrica (B) para el contenido acumulado de Na⁺ y Cl⁻.

Tabla 15. Contenidos de Na⁺, Cl⁻ y K⁺, en raíces de *Stipa caudata* temporada 2019-2020.

Condición hídrica	Tratamientos	Na ⁺ (μmol g ⁻¹ PS ⁻¹)	Cl ⁻ (μmol g ⁻¹ PS ⁻¹)	K ⁺ (μmol g ⁻¹ PS ⁻¹)
Regado	AAS + BS ¹	331,12 ± 17,89 a ²	109,76 ± 18,45 cd	
Regado	AAS	115,52 ± 17,89 bc	141,47 ± 15,97 bc	136,24 ± 10.71
Regado	BS	164,5 ± 17,89 c	139,35 ± 15,97 bc	
Regado	Control	108,08 ± 17,89 c	165,44 ± 15,97 ab	195,05 ± 55.53
R.H	AAS + BS	72,63 ± 17,89 c	77,56 ± 15,97 de	
R.H	AAS	82,68 ± 17,89 c	189,33 ± 15,97 a	124,46 ± 9.78
R.H	BS	78,71 ± 20,65 c	57,54 ± 15,97 e	
R.H	Control	93,21 ± 17,89 c	163,05 ± 15,97 ab	123,28 ± 41.42
Estadística				
Tratamientos	A	***	***	N.S
Condición hídrica	B	***	N.S	N.S
AxB		***	***	N.S

^{1/} AAS = ácido acetilsalicílico; BS = biosólidos; Control = sin tratamientos; Regadas = irrigada; RH = restricción hídrica. Medias ± error estándar. ^{2/} Indica diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor <0,05); N.S = No significativa.

En la Figura 47 se presenta la interacción entre los Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para el contenido del total de Na⁺ en raíces. Plantas ^{1/} AAS = ácido acetilsalicílico; BS = biosólidos; Control = sin tratamientos; Regadas = irrigada; RH = restricción hídrica. Medias ± error estándar. ^{2/} Indica diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor <0,05); N.S = No significativa.

BS regados, presentaron los mayores niveles respecto a los demás tratamientos. Por otra parte, tratamientos BS y AAS irrigados, una condición intermedia, mientras que el resto de los tratamientos presentó los menores niveles del ion en su tejido radical.

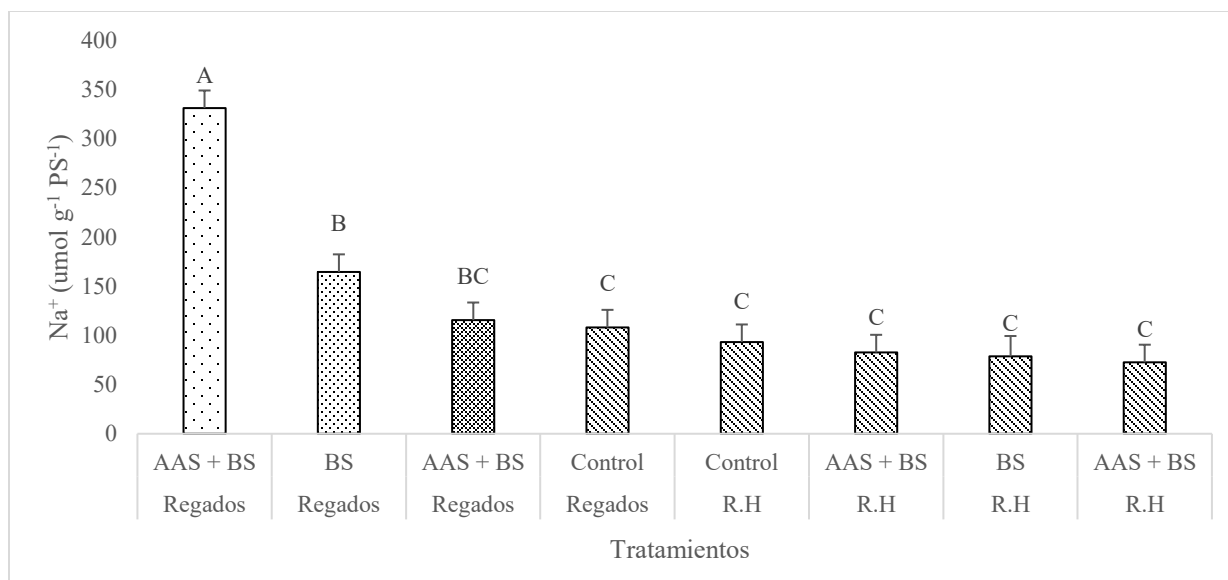


Figura 47. Interacción entre Tratamientos (A) x Condición hídrica (B) para la acumulación de Na⁺ en brotes de *Stipa caudata* medidos al final del experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor<0.05). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; BS = biosólidos; Control = sin tratamientos; Regada = irrigada; RH = restricción hídrica.

En la Figura 48 se presenta la interacción de Tratamientos (A) x Condición hídrica (B), para el contenido acumulado de Cl⁻ en brotes medidos al final del experimento. Plantas RH presentaron los mayores niveles, mientras que Irrigadas y RH Control presentaron niveles intermedios. Niveles intermedios, pero algo menores que los anteriores presentaron plantas Irrigadas AAS, BS y AAS /BS irrigadas, siendo AAS /BS y BS en RH las que presentaron los niveles menores.

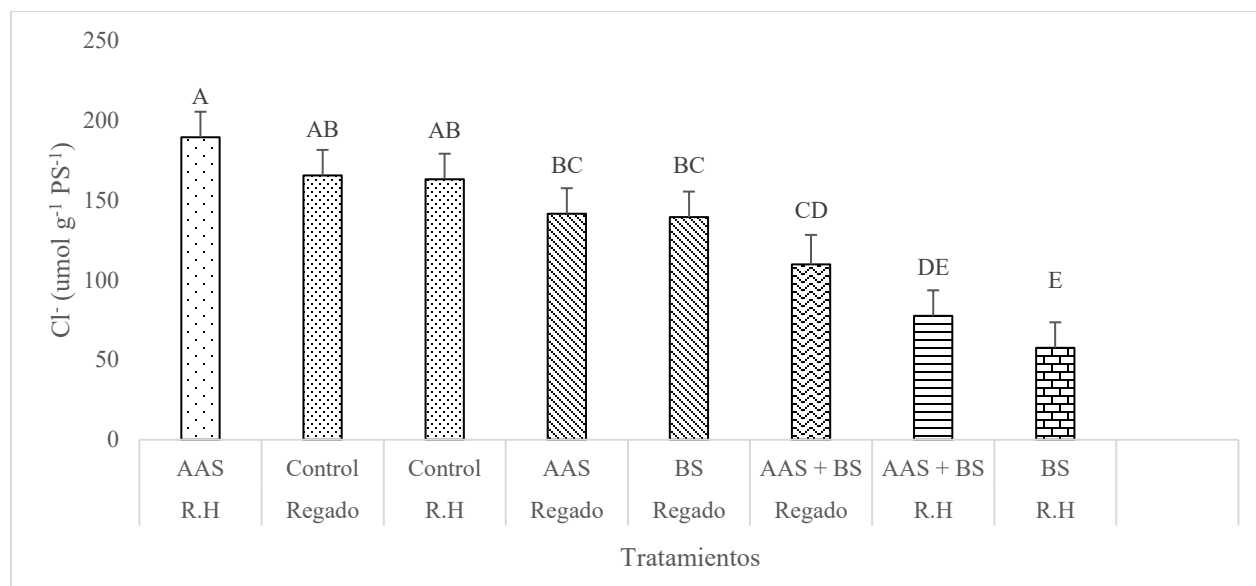


Figura 48. Interacción entre Tratamientos x Condición hídrica para el contenido acumulado de Cl^- en brotes de *Stipa caudata*.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. AAS = ácido acetilsalicílico; BS = biosólidos; Control = sin tratamientos; Regadas = irrigada; RH = restricción hídrica.

En la Tabla 16 se presenta el contenido total de compuestos fenólicos (TCF), total flavonoides (TF), prolina (Pro) y malondialdehído (MDA) en brotes de *Stipa caudata* al final del experimento. Se presentaron diferencias significativas para el contenido de Pro, mientras que en MDA hubo diferencias significativas entre los tratamientos (A) y también para la condición hídrica (B).

Tabla 16. Contenido total de compuestos fenólicos (TCF), total flavonoides (TF), prolina (Pro) y malondialdehído (MDA) en brotes de *Stipa caudata* al final del experimento.

Condición hídrica	Tratamientos	TCF (mg eq. GA g ⁻¹ PF)		TF (catequina g ⁻¹ PF)		Pro (mg g ⁻¹ FW ⁻¹)		MDA (nmol g ⁻¹ PF ⁻¹)	
Regado	AAS + BS					9,31 ± 4,40			
Regado	AAS	67,12 ± 9,16		3,28 ± 0,11		8.89 ± 4,4		47,87 ± 8,72	
Regado	BS	82,09 ± 13,23		3,73 ± 0,12		8.78 ± 4,4		86,26 ± 8,72	
Regado	Control	75,1 ± 13,23		3,01 ± 0,12		10.95 ± 4,4		37,79 ± 8,72	
R.H	AAS + BS					22.25 ± 5,45			
R.H	AAS	56,83 ± 9,16		2,6 ± 0,53		31.7 ± 5,87		26,1 ± 7,55	
R.H	BS	57,92 ± 16,01		2,88 ± 0,75		25.09 ± 4,91		44,99 ± 10,68	
R.H	Control	57,88 ± 11,59		2,4 ± 0,53		30.03 ± 7,13		30,05 ± 7,55	
Estadística									
Tratamientos	A	N.S		N.S		N.S		**	
Condición hídrica	B	N.S		N.S		***		*	
AxB		N.S		N.S		NS		N.S	

^{1/} AAS = ácido acetilsalicílico; BS = biosólidos; Control = sin tratamientos; Regadas = irrigada; RH = restricción hídrica. Medias ± error estándar. */ Indica diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor <0,05); N.S = No significativa.

En la Figura 49 se presenta el contenido de prolina (Pro) total medido en brotes de *Stipa caudata* al final del experimento. Se presentaron diferencias significativas respecto a la condición hídrica (B), en donde plantas RH presentaron mayores niveles en cuanto a Pro respecto a plantas Regadas

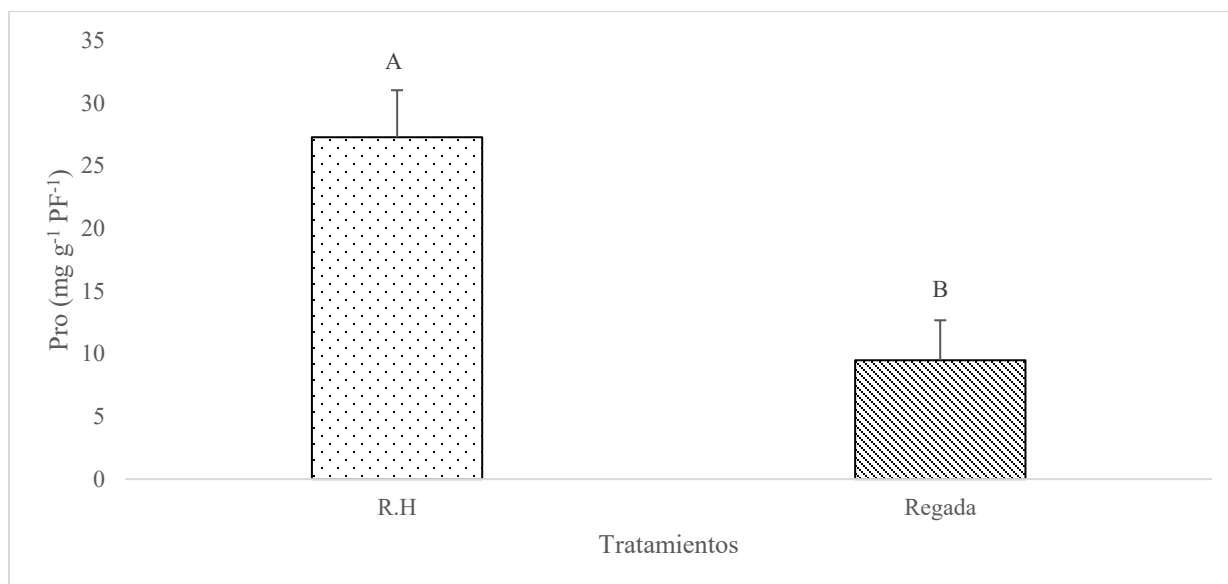


Figura 49. Contenido total de prolina en brotes de *Stipa caudata* medida al final del experimento. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. RH = restricción hídrica; Regadas = irrigadas.

En la Figura 50 se presenta el contenido de malondialdehído (MDA) total medido en brotes de *Stipa caudata*. Se presentaron diferencias significativas respecto a la condición hídrica (B), en donde plantas Regadas presentaron los mayores niveles respecto a plantas RH.

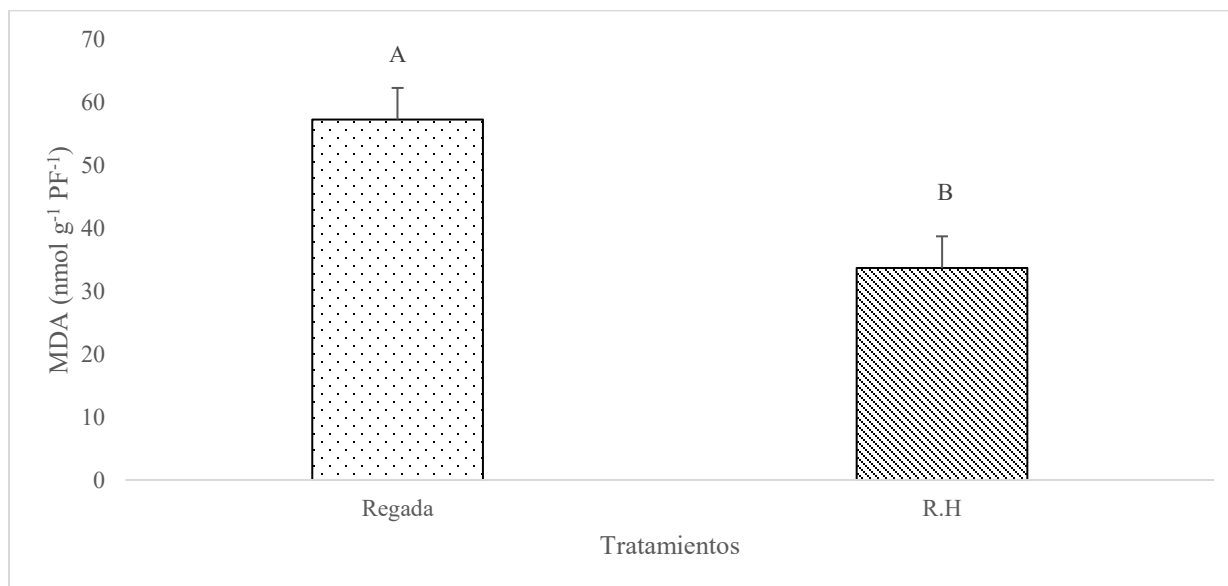


Figura 50. Contenido de malondialdehído en brotes de *Stipa caudata* al final del experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. RH = restricción hídrica; Regadas = irrigadas.

En la Figura 51, se presentan los resultados del contenido de MDA de brotes de *Stipa caudata* medido al final del experimento. Plantas BS presentaron los mayores niveles, mientras que plantas AAS y Control, los menores.

