

## MINERA LOS PELAMBRES

### SERVICIO ETAPA II ENSAYO 30 HA FITOESTABILIZACIÓN

N° 4357-0000-MA-INF-008 \_ REV. 0

### INFORME ETAPA 6

REV.		Ejecutor	Revisor	Aprobador	DESCRIPCIÓN
A	Nombre	Ramon Leva Yasna Tapia	Oscar Parada	Oscar Parada	Coordinación Interna
	Fecha	15.07.16	30.08.16	30.08.16	
B	Nombre Firma	Ramon Leva Yasna Tapia	Oscar Parada	Oscar Parada	Revisión y Aprobación Cliente
	Fecha	15.07.16	30.08.16	30.08.16	
0	Nombre Firma	Ramon Leva Yasna Tapia	Oscar Parada	Oscar Parada	Aprobado Cliente
	Fecha	30.08.16	27.09.16	27.09.16	

## SERVICIO ETAPA II ENSAYO 30 HA FITOESTABILIZACIÓN

### INFORME ETAPA 6

#### CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS .....</b>	<b>13</b>
2.1	OBJETIVO GENERAL .....	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>15</b>
3.1	SOBREVIVENCIA.....	15
3.2	MEDICIONES DENDROMÉTRICAS.....	15
3.2.1	Variables cuantitativas .....	16
3.2.2	Variables cualitativas.....	16
3.2.3	Análisis Estadísticos de las Mediciones .....	18
3.3	MUESTREO DE SUELOS, FOLIAR Y FRUTOS .....	24
3.3.1	Muestreo de sustrato.....	24
3.3.2	Muestreo Foliar .....	28
3.3.3	Muestreo de Raíces .....	29
3.4	ELECCIÓN DE ESPECIES .....	31
3.4.1	Metodología para la elección de especies para la primera etapa.....	31
3.4.2	Metodología para la elección de especies para la segunda etapa .....	34
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>36</b>
4.1	ACTIVIDADES REALIZADAS (REPORTES MENSUALES).....	36
4.1.1	Administración.....	36
4.1.2	Mantenimiento de la Infraestructura.....	37
4.1.3	Manejo Plantación.....	41
4.2	SOBREVIVENCIA Y DESARROLLO .....	47
4.2.1	Seguimiento sobrevivencia y desarrollo.....	47
4.3	MEDICIONES DENDROMÉTRICAS.....	51
4.3.1	Altura .....	51
4.3.2	Diámetro de Tallo o Cuello (DAC).....	55
4.3.3	Diámetro de Copa .....	58
4.3.4	Variable Estado (variable cualitativa, Vigor) .....	60
4.3.5	Análisis Estadístico .....	62
4.4	SEGUIMIENTO DE LOS ENSAYOS .....	70
4.4.1	Seguimiento Sustrato relaves .....	70
4.4.2	Seguimiento de tejido foliar .....	87
4.4.3	Seguimiento en tejido radical.....	111
4.4.4	Relación de concentración de metales en tejido foliar versus tejido radical .....	128
<b>5</b>	<b>ELECCIÓN DE ESPECIES .....</b>	<b>138</b>
5.1	RESULTADO ETAPAS .....	138

---

5.1.1	Resultados primera etapa .....	138
5.1.2	Resultados Segunda etapa .....	144
6	CONCLUSIONES.....	148
6.1	SOBREVIVENCIA.....	148
6.2	MEDICIONES DENDROMÉTRICAS.....	148
6.3	MUESTREO DE SUSTRATO .....	148
6.4	MUESTREO FOLIAR Y RADICAL .....	149
6.5	ELECCIÓN DE ESPECIES .....	149
6.6	CONCLUSIÓN GENERAL .....	149
7	RECOMENDACIONES.....	150
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	151

## LISTADO DE ANEXOS

Anexo A	Resultados de Laboratorio
Anexo B	Informe Vivero CDS
Anexo C	Análisis estadístico mediciones dendrométricas (U de Chile)

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 3.2-1 Cantidad de individuos por especie para mediciones dendrométricas al inicio del ensayo. ....	15
Tabla 3.3-1. Descripción de muestreos realizados en el sustrato de relaves. ....	25
Tabla 3.3-2. Análisis muestra de sustrato, otoño 2016. ....	25
Tabla 3.3-3. Contaminación por metales en suelos agrícolas (mg/kg). ....	27
Tabla 3.3-4. Directivas de Kelly para la clasificación de suelos contaminados. ....	27
Tabla 3.3-5. Concentraciones de elementos traza considerados deficientes, normales y tóxicos. ....	27
Tabla 3.3-6. Concentraciones aproximadas de elementos trazas en tejido de hojas (maduras), generalizadas para varias especies. ....	29
Tabla 3.4-1. Concentración Total de elementos metálicos y no metálicos obtenidos en el relave (Línea base 2012). ....	35
Tabla 4.1-1. Capacitaciones realizadas a CDS. ....	36
Tabla 4.1-2 Listado de Bonos entregados (2015-2016). ....	37
Tabla 4.1-3 Aplicación de Fertilizantes en el periodo. ....	41
Tabla 4.1-4 Actividades de mantenimiento del sistema de riego. ....	43
Tabla 4.2-1. Supervivencia de individuos por tratamientos, junio 2016. ....	47
Tabla 4.2-2. Supervivencia de individuos replantados, junio 2016. ....	48
Tabla 4.2-3. Supervivencia de individuos por tratamientos y especie vegetal, Junio 2016. ...	49
Tabla 4.3-1. Número de plantas (n), altura promedio de plantas (cm) y coeficiente de variación (CV) por especie en el período Mayo 2012. ....	51
Tabla 4.3-2. Número de plantas (n), altura promedio de plantas (cm) y coeficiente de variación (CV) por especie al período junio 2016. ....	51

Tabla 4.3-3. Número de plantas (n), Diámetro de cuello promedio de plantas (cm), valor mínimo (Min), valor máximo(Max) y coeficiente de variación (CV) por especie en el período mayo 2012.....	55
Tabla 4.3-4. Número de plantas (n), Diámetro de cuello promedio de plantas (cm), valor mínimo (Min), valor máximo(Max) y coeficiente de variación (CV) por especie en el período junio 2016.....	55
Tabla 4.3-5. Número de plantas (n), diámetro de copa promedio (mm) (DCprom), valor mínimo (Min), valor máximo (Max) y coeficiente de variación (CV) por especie en el período Abril 2015. ....	58
Tabla 4.3-6. Número de plantas (n), diámetro de copa promedio (mm) (DCprom), valor mínimo (Min), valor máximo (Max) y coeficiente de variación (CV) por especie en el período Enero-Febrero 2016. ....	58
Tabla 4.3-7. Número de plantas (n), diámetro de copa promedio (mm) (DCprom), valor mínimo (Min), valor máximo (Max) y coeficiente de variación (CV) por especie en el período Junio 2016. ....	58
Tabla 4.3-8. Frecuencias absolutas según Especie (Filas) y nivel de Estado (Columnas). Período Abril 2015. ....	60
Tabla 4.3-9. Frecuencias relativas por filas expresadas como porcentaje según Especie (Filas) y nivel de Estado (Columnas). Período Abril 2015. ....	60
Tabla 4.3-10. Frecuencias absolutas según Especie (Filas) y nivel de Estado (Columnas). Período Enero-Febrero 2016. ....	61
Tabla 4.3-11. Frecuencias relativas por filas expresadas como porcentaje según Especie (Filas) y nivel de Estado (Columnas). Período Enero-febrero 2016.....	61
Tabla 4.3-12. Frecuencias absolutas según Especie (Filas) y nivel de Estado (Columnas). Período Junio 2016.....	61
Tabla 4.3-13. Frecuencias relativas por filas expresadas como porcentaje según Especie (Filas) y nivel de Estado (Columnas). Período Junio 2016. ....	62
Tabla 4.3-14. Prueba de hipótesis marginales. Incremento altura plantas. ....	62
Tabla 4.3-15. Medias ajustadas para el incremento de altura de las especies en función del tratamiento y sus respectivos errores estándares (E.E). ....	63
Tabla 4.3-16. Prueba de hipótesis marginales. Incremento diámetro de cuello.....	64
Tabla 4.3-17. Medias ajustadas para el incremento de Incremento diámetro de cuello y sus respectivos errores estándares (E.E).....	64
Tabla 4.3-18. Prueba de hipótesis marginales. Diámetro de copa. ....	65

Tabla 4.3-19. Medias ajustadas para el Diámetro de copa y sus respectivos errores estándares (E.E). .....	65
Tabla 4.4-1. Resultados análisis de laboratorio a muestras de relave de los tratamientos (T1, T2 y T3) del ensayo, obtenido en otoño de 2016. ....	72
Tabla 4.4-2. Test de Kruskal-Wallis para los resultados de análisis de sustrato relave en otoño de 2015 para los tres tratamientos.....	74
Tabla 4.4-3. Resultados de análisis foliar realizado en otoño de 2016.....	88
Tabla 4.4-4. Resultados de análisis foliar realizado en otoño de 2015.....	89
Tabla 4.4-5. Resultados de análisis foliar realizado en otoño de 2013.....	90
Tabla 4.4-6. Resultados de análisis de raíces realizado en otoño de 2016.....	112
Tabla 4.4-7. Resultados de análisis de raíces realizado en otoño de 2015.....	113
Tabla 4.4-8. Resultados de análisis de raíces realizado en otoño de 2013.....	114
Tabla 5.1-1. Altura promedio de las especies en temporada 2016.....	138
Tabla 5.1-2. Diámetro de cuello basal promedio de las especies en temporada 2016. ....	139
Tabla 5.1-3. Diámetro de copa (cobertura) de las especies en temporada 2016.....	140
Tabla 5.1-4. Tabla de Estado (vigor), temporada 2016. ....	141
Tabla 5.1-5. Matriz de evaluación de las especies en la primera etapa. ....	143
Tabla 5.1-6. Índice de translocación (Ti) determinado para las campañas de muestreo de otoño de 2015 y otoño de 2016. ....	144
Tabla 5.1-7. Factor de bioconcentración en raíces (FBCR) determinados para las campañas de muestreo de otoño de 2015 y otoño de 2016. ....	145
Tabla 5.1-8 . Matriz de valoración de atributos por especie respecto a la concentración de metales. ....	146
Tabla 5.1-9 . Tabla de elección de especies en primera y segunda etapa. ....	147
Tabla 5.1-10 . Tabla sintetizada de elección de especies en primera y segunda etapa. ....	147

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 3.2-1. Esquema de ensayo de Fitoestabilización Tranque Quillayes.....	19
--	----

Figura 4.3-1. Análisis de correspondencia múltiple sobre la variable Especie, Categoría (Cat), tratamiento (T1, T2 y T3) y periodo evaluación. ....	67
Figura 4.3-2. Análisis de Componentes Principales sobre las variables Diámetro de copa promedio (DC Prom), Altura de plantas, Incremento de altura de plantas, Diámetro de cuello (DAC) e Incremento de Diámetro de Cuello. ....	68
Figura 4.3-3. Análisis de Componentes Principales sobre las variables Diámetro de copa promedio (DC Prom), Altura de plantas, Incremento de altura de plantas, Diámetro de cuello (DAC) e Incremento de Diámetro de Cuello. ....	69
Figura 4.4-1. Influencia del pH en la disponibilidad de elementos químicos. ....	78

## LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 3.3-1 Excavación para muestreo del sustrato, mayo 2016. ....	26
Fotografía 3.3-2 Relleno de bolsa ziploc con muestra compuesta, mayo 2016. ....	26
Fotografía 3.3-3: Muestreo foliar en Espino, mayo 2016. ....	28
Fotografía 3.3-4: Acumulación de hojas en bolsas rotuladas, mayo 2016. ....	28
Fotografía 3.3-5: Muestreo de raíces en Romero. ....	30
Fotografía 3.3-6: Recolección de muestra de tejido radicular. ....	30
Fotografía 3.3-7: Depositación de raíces en bolsas de papel. ....	30
Fotografía 4.1-1. Nevazón zona del ensayo, Octubre 2015. ....	39
Fotografía 4.1-2 Contaminación de agua de riego noviembre 2015. ....	39
Fotografía 4.1-3 Demarcación de sector con socavones, junio 2016. ....	40
Fotografía 4.1-4 Acumulación de agua en el Bloque 3 Sector 6 del ensayo. ....	40
Fotografía 4.1-5: Placa Identificación Bosquete Mejorado. ....	42
Fotografía 4.1-6: Humectación del compost antes del traslado. ....	42
Fotografía 4.1-7 : Aplicación de compost. ....	42
Fotografía 4.1-8: Limpieza de matrices, abril 2016. ....	44
Fotografía 4.1-9: Extracción de agua de matrices, abril 2016. ....	44
Fotografía 4.1-10: Estandarización de herramientas, mayo 2016. ....	45

Fotografía 4.1-11: Estandarización de herramientas manuales, junio 2016.....	45
Fotografía 4.1-12: Reparación de fosas de inspección, mayo 2016.....	45
Fotografía 4.1-13: Confección de refugios para roedores silvestres, mayo 2016. ....	45
Fotografía 4.1-14: Demarcación de sector con socavones, junio 2016. ....	46
Fotografía 4.1-15: Presencia de socavones en el sector del ensayo, junio 2016. ....	46
Fotografía 4.1-16: Acumulación de agua superficial, junio 2016. ....	46
Fotografía 4.1-17: Acumulación de agua superficial, junio 2016. ....	46

## LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfico 4.2-1 Mortandad de individuos por especie vegetal según tratamientos (T1, T2 y T3) a marzo del 2016. ....	50
Gráfico 4.3-1. Altura promedio de plantas (cm) según período y especie. ....	52
Gráfico 4.3-2. . Incremento promedio de altura de plantas (cm) según período y especie (Incremento del período con respecto a mayo 2012). ....	53
Gráfico 4.3-3. Altura promedio de plantas (cm) según período y tratamiento. ....	53
Gráfico 4.3-4. Incremento de Altura promedio de plantas (cm) según período y tratamiento. ....	54
Gráfico 4.3-5. Diámetro de cuello promedio (mm) según período y especie. ....	56
Gráfico 4.3-6. Incremento de diámetro de cuello promedio (mm) según período y especie (Incremento del período con respecto a mayo 2012). ....	56
Gráfico 4.3-7. Diámetro de cuello promedio (mm) según período y tratamiento. ....	57
Gráfico 4.3-8. Incremento de diámetro de cuello promedio (mm) según período y tratamiento .....	57
Gráfico 4.3-9. Diámetro de copa promedio (mm) según período y especie. ....	59
Gráfico 4.3-10. Diámetro de copa promedio (mm) según período y tratamiento. ....	59
Gráfico 4.4-1. Seguimiento de Nitrógeno (mg/kg) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016. ....	71
Gráfico 4.4-2. Seguimiento de Fósforo (mg/kg) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016. ....	71



Gráfico 4.4-3. Seguimiento de Potasio (mg/kg) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016. ....	72
Gráfico 4.4-4 Seguimiento de pH en sustrato de relaves para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.....	76
Gráfico 4.4-5. Seguimiento de conductividad eléctrica (dS/m) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.....	79
Gráfico 4.4-6. Seguimiento de materia orgánica (%) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.....	80
Gráfico 4.4-7. Seguimiento de arsénico total (mg/kg) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.....	81
Gráfico 4.4-8 Seguimiento de cobre total (mg/kg) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.....	82
Gráfico 4.4-9. Seguimiento de hierro total (mg/kg) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.....	83
Gráfico 4.4-10. Seguimiento de hierro soluble (mg/L) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.....	84
Gráfico 4.4-11. Seguimiento de Manganeseo total (mg/kg) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.....	85
Gráfico 4.4-12. Seguimiento de Molibdeno total (mg/kg) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.....	86
Gráfico 4.4-13. Concentración de nitrógeno (%) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo. ....	91
Gráfico 4.4-14. Concentración de nitrógeno (%) de las especies muestreadas el año 2016 y especies del entorno (muestras 2012). ....	92
Gráfico 4.4-15. Porcentaje de fósforo (%) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo. ....	93
Gráfico 4.4-16. Concentración de Fósforo (%) de las especies muestreadas el año 2016 y especies del entorno (muestras 2012). ....	94
Gráfico 4.4-17. Porcentaje de potasio en tejido foliar (%) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo. ....	95
Gráfico 4.4-18. Concentración de Potasio (%) de las especies muestreadas el año 2016 y especies del entorno (muestras 2012). ....	96

Gráfico 4.4-19 . Concentración de arsénico en tejido foliar (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.....	97
Gráfico 4.4-20. Concentración de Arsénico (mg/kg) de las especies muestreadas el año 2016 y especies del entorno (muestras 2012). ....	98
Gráfico 4.4-21. Concentración de cadmio en tejido foliar en tejido foliar (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo. ....	99
Gráfico 4.4-22. Concentración de cromo en tejido foliar (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.....	100
Gráfico 4.4-23. Concentración de cobre en tejido foliar (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.....	101
Gráfico 4.4-24. Concentración de Cobre (mg/kg) de las especies muestreadas el año 2016 y especies del entorno (muestras 2012). ....	102
Gráfico 4.4-25. Concentración de manganeso en tejido foliar (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo. ....	103
Gráfico 4.4-26. Concentración de Manganeseo (mg/kg) de las especies muestreadas el año 2016 y especies del entorno (muestras 2012).....	104
Gráfico 4.4-27. Concentración de Mercurio en tejido foliar (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.....	105
Gráfico 4.4-28. Concentración de molibdeno en tejido foliar (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo. ....	106
Gráfico 4.4-29. Concentración de Molibdeno (mg/kg) de las especies muestreadas el año 2016 y especies del entorno (muestras 2012). ....	107
Gráfico 4.4-30. Concentración de plomo en tejido foliar (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.....	108
Gráfico 4.4-31. Concentración de zinc en tejido foliar (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.....	109
Gráfico 4.4-32. Concentración de Zinc (mg/kg) de las especies muestreadas el año 2016 y especies del entorno (muestras 2012). ....	110
Gráfico 4.4-33. Concentración de nitrógeno en tejido radical (%) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.....	115
Gráfico 4.4-34. Concentración de fósforo en tejido radical (%) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.....	117

Gráfico 4.4-35. Concentración de potasio en tejido radical (%) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.....	118
Gráfico 4.4-36. Concentración de arsénico en tejido radical (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.....	119
Gráfico 4.4-37. Concentración de cadmio en tejido radical (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.....	120
Gráfico 4.4-38. Concentración de cromo en tejido radical (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.....	121
Gráfico 4.4-39. Concentración de cobre en tejido radical (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.....	122
Gráfico 4.4-40. Concentración de manganeso en tejido radical (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.....	123
Gráfico 4.4-41. Concentraciones de Mercurio en tejido radical (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.....	124
Gráfico 4.4-42. Concentración de molibdeno en tejido radical (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.....	125
Gráfico 4.4-43. Concentración de plomo en tejido radical (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.....	126
Gráfico 4.4-44. Concentración de zinc en tejido radical (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.....	127
Gráfico 4.4-45. Relación de concentración de Arsénico (mg/kg) en raíz y hojas.....	129
Gráfico 4.4-46. Relación de concentración de Cadmio (mg/kg) en raíz y hojas.....	130
Gráfico 4.4-47. Relación de concentración de Cobre (mg/kg) en raíz y hojas.....	131
Gráfico 4.4-48. Relación de concentración de Cromo (mg/kg) en raíz y hojas.....	132
Gráfico 4.4-49. Relación de concentración de Manganeso (mg/kg) en raíz y hojas.....	133
Gráfico 4.4-50. Relación de concentración de Molibdeno (mg/kg) en raíz y hojas.....	134
Gráfico 4.4-51. Relación de concentración de Plomo (mg/kg) en raíz y hojas.....	135
Gráfico 4.4-52. Relación de concentración de Zinc (mg/kg) en raíz y hojas.....	136
Gráfico 5.1-1: Altura Promedio año 2016.....	138
Gráfico 5.1-2: Promedio diámetro de cuello temporada 2016.....	139

---

Gráfico 5.1-3: Promedio diámetro de copa: Cobertura período 2016. ....	140
Gráfico 5.1-4: Adaptación al medio. Variable Estado (vigor). ....	142

## 1 INTRODUCCIÓN

Arcadis está realizando la segunda etapa del estudio denominado “Etapa II Ensayo 30 ha Fitoestabilización”, que considera la continuación de un ensayo de Fitoestabilización iniciado el año 2011 en una superficie de 30 hectáreas del tranque de relaves Quillayes, ubicada en las instalaciones de MLP en la cuenca del río Cuncumén, circunscritas administrativamente en la comuna de Salamanca, Provincia del Choapa, Región de Coquimbo.

Este tranque de relaves Quillayes está ubicado aproximadamente a 190 km lineales al Norte de Santiago, en las coordenadas UTM N: 6.475.483; E: 348.030 (Datum WGS 84) y altitud de 1.331 msnm.

El presente informe denominado informe Etapa 6 y final, contiene un resumen de las actividades desarrolladas e incluye el sexto análisis de las muestras de suelo y tejido vegetal (foliar y raíces) obtenidas en otoño de 2016 junto con un análisis final de la etapa II del ensayo. El contenido del informe es el siguiente:

- Resumen de actividades realizadas.
- Resultados de sobrevivencia.
- Análisis de los resultados de la última medición dendrométrica y su comparación con los resultados anteriores.
- Resultados de laboratorio de las muestras de suelos, foliar y raíces correspondiente a la estación de otoño de 2016. Análisis y discusión de los resultados obtenidos durante todo el período del ensayo.
- Conclusiones y recomendaciones.

## 2 OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS

Los objetivos generales y específicos para el Informe Etapa 6 son los siguientes:

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Continuar la investigación iniciada el año 2011 asociada a los ensayos de fitoestabilización en 30 Ha de la cubeta del tranque de relaves Quillayes.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- evaluar el efecto del establecimiento de las especies vegetales sobre el sustrato de relave (estabilidad, fertilidad y disponibilidad de elementos químicos).
- Evaluación e identificación de las especies vegetales que presentan un establecimiento idóneo sobre el tranque Quillayes a nivel de sobrevivencia, desarrollo y niveles químicos en los tejidos vegetales, identificando especialmente aquellas especies que bioacumulan de mejor manera.
- Determinar si existen diferencias significativas en las enmiendas de compost y micorrizas y si mejoran de manera significativa el establecimiento de las plantas sobre la cubeta del tranque.

- 
- Dar continuidad al análisis de los indicadores químicos y biológicos para el seguimiento de la fitoestabilización del tranque Quillayes.

### 3 METODOLOGÍA

A continuación se presenta la metodología realizada para la elaboración del presente informe.

#### 3.1 SOBREVIVENCIA

Para establecer la sobrevivencia, el personal en terreno recorre los tratamientos por bloques, censando cada uno de los individuos. En el caso de encontrar un ejemplar muerto es marcado con una cinta distintiva de color rosado colocado sobre un tutor. Estos datos son registrados en una planilla diseñada para esta labor y posteriormente traspasado a una planilla Excel que se presenta más adelante.

En la actualidad se llevan dos registros de sobrevivencia, el primero de ellos corresponde al listado inicial del ensayo, es decir el porcentaje de individuos vivos en relación a las 25.680 plantadas en el año 2012. En el segundo caso, la sobrevivencia se realiza en función a las plantas replantadas en julio del 2015. Este conteo se realiza sobre un universo de 980 individuos.

#### 3.2 MEDICIONES DENDROMÉTRICAS

El monitoreo y seguimiento de las diferentes variables se realizó sobre una muestra conformada por 3.645 individuos de las diferentes especies que conforman el ensayo, lo que equivale a 243 bosquetes. Cada tratamientos está representado por 1.215 individuos, equivalente a 81 bosquetes. La cantidad de individuos seleccionados para las mediciones dendrométricas al inicio del ensayo por especie vegetal se presenta en la Tabla 3.2-1.

**Tabla 3.2-1 Cantidad de individuos por especie para mediciones dendrométricas al inicio del ensayo.**

Especie Vegetal	Nº Individuos	Porcentaje (%)
<i>A. saligna</i>	65	1,8%
Algarrobo	280	7,7%
Espino	317	8,7%
Huingán	978	26,8%
Litre	36	1,0%
Maitén	73	2,0%
Pimiento	289	7,9%
Quillay	352	9,7%
Quilo	36	1,0%
Romero	862	23,6%
Tralhuén	357	9,8%
<b>Total</b>	<b>3.645</b>	<b>100,0%</b>

Fuente: Arcadis, 2016

Las mediciones dendrométricas consideraron las siguientes variables:

### 3.2.1 Variables cuantitativas

Considera los siguientes parámetros: Altura, diámetro de tallo a la altura del piso (DAC) y diámetro de copa.

#### 3.2.1.1 *Altura*

La altura de las plantas se midió con huincha metálica retráctil desde la base de la planta, hasta la punta de la rama más alta. En el caso de ejemplares de hábito de crecimiento postrado o achaparrado o rastrero, como el caso del quilo, la altura se midió desde el suelo a la parte más alta de la masa aérea. La altura fue registrada en centímetros con aproximación a 0,5 cm.

#### 3.2.1.2 *Diámetro de tallo basal (DAC)*

El Diámetro de tallo o cuello (DAC) en las especies vegetales se midió con un pie de metro, en la base del tallo o en el tallo de mayor grosor.

#### 3.2.1.3 *Diámetro de copa*

Esta medición se realizó sobre la proyección en el suelo de la copa, mediante la utilización de una huincha metálica retráctil, graduada en centímetros (aproximación a 0,5 cm), con dos mediciones en direcciones ortogonales entre sí. El promedio de ambas es el dato que posteriormente se procesa.

### 3.2.2 Variables cualitativas

Considera los siguientes parámetros: Estado o condición general, arquitectura o forma y estado fenológico de los individuos.

#### 3.2.2.1 *Estado o condición general*

El estado general de la planta evaluada a través de “estado de vigor”, variable que se pondera o califica en una escala de 1 a 5, según se describe a continuación:

- *Planta muy mala (1)*: en muy mal estado, con tendencia a morir, prácticamente seca o buena parte del follaje seco o marchito, necrótica, clorótica, desfoliada.
- *Planta mala (2)*: en mal estado, planta con amarillez o marchitez parcial, con partes de copa seca, de follaje ralo, ápice muerto, escaso vigor aparente.
- *Planta regular (3)*: estable, vigor medio, follaje con algunas deficiencias, hojas secas ocasionales, pero tendencia favorable.
- *Planta buena (4)*: en general follaje de color verde sano o normal para la especie, con evidencias de estar en crecimiento normal. Se encuentra en buen estado aunque podría estar aún mejor, comparada con otros ejemplares de la especie en el ensayo.
- *Planta muy buena (5)*: sobresaliente por su vigor, color, follaje, forma, tamaño, abundancia de biomasa.



Como se mencionó anteriormente, las plantas muertas fueron identificadas y marcadas con una cinta de color rosado.

#### 3.2.2.2 *Arquitectura*

Esta variable está orientada a medir la forma en que se desarrolla la planta, independiente del número de tallos; está enfocada a verificar si la planta crece **erecta** (E) o **achaparrada** (A); si tiene amplia o escasa cobertura sobre la superficie, lo cual podría generar un efecto nodriza, de incidencia en el control de la erosión.

#### 3.2.2.3 *Estado fenológico*

Se evalúa el estado fenológico de las plantas, es decir, si éstas se encuentran en floración, fructificación, semillación o si se presenta regeneración natural en el entorno. La variable de estado fenológico, de acuerdo a la metodología realizada desde el inicio del ensayo, se ha otorgado un proceso de valorización similar al estado de vigor, donde a una planta que está en semillación tiene una valoración superior a una que está en floración y, una planta que está en floración tiene un estado reproductivo superior a una que está en estado vegetativo, y así sucesivamente.

### **3.2.3 Análisis Estadísticos de las Mediciones**

Para el análisis de los datos obtenidos en terreno, Arcadis contrato los servicios de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile para evaluar la base de datos obtenida en los años 2015 y 2016, tomando como base los datos iniciales 2012. La metodología utilizada es la siguiente:

#### **3.2.3.1 Objetivos**

Analizar una base de datos de 3 temporadas proveniente del estudio de fitoestabilización en 30 hectáreas en el tranque Quillayes, con la finalidad de determinar que enmiendas o acondicionadores de plantación y/o especies vegetales lograron un mejor desarrollo de las plantas.

Proporcionar métodos para estudiar datos multivariados provenientes de un ensayo de fitoestabilización.

#### **3.2.3.2 Materiales y Métodos**

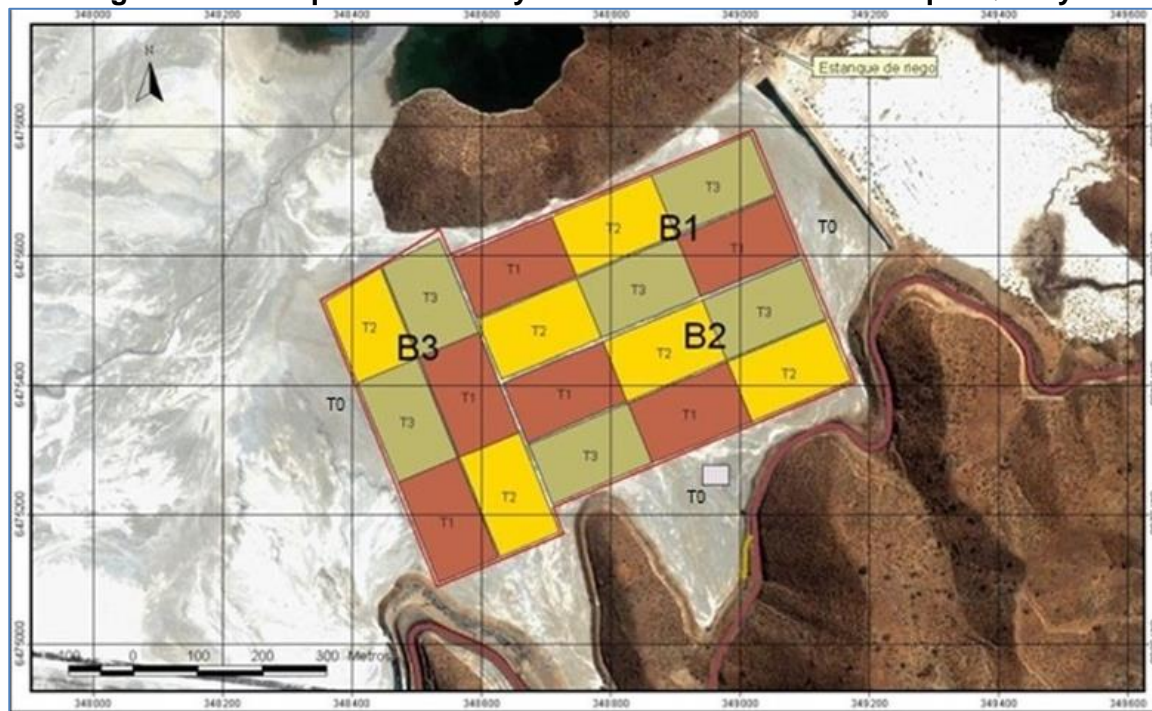
##### **Tratamiento y Diseño Experimental**

El diseño del ensayo contempló probar once especies arbóreas y arbustivas, mayoritariamente nativas, establecidas en tres tratamientos, que se detallan a continuación:

- T1: Plantación sin acondicionamiento o enmienda
- T2: Plantación con compost como enmienda orgánica en la casilla
- T3: Plantación con plantas inoculadas con micorrizas (*Glomus intraradices*)

En cada tratamiento hubo seis repeticiones, distribuidas en tres bloques de 10 hectáreas cada uno (dos repeticiones por bloque). Las once especies probadas por este ensayo fueron: huigán, quillay, litre, maitén, talhuén, Acacia saligna, espino, algarrobo, pimienta, quilo y romerillo. Todas las plantas fueron producidas por un vivero de la CDS ubicado en Cuncumén, a aproximadamente 10 km del sitio de destino.

**Figura 3.2-1. Esquema de ensayo de Fitoestabilización Tranque Quillayes.**



Fuente: SKM, 2012.