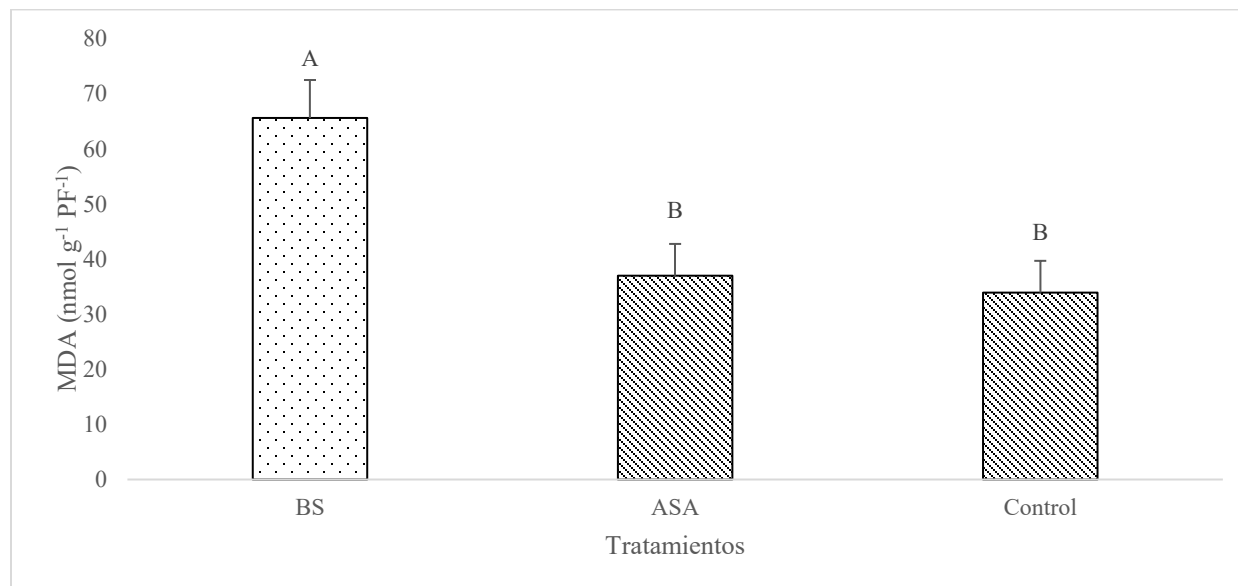


Figura 51. Contenido de malondialdehído en brotes de *Stipa caudata* al final del experimento.

Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Fisher (p -valor $<0,05$). Barras verticales indican error estándar. BS = Biosólidos; AAS = ácido acetilsalicílico; Control = sin tratamientos.

En la Figura 52 se presenta el análisis de componentes principales para las variables respuestas edáficas, productivas y fisiológicas del estudio. El componente principal 1 (CP1) comprende el 50,3% de la variabilidad total, mientras que el CP2, el 21%. Ambos componentes principales representan el 71,3%. Las variables con mayor inercia (Autovectores) dentro de la CP1 de mayor a menor son: contenido volumétrico de agua en el suelo (0,29), ancho de hojas (0,28), MDA (0,28), flavonoides (0,28), TFC (0,27). Las variables con mayor variabilidad o inercia dentro de la CP2 son: peso seco de canopia (0,45), peso seco de raíces (0,41), peso fresco de raíces (0,38). En la Tabla 17 se presentan los coeficientes de Pearson y variables con diferencias significativas.

Tabla 17. Coeficientes de Pearson y variables con diferencias significativas.

Correlación	2019-2020	
	Pearson Coef.	p value (<0,05)
Temperatura canopia/ Ancho hojas	-0,85471446	0,030128495
Temperatura canopia /Grosor de hojas	-0,90248077	0,013801296
Cont. Agua suelo/ Ancho hojas	0,921375059	0,009029797
Cont. Volumétrico Agua suelo / Grosor de hojas	0,906493298	0,012706467
Cont. Volumétrico Agua suelo / Temperatura canopia	-0,97988283	0,00060298
Peso fresco canopia/ Grosor de hojas	0,822819847	0,044308119
Peso fresco canopia/ Temperatura canopia	-0,86143623	0,027469672
Na raíces/ K hojas	-0,85098366	0,031654287
Pro/ Ancho hojas	-0,84789771	0,032943207
Pro/ Grosor de hojas	-0,96889585	0,001436156
Pro/ Temperatura canopia	0,970373261	0,001303613
Pro/ Cont. Volumétrico Agua suelo	-0,97004747	0,001332295
Pro/ Peso fresco canopia	-0,88549556	0,01891625
MDA/ Ancho hojas	-0,88549556	0,031541943
MDA/ K hojas	-0,88593187	0,018775207
MDA/ Na raíces	0,958313084	0,002570477
TFC/ Ancho hojas	0,867660037	0,025111906
TFC/ Na raíces	0,979437525	0,000629876
TFC/ MDA	0,970298182	0,001310196
Flavonoides/ Ancho hojas	0,89425609	0,01618146
Flavonoides/ Cont. Volumétrico Agua suelo	0,873725642	0,022911085
Flavonoides/ Na raíces	0,906219705	0,012779729
Flavonoides/ MDA	0,966910145	0,001624292
Flavonoides/ TFC	0,961865329	0,002153651

En la Figura 52 se observan correlaciones positivas entre el tratamiento RH AAS frente a las variables: K de raíces, K de hojas, Cl de hojas, Cl de raíces, Na de hojas, temperatura de la canopia

y Pro. A su vez, el tratamiento RH AAS mostró correlaciones negativas frente a las variables: peso fresco de raíces, peso fresco de canopia, grosor de hojas, pH, CE, contenido volumétrico de agua en el suelo, largo acumulado de tallos, grosor de hojas, MDA, flavonoides, TCF y Na de raíces. Por otra parte, plantas Irrigadas AAS + BS mostraron correlaciones positivas con las variables: grosor de hojas, CE, contenido volumétrico de agua en el suelo, largo acumulado de tallos, ancho de hojas, MDA, flavonoides, TCF y Na de raíces.

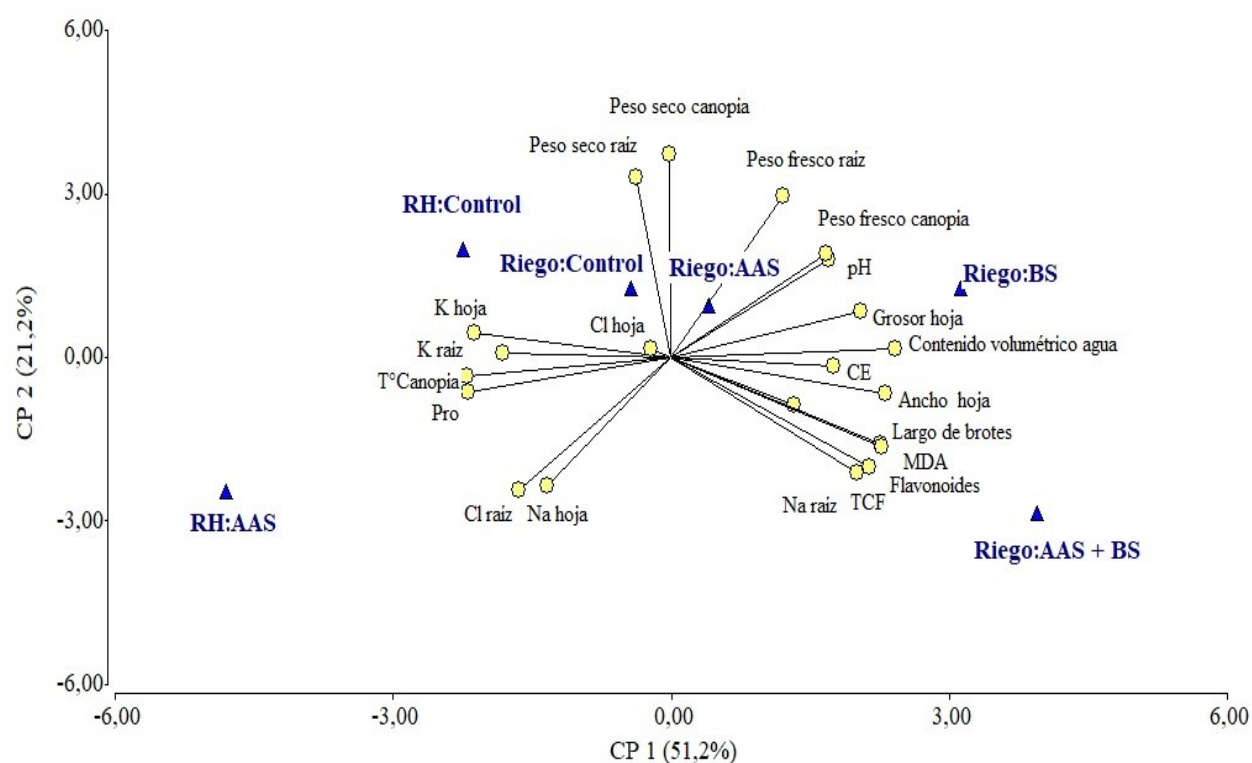


Figura 52. Análisis de componentes principales entre las variables respuesta del estudio.

MDA = malondialdehído; Pro = prolina; TFC = total de compuestos fenólicos; Regadas = irrigadas; RH = restricción hídrica; BS = biosólidos; AAS = ácido acetilsalicílico; Control = control.

5. DISCUSIÓN

5.1. Parámetros climáticos

5.1.1. Rinconada de Los Andes

Según la Clasificación Bioclimática UNESCO-FAO, la localidad de Rinconada de Los Andes, desde donde se extrajo el suelo para las temporadas experimentales, presenta la siguiente clasificación:

La temperatura media para todas las temporadas analizadas es fue de 14,7 °C, por lo tanto, se clasifica en el Grupo 1 (Cuando $t_m > 0$ °C.) perteneciendo

La subdivisión en la cual se clasifica esta localidad es la correspondiente a Clima Templado, debido a que la temperatura media del mes más frío de las temporadas analizadas fue de 7,5°C, debiendo estar entre $10\text{ °C} \geq t_{mf} > 0\text{ °C}$.

Por otra parte, se encuentra entre la clasificación de Invierno Suave e Invierno Cálido, debido a que la temperatura media del mes más frío (julio), fue de 7,5°C, debiendo estar entre $7\text{ °C} > t_{mmf} \geq 3\text{ °C}$ (Invierno Suave) y $11\text{ °C} > t_{mmf} \geq 7\text{ °C}$ (Invierno Cálido).

La precipitación acumulada promedio de cada entre las temporadas 2013 y 2018 fue de 176,1 mm. El clima pertenece al Subgrupo 1, con un tipo de clima Monoxérico Mediterráneo (períodos secos de 1 a 8 meses).

5.1.2. La Platina

Según la Clasificación Bioclimática UNESCO-FAO, la estación meteorológica de La Platina se ubica en la comuna de la Pintana, desde donde se extrajo el material vegetal para las temporadas experimentales, presenta la siguiente clasificación:

La temperatura media para todas las temporadas analizadas es fue de 15,0 °C, por lo tanto, se clasifica en el Grupo 1 (Cuando $t_m > 0$ °C.) perteneciendo

La subdivisión en la cual se clasifica esta localidad es la correspondiente a Clima Templado, debido a que la temperatura media del mes más frío de las temporadas analizadas fue de 8,8 °C, debiendo estar entre $10\text{ °C} \geq t_{mf} > 0\text{ °C}$.

Además, se encuentra entre la clasificación de Invierno Cálido, debido a que la temperatura media del mes más frío (julio), fue de 8,8 °C, debiendo estar entre $11\text{ °C} > t_{mmf} \geq 7\text{ °C}$ (Invierno Cálido).

La precipitación acumulada promedio de cada entre las temporadas 2013 y 2021 fue de 220,5 mm.

El clima pertenece al Subgrupo 1, con un tipo de clima Monoxérico Mediterráneo (períodos secos de 1 a 8 meses).

5.2. Parámetros edáficos, productivos y fisiológicos

El conocimiento de los mecanismos involucrados en la respuesta de las plantas frente a restricciones hídricas es fundamental para optimizar el uso de agua en escenarios de incertidumbre climática. El uso de fitohormonas, elementos minerales y biosólidos para aumentar la resistencia de las plantas al estrés hídrico, podría significar aumentos o, por lo menos, reducir la pérdida de biomasa en condiciones limitantes.

5.2.1. Ensayo final temporada 2018-2019

Esta investigación presenta un conjunto de resultados sin precedente en *Stipa caudata* tratada con ácido acetilsalicílico (AAS) y sulfato de amonio (SA) en diferentes condiciones hídricas. Los resultados indican que: (i) variables productivas: plantas tratadas en donde AAS y SA estuvieron presentes, presentaron similar altura de tallos que plantas Irrigadas y similar número de espigas/planta que plantas sin tratamientos, no obstante, el diámetro de tallos fue menor; (ii) variables fisiológicas: plantas con restricción hídrica (RH) tuvieron mayor MDA que plantas Irrigadas. Plantas con AAS /SA tuvieron mayor contenido de clorofilas totales que el resto de los

tratamientos. No hubo respuestas categóricas en el contenido de iones en hojas, sin embargo, plantas SA con RH presentaron similares valores que plantas Irrigadas; (iii) osmoprotectores: Plantas tratadas tuvieron aumentos en prolina y acumulación de TF. Respecto a TCF hubo interacción AxB, sin embargo, plantas con tratamientos y RH presentaron similares valores en cuanto a aumentos de TCF respecto a Regadas; (iv) actividad enzimática: plantas RH tuvieron mayor actividad APX. Se presentó interacción AxB para la actividad de CAT y SOD, sin embargo, plantas RH ASA y AAS /SA presentaron similar reducción de la actividad de ambas enzimas respecto a Regadas / AAS.

Los resultados anteriormente expuestos evidencian interacción AxB en los factores estudiados, sin embargo, se observó que plantas RH donde AAS y SA estaban presentes podrían generar similar altura de tallos que plantas Regadas. A su vez, plantas AAS/SA presentaron los mayores contenidos de clorofilas.

Resultados positivos en la altura y biomasa de plantas RH tratadas con AAS o SA han sido reportados en tomate (*Lycopersicon esculentum*), poroto (*Phaseolus vulgaris*), trigo (*Triticum aestivum*), garbanzo (*Cicer arietinum*) y *Eragrostis plana* (Nilsson y Wiklund, 1994; Senaratna et al., 2000; Kareem et al., 2017; Hussain et al., 2020; Bastiani et al., 2021). Sin embargo Wu et al.,(2008); Kabiri y Naghizadeh, (2015) no encontraron diferencias en la altura de cebada (*Hordeum vulgare*) o *Sophora davidii*. Por otra parte, Plantas con restricción hídrica tuvieron elevados contenidos de MDA respecto a plantas regadas. A su vez, plantas con AAS/SA mostraron mayor contenido de clorofilas totales que el resto de los tratamientos. Similares observaciones han reportado con tratamientos de AAS o SA por Gunes et al., (2007); Zeinali and Moradi (2015); Khan et al., (2015) y Hussain et al., (2020).

Los resultados anteriormente expuestos sugieren que aplicaciones de AAS o SA podrían aumentar algunos parámetros de crecimiento en plantas RH o estresadas hídricamente. En este sentido el AAS y SA podrían presentar un efecto en el cierre estomático y mantenimiento del flujo hídrico relacionados con el crecimiento. Probablemente aplicaciones de estos complementos en bajas dosis al inicio de un déficit hídrico podrían tener también un efecto sinérgico en los sistemas de defensa al estrés.

En este sentido Jopia et al., (2020) demostró que déficits hídricos podrían disminuir el crecimiento mediante la discusión del potencial hídrico (Ψ). En esta dirección, un cierre estomático y reducción del flujo hídrico podrían generar cambios fisiológicos y bioquímicos por la producción de especies reactivas al oxígeno (ROS). Elevadas concentraciones de ROS aumentan la peroxidación de lípidos, inducen muerte celular programada y disminuyen las funciones fotosintéticas debido a la degradación de clorofilas (Choat et al., 2012; Lee et al., 2016; Sun, 2020; Vargas-Ortiz et al., 2021). Similares hallazgos han sido descritos en plantas estresadas nutricionalmente (Molina y Covarrubias, 2019). No obstante, los resultados indicaron que AAS y SA aliviaron los efectos de la reducción hídrica en el crecimiento vegetativo y producción de clorofilas. Recientes reportes han mostrado relaciones sinérgicas entre SA y la actividad nitrato reductasa estimulada por nitrógeno, la cual participa en la síntesis de óxido nítrico precursor de SA, aliviando de este modo los síntomas del estrés hídrico mediante la mejora de sistemas de defensa y potencial hídrico (Nazar, 2015; Kaya, 2021).

Los resultados expuestos mostraron interacción AxB para el contenido de Ca^{++} . Sin embargo, se observó que plantas con restricción hídrica donde SA estuvo presente, presentaron una acumulación de Ca^{++} en hojas similar a plantas AAS regadas.