### 3.2.3.3 Análisis Estadísticos.

La base de datos analizada corresponde a mediciones realizadas entre el periodo 2015-2016 para las siguientes variables: Incremento altura de planta (cm), incremento diámetro de cuello o tronco en la base (DAC, en mm), diámetro de copa o cobertura (DC, en mm) y estado (categorías de 1-5). Tanto el incremento en la altura de planta como el incremento en el diámetro de cuello se construyeron corrigiendo los valores con las mediciones de altura y diámetro de cuello realizado el año 2012.

Las especies litre, maitén y quilo se plantaron en baja cantidad con baja sobrevivencia por lo que no fueron analizados en el presente informe. En el caso del Talhuén no se incorporó en el análisis ya que es una especie que tiene un proceso de receso considerable que puede interpretarse como ejemplares de bajo vigor y que además no cuenta con datos completos.

Para todas las variables en estudio se presenta estadística descriptiva y gráficos que fueron realizados a través del software estadístico Infostat (InfoStat, 2016).

El modelo propuesto para las variables incremento altura de planta, incremento de diámetro de cuello (DAC) y diámetro de copa (DC) correspondió a:

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + v_j + (\tau v)_{ij} + \rho_k + \beta_{l(k)} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:

$y_{ijkl}$  = Variable respuesta.

$\mu$  = Media general.  
 $\tau_i$  = Efecto tratamiento.  
 $\nu_j$  = Efecto especie.  
 $(\tau\nu)_{ij}$  = Interacción efecto tratamiento y efecto especie.  
 $\rho_k$  = Efecto temporada.  
 $\beta_{l(k)}$  = Efecto Bloque  
 $\varepsilon_{ijkl}$  = Error experimental.

Los subíndices corresponden a los distintos niveles que tiene cada uno de los factores analizados.

Los factores de interés analizados correspondieron al factor “Especie”, el cual considera la plantación de las siguientes especies (niveles): Acacia, algarrobo, espino, huíngán, pimienta, romero y quillay, y el factor “Tratamiento” el cual considera los siguientes niveles: sin aplicación de enmienda (T1), aplicación de compost como enmienda orgánica en la casilla (T2) e inoculación de micorrizas (T3).

Dado el desbalance que presenta el número de árboles dentro de los bloques y dentro del factor tratamiento, es que se procedió a promediar, para las tres primeras variables, los árboles plantados dentro de cada nivel del tratamiento y dentro de cada bloque. Considerando la existencia de tres bloques, tres fechas de evaluaciones (abril 2015, enero 2016 y junio 2016), siete especies y tres tratamientos, la data con la cual se realizaron los análisis estadísticos correspondieron a una base de datos de 189 observaciones. Para la variable “Estado”, al ser esta una variable categórica, la cual no es recomendable promediar, se consideraron todas las observaciones.

La utilización de bloques se justifica por la condición heterogénea de la superficie en la cual se realizó el ensayo, tanto en lo relacionado con el viento como lo relacionado con el material granulado depositado sobre el relave. Cada bloque abarca una superficie de 10 hectáreas y dentro de cada bloque se encuentran todos los niveles del factor Tratamiento y el factor Especie.

Los datos de las variables incremento altura de planta, incremento de diámetro de cuello (DAC) y diámetro de copa (DC) fueron analizados mediante la utilización de modelos lineales mixtos (MLM), esto con el fin de modelar estructuras de correlación que puedan presentarse en los datos. Los factores Especie y tratamiento, además de su interacción fueron considerados como efectos fijos y los factores temporada de evaluación y bloque como efectos aleatorios. La verificación de los supuestos de homogeneidad de varianza y normalidad de los errores se realizó mediante herramientas gráficas, esto con el fin de detectar y corregir posibles problemas heterocedásticos observados. Datos anómalos fueron detectados en la base de dato original y eliminados al momento de realizar los análisis respectivos.

Con el fin de realizar el ajuste de modelos mixtos, se utilizó la librería nlme mediante el lenguaje de programación R (R Core Team, 2016). En el caso de encontrarse diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, se procedió a realizar el test de comparación múltiple de Fisher ( $\alpha=0,05$ ).

La variable Estado, con sus cinco niveles (Se consideró para esta variable 5 estados, representados como Cat1, Cat2 Cat3, Cat4 y Cat5), se estudió mediante un Análisis de Correspondencia Múltiple, a través de la librería FactorMineR y la librería pyLr. La presentación de los resultados a través de un gráfico biplot se realizó a través de la librería ggplot2, todo ejecutado a través del lenguaje de programación R (R Core Team, 2016).

Complementariamente se realizó Análisis Multivariado de Componentes Principales, con el objetivo de explicar la variabilidad de las variables evaluadas y así poder relacionarlas con las diferentes especies y/o tratamientos. Estos resultados se presentan mediante un gráfico Biplot creados con el software estadístico InfoStat (InfoStat, 2016). El análisis de componentes principales (ACP) y los gráficos conocidos como Biplot son técnicas generalmente utilizadas para reducción de dimensión. Las técnicas de reducción de dimensión permiten examinar todos los datos en un espacio de menor dimensión que el espacio original de las variables. Con el ACP se construyen ejes artificiales (Componentes Principales), que permiten obtener gráficos de dispersión y visualizar observaciones y variables en un mismo espacio con propiedades óptimas para la interpretación (el prefijo “Bi” en el nombre Biplot refleja esta característica). Así es posible identificar asociaciones entre observaciones, entre variables y entre variables y observaciones.

### **Técnicas multivariadas utilizadas**

El Análisis de Componentes Principales se aplica generalmente cuando las variables son cuantitativas mientras que el Análisis de Correspondencia Múltiple se aplica para variables categorizadas. Ambas son técnicas que permiten reducir el problema de la multidimensionalidad y obtener estructuras de correlación o asociación entre las variables analizadas.

### **Análisis de Componentes Principales (ACP)**

El análisis de componentes principales es una técnica multivariada que tiene como objetivo reducir la dimensionalidad de la matriz de datos a través de combinaciones lineales construidas a partir de las variables originales. Estas combinaciones lineales deberán tener la propiedad de ser construidas en función de la máxima varianza de las variables originales. Sobre los datos a utilizar, no es necesario asumir nada en particular, principalmente con respecto a la distribución de los datos, excepto que el vector de medias (media aritmética calculada sobre cada variable) y la matriz de varianza y covarianza (matriz que tiene igual número de filas y columnas y que estas responden al número de variables que se analicen, donde la diagonal principal corresponde a las varianzas de cada variable y los elementos fuera de la diagonal principal corresponden a las covariables calculadas entre cada variable) existan (Hardle and Simar, 2007).

A partir de la construcción de estas nuevas variables sintéticas, conocidas como “componentes principales”, se pretende representar de forma adecuada la información original, con un número menor de “variables sintéticas”, asumiendo una mínima pérdida de información. Lo anterior es posible de lograr gracias a que variables que puedan estar altamente correlacionadas, tienden a ser explicadas mediante un número reducido de ellas. Según Peña (2002), la utilidad del Análisis de Componentes Principales radica en los siguientes aspectos:

- a) Permite la representación de las observaciones o unidades de análisis en un espacio de dimensión más pequeña.
- b) Considera la transformación de variables, que pueden tener un grado de correlación al momento de ser analizadas, en nuevas variables no correlacionadas (componentes principales o variables sintéticas), facilitando la interpretación de los datos.
- c) Las componentes principales conservan la variabilidad inicial, es decir, la suma de las varianzas de las componentes principales es igual a la suma de las varianzas de las variables originales.
- d) La proporción de la variabilidad que explica cada componente es el cociente entre la varianza de cada componente y la suma de las varianzas de todos los componentes. Como la construcción de cada componente se realiza en el sentido de máxima varianza, el aporte que tiene la primera componente siempre será mayor que el de la segunda y así sucesivamente.

El Análisis de Componentes Principales se realiza a través de una técnica de factorización de matrices conocida como descomposición por valor singular (SVD, por sus siglas en inglés), técnica que puede ser aplicada sobre la matriz de varianzas y covarianzas y/o matriz de correlación de los datos, lo cual permitirá obtener los coeficientes para la construcción de los componentes (auto-vectores) y la variabilidad que resumen cada uno de ellos (auto-valores).

### **Representación gráfica ACP**

Una de las ventajas que tiene el Análisis de Componentes Principales es la representación de las observaciones en un espacio que considera una dimensión menor al total de dimensiones si se hubiesen considerado todas las variables utilizadas. Esto se debe a que las primeras componentes son capaces de resumir un gran porcentaje de la variabilidad de los datos, por lo que si esto ocurre, las observaciones pueden ser presentadas, idealmente en dos dimensiones. Una forma de representar de manera simultánea las observaciones en un espacio reducido y construido mediante las componentes principales y las variables originales es el Gráfico Biplot con aplicación sobre componentes principales propuesto por Gabriel (1971) el cual permite analizar, en un mismo gráfico, tanto las variables como las observaciones, lo cual permite obtener información referente a las correlaciones que puedan presentarse entre variables, y la orientación que puedan tener las observaciones a las variables analizadas, facilitando aún más las interpretaciones de los datos. El prefijo “bi” en el nombre biplot refleja la característica de que tanto observaciones como variables, son representadas en el mismo gráfico.

En los Biplots, las observaciones son generalmente graficadas como puntos. Las variables son graficadas como vectores desde el origen.

Para interpretar un Biplot obtenido a partir de un ACP se recomienda seguir los siguientes pasos:



Concentrarse en las primeras componentes, que por construcción, siempre explicará el mayor porcentaje de variabilidad total.

1. Analizar las proyecciones perpendiculares a la CP1 de los puntos que representan las observaciones. Identificar los de mayor inercia, es decir los puntos que se encuentran a mayor distancia del cero, ya sea que se alejan hacia la derecha o hacia la izquierda. Interpretar “similitudes/disimilitudes” entre casos en función de las distancias entre proyecciones sobre la CP1.
2. Analizar las proyecciones de los puntos que representan las variables sobre la CP1. Identificar las variables de mayor inercia. Interpretar “correlaciones” entre variables según los ángulos de los vectores que los representan. Ángulos agudos indican correlaciones positivas, ángulos obtusos corresponden a correlaciones negativas y ángulos rectos indican que no hay correlación entre las variables. Nota: La longitud de los vectores correspondientes a las variables no son de interés cuando los datos han sido previamente estandarizados. Si no se estandarizan los datos, las longitudes de los vectores son proporcionales a las varianzas de las variables.
3. Interpretar correlaciones entre observaciones y variables en función de la orientación, pero no de la cercanía entre puntos filas y columnas, es decir las variables orientadas hacia la derecha tendrán altos valores en las observaciones orientados en la misma dirección y las variables orientadas hacia la izquierda tendrán altos valores en las observaciones orientadas hacia la izquierda. La distancia entre símbolos representando observaciones y símbolos representando variables no tiene interpretación.

Concentrarse en la CP2 y realizar las interpretaciones siguiendo un procedimiento análogo al realizado para la CP1 pero teniendo en cuenta que las variables en esta dimensión son de menor importancia que los realizados sobre la CP1 según indican los porcentajes de variabilidad total explicados por cada CP.

### **Análisis de Correspondencia Simple-Múltiple (ACS-ACM)**

El Análisis de Correspondencia es considerada una técnica descriptiva para la presentación de tablas de contingencia provenientes de variables categorizadas, siendo el equivalente del Análisis de Componentes Principales proveniente de variables cuantitativas (Peña, 2002). Las tablas de contingencia son tablas donde se resume la aparición de dos (análisis de correspondencia simple) o más (análisis de correspondencia múltiple) variables del tipo categórica o cualitativa. Un ejemplo sería una tabla de contingencia 2x2 la cual podría estar formada por n observaciones a las cuales se les midieron 2 variables, con dos niveles cada una. Cada celda de la tabla reportará la frecuencia en la cual cada combinación de variables aparece en los datos observados. El Análisis de Correspondencia puede ser definido como una técnica multivariada que permite reducir la dimensionalidad de estas tablas a través de factores que nos ayudarán a concentrarnos en las variables más importantes. La técnica de

reducción es bastante similar a la técnica de análisis de componentes principales descrita anteriormente, pero dadas las diferencias en el uso de variables categóricas, se procede a descomponer una medida de dependencia (conocido como el estadístico  $\chi^2$ ) entre las variables, en vez de una medida de varianza (Härdle and Hlávka, 2007). Al trabajar con tablas multidimensionales, en vez de considerar trabajar con tablas de frecuencia se trabajará directamente con las tablas “Burt”, las cuales tienen todos los niveles de clasificaciones cruzadas de las variables originales.

### **Representación gráfica ACM**

Al igual que en el Análisis de Componentes Principales, los resultados de un Análisis de Correspondencia Múltiple puede ser representado mediante un gráfico Biplot, graficando en éste los puntos filas y columnas en un mismo espacio. Al igual que en los gráficos Biplot de Componentes Principales, las distancias no tienen interpretación válida, por lo que las interpretaciones se deben enfocar en la dirección en la cual aparezcan los puntos filas y columnas. Puntos que caen en la misma dirección están asociados de forma positiva, mientras que si estos se encuentran en direcciones opuestas se encuentran asociados pero de forma negativa.

## **3.3 MUESTREO DE SUELOS, FOLIAR Y FRUTOS**

Durante mayo de 2016 el encargado de terreno Alvaro Mondaca y el personal de CDS procedieron a realizar el muestreo final de suelos, foliar y de raíces. Esta información se adjunta a los muestreos realizados en este ensayo.

La metodología utilizada corresponde a lo solicitado por MLP en los términos de referencias (TDR). Esto con la finalidad de mantener una continuidad en el tiempo y poder comparar los resultados con los de años anteriores. A continuación se presenta un resumen de la metodología utilizada.

### **3.3.1 Muestreo de sustrato**

Para el análisis de sustrato se considera un total de 10 muestras compuestas. Cada tratamiento (T1, T2 y T3) tuvo una muestra por cada bloque (B1, B2 y B3). Adicionalmente, se genera una contramuestra, que en el caso de esta última muestra se realizó para el tratamiento T3 en el Bloque B3 con la finalidad de cumplir con el Plan de Aseguramiento de la Calidad definido por ARCADIS. (Ver Figura 3.2-1).

Cada muestra, se generó a partir de 8 sub-muestras, 4 por cada repetición (R1 y R2) dentro de cada Bloque. De este modo, el total de sub-muestras extraídas para el análisis de sustrato de relave totaliza 72 (8 submuestras \* 3 tratamientos \* 3 bloques). La cantidad de sustrato extraída para cada muestra es de aproximadamente 1,5 kg. En el caso de la contramuestra, la muestra obtenida para T3 en B3 fue dividida en dos.



**Tabla 3.3-1. Descripción de muestreos realizados en el sustrato de relaves.**

Tratamiento	N° de muestras	N° de contramuestras	Total
T1	3	0	3
T2	3	0	3
T3	3	1	4
<b>Total de muestras de relaves del estudio (verano 2016)</b>			<b>10</b>

Fuente: Arcadis, 2016

Cada sub-muestra es extraída a partir de una calicata adyacente a la casilla de plantación. Esta representa un perfil de relaves de 50 cm (medidos desde el término de la capa de material granular). Durante el muestreo, se toma material del perfil completo para luego homogenizarlo. (Ver Fotografía 3.3-1 y Fotografía 3.3-2).

Cada muestra es envasada en bolsas *Ziploc*, rotulada (n° de tratamiento, n° de bloque y fecha) y guardada en *coolers* para posteriormente ser trasladadas al laboratorio *Agrolab*, el cual realizó las mediciones en la etapa anterior de este ensayo.

En la Tabla 3.3-2 se presenta el detalle de los análisis solicitados para las 10 muestras de sustrato correspondiente a otoño de 2016.

**Tabla 3.3-2. Análisis muestra de sustrato, otoño 2016.**

Código	Descripción
4012	pH-C. Eléctrica - Materia Orgánica - N-P-K disponibles
4312	Micronutrientes (Fe-Mn-Zn-Cu) - Boro(B) disponibles
4364	Azufre (S) extractable
4402	Nitrógeno (N) - Fósforo (P) - Potasio (K) totales
4404	Calcio (Ca) - Magnesio (Mg) totales
4414	Arsénico (As) - Cadmio (Cd) - Cromo (Cr) - Cobre (Cu) - Hierro (Fe) - Manganeso (Mn) - Mercurio (Hg)
4438	Azufre (S) total
4454	Boro (B) total
4524	Salinidad: pHe - C. Eléctrica e - RAS - PSI (calculada) - % Saturación (ret. agua en pasta)
4590	Micronutrientes (Fe-Mn-Zn-Cu) solubles
4594	Arsénico(As)-Cadmio(Cd)-Cromo(Cr)-Mercurio(Hg)-Molibdeno(Mo)-Niquel(Ni)-Plomo(Pb)-Selenio(Se)solubles

s/c: Sin código

Fuente: Agrolab, 2015

**Fotografía 3.3-1 Excavación para muestreo del sustrato, mayo 2016.**



**Fotografía 3.3-2 Relleno de bolsa ziploc con muestra compuesta, mayo 2016.**



Como referencia para el análisis de las concentraciones de metales en el sustrato se utilizan valores presentados por Serrato et al. (2009), Acevedo, 2005 y Kabata-Pendias, 2011. (Ver Tabla 3.3-3 a Tabla 3.3-5).

**Tabla 3.3-3. Contaminación por metales en suelos agrícolas (mg/kg).**

País	Cadmio	Cromo	Cobre	Níquel	Plomo	Zinc
Austria	5	100	100	100	100	300
Canadá	8	75	100	100	200	400
Polonia	3	100	100	100	100	300
Japón	-	-	125	100	400	250
G. Bretaña	3	50	100	50	100	300
Alemania	5	200	200	200	1000	600
Holanda*	20	800	500	500	600	3000
España	3	150	210	112	300	450
Andalucía	3-7	250-400	150-300	80-200	250-350	300-600
P. Vasco	18	-	250	280	330	840

\*niveles de necesidad urgente de intervención.

Fuente: Adaptado de Serrato *et al.* (2009)

**Tabla 3.3-4. Directivas de Kelly para la clasificación de suelos contaminados (Revisión Acevedo)**

Elemento	Valores típicos suelos no contaminados (mg/kg)	Contaminación Ligera (mg/kg)	Contaminación (mg/kg)	Contaminación Alta (mg/kg)	Contaminación inusualmente alta (mg/kg)
Arsénico	0 - 30	30 - 50	50 - 100	100 - 500	> 500
Cadmio	0 - 1	1 - 3	3 - 10	10 - 50	> 50
Cromo	0 - 100	100 - 200	200 - 500	500 - 2500	> 2500
Cobre (disp.)	0 - 100	100 - 200	200 - 500	500 - 2500	> 2500
Plomo	0 - 500	500 - 1000	1000 - 2000	2000 - 1%	> 1%
Plomo (disp.)	0 - 200	200 - 500	500 - 1000	1000 - 5000	> 5000
Manganeso	0 - 500	500 - 1000	1000 - 2000	2000 - 1%	> 1%
Níquel (disp.)	0 - 20	20 - 50	50 - 200	200 - 1000	> 1000
Zinc (disp.)	0 - 250	250 - 500	500 - 1000	1000 - 5000	> 5000

Fuente: Acevedo, 2005.

**Tabla 3.3-5. Concentraciones de elementos traza considerados deficientes, normales y tóxicos.**

Elemento	Deficiente (mg/kg)	Suficiente o Normal (mg/kg)	Excesivo o Tóxico (mg/kg)
As	-	1 - 1,7	5 - 20
Cd	-	0,05 - 0,2	5 - 30
Cr	-	0,1 - 0,5	5 - 30
Cu	2 - 5	5 - 30	20 - 100
Hg	-	-	1 - 3
Mn	10 - 30	30 - 300	400 - 1000
Mo	0,1 - 0,3	0,2 - 0,5	10 - 50
Pb	-	5 - 10	30 - 300
Zn	10 - 20	27 - 150	100 - 400

Fuente: Adaptado de Kabata-Pendias, 2011

### 3.3.2 Muestreo Foliar

Para el último muestreo realizado en mayo 2016 se selecciona las 7 especies vegetales con mayor follaje a la fecha del muestreo. Éstas correspondieron a: Acacia s, Algarrobo, Romero, Huingán, Espino, Pimiento y Quillay.

El muestreo se realiza manteniendo los bosquetes seleccionados en la etapa anterior. Para ello, se tomaron 4 a 5 hojas por árbol según los puntos cardinales a la altura de la cintura o del hombro. Los árboles fueron seleccionados en diagonales (en X) o en líneas. El muestreo se realizó con un mínimo 45 árboles conteniendo más de 180 hojas. (Ver Fotografía 3.3-3 y Fotografía 3.3-4). En total se obtienen 64 muestras, 63 equivalentes a 7 especies \* 3 Bloques \* 3 Tratamientos y 1 contra muestra

Las hojas recolectadas son guardadas en bolsas de papel (rotuladas con el número de bloque, tratamiento y especie), y dejadas en *coolers* con unidades refrigerantes con el fin de evitar exceso de humedad que puede generar la pudrición durante el transporte.

Es importante señalar que en el caso de los tratamientos T2 y T3 del Bloque 3, los bosquetes no presentan individuos de las especies Talhuén, Espino y *Acacia saligna*. Por este motivo, el muestreo en estas tres especies se completó solamente con una de las repeticiones de dicho Bloque.

**Fotografía 3.3-3: Muestreo foliar en Espino, mayo 2016.**



**Fotografía 3.3-4: Acumulación de hojas en bolsas rotuladas, mayo 2016.**



Para cumplir con el Plan de Aseguramiento de la Calidad definido por ARCADIS, en mayo se tomó una contramuestra para la especie Romero. Ésta fue extraída en el Bloque 1, Tratamiento T1. La recepción de las muestras por el laboratorio de la Universidad Católica fue realizada el día 25 mayo de 2016.

Como parámetros de comparación para evaluar los resultados obtenidos, se utilizan los rangos que se presentan en la Tabla 3.3-6.

**Tabla 3.3-6. Concentraciones aproximadas de elementos trazas en tejido de hojas (maduras), generalizadas para varias especies.**

Elemento	Suficiente o Normal (mg/kg)	Excesivo o Tóxico (mg/kg)	Tolerable en Cultivo (mg/kg)
Ag	-	5-10	-
As	-	5-20	0,2
B	5-30	50-200	100
Ba	-	500	-
Be	-	10-50	-
Cd	-	5-30	0,05-0,5
Co	-	15-50	5
Cr	-	5-30	2
Cu	2-5	20-100	5-20
F	-	50-500	-
Hg	-	1-3	0,2
Li	-	5-50	-
Mn	10-30	400-1000	300
Mo	0,1-0,3	10-50	-
Ni	-	10-100	1-10
Pb	-	30-300	0,5-10
Se	-	5-30	-
Sn	-	60	-
Sb	-	150	-
Ti	-	50-200	-
Tl	-	20	-
V	-	5-10	-
Zn	10-20	100-400	50-100
Zr	-	15	-

Fuente: Kabata-Pendias, 2011.

### 3.3.3 Muestreo de Raíces

Para el muestreo de raíces de la última muestra (mayo 2016), se seleccionaron 8 especies (*Acacia* s, Algarrobo, Romero, Huingán, Quillay, Espino, Pimiento y Tralhuén). La metodología consiste en excavar aproximadamente un cuarto de la superficie sobre la cual se encontraba cada individuo plantado (25% de casilla de plantación). Posterior a ello, se podan las raíces y se limpian cuidadosamente para extraer el exceso de sustrato en ellas. Luego, son depositadas en bolsas de papel previamente rotuladas con los nombres de cada especie, bloque y tratamiento. (Ver **Fotografía 3.3-5** y **Fotografía 3.3-6**)

En total se obtienen 73 muestras, 72 equivalentes a 8 especies \* 3 Bloques \* 3 Tratamientos y 1 contra muestra, en el caso de la última muestra, corresponde a la especie *Acacia* (Tratamiento 2, Bloque 2). A su vez, cada muestra está conformada por 4 submuestras (2 submuestras por repetición).



Las muestras rotuladas son almacenadas en cajas térmicas a baja temperatura y posteriormente refrigeradas, hasta ser despachadas al Laboratorio de servicios de la Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal de la Pontificia Universidad Católica de Chile. La recepción de las muestras por el laboratorio fue realizada el día 19 de mayo de 2016.

**Fotografía 3.3-5: Muestreo de raíces en Romero**



**Fotografía 3.3-6: Recolección de muestra de tejido radicular.**



**Fotografía 3.3-7: Deposición de raíces en bolsas de papel.**



### 3.4 ELECCIÓN DE ESPECIES

Una de los principales objetivos de este ensayo es poder determinar las especies más adecuadas para realizar la fitoestabilización de manera de replicar esta plantación en la cubeta del tranque Quillayes. Para la elección de especies se considera una primera etapa donde se busca establecer una plantación en el tranque de relave, considerando características particulares de las especies como son: alta capacidad de adaptación a la condición del relave, rápido crecimiento, desarrollo y cobertura. Luego, en una segunda etapa se debe tomar en cuenta los factores antes mencionados más las características de las especies para acumular los elementos minerales y metales pesados que se encuentran en el medio, privilegiando aquellas especies que fitoestabilizan; es decir, acumulan metales en la zona radicular o se logre estabilizar los compuestos metálicos en el suelo. Para este análisis también se han estudiado los informes de la primera etapa del ensayo y algunos estudios adicionales realizados en la zona del tranque El Chinche.

La condición base donde se desarrolla la plantación tiene las siguientes características:

- El tranque de relave se encuentra cubierto con sustrato obtenido de los cerros aledaños. La cubierta tiene un promedio de 30 cm de profundidad. Bajo ésta se encuentra el relave que cuenta con características de fertilidad deficientes y pH ácido que genera problemas de biodisponibilidad de elementos esenciales como N, P y K.

Por último, se debe considerar las semillas de herbáceas y arbustos que vienen en la capa de suelo que se dispone sobre el relave y que germinan aportando beneficios en la condición de suelo y en la diversidad de la zona

#### 3.4.1 Metodología para la elección de especies para la primera etapa

Como se señaló anteriormente, la primera etapa se relaciona con aquellas especies rusticas de rápido crecimiento y desarrollo que pueden establecerse en estas condiciones. Estas deben ser especies colonizadoras que aporten materia orgánica para formar suelo. También que sean nodrizas entregando mejores condiciones para el establecimiento de especies en una segunda etapa.

Para la elección de las especies en esta primera etapa, se ha utilizado la información del seguimiento desarrollado hasta el momento de las mediciones dendrométricas (Altura, Diámetro de cuello del Tallo (DAC), Cobertura (Diámetro de copa) y Estado (vigor)).

Es importante señalar que la primavera del 2015 estuvo marcada por eventos climáticos anormales, con dos nevazones durante el mes de octubre y bajas temperaturas, cuando la mayoría de las plantas están en periodo de crecimiento foliar y en etapa de floración. Esta situación generó un detrimento de la plantación donde se necrosó tejido foliar y floral; además de desgancho de ramas.

Se revisaron las tablas de datos (Ver anexo A) y se realizó una ponderación de acuerdo a rangos que se verán más adelante (ítem 4.3). Es importante señalar que no formaron parte de

este análisis el Litre, Quilo y Maitén debido a su bajo número en la plantación y a la baja tasa de sobrevivencia. La calificación final asigna un número para calificar:



Calificación:

Calificación	
Alto	(3)
Medio	(2)
Bajo	(1)

Parámetros:

#### 3.4.1.1 **Crecimiento** (altura, diámetro tronco basal (DAC)):

La altura de las plantas se mide con huincha metálica retráctil desde la base de la planta, hasta la punta de la rama más alta.

El DAC de las plantas se mide con un pie de metro, en la base del tallo o en el tallo de mayor grosor en el caso de los ejemplares multifustales. El DAC fue registrado en milímetros con aproximación a un decimal.

Los rangos establecidos para calificar son:

Calificación		Altura (cm)	DAC* (mm)
Alto	(3)	Mayor a 100	Mayor a 60
Medio	(2)	50 a 100	30 a 60
Bajo	(1)	Menor a 50	Menor a 30

(\*) Diámetro del tronco principal en la base.

#### 3.4.1.2 **Cobertura** (diámetro de copa)

Esta medición se realiza sobre la proyección en el suelo de la copa, mediante la utilización de una huincha metálica retráctil, con dos mediciones en direcciones perpendiculares entre sí. El promedio de ambas es el dato que posteriormente se procesa

Los rangos establecidos para calificar son:

Calificación		Cobertura (Diámetro de copa) (cm)
Alto	(3)	Mayor a 150
Medio	(2)	80 a 150
Bajo	(1)	Menor a 80

### 3.4.1.3 Variable Estado (vigor):

Las categorías establecidas para determinar vigor son:

(Cat 1) Planta muy mala (1): en muy mal estado, con tendencia a morir, prácticamente seca, buena parte del follaje seco o marchito, necrótica, clorótica, desfoliada.

(Cat 2) Planta mala (2): en mal estado, planta con amarillez o marchitez parcial, con partes de copa seca, de follaje ralo, ápice muerto, escaso vigor aparente.

(Cat 3) Planta regular (3): estable, vigor medio, follaje con algunas deficiencias, hojas secas ocasionales, pero tendencia favorable.

(Cat 4) Planta buena (4): en general follaje de color verde sano o normal para la especie, con evidencias de estar en crecimiento normal. Se encuentra en buen estado aunque podría estar aún mejor, comparada con otros ejemplares de la especie en el ensayo.

(Cat 5) Planta muy buena (5): sobresaliente por su vigor, color, follaje, forma, tamaño, abundancia de biomasa.

Los rangos establecidos para calificar son:

Calificación	Categoría
3	Cat 4 y Cat 5
2	Cat 3
1	Cat 2 y Cat 1

### 3.4.2 Metodología para la elección de especies para la segunda etapa

En una segunda etapa se deben seleccionar aquellas especies que cuenten con características de fitoestabilización y que no acumulen metales en la parte aérea de la planta (o en baja concentración), de manera de no generar efectos negativos al ambiente como en las cadenas tróficas. En este caso se tomaron los datos de las muestras de tejido vegetal (foliar y raíces) y sustrato que se cuenta hasta el momento.

Los índices para evaluar la concentración de metales en plantas son los siguientes.

**Índice de translocación (TI):** Puede ser interpretado como la capacidad de la planta para translocar elementos metálicos desde raíces a la parte aérea. Este índice ha sido utilizado por diversos autores en ensayos de fitorremediación (Ahmadpour et al., 2014; Alshaal et al., 2015; Egbuchunam et al., 2010).

TI se expresa:

$$Ti = \text{Concentración del metal en hojas (mg kg}^{-1}\text{)} / \text{Concentración del metal en raíces (mg kg}^{-1}\text{)}$$

Ti: Índice de traslocación o transporte a la parte aérea:

Se espera para que efectos de Fitoestabilización este índice en plantas sea menor a 1. Un alto Ti se relaciona con una mayor capacidad de las especies del ensayo en translocar los elementos metálicos desde sus raíces a la parte aérea.

**Factor de concentración en raíces (FBCR):** Corresponde a la relación entre la concentración del metal en raíces, respecto a la concentración inicial del metal en el relave (línea base) (Ahmadpour et al., 2014, Ali et al., 2012;).

FBCR se expresa:

$$\text{FBCR} = \text{Concentración del metal en raíces (mg kg}^{-1}\text{)} / \text{Concentración inicial del metal en el relave (mg kg}^{-1}\text{)}$$

FBCR: Factor de bioacumulación de metales en las raíces. Se espera que este factor sea mayor o aproximado a 1.

Los índices Ti y FBCR, fueron calculados en base a la información obtenida de la concentración de metales en los tejidos de las plantas durante las campañas de muestreo realizadas en otoño de 2015 y otoño de 2016, ya que en estas campañas se determinaron la concentración de metales en tejido radical.