Resultados positivos en la acumulación de iones en hojas en plantas con déficit hídrico han sido reportados en *Sarcoconia frucosa*, *Inula crithmoides*, *Juncus maritimus* y *J. acutus* (Gil et al., 2014); *Dittrichia viscosa* (Hassan et al., 2016); especies de *Limonium* (Al Hassan et al., 2017); *Nerium oleander* (Kumar et al., 2017); y *Plantago ovata* (Ltaeif et al., 2021). No obstante, Hassan et al., (2016) encontraron una mayor acumulación de iones en raíces de *J. maritimus* y *J. acutus* que en hojas. Por su parte, se presentaron relaciones significativas negativas entre el contenido de K de hojas y el largo acumulado de tallos. También entre el contenido de Cl de hojas y la CE. Por su parte, se presentaron tendencias frente a relaciones positivas entre el contenido de K de hojas frente al aumento de MDA, actividad SOD, APX y Pro frente a tratamientos con RH Control o en donde SA y AAS estuvieron presentes. Por su parte, el contenido de Cl de hojas mostró una tendencia a correlacionarse positivamente con la actividad GR, TFC y flavonoides. Correlaciones positivas entre K y Pro han sido descritas en *L. girardianum* (González-Orenga et al., 2020) y entre

el contenido de K de raíces y hojas con el aumento del peso fresco foliar en *N. oleander* (Kumar et al., 2017).

Los resultados encontrados sugieren que aplicaciones de SA podría aumentar la acumulación de Ca^{2+} bajo déficit hídrico. En este sentido SA podría estimular la absorción y acumulación de Ca^{2+} bajo un déficit hídrico, el cual es fundamental para señalar respuestas fisiológicas como la síntesis de ácido abscísico o ajuste osmótico.

En este sentido, la absorción y transporte del Ca^{2+} disuelto en la solución suelo se produce por la transpiración siguiendo las diferencias de potenciales hídricos respecto a la atmósfera. A su vez, el Ca^{2+} es un elemento mineral esencial que actúa como segundo mensajero celular señalizando respuestas fisiológicas y transcripcionales frente a condiciones de estrés (Hashimoto & Batistic, 2010). También actúa mejorando la regulación estomática y activando una serie de enzimas. Recientes han demostrado que el nitrógeno es un elemento que favorece la resistencia al estrés actuando sinérgicamente con la acumulación de Ca^{2+} (Zhang et al., 2018).

Los resultados anteriormente expuestos señalan que plantas tratadas tuvieron aumentos en prolina y acumulación de TF. A su vez, se presentó interacción AxB para TCF. Sin embargo, se observó que plantas con tratamientos y restricción hídrica presentaron similares valores en cuanto a aumentos de TCF respecto a regadas.

Resultados positivos en la acumulación de osmoprotectantes han sido ampliamente descritos en plantas estresadas (Hassan et al., 2016; Al Hassan, 2017; Schiop et al., 2017). En la misma dirección, otros resultados mostraron que AAS o SA aumentan la concentración prolina, flavonoides y compuestos fenólicos frente a estrés hídricos (Neuberg et al., 2010; Li et al., 2017; Khan et al., 2015; Tavakoli Hasanaklou et al., 2016; Hussain et al., 2020). Por otra parte, se evidenciaron correlaciones positivas entre TCF y flavonoides y correlaciones positivas entre ambos osmoprotectantes respecto a MDA, y actividad GR en condiciones RH SA. Similares hallazgos reportaron en *N. oleander* (Kumar et al., 2017), y en *L. narbonense* (González-Orenga et al., 2020).

Los resultados anteriormente expuestos sugieren que aplicaciones de AAS o SA en plantas bajo déficit hídrico podrían estimular la síntesis de osmolitos y compuestos antioxidantes en sus células, como prolina, flavonoides y compuestos fenólicos.

Al respecto, estos compuestos han demostrado una elevada capacidad degradativa de las especies reactivas al oxígeno (ROS) producidas bajo estrés (Akram et al., 2017; Farooq et al., 2020; Almaroai y Eissa, 2020). La prolina es un precursor proteico con actividad antioxidante que actúa detoxificando y protegiendo mediante homeostasis celular otorgando un adecuado balance redox. Por otra parte, Prolina induce una serie de genes para la activación de enzimas antioxidantes, mejorando el potencial hídrico en plantas (Nazar et al., 2015; Mansour y Ali, 2017). En el mismo sentido, la acumulación de fenoles y flavonoides pueden quelar iones de metales de transición; eliminar directamente especies moleculares de oxígeno activo y apagar la peroxidación de lípidos atrapando el radical alcóxido. Además, los flavonoides y fenilpropanoides son oxidados por la peroxidasa y actúan en el sistema de captación de H_2O_2 , fenólico / AsA / POD (Bartwal et al., 2013; Sarker y Oba, 2018). Siguiendo esta tendencia, los resultados indicaron que ASA o AMS potencian la síntesis de prolina, flavonoides y compuestos fenólicos frente a estrés hídricos (Neuberg et al., 2010; Li et al., 2017; Khan et al., 2015; Tavakoli Hasanaklou et al., 2016; Hussain et al., 2020).

Los resultados anteriormente expuestos evidencian mayor actividad APX bajo restricción hídrica. Por otro lado, se presentó interacción AxB para la actividad de CAT y SOD, sin embargo, se observó que plantas con restricción hídrica AAS y AAS/AMS presentaron similar reducción de la actividad de ambas enzimas respecto a regadas/AAS.

Resultados contradictorios se han reportado en la actividad CAT y SOD y APX frente a diversos estreses y según la especie estudiada. Hassan et al., (2016) han descrito disminuciones en la actividad CAT y aumentos en SOD en *D. viscosa*, mientras que Al Hassan et al., (2017) no encontraron claras diferencias en SOD en *J. maritimus* y *J. articulatus* tratadas en medios salinos, pero aumentos en *J. acutus*. Los mismos autores reportaron mayor actividad en APX en *J. maritimus*, pero menor en *J. auriculatus* bajo estrés. En el mismo sentido, Kumar et al., (2017) no encontraron diferencias en la actividad SOD, CAT, pero si aumentos en APX en *Nerium oleander*

L bajo estrés hídrico. Tampoco se han descrito claras tendencias respecto a la actividad SOD bajo estreses abióticos tratadas con AAS. Al respecto, *Glycine max* mostró mayor actividad tratada con AAS (Ardebili et al., 2014), mientras que Hussain et al., (2020) encontraron aumentos en CAT, pero solamente en dosis mayores en SOD en *Cicer arietium* bajo estrés hídrico. Por último, tampoco han habido reportes de tendencias claras en la actividad de enzimas antioxidantes respecto a estrés hídrico y tratamientos nitrogenados (Zhang et al., 2007; Giansoldati et al., 2012).

Los resultados anteriormente expuestos sugieren que aplicaciones de AAS o SA podrían aliviar la actividad de SOD y CAT en algunas especies frente a condiciones estresantes. SOD y CAT son enzimas encargadas de degradar sistemáticamente las ROS logrando reducir su nivel tóxico a niveles cada vez menores.

Al respecto, aumento de (ROS) como el O_2 , O_3 o H_2O_2 ocurre en muchos casos en plantas bajo condiciones de estrés. Estos radicales producen peroxidación de lípidos en celular causando muerte celular. Como defensa, las células responden aumentando la actividad de enzimas antioxidantes como SOD, CAT y APX, actuando SOD en una primera línea de acción catalizando la dismutación del O_2 hacia H_2O_2 mediante su neutralización por la adición de dos iones hidrógeno reduciendo la formación de $OH^\cdot$ vía reacción de Haber-Weiss. Por otra parte, CAT y APX catalizan la conversión del H_2O_2 a H_2O y O aliviando el daño (Apel y Hirt, 2004; Das y Roychoudhury, 2014; Noctor y Foyer, 2016; Noctor et al., 2018; Alves et al., 2020).

En esta investigación respecto a los efectos del AAS y SA en parámetros productivos, fisiológicos y bioquímicos en *Stipa caudata* bajo un déficit hídrico. Se profundizó en las respuestas de crecimiento de tallos, acumulación de clorofilas, iones, osmolitos, antioxidantes y actividad enzimática. Pese a los esfuerzos realizados quedan preguntas sobre el rol relativo del AAS y SA en otros mecanismos fisiológicos y bioquímicos como la regulación del potencial hídrico xilemático, actividad fotosintética y producción de materia seca aérea.

5.2.2. Temporada final 2019-2020

Esta investigación presenta un conjunto de resultados sin precedente en *Stipa caudata* tratada con ácido acetilsalicílico (AAS) y biosólidos (BS) en diferentes condiciones hídricas. Los resultados indican que (i) variables edáficas: el sustrato en donde BS estuvo presente experimentó una ligera acidificación y aumentos en la CE. Por otra parte, el sustrato en donde BS estuvo presente mantuvo por mayor tiempo su contenido volumétrico de agua respecto al resto de tratamientos; (ii) variables productivas: no se presentaron diferencias significativas en la altura de tallos. Pese a no haber diferencias significativas para el grosor de hojas, plantas AAS presentaron los mayores valores. Respecto al peso seco de canopia, plantas AAS presentaron los mayores valores junto a tratamientos Control, mientras que tratamientos donde BS estuvo presente, presentaron los menores, sin considerar la condición hídrica. Respecto al peso seco de raíces, plantas RH Control presentaron los mayores valores, mientras que RH AAS/BS, los menores, no obstante, plantas WR AAS presentaron similares crecimientos comparados con Regadas Control; (ii) contenido de iones de brotes y raíces: plantas RH presentaron mayor contenido Na^+ en brotes, independientemente de los tratamientos, presentándose interacción AxB para el caso de raíces. Al respecto, plantas Irrigadas AAS+BS presentaron los mayores valores, mientras que el resto de los tratamientos bajo WR, los menores. Para el Cl^- , RH AAS presentó los mayores valores en raíces, mientras que RH BS los menores; (iii) osmoprotectantes: plantas RH presentaron mayores contenidos de Pro, pero menores en MDA independientemente de los tratamientos. Respecto solamente a los tratamientos, plantas BS presentaron los mayores valores respecto a AAS y Control.

Los resultados anteriormente expuestos señalan que no se presentaron diferencias significativas en la altura de tallos ni peso fresco de canopia, sin embargo, en cuanto al peso seco de canopia, plantas en donde AAS estuvo presente presentaron los mayores valores junto a tratamientos Control, mientras que tratamientos donde BS estuvo presente, presentaron los menores, sin considerar la condición hídrica. Respecto al peso fresco de raíces, plantas en sustratos BS presentaron los mayores valores junto al Control, mientras que, en cuanto al peso seco de raíces, se presentó interacción AxB, en donde plantas RH Control presentaron los mayores valores, mientras que RH AAS/BS los menores, no obstante, plantas RH AAS presentaron similares crecimientos comparados con Irrigadas Control. Por otra parte, plantas Control y Control RH presentaron

aumentos significativos en su biomasa total, pero sin aumentos en el grosor de tallos como las tendencias que mostraron plantas AAS, lo que indicaría que estas últimas crecerían en similar magnitud, pero resistiendo la condición de RH.

Resultados positivos han sido encontrados también en la altura y biomasa de plantas frente a estreses tratadas con AAS en tomate (*Lycopersicon esculentum*), trigo (*Triticum aestivum*), garbanzo (*Cicer arietinum*), *Eragrostis plana* Nees y *Stipa caudata* (Senaratna et al., 2000; Kareem et al., 2017; Hussain et al., 2020; Molina et al., 2022). Sin embargo Kabiri y Naghizadeh, (2015) no encontraron diferencias en la altura de cebada (*Hordeum vulgare*). Por otra parte, aumentos en el crecimiento radical frente a restricciones hídricas moderadas han sido reportados en trigo (*Triticum aestivum*) (Timmusk et al., 2014), maíz (*Zea maíz*) (Sharp y Davies, 1979) y (Eghball y Maranville, 1993), citados por Feng et al., (2016).

Respecto a plantas en donde BS estuvo presente, presentaron menores, o no significativos crecimientos de raíces. En la misma dirección, Trippe et al. (2021) encontraron aumentos en la biomasa aérea y radical en *Elymus glaucus* tratadas con una mezcla BS respecto a un sustrato con cal, pero no encontraron diferencias respecto a un sustrato con otros tratamientos, mientras que Sidhu et al., (2019) tampoco encontraron diferencias significativas en la biomasa fresca de *Raphanus sativus*, *Lactuca sativa* y *Festuca arundinacea* tratada con BS. Por último Pampana et al. (2021) encontraron aumentos en peso seco en *Hordeum vulgare*, *Triticum aestivum* y *Avena byzantina* respecto a plantas control, pero no encontraron diferencias respecto a una fertilización tradicional, mientras que no hubo diferencias frente al control en *Triticum durum*. Ante esto, un comportamiento común de las raíces en contacto con metales de transición es la disminución del crecimiento y acortamiento en largo (Wong y Bradshaw, 1982).

Déficits hídricos pueden alterar el status hídrico de las plantas, mediante una regulación en el control estomático, a través de una disminución en el potencial hídrico (Ψ_l), como demostraron Jopia et al., (2020). En condiciones estresantes, las plantas producen en cantidades mayores especies reactivas al oxígeno (ROS), las cuales median una muerte celular paulatina o programada, mediante la peroxidación de lípidos entre otras, las que repercuten en una disminución en la tasa fotosintética y producción de hidratos de carbono indispensables para el crecimiento en biomasa

(Choat et al., 2012; Lee et al., 2016; Sun, 2020; Vargas-Ortiz et al., 2021). Similares hallazgos han sido descritos en plantas estresadas nutricionalmente (Molina y Covarrubias, 2019).

No obstante, el ácido salicílico, que es un compuesto fenólico reconocido como una hormona vegetal (Hayat et al., 2007), actúa manteniendo el status hídrico de las plantas mediante una señalización fisiológica o regulando la actividad o síntesis de diversas enzimas como catalasas (CAT) o peroxidasas (POX) o mediante el aumento de osmoprotectores (Biareh et al., 2022; Molina et al., 2022). A su vez, frente a diversos estreses, algunas plantas presentan resistencia mediante el engrosamiento de la epidermis o ancho de sus hojas, como se ha descrito en olivos (*Olea europaea*) (Ennajeh et al., 2010) y trigo resistente a sequía (Saska et al., 2021). Sin embargo, plantas estresadas podrían incrementar también, de forma natural su biomasa total frente a restricciones hídricas moderadas, sin ningún tratamiento más que una restricción hídrica del suelo, mediante un incremento en la síntesis y acumulación de ácido abscísico (ABA) y aumentos del potencial de soluto mediados por la acumulación de osmolitos como hexosas, entre otros (Sharp et al., 1990).

Por otro lado, los BS han demostrado ser efectivos en mejorar los parámetros físicos, como la porosidad del suelo, químicos, como el contenido de minerales y biológicos, incrementando el número de colonias bacterianas benéficas (Möller y Müller, 2012; Pampana et al., 2021; Ondreičková et al., 2021). Sin embargo y pese a aumentar el contenido de agua en el sustrato, BS aumentó la conductividad eléctrica, lo que podría haber llevado a esta especie a rangos más elevados respecto a los tolerados, afectando el crecimiento. La salinidad de un suelo está dada por la cantidad de iones solubles en los suelos y materiales compostados como el Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , entre otros (Gondek et al., 2020). En este sentido, el lavado de biosólidos y desechos municipales sólidos previo a la incorporación al suelo ha sido un método efectivo para disminuir la concentración de sales (Weggler-Beaton et al., 2000; Gondek et al., 2020) ya que el agua que lixivia contiene elementos como Na^+ y Cl^- (Kim y Owens 2010). Por otra parte, incorporaciones BS en dosis más bajas sobre suelos parecidos han tenido efectos similares en las conductividades eléctricas de dichos tratamientos (Antilén et al., 2014). En este sentido, dosis como la ocupada pudo haber sido demasiado alta por lo que quizás un previo lavado de los BS junto con una disminución de la dosis sería efectivo para aminorar el efecto negativo en el crecimiento que se

observó. Además, los tratamientos BS también mostraron al final del experimento raíces oscuras color marrón con lesiones necróticas en comparación con los controles. Estas lesiones se ven frecuentemente en plantas expuestas a altas concentraciones de metales de transición donde se evidencia también una reducción del desarrollo de raíces (Alam et al., 2001; Stoyanova y Doncheva, 2002; Rahman et al., 2005; López-Millan et al., 2009; Jia et al., 2011). Probablemente el contacto de las raíces con dichos elementos contribuyó también al arresto del desarrollo radical obtenido.