La concentración de relave base es el siguiente (año 2012):

**Tabla 3.4-1. Concentración Total de elementos metálicos y no metálicos obtenidos en el relave (Línea base 2012)**

Elemento	Concentración mg/Kg
Arsénico	0,007
Cadmio	0,003
Cromo	9,1
Cobre	674,3
Mercurio	0,4
Manganeso	73,3
Molibdeno	13,5
Plomo	2,6
Zinc	13,7

Fuente: Adaptado de SKM, 2013.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 ACTIVIDADES REALIZADAS (REPORTES MENSUALES)

A partir de los informes mensuales generados por ARCADIS y entregados a MLP se elaboró un resumen que incluye todas las actividades realizadas en el ensayo para todo período que duró el proyecto.

La información presentada en cada uno de los reportes mensuales fue coordinada y elaborada por Alvaro Mondaca quien es el profesional de ARCADIS en terreno.

Las principales actividades desarrolladas durante este período correspondieron a:

- Administración
- Capacitación a personal CDS
- Mantenimiento de la Infraestructura
- Manejo Plantación
- Actividades en Vivero CDS<sup>1</sup>

#### 4.1.1 Administración

Dentro de las actividades administrativas desarrolladas a lo largo del proyecto se destacan las siguientes:

- Capacitaciones a CDS:

Se realizaron 6 capacitaciones a CDS, en las que participaron todos los trabajadores del ensayo de Fitoestabilización y funcionarios de CDS, Las capacitaciones fueron realizadas en la sala de reunión facilitada por CDS (Cuncumén). El registro de las capacitaciones realizadas a CDS durante todo el estudio se presenta en la Tabla 4.1-1.

**Tabla 4.1-1. Capacitaciones realizadas a CDS**

N°	Descripción de la capacitación	Mes
1	Uso de EPP y manejo de residuos post utilización de agroquímicos.	abr-15
2	Principales plagas y enfermedades presentes en cultivos de la zona y manejo fitosanitario.	jun-15
3	Técnicas de riego para cultivos de la zona, incluyendo formas en las que se pueda optar a subvención con INDAP, CNR, etc.	ago-15
4	Fertilización de cultivos en la zona.	oct-15
5	Manejo de especies forestales en vivero	dic-15
6	Resumen del proyecto	jun-16

Fuente: Arcadis 2016.

<sup>1</sup> Se adjunta informe de visita final a vivero CDS (Anexo B)

- Presentaciones Mesa Cierre Tranque Quillayes

Durante el periodo se realizan 2 presentaciones del estado actual del ensayo a la Mesa de Cierre Tranque Quillayes.

- El miércoles 22 de junio, el Gerente de Medio Ambiente de ARCADIS, Alexandra Belaúnde, junto al Jefe del Proyecto, Oscar Parada realizaron la presentación de los resultados del Proyecto a la comunidad (mesa de cierre tranque Quillayes).
- El 7 Septiembre 2016 se realiza la presentación final del proyecto a la comunidad.

- Entrega de Bonos a trabajadores de terreno

En el transcurso del contrato, MLP hizo entrega a través de Arcadis de 5 bonos a los trabajadores de terreno de Arcadis y CDS, los que posteriormente fueron sometidos a auditorías.

**Tabla 4.1-2 Listado de Bonos entregados (2015-2016).**

N°	Descripción del Bono
1	Bono 1° Cuota convenio de Desempeño
2	Bono 2° Cuota convenio de Desempeño
3	Bono 2° Cuota convenio de Desempeño
4	Bono Especial Buenas Relaciones Laborales 2015
5	Bono Especial Buenas Relaciones Laborales 2016

Fuente: Arcadis 2016.

- Entrega de informes mensuales a SERCOL

Como parte de la administración de contrato mensualmente se hizo entrega periódicamente a SERCOL de la siguiente documentación:

- Informe de novedades mensuales
- Certificado de Cumplimiento de Obligaciones Laborales
- Informe de dotación HH de terreno (enviado a la administración del contrato)
- Formulario E-200 a SERNAGEOMIN.

#### 4.1.2 Mantenimiento de la Infraestructura

Las principales actividades de mantención de la infraestructura desarrolladas en el periodo fueron:

- Compra contenedores de residuos de tipo domiciliarios
- Cambio de artículos del botiquín de emergencia.
- Recarga de extintores.
- Renovación de la bocina de emergencia.
- Mejoramiento del panel de emergencia y letrero de PEE
- Renovación de las herramientas en mal estado.
- Reparación de sombreaderos
- Mejoramiento de los letreros, cercos y condición general del ensayo.
- Instalación de un segundo baño químico para el personal de CDS.
- Reparación del equipo de iluminación solar
- Cubrimiento y construcción de un cerco perimetral en la fosa de drenaje construida frente a la caseta de control de riego del ensayo.
- Recolección de desechos dentro del área de ensayo.
- Reparación de las fosas de inspección de raíces.

Además durante todo el periodo se realizaron actividades de estandarización de herramientas marcándolas con el color del mes, además de jornadas de mensuales de Housekeeping

Algunos de los hechos más importantes que afectaron tanto a la infraestructura como a la plantación son los siguientes:

- Durante el mes de **mayo del 2015**, fue removido el cerco perimetral en un sector por la empresa encargada que realizaba trabajos en el sector movimiento de tierra en la denominada “Lengua N°2”, el que fue reparado para evitar el ingreso de lagomorfos a la zona del ensayo.
- En **Octubre 2015** se presentaron en la zona dos frentes de mal tiempo, dejando en la zona del ensayo una capa de nieve causando impacto sobre los ejemplares produciendo necrosis de brotes y tejido foliar (Durante la última semana del mes de octubre del 2015, se realiza la poda de ramas quebradas, confección de calicatas para observar el estado de humedad del suelo y se comienza a realizar la revisión y preparación del sistema de riego para recuperar las plantas y reactivar nuevos brotes.

**Fotografía 4.1-1. Nevazón zona del ensayo, Octubre 2015.**



- En **noviembre 2015** se detectó alta turbiedad en el agua que abastece el ensayo principalmente durante las mañanas. A raíz de esto se tomaron muestras de agua y se analizaron en el laboratorio químico de AHK, arrojando como resultado un alto contenido de Fe lo que concuerda con la coloración roja y olor a óxido que presenta el agua.

**Fotografía 4.1-2 Contaminación de agua de riego noviembre 2015.**



- Producto de las precipitaciones que se presentaron durante la primera semana de **junio de 2016**, se produjeron algunas grietas o pequeños socavones en el relleno que cubre la cubeta del tranque, especialmente en el sector del cerco perimetral, por lo que fue necesario marcar el perímetro en que se hundió el terreno y posteriormente rellenar los socavones con la finalidad de evitar el ingreso de lagomorfos al sector de plantación.



(Ver Fotografía 4.1-3)

**Fotografía 4.1-3 Demarcación de sector con socavones, junio 2016.**



- En **junio de 2016** a raíz de las precipitaciones se produjo una acumulación de agua en el Bloque 3 Sector 6 del ensayo. En el lugar se presentó, por algunos días una acumulación de agua superficial que abarcaba una superficie aproximada de 1 ha y una profundidad que fluctuaba entre 20 y 30 cm,. Se estima que el agua cubrió aproximadamente el 50% del sector 6 del Bloque 3 viéndose afectadas alrededor de 700 plantas las que estuvieron con una lámina de agua durante 1 semana.

**Fotografía 4.1-4 Acumulación de agua en el Bloque 3 Sector 6 del ensayo.**



### 4.1.3 Manejo Plantación

#### 4.1.3.1 Aplicación de fertilizantes

La Tabla 4.1-3 muestra un resumen de las mejoras mediante aplicación de fertilizante y compost aplicados en esta segunda etapa del estudio.

**Tabla 4.1-3 Aplicación de Fertilizantes en el periodo**

Fecha	Actividad
<b>mar-15</b>	Se realizó una mejora de sustrato en 2 bosquetes ubicados en el Bloque 3 que consistió en aplicación de compost y fertilización con NPK. Estos bosquetes no forman parte de los seguimientos. Esta medida se realizó debido al bajo crecimiento de las especies que se encuentran en este bloque.
<b>abr-15</b>	Se aplicó compost dispuesto en el ensayo sobre aquellos bosquetes con menor crecimiento en las zonas que se observan deprimidas.
<b>jun-15</b>	Se realizó el reparto de fertilizante NPK (Mezcla maicera 29, 14, 8), en las casillas de plantación donde se reemplazan las plantas muertas. El reparto del fertilizante fue dispuesto sobre el montículo que contiene la mezcla de sustratos de tierra vegetal, relave y compost, la dosis utilizada fue de 50 gr por planta.
<b>jul-15</b>	Se realizó el reparto de compost en cada una de las casillas destinadas para replante y reparto de fertilizante NPK 29-14-11. Durante el proceso de plantación, se mezclaron los componentes para proceder a llenar las casillas e instalar la planta que quedará de manera definitiva en el lugar.

Fuente: Arcadis 2016.

Durante el mes de abril-16 se aplicó compost en el ensayo sobre aquellos bosquetes con menor crecimiento en las zonas que se observan deprimidas.

En primera instancia se identificaron aquellos bosquetes que contienen plantas con poco vigor. Posteriormente se realizó la aplicación del compost en las 15 plantas que componen el bosque. Cada bosque fue identificado por medio de un tutor instalado al centro de 2 m de altura aproximada y con una placa metálica que contendrá escrita la palabra “Compost” y el número correspondiente al bosque. (Ver Fotografía 4.1-5). Esta identificación fue realizada con la finalidad de evitar que los bosquetes mejorados fuesen considerados en los otros análisis realizados en el ensayo y así incidir negativamente sobre la representatividad del ensayo y sus estadísticas.

Para el retiro y traslado del material se optó por humectar el compost a medida que se fue retirando, con ello se evitó levantamiento de polvo el cual podría afectar la salud de los trabajadores y la acumulación de éste en las plantas cercanas a los lugares de acopio (Ver Fotografía 4.1-6). Finalmente, la cantidad aplicada por planta fue de 14 litros, cantidad similar

a la aplicada al momento de la plantación original del ensayo

**Fotografía 4.1-5: Placa Identificación  
Bosquete Mejorado.**



**Fotografía 4.1-6: Humectación del  
compost antes del traslado.**



**Fotografía 4.1-7 : Aplicación de compost.**



#### 4.1.3.2 Sistema de Riego

- Durante los meses de enero a julio 2015 se efectuó el riego de 20 litros mensuales de agua a cada planta con una dosis de 10 litros cada 15 días en forma normal.
- En agosto 2015 se suspende el riego por las condiciones climáticas (precipitaciones) y se retoma con 10 litros por planta desde noviembre 2015 a enero 2016.
- A partir de la primera semana de febrero del 2016, se comienza con el riego de especies con 40 litros mensuales por planta, hasta marzo del 2016 retirando en forma parcial la cantidad de riego a partir de abril del 2016 hasta suspender el riego por el periodo invernal.

La Tabla 4.1-4 muestra un resumen de las principales actividades de mantención realizadas al sistema de riego en el periodo.

**Tabla 4.1-4 Actividades de mantenimiento del sistema de riego.**

Fecha	Actividad
<b>feb-15</b>	Se realizó la desconexión de los caudalímetros para su mantención que consiste en remover la presencia de algas que tapan los poros del filtro (filtro de malla), que disminuyen la eficiencia del riego. Se renovaron las conexiones de goma en donde se inserta el lineal a la sub matriz.
<b>mar-15</b>	Se realizó el reemplazo de la pieza que presentaba una filtración en el codo de 75 mm de PVC ubicada en la caseta de filtros, se instaló un soporte que controla las vibraciones producidas por la presión del agua y por ende disminuye la posibilidad de que el codo se suelte y se generen filtraciones de agua. Inspecciones a las matrices lineales y a los goteros y se realizan cambios si presentan deterioros. Cambios de matrices lineales y goteros que presentan deterioros.
<b>may-15</b>	Reparación las desconexiones producidas por la contracción y dilatación de las tuberías y submatrices. Cambios de matrices lineales y goteros que presentan deterioros.
<b>jul-15</b>	Reparación de filtración en una de las válvulas de regulación dispuesta en el cabezal de riego.
<b>ago-15</b>	Reemplazo de piezas de PVC dañadas por la radiación solar y las bajas temperaturas de invierno.
<b>oct-15</b>	Fijación de lineales por medio de estacas instaladas al extremo final de cada uno, para corregir postura de los goteros.
<b>abr-16</b>	Vaciado de las matrices y estanques por paralización del riego.

Fuente: Arcadis 2016.



Durante el mes abril se continuó con el riego de (40 l/planta/mes) aplicando 10 l/planta en forma semanal. A final de este mes se detiene el riego debido a precipitaciones y la disminución en las temperaturas. Para ello, se vacían las matrices y estanques con la finalidad de dejar el sistema limpio y sin agua en su interior para así evitar que las bajas temperaturas de invierno puedan congelarla, lo que podría ocasionar daños en las piezas que componen el sistema de riego. Ver Fotografía 4.1-8 y Fotografía 4.1-9).

**Fotografía 4.1-8: Limpieza de matrices, abril 2016.**



**Fotografía 4.1-9: Extracción de agua de matrices, abril 2016.**



#### 4.1.3.3 Reposición de Individuos

En el mes de junio del año 2015 se inició la reposición de un total de 980 ejemplares, número arrojado según censo de plantas muertas realizado antes de comenzar con la hoyadura y reparto de enmienda orgánica, esta actividad finalizó en julio del mismo año. Posteriormente, no se realizaron reposiciones de individuos.

#### 4.1.3.4 Infraestructura, materiales y registros

Cada mes, se comienza realizando la inspección mensual de Housekeeping en conjunto con el cambio de cinta para las herramientas operativas con el color del mes respectivo (Ejemplo= abril: azul; mayo: verde y junio: blanco). En el caso de las herramientas que se encuentran en mal estado son demarcadas con cinta de color rojo lo que imposibilita su uso. (Ver ejemplos Fotografía 4.1-10 y Fotografía 4.1-11).

**Fotografía 4.1-10: Estandarización de herramientas, mayo 2016.**



**Fotografía 4.1-11: Estandarización de herramientas manuales, junio 2016.**



Durante el mes de mayo-16 se realizó la recolección de desechos dentro del área de ensayo. Se recogen todos aquellos sacos en mal estado que han quedado producto de la aplicación de compost. Una vez terminada la recolección, los desechos son conducidos y dispuestos en el vertedero interno de MLP que administra la empresa Disal.

Posterior a ello, se realizó la reparación de las fosas de inspección de raíces. Adicionalmente se instalan pequeños cúmulos de piedras y restos vegetales para el resguardo de aquellos roedores silvestres que se alojaban en dicho lugar. (Ver Fotografía 4.1-12 y Fotografía 4.1-13)

**Fotografía 4.1-12: Reparación de fosas de inspección, mayo 2016.**



**Fotografía 4.1-13: Confección de refugios para roedores silvestres, mayo 2016.**



Como se señaló anteriormente, producto de las precipitaciones que se presentaron durante la primera semana de junio-16, se produjeron algunas grietas o pequeños socavones en el relleno que cubre la cubeta del tranque, especialmente en el sector del cerco perimetral, por lo que fue necesario marcar el perímetro en que se hundió el terreno y posteriormente rellenar los socavones con la finalidad de evitar el ingreso de lagomorfos al sector de plantación. (Ver Fotografía 4.1-14 y Fotografía 4.1-15)



**Fotografía 4.1-14: Demarcación de sector con socavones, junio 2016.**



**Fotografía 4.1-15: Presencia de socavones en el sector del ensayo, junio 2016.**



Otro problema suscitado en junio a raíz de las precipitaciones fue la acumulación de agua en el Bloque 3 Sector 6 de ensayo. En el lugar se presentó por algunos días, acumulación de agua superficial que abarcaba una superficie aproximada de 1 ha y una profundidad que fluctuaba entre 20 y 30 cm, tal como se muestra en la Fotografía 4.1-16 y Fotografía 4.1-17.

Esta información fue enviada mediante correo electrónico a la administración del contrato para que tomará los resguardos pertinentes.

En el sector de la caseta de filtros también se produjo acumulación de agua, la cual generó otra pequeña laguna, de menor tamaño en relación a la descrita anteriormente en el sector sur, pero que involucró aproximadamente 50 plantas.

**Fotografía 4.1-16: Acumulación de agua superficial, junio 2016.**



**Fotografía 4.1-17: Acumulación de agua superficial, junio 2016.**





## 4.2 SOBREVIVENCIA Y DESARROLLO

### 4.2.1 Seguimiento sobrevivencia y desarrollo

Durante el período de marzo a junio se continuó con el catastro de individuos. En la Tabla 4.2-1 y Tabla 4.2-3, se presenta el detalle del catastro realizado, señalando el número de individuos muertos y porcentaje de sobrevivencia por tratamientos y también por especies vegetales. Cabe señalar que las especies identificadas como secas o muertas fueron marcadas, similar a las mediciones anteriores, con una cinta de color distintivo. Es importante destacar que la especie Talhuén presenta un estado de receso mayor al resto de las especies, lo que puede inducir al error en el personal que realiza esta labor, por lo cual se revisó la turgencia del tallo para comprobar así el estado real de la planta.

**Tabla 4.2-1. Sobrevivencia de individuos por tratamientos, junio 2016.**

Bl.	Tr.	Rp.	N° individuos plantados	N° individuos muertos junio-2016	N° individuos vivos junio-2016	% Sobrevivencia junio-2016
1	1	R <sub>1</sub>	1.440	42	1.398	97,1%
1	1	R <sub>2</sub>	1.440	55	1.385	96,2%
1	2	R <sub>1</sub>	1.440	114	1.326	92,1%
1	2	R <sub>2</sub>	1.440	78	1.362	94,6%
1	3	R <sub>1</sub>	1.455	61	1.394	95,8%
1	3	R <sub>2</sub>	1.440	126	1.314	91,3%
2	1	R <sub>1</sub>	1.440	105	1.335	92,7%
2	1	R <sub>2</sub>	1.440	119	1.321	91,7%
2	2	R <sub>1</sub>	1.440	52	1.388	96,4%
2	2	R <sub>2</sub>	1.440	117	1.323	91,9%
2	3	R <sub>1</sub>	1.440	58	1.382	96,0%
2	3	R <sub>2</sub>	1.440	85	1.355	94,1%
3	1	R <sub>1</sub>	1.440	83	1.357	94,2%
3	1	R <sub>2</sub>	1.440	82	1.358	94,3%
3	2	R <sub>1</sub>	1.440	130	1.310	91,0%
3	2	R <sub>2</sub>	1.245	34	1.211	97,3%
3	3	R <sub>1</sub>	1.440	59	1.381	95,9%
3	3	R <sub>2</sub>	1.380	72	1.308	94,8%
<b>Total</b>			<b>25.680</b>	<b>1.472</b>	<b>24.208</b>	

Bl= bloque; Tr=tratamiento; Rp=repeticón  
Fuente: Arcadis 2016

De acuerdo con la tabla anterior, tenemos que a junio de 2016, la pérdida total de individuos fue de 1.472 (5,7%). Esto corresponde a la suma de los **980** individuos muertos a junio del 2015 los cuales fueron reemplazados y, **492** catastrados entre febrero y junio de 2016. A nivel de tratamientos, la mayor pérdida de individuos se ha producido en el tratamiento T2 con 525 individuos muertos, seguido de T3 con 461 y T1 con 486.

En el caso de los individuos replantados en julio del 2015 para las especies *Acacia sp*, Quillay, Pimiento, Huingán y Algarrobo, el catastro final realizado en el mes de junio de 2016 arrojó un

total de 15 individuos muertos. El detalle por especies se presenta en la siguiente tabla (Ver **Tabla 4.2-2**)

**Tabla 4.2-2. Supervivencia de individuos replantados, junio 2016**

<b>Especie Vegetal</b>	<b>N° individuos plantados julio-15</b>	<b>N° Individuos Muertos junio-16</b>	<b>N° individuos vivos junio-2016</b>
Espino	250	1	249
Quillay	150	0	150
Pimiento	90	3	87
Huingán	200	0	200
Algarrobo	290	11	279
<b>Total</b>	<b>980</b>	<b>15</b>	<b>965</b>

Fuente: Arcadis 2016

**Tabla 4.2-3. Supervivencia de individuos por tratamientos y especie vegetal, Junio 2016.**

Bloque	Tratamiento	Repetición	Especie Vegetal											TOTAL
			A. saligna	Algarrobo	Espino	Huingán	Litre	Maitén	Pimiento	Quillay	Quilo	Romero	Talhuén	
Nº Individuos a marzo-2016			544	2.517	1.879	7.403	36	306	1.852	2.090	36	6.182	2.835	25.680
1	1	R <sub>1</sub>	2	2	3	6	2	6	0	4	0	1	16	42
1	1	R <sub>2</sub>	3	3	0	1	2	11	0	3	0	0	32	55
1	2	R <sub>1</sub>	1	4	6	9	2	16	1	12	0	16	47	114
1	2	R <sub>2</sub>	1	0	3	1	2	17	0	4	1	1	48	78
1	3	R <sub>1</sub>	4	8	7	2	2	10	0	3	1	9	15	61
1	3	R <sub>2</sub>	2	3	5	22	2	16	0	17	0	9	50	126
2	1	R <sub>1</sub>	3	0	18	14	2	9	1	12	2	1	43	105
2	1	R <sub>2</sub>	3	1	15	1	2	16	0	5	0	1	75	119
2	2	R <sub>1</sub>	1	1	2	3	2	11	0	5	0	1	26	52
2	2	R <sub>2</sub>	3	1	14	4	1	11	1	4	1	2	75	117
2	3	R <sub>1</sub>	3	1	3	2	2	6	1	6	0	2	32	58
2	3	R <sub>2</sub>	1	2	5	7	2	11	2	13	1	5	36	85
3	1	R <sub>1</sub>	5	3	11	10	2	12	3	6	0	0	31	83
3	1	R <sub>2</sub>	4	2	1	10	2	14	1	8	1	2	37	82
3	2	R <sub>1</sub>	6	1	9	1	2	14	0	5	0	1	91	130
3	2	R <sub>2</sub>	0	2	0	16	2	6	2	6	0	0	0	34
3	3	R <sub>1</sub>	5	3	7	3	2	9	0	6	1	2	21	59
3	3	R <sub>2</sub>	0	12	0	23	2	11	3	19	1	1	0	72
Total individuos Muertos jun-16			47	49	109	135	35	206	15	138	9	54	675	1.472
% Supervivencia			91,4	98,1	94,2	98,2	2,8	32,7	99,2	93,4	75,0	99,1	76,2	-
Nº Individuos Vivos a jun-16			497	2468	1770	7268	1	100	1837	1952	27	6128	2160	24.208

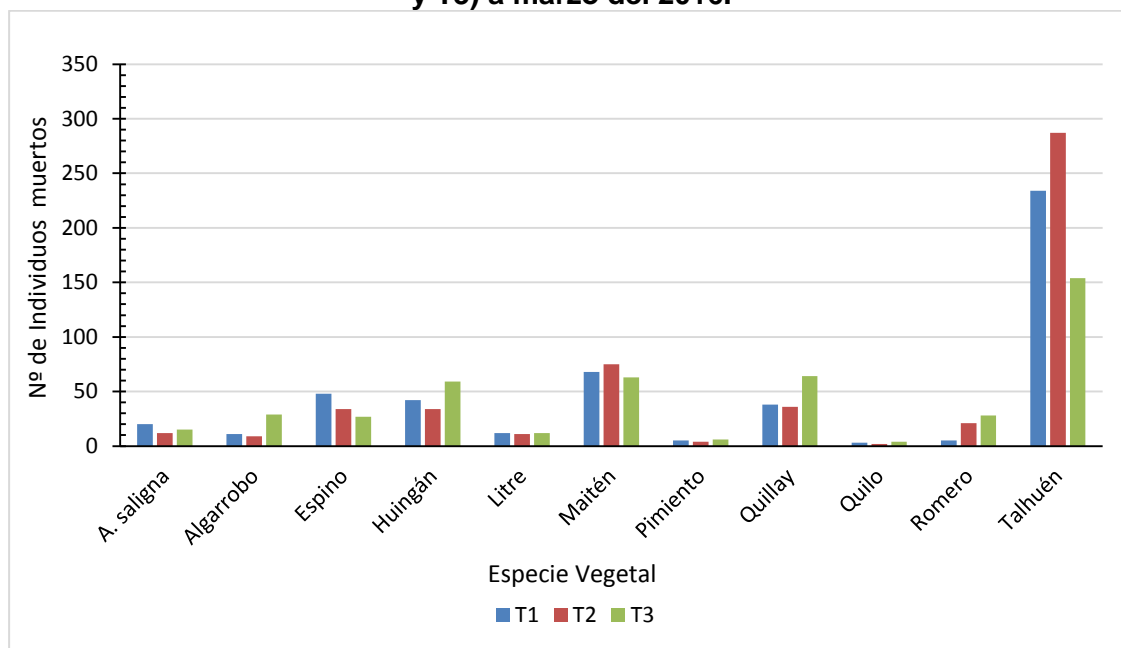
Fuente: Arcadis 2016

En relación a la supervivencia de las especies vegetales, la mayor parte de ellas se encuentra cercana o sobre el 90%. La excepción corresponde a Litre, Maitén, Quilo y Talhuén, las cuales presentaron una supervivencia de 2,8%, 32,7%, 75,0 y 76,2% respectivamente. Sin embargo, las 3 especies con menor porcentaje coinciden con ser aquellas con menor número de individuos plantados a inicio del ensayo por una baja disponibilidad de ellos en el vivero. En el caso del Talhuén, está es una especie que tiene un receso prolongado y que puede llevar a error por parte del evaluador en terreno. Por lo tanto es importante realizar un seguimiento a estos datos de campo.

Por otro lado, las especies que han tenido un mayor porcentaje de supervivencia corresponden a Pimiento, Romero, Huingán Algarrobo y con 99,2%; 99,1%; 98,2% y 98,1% respectivamente. En el

Gráfico 4.2-1 se presenta la mortandad de especies vegetales por tratamientos del ensayo.

**Gráfico 4.2-1 Mortandad de individuos por especie vegetal según tratamientos (T1, T2 y T3) a marzo del 2016.**



Fuente: Arcadis 2016

Según el gráfico anterior, las especies con mayor mortandad de individuos a marzo de 2016 no presentan una tendencia en relación al tratamiento.

### 4.3 MEDICIONES DENDROMÉTRICAS

A continuación se presenta el resultado de las mediciones dendrométricas. Es importante mencionar que de las especies presentes en el ensayo, las más afectadas a la fecha corresponden a: Litre, Maitén y Quilo, las cuales presentan un número bajo de individuos lo que afecta directamente en los resultados y representatividad que se puedan obtener. Por este motivo no fueron consideradas para este análisis. (En anexo C se adjunta detalle estudio solicitado a la Universidad de Chile)

#### 4.3.1 Altura

En los Tabla 4.3-1 y Tabla 4.3-2 se presentan los promedios de las alturas de las plantas por especie para los periodos mayo 2012 y junio 2016 respectivamente. Se observa una alta variabilidad entre las alturas iniciales de las plantas por especie, razón por la cual la variable altura de planta analizada en las temporadas abril 2015, enero-febrero 2016 y junio 2016 fue tratada como incremento de altura de plantas (altura del periodo menos altura inicial a mayo 2012). Dentro de cada especie se observa también una alta dispersión de los datos como lo pone en evidencia los altos coeficientes de variación encontrados.

**Tabla 4.3-1. Número de plantas (n), altura promedio de plantas (cm) y coeficiente de variación (CV) por especie en el período Mayo 2012.**

Especie	n	Altura planta (cm)	CV
Acacia	65	95,4	24
Algarrobo	280	54,4	30
Espino	317	63,0	30
Huingán	978	54,6	29
Litre	36	22,5	32
Maitén	73	50,5	33
Pimiento	289	34,4	24
Quillay	352	39,0	30
Quilo	36	54,3	37
Romero	862	70,6	30
Talhuén	357	62,9	23

Fuente: U. de Chile, 2016

**Tabla 4.3-2. Número de plantas (n), altura promedio de plantas (cm) y coeficiente de variación (CV) por especie al período junio 2016.**

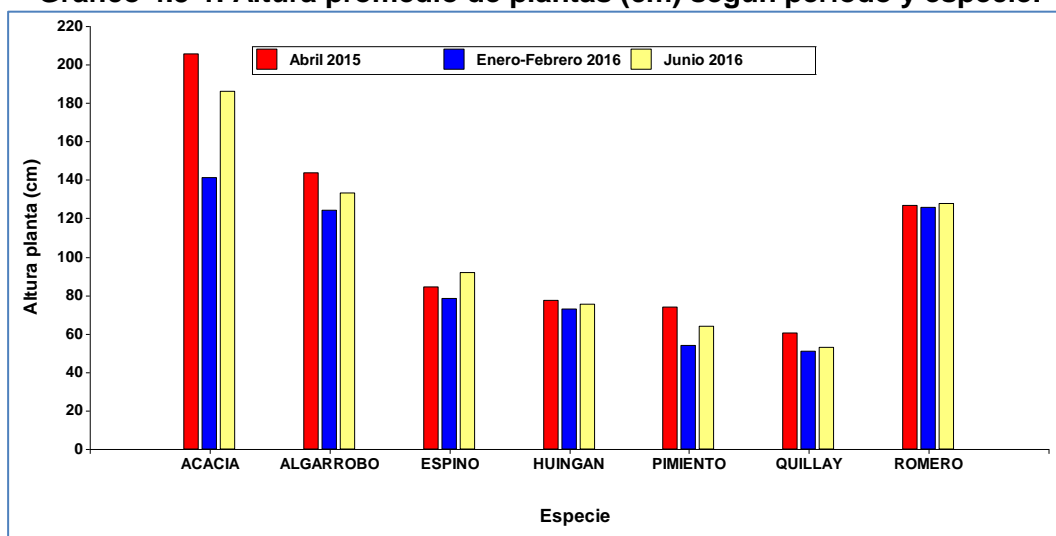
Especie	n	Altura planta (cm)	CV
Acacia	60	191,5	41
Algarrobo	277	133,4	30
Espino	305	90,4	39
Huingán	954	75,6	37
Pimiento	287	64,2	56

Especie	n	Altura planta (cm)	CV
Quillay	338	53,0	48
Romero	849	128,0	23

Fuente: U. de Chile, 2016.

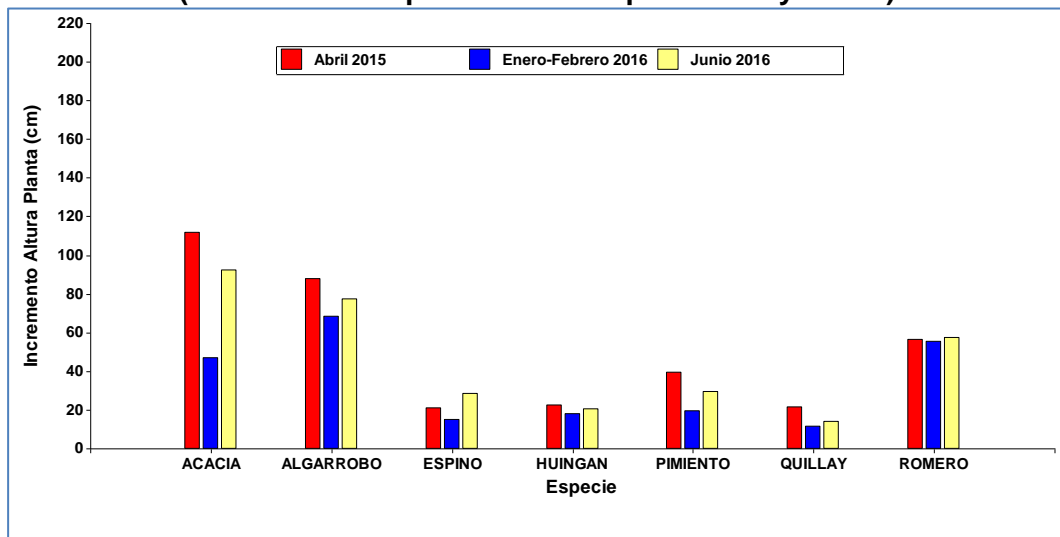
En el Gráfico 4.3-1, se presentan los promedios de Altura de plantas por especie y por período independiente de los tratamientos aplicados. En el Gráfico 4.3-2, se presentan los promedios de Incremento de altura de plantas por especie y por período independiente de los tratamientos aplicados. Tanto para la variable altura de planta, como para la variable incremento de altura de plantas, se observa una tendencia a que las especies Acacia, Romero y Algarrobo fueron las que lograron un mayor desarrollo con respecto a las demás especies. El hecho de que las plantas hayan disminuido su altura entre el período abril 2015 y enero-febrero 2016, puede deberse a que en Octubre del 2015 hubo eventos climáticos adversos (nevazones y bajas temperaturas en el sector del ensayo), lo cual repercutió en plantas desganchadas y brotes quemados.