Respecto al contenido de iones de brotes y raíces: plantas RH sin tratamientos presentaron mayor contenido Na^+ en brotes, presentándose interacción AxB para el caso de raíces. Al respecto de la interacción, plantas Irrigadas AAS+BS presentaron los mayores valores, mientras que el resto de los tratamientos bajo WR con tratamientos, los menores. Para el Cl^- , RH ASA presentó los mayores valores en raíces, mientras que RH BS los menores.

Aumentos en el contenido de Na^+ de brotes en plantas con déficit hídrico han sido reportados en trigo (*Triticum aestivum*) (Muranaka et al., 2002), al igual que en *Arabidopsis thaliana* que expresaba los genes TNHX1 y TVP1 de trigo (*Triticum aestivum*). Similares hallazgos han reportado (Brini et al., 2007). No obstante, Dugasa et al., (2019) encontraron menores niveles de Na^+ en raíces de trigo (*Triticum aestivum*) bajo estrés salino e hídrico. Respecto a aplicaciones de AAS, Noreen et al. (2017) reportaron disminuciones en la acumulación de Na^+ en trigo (*Triticum aestivum*) bajo estrés hídrico, al igual que Kaydan et al., (2007). Por otro lado Jini y Joseph, (2017) reportaron disminuciones en el contenido de Na^+ y Cl^- en arroz (*Oryza sativa*), al igual que Yang et al. (2021) y Gunes et al. (2005) en maíz (*Zea mays*). Sin embargo, Aldesuquy et al., (2013) reportaron aumentos en los contenidos de Na^+ y Cl^- en plantas de trigo (*Triticum aestivum*). Por último, tratamientos RH en donde BS estuvo presente, presentaron menor acumulación de Na^+ y Cl^- en la biomasa de plantas. Menor acumulación de Na^+ frente han sido descritos por Garg y Chandel, (2012) en genotipos *Cajanus cajan* resistentes a estrés, similares tendencias mostraron Ziadi et al. (2013) en el contenido de Na^+ en soya (*Glycine max*). Disminución en el contenido de Na^+ y Cl^- en suelos fertilizados con lodos municipales han sido descritos en *Spinacia oleracea* (Maftoun et al., 2004). Se presentaron correlaciones positivas entre los contenidos de Cl de raíces frente a los contenidos de Na de hojas, contenido de K de raíces y Pro por su parte, hubo

correlaciones positivas entre el contenido de Na de raíces frente a TCF, flavonoides, MDA, grosor de hojas y altura acumulada de tallos. Similares resultados han evidenciado frente a contenidos de K, Pro y MDA en *L. girardianum* (González-Orenga et al., 2020), y entre los contenidos de K de raíces y hojas frente al peso fresco de hojas, y acumulación de osmoprotectantes como carotenoides en *N. oleander* (Kumar et al., 2017).

Aumentos en el contenido de Na^+ ocurren en condiciones de déficit hídrico, debido a una disminución en la absorción de otros cationes esenciales (Noreen et al., 2017). No obstante, cuando el ácido salicílico se encuentra presente, cambia el balance de absorción del Na^+ aumentando la absorción de otros cationes esenciales en desmedro de Na^+ (Singh y Usha, 2003; Hussain et al., 2010). Al respecto, es conocida la capacidad selectiva de las plantas en cuanto a la selección/discriminación de los iones que absorben. Probablemente *Stipa caudata* en presencia de AAS aumento esta capacidad minimizando la absorción de Na^+ debido a que no es un elemento mineral esencial (Marschner, 1995) y podría ocasionar daño a nivel celular. Sin embargo, plantas RH AAS tendieron a aumentar el contenido interno de Cl^- . El Cl^- es un anión toxico para la mayoría de las plantas (Marschner, 1995), sin embargo participa junto al K^+ en la regulación estomática en condiciones de estrés, equilibrando el balance hídrico de la planta (Chen et al., 2012b).

Por otra parte, plantas con sustrato BS presentaron menor acumulación de Cl^- y Na^+ . Considerando que alrededor de la mitad de la matriz de biosólidos es materia orgánica (Torri et al., 2014), lo observado se pudo haber debido por una parte a la retención electroestática que ejerce la materia orgánica aplicada (Rajala, 2004) y, por otra, a la competencia ejercida entre los iones en ella incluidos (Brown et al., 1960), los cuales limitarían la absorción especialmente de cationes y aniones no esenciales como el Na^+ y Cl^- (Marschner, 1995).

No se encontraron diferencias significativas respecto a la acumulación de compuestos fenólicos totales y flavonoides totales. Respecto al contenido de prolina, plantas RH independientemente de los tratamientos presentaron los mayores valores y, pese a no encontrarse diferencias significativas, plantas RH AAS presentaron los mayores valores. Por otra parte, plantas Irrigadas presentaron los mayores valores de malondialdehído (MDA) independientemente de los

tratamientos, mientras que plantas de macetas BS presentaron los mayores niveles de MDA mientras que AAS y Control, los menores.

Aumentos en el contenido de Pro han sido reportados en condiciones de escasez hídrica en *Triticum vulgare*, *Plantago ovata* Forsk-Isabgool, *Papaver somnifera*, *Brassica juncea* (Patel y Vora, 1985), en trigo (*Triticum aestivum*) (Johari-Pireivatlou et al., 2010), en *Juncus maritimus*, *acutus* y *articulatus* (Al Hassan et al., 2016) y en *Stipa caudata* (Molina et al., 2022). A su vez, plantas tratadas con ácido salicílico tienden a aumentar su contenido de Pro; en la misma dirección se han reportado aumentos en la expresión del gen P5C5 de resistencia a sequía en trigo (*Triticum aestivum*) frente a aplicaciones de ácido salicílico (Maghsoudi et al., 2018), y aumentos en el contenido de Pro en hojas de trigo estresadas por frío (Ignatenko et al., 2019). Similares hallazgos han sido descritos en arroz (*Oriza sativa*) frente a déficit hídrico (Farooq et al., 2009). Por otro lado, aumentos en el contenido de MDA han sido descritos en condiciones de escasez hídrica en *Juncus acutus* y *articulatus* (Al Hassan et al., 2017), arroz (Wang et al., 2010) y trigo (Shan et al., 2020). No obstante, aumentos en el contenido de MDA en plantas irrigadas respecto a plantas con estrés hídrico han sido descritos también en papayo (*Carica papaya* cultivar “BH-65”) (Mahouachi et al., 2012). Sin embargo y siguiendo la línea de los resultados encontrados, disminuciones en el contenido de MDA con tratamientos de ácido salicílico han sido descritos por (Xu et al., 2017). Por otra parte, se han encontrado aumentos también en el contenido de MDA con aplicaciones de tratamientos BS o sus derivados, como lo ha sido descrito en *Vicia faba* regadas con aguas servidas (Mkhinini et al., 2020), mientras que en *Sporobolus pungens* se encontraron aumentos frente a un estrés salino severo (Cerrato et al., 2022). A su vez, correlaciones positivas entre TCF, fenoles totales han sido reportados en trigo bajo estrés hídrico (Li et al., 2015), similares tendencias han reportado entre TCF, fenoles totales y MDA en trigo (Gholamin y Khayatnezhad, 2020).

Una de las primeras respuestas en plantas frente a diversos estreses es la acumulación de especies reactivas al oxígeno (ROS). En condiciones normales, las ROS actúan como señalizadores de diversas respuestas metabólicas y fisiológicas, pero frente a estreses su acumulación se ve aumentada provocando daños oxidativos irremediables a nivel celular (Gill y Tuteja, 2010; Biareh et al., 2022). El ácido salicílico es una fitohormona sintetizada en las raíces con diversos roles

como en la fotosíntesis, crecimiento, captura de nutrientes e incluso en la evolución de plantas (Pál et al., 2013) que actúa también como señalizador frente a diversos estreses, reduciendo efectivamente sus impactos (Szalai et al., 2013; Pál et al., 2013) generando, por consiguiente, disminuciones en el contenido de MDA debido a una mejor integridad de ácidos grasos y su equilibrio redox en membranas (Xu et al., 2017), efecto opuesto al generado por BS probablemente debido al elevado contenido de sales que su composición. Por su parte, la acumulación de prolina ha sido estudiada en plantas bajo estreses, hace décadas debido a su rol como osmoprotectante, ya que actúa protegiendo las plantas frente a diversos estreses al unirse a fosfolípidos y proteínas evitando daños producto de las ROS como radicales hidroxilos (Kishor et al., 2005). La prolina puede entonces ser considerada como un componente importante en el espectro de las reacciones protectoras de las plantas en respuesta a la sequía inducidas por SA y mediadas por ABA, contribuyendo a una reducción de los efectos nocivos de la sequía y a una aceleración de los procesos de reparación después del estrés, evidenciando la acción protectora de SA sobre las plantas (Shakirova et al., 2003).

6. CONCLUSIONES

6.1. Temporada 2018-2019

Bajo las condiciones experimentales en las cuales se desarrolló la presente investigación, es posible concluir lo siguiente:

La presencia de ácido acetilsalicílico y sulfato de amonio contribuyen a un aumento similar en la altura de plantas regadas. Frente a la presencia de ácido acetilsalicílico y sulfato de amonio la concentración de clorofilas fue mayor respecto a los otros tratamientos.

La presencia de sulfato de amonio induce una acumulación de Ca^{++} en hojas similar a plantas tratadas con ácido acetilsalicílico regadas.

Los tratamientos inducen aumentos en prolina y acumulación del total de flavonoides. A su vez, existe interacción entre los tratamientos y la condición hídrica para el total de compuestos fenólicos. Sin embargo, plantas con tratamientos y restricción hídrica presentan similares valores en cuanto a aumentos del total de compuestos fenólicos respecto a plantas regadas.

La actividad APX en plantas con restricción hídrica fue mayor respecto a plantas regadas. Por otro lado, existe interacción entre los tratamientos y la condición hídrica para la actividad de CAT y SOD, sin embargo, la presencia de ácido acetilsalicílico o sulfato de amonio induce en plantas con restricción hídrica similar reducción de la actividad de ambas enzimas respecto a regadas/ASA.

6.2. Temporada 2019-2020

Bajo las condiciones experimentales en las cuales se desarrolló la presente investigación, es posible concluir lo siguiente:

En cuanto al peso seco de canopia, plantas en donde AAS estuvo presente presentaron los mayores valores junto a tratamientos Control, mientras que tratamientos donde BS estuvo presente, presentaron los menores, sin considerar la condición hídrica, mientras que en cuanto al peso seco de raíces, se presentó interacción AxB, en donde plantas RH Control presentaron los mayores valores, mientras que RH AAS/BS los menores, no obstante, plantas RH ASA presentaron similares crecimientos comparados con Irrigadas Control. Por otra parte, plantas Control y Control WR presentaron aumentos significativos en su biomasa total, pero sin aumentos en el grosor de tallos como las tendencias encontradas en plantas AAS, lo que indicaría que estas últimas crecerían en similar magnitud, pero resistiendo la condición de RH.

Respecto al contenido de iones de brotes y raíces: plantas RH sin tratamientos presentaron mayor contenido Na^+ en brotes, presentándose interacción AxB para el caso de raíces. Al respecto de la interacción, plantas Irrigadas AAS+BS presentaron los mayores valores, mientras que el resto de los tratamientos bajo RH con tratamientos, los menores. Para el Cl^- , RH AAS presentó los mayores valores en raíces, mientras que RH BS los menores.

No se encontraron diferencias significativas respecto a la acumulación de compuestos fenólicos totales y flavonoides totales. Respecto al contenido de prolina, plantas RH independientemente de los tratamientos presentaron los mayores valores y, pese a no encontrarse diferencias significativas, plantas RH AAS presentaron los mayores valores. A su vez plantas AAS presentaron los menores niveles de MDA, mientras que plantas en sustratos BS, los mayores.

Respecto a las temperaturas promedio entre las temporadas 2010 a 2014 para Rinconada de Los Andes, se evidenciaron incrementos de $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ en relación con los períodos comprendidos del 2015 al 2018. Similares tendencias se observaron en las precipitaciones, encontrándose incrementos de $5,6\text{ mm}$ en los períodos entre 2015 a 2018 respecto a 2010 a 2014.

Por su parte, para el caso de La Platina, se observaron aumentos de temperaturas de $0,65^{\circ}\text{C}$ entre los períodos 2017 a 2021, respecto a los períodos 2013 a 2016. No hubo diferencias significativas respecto a las precipitaciones caídas entre los períodos 2013 a 2016 y 2017 a 2021, las cuales fueron de 0,01 mm.

7. BIBLIOGRAFÍA CITADA

Abdulyekeen, K. A., Umar, A. A., Patah, M. F. A., and Daud, W. M. A. W. (2021). Torrefaction of biomass: Production of enhanced solid biofuel from municipal solid waste and other types of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111436.

Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*, 105, 121–126. [https://doi:10.1016/s0076-6879\(84\)05016-3](https://doi.org/10.1016/s0076-6879(84)05016-3).

Ahluwalia, O., Singh, P. C., and Bhatia, R. (2021). A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. *Resources, Environment and Sustainability*, 5 (December 2020), 100032. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100032>.

Ahmad, P., Jaleel, C. A., Salem, M. A., Nabi, G., and Sharma, S. (2010). Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress. *Critical Reviews in Biotechnology*, 30(3), 161–175. <https://doi.org/10.3109/07388550903524243>.

Ahmad, R., Waraich, E. A., Ashraf, M. Y., Ahmad, S., and Aziz, T. (2014). Does nitrogen fertilization enhance drought tolerance in sunflower? a Review. *Journal of Plant Nutrition*, 37(6), 942–963.

Ahmad, Z., Anjum, S., Waraich, E. A., Ayub, M. A., Ahmad, T., Tariq, R. M. S., Ahmad, R., and Iqbal, M. A. (2018). Growth, physiology, and biochemical activities of plant responses with foliar potassium application under drought stress—a review. *Journal of Plant Nutrition*, 41(13), 1734–1743.

Ahumada, I., Sepúlveda, K., Fernández, P., Ascar, L., Pedraza, C., Richter, P., and Brown, S.

(2014). Effect of biosolid application to Mollisol Chilean soils on the bioavailability of heavy metals (Cu, Cr, Ni, and Zn) as assessed by bioassays with sunflower (*Helianthus annuus*) and DGT measurements. *Journal of Soils and Sediments*, 14(5), 886–896.

Akram, N. A., Shafiq, F., and Ashraf, M. (2017). Ascorbic Acid - A potential oxidant scavenger and its role in plant development and abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 8, 613. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00613>.

Al Hassan, M., del Pilar Lopez-Gresa, M., Boscaiu, M., and Vicente, O. (2016). Stress tolerance mechanisms in *Juncus*: responses to salinity and drought in three *Juncus* species adapted to different natural environments. *Functional Plant Biology*, 43(10), 949-960. <https://doi.org/10.1071/FP16007>.

Al Hassan, M., Estrelles, E., Soriano, P., López-Gresa, M. P., Bellés, J. M., Boscaiu, M., and Vicente, O. (2017). Unraveling salt tolerance mechanisms in halophytes: A comparative study on four Mediterranean *Limonium* species with different geographic distribution patterns. *Frontiers in Plant Science*, 8(August), 1–21. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01438>.

Alam, S., Kamei, S., and Kawai, S. (2001). Amelioration of manganese toxicity in barley with iron. *Journal of Plant Nutrition*, 24(9), 1421-1433.

Aldesuquy, H. S., Abbas, M. A., Abo-Hamed, S. A., and Elhakem, A. H. (2013). Does glycine betaine and salicylic acid ameliorate the negative effect of drought on wheat by regulating Osmotic adjustment through solutes accumulation? *Journal of Stress Physiology and Biochemistry*, 9(3), 5–22.

Almaroai, Y. A., and Eissa, M. A. (2020). Role of marine algae extracts in water stress resistance of onion under semiarid conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 20, 1092–1101.

Altuntaş, C., Demiralay, M., Sezgin Muslu, A., and Terzi, R. (2020). Proline-stimulated signaling primarily targets the chlorophyll degradation pathway and photosynthesis associated processes to

cope with short-term water deficit in maize. *Photosynthesis Research*, 144(1), 35-48.

Alves, L. R., Prado, E. R., de Oliveira, R., Santos, E. F., Lemos de Souza, I., Dos Reis, A. R. and Gratão, P. L. (2020). Mechanisms of cadmium-stress avoidance by selenium in tomato plants. *Ecotoxicology*, 29(5), 594-606.

An, C., and Mou, Z. (2011). Salicylic acid and its function in plant immunity. *Journal of Integrative Plant Biology*, 53(6), 412–42.

Antilén, M., Silva, K., Acevedo, S., Amiama, F., Faúndez, M., Knicker, H., and Pizarro, C. (2014). Characterization of humic acids extracted from biosolid amended soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 14(4), 1005–1020.

Apel, K., and Hirt, H. (2004). Reactive oxygen species: Metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 55, 373. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701>.

Araya-Osses, D., Casanueva, A., Román-Figueroa, C., Uribe, J. M., and Paneque, M. (2020). Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*, 54(9–10), 4309–4330. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05231-4>.

Ardebili, N. O., Saadatmand, S., Niknam, V., and Khavari-Nejad, R. A. (2014). The alleviating effects of selenium and salicylic acid in salinity exposed soybean. *Acta Physiologiae Plantarum*, 36(12), 3199-3205.

Arriaga, M. O., and Barkworth, M. E. (2006). *Amelichloa*: a new genus in the *Stipeae* (Poaceae). *SIDA, Contributions to Botany*, 145-149.

Ashraf, M. F. M. R., and Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 59(2), 206-216.

Attia, Z., Domec, J. C., Oren, R., Way, D. A., and Moshelion, M. (2015). Growth and physiological responses of isohydric and anisohydric poplars to drought. *Journal of Experimental Botany*, 66(14), 4373–4381.

Bandurska, H., and Józwiak, W. (2010). A comparison of the effects of drought on proline accumulation and peroxidases activity in leaves of *Festuca rubra* L. and *Lolium perenne* L. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 79(2), 111–116.

Barker, A. V., and Pilbeam, D. J. (2007). *Handbook of Plant Nutrition*, CRC press.

Bartwal, A., Mall, R., Lohani, P., Guru, S. K., and Arora, S. (2013). Role of secondary metabolites and brassinosteroids in plant defense against environmental stresses. *Journal Plant Growth Regulation*, 216–232. <https://doi.org/10.1007/s00344-012-9272-x>.

Bastiani, M. O., Roma-Burgos, N., Langaro, A. C., Salas-Perez, R. A., Rouse, C. E., Fipke, M. V., and Lamago, F. P. (2021). Ammonium sulfate improves the efficacy of glyphosate on South African lovegrass (*Eragrostis plana*) under water stress. *Weed Science*, 69(2), 167–176. <https://doi.org/10.1017/wsc.2020.97>.

Bates, L. S., Waldren, R. P., and Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and soil*, 39(1), 205-207.

Besson-Bard, A., Pugin, A., and Wendehenne, D. (2008). New insights into nitric oxide signaling in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 21–39.

Bettiol, W., and Ghini, R. (2011). Impacts of sewage sludge in tropical soil: a case study in Brazil. *Applied and Environmental Soil Science*, 2011.

Beyer Jr, W. F., and Fridovich, I. (1987). Assaying for superoxide dismutase activity: some large consequences of minor changes in conditions. *Analytical Biochemistry*, 161(2), 559-566.

Biareh, V., Shekari, F., Sayfzadeh, S., Zakerin, H., Hadidi, E., Beltrão, J. G. T., and Mastinu, A. (2022). Physiological and qualitative response of *Cucurbita pepo* L. to salicylic acid under controlled water stress conditions. *Horticulturae*, 8(1), 1–13. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8010079>.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. 28 Octubre 2009. Decreto 4: Ministerio secretaría general de la presidencia; subsecretaria general de la presidencia, reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas. Disponible en: <https://bcn.cl/2ps2v>.

Blainski, A., Lopes, G. C., and De Mello, J. C. P. (2013). Application and analysis of the folin ciocalteu method for the determination of the total phenolic content from *Limonium brasiliense* L. *Molecules*, 18(6), 6852-6865.

Blum, A. (2017). Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production. *Plant Cell and Environment*, 40(1), 4–10.

Bose, J., Rodrigo-Moreno, A., and Shabala, S. (2014). ROS homeostasis in halophytes in the context of salinity stress tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 65(5), 1241-1257.

Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1-2), 248-254.

Brini, F., Hanin, M., Mezghani, I., Berkowitz, G. A., and Masmoudi, K. (2007). Overexpression of wheat Na⁺/H⁺ antiporter TNHx1 and H⁺-pyrophosphatase TVP1 improve salt- and drought-stress tolerance in *Arabidopsis thaliana* plants. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 301–308. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl251>.

Brown, J. C., Tiffin, L. O., and Holmes, R. S. (1960). Competition between chelating agents and roots as factor affecting absorption of iron and other ions by plant species. *Plant Physiology*, 35(6), 878.

Burkart, A. (1975). Evolution of grasses and grasslands in South America. *Taxon*, 24(1), 53–66.

Buta, M., Hubeny, J., Zieliński, W., Harnisz, M., and Korzeniewska, E. (2021). Sewage sludge in agriculture—the effects of selected chemical pollutants and emerging genetic resistance determinants on the quality of soil and crops—a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 214, 112070.

Cabrera, A. L. (1971). Fitogeografía de la república Argentina. *Boletín de La Sociedad Argentina de Botánica*, 14, 1–42.

Cai, W., McPhaden, M. J., Grimm, A. M., Rodrigues, R. R., Taschetto, A. S., Garreaud, R. D., Dewitte, B., Poveda, G., Ham, Y. G., Santoso, A., Ng, B., Anderson, W., Wang, G., Geng, T., Jo, H. S., Marengo, J. A., Alves, L. M., Osman, M., Li, S., ... Vera, C. (2020). Climate impacts of the El Niño–Southern oscillation on South America. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1(4), 215–231. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>

Cakmak, I. (2005). The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168(4), 521–530.

Capone, D. G., Bronk, D. A., Mulholland, M. R., and Carpenter, E. J. (Eds.). (2008). Nitrogen in the marine environment. *Elsevier*, 1758p.

Caro, J. A., and Sánchez, E. (1971). La identidad de *Stipa brachychaeta* Godron, *S. caudata* Trinius y *S. bertrandii* Philippi. *Darwiniana, Instituto de Botánica Darwinion* 637–653.

Carver, S., Mikkelsen, N., and Woodward, J. (2002). Long-term rates of mass wasting in Mestersvig, northeast Greenland: Notes on a re-survey. *Permafrost and Periglacial Processes*,

13(3), 243–249. <https://doi.org/10.1002/ppp.421>.

Casanova, M., Vera, W., Luzio, W., Salazar, O. (2004). Edafología: Guía de clases prácticas. Universidad de Chile, 75p.

Celis, J. H., Machuca, A. H., Sandoval, M. E., and Morales, P. C. (2011). Biological activity in a degraded alfisol amended with sewage sludge and cropped with yellow serradela (*Ornithopus compressus* L.). *Chilean Journal of Agricultural Research*, 71(1), 164.

Cellier, A., Gauquelin, T., Baldy, V., and Ballini, C. (2014). Effect of organic amendment on soil fertility and plant nutrients in a post-fire mediterranean ecosystem. *Plant and Soil*, 376(1), 211-228.

Cerrato, M., Ribas-Serra, A., Cortés-Fernández, I., Cardona Ametller, C., Mir-Rosselló, P. M., Goethe, C., and Sureda, A. (2022). Effect of seawater salinity stress on *Sporobolus pungens* (Schreb.) Kunth, a halophytic grass of the mediterranean embryonic dunes. *Plant Growth Regulation*, 1-14.

Chakraborty, U., and Pradhan, B. (2012). Oxidative stress in five wheat varieties (*Triticum aestivum* L.) exposed to water stress and study of their antioxidant enzyme defense system, water stress responsive metabolites and H₂O₂ accumulation. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 24, 117-130.

Chang, Y. N., Zhu, C., Jiang, J., Zhang, H., Zhu, J. K., and Duan, C. G. (2020). Epigenetic regulation in plant abiotic stress responses. *Journal of Integrative Plant Biology*, 62(5), 563-580.

Chamizo-Ampudia, A., Sanz-Luque, E., Llamas, A., Galvan, A., and Fernandez, E. (2017). Nitrate reductase regulates plant nitric oxide homeostasis. *Trends in Plant Science*, 22(2), 163–174.

Chen, Z., Zheng, Z., Huang, J., Lai, Z., and Fan, B. (2009). Biosynthesis of salicylic acid in plants. *Plant Signaling and Behavior*, 4(6), 493–496.

- Chen, H., Yan, S. H., Ye, Z. L., Meng, H. J., and Zhu, Y. G. (2012a). Utilization of urban sewage sludge: Chinese perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, 19(5), 1454-1463.
- Chen, Z. H., Hills, A., Bätz, U., Amtmann, A., Lew, V. L., and Blatt, M. R. (2012b). Systems dynamic modeling of the stomatal guard cell predicts emergent behaviors in transport, signaling, and volume control. *Plant Physiology*, 159(3), 1235–1251. <https://doi.org/10.1104/pp.112.197350>.
- Choat, B., Jansen, S., Brodribb, T. J., Cochard, H., Delzon, S., Bhaskar, R., ... and Zanne, A. E. (2012). Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, 491(7426), 752-755.
- Chloupek, O., Dostál, V., Středa, T., Psota, V., and Dvořáčková, O. (2010). Drought tolerance of barley varieties in relation to their root system size. *Plant Breeding*, 129(6), 630–636.
- Cieřlik, B. M., Namieśnik, J., and Konieczka, P. (2015). Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. *Journal of Cleaner Production*, 90, 1-15.
- Cogger, C. G., Bary, A. I., Kennedy, A. C., and Fortuna, A. M. (2013). Long-term crop and soil response to biosolids applications in dryland wheat. *Journal of Environmental Quality*, 42(6), 1872-1880.
- Connell, J. P., and Mullet, J. E. (1986). Pea chloroplast glutathione reductase: purification and characterization. *Plant Physiology*, 82(2), 351-356.
- Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Frattarola, A., Miino, M. C., Padovani, S., Katsoyiannis, I., and Torretta, V. (2019). Legislation for the reuse of biosolids on agricultural land in Europe: Overview. *Sustainability (Switzerland)*, 11(21). <https://doi.org/10.3390/su11216015>.
- Cruz de Carvalho, M. H. (2008). Drought stress and reactive oxygen species: production, scavenging and signaling. *Plant Signaling and Behavior*, 3(3), 156-165.

Dalal, M., and Khanna-Chopra, R. (2001). Differential response of antioxidant enzymes in leaves of necrotic wheat hybrids and their parents. *Physiologia Plantarum*, 111(3), 297–304. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2001.1110306.x>.

Das, K., and Roychoudhury, A. (2014). Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. *Frontiers in Environmental Science*, 2, 53. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00053>.

Davies, P. J. (Ed.). (2004). Plant hormones: biosynthesis, signal transduction, action!. *Springer Science and Business Media*.

Demidchik, V. (2015). Mechanisms of oxidative stress in plants: From classical chemistry to cell biology. *Environmental and Experimental Botany*, 109, 212–228. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.06.021>.

Di Castri, F., and Hajek, E. R. (1976). *Bioclimatología de Chile* (Vol. 128). Santiago: Vicerrectoría Académica de la Universidad Católica de Chile.

Donoso Z., C. (1982). Reseña ecológica de los bosques mediterráneos de Chile. *Bosque*, 4(2), 117–146.

Dugasa, M. T., Cao, F., Ibrahim, W., and Wu, F. (2019). Differences in physiological and biochemical characteristics in response to single and combined drought and salinity stresses between wheat genotypes differing in salt tolerance. *Physiologia Plantarum*, 165(2), 134–143. <https://doi.org/10.1111/ppl.12743>.

Eghball, B., and Maranville, J. W. (1993). Root development and nitrogen influx of corn genotypes under combined drought and nitrogen stresses. *Agronomy Journal*, 85, 147–152.

El Moukhtari, A., Cabassa-Hourton, C., Farissi, M., and Savouré, A. (2020). How does proline treatment promote salt stress tolerance during crop plant development?. *Frontiers in Plant*

Science, 11, 1127.

El Sabagh, A., Hossain, A., Barutçular, C., Gormus, O., Ahmad, Z., Hussain, S., Islam, M. S., Alharby, H., Bamagoos, A., Kumar, N., Akdeniz, H., Fahad, S., Meena, R. S., Abdelhamid, M., Wasaya, A., Hasanuzzaman, M., Sorour, S., and Saneoka, H. (2019). Effects of drought stress on the quality of major oilseed crops: Implications and possible mitigation strategies - A review. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(2), 4019–4043.

Ennajeh, M., Vadel, A. M., Cochard, H., and Khemira, H. (2010). Comparative impacts of water stress on the leaf anatomy of a drought-resistant and a drought-sensitive olive cultivar. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 85(4), 289–294. <https://doi.org/10.1080/14620316.2010.11512670>.

Farooq, M., Basra, S. M. A., Wahid, A., Ahmad, N., and Saleem, B. A. (2009). Improving the drought tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) by exogenous application of salicylic acid. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195(4), 237–246. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2009.00365.x>.

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N. S. M. A., Fujita, D. B. S. M. A., and Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. In *Sustainable Agriculture* (pp. 153–188).

Farooq, M., Hussain, M., and Siddique, K. H. M. (2014). Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 33(4), 331–349.

Farooq, A., Bukhari, S. A., Akram, N. A., Ashraf, M., Wijaya, L., Alyemeni, M. N., and Ahmad, P. (2020). Exogenously applied ascorbic acid-mediated changes in osmoprotection and oxidative defense system enhanced water stress tolerance in different cultivars of safflower (*Carthamus tinctorious* L.). *Plants*, 9(1), 104.

Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J., and Rooney, D. W. (2020). Strategies for mitigation of climate

change: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(6), 2069–2094. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>.

Feng, W., Lindner, H., Robbins, N. E., and Dinneny, J. R. (2016). Growing out of stress: The role of cell- and organ-scale growth control in plant water-stress responses. *Plant Cell*, 28(8), 1769–1782. <https://doi.org/10.1105/tpc.16.00182>.

Fernández-Getino, A. P., Pérez, J., del Mar Albarrán, M., Lammerding, D. M., and Walter, I. (2012). Restoration of abandoned, degraded agricultural soil using composted biosolid: Influence on selected soil properties. *Arid Land Research and Management*, 26(3), 200–210.

Foito, A., Byrne, S. L., Shepherd, T., Stewart, D., and Barth, S. (2009). Transcriptional and metabolic profiles of *Lolium perenne* L. genotypes in response to a PEG-induced water stress. *Plant Biotechnology Journal*, 7(8), 719–732.

Foyer, C. H., and Noctor, G. (2005). Oxidant and antioxidant signalling in plants: a re-evaluation of the concept of oxidative stress in a physiological context. *Plant, Cell and Environment*, 28(8), 1056–1071.

Funck, D., Eckard, S., and Müller, G. (2010). Non-redundant functions of two proline dehydrogenase isoforms in *Arabidopsis*. *BMC Plant Biology*, 10. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-10-70>.

Garg, N., and Chandel, S. (2012). Role of *Arbuscular mycorrhizal* (AM) fungi on growth, cadmium uptake, osmolyte, and phytochelatin synthesis in *Cajanus cajan* (L.) Millsp. under NaCl and Cd Stresses. *Journal of Plant Growth Regulation*, 31(3), 292–308. <https://doi.org/10.1007/s00344-011-9239-3>.

Ghezzi, P., and Bonetto, V. (2003). Redox proteomics: Identification of oxidatively modified proteins. *Proteomics*, 3(7), 1145–1153. <https://doi.org/10.1002/pmic.200300435>.

Gholamin, R., and Khayatnezhad, M. (2020). Study of bread wheat genotype physiological and biochemical responses to drought stress. *Helix*, 10(5), 87–92. <https://doi.org/10.29042/2020-10-5-87-92>.