**Gráfico 4.3-1. Altura promedio de plantas (cm) según período y especie.**



Fuente: U. de Chile, 2016

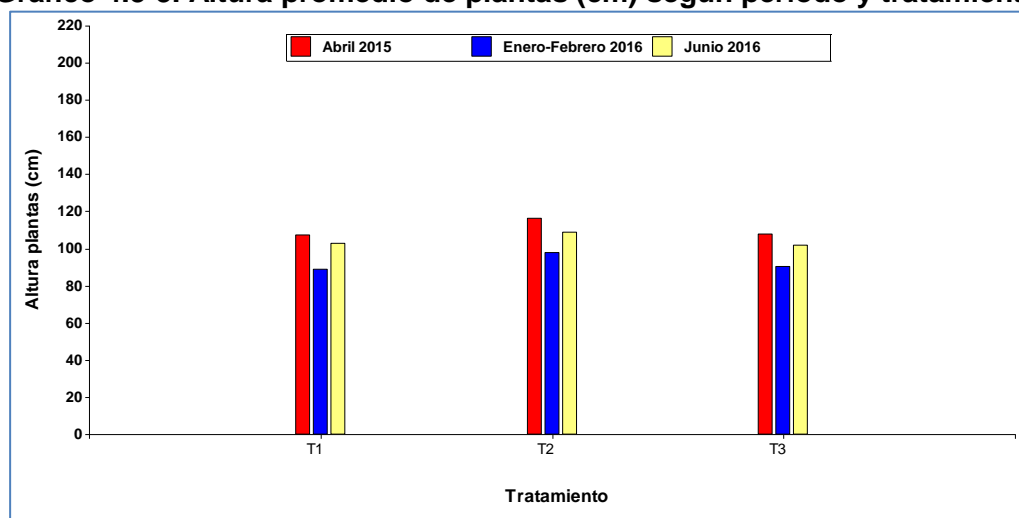
**Gráfico 4.3-2. . Incremento promedio de altura de plantas (cm) según período y especie (Incremento del período con respecto a mayo 2012).**



Fuente: U. de Chile, 2016

En el Gráfico 4.3-3, se presentan los promedios de altura de plantas por tratamiento y por período independiente de las especies. En el Gráfico 4.3-4, se presentan los promedios del incremento de altura de plantas por tratamiento y por período independiente de las especies. Tanto para la variable altura de planta, como para la variable incremento de altura de plantas, no se observa una tendencia a que algún tratamiento lograra mejor desarrollo de plantas con respecto a otro.

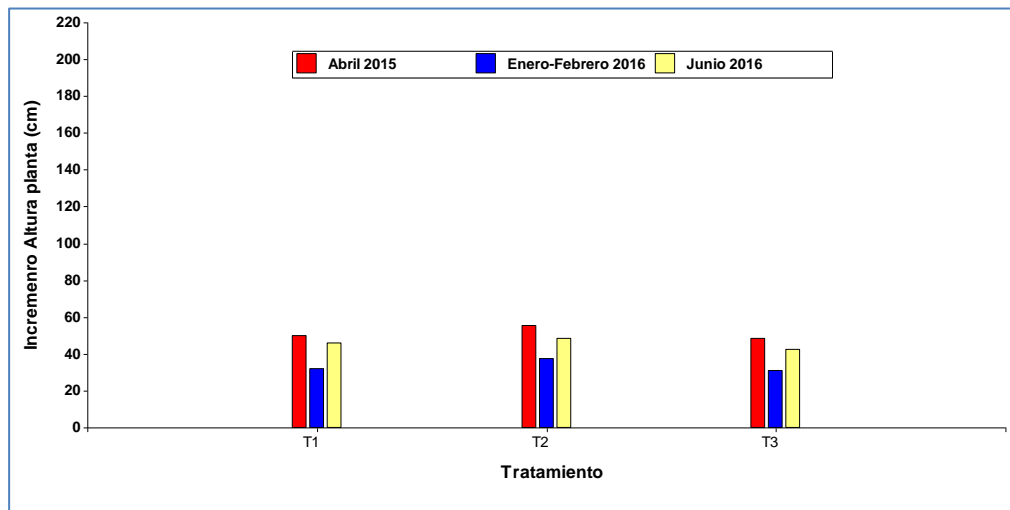
**Gráfico 4.3-3. Altura promedio de plantas (cm) según período y tratamiento.**



Fuente: U. de Chile, 2016



**Gráfico 4.3-4. Incremento de Altura promedio de plantas (cm) según período y tratamiento.**



Fuente: U. de Chile, 2016

### 4.3.2 Diámetro de Tallo o Cuello (DAC)

En las Tabla 4.3-3 y Tabla 4.3-4 se presentan los promedios del Diámetro de cuello por especie para los períodos mayo 2012 y junio 2016, respectivamente. Se observa una alta variabilidad entre los diámetros de cuello promedio por especie, razón por la cual la variable diámetro de cuello analizada en las temporadas abril 2015, enero-febrero 2016 y junio 2016 fue tratada como incremento de diámetro de cuello (diámetro de cuello del período menos diámetro de cuello inicial a mayo 2012). Dentro de cada especie se observa también una alta dispersión de los datos como lo pone en evidencia los altos coeficientes de variación encontrados.

**Tabla 4.3-3. Número de plantas (n), Diámetro de cuello promedio de plantas (cm), valor mínimo (Min), valor máximo(Max) y coeficiente de variación (CV) por especie en el período mayo 2012.**

Especie	n	DAC (mm)	Mín	Máx	CV
Acacia	65	10,6	5,8	16,8	23
Algarrobo	280	4,7	2,1	8,8	24
Espino	317	5,5	2,2	9,7	24
Huingán	978	6,5	3,5	12,6	20
Litre	36	5,8	4,2	8	18
Maitén	73	5,3	1,9	8,9	28
Pimiento	289	6,8	3,7	12,2	21
Quillay	352	4,7	2,3	8,7	24
Quilo	36	5,7	3,2	13,2	38
Romero	862	6,9	2,2	14	31
Talhuén	357	5,3	3,1	8,3	15

Fuente: U. de Chile, 2016

**Tabla 4.3-4. Número de plantas (n), Diámetro de cuello promedio de plantas (cm), valor mínimo (Min), valor máximo(Max) y coeficiente de variación (CV) por especie en el período junio 2016.**

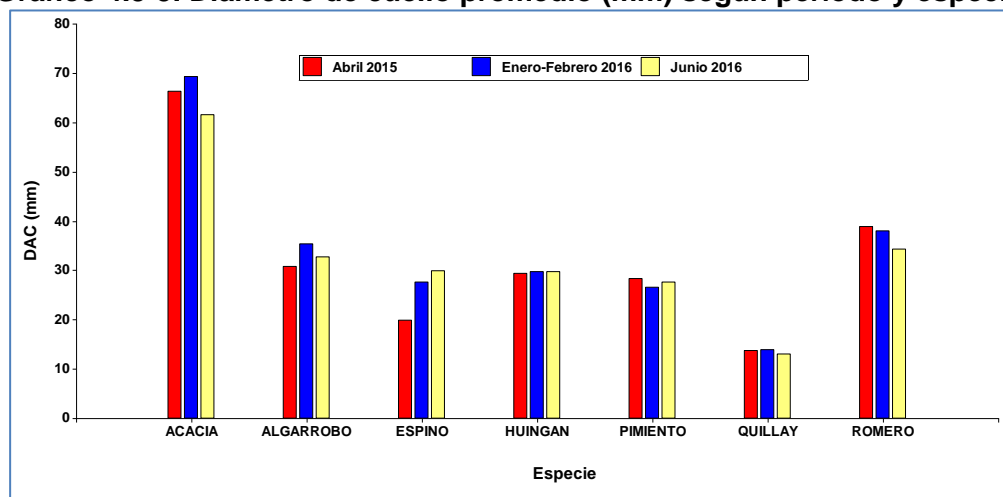
Especie	n	DAC (mm)	Mín	Máx	CV
Acacia	60	64,6	9,7	138,5	60
Algarrobo	277	35,0	3,7	478	88
Espino	305	28,9	6,4	83	48
Huingán	954	29,7	8	81,8	36
Pimiento	287	27,6	2,2	85,8	46
Quillay	338	13,0	2,3	130	68
Romero	850	34,2	5,4	85,2	38

Fuente: U. de Chile, 2016

En el Gráfico 4.3-5, se presentan los promedios de Diámetro de cuello (DAC) por especie y por período independiente de los tratamientos aplicados. En el Gráfico 4.3-6, se presentan los promedios del incremento del diámetro de cuello (DAC) por especie y por período independiente de los tratamientos aplicados. Tanto para la variable diámetro de cuello, como

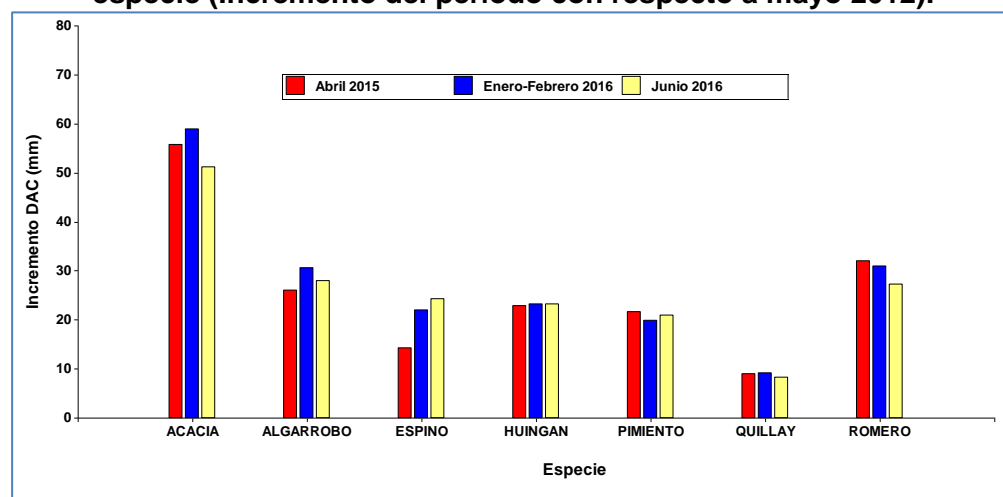
para la variable incremento de diámetro de cuello, se observa una tendencia a que la especie Acacia seguida de Romero y Algarrobo fueron las que lograron un mayor diámetro de cuello con respecto a las demás especies.

**Gráfico 4.3-5. Diámetro de cuello promedio (mm) según período y especie.**



Fuente: U. de Chile, 2016

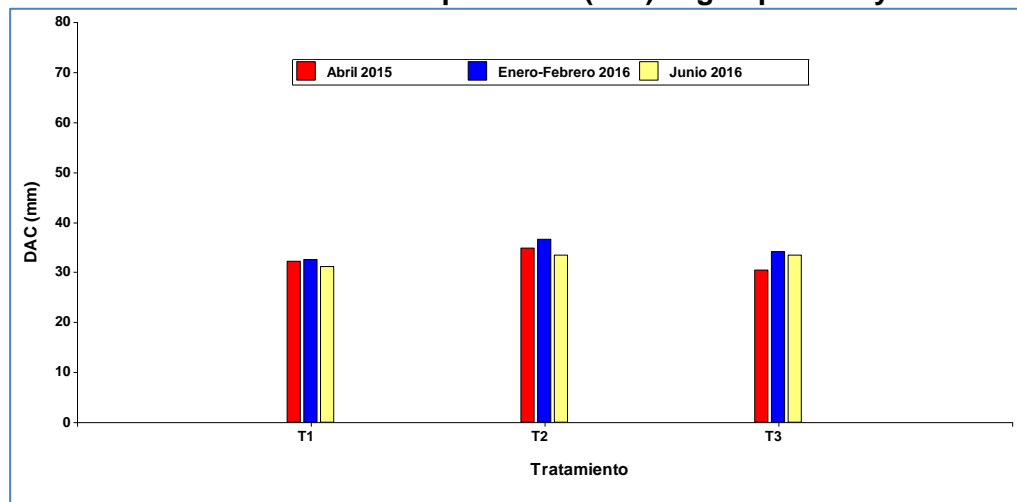
**Gráfico 4.3-6. Incremento de diámetro de cuello promedio (mm) según período y especie (Incremento del período con respecto a mayo 2012).**



Fuente: U. de Chile, 2016

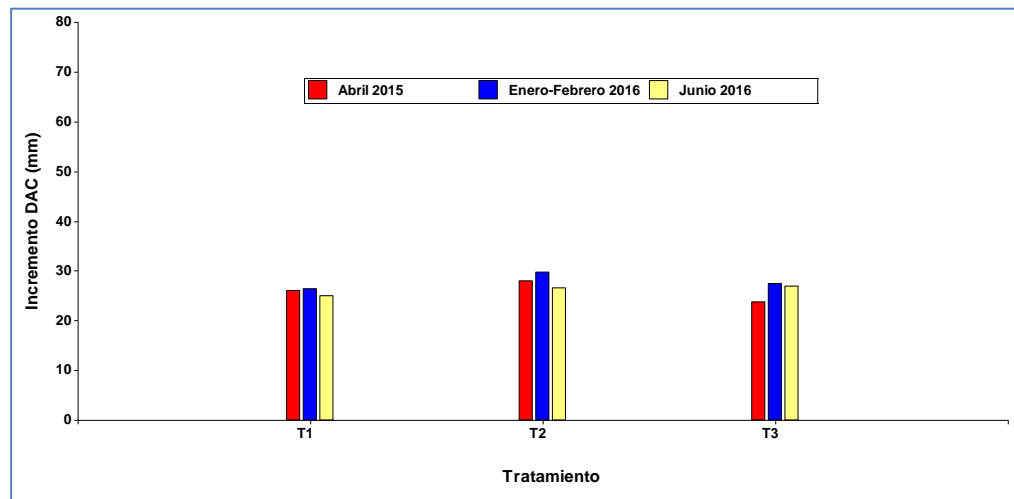
En el Gráfico 4.3-7, se presentan los promedios del Diámetro de cuello (DAC) por tratamiento y por período independiente de las especies presentes. En el Gráfico 4.3-8, se presentan los promedios del incremento del diámetro de cuello (DAC) por tratamiento y por período independiente de las especies presentes. Tanto para la variable diámetro de cuello, como para la variable incremento de diámetro de cuello, no se observa una tendencia a que algún tratamiento lograra mejor diámetro con respecto a otro tratamiento.

**Gráfico 4.3-7. Diámetro de cuello promedio (mm) según período y tratamiento.**



Fuente: U. de Chile, 2016

**Gráfico 4.3-8. Incremento de diámetro de cuello promedio (mm) según período y tratamiento**



Fuente: U. de Chile, 2016

### 4.3.3 Diámetro de Copa

En las Tabla 4.3-5 a Tabla 4.3-7 se presentan los promedios del Diámetro de cuello por especie para los períodos mayo 2012 y junio 2016, respectivamente.

**Tabla 4.3-5. Número de plantas (n), diámetro de copa promedio (mm) (DCprom), valor mínimo (Min), valor máximo (Max) y coeficiente de variación (CV) por especie en el período Abril 2015.**

Especie	n	DC prom	Mín	Máx	CV
Acacia	61	210,2	35	440	43,3
Algarrobo	269	224,7	49,5	460	35
Espino	206	84,3	32,5	206,5	40
Huingan	897	90,1	24,5	212,5	33,7
Pimiento	232	80,5	24	176,5	37,2
Quillay	215	69,3	19,5	165,5	36,8
Romero	845	112,3	23,5	221,5	26

Fuente: U. de Chile, 2016

**Tabla 4.3-6. Número de plantas (n), diámetro de copa promedio (mm) (DCprom), valor mínimo (Min), valor máximo (Max) y coeficiente de variación (CV) por especie en el período Enero-Febrero 2016.**

Especie	n	DC prom	Mín	Máx	CV
Acacia	60	151,4	45	365	50,8
Algarrobo	272	230	49	460	32,6
Espino	280	96,3	40	242,5	36,6
Huingan	870	91,4	27,5	215	34,7
Pimiento	197	73,7	30	227,5	37,5
Quillay	196	67,8	27,5	170	34,5
Romero	844	135,9	39,5	280	26,4

Fuente: U. de Chile, 2016

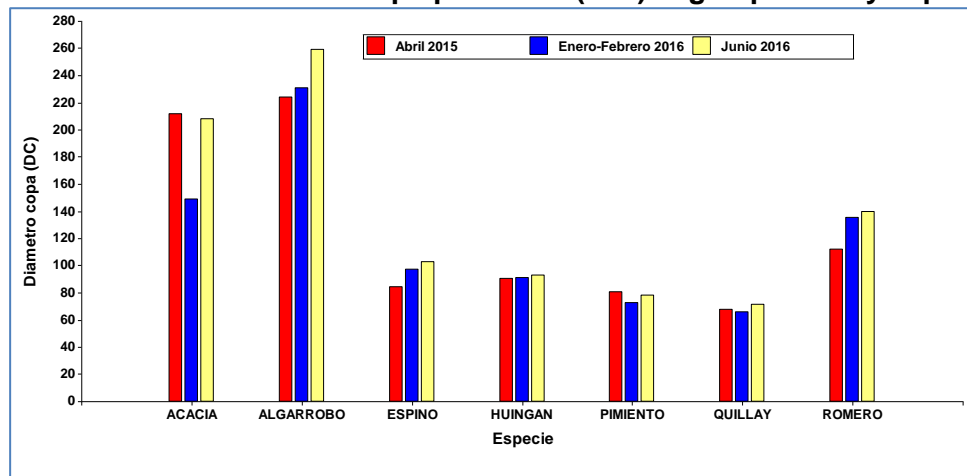
**Tabla 4.3-7. Número de plantas (n), diámetro de copa promedio (mm) (DCprom), valor mínimo (Min), valor máximo (Max) y coeficiente de variación (CV) por especie en el período Junio 2016.**

Especie	n	DC prom	Mín	Máx	CV
Acacia	58	212,2	69,5	435	42,1
Algarrobo	269	258,8	50	490	30,4
Espino	281	102	39,5	221,5	34,7
Huingan	782	92,9	30	200	32,5
Pimiento	167	79,2	31	235	35,5
Quillay	161	72,1	20	145	32,8
Romero	838	140,1	35	260	26

Fuente: U. de Chile, 2016

En el Gráfico 4.3-9, se presentan los promedios de Diámetro de copa (DAC) por especie y por período independiente de los tratamientos aplicados. Con respecto al diámetro de copa promedio se observa una tendencia a que la especie Algarrobo seguida de Acacia y Romero fueron las que lograron un mayor diámetro de copa con respecto a las demás especies (Gráfico 4.3-9 y Gráfico 4.3-10).

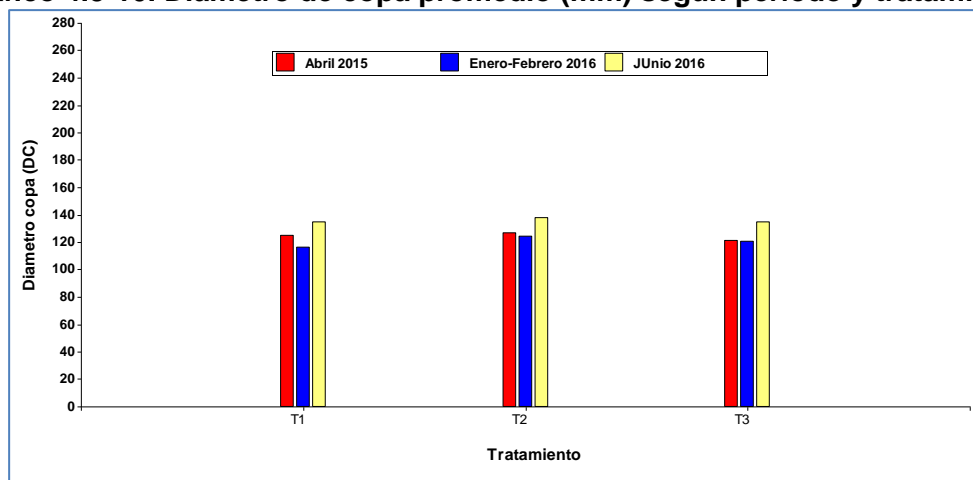
**Gráfico 4.3-9. Diámetro de copa promedio (mm) según período y especie.**



Fuente: U. de Chile, 2016

En el Gráfico 4.3-10, se presentan los promedios de Diámetro de copa (DAC) por tratamiento y por período independiente de las especies presentes. Al evaluar esta misma variable pero por tratamiento, no se observa una tendencia a que algún tratamiento lograra mejor diámetro con respecto a otro tratamiento.

**Gráfico 4.3-10. Diámetro de copa promedio (mm) según período y tratamiento.**



Fuente: U. de Chile, 2016

#### 4.3.4 Variable Estado (variable cualitativa, Vigor)

Con el objetivo de cuantificar como se modifica la proporción de plantas de cada categoría de la variable Estado, a medida que transcurre el tiempo, es que se presentan los resultados de las frecuencias absolutas según especie y nivel de estado en los períodos abril 2015 (Tabla 4.3-8), enero-febrero 2016 (Tabla 4.3-10) y junio 2016 (Tabla 4.3-12) y las frecuencias relativas por filas (por especie) expresadas como porcentaje según especie y nivel de estado en los períodos abril 2015 (Tabla 4.3-9), enero-febrero 2016 (Tabla 4.3-11) y junio 2016 (Tabla 4.3-13).

Se observa que en el período abril 2015, la mayoría de las plantas (independiente de la especie) se concentran en los niveles de estado 3, 4 y 5. En los dos períodos siguientes, la frecuencia de plantas en la Categoría 5 disminuye aumentando la frecuencia de plantas en las categorías 3 y 2 (Tabla 4.3-9, Tabla 4.3-11 y Tabla 4.3-13)

En el Tabla 4.3-13, en donde se presentan las frecuencias relativas por especie a junio del 2016, se puede observar una tendencia a que las especies Algarrobo, Romero, Acacia y Espino fueron entre las especies analizadas aquellas que obtuvieron en el último período de evaluación una mayor frecuencia de plantas buenas (4) y muy buenas (5). (Algarrobo 88 %, Romero 74%, Acacia 72% y Espino 65% de plantas pertenecientes a las Categorías 4 y 5). Por otra parte, las especies que concentraron una mayor frecuencia de plantas muy malas (1), malas (2) y regular (3) en el último período de evaluación fueron Quillay, Pimiento y Huingán (Quillay 92%, Pimiento 91% y Huingán 80% de plantas pertenecientes a las Categorías 1, 2 y 3.

**Tabla 4.3-8. Frecuencias absolutas según Especie (Filas) y nivel de Estado (Columnas). Período Abril 2015.**

Especie	1	2	3	4	5	Total
Acacia	0	4	6	34	21	65
Algarrobo	0	1	29	161	82	273
Espino	0	11	39	188	69	307
Huingan	2	25	199	651	83	960
Pimiento	2	31	98	119	40	290
Quillay	1	24	120	171	24	340
Romero	0	2	71	650	126	849
<b>Total</b>	<b>5</b>	<b>98</b>	<b>562</b>	<b>1974</b>	<b>445</b>	<b>3084</b>

Fuente: U. de Chile, 2016

**Tabla 4.3-9. Frecuencias relativas por filas expresadas como porcentaje según Especie (Filas) y nivel de Estado (Columnas). Período Abril 2015.**

Especie	1	2	3	4	5	Total
Acacia	0,0	6,2	9,2	52,3	32,3	100
Algarrobo	0,0	0,4	10,6	59,0	30,0	100
Espino	0,0	3,6	12,7	61,2	22,5	100



Especie	1	2	3	4	5	Total
Huingán	0,2	2,6	20,7	67,8	8,7	100
Pimiento	0,7	10,7	33,8	41,0	13,8	100
Quillay	0,3	7,1	35,3	50,3	7,1	100
Romero	0,0	0,2	8,4	76,6	14,8	100
<b>Total</b>	<b>0,2</b>	<b>3,2</b>	<b>18,2</b>	<b>64,0</b>	<b>14,4</b>	<b>100</b>

Fuente: U. de Chile, 2016

**Tabla 4.3-10. Frecuencias absolutas según Especie (Filas) y nivel de Estado (Columnas). Período Enero-Febrero 2016.**

Especie	1	2	3	4	5	Total
Acacia	0	5	9	41	9	64
Algarrobo	0	5	17	144	111	277
Espino	0	5	46	201	53	305
Huingan	3	50	319	564	23	959
Pimiento	7	59	151	67	3	287
Quillay	3	63	193	80	1	340
Romero	0	4	131	651	64	850
<b>Total</b>	<b>13</b>	<b>191</b>	<b>866</b>	<b>1748</b>	<b>264</b>	<b>3082</b>

Fuente: U. de Chile, 2016

**Tabla 4.3-11. Frecuencias relativas por filas expresadas como porcentaje según Especie (Filas) y nivel de Estado (Columnas). Período Enero-febrero 2016.**

Especie	1	2	3	4	5	Total
Acacia	0,0	7,8	14,1	64,1	14,1	100
Algarrobo	0,0	1,8	6,1	52,0	40,1	100
Espino	0,0	1,6	15,1	65,9	17,4	100
Huingán	0,3	5,2	33,3	58,8	2,4	100
Pimiento	2,4	20,6	52,6	23,3	1,1	100
Quillay	0,9	18,5	56,8	23,5	0,3	100
Romero	0,0	0,5	15,4	76,6	7,5	100
<b>Total</b>	<b>0,4</b>	<b>6,2</b>	<b>28,1</b>	<b>56,7</b>	<b>8,6</b>	<b>100</b>

Fuente: U. de Chile, 2016

**Tabla 4.3-12. Frecuencias absolutas según Especie (Filas) y nivel de Estado (Columnas). Período Junio 2016.**

Especie	1	2	3	4	5	Total
Acacia	0	3	14	39	4	60
Algarrobo	2	8	22	230	15	277
Espino	2	8	98	192	5	305
Huingán	14	132	617	190	2	955
Pimiento	22	88	152	23	2	287

Especie	1	2	3	4	5	Total
Quillay	17	109	184	28	0	338
Romero	2	10	205	633	0	850
<b>Total</b>	<b>59</b>	<b>358</b>	<b>1292</b>	<b>1335</b>	<b>28</b>	<b>3072</b>

Fuente: U. de Chile, 2016

**Tabla 4.3-13. Frecuencias relativas por filas expresadas como porcentaje según Especie (Filas) y nivel de Estado (Columnas). Período Junio 2016.**

Especie	1	2	3	4	5	Total
Acacia	0,0	5,0	23,3	65,0	6,7	100
Algarrobo	0,7	2,9	7,9	83,0	5,4	100
Espino	0,7	2,6	32,1	63,0	1,6	100
Huingán	1,5	13,8	64,6	19,9	0,2	100
Pimiento	7,7	30,7	53,0	8,0	0,7	100
Quillay	5,0	32,3	54,4	8,3	0,0	100
Romero	0,2	1,2	24,1	74,5	0,0	100
<b>Total</b>	<b>1,9</b>	<b>11,7</b>	<b>42,1</b>	<b>43,5</b>	<b>0,9</b>	<b>100</b>

Fuente: U. de Chile, 2016

### 4.3.5 Análisis Estadístico

#### Incremento altura plantas

Con el objetivo de evaluar el incremento de plantas durante el desarrollo del ensayo, se procedió a corregir la variable altura de las temporadas 2015 y 2016 mediante la altura obtenida en la temporada 2012, ya que una mayor altura al final del periodo de evaluación puede deberse a que las plantas desde un inicio hubiesen llegado con una altura superior al resto.

Posterior a la corrección se procedió a ajustar un modelo lineal mixto, observándose problemas de heterogeneidad de varianza en los factores analizados, específicamente en el factor “Especie”, los cuales fueron corregidos mediante una función de varianza del tipo varIdent (Ver Anexos, figura 1 y 2). Una vez corregido el modelo, los resultados sugieren que existe interacción entre los factores Tratamiento y Especie (Tabla 4.3-14), por lo que estos factores no actúan de manera independientes, sino que de manera conjunta ( $p$ -valor  $<0,05$ ).

**Tabla 4.3-14. Prueba de hipótesis marginales. Incremento altura plantas.**

Fuente de variación	numDF	denDF	F-value	p-value
Tratamiento	2	160	1,82	0,1651
Especie	6	160	150,91	$<0,0001$
Tratamiento:Especie	12	160	2,18	0,0147

Fuente: U. de Chile, 2016

La Tabla 4.3-15 muestra las comparaciones múltiples realizadas para cada especie en función del tratamiento que recibieron, destacándose en el tratamiento 1 Acacia y Algarrobo, en el tratamiento 2 Acacia, Algarrobo y Romero y, Acacia y Algarrobo en el tratamiento 3 como las especies que tiene mayor incremento en la altura. Los peores desempeños en el tratamiento 1 correspondieron a Espino y Quillay, en el tratamiento 2 a Huigán y Quillay y en el tratamiento 3 a Quillay, Espino y Huigán respectivamente.

**Tabla 4.3-15. Medias ajustadas para el incremento de altura de las especies en función del tratamiento y sus respectivos errores estándares (E.E).**

Tratamiento	Especie	Medias	E.E.	Grupo
1	Acacia	88,9	15,	a
1	Algarrobo	74,9	4,4	ab
1	Romero	58,1	4,4	bc
1	Huigán	25,7	4,4	d
1	Pimiento	23,1	4,4	de
1	Espino	15,9	4,4	ef
1	Quillay	11,8	4,4	f
2	Acacia	87,2	15,3	a
2	Algarrobo	78,2	4,4	a
2	Romero	58,8	4,4	a
2	Pimiento	36,7	4,4	b
2	Espino	32,1	4,4	b
2	Huigán	19,8	4,4	c
2	Quillay	16,8	4,4	c
3	Algarrobo	80,1	4,4	a
3	Acacia	74,7	15,3	ab
3	Romero	51,7	4,4	b
3	Pimiento	28,5	4,4	c
3	Quillay	18,5	4,4	d
3	Espino	16,1	4,4	d
3	Huigán	15,6	4,4	d

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas de acuerdo al test de comparación múltiple de Fisher ( $\alpha = 0,05$ ). Fuente: U. de Chile, 2016

### Incremento diámetro de cuello (DAC)

De manera similar al incremento de la altura, la variable incremento del diámetro de cuello (DAC) fue corregida utilizando los datos obtenidos en la temporada 2012. Posterior a la corrección se procedió a ajustar el modelo lineal mixto observándose problemas de heterogeneidad de varianza en los factores analizados, específicamente en el factor “Especie” los cuales fueron corregidos mediante una función de varianza del tipo varIdent (Ver Anexos, figura 3 y 4).

Los análisis sugieren que la interacción Tratamiento Especie, para la variable incremento diámetro de cuello no es estadísticamente significativa, por lo que se procedieron a realizar pruebas de hipótesis sobre los factores de manera independiente, observándose que sólo el efecto Especie resulta estadísticamente significativo (Tabla 4.3-16).

**Tabla 4.3-16. Prueba de hipótesis marginales. Incremento diámetro de cuello.**

Fuente de variación	numDF	denDF	F-value	p-value
Tratamiento	2	160	1,7	0,1865
Especie	6	160	90,39	<0,0001
Tratamiento:Especie	12	160	0,99	0,4622

Fuente: U. de Chile, 2016

Al ser estadísticamente significativo el factor especie (p-valor <0,0005), se procedió a realizar pruebas de comparaciones múltiples entre las especies, observándose que la especie Acacia fue la que obtuvo mayores incrementos en el diámetro de cuello, seguida de Romero y Algarrobo, las cuales no se diferenciaron de manera estadística. La especie que tuvo el menor desempeño para esa variable correspondió a Quillay, seguida de Pimiento y Espino, ambas no diferenciadas estadísticamente (Tabla 4.3-17).