Giansoldati, V., Tassi, E., Morelli, E., Gabellieri, E., Pedron, F., and Barbafieri, M. (2012). Chemosphere nitrogen fertilizer improves boron phytoextraction by *Brassica juncea* grown in contaminated sediments and alleviates plant stress. *Chemosphere*, 87(10), 1119–1125. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.02.005>.

Gil, R., Bautista, I., Boscaiu, M., Lidón, A., Wankhade, S., Sánchez, H., Llinares, J., and Vicente, O. (2014). Responses of five Mediterranean halophytes to seasonal changes in environmental conditions. *AoB Plants*, 6, 1–18. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plu049>.

Gill, S. S., and Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(12), 909–930. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>.

Gondek, M., Weindorf, D. C., Thiel, C., and Kleinheinz, G. (2020). Soluble salts in compost and their effects on soil and plants: A review. *Compost Science and Utilization*, 28(2), 59-75.

González-Orenga, S., Llinares, J. V., Al Hassan, M., Fita, A., Collado, F., Lisón, P., Vicente, O., and Boscaiu, M. (2020). Physiological and morphological characterization of *Limonium* species in their natural habitats: Insights into their abiotic stress responses. *Plant and Soil*, 449(1–2), 267–284. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04486-4>.

Guerra, P., Ahumada, I., and Carrasco, A. (2007). Effect of biosolid incorporation to mollisol soils on Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn fractionation, and relationship with their bioavailability. *Chemosphere*, 68(11), 2021–2027.

Gunes, A., Inal, A., Alpaslan, M., Cicek, N., Guneri, E., Eraslan, F., Tuktü, G. (2005). Effects of exogenously applied salicylic acid on the induction of multiple stress tolerance and mineral

nutrition in maize (*Zea mays* L.). *Archives of Agronomy and Soil Science*, 51(6), 687-695. April 2013, 37–41. <https://doi.org/10.1080/03650340500336075>.

Gunes, A., Inal, A., Alpaslan, M., Eraslan, F., Bagci, E. G., and Cicek, N. (2007). Salicylic acid induced changes on some physiological parameters symptomatic for oxidative stress and mineral nutrition in maize (*Zea mays* L.) grown under salinity. *Journal of Plant Physiology*, 164(6), 728-736.

Gupta, D. K., Srivastava, S., Huang, H. G., Romero-Puertas, M. C., and Sandalio, L. M. (2011). Arsenic tolerance and detoxification mechanisms in plants. *Detoxification of Heavy Metals*, 169-179.

Halliwell, B. (2006). Reactive species and antioxidants. Redox biology is a fundamental theme of aerobic life. *Plant Physiology*, 141(2), 312–322. <https://doi.org/10.1104/pp.106.077073>.

Haney, R. L., Jin, V. L., Johnson, M. V. V., White, M. J., and Arnold, J. G. (2015). On-site assessment of extractable soil nutrients after long-term biosolid applications to perennial forage. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46(7), 873-887.

Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Bhuiyan, T. F., Anee, T. I., Inafuku, M., Oku, H., and Fujita, M. (2017). Salicylic acid: An all-rounder in regulating abiotic stress responses in plants. *Phytohormones - Signaling Mechanisms and Crosstalk in Plant Development and Stress Responses*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68213>.

Hassan, M., Farrokh, D., Jahanfar, D., Ghorban, N., and Davood, H. (2011). Effects of water deficit stress on seed yield and antioxidants content in soybean (*Glycine max* L.) cultivars. *African Journal of Agricultural Research*, 6(5), 1209-1218.

Hassan, M. Al, Chaura, J., López-Gresa, M. P., Borsai, O., Daniso, E., Donat-Torres, M. P., Mayoral, O., Vicente, O., and Boscaiu, M. (2016). Native-invasive plants vs. halophytes in

mediterranean salt marshes: Stress tolerance mechanisms in two related species. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1–21. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00473>.

Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I. S., and White, P. (2011). Functions of macronutrients. In Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition. Elsevier Ltd.

Hayat, S., Ali, B., Aiman Hasan, S., and Ahmad, A. (2007). Brassinosteroid enhanced the level of antioxidants under cadmium stress in *Brassica juncea*. *Environmental and Experimental Botany*, 60(1), 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2006.06.002>.

Hayat, S., Hayat, Q., Alyemeni, M. N., Wani, A. S., Pichtel, J., and Ahmad, A. (2012). Role of proline under changing environments: A review. *Plant Signaling and Behavior*, 7(11).

Haynes, R. J., Murtaza, G., and Naidu, R. (2009). Inorganic and organic constituents and contaminants of biosolids: implications for land application. *Advances in Agronomy*, 104, 165–267.

Hodges, D. M., DeLong, J. M., Forney, C. F., and Prange, R. K. (1999). Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds. *Planta*, 207, 604–611.

Hofmockel, J. K. J. and K. (2020). Soil microbiomes and climate change Janet K . Jansson and Kirsten Hofmockel earth and biological sciences directorate, Pacific Northwest national laboratory. *Nature*, 2(3), 60–100.

Honorato, R. (2000). Manual de Edafología. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago.

Hosseinpour, A., and Pashamokhtari, H. (2013). The effects of incubation on phosphorus desorption properties, phosphorus availability, and salinity of biosolids-amended soils. *Environmental Earth Sciences*, 69(3), 899–908.

Hussain, K., Nawaz, K., Majeed, A., Khan, F., Lin, F., Ghani, A., Raza, G., Afghan, S., Zia-ul-Hussain, S., Ali, K., and Shahazad, A. (2010). Alleviation of salinity effects by exogenous applications of salicylic acid in pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) seedlings. *African Journal of Biotechnology*, 9(50), 8602–8607. <https://doi.org/10.5897/AJB10.850>.

Hussain, I., Rasheed, R., Ashraf, M. A., Mohsin, M., Shah, S. M. A., Rashid, D. A., Akram, M., Nisar, J., and Riaz, M. (2020). Foliar applied acetylsalicylic acid induced growth and key-biochemical changes in chickpea (*Cicer arietinum* L.) under drought stress. *Dose-Response*, 18(4), 1–13. <https://doi.org/10.1177/1559325820956801>.

Ignatenko, A., Talanova, V., Repkina, N., and Titov, A. (2019). Exogenous salicylic acid treatment induces cold tolerance in wheat through promotion of antioxidant enzyme activity and proline accumulation. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41(6). <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2872-3>.

Ilyas, M., Nisar, M., Khan, N., Hazrat, A., Khan, A. H., Hayat, K., Fahad, S., Khan, A., and Ullah, A. (2021). Drought tolerance strategies in plants: A mechanistic approach. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(3), 926–944.

IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)].

IPCC, 2000: Summary for policymakers. In: Emission scenarios. A special report of working group III of the intergovernmental panel on climate change. [Nakicenovic, N., Davidson, O., Davis, G., Grübler, A., Kram, T., Lebre-La Rovere, E., Metz, B., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Sankovski, A., Shukla, P., Swart, R., Watson, R. and Dadi, Z. (eds.)]. In Press. ISBN: 92-9169-

IUSS Working Group WRB. 2015. World reference base for soil resources 2014, update 2015 international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.

Jacobs, S. W. L., and Everett, J. (1996). *Austrostipa*, for Australasian species formerly included in *Stipa* (Gramineae). *Telopea*, 6(4), 579-595.

Jaleel, C. A., Gopi, R., Manivannan, P., Sankar, B., Kishorekumar, A., and Panneerselvam, R. (2007). Antioxidant potentials and ajmalicine accumulation in *Catharanthus roseus* after treatment with giberellic acid. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 60(2), 195–200. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2007.06.009>

Jia, Y., Tang, S. R., Ju, X. H., Shu, L. N., Tu, S. X., Feng, R. W., and Giusti, L. (2011). Effects of elevated CO₂ levels on root morphological traits and Cd uptakes of two *Lolium* species under Cd stress. *Journal of Zhejiang University Science B*, 12(4), 313-325.

Jiang, M., and Zhang, J. (2002). Water stress-induced abscisic acid accumulation triggers the increased generation of reactive oxygen species and up-regulates the activities of antioxidant enzymes in maize leaves. *Journal of Experimental Botany*, 53(379), 2401-2410.

Jini, D., and Joseph, B. (2017). Physiological mechanism of salicylic acid for alleviation of salt stress in rice. *Rice Science*, 24(2), 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2016.07.007>

Johari-Pireivatlou, M., Qasimov, N., and Maralian, H. (2010). Effect of soil water stress on yield and proline content of four wheat lines. *African Journal of Biotechnology*, 9(1), 036–040.

Jopia, A., Zambrano, F., Pérez-Martínez, W., Vidal-Páez, P., Molina, J., and Mardones, F. de la H. (2020). Time-series of vegetation indices (VNIR/SWIR) derived from sentinel-2 (A/B) to

assess turgor pressure in Kiwifruit. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(11), 1–18. <https://doi.org/10.3390/ijgi9110641>.

Juszczuk, I. M., Bykova, N. V., and Møller, I. M. (2007). Protein phosphorylation in plant mitochondria. *Physiologia Plantarum*, 129(1), 90-103.

Kabiri, R., and Naghizadeh, M. (2015). Exogenous acetylsalicylic acid stimulates physiological changes to improve growth, yield and yield components of barley under water stress condition. *Journal of Plant Physiology and Breeding*, 5(1), 35–45.

Kareem, F., Rihan, H., Fuller, M. (2017). The effect of exogenous applications of salicylic acid and molybdenum on the tolerance of drought in wheat. *Agricultural Research and Technology: Open Access Journal*, 9(4), 97-105. <https://doi.org/10.19080/artoaj.2017.09.555768>.

Kavas, M., Baloğlu, M. C., Akça, O., Köse, F. S., and Gökçay, D. (2013). Effect of drought stress on oxidative damage and antioxidant enzyme activity in melon seedlings. *Turkish Journal of Biology*, 37(4), 491–498.

Kaya, C. (2021). Nitrate reductase is required for salicylic acid-induced water stress tolerance of pepper by upraising the AsA-GSH pathway and glyoxalase system. *Physiologia Plantarum*, 172(2), 351-370.

Kaydan, D., Yagmur, M., and Okut, N. (2007). Effects of salicylic acid on the growth and some physiological characters in salt stressed wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Agricultural Sciences*, 13(2), 114-119.

Kishor, K. P. B., Sangam, S., Amrutha, R. N., Sri Laxmi, P., Naidu, K. R., Rao, K. R. S. S., Rao, S., Reddy, K. J., Theriappan, P., and Sreenivasulu, N. (2005). Regulation of proline biosynthesis, degradation, uptake and transport in higher plants: Its implications in plant growth and abiotic stress tolerance. *Current Science*, 88(3), 424–438.

Khan, M. I. R., Fatma, M., Per, T. S., Anjum, N. A., and Khan, N. A. (2015). Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1–17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00462>.

Khayatnezhad, M., and Gholamin, R. (2021). The effect of drought stress on the superoxide dismutase and chlorophyll content in durum wheat genotypes. *Advancements in Life Sciences*, 8(2), 119–123.

Khodary, S. (2004). Effect of salicylic acid on the growth, photosynthesis and carbohydrate metabolism in salt-stressed maize plants. *International Journal of Agriculture. Biology*, 6(1), 5–8.

Kim, K. R., and Owens, G. (2010). Potential for enhanced phytoremediation of landfills using biosolids—a review. *Journal of Environmental Management*, 91(4), 791–797.

Kishorekumar, R., Bulle, M., Wany, A., Gupta, K. J. (2020). An overview of important enzymes involved in nitrogen assimilation of plants. In K. Gupta (Ed.), *Nitrogen Metabolism in Plants* (p. 187). Humana, New York, NY.

Kohli, S. K., Handa, N., Kaur, R., Kumar, V., Khanna, K., Bakshi, P., and Bhardwaj, R. (2017). Role of salicylic acid in heavy metal stress tolerance: insight into underlying mechanism. In *Salicylic Acid: a Multifaceted Hormone* (pp. 123–144).

Korkmaz, A., Uzunlu, M., and Demirkiran, A. R. (2007). Treatment with acetyl salicylic acid protects muskmelon seedlings against drought stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 29(6), 503–508.

Kovács, V., Gondor, O. K., Szalai, G., Darkó, É., Majláth, I., Janda, T., and Pál, M. (2014). Synthesis and role of salicylic acid in wheat varieties with different levels of cadmium tolerance. *Journal of Hazardous Materials*, 280, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.07.048>.

Kranner, I., Beckett, R., Hochman, A., and Nash III, T. H. (2008). Desiccation-tolerance in lichens: a review. *The Bryologist*, 111(4), 576–593.

Kranz, C. N., McLaughlin, R. A., Johnson, A., Miller, G., and Heitman, J. L. (2020). The effects of compost incorporation on soil physical properties in urban soils—A concise review. *Journal of Environmental Management*, 261, 110209.

Kumar, D., Al Hassan, M., Naranjo, M. A., Agrawal, V., Boscaiu, M., and Vicente, O. (2017). Effects of salinity and drought on growth, ionic relations, compatible solutes and activation of antioxidant systems in oleander (*Nerium oleander* L.). *Public Library of Science*, 12(9), 1–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185017>.

Kusvuran, S., and Dasgan, H. Y. (2017). Effects of drought stress on physiological and biochemical changes in *Phaseolus vulgaris* L. *Legume Research*, 40(1), 55–62.

Latosińska, J., Kowalik, R., and Gawdzik, J. (2021). Risk assessment of soil contamination with heavy metals from municipal sewage sludge. *Applied Sciences*, 11(2), 548.

Lee, D. K., Jung, H., Jang, G., Jeong, J. S., Kim, Y. S., Ha, S. H., ... and Kim, J. K. (2016). Overexpression of the OsERF71 transcription factor alters rice root structure and drought resistance. *Plant Physiology*, 172(1), 575–588.

Li, X., Schuler MA, Berenbaum MR. (2002). Jasmonate and salicylate induce expression of herbivore cytochrome P450 genes. *Nature*, 419(6908):712–715. <https://doi: 10.1038/nature01003>. [PMID: 12384696](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12384696/).

Li, Y., Ma, D., Sun, D., Wang, C., Zhang, J., Xie, Y., and Guo, T. (2015). Total phenolic, flavonoid content, and antioxidant activity of flour, noodles, and steamed bread made from different colored wheat grains by three milling methods. *Crop Journal*, 3(4), 328–334. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.04.004>.

Li, Z., Yu, J., Peng, Y., and Huang, B. (2017). Metabolic pathways regulated by abscisic acid, salicylic acid and γ -aminobutyric acid in association with improved drought tolerance in creeping

bentgrass (*Agrostis stolonifera*). *Physiologia Plantarum*, 159(1), 42–58.
<https://doi.org/10.1111/ppl.12483>.

Lichtenthaler, H. K., and Wellburn, A. R. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11, 591-592.

Liu, X., Liu, W., Wang, Q., Wu, L., Luo, Y., and Christie, P. (2017). Soil properties and microbial ecology of a paddy field after repeated applications of domestic and industrial sewage sludges. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(9), 8619-8628.

López-Millán, A. F., Sagardoy, R., Solanas, M., Abadía, A., and Abadía, J. (2009). Cadmium toxicity in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants grown in hydroponics. *Environmental and Experimental Botany*, 65(2-3), 376-385.

Lotfi, N., Soleimani, A., Vahdati, K., and Çakmakçı, R. (2019). Comprehensive biochemical insights into the seed germination of walnut under drought stress. *Scientia Horticulturae*, 250, 329-343.

Ltaeif, H. B., Sakhraoui, A., González-Orenga, S., Landa Faz, A., Boscaiu, M., Vicente, O., and Rouz, S. (2021). Responses to salinity in four plantago species from Tunisia. *Plants*, 10(7).
<https://doi.org/10.3390/plants10071392>.

Lu, Q., He, Z. L., and Stoffella, P. J. (2012). Land application of biosolids in the USA: a review. *Applied and Environmental Soil Science*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/201462>.

Luzio, W. (2010). Suelos de Chile. p. 346.

Maftoun, M., Moshiri, F., Karimian, N., and Ronaghi, A. M. (2004). Effects of two organic wastes in combination with phosphorus on growth and chemical composition of spinach and soil

properties. *Journal of Plant Nutrition*, 27(9), 1635–1651. <https://doi.org/10.1081/PLN-200026005>.

Maghsoudi, K., Emam, Y., Niazi, A., Pessarakli, M., and Arvin, M. J. (2018). P5CS expression level and proline accumulation in the sensitive and tolerant wheat cultivars under control and drought stress conditions in the presence/absence of silicon and salicylic acid. *Journal of Plant Interactions*, 13(1), 461–471. <https://doi.org/10.1080/17429145.2018.1506516>.

Mahouachi, J., Argamasilla, R., and Gómez-Cadenas, A. (2012). Influence of exogenous glycine betaine and abscisic acid on papaya in responses to water-deficit stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 31(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00344-011-9214-z>.

Mansour, E., Merwad, A. M. A., Yasin, M. A. T., Abdul-Hamid, M. I. E., El-Sobky, E. E. A., and Oraby, H. F. (2017). Nitrogen use efficiency in spring wheat: Genotypic variation and grain yield response under sandy soil conditions. *The Journal of Agricultural Science*, 155(9), 1407-1423.

Mansour, M. M. F., and Ali, E. F. (2017). Evaluation of proline functions in saline conditions. *Phytochemistry*, 140, 52-68.

Marschner, H. (1995). Mineral nutrition of higher plants 2nd edn. *Institute of Plant Nutrition University of Hohenheim: Germany*.

Masclaux-Daubresse, C., Daniel-Vedele, F., Dechorgnat, J., Chardon, F., Gaufichon, L., and Suzuki, A. (2010). Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. *Annals of Botany*, 105(7), 1141-1157.

Matthei, O. (1965). Estudio crítico de las gramíneas del género *Stipa* en Chile. *Gayana Botanica*, 13, 1-18,68-73.

Meselhy, A., Sharma, S., Guo, Z., Singh, G., Yuan, H., Tripathi, R. D., ... and Dhankher, O. P. (2021). Nanoscale sulfur improves plant growth and reduces arsenic toxicity and accumulation in

rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Science and Technology*, 55(20), 13490-13503.

Millar, A. H., Mittler, R., Kiddle, G., Heazlewood, J. L., Bartoli, C. G., Theodoulou, F. L., and Foyer, C. H. (2003). Control of ascorbate synthesis by respiration and its implications for stress responses. *Plant Physiology*, 133(2), 443–447. <https://doi.org/10.1104/pp.103.028399>.

Ministerio del Medio Ambiente. (2017). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático.

Mittler, R. (2017). ROS are good. *Trends in Plant Science*, 22(1), 11–19.

Miura, K., and Tada, Y. (2014). Regulation of water, salinity, and cold stress responses by salicylic acid. *Frontiers in Plant Science*, 5(January), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00004>.

Mkhinini, M., Helaoui, S., Boughattas, I., Amemou, C., and Banni, M. (2020). Earthworm *Eisenia andrei* modulates oxidative stress in bean plants *Vicia faba* irrigated with treated wastewater. *Ecotoxicology*, 29(7), 1003–1016. <https://doi.org/10.1007/s10646-020-02243-y>.

Molina, J., and Covarrubias, J. I. (2019). Influence of nitrogen on physiological responses to bicarbonate in a grapevine rootstock. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(2), 305–312. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00030-1>.

Molina, J., González-Orenga, S., Vicente, O., Boscaiu, M., Llinares, J. V., Zambrano, F., and Santibáñez, C. (2022). Effect of acetylsalicylic acid and ammonium sulphate on productive and physiological parameters in *Stipa caudata* under water shortage conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 50(1), 1–17. <https://doi.org/10.15835/nbha5011264.5>.

Möller, K., and Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences*, 12(3), 242–257. <https://doi.org/10.1002/elsc.201100085>.

Moraldo, B. (1986). Il genere *Stipa* L. (Gramineae) in Italia. *Webbia*, 40(2), 203–278.

Moussa, H., and Abdel-Aziz, S. (2008). Comparative response of drought tolerant and drought sensitive maize genotypes to water stress. *Australian Journal of Crop Science*, 1(1), 31–36.

Moussouraki, M. A., Eleni, T. A. N. I., Velliou, A., Goufa, M., Psychogiou, M., Papadakis, I. E., and Abraham, E. M. (2019). Growth, physiological and biochemical responses of two greek cotton cultivars to salt stress and their impact as selection indices for salt tolerance. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 47(3), 706-715.

Mueller, M. J. (2004). Archetype signals in plants: The phytoprostanes. *Current Opinion in Plant Biology*, 7(4), 441–448. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2004.04.001>.

Munné-Bosch, S., Queval, G., and Foyer, C. H. (2013). The impact of global change factors on redox signaling underpinning stress tolerance. *Plant Physiology*, 161(1), 5–19. <https://doi.org/10.1104/pp.112.205690>.

Munns R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell & Environment*, 25(2): 239-250.

Munns, R., and Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651-681.

Muranaka, S., Shimizu, K., and Kato, M. (2002). A salt-tolerant cultivar of wheat maintains photosynthetic activity by suppressing sodium uptake. *Photosynthetica*, 40(4), 505-515.

Nakano, Y., and Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, 22(5), 867-880.

Namdjoyan, S., Kermanian, H., Abolhasani Soorki, A., Modarres Tabatabaei, S., and Elyasi, N. (2017). Interactive effects of salicylic acid and nitric oxide in alleviating zinc toxicity of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Ecotoxicology*, 26(6), 752–761

Nazar, R., Umar, S., Khan, N. A., and Sareer, O. (2015). Salicylic acid supplementation improves photosynthesis and growth in mustard through changes in proline accumulation and ethylene formation under drought stress. *South African Journal of Botany*, 98, 84–94. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.02.005>.

Neuberg, M., Pavlíková, D., Pavlík, M., and Balík, J. (2010). The effect of different nitrogen nutrition on proline and asparagine content in plant. *Plant, Soil and Environment*, 56(7), 305–311. <https://doi.org/10.17221/47/2010-pse>.

Nilsson, L. O., and Wiklund, K. (1994). Nitrogen uptake in a Norway spruce stand following ammonium sulphate application, fertigation, irrigation, drought and nitrogen-free-fertilization. *Plant and Soil*, 164(2), 221–229. <https://doi.org/10.1007/BF00010074>.

Noctor, G., and Foyer, C. H. (2016). Intracellular redox compartmentation and ROS-related communication in regulation and signaling. *Plant Physiology*. 171(July), 1581–1592. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00346>.

Noctor, G., Reichheld, J. P., and Foyer, C. H. (2018). ROS-related redox regulation and signaling in plants. *Seminars in Cell and Developmental Biology* (Vol. 80, pp. 3-12). Academic Press.

Noreen, S., Fatima, K., Athar, H. U. R., Ahmad, S., and Hussain, K. (2017). Enhancement of physio-biochemical parameters of wheat through exogenous application of salicylic acid under drought stress. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 27(1), 153–163.

Norton, M. R., Malinowski, D. P., and Voltaire, F. (2016). Plant drought survival under climate change and strategies to improve perennial grasses. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(2).

Nowicka, B., Ciura, J., Szymańska, R., and Kruk, J. (2018). Improving photosynthesis, plant productivity and abiotic stress tolerance—current trends and future perspectives. *Journal of Plant*

Physiology, 231, 415-433.

Ondreičková, K., Piliarová, M., Klčová, L., Žofajová, A., Gubiš, J., Horník, M., Gubišová, M., Hudcovicová, M., and Kraic, J. (2021). The impact of sewage sludge on the fungal communities in the rhizosphere and roots of barley and on barley yield. *Open Life Sciences*, 16(1), 210–221. <https://doi.org/10.1515/biol-2021-0024>.

Ozgur, R., Uzilday, B., Sekmen, A. H., and Turkan, I. (2013). Reactive oxygen species regulation and antioxidant defence in halophytes. *Functional Plant Biology*, 40(9), 832-847.

Pachauri, R. K., and Meyer, L. A. (2014). Climate Change 2014: Synthesis report. contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.

Pál, M., Kovács, V., Vida, G., Szalai, G., and Janda, T. (2013). Changes induced by powdery mildew in the salicylic acid and polyamine contents and the antioxidant enzyme activities of wheat lines. *European Journal of Plant Pathology*, 135(1), 35–47. <https://doi.org/10.1007/s10658-012-0063-9>.

Palansooriya, K. N., Shaheen, S. M., Chen, S. S., Tsang, D. C., Hashimoto, Y., Hou, D., ... and Ok, Y. S. (2020). Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review. *Environment International*, 134, 105046.

Pampana, S., Rossi, A., and Arduini, I. (2021). Biosolids benefit yield and nitrogen uptake in winter cereals without excess risk of n leaching. *Agronomy*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/agronomy11081482>.

Patel, J. A., and Vora, A. B. (1985). Free proline accumulation in drought-stressed plants. *Plant and Soil*, 84(3), 427–429. <https://doi.org/10.1007/BF02275480>.

Pease, B., Thompson, G. L., and Thoms, A. W. (2022). Evaluation of compost and soil mix ratios

for perennial ryegrass establishment on topsoil and subsoil. *HortTechnology*, 32(2), 191-198.

Pepper, I. L., Zerzghi, H., Brooks, J. P., and Gerba, C. P. (2008). Sustainability of land application of class B biosolids. *Journal of Environmental Quality*, 37(S5), S-58.

Per, T. S., Khan, N. A., Reddy, P. S., Masood, A., Hasanuzzaman, M., Khan, M. I. R., and Anjum, N. A. (2017). Approaches in modulating proline metabolism in plants for salt and drought stress tolerance: Phytohormones, mineral nutrients and transgenics. *Plant Physiology and Biochemistry*, 115, 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.03.018>.

Pérez, B. (1999). Edafología en la agricultura regadía cuyana. *Fundar*. Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ciencias Agrarias.

Pessarakli, M. (Ed.). (2019). Handbook of plant and crop stress. CRC press.

Pollastri, S., and Tattini, M. (2011). Flavonols: old compounds for old roles. *Annals of Botany*, 108(7), 1225-1233.

Pyke, S. (2003). *Stipa caudata* in peninsula Iberica. *Flora Montiberica*, 22, 20–22.

Rahman, H., Sabreen, S., Alam, S., and Kawai, S. (2005). Effects of nickel on growth and composition of metal micronutrients in barley plants grown in nutrient solution. *Journal of Plant Nutrition*, 28(3), 393-404.

Rajala, A. (2004). Plant growth regulators to manipulate oat stands. *Agricultural and Food Science*, 13(1–2), 186–197. <https://doi.org/10.2137/1239099041838058>.

Reddy, D. R., and Prasanth, D. B. V. (2018). Comarision of distributed power-flow controller (DPFC) and generalized unified power flow controller (GUPFC) in power quality enhancement. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, 5, 686-696.

Reyes, M. F., and Aguiar, M. R. (2017). Root proliferation strategies and exploration of soil patchiness in arid communities. *Austral Ecology*, 42(7), 810–818.

Rice-Evans, C. A., Miller, N. J., and Paganga, G. (1997). Antioxidant properties of phenolic compounds. *Trends in Plant Science*, 2(4), 152–159. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(97\)01018-2](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(97)01018-2).

Roig, N., Sierra, J., Martí, E., Nadal, M., Schuhmacher, M., and Domingo, J. L. (2012). Long-term amendment of Spanish soils with sewage sludge: Effects on soil functioning. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 158, 41–48.

Rolnick, D., Donti, P. L., Kaack, L. H., Kochanski, K., and ... (2022). Tackling climate change with machine learning. *ArXiv Preprint ArXiv*, 55(2). <https://arxiv.org/abs/1906.05433%0Ahttps://arxiv.org/pdf/1906.05433.pdf?ref=https://githubhelp.com>.

Romaschenko, K., Peterson, P. M., Soreng, R. J., Garcia-Jacas, N., Futorna, O., and Susanna, A. (2012). Systematics and evolution of the needle grasses (Poaceae: *Pooideae: Stipeae*) based on analysis of multiple chloroplast loci, ITS, and lemma micromorphology. *Taxon*, 61(1), 18–44.

Sade, N., Gebremedhin, A., and Moshelion, M. (2012). Risk-taking plants: anisohydric behavior as a stress-resistance trait. *Plant Signaling and Behavior*, 7(7), 767–770.

Sakamoto, A., and Murata, N. (2002). The role of glycine betaine in the protection of plants from stress: Clues from transgenic plants. *Plant, Cell and Environment*, 25(2), 163–171.

Sanders, G. J., and Arndt, S. K. (2012). Osmotic adjustment under drought conditions. *Plant responses to drought stress: From Morphological to Molecular Features*, 199–229.

Santibañez, C., De La Fuente, L. M., Bustamante, E., Silva, S., León-Lobos, P., and Ginocchio, R. (2012). Potential use of organic- and hard-rock mine wastes on aided phytostabilization of large-scale mine tailings under semiarid mediterranean climatic conditions: Short-term field study.

Applied and Environmental Soil Science, 2012.

Santibáñez Quezada, F. (2017). Atlas agroclimático de Chile. Estado actual y tendencias del clima. Tomo III: Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas: FIA.

Sarker, U., and Oba, S. (2018). Drought stress effects on growth, ROS markers, compatible solutes, phenolics, flavonoids, and antioxidant activity in *Amaranthus tricolor*. *Apply Biochemistry Biotechnology*, 999–1016.

Saska, P., Skuhrovec, J., Tylová, E., Platková, H., Tuan, S. J., Hsu, Y. T., and Vítámvás, P. (2021). Leaf structural traits rather than drought resistance determine aphid performance on spring wheat. *Journal of Pest Science*, 94(2), 423–434. <https://doi.org/10.1007/s10340-020-01253-3>.

Schiop, S. T., Al Hassan, M., Sestras, A. F., Boscaiu, M., Sestras, R. E., and Vicente, O. (2017). Biochemical responses to drought, at the seedling stage, of several Romanian Carpathian populations of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst). *Trees - Structure and Function*, 31(5), 1479–1490. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1563-1>.

Schmidt, A., and Jäger, K. (1992). Open questions about sulfur metabolism in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 43(1), 325–349.

Schultz, H. R. (2003). Differences in hydraulic architecture account for near-isohydric and anisohydric behaviour of two field-grown *Vitis vinifera* L. cultivars during drought. *Plant, Cell and Environment*, 26(8), 1393–1405.

Senaratna, T., Touchell, D., Bunn, E., and Dixon, K. (2000). Acetyl salicylic acid (aspirin) and salicylic acid induce multiple stress tolerance in bean and tomato plants. *Plant Growth Regulation*, 30(2), 157–161.

Shabala, S., and Cuin, T. A. (2008). Potassium transport and plant salt tolerance. *Physiologia*

Plantarum, 133(4), 651-669.

Shabala, S., and Shabala, L. (2011). Ion transport and osmotic adjustment in plants and bacteria. *Biomolecular Concepts*, 2(5), 407-419.

Shakirova, F. M., Sakhabutdinova, A. R., Bezrukova, M. V., Fatkhutdinova, R. A., and Fatkhutdinova, D. R. (2003). Changes in the hormonal status of wheat seedlings induced by salicylic acid and salinity. *Plant Science*, 164(3), 317-322.

Shan, C., Wang, B., Sun, H., Gao, S., and Li, H. (2020). H₂S induces NO in the regulation of AsA-GSH cycle in wheat seedlings by water stress. *Protoplasma*, 257(5), 1487-1493. <https://doi.org/10.1007/s00709-020-01510-3>.

Sharma, B., Sarkar, A., Singh, P., and Singh, R. P. (2017). Agricultural utilization of biosolids: A review on potential effects on soil and plant grown. *Waste Management*, 64, 117-132.

Sharma, P., Jha, A. B., and Dubey, R. S. (2019). Oxidative stress and antioxidative defense system in plants growing under abiotic stresses. In *Handbook of Plant and Crop Stress*, Fourth Edition (pp. 93-139). CRC press.

Sharp, R. E., and Davies, W. J. (1979). Solute regulation and growth by roots and shoots of water-stressed maize plants. *Planta*, 147(1), 43-49. <https://doi.org/10.1007/BF00384589>.

Sharp, R. E., Hsiao, T. C., and Silk, W. K. (1990). Growth of the maize primary root at low water potentials: II. Role of growth and deposition of hexose and potassium in osmotic adjustment. *Plant Physiology*, 93(4), 1337-1346. <https://doi.org/10.1104/pp.93.4.1337>.