**Tabla 4.3-17. Medias ajustadas para el incremento de Incremento diámetro de cuello y sus respectivos errores estándares (E.E).**

Especies	Medias	E.E.	Grupo
Acacia	55,3	3,5	a
Romero	30,1	1,1	b
Algarrobo	28,2	1,1	b
Huingán	23,1	1,1	c
Pimiento	20,8	1,1	d
Espino	20,2	1,1	d
Quillay	8,8	1,1	e

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas de acuerdo al test de comparación múltiple de Fisher ( $\alpha = 0,05$ ). Fuente: U. de Chile, 2016

### Diámetro de copa (DC).

Para el modelamiento de la variable “Diámetro de copa” se consideró el promedio de 2 mediciones sobre el mismo árbol. Los datos consideran tres mediciones, abril 2015, enero 2016 y junio 2016 y sobre ellos no se realizó ninguna corrección con respecto a los datos recopilados en la temporada 2012. Los datos fueron analizados mediante modelos mixtos, observándose problemas de heterogeneidad de varianza, principalmente sobre la variable Especie, lo cual fue corregido mediante la utilización de una función de varianza del tipo varIdent (ver Anexo, figura 5 y 6). Posterior a la corrección, se procedió a analizar los datos (Tabla 4.3-18), observándose que no existe interacción entre los tratamientos y especies evaluadas, procediendo a realizar pruebas de hipótesis sobre los factores actuando de manera

independiente. Sólo el factor especie fue estadísticamente significativo ( $p\text{-value} < 0,0001$ ) por lo que se procedió a realizar pruebas de comparaciones múltiples.

**Tabla 4.3-18. Prueba de hipótesis marginales. Diámetro de copa.**

Fuente de variación	numDF	denDF	F-value	p-value
Tratamiento	2	160	0,73	0,4844
Especie	6	160	206,25	<0,0001
Tratamiento:Especie	12	160	0,26	0,9942

Fuente: U. de Chile, 2016

Las pruebas de comparaciones múltiples sugieren que la especie con mayor diámetro de copa correspondió a Algarrobo, seguido de Acacia y Romero, siendo estas tres especies diferentes estadísticamente. La especie que presentó el menor diámetro de copa correspondió a Quillay, seguido por Pimiento y finalmente Espino y Huingán.

**Tabla 4.3-19. Medias ajustadas para el Diámetro de copa y sus respectivos errores estándares (E.E.).**

Especie	Medias	E.E.	Grupo
Algarrobo	237,9	4,7	a
Acacia	189,5	11,3	b
Romero	129,2	4,7	c
Espino	94,7	4,7	d
Huingán	91,4	4,7	d
Pimiento	77,2	4,7	e
Quillay	68,4	4,7	f

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas de acuerdo al test de comparación múltiple de Fisher ( $\alpha = 0,05$ ). Fuente: U. de Chile, 2016

## Análisis Multivariado de Correspondencia Múltiple

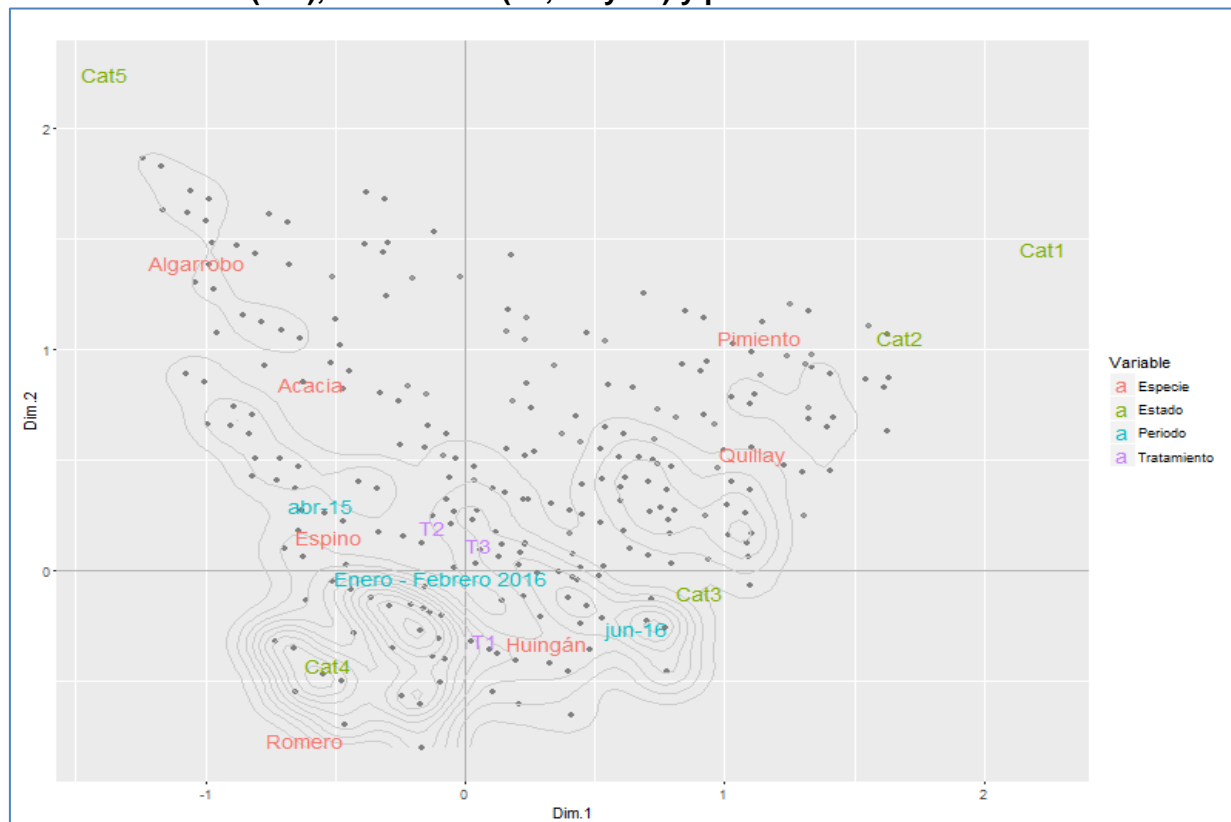
La propuesta de análisis de la variable Estado de Planta (variable cualitativa ordinal), es mediante técnicas multivariadas del tipo correspondencia múltiple. El análisis de correspondencia puede ser definido como una técnica multivariada que permite reducir la dimensionalidad de tablas de frecuencia a través de factores que nos ayudarán a concentrarnos en las variables más importantes. La técnica de reducción considera descomponer una medida de dependencia (conocido como el estadístico  $\chi^2$ ) entre las variables que se estén analizando (Härdle and Hlávka, 2007). Al trabajar con tablas multidimensionales (como es este caso en particular), en vez de considerar trabajar con las tablas de frecuencia se trabajará directamente con tablas conocidas como "Tablas Burt", las cuales tienen todos los niveles de clasificaciones cruzadas de las variables originales (Especie, Tratamiento, Año y Estado). Con el objetivo de facilitar las conclusiones, los resultados de un análisis de correspondencia múltiple puede ser representado mediante un gráfico biplot, graficando en éste los puntos filas y columnas en un mismo espacio. Puntos que caen en la misma dirección están correlacionados de forma positiva, mientras que si estos se encuentran en direcciones opuestas se encuentran correlacionados pero de forma negativa. De forma

adicional, se agregarán a estos análisis curvas de densidad, las cuales se interpretan como mayores niveles de respuesta en esas variables analizadas.

#### **Variable cualitativa: Estado (Vigor)**

La Figura 4.3-1 muestra los resultados obtenidos al realizar los análisis de correspondencia sobre los datos y presentar los resultados mediante un gráfico biplot. En este gráfico se puede observar que las especies Algarrobo y Acacia, las cuales están en la misma dirección que el estado 5 (representado como Cat 5), se encuentran bastante correlacionados, así como las especies Espino y Romero (Cat4) y Pimiento y Quillay al Estado 1 y 2 (Cat1 y Cat2). Los tratamientos, ubicados en la zona central del gráfico, no se encuentran asociados a ningún estado en particular, obteniendo resultados bastante similares obtenidos en los análisis de las variables cuantitativas analizadas previamente, lo cual podría hacer suponer que los tratamientos no tienen influencia en el estado de las plantas. Al incluir los años en el análisis, se puede observar que en la temporada abril 2015 los árboles en general tenían Estados cercanos a categorías altas, lo cual tiende a variar en la medida que nos acercamos a las mediciones realizadas en el periodo enero 2016 y posteriormente a abril 2016, lo cual hace suponer que el Estado de las plantas fue afectado fuertemente por el evento climático de octubre 2015, y que se hace necesario continuar con las mediciones para ver la evolución de la plantación, ya que se aprecia que la variable Estado de las plantas comienza a disminuir en general en la medida que ha pasado el tiempo.

**Figura 4.3-1. Análisis de correspondencia múltiple sobre la variable Especie, Categoría (Cat), tratamiento (T1, T2 y T3) y periodo evaluación.**



Fuente: U. de Chile, 2016

### Análisis Multivariado de Componentes Principales

El análisis de componentes principales realizado explicó un 94,4 % de la variabilidad total de las observaciones (Figura 4.3-2 y Figura 4.3-3). En la Figura 4.3-2 se representan a las observaciones (círculos en el gráfico) coloreadas por especie y en la Figura 4.3-3 se presentan a las observaciones coloreadas por tratamiento.

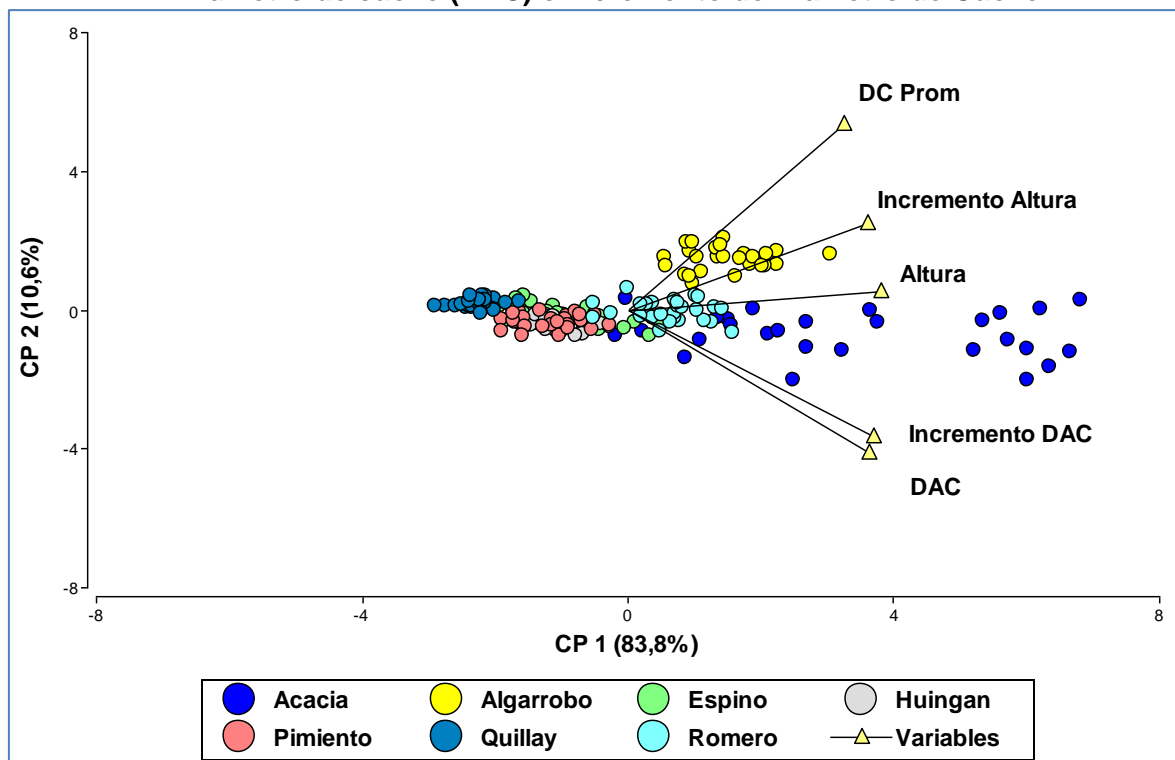
Las variables de mayor peso o inercia en el eje 1 son de mayor a menor importancia: Altura, Incremento DAC, Incremento Altura, DAC y DC Prom. Las variables de mayor peso en el eje 2 son de mayor a menor importancia: DC Prom, DAC, Incremento DAC e Incremento Altura. Los resultados indican una correlación positiva entre todas las variables analizadas (es decir árboles más altos, tienen mayor diámetro de cuello y mayor diámetro de copa)

Para comenzar a interpretar este gráfico es importante observar en primera instancia en sentido derecha-izquierda, y ver las proyecciones de las observaciones sobre la CP1 (componente principal 1) y luego observar en segunda instancia en sentido arriba-abajo, y ver las proyecciones de las observaciones sobre la CP2 (componente principal 2).



En el Biplot de la Figura 4.3-2 puede observarse que con las dos primeras componentes analizadas es posible diferenciar a las especies. El eje que mejor permite diferenciar a las especies es la CP1, ya que hay especies que se concentran a la derecha del gráfico (Acacia, Algarrobo y Romero) y especies que se concentran a la izquierda del gráfico (Quillay, Pimiento, Espino y Huingán). A partir de la dispersión de las observaciones, podemos inferir que las especies Acacia, Algarrobo y Romero se caracterizan por presentar mayores incrementos de altura de plantas, mayores incrementos de diámetro de cuello (DAC) y mayores incrementos de diámetros de copa. Por otra parte Quillay, Pimiento Espino y Huingán fueron especies que se caracterizaron (entre las especies analizadas) en obtener menores incrementos de altura de plantas, menores incrementos de diámetro de cuello (DAC) y menores diámetros de copa. El eje CP2 permite diferenciar a las especies Algarrobo de Acacia, caracterizando a Algarrobo con un mayor diámetro de copa promedio (DC Prom) con respecto a Acacia. Con respecto al incremento del diámetro del cuello esta misma componente permite diferencias a las especies Acacia de Romero y Algarrobo, siendo la que presenta un mayor Incremento de DAC Acacia, luego Romero y luego Algarrobo.

**Figura 4.3-2. Análisis de Componentes Principales sobre las variables Diámetro de copa promedio (DC Prom), Altura de plantas, Incremento de altura de plantas, Diámetro de cuello (DAC) e Incremento de Diámetro de Cuello.**

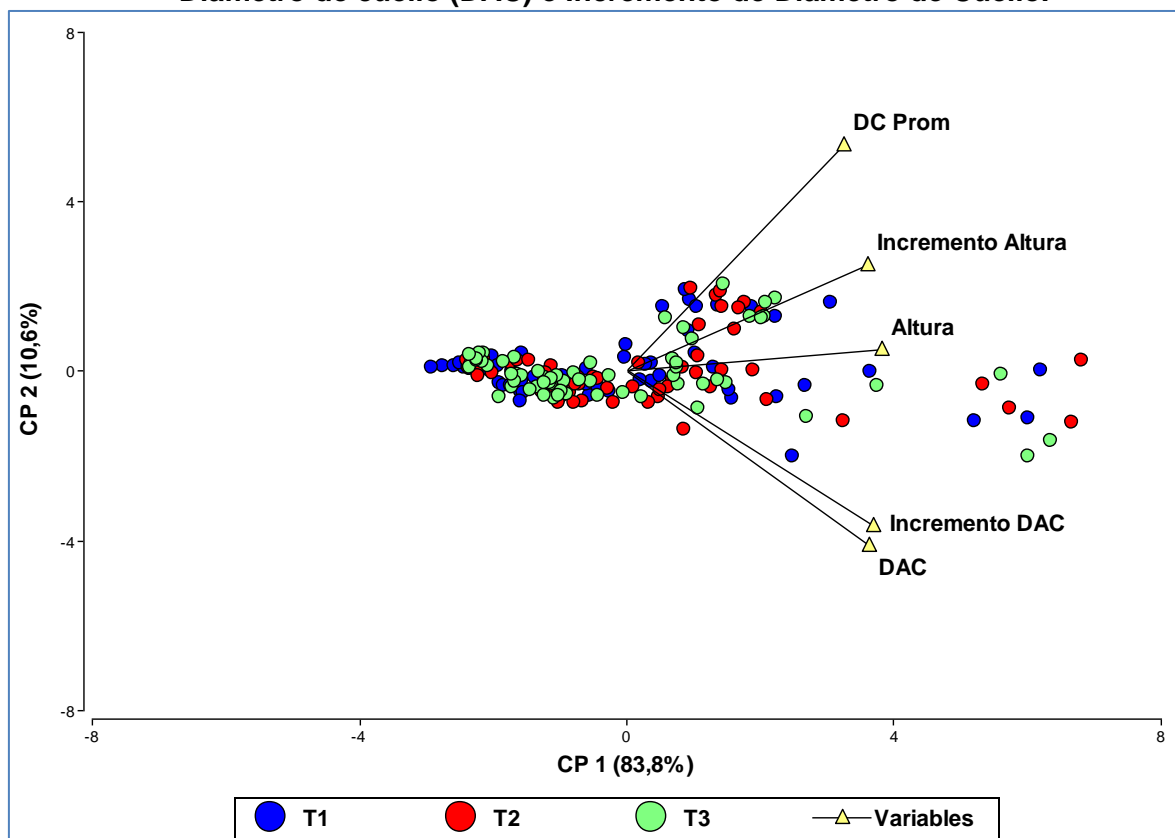


Nota: Vectores (flechas) representan las variables analizadas y puntos a las observaciones clasificadas por especie.

Fuente: U. de Chile, 2016

El Biplot de la Figura 4.3-3 muestra que no es posible diferenciar a los tratamientos, es decir no hay ninguno de los tratamientos que se caracterice por tener mayores o menores valores en las variables analizadas. Esto se da pues los tratamientos al ser coloreados no se identificaron, de forma particular con ninguno de las variables analizadas.

**Figura 4.3-3. Análisis de Componentes Principales sobre las variables Diámetro de copa promedio (DC Prom), Altura de plantas, Incremento de altura de plantas, Diámetro de cuello (DAC) e Incremento de Diámetro de Cuello.**



Nota: Vectores (flechas) representan las variables analizadas y puntos a las observaciones clasificadas por tratamiento.  
Fuente: U. de Chile, 2016

#### 4.4 SEGUIMIENTO DE LOS ENSAYOS

A partir de los resultados entregados por los laboratorios, para las muestras de relave y tejido foliar (Ver **Anexo A**), se procedió a realizar un análisis y discusión de ellos en función de los rangos de concentración detectados para cada elemento y como parte de las series históricas de los resultados.

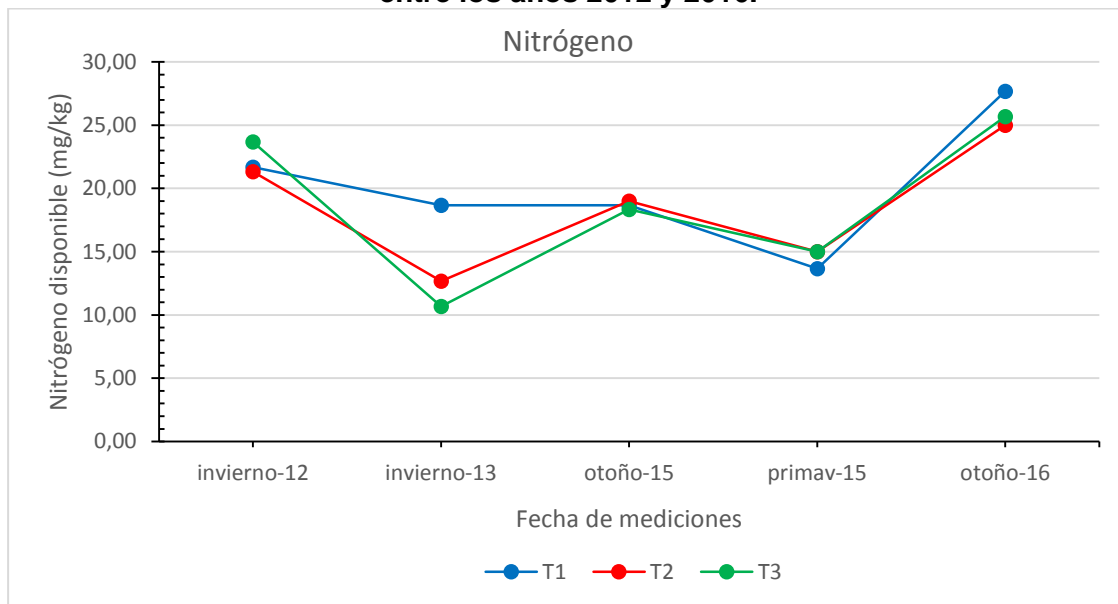
Para ello se utilizan los mismos programas estadísticos de la etapa anterior, de manera tal, de dar una continuidad al análisis de resultados y poder comparar los resultados en el tiempo.

##### 4.4.1 Seguimiento Sustrato relaves

En las Tabla 4.4-1 y Tabla 4.4-2 se resumen los resultados de análisis de laboratorio y análisis estadístico realizados a las muestras de relave correspondientes a los tratamientos del ensayo (T1, T2 y T3) obtenidas en Otoño de 2016.

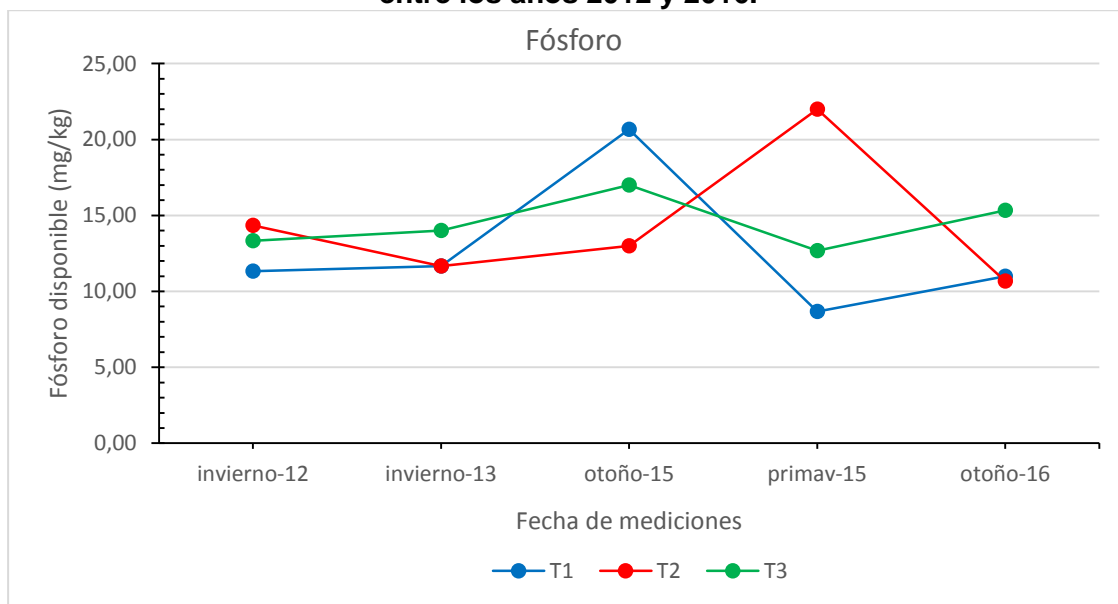
En relación a los parámetros de fertilidad del relave determinados en la campaña de Otoño de 2016 (Tabla 4.4-1), los elementos nitrógeno y fósforo disponible se encuentran en niveles medios, con un promedio de 26,1 mg/kg y 12,9 mg/kg respectivamente, mientras que el potasio disponible muestra un nivel deficiente, con un promedio a 28,8 mg/kg (Bernier, 2000; NOM-021-RECNAT, 2000). (Gráfico 4.4-1 a Gráfico 4.4-3). En general, se ha observado una disminución de los niveles de fósforo y potasio disponible, en comparación con las determinaciones realizadas en la línea base. Por otra parte, desde el punto de vista de la fertilidad del relave, las concentraciones disponibles de boro, cobre, hierro y manganeso presentan valores altos (Jones, 2002; Silva y Rodríguez, 1995) mientras que la concentración de zinc disponible ( $0,3 - 0,4 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y zinc total ( $11,7 - 13,0 \text{ mg kg}^{-1}$ ) son bajas. Respecto a otros parámetros químicos del relave, se destacan los bajos valores de pH del relave, los que se encuentran en el rango de 4,0 a 4,5 y son clasificados por la literatura como fuertemente ácidos (Brady y Weil, 2008). Probablemente el pH fuertemente ácido se deba a la alta concentración de azufre soluble ( $24 \text{ meq/L}$ ) y extractable, que mostró un rango de 2748 a 2861  $\text{mg kg}^{-1}$  generado por la oxidación de la pirita que compone los relaves mineros.

**Gráfico 4.4-1. Seguimiento de Nitrógeno (mg/kg) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.**



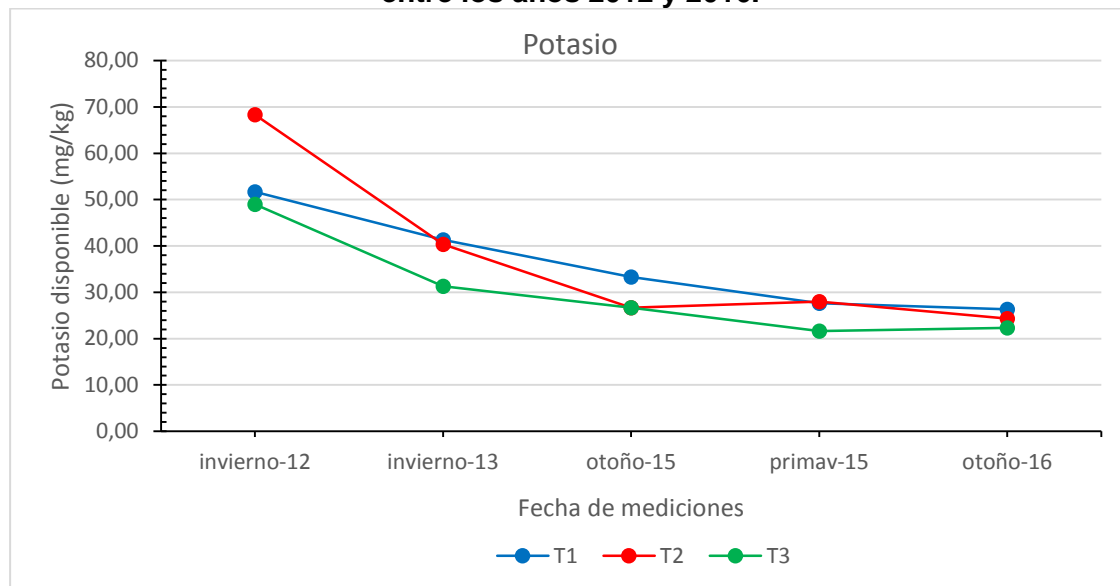
Fuente: Arcadis 2016.

**Gráfico 4.4-2. Seguimiento de Fósforo (mg/kg) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.**



Fuente: Arcadis 2016.

**Gráfico 4.4-3. Seguimiento de Potasio (mg/kg) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.**



Fuente: Arcadis 2016.

Respecto a las comparaciones estadísticas realizadas entre tratamientos, correspondientes a la campaña de otoño de 2016 (Tabla 4.4-2), no se observan diferencias significativas para la mayoría de las propiedades químicas analizadas excepto para algunos elementos particulares cuando el valor (%) para el test de Friedman es menor a 5%. En general, las evaluaciones realizadas durante las campañas de invierno de 2012, otoño de 2013 y otoño de 2015 no han mostrado un efecto de los tratamientos sobre las propiedades químicas del relave, con excepción de algunos casos particulares, que al igual que en la campaña de otoño de 2016, estas diferencias estadísticas entre tratamientos son atribuidas a la propia variabilidad en el relave de los elementos analizados, así como a los bajos valores de concentración de los elementos, los que son cercanos o equivalentes al límite de detección de los equipos de laboratorio.

**Tabla 4.4-1. Resultados análisis de laboratorio a muestras de relave de los tratamientos (T1, T2 y T3) del ensayo, obtenido en otoño de 2016.**

Componente	Variable	Unidad	Tratamiento					
			T1		T2		T3	
			Promedio	Error estándar	Promedio	Error estándar	Promedio	Error estándar
Salinidad	pH (en extracto)		4,9	0,5	4,7	0,4	4,4	0,1
	C.E. (en extracto)	dS/m	2,4	0,1	2,5	0,1	2,6	0,1
	RAS		0,4	0,0	0,4	0,1	0,3	0,1
	Calcio	meq/L	20,1	0,5	19,4	0,7	19,4	0,8
	Magnesio	meq/L	4,4	0,6	5,5	0,6	6,5	1,2

Componente	Variable	Unidad	Tratamiento					
			T1		T2		T3	
			Promedio	Error estándar	Promedio	Error estándar	Promedio	Error estándar
Cationes y Aniones Solubles	Potasio	meq/L	0,5	0,1	0,5	0,2	0,4	0,2
	Sodio	meq/L	1,3	0,2	1,5	0,3	1,2	0,2
	Cloruro (Cloro)	meq/L	0,5	0,1	0,5	0,1	0,6	0,1
	Sulfato S-SO <sub>4</sub>	meq/L	24,0	0,6	24,0	0,6	24,3	1,2
	Bicarbonato	meq/L	0,4	0,1	0,3	0,0	0,2	0,0
Otros Elementos Solubles	Arsénico	mg/kg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Boro	mg/kg	0,6	0,0	0,7	0,1	0,6	0,1
	Cadmio	mg/kg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Cobre	mg/kg	27,8	17,8	24,8	12,4	28,9	16,2
	Cromo	mg/kg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Hierro	mg/kg	2,5	1,2	3,2	2,3	2,8	0,4
	Manganeso	mg/kg	3,2	0,9	4,0	0,5	4,2	0,8
	Mercurio	mg/kg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Molibdeno	mg/kg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Níquel	mg/kg	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0
	Plomo	mg/kg	1,1	0,6	1,1	0,4	1,5	0,3
	Selenio	mg/kg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Zinc	mg/kg	0,6	0,3	0,5	0,2	0,8	0,2
Fertilidad	pH (agua, 1:2,5)		4,5	0,3	4,4	0,5	4,0	0,1
	C.E. (extracto)	dS/m	2,4	0,1	2,5	0,1	2,6	0,1
	Materia orgánica	%	0,7	0,1	0,6	0,2	0,6	0,1
	Nitrógeno disp.	mg/kg	27,7	4,3	25,0	2,1	25,7	1,8
	Fósforo disp.	mg/kg	11,0	4,4	10,7	3,8	15,3	4,4
	Potasio disp.	mg/kg	26,3	8,1	24,3	5,2	22,3	3,9
	Azufre extract.	mg/kg	2.747,7	135,8	2.755,0	198,2	2.861,0	277,1
Microelementos Disponibles	Hierro	mg/kg	38,2	9,9	49,1	15,2	70,7	11,1
	Manganeso	mg/kg	1,8	0,2	2,2	0,2	2,4	0,7
	Zinc	mg/kg	0,3	0,0	0,4	0,0	0,4	0,1
	Cobre	mg/kg	39,0	11,1	40,9	13,1	27,5	15,7
	Boro	mg/kg	0,6	0,0	0,8	0,3	0,9	0,2
Elementos Totales	Nitrógeno	mg/kg	605,7	73,5	567,0	54,7	563,7	12,4
	Fósforo	mg/kg	597,3	260,3	863,3	31,8	998,3	101,3
	Potasio	mg/kg	1.437,0	141,4	1.667,3	333,0	2.109,7	191,0
	Azufre	mg/kg	5,7	0,5	6,0	0,8	7,9	0,6
	Calcio	mg/kg	7.237,3	788,2	8.230,3	1273,8	10.431,7	649,8
	Magnesio	mg/kg	3.114,0	288,8	3.721,0	646,6	4.880,0	304,2
Microelementos Totales	Hierro	mg/kg	7.363,0	902,0	8.187,3	305,9	8.509,3	297,8
	Manganeso	mg/kg	51,0	3,1	53,3	3,4	53,3	3,8
	Zinc	mg/kg	11,7	0,9	13,0	1,0	12,3	1,2
	Cobre	mg/kg	206,0	79,5	255,0	143,9	115,3	40,1
	Boro	mg/kg	12,6	0,8	12,3	2,1	12,3	2,1
	Arsénico	mg/kg	1,2	0,1	1,3	0,2	1,9	0,1

Componente	Variable	Unidad	Tratamiento					
			T1		T2		T3	
			Promedio	Error estándar	Promedio	Error estándar	Promedio	Error estándar
Otros Elementos Totales	Cadmio	mg/kg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Cromo	mg/kg	7,6	0,9	8,7	0,8	9,1	1,0
	Mercurio	mg/kg	0,6	0,1	0,7	0,1	0,8	0,0
	Molibdeno	mg/kg	7,6	4,0	7,7	4,2	9,7	5,3
	Níquel	mg/kg	3,1	0,7	3,9	0,4	3,7	0,5
	Plomo	mg/kg	22,6	2,3	24,9	2,6	23,3	2,1
	Selenio	mg/kg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fuente: Arcadis en base a resultados de AGROLAB, 2016

**Tabla 4.4-2. Test de Kruskal-Wallis para los resultados de análisis de sustrato relave en otoño de 2015 para los tres tratamientos.**

Componente	Variable	Valor P (%)
		Otoño 2016
Salinidad	pH (en extracto)	62,08
	C. eléctrica (en extracto)	93,44
	RAS	14,51
Cationes y Aniones Solubles (meq/l)	Calcio	30,86
	Magnesio	44,44
	Potasio	30,86
	Sodio	75,11
	Cloruro (Cloro) pasta	30,86
	Sulfato S-SO <sub>4</sub> pasta	94,03
	Bicarbonato HCO <sub>3</sub>	62,08
Otros Elementos Solubles (mg/kg)	Arsénico	90,70
	Boro	44,44
	Cadmio	sd
	Cobre	79,01
	Cromo	sd
	Hierro	79,01
	Manganeso	44,44
	Mercurio	sd
	Molibdeno	sd
	Níquel	82,64
	Plomo	79,01
	Selenio	sd
	Zinc	79,01
Fertilidad	pH (agua, relación 1:2,5)	13,22
	C. Eléctrica (en extracto)	93,44
	Materia orgánica	79,01
	Nitrógeno disponible	82,64
	Fósforo disponible	13,22
	Potasio disponible	79,01
	Azufre extractable	79,01



Componente	Variable	Valor P (%)
		Otoño 2016
Microelementos Disponibles (mg/kg)	Hierro	79,01
	Manganeso	44,44
	Zinc	93,44
	Cobre	30,86
	Boro	94,03
Elementos Totales (mg/kg)	Nitrógeno	79,01
	Fósforo	79,01
	Potasio	<b>4,94</b>
	Azufre	<b>4,94</b>
	Calcio	<b>4,94</b>
Microelementos Totales (mg/kg)	Magnesio	<b>4,94</b>
	Hierro	79,01
	Manganeso	>99,99
	Zinc	62,08
	Cobre	4,94
Otros Elementos Totales (mg/kg)	Boro	79,01
	Arsénico	<b>4,94</b>
	Cadmio	sd
	Cromo	79,01
	Mercurio	<b>4,94</b>
	Molibdeno	94,03
	Níquel	79,01
	Plomo	44,44
	Selenio	11,11

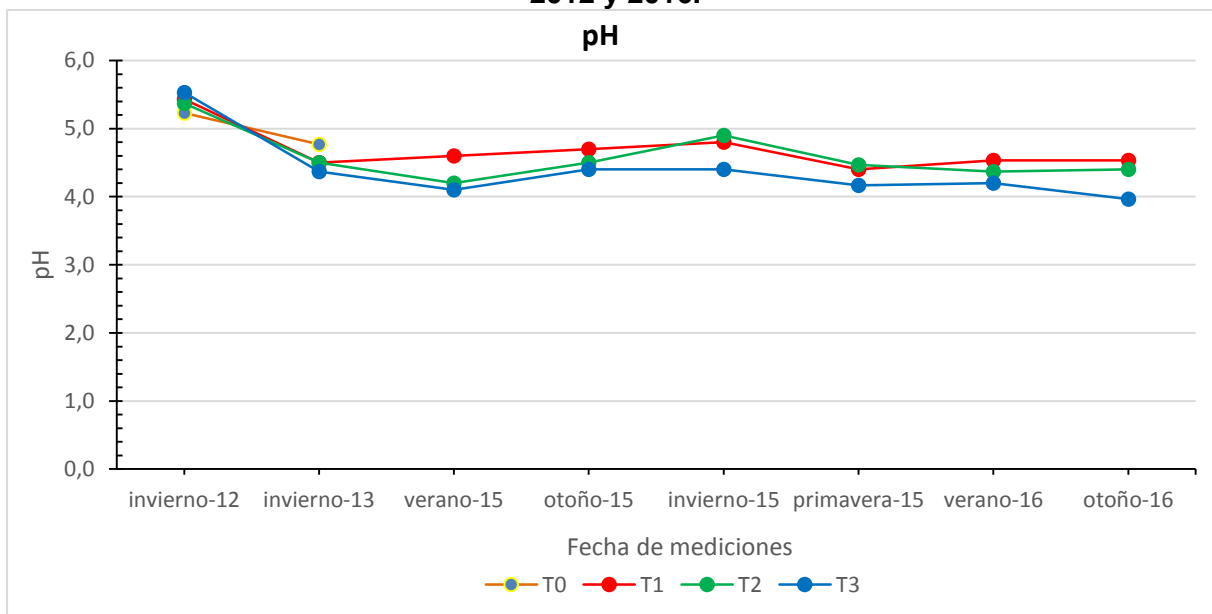
\*sd= Valores utilizados en análisis estadístico corresponden a límite de detección  
Fuente: Arcadis, 2016

A continuación, se presentan gráficos para aquellas propiedades químicas determinadas en el relave en las campañas de muestreo realizadas entre invierno de 2012 y otoño de 2016. Éstas corresponden a:

- pH.
- Conductividad eléctrica.
- Materia orgánica.
- Metales(loides): Arsénico total, hierro total, hierro soluble, manganeso total, y molibdeno total

#### 4.4.1.1 pH

**Gráfico 4.4-4 Seguimiento de pH en sustrato de relaves para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.**



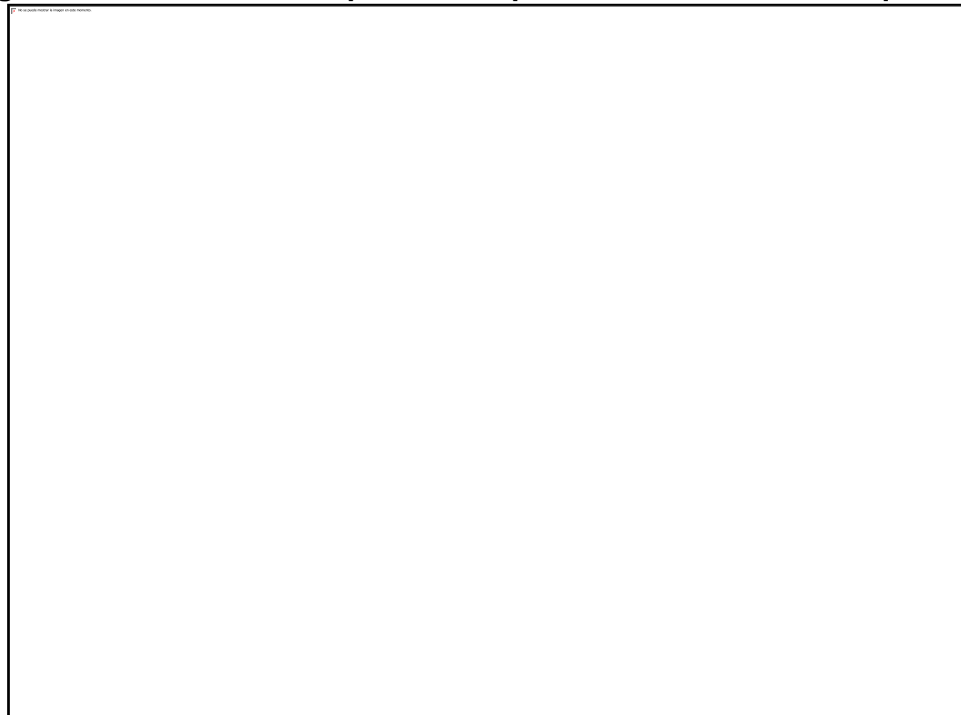
Fuente: Arcadis 2016.

Según se observa en Gráfico 4.4-4, el relave ha experimentado procesos de acidificación desde el establecimiento de las plantas del ensayo. En la línea base del ensayo se observaron valores de pH en el rango de 5,8 – 6,5, los que disminuyeron a un rango de 5,4 – 5,5 en la campaña de invierno de 2012. Posteriormente, según las campañas realizadas entre los años 2013 y 2016, el pH se ha mantenido en valores bajos, alcanzando en la campaña de otoño de 2016 un rango de 4,9 – 4,4. Estos valores de pH son clasificados por la literatura como fuertemente ácidos (Bernier, 2010; Brady y Weil, 2008). Las principales causas que contribuyen al proceso de acidificación del relave corresponden a la oxidación de sulfuros, así como las reacciones de hidrólisis de los elementos hierro y aluminio (Brady y Weil, 2008; Lottermoser, 2010). En menor medida, como proceso natural generador de acidez puede ser considerada la producción de ácido carbónico proveniente de la descomposición de la materia orgánica y respiración de raíces.

La acidez aumenta la biodisponibilidad de elementos traza metálicos en el relave (Figura 4.4-1), favoreciendo el proceso de absorción por las plantas. Si los metales se concentran en niveles altos o tóxicos disminuye la producción de biomasa, lo cual es un efecto contrario a los objetivos de la fitoestabilización. Otro efecto indeseado del pH fuertemente ácido del relave, corresponde a la disminución de la disponibilidad de nutrientes esenciales, tales como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio, por lo que la tendencia de acidificación del relave es indeseada para el cumplimiento de los objetivos del ensayo.

En relación a los tratamientos, para la campaña de otoño de 2016 no se observan diferencias estadísticas para el valor de pH, lo que concuerda con el comportamiento observado en campañas anteriores.

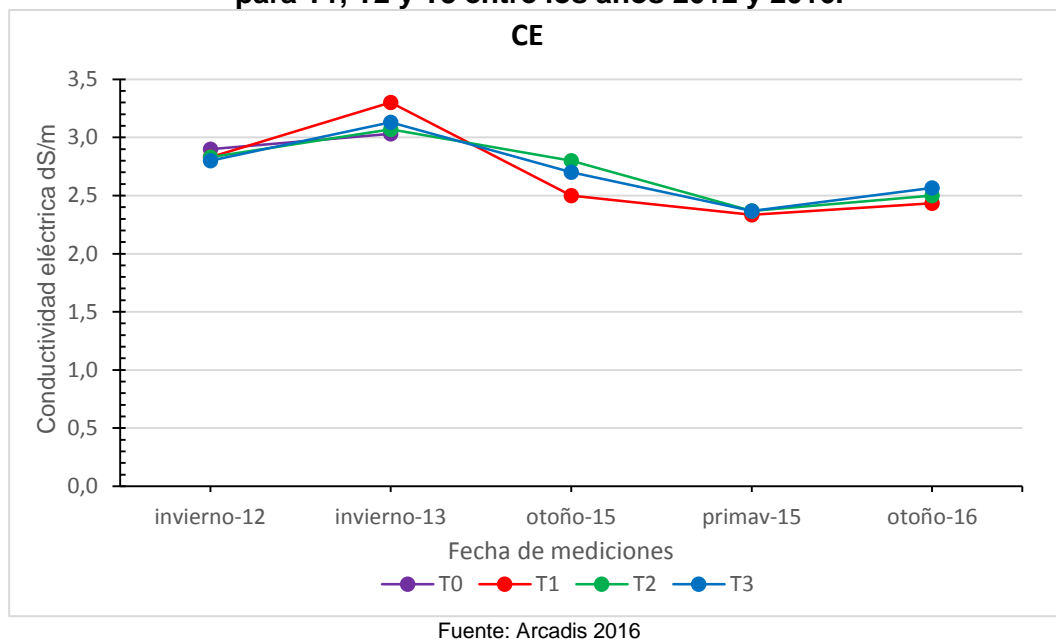
**Figura 4.4-1. Influencia del pH en la disponibilidad de elementos químicos.**



Fuente: Brady And Weil, 2008

#### 4.4.1.2 Conductividad Eléctrica (CE)

**Gráfico 4.4-5. Seguimiento de conductividad eléctrica (dS/m) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.**

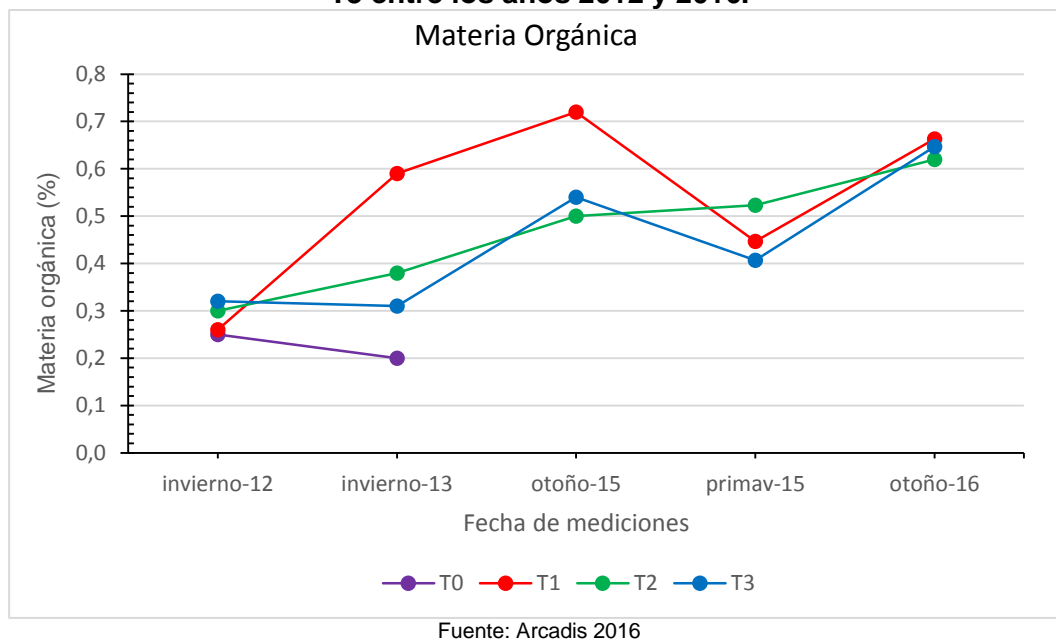


La conductividad eléctrica se ha mantenido relativamente estable durante las campañas de muestreo de los años 2015 y 2016, alcanzando en la campaña de otoño 2016 un rango de 2,4 – 2,6 dS/m, lo que es catalogado por la literatura como ligeramente salino (Jones, 2002). No obstante, las especies utilizadas en el ensayo pueden tolerar estos niveles de salinidad, por lo que no se advierten mayores problemas con este parámetro.

En relación a los tratamientos, para la campaña de otoño de 2015 no se observan diferencias estadísticas para la conductividad eléctrica, lo que concuerda con el comportamiento observado en campañas anteriores.

#### 4.4.1.3 Materia orgánica (%) (MO)

**Gráfico 4.4-6. Seguimiento de materia orgánica (%) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.**

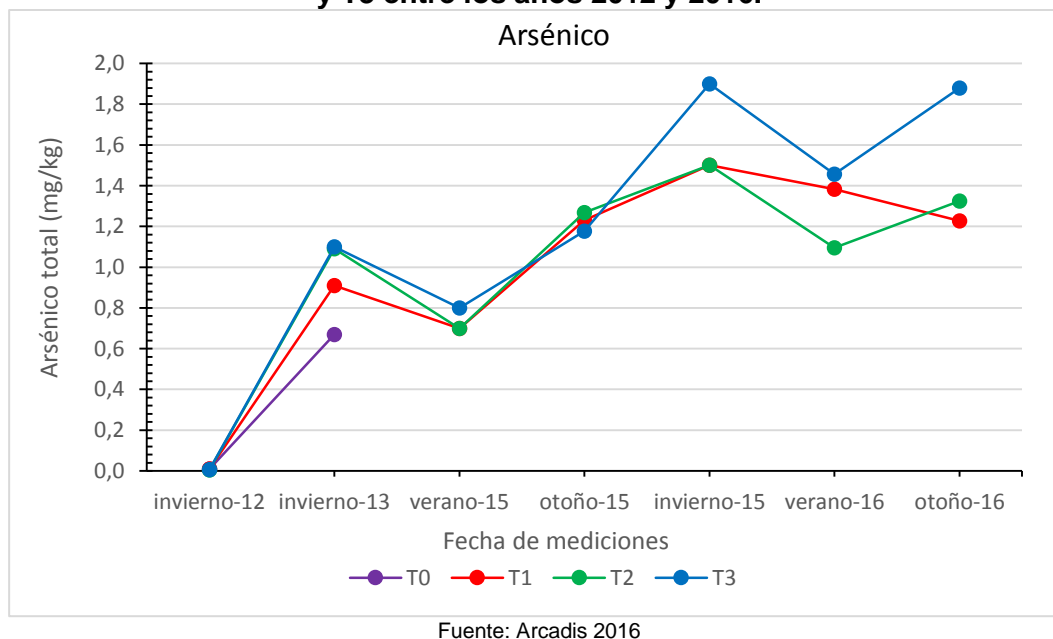


En la primera campaña de muestreo realizada en invierno de 2012 se observaron niveles de materia orgánica en el rango de 0,25% - 0,32%, similares a los determinados en la línea base del ensayo. Posteriormente, en la segunda campaña de seguimiento realizada en otoño de 2013, se observó un moderado aumento en los niveles de materia orgánica para los tratamientos del ensayo, en donde éstos se encontraron en el rango de 0,32% a 0,59%. Desde la campaña de otoño de 2015 hasta la campaña de otoño de 2016 se ha observado una tendencia al aumento en los niveles de materia orgánica en todos los tratamientos del ensayo, alcanzando en otoño de 2016 un rango de 0,6% - 0,7%. Este aumento se relaciona probablemente con la mayor exploración radical de las distintas especies del ensayo, las que luego de 4 años desde el establecimiento han desarrollado un mayor volumen de raíz en el relave, fuera de la casilla de plantación, en comparación con las primeras evaluaciones de invierno de 2012. Cabe destacar que los niveles de materia orgánica observados en el relave son bajos, en comparación con los niveles considerados normales en suelos (nivel bajo en suelo: 0,6-1,5 %; Bernier y Bortolameolli, 2000). No obstante, los bajos niveles de materia orgánica determinados en el relave son esperables, ya que valores promedio típicos para este tipo de sustrato corresponden a 0,31% (Hossner y Shahandeh, 2005).

En relación a los tratamientos, para la campaña de otoño de 2016 no se observan diferencias estadísticas para el contenido de materia orgánica, lo que concuerda con el comportamiento observado en campañas anteriores.

#### 4.4.1.4 Arsénico Total (mg/kg)

**Gráfico 4.4-7. Seguimiento de arsénico total (mg/kg) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.**



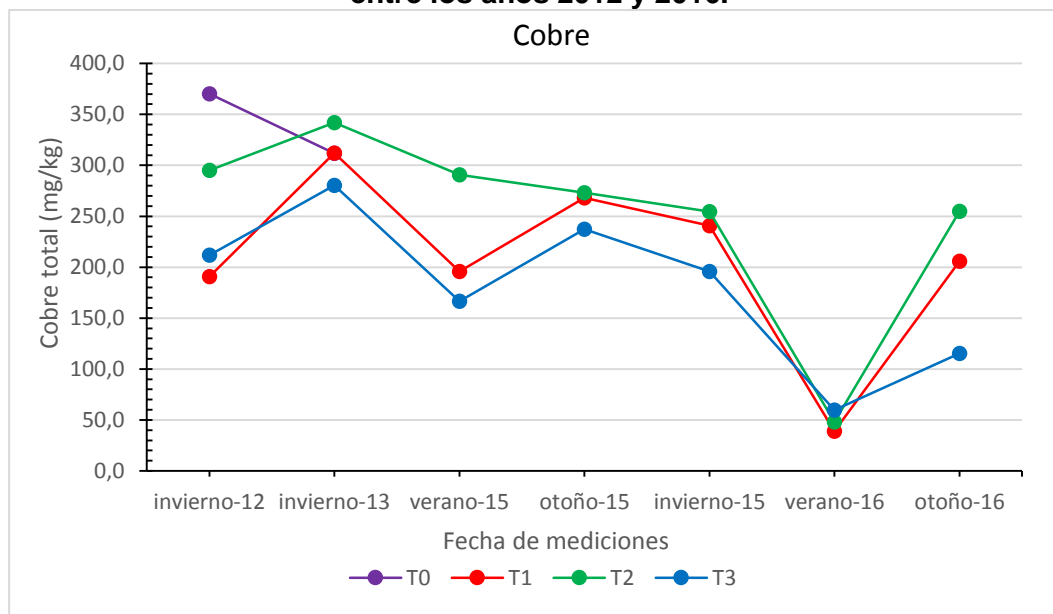
De acuerdo a las evaluaciones realizadas en la línea base del ensayo, así como en la campaña de invierno de 2012, los niveles de arsénico del relave presentaron niveles muy bajos, cercanos al límite de detección de los equipos de medición. De forma posterior, durante las campañas de muestreo realizadas los años 2013, 2015 y 2016 se han observado niveles levemente superiores a los determinados previamente, alcanzando en la campaña de otoño de 2016 un rango de 1,2 – 1,9 mg kg<sup>-1</sup>. Estos niveles son bajos en comparación con aquellos considerados normales en suelos (0 – 30 mg kg<sup>-1</sup>; Acevedo *et al.*, 2005), sin advertir riesgos de toxicidad para las plantas del ensayo.

En relación a los tratamientos, se observa que el tratamiento T3 presenta mayores niveles de arsénico, en comparación con los tratamientos T1 y T2. Sin embargo, aunque este resultado no se observó en campañas anteriores, los niveles son bajos y permiten descartar la importancia a este resultado.



#### 4.4.1.5 Cobre Total (mg/kg)

**Gráfico 4.4-8 Seguimiento de cobre total (mg/kg) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.**



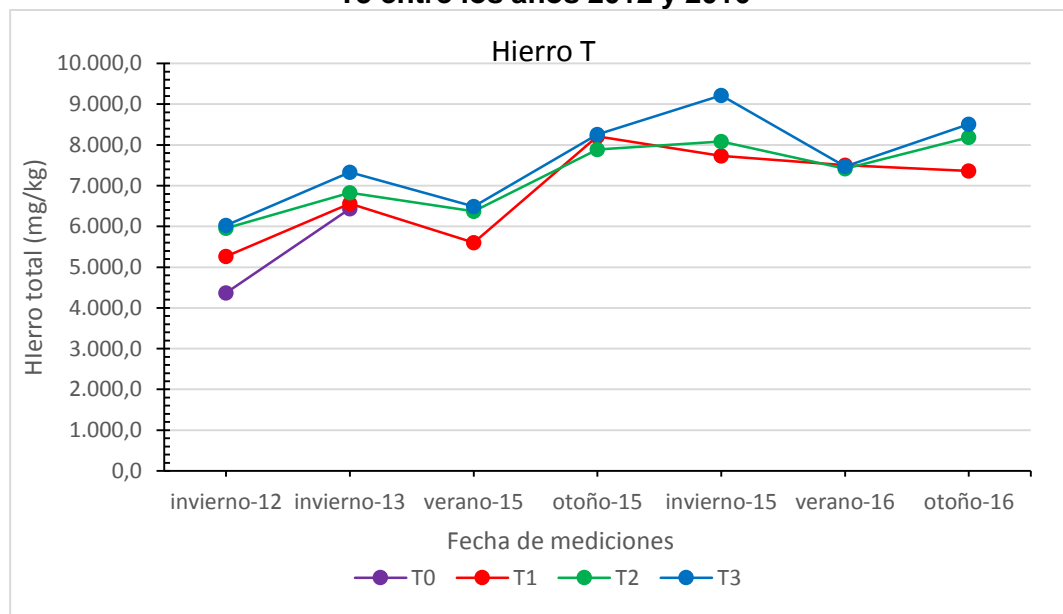
Fuente: Arcadis 2016.

En la campaña de invierno de 2012, los niveles de cobre total determinados para los tratamientos se encontraron en el rango de 190 a 295 mg/kg, mientras que en la campaña de otoño de 2015 los niveles se encontraron en el rango de 237 a 273 mg kg<sup>-1</sup>. En la campaña de otoño de 2016 se observó un rango más amplio de concentración de cobre total, encontrándose en 115 a 255 mg kg<sup>-1</sup>. La variabilidad en los rangos observados en el tiempo son explicados por la propia variabilidad del elemento en el relave. Cabe destacar que estos niveles no advierten riesgos de fitotoxicidad para las plantas del ensayo, ya que según las legislaciones de los países menos exigentes, concentraciones de cobre total mayores a 300-500 mg/kg indican riesgo de contaminación (Serrato *et al.*, 2009). Sin embargo, desde el punto de vista de la disponibilidad de cobre en el relave, es recomendable aumentar el pH del relave para favorecer la precipitación del elemento, ya que en la campaña de otoño de 2016 se observa que la concentración de cobre disponible representa un 18% respecto a la concentración total. Al respecto, Zhang *et al.* (2008) han mencionado en estudios de sedimentos, que cuando la fracción disponible (fracción intercambiable y ligada a carbonatos) de un elemento metálico se encuentra en el rango de 11 – 30%, existe un riesgo ecológico medio.

En relación a los tratamientos, en ninguna de las campañas de muestreo se han observado diferencias estadísticamente significativas para la concentración total de cobre.

#### 4.4.1.6 Hierro Total (mg/kg)

**Gráfico 4.4-9. Seguimiento de hierro total (mg/kg) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016**



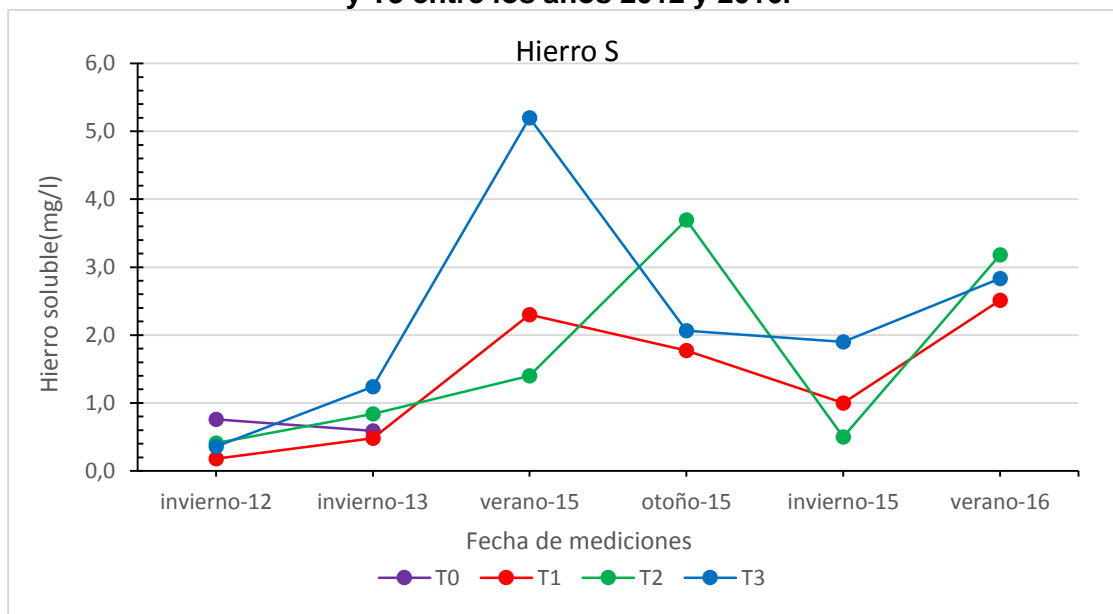
Fuente: Arcadis 2016.

Las concentraciones de hierro total se han incrementado en el tiempo. En la línea base del ensayo, los niveles de hierro total se encontraron en el rango de 5265 a 6030 mg kg<sup>-1</sup> en los tratamientos del ensayo, mientras que en la campaña de otoño de 2016 se observaron concentraciones de hierro total en el rango de 7363 – 8509 mg kg<sup>-1</sup>. Este aumento puede ser atribuido a los aportes de hierro provenientes del agua de riego, siendo detectada su presencia tanto visualmente como mediante análisis de laboratorio (AHK). No obstante, altos niveles de hierro total son comunes en relaves y suelos, no siendo relevante este aumento desde el punto de vista de la fitotoxicidad por hierro para las plantas del ensayo. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que la presencia de hierro en el agua de riego es fuente de acidez, ya que la precipitación del hierro disuelto provoca la liberación de iones hidrógeno mediante hidrólisis (Lottermoser, 2010).

En relación a los tratamientos, para la campaña de Otoño 2016 no se observan diferencias estadísticas para niveles de hierro total.

#### 4.4.1.7 Hierro Soluble (mg/L)

**Gráfico 4.4-10. Seguimiento de hierro soluble (mg/L) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.**



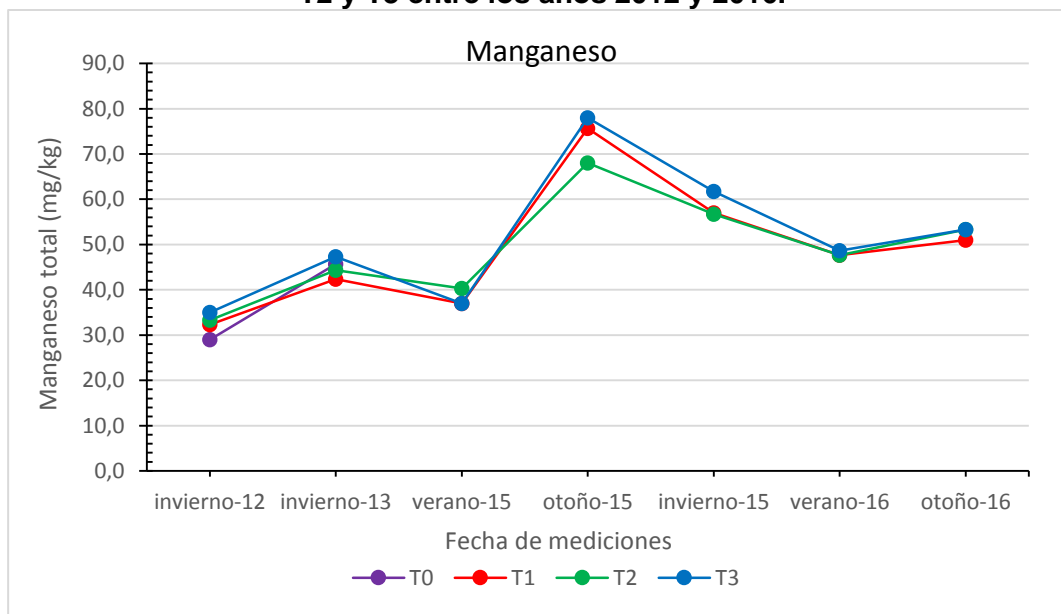
Fuente: Arcadis 2016.