Shri, M., Dave, R., Diwedi, S., Shukla, D., Kesari, R., Tripathi, R. D., ... and Chakrabarty, D. (2014). Heterologous expression of *Ceratophyllum demersum* phytochelatin synthase, CdPCS1, in rice leads to lower arsenic accumulation in grain. *Scientific Reports*, 4(1), 1-10.

Sidhu, H., O'Connor, G., and Kruse, J. (2019). Plant toxicity and accumulation of biosolids-borne ciprofloxacin and azithromycin. *Science of the Total Environment*, 648, 1219–1226. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.218>.

Singh, M., Kumar, J., Singh, S., Singh, V. P., and Prasad, S. M. (2015). Roles of osmoprotectants in improving salinity and drought tolerance in plants: a review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 14(3), 407-426.

Slama, I., Abdelly, C., Bouchereau, A., Flowers, T., and Saviouré, A. (2015). Diversity, distribution and roles of osmoprotective compounds accumulated in halophytes under abiotic stress. *Annals of Botany*, 115(3), 433-447.

Smith, S. R. (2009). A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge. *Environment International*, 35(1), 142-156.

Song, Y., Li, J., Liu, M., Meng, Z., Liu, K., and Sui, N. (2019). Nitrogen increases drought tolerance in maize seedlings. *Functional Plant Biology*, 46(4), 350-359.

Stoyanova, Z., and Doncheva, S. (2002). The effect of zinc supply and succinate treatment on plant growth and mineral uptake in pea plant. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 14, 111-116.

Sun, Y., Wang, C., Chen, H. Y. H., and Ruan, H. (2020). Response of plants to water stress : A Meta-Analysis. *Frontiers in Plant Science*, 11 (June), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00978>.

Superintendencia de Servicios Sanitarios, División de Fiscalización. 10 May 2019. Establece nuevo programa de monitoreo de la planta de tratamiento de aguas servidas “La Farfana” de la empresa Aguas Andinas S.A., por tratamiento de aguas servidas de la zona central de la ciudad de Santiago, Región Metropolitana. Disponible en: http://www.siss.gob.cl/586/articles-5147_RPM_1653_2019.pdf.

Szabados, L., and Savouré, A. (2010). Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science*, 15(2), 89-97.

Szalai, G., Krantev, A., Yordanova, R., Popova, L. P., and Janda, T. (2013). Influence of salicylic acid on phytochelatin synthesis in *Zea mays* during Cd stress. *Turkish Journal of Botany*, 37(4), 708-714. <https://doi.org/10.3906/bot-1210-6>.

Tari, I., Csiszár, J., Szalai, G., Horváth, F., Pécsváradi, A., Kiss, G., Szepesi, Á., Szabó, M., and Erdei, L. (2002). Acclimation of tomato plants to salinity stress after a salicylic acid pre-treatment. *Acta Biologica Szegediensis*, 46(3-4), 55-56.

Tavakoli Hasanaklou, N., Ebadi, A., Davari, M., and Tavakoli, H. (2016). Effect of potassium and nitrogen on the resistant of wheat against FHB. *Cereal Research*, 6(2), 159-171.

Tejada-Jimenez, M., Llamas, A., Galván, A., and Fernández, E. (2019). Role of nitrate reductase in NO production in photosynthetic eukaryotes. *Plants*, 8(3). <https://doi:10.3390/plants8030056>.

Thomas, H. (1991). Accumulation and consumption of solutes in swards of *Lolium perenne* during drought and after rewatering. *New Phytologist*, 118(1), 35-48.

Timmusk, S., Abd El-Daim, I. A., Copolovici, L., Tanilas, T., Kännaste, A., Behers, L., Nevo, E., Seisenbaeva, G., Stenström, E., and Niinemets, Ü. (2014). Drought-tolerance of wheat improved by rhizosphere bacteria from harsh environments: Enhanced biomass production and reduced emissions of stress volatiles. *Public Library of Science*, 9(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096086>.

Torri, S. I., Corrêa, R. S., and Renella, G. (2014). Soil carbon sequestration resulting from biosolids application. *Applied and Environmental Soil Science*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/821768>.

Trippe, K. M., Manning, V. A., Reardon, C. L., Klein, A. M., Weidman, C., Ducey, T. F., Novak, J. M., Watts, D. W., Rushmiller, H., Spokas, K. A., Ippolito, J. A., and Johnson, M. G. (2021). Phytostabilization of acidic mine tailings with biochar, biosolids, lime, and locally-sourced microbial inoculum: Do amendment mixtures influence plant growth, tailing chemistry, and microbial composition? *Applied Soil Ecology*, 165 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103962>.

Vargas-ortiz, E., Ramírez-tobias, H. M., Luis, J., Espitia-rangel, E., Guti, A. K., Boj, E., Paulina, A., and De, B. (2021). Biomass, chlorophyll fluorescence, and osmoregulation traits let differentiation of wild and cultivated Amaranthus under water stress. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 220 (February 2020, 112210. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2021.112210>.

Verdugo, C., Sanchez, P., Santibanez, C., Urrestarazu, P., Bustamante, E., Silva, Y., ... and Ginocchio, R. (2010). Efficacy of lime, biosolids, and mycorrhiza for the phytostabilization of sulfidic copper tailings in Chile: a greenhouse experiment. *International Journal of Phytoremediation*, 13(2), 107–125.

Verichev, K., Zamorano, M., and Carpio, M. (2020). Effects of climate change on variations in climatic zones and heating energy consumption of residential buildings in the southern Chile. *Energy and Buildings*, 215, 109874. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109874>.

Verloove, F. (2005). A synopsis of Jarava Ruiz and Pav. And Nassella E. Desv.(*Stipa* L. sl) (Poaceae: *Stipeae*) in southwestern Europe. *Candollea*, 60(1), 97.

Verma, N., Tiwari, S., Singh, V. P., and Prasad, S. M. (2020). Nitric oxide in plants: an ancient molecule with new tasks. *Plant Growth Regulation*, 90(1).

Vinocur, B., and Altman, A. (2005). Recent advances in engineering plant tolerance to abiotic stress: achievements and limitations. *Current Opinion in Biotechnology*, 16(2), 123-132.

Vlot, A. C., Dempsey, D. A., and Klessig, D. F. (2009). Salicylic acid, a multifaceted hormone to combat disease. *Annual Review of Phytopathology*, 47(1), 177–206.
<https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.050908.135202>.

Walinga, I, Van Vark, W. and Van der Lee, J.J. (1989). “Plant analysis procedures”. Wageningen Agricultural Units (Soil and Plant Part 7). A Series syllabi, Netherlands, Pp. 10-167.

Wang, H. Zheng, Zhang, L. He, Ma, J., Li, X. Yi, Li, Y., Zhang, R. Ping, and Wang, R. Quan. (2010). Effects of water stress on reactive oxygen species generation and protection system in rice during grain-filling stage. *Agricultural Sciences in China*, 9(5), 633–641.
[https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(09\)60138-3](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(09)60138-3).

Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., and Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(4), 7370-7390.

Weggler-Beaton, K., McLaughlin, M. J., and Graham, R. D. (2000). Salinity increases cadmium uptake by wheat and Swiss chard from soil amended with biosolids. *Soil Research*, 38(1), 37-46.

Weimberg, R. (1987). Solute adjustments in leaves of two species of wheat at two different stages of growth in response to salinity. *Physiologia Plantarum*, 70(3), 381-388.

Weng, M., Cui, L., Liu, F., Zhang, M., Shan, L., Yang, S., and Deng, X. (2015). Effects of drought stress on antioxidant enzymes in seedlings of different wheat genotypes. *Pakistan Journal of Botany*, 47(1), 49–56.

Wiseman, H., and Halliwell, B. (1996). Damage to DNA by reactive oxygen and nitrogen species: Role in inflammatory disease and progression to cancer. *Biochemical Journal*, 313(1), 17–29.
<https://doi.org/10.1042/bj3130017>.

Wong, M. H., and Bradshaw, A. D. (1982). A comparison of the toxicity of heavy metals, using root elongation of rye grass, *Lolium perenne*. *New Phytologist*, 91(2), 255-261.

Wu, F., Bao, W., Li, F., and Wu, N. (2008). Effects of drought stress and N supply on the growth, biomass partitioning and water-use efficiency of *Sophora davidii* seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, 63(1-3), 248-255. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.11.002>.

Wu, T. M., Lin, W. R., Kao, Y. T., Hsu, Y. T., Yeh, C. H., Hong, C. Y., and Kao, C. H. (2013). Identification and characterization of a novel chloroplast/mitochondria co-localized glutathione reductase 3 involved in salt stress response in rice. *Plant Molecular Biology*, 83, 379-390.

Wu, H., Zhang, X., Giraldo, J.P. et al. (2018). It is not all about sodium: revealing tissue specificity and signalling roles of potassium in plant responses to salt stress. *Plant Soil*, 431, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3770-y>.

Xu, L., Zhao, H., Ruan, W., Deng, M., Wang, F., Peng, J., Luo, J., Chen, Z., and Yi, K. (2017). Abnormal inflorescence meristem1 functions in salicylic acid biosynthesis to maintain proper reactive oxygen species levels for root meristem activity in rice. *Plant Cell*, 29(3), 560–574. <https://doi.org/10.1105/tpc.16.00665>.

Yang, D., Ni, R., Yang, S., Pu, Y., Qian, M., Yang, Y., and Yang, Y. (2021). Functional characterization of the *stipa purpurea* p5cs gene under drought stress conditions. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(17), 9599.

Yang, S., Ulhassan, Z., Shah, A. M., Khan, A. R., Azhar, W., Hamid, Y., Hussain, S., Sheteiwy, M. S., Salam, A., and Zhou, W. (2021). Salicylic acid underpins silicon in ameliorating chromium toxicity in rice by modulating antioxidant defense, ion homeostasis and cellular ultrastructure. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166 (June), 1001–1013. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.07.013>

Zeinali, A., and Moradi, P. (2015). The effects of humic acid and ammonium sulfate foliar spraying and their interaction effects on the qualitative and quantitative yield of native garlic (*Allium sativum* L.). *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 4(12S), 205-211.

Zhang, L., Li, S., Zhang, H., and Liang, Z. (2007). Nitrogen rates and water stress effects on production, lipid peroxidation and antioxidative enzyme activities in two maize (*Zea mays* L.) Genotypes. 397, 387–397. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2007.00276.x>.

Zhang, X., Ervin, E. H., Evanylo, G. K., Cataldi, D., Li, J., and Zhou, D. (2012). Biosolids impact antioxidant metabolism associated with drought tolerance in tall fescue. *HortScience*, 47(10), 1550–1555.

Zhang, L., and Becker, D. F. (2015). Connecting proline metabolism and signaling pathways in plant senescence. *Frontiers in Plant Science*, 6, 552.

Zhang, X., Wang, X. Q., and Wang, D. F. (2017). Immobilization of heavy metals in sewage sludge during land application process in China: A review. *Sustainability*, 9(11), 2020.

Zhang, T., Yang, J., Sun, Y., Kang, Y., Yang, J., and Qi, Z. (2018). Calcium deprivation enhances non-selective fluid-phase endocytosis and modifies membrane lipid profiles in *Arabidopsis* roots. *Journal of Plant Physiology*, 226(April), 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.04.002>.

Zhishen, J., Mengcheng, T., and Jianming, W. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chemistry*, 64(4), 555-559.

Zhu, J. K. (2001). Plant salt tolerance. *Trends in Plant Science*, 6(2), 66-71.

Ziadi, N., Gagnon, B., and Nyiraneza, J. (2013). Crop yield and soil fertility as affected by papermill biosolids and liming by-products. *Canadian Journal of Soil Science*, 93(3), 319-328. <https://doi.org/10.4141/CJSS2012-129>.

ANEXO

Registro fotográfico temporada 2018-2019



Fotografía 1. Diseño experimental del ensayo



Fotografía 2. *Stipa caudata* Regadas y AAS



Fotografía 3. *Stipa caudata* RH sin tratamientos



Fotografía 4. *Stipa caudata* RH y AAS



Fotografía 5. *Stipa caudata* RH y SA



Fotografía 6. *Stipa caudata* y succionador de solución suelo



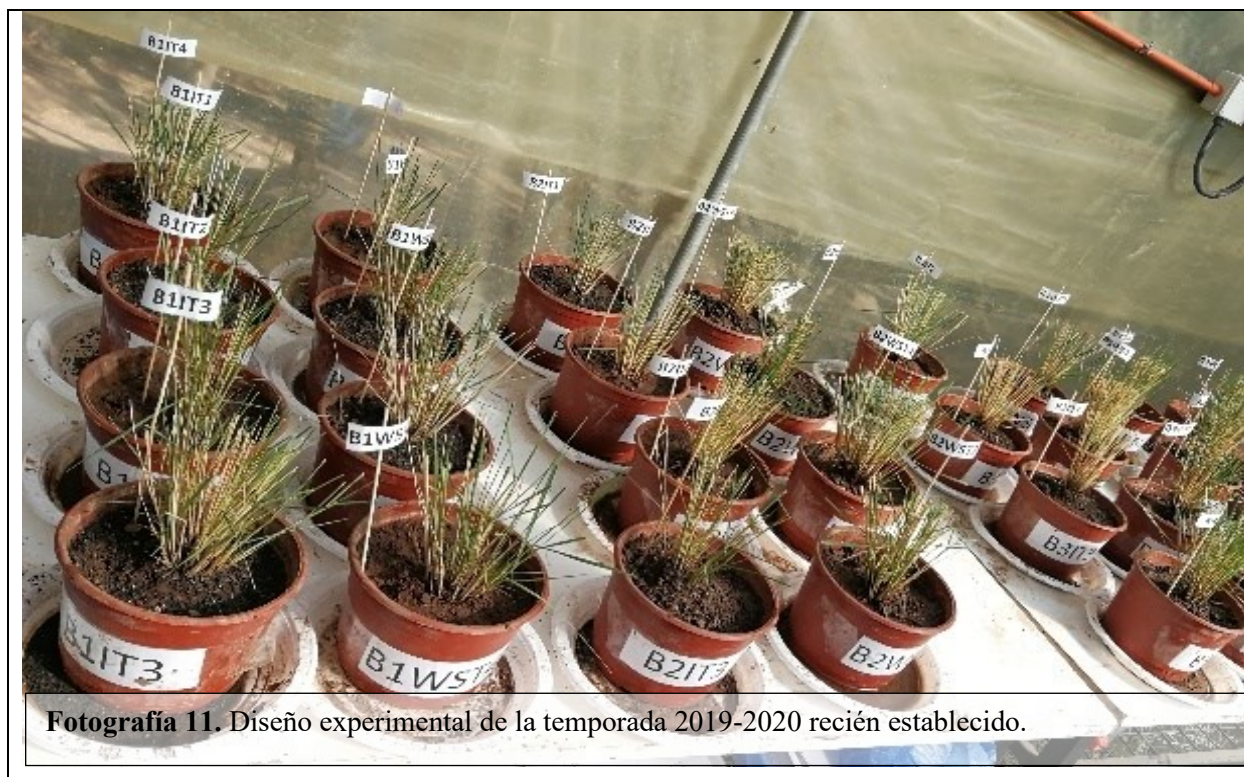
Fotografía 7. Aplicación del riego



Fotografía 8. Medición de clorofila.



Registro fotográfico temporada 2019-2020





Fotografía 12. Corte transversal de una corona de *Stipa caudata* al final del experimento tratada con BS Regadas.



Fotografía 13. Suelo tratado con BS Regado visto al término del ensayo final



Fotografía 14. Raíces de dos macetas de *Stipa caudata* tratadas con BS Regadas vistas al término del ensayo final.





Fotografía 15. Raíces de *Stipa caudata* Regada sin BS vistas al término del ensayo final





Fotografía 16. Biosólidos secados y tamizados junto con la mezcla final ocupada en los tratamientos correspondientes.



Fotografía 17. Detalle de estados fenológicos de *Stipa caudata*.

Registro de progresión semanal plantas Irrigated ensayo final temporada 2019-2020.



Tratamientos: T2 = AAS; T4 = Control.

Registro de progresión semanal plantas WR ensayo final temporada 2019-2020

RH día 1	RH día 7	RH día 14
		
		
		
		

Tratamientos: T2 = AAS; T4 = Control.