Las concentraciones de hierro soluble han experimentado un aumento desde el inicio del ensayo. Las concentraciones determinadas en Invierno de 2012 se encontraban en el rango de 0,2 - 0,4 mg/L para los tratamientos del ensayo, aumentando progresivamente hasta los niveles actuales, en donde las determinaciones de otoño de 2016 muestran niveles en el rango de 2,5 – 3,2 mg/L. El aumento en los niveles de este parámetro puede ser atribuido a los aportes provenientes del agua de riego, así como también al proceso de acidificación que ha experimentado el relave desde el inicio del ensayo, lo cual aumenta la fracción soluble y biodisponibilidad de hierro para las plantas.

En relación a los tratamientos, en ninguna de las campañas de muestreo se han observado diferencias estadísticamente significativas para hierro soluble.

#### 4.4.1.8 Manganeseo total (mg/kg)

**Gráfico 4.4-11. Seguimiento de Manganeseo total (mg/kg) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.**



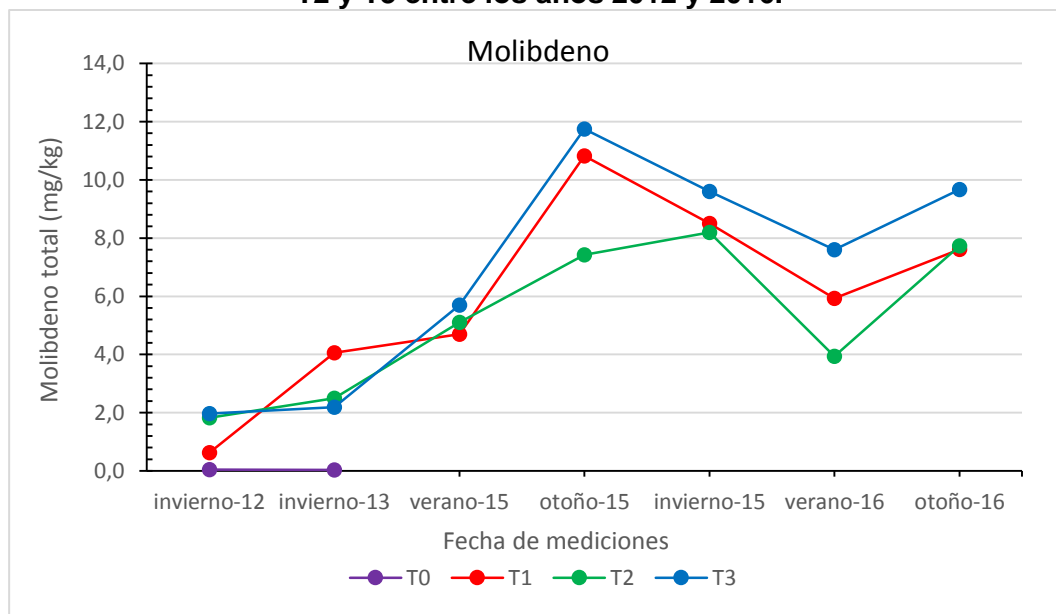
Fuente: Arcadis 2016.

Los niveles de manganeseo total han experimentando un ligero aumento desde el establecimiento del ensayo. En la campaña de invierno de 2012, las concentraciones observadas se encontraron en el rango de 32 a 35 mg/kg. Posteriormente, en la campaña de otoño de 2015, se observaron concentraciones de manganeseo total en el rango de 68 – 78 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que en la campaña de otoño de 2016, las concentraciones de manganeseo total se encontraron en el rango de 51 – 53 mg kg<sup>-1</sup>. Estos niveles de manganeseo total en el relave son bajos, en comparación a las concentraciones que son habituales de encontrar en suelos (<500 mg/kg, Acevedo et al., 2005).

En relación a los tratamientos, en ninguna de las campañas de muestreo se han observado diferencias estadísticamente significativas para los niveles de manganeseo.

#### 4.4.1.9 Molibdeno total (mg/kg)

**Gráfico 4.4-12. Seguimiento de Molibdeno total (mg/kg) en sustrato de relave para T1, T2 y T3 entre los años 2012 y 2016.**



Fuente: Arcadis 2016.

Las concentraciones de molibdeno total han experimentado un aumento a lo largo del tiempo. En la campaña de invierno de 2012, las concentraciones de molibdeno total no sobrepasaron  $2 \text{ mg kg}^{-1}$ , mientras que en la campaña de otoño de 2015 se observaron concentraciones en un rango de  $7,4 - 11,8 \text{ mg kg}^{-1}$ . Estos resultados son similares a los determinados en la campaña de otoño de 2016, en donde se encontraron concentraciones de molibdeno total en el rango de  $7,6 - 9,7 \text{ mg kg}^{-1}$ . Considerando que en suelos, un alto nivel de molibdeno total corresponde a concentraciones mayores a  $24 \text{ mg/kg}$  (Kabata-Pendias, 2011), las concentraciones encontradas en el relave siguen siendo normales, no advirtiendo riesgo de toxicidad para las plantas del ensayo.

En relación a los tratamientos, en ninguna de las campañas de muestreo se han observado diferencias estadísticamente significativas para los niveles de molibdeno.

#### 4.4.2 Seguimiento de tejido foliar

En la **Tabla 4.4-3** se presentan los resultados de análisis foliar de las 7 especies vegetales muestreadas en otoño de 2016. Adicionalmente, de forma comparativa, en Tabla 4.4-4 y Tabla 4.4-5 se presentan los resultados de análisis foliar realizado en otoño de 2015 de las mismas 7 especies vegetales, así como los resultados de la campaña de otoño de 2013, en donde se muestran resultados de análisis foliar de 10 especies.

El análisis estadístico entre tratamientos fue efectuado para los análisis foliares de otoño de 2016. Este análisis estadístico es representado por el valor P de la **Tabla 4.4-3** y muestra que en la mayoría de los casos no existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, debido a que el valor P es mayor 5%. En general, los casos que muestran diferencias estadísticas entre tratamientos (ej.: Quillay para fósforo y potasio, Romero para cobre y Zinc) no han presentado una tendencia clara durante el transcurso del ensayo, sin ser posible atribuir estos resultados al efecto de los tratamientos.

En relación a la condición nutricional de las especies del ensayo, en el muestreo de otoño de 2016 se observan niveles de nitrógeno adecuados para la mayoría de las especies, con excepción de la especie Quillay, la que presentó valores menores a 1% para el tratamiento T3. En relación a los niveles de fósforo, todas las especies muestran bajos niveles de este elemento, en referencia a los niveles recomendados por la literatura para la mayoría de las especies, los que oscilan entre 0,3 a 0,5% (la excepción es el pimiento). En el caso del potasio, los niveles adecuados de acuerdo a bibliografía es de 2 a 5% (Havlin *et al.*, 2014; Kabata-Pendias, 2011), por lo que se encuentra deficitario en *Acacia saligna*, Algarrobo, Espino y Huingán.

Respecto a los elementos traza metálicos, en general, no se encuentran en concentraciones que puedan considerarse tóxicas o excesivas, salvo en casos particulares encontrados para los elementos cobre y molibdeno, los que son discutidos posteriormente.

**Tabla 4.4-3. Resultados de análisis foliar realizado en otoño de 2016.**

Especie	Tratamiento	N (%)	P (%)	K (%)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Acacia	T1	3,00	0,13	1,27	0,21	0,00	140,33	0,04	0,14	38,00	239,67	0,82	14,00
	T2	2,99	0,13	1,28	0,21	0,00	79,67	0,06	0,13	33,00	198,33	1,23	20,67
	T3	3,01	0,13	1,35	0,19	0,00	106,33	0,07	0,13	32,67	234,00	0,85	18,67
	Valor P (%)	44,44	99,99	79,01	82,64	**	4,94	52,89	75,11	82,64	44,44	4,94	36,73
Algarrobo	T1	3,06	0,16	1,36	0,12	0,00	45,33	0,06	0,21	50,00	151,00	0,89	15,67
	T2	3,07	0,15	1,54	0,29	0,00	23,67	0,04	0,16	54,67	174,33	1,04	17,33
	T3	3,36	0,17	1,45	0,12	0,00	35,00	0,03	0,17	53,00	178,33	0,94	17,67
	Valor P (%)	44,44	13,22	79,01	44,44	**	36,73	44,44	93,44	44,44	79,01	100,00	32,11
Espino	T1	3,22	0,21	0,93	0,58	0,00	12,00	0,01	0,35	57,33	68,67	0,78	20,33
	T2	3,29	0,21	0,93	0,61	0,00	12,00	0,03	0,36	58,33	42,67	0,85	21,33
	T3	3,34	0,20	0,92	0,52	0,00	10,67	0,02	0,36	58,33	70,33	1,04	19,00
	Valor P (%)	82,64	44,44	79,01	79,01	**	13,22	4,94	36,73	100,00	4,94	79,01	14,51
Huingán	T1	1,15	0,24	1,16	0,35	0,00	5,00	0,22	0,19	18,67	272,00	0,81	18,67
	T2	1,15	0,26	1,26	0,40	0,00	4,33	0,14	0,21	20,67	147,67	0,83	23,00
	T3	1,66	0,24	1,18	0,24	0,00	4,00	0,09	0,21	19,00	150,00	0,81	20,67
	Valor P (%)	79,01	79,01	52,89	79,01	**	62,08	79,01	79,01	25,00	44,44	79,01	30,86
Pimiento	T1	2,08	0,80	2,46	0,33	0,00	4,33	0,15	0,22	22,33	196,67	1,06	32,00
	T2	2,33	0,86	2,69	0,19	0,00	5,00	0,16	0,23	21,33	213,33	0,97	31,67
	T3	2,46	0,63	2,19	0,16	0,00	2,67	0,08	0,21	22,00	246,33	1,08	26,67
	Valor P (%)	100,00	30,86	<0,01	44,44	**	30,86	4,94	18,00	82,64	44,44	79,01	3,31
Quillay	T1	1,46	0,16	2,09	0,45	0,00	9,67	0,03	0,13	5,67	98,67	0,88	5,67
	T2	1,61	0,24	2,00	0,25	0,00	9,00	0,01	0,17	6,33	94,33	0,74	7,33
	T3	0,80	0,17	2,25	0,25	0,00	7,67	0,01	0,13	6,67	67,67	0,91	6,00
	Valor P (%)	36,73	4,94	4,94	44,44	**	44,44	44,44	58,78	75,11	30,86	79,01	14,51
Romero	T1	1,43	0,20	2,36	0,20	0,00	7,00	1,08	0,20	30,33	88,33	1,02	39,00
	T2	1,51	0,21	2,42	0,35	0,00	5,67	0,57	0,23	33,00	74,67	0,98	60,33
	T3	1,94	0,19	2,25	0,29	0,00	6,00	0,68	0,24	29,67	86,67	0,97	43,33
	Valor P (%)	79,01	58,78	30,86	44,44	**	62,08	4,94	82,64	0,37	13,22	100,00	4,94

\*Valor P en porcentaje (%) correspondiente a prueba estadística de *Friedman* (n=3,  $\alpha=5\%$ )

\*\* Valores corresponden a límite de detección.

Fuente: Arcadis 2016.



**Tabla 4.4-4. Resultados de análisis foliar realizado en otoño de 2015.**

Especie	N (%)	P (%)	K (%)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Acacia Saligna	2,72	0,11	1,11	0,57	0,00	123,22	0,07	0,31	39,00	386,33	0,79	17,67
	2,91	0,12	1,19	0,04	0,00	96,80	0,08	0,36	34,00	444,00	0,24	24,67
	2,68	0,11	1,08	1,09	0,00	105,39	0,03	0,27	38,67	424,33	0,39	15,00
Valor P (%)	4,94	30,86	30,86	62,08	**	4,94	25,00	94,03	100,00	79,01	79,01	4,94
Algarrobo	2,69	0,12	1,64	0,23	0,00	53,93	0,05	0,37	64,67	361,67	0,47	19,00
	2,77	0,13	1,63	0,72	0,00	44,66	0,05	0,36	63,00	319,67	0,41	15,33
	2,84	0,13	1,51	0,68	0,00	47,81	0,03	0,62	75,33	382,33	0,31	15,67
Valor P (%)	44,44	75,11	44,44	52,89	**	79,01	36,73	79,01	4,94	79,01	62,08	82,64
Espino	3,19	0,18	1,01	0,11	0,00	14,08	0,03	0,42	29,00	91,33	0,29	15,33
	3,29	0,19	1,04	0,09	0,00	12,40	0,02	0,37	30,33	86,67	0,47	20,33
	2,93	0,18	0,99	0,35	0,00	11,57	0,02	0,41	32,33	95,33	0,67	17,33
Valor P (%)	4,94	30,86	4,94	58,78	**	79,01	44,44	79,01	79,01	79,01	0,01	4,94
Huingán	1,24	0,25	1,39	0,27	0,00	3,63	0,12	0,35	17,00	158,33	0,36	14,67
	1,32	0,26	1,33	0,06	0,00	2,81	0,07	0,25	18,67	161,00	0,27	20,33
	1,26	0,24	1,31	0,02	0,00	2,58	0,09	0,31	17,33	166,67	0,35	17,00
Valor P (%)	79,01	30,86	79,01	32,11	**	4,94	30,86	79,01	18,00	100,00	79,01	13,22
Pimiento	1,76	0,66	2,41	1,41	0,00	5,56	0,08	0,80	20,67	291,67	0,42	22,00
	1,98	0,56	2,49	0,49	0,00	4,25	0,09	0,69	21,67	404,00	0,27	23,33
	1,99	0,52	2,39	0,72	0,00	3,11	0,09	0,41	21,67	333,33	0,34	21,67
Valor P (%)	79,01	44,44	79,01	79,01	**	4,94	75,11	30,86	79,01	100,00	52,89	79,01
Quillay	0,89	0,14	2,13	0,57	0,00	7,01	0,02	0,47	3,33	117,33	0,21	4,67
	0,88	0,17	2,06	0,79	0,00	8,31	0,02	0,64	3,67	103,33	0,08	4,33
	0,91	0,16	2,21	0,44	0,00	6,87	0,05	0,92	3,33	105,33	0,36	4,33
Valor P (%)	79,01	62,08	4,94	62,08	**	79,01	11,11	18,00	79,01	79,01	0,37	82,64
Romero	1,17	0,13	1,75	0,45	0,00	13,22	0,51	0,62	24,33	201,00	0,49	37,67
	1,29	0,15	1,93	0,62	0,00	10,20	0,64	0,44	26,33	156,33	0,35	63,33
	1,30	0,14	1,87	0,69	0,00	15,30	0,73	0,31	24,33	192,33	0,22	37,67
Valor P (%)	4,94	0,37	44,44	79,01	**	79,01	30,86	30,86	13,22	79,01	79,01	4,94

\*Valor P en porcentaje (%) correspondiente a prueba estadística de *Friedman* (n=3,  $\alpha=5\%$ )

\*\* Valores corresponden a límite de detección.

Fuente: Arcadis 2016

**Tabla 4.4-5. Resultados de análisis foliar realizado en otoño de 2013.**

Especie	Tratamiento	N (%)	P (%)	K (%)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
<i>Acacia saligna</i>	T1	2,53	0,09	1,33	0,00	0,00	270,53	0,02	0,16	33,33	261,67	0,07	6,33
	T2	2,7	0,10	1,37	0,00	0,00	227,73	0,06	0,37	41,33	270	0,11	18,67
	T3	2,7	0,09	1,4	0,00	0,00	223,83	0,04	0,51	38,67	289,33	0,31	9
Algarrobo	T1	2,87	0,17	2,18	0,00	0,00	106,57	0,08	0,18	36	200	0,14	10,33
	T2	3,52	0,18	2,33	0,00	0,00	90,47	0,06	0,15	46,33	208	0,41	26,67
	T3	3,35	0,17	2,43	0,00	0,00	81,03	0,06	0,28	45,33	265	0,44	14
Espino	T1	4,17	0,27	1,48	0,00	0,00	22,57	0,06	1,28	22	80	0,42	19,33
	T2	4,32	0,3	1,64	0,00	0,00	12,53	0,03	0,75	18,67	57,67	0,22	29,67
	T3	4,11	0,28	1,54	0,00	0,00	13,33	0,03	0,94	22	81	0,27	19,67
Huingán	T1	1,83	0,18	1,26	0,00	0,00	11	0,07	0,3	20,67	187,67	0,3	11
	T2	1,94	0,21	1,36	0,00	0,00	6,12	0,04	0,24	20,33	206,33	0,48	18,67
	T3	1,94	0,2	1,41	0,00	0,00	6,97	0,07	0,35	20,67	182,33	0,25	13
Litre	T1	1,5	0,19	2,11	0,00	0,00	6,87	0,07	0,64	10	153,67	0,27	8,67
	T2	1,43	0,3	2,64	0,00	0,00	8,83	0,05	0,24	10	92	0,32	13,33
	T3	1,39	0,19	2,29	0,00	0,00	5,6	0,05	0,5	10	269,33	0,52	7,33
Maitén	T1	2,41	0,32	1,65	0,00	0,00	4,53	0,29	0,68	17	161	0,48	30,67
	T2	2,18	0,33	1,77	0,00	0,00	5,23	0,17	0,15	16,67	93,67	0,33	64
	T3	2,36	0,32	1,7	0,00	0,00	4,77	0,27	0,45	15,67	146,33	0,13	28,33
Pimiento	T1	2,42	0,31	2,43	0,00	0,00	15	0,12	0,4	18,33	267,33	0,1	9,67
	T2	2,1	0,25	2,47	0,00	0,00	11,17	0,04	0,41	16	357,67	0,3	10
	T3	2,8	0,24	2,69	0,00	0,00	12	0,07	0,29	19	349,33	0,07	9,67
Quillay	T1	1,91	0,21	2,54	0,00	0,00	8,03	0,08	0,35	6	109,67	0,47	10,33
	T2	1,87	0,25	2,56	0,00	0,00	8,23	0,05	0,53	5,67	74,33	0,17	16
	T3	1,94	0,2	2,39	0,00	0,00	8,73	0,05	0,49	6	100,67	0,26	12
Quilo	T1	3,08	0,21	3,1	0,00	0,00	18,7	0,1	0,07	34,67	306,67	0,14	36,33
	T2	2,92	0,22	3,06	0,00	0,00	8,17	0,07	0,16	39,67	251,33	0,24	45,33
	T3	2,7	0,2	2,88	0,00	0,008	10,97	0,09	0,52	24,67	278	0,25	45
Romero	T1	1,84	0,17	2,28	0,00	0,00	22,67	0,31	0,23	17,67	206,33	0,18	16,67
	T2	1,75	0,17	2,33	0,00	0,00	16,97	0,26	0,1	17,33	191,67	0,23	24,67
	T3	1,8	0,16	2,24	0,00	0,00	22,5	0,28	0,39	17,67	210	0,19	18,33

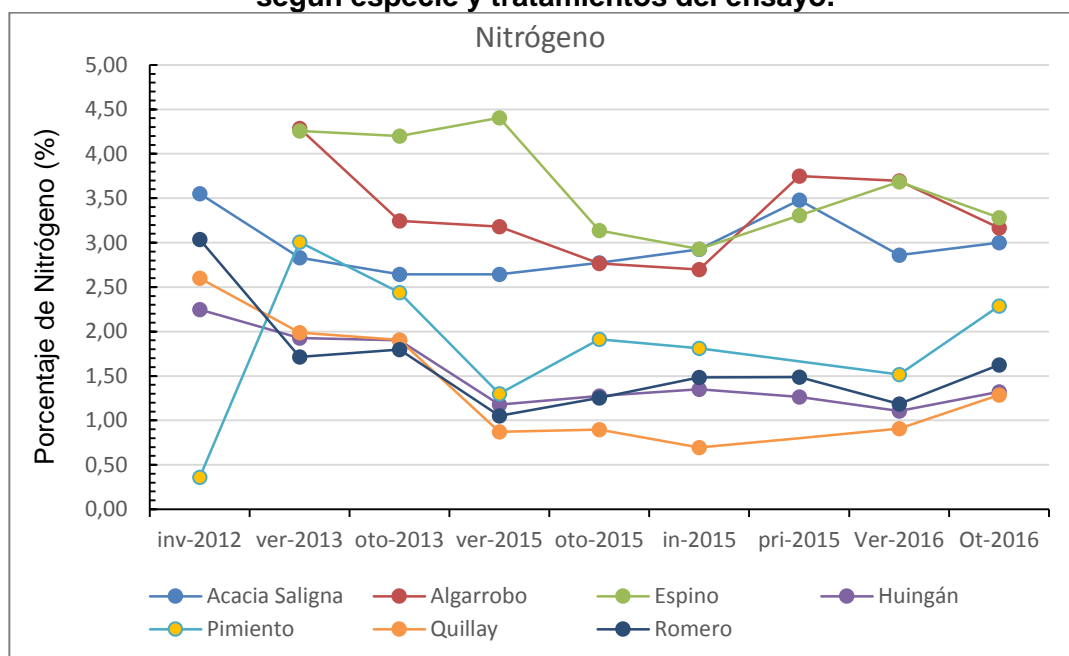
Fuente: SKM, 2013

A continuación, se presentan gráficos para aquellos elementos químicos determinados en las distintas especies de plantas entre las campañas de invierno de 2012 y otoño de 2016. También, se incorpora la información promedio de los datos obtenidos de plantas adultas del entorno (primavera-verano 2012) que se comparan con las concentraciones de los ejemplares muestreados en el año 2016.

- Nitrógeno, fósforo y potasio
- Metales (loides): Arsénico, cadmio, cromo, cobre, manganeso, mercurio, molibdeno, plomo y zinc

#### 4.4.2.1 Nitrógeno (%)

**Gráfico 4.4-13. Concentración de nitrógeno (%) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



Fuente: Arcadis 2016.

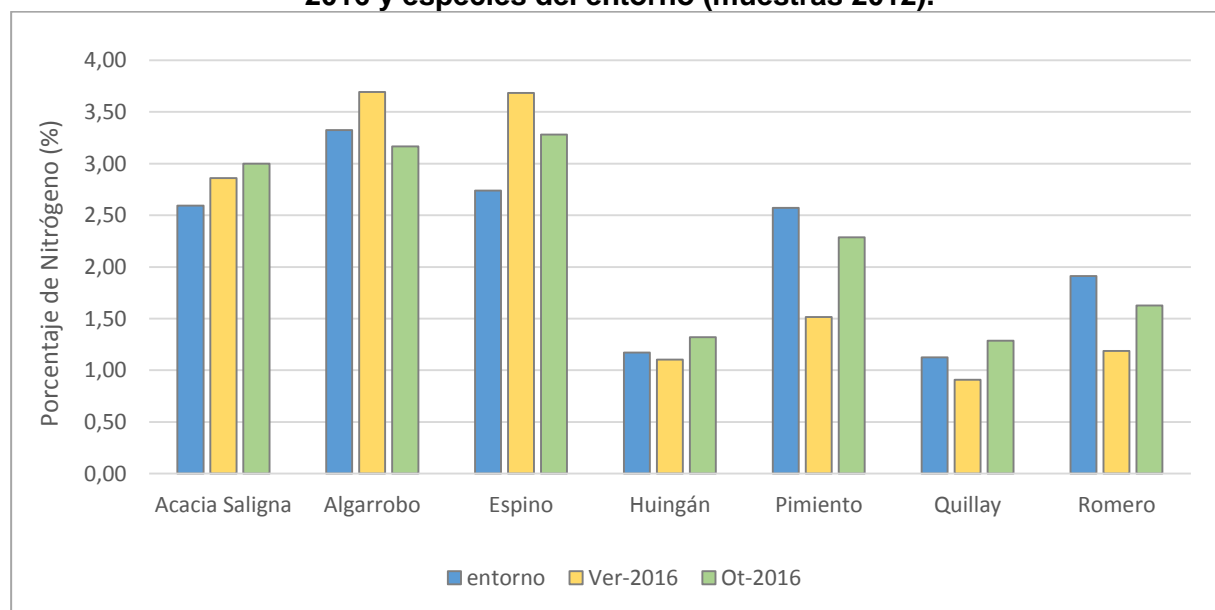
Los niveles de nitrógeno foliar se han mantenido relativamente estables en las especies *Acacia saligna*, *Algarrobo*, *Espino* y *Pimiento*, mientras que las especies *Huigán*, *Quillay* y *Romero* han experimentado un leve descenso en los niveles de nitrógeno desde el establecimiento desde las campañas de muestreo del año 2013 hasta la campaña de otoño de 2016.

En la campaña de otoño de 2016 se destacan las altas concentraciones de nitrógeno de las especies *Acacia saligna*, *Algarrobo* y *Espino*, respecto al resto de las especies, resultado que concuerda con las campañas de muestreo realizadas en otoño de 2015 y otoño de 2013. Este comportamiento es esperable debido a que estas especies son de tipo leguminosas, por lo

que tienen la capacidad de fijar el nitrógeno atmosférico y presentar niveles más altos de nitrógeno foliar en comparación a especies de tipo no leguminosas, en condiciones de baja disponibilidad del elemento. En general, los niveles de nitrógeno observados para las especies del ensayo son adecuados, indicando que no existen deficiencias nutricionales de nitrógeno en la mayoría de las especies. Sin embargo, la especie Quillay ha presentado los niveles más bajos de nitrógeno foliar, alcanzando en la campaña de otoño de 2016 niveles menores a 1% en el tratamiento T3.

En relación a los tratamientos, no se observan diferencias significativas en ninguna de las especies del ensayo. Este resultado difiere al observado en la campaña de otoño de 2015, en donde las especies *Acacia saligna*, Espino y Romero presentaron mayores niveles de nitrógeno para el tratamiento T2. Sin embargo, los resultados de la campaña de otoño de 2016 permiten descartar la importancia de las diferencias estadísticas observadas entre tratamientos durante la campaña de otoño de 2015.

**Gráfico 4.4-14. Concentración de nitrógeno (%) de las especies muestreadas el año 2016 y especies del entorno (muestras 2012).**

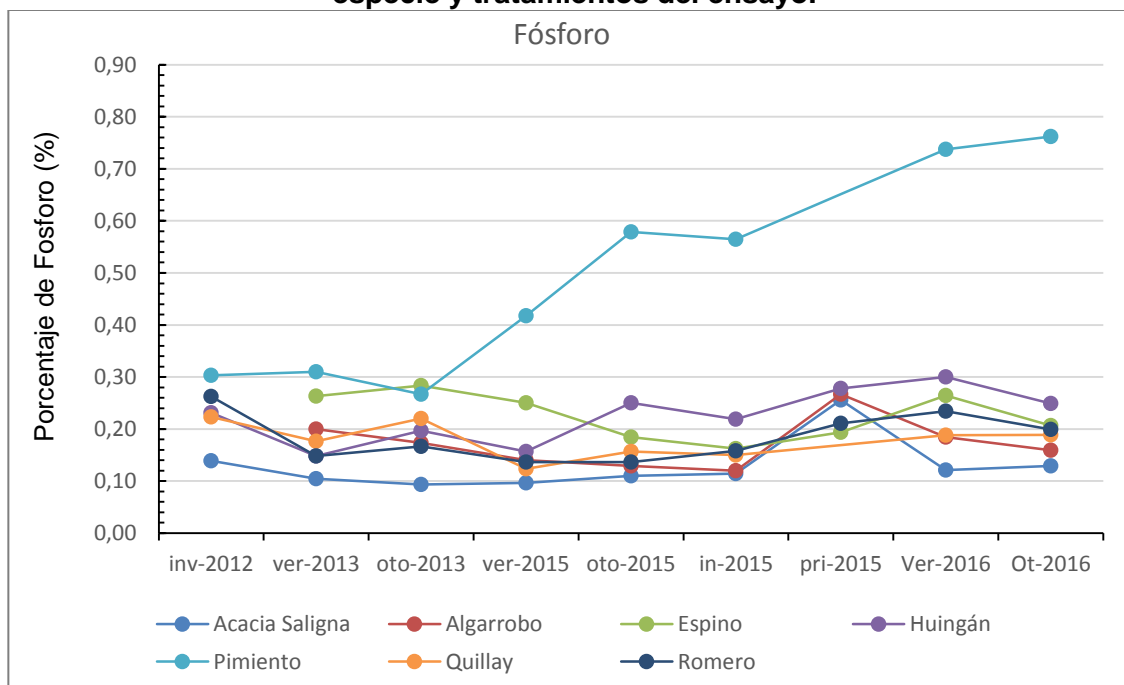


Fuente: Arcadis 2016.

Por otro lado, la mayoría de las especies presentó niveles de nitrógeno foliar similares a los determinados en plantas del entorno (línea base del ensayo en verano de 2012) (ver **Gráfico 4.4-14**), con excepción de las especies *Acacia saligna* y Espino, las que en otoño de 2016 presentaron niveles de nitrógeno foliar levemente superiores, en comparación con los niveles en plantas del entorno. Por otro lado, en la campaña de otoño de 2016, la especie Pimiento presentó menores niveles de nitrógeno foliar, en comparación con los niveles determinados en plantas del entorno, sin encontrarse en el rango de deficiencia (niveles de nitrógeno foliar menores a 1%).

#### 4.4.2.2 Fósforo (%)

**Gráfico 4.4-15. Porcentaje de fósforo (%) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



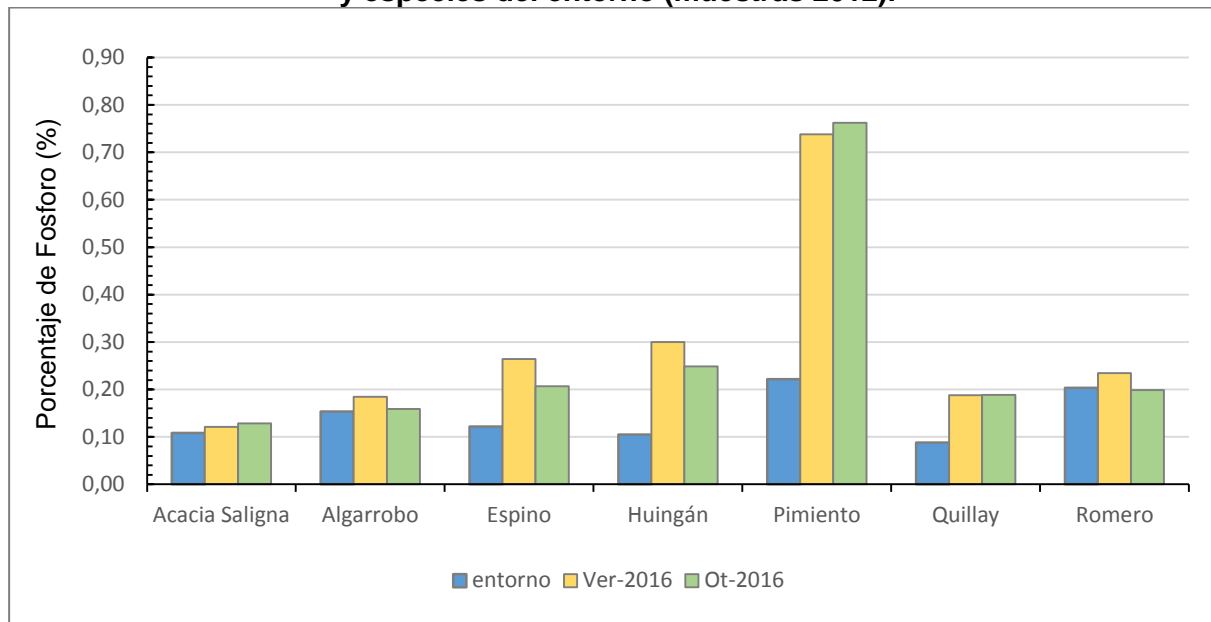
Fuente: Arcadis 2016.

Según se muestra en Gráfico 4.4-15, la concentración de fósforo en el tejido foliar de la mayoría de las especies se ha mantenido constante desde el establecimiento del ensayo, con excepción de la especie Pimiento, la que ha mostrado un aumento sostenido de los niveles de fósforo foliar, alcanzando en la temporada de otoño de 2016 un promedio de 0,76%, lo que concuerda con las tendencias observadas con las campañas de muestreo de otoño de 2015. Este comportamiento puede ser atribuido a una mayor exploración radical en el relave, ya que el suministro de este elemento depende tanto de los niveles de disponibilidad como de la capacidad de exploración radical de las especies.

Respecto al estado nutricional de las plantas del ensayo, la literatura establece que los niveles adecuados de fósforo para las plantas se encuentran entre 0,3% y 0,5% (Kabata-Pendias, 2011), por lo que la mayoría de las especies, con excepción de Pimiento, se encontrarían con niveles deficientes de este elemento.

En relación a los tratamientos, no se observan diferencias estadísticamente significativas en la campaña de muestreo de 2016 para fósforo, situación que concuerda con los muestreos realizados en campañas anteriores. Una excepción a lo anterior se observó en la especie Quillay, en donde el tratamiento T2 presentó mayores niveles de fósforo foliar. Sin embargo, este resultado no ha sido observado en campañas de muestreo previas, no siendo posible afirmar un efecto del T2 sobre el nivel de fósforo foliar.

**Gráfico 4.4-16. Concentración de Fósforo (%) de las especies muestreadas el año 2016 y especies del entorno (muestras 2012).**

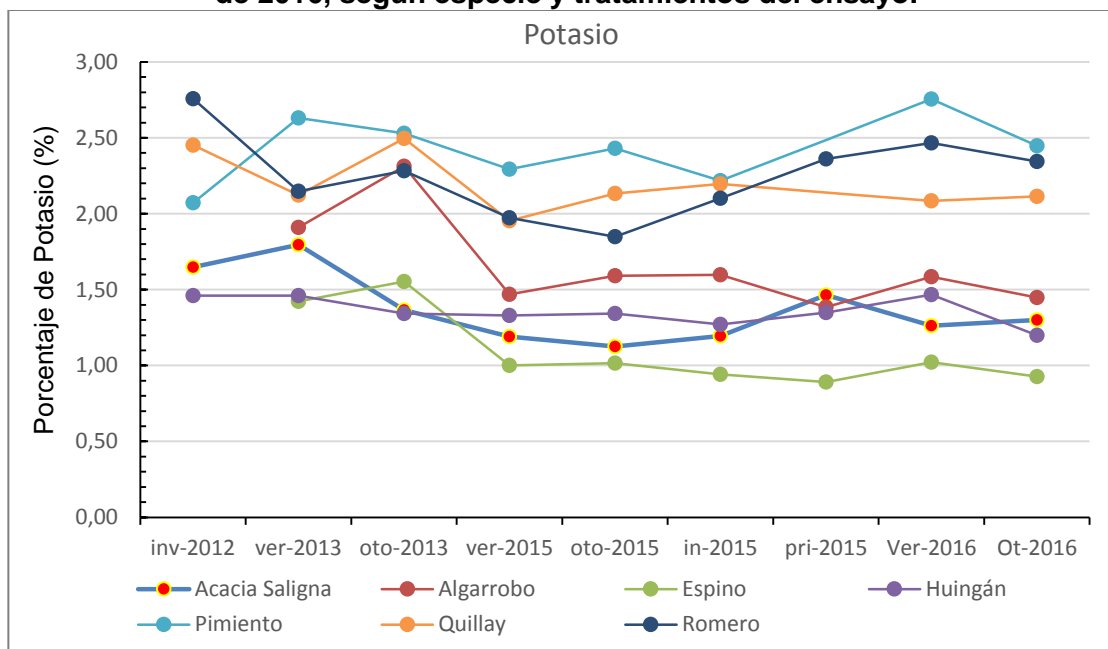


Fuente: Arcadis 2016.

Por otro lado, en otoño de 2016, la mayoría de las plantas del ensayo, presentaron niveles de fósforo foliar similares a los determinados en plantas del entorno (línea base del ensayo), con excepción de la especie Pimiento, la que presentó niveles de fosforo foliar superiores en las plantas del ensayo (promedio: 0,76%), en comparación con los niveles de la línea base (promedio: 0,20%).

#### 4.4.2.3 Potasio (%)

**Gráfico 4.4-17. Porcentaje de potasio en tejido foliar (%) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



Fuente: Arcadis 2016.

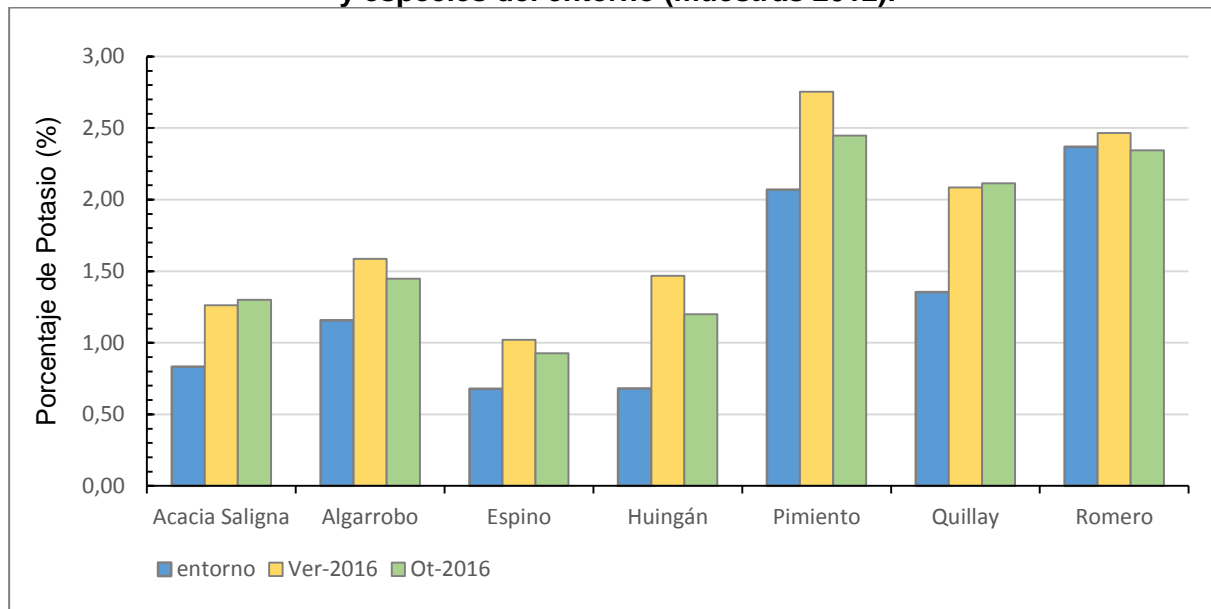
Durante el transcurso del ensayo, las especies que han presentado los niveles de potasio más altos corresponden a Pimiento, Quillay y Romero, mientras que los niveles más bajos de potasio se han observado para las especies *Acacia saligna* y Espino. Considerando que los niveles normales de potasio para las plantas se encuentran entre 2% a 5%, la mayoría de las especies presentan niveles deficientes de este elemento según las determinaciones de otoño de 2015, con excepción de Pimiento, Quillay y Romero, las que se encuentran en niveles adecuados.

Al comparar las campañas de muestreo de otoño de 2015 y otoño de 2016, se observan niveles similares de potasio foliar en la mayoría de las especies del ensayo. No obstante, la especie Romero ha experimentado un aumento promedio de 1,85 a 2,34%, superando el umbral de deficiencia de potasio (2%).

En relación a los tratamientos, el análisis estadístico para potasio mostró valores P menores al 5% en las especies Pimiento y Quillay. En el caso de la especie Pimiento, se observó una mayor concentración de potasio foliar para el tratamiento T2, mientras que en la especie Quillay la mayor concentración fue observada en el tratamiento T3. Según estos resultados, no existe una tendencia clara respecto a un aumento o disminución de los niveles de potasio foliar producto de la aplicación de los tratamientos. Considerando que, en campañas anteriores, los resultados de análisis estadísticos han sido variables, es posible descartar la importancia de las diferencias estadísticas observadas en la campaña de otoño de 2016.



**Gráfico 4.4-18. Concentración de Potasio (%) de las especies muestreadas el año 2016 y especies del entorno (muestras 2012).**

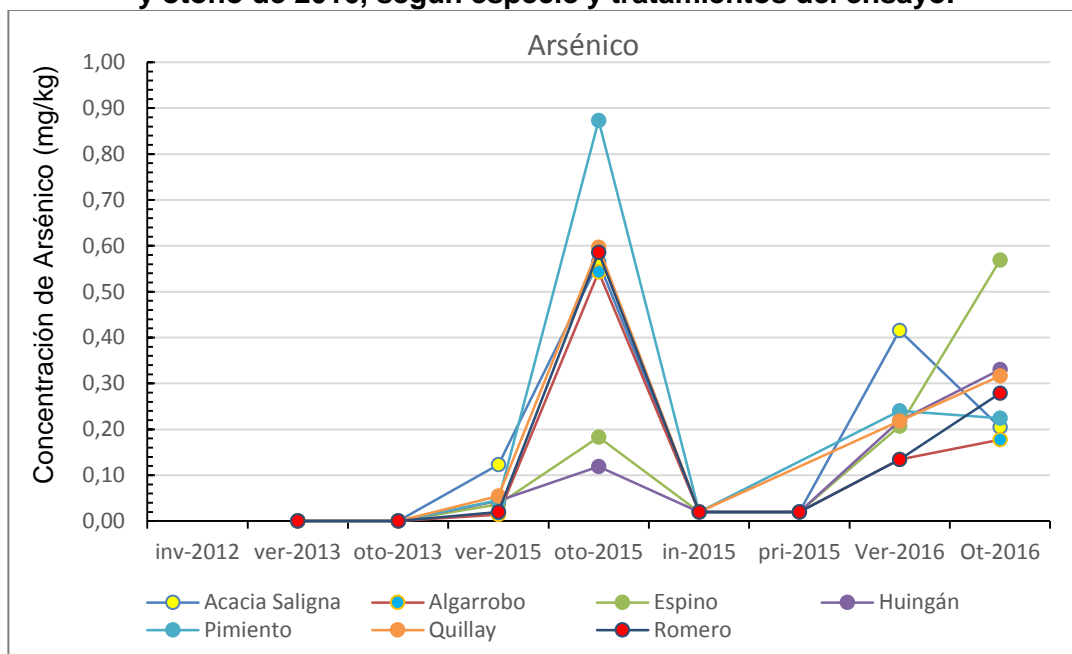


Fuente: Arcadis 2016.

En la campaña de otoño de 2016, los niveles de potasio foliar en todas las especies del ensayo fueron más altos que los observados en plantas del entorno (ver Gráfico 4.4-18), correspondientes a la línea base del ensayo (verano de 2012). En este sentido, las especies Acacia saligna, Huingán y Quillay presentaron las mayores diferencias, ya que en las plantas del ensayo se observaron niveles de potasio foliar que sobrepasan en un rango de 0,3% - 0,4% los niveles determinados en la línea base del ensayo.

#### 4.4.2.4 Arsénico (mg/kg)

**Gráfico 4.4-19 . Concentración de arsénico en tejido foliar (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



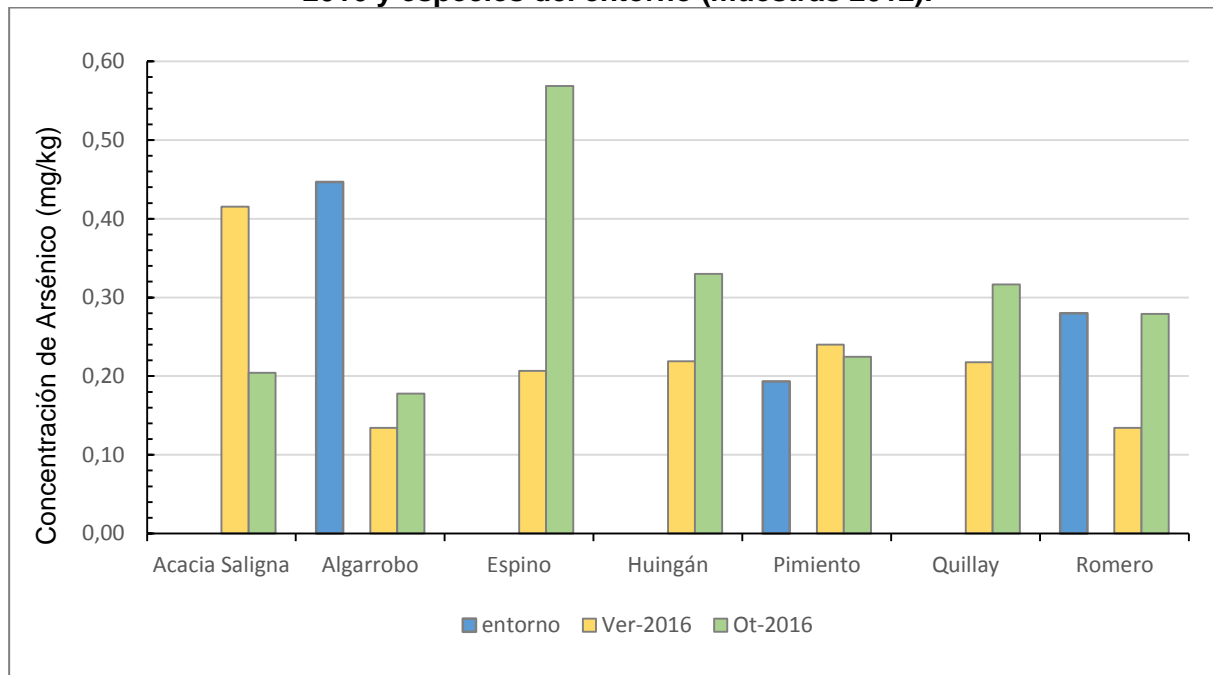
Fuente: Arcadis, 2016.

Los niveles de arsénico determinados en todas las especies son muy bajos, encontrándose en concentraciones inferiores a 1,0 mg/kg, por lo que no se advierten niveles que puedan ser considerados como excesivos o tóxicos para las plantas (5 a 20 mg/kg, Kabata-Pendias, 2011).

En relación a las campañas de muestreo, en la campaña de otoño de 2013 no se observó arsénico en el tejido foliar, mientras que en las campañas de otoño de 2015 y otoño de 2016 se ha observado una tendencia incipiente de bioacumulación de este elemento a nivel foliar. Sin embargo, según se mencionó anteriormente, los niveles detectados de este elemento son bajos y no advierten problemas para las plantas del ensayo.

En relación a los tratamientos, no se observan diferencias estadísticamente significativas en la campaña de muestreo de 2016 para arsénico, situación que concuerda con los muestreos realizados en campañas anteriores.

**Gráfico 4.4-20. Concentración de Arsénico (mg/kg) de las especies muestreadas el año 2016 y especies del entorno (muestras 2012).**

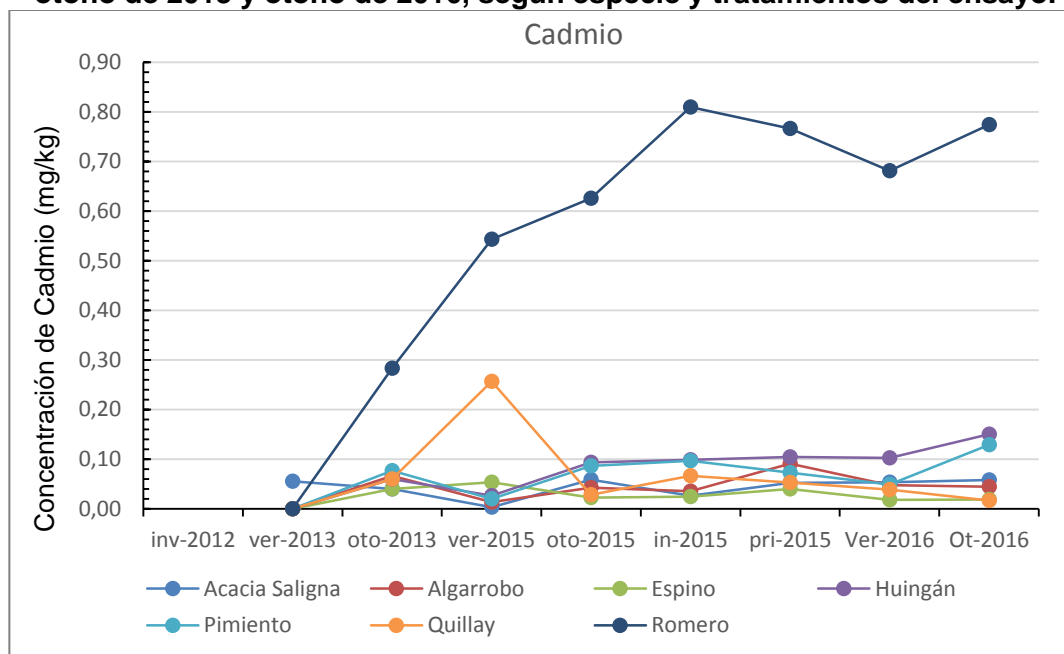


Fuente: Arcadis, 2016.

En la campaña de otoño de 2016, los niveles de arsénico foliar en la mayoría de las especies del ensayo fueron levemente más altos que los observados en plantas del entorno, correspondientes a la línea base del ensayo (verano de 2012) a excepción del Algarrobo. Ver Gráfico 4.4-20. Cabe destacar que en la línea base del ensayo, sólo 3 especies presentaron niveles de arsénico foliar detectables por los equipos de laboratorio, correspondientes a Algarrobo (0,45%), Romero (0,28%) y Pimiento (0,19%), mientras que, en el resto de las especies, las concentraciones de arsénico foliar fueron menores al límite de detección de los equipos de laboratorio.

#### 4.4.2.5 Cadmio (mg/kg)

**Gráfico 4.4-21. Concentración de cadmio en tejido foliar en tejido foliar (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



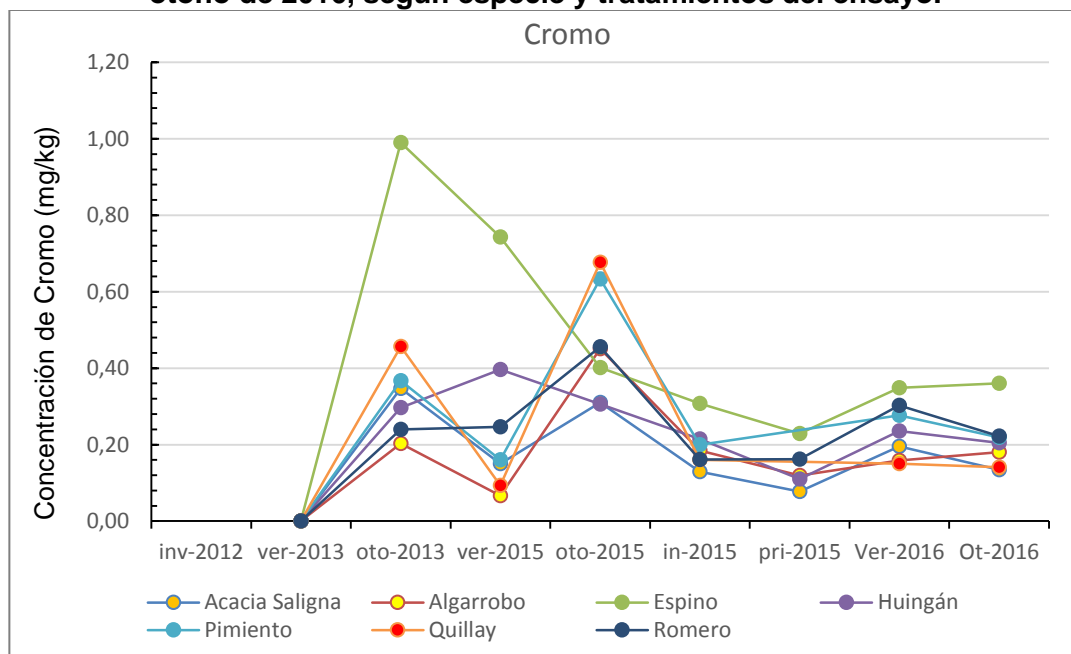
Fuente: Arcadis, 2016.

En las campañas de muestreo de otoño de 2016 y otoño de 2015, la especie que presenta los mayores niveles de cadmio foliar es Romero, situación que concuerda con las campañas de muestreo de otoño de 2013. En general, las concentraciones observadas son bajas y no advierten problemas para las plantas, ya que, según la literatura, concentraciones en el rango de 5 a 30 mg/kg podrían ocasionar toxicidad (Kabata-Pendias, 2011). Cabe destacar que el aumento en los niveles de cadmio foliar observado en la especie Romero, pueden ser atribuidos a un comportamiento fitoextractor del elemento, lo que debe ser verificado en base a la relación entre las concentraciones observadas en hojas y raíces.

En relación a los tratamientos, se observaron diferencias estadísticas para cadmio en las especies Espino, Pimiento y Romero. Sin embargo, el efecto de los tratamientos no fue claro, ya que, en Espino y Pimiento, las concentraciones de cadmio foliar correspondientes al tratamiento T2 presentaron mayores concentraciones, mientras que, en Romero, el tratamiento T2 presentó menores concentraciones de cadmio foliar. Por otro lado, en campañas de muestreo previas no se han observado tendencias claras respecto a un posible efecto de los tratamientos sobre los niveles de cadmio foliar, lo que permite descartar la importancia del resultado obtenido en la campaña de otoño de 2016.

#### 4.4.2.6 Cromo (mg/kg)

**Gráfico 4.4-22. Concentración de cromo en tejido foliar (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



Fuente: Arcadis, 2016.

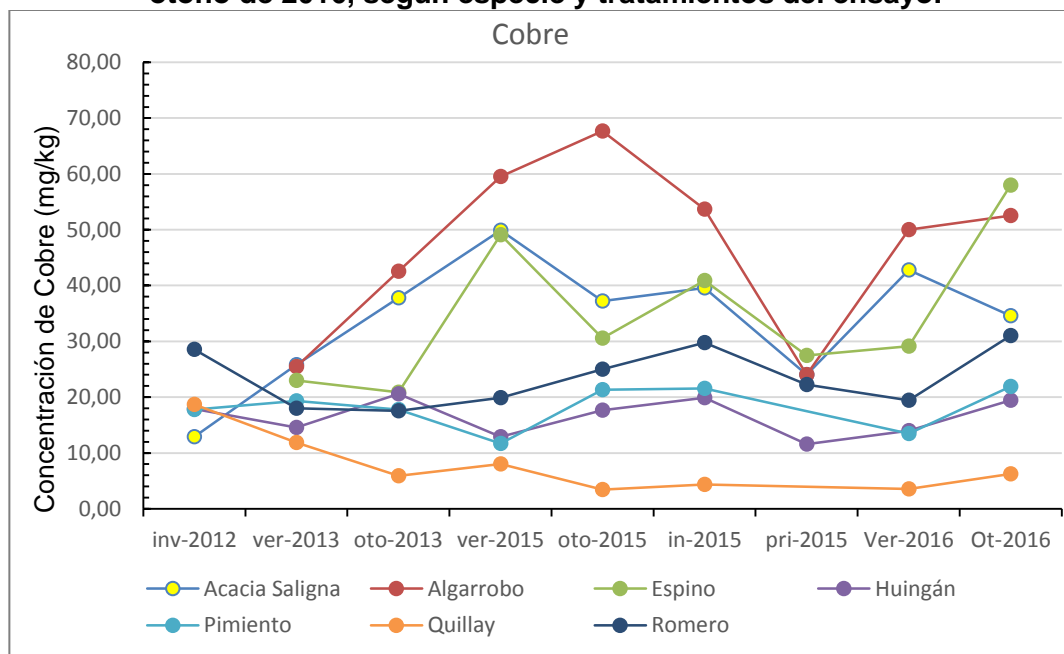
Según se observa en **Gráfico 4.4-22**, la concentración de cromo en el tejido foliar ha presentado un comportamiento relativamente estable desde el establecimiento del ensayo, en la mayoría de las especies. La excepción ha sido observada en la especie Espino, la que presentó una mayor concentración de cromo foliar ( $1 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en la campaña de otoño de 2013, nivel que posteriormente disminuyó en las siguientes campañas de muestreo, llegando a presentar valores similares los observados en el resto de las especies.

En la campaña de otoño de 2016, las especies Espino y Romero presentaron mayores niveles del cromo, mientras que en la campaña de otoño de 2015, las especies que presentaron mayores niveles del elemento fueron Quillay y Pimiento. Sin embargo, se destaca que las concentraciones observadas en todas las especies del ensayo son bajas, siendo menores a  $0,4 \text{ mg kg}^{-1}$  según las evaluaciones de otoño de 2016. Considerando que posibles problemas de exceso o toxicidad por cromo comienzan con concentraciones mayores a  $5 \text{ mg kg}^{-1}$  (Kabata-Pendias, 2011), las concentraciones observadas en el tejido foliar no representan problemas desde el punto de vista de la fitotoxicidad.

En relación a los tratamientos, no se observan diferencias estadísticamente significativas en la campaña de muestreo de 2016 para cromo, situación que concuerda con los muestreos realizados en campañas anteriores.

#### 4.4.2.7 Cobre (mg/kg)

**Gráfico 4.4-23. Concentración de cobre en tejido foliar (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



Fuente: Arcadis, 2016.

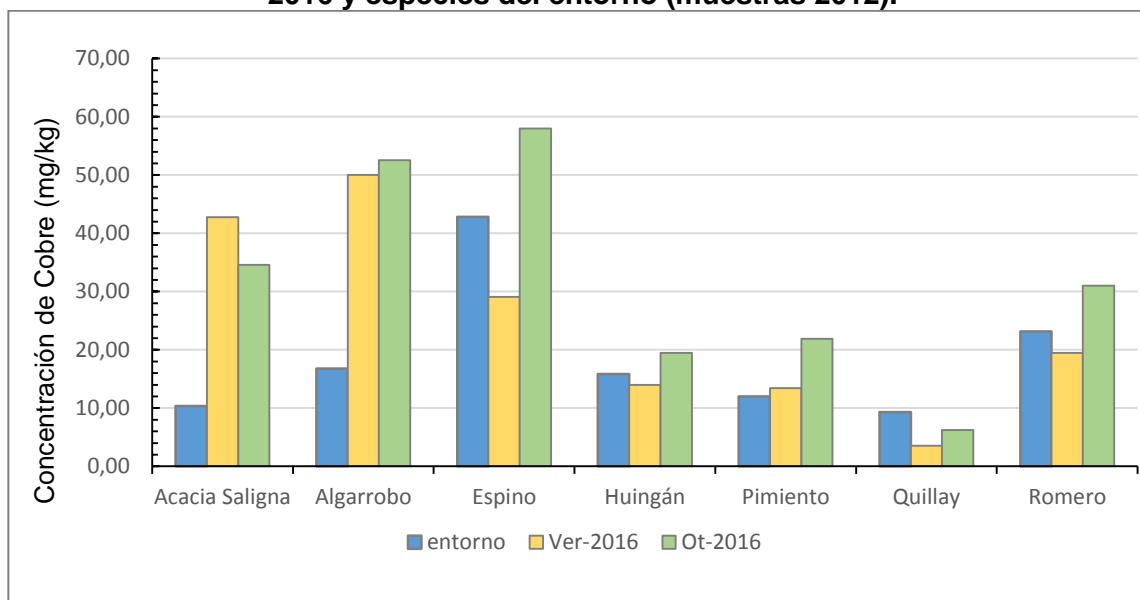
Las concentraciones de cobre foliar han presentado un comportamiento variable en algunas especies del ensayo, ya que, por ejemplo, en las especies Algarrobo, Espino y *Acacia saligna* se ha observado una amplia variabilidad en los niveles de cobre foliar desde el establecimiento del ensayo, mientras que las especies Romero, Pimiento, Huigán y Quillay se han mantenido en rangos más estables, presentando en general, concentraciones de cobre menores a 30 mg kg<sup>-1</sup>.

En las especies *Acacia saligna*, Algarrobo y Espino, se han observado las mayores concentraciones de cobre foliar en la mayoría de las campañas de muestreo. En la campaña de otoño de 2016, las especies Algarrobo y Espino han mostrado niveles de cobre mayores a 50 mg kg<sup>-1</sup>. Según la literatura, la mayoría de las especies pueden presentar síntomas de toxicidad por cobre cuando se alcanzan niveles en el rango de 20 a 100 mg kg<sup>-1</sup> (Kabata-Pendias, 2011), situación por la cual, las concentraciones de cobre foliar en las especies Algarrobo y Espino pueden ser consideradas altas. En el resto de las especies se observan niveles adecuados de cobre en tejido foliar.

En relación a los tratamientos, se observaron diferencias significativas en la especie Romero, en donde se observó una mayor concentración de cobre para el tratamiento T2, en comparación con el resto de los tratamientos. Estos resultados no han sido observados en campañas de muestreo previas, sin embargo, en la campaña de otoño de 2015 se observaron diferencias significativas en la especie Algarrobo, la que presentó mayores concentraciones de cobre en el tratamiento T3. Debido a la falta de continuidad en los resultados obtenidos, es

posible descartar el efecto de los tratamientos sobre los niveles de cobre foliar en las especies del ensayo.

**Gráfico 4.4-24. Concentración de Cobre (mg/kg) de las especies muestreadas el año 2016 y especies del entorno (muestras 2012).**



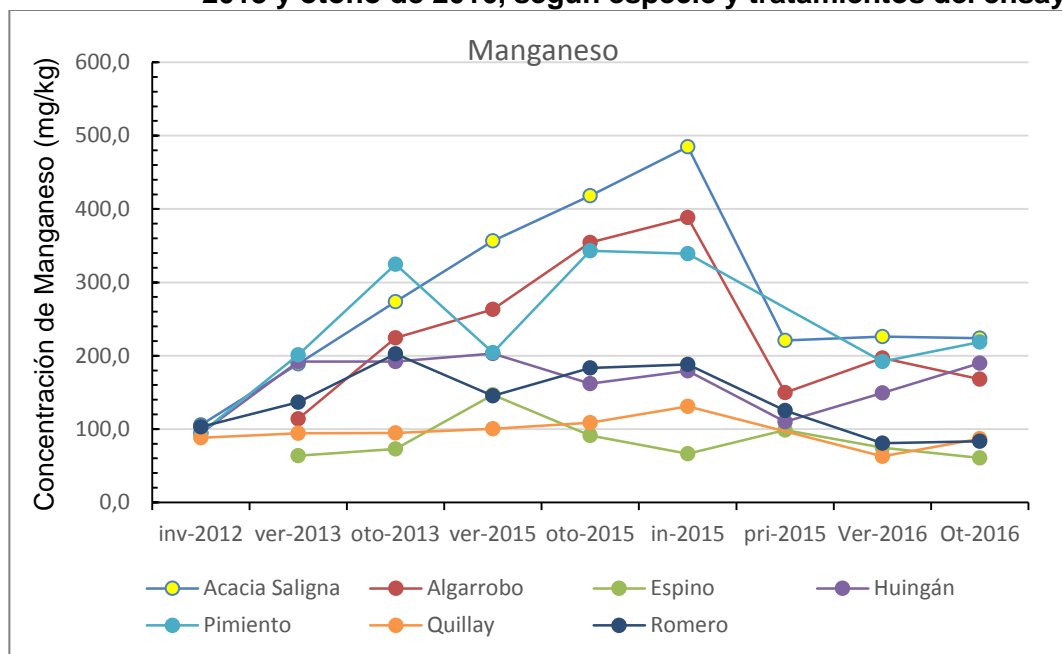
Fuente: Arcadis, 2016.

En la campaña de otoño de 2016, los niveles de cobre foliar en la mayoría de las especies del ensayo, fueron más altos que los observados en plantas del entorno, correspondientes a la línea base del ensayo (verano de 2012) (Ver Gráfico 4.4-24). En este sentido, en otoño de 2016, sólo las especies Huigán y Quillay presentaron niveles de cobre foliar similares a los determinados en plantas del entorno, mientras que en el resto de las especies del ensayo se observaron niveles de cobre foliar que sobrepasaron notoriamente los niveles determinados en la línea base. Por ejemplo, en la línea base del ensayo, las especies Acacia saligna, Algarrobo y Espino presentaron niveles de cobre foliar de 11, 20 y 43 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente, mientras en otoño de 2016, estos niveles fueron de 35, 53 y 58 mg kg<sup>-1</sup>.



#### 4.4.2.8 Manganeseo (mg/kg)

**Gráfico 4.4-25. Concentración de manganeso en tejido foliar (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**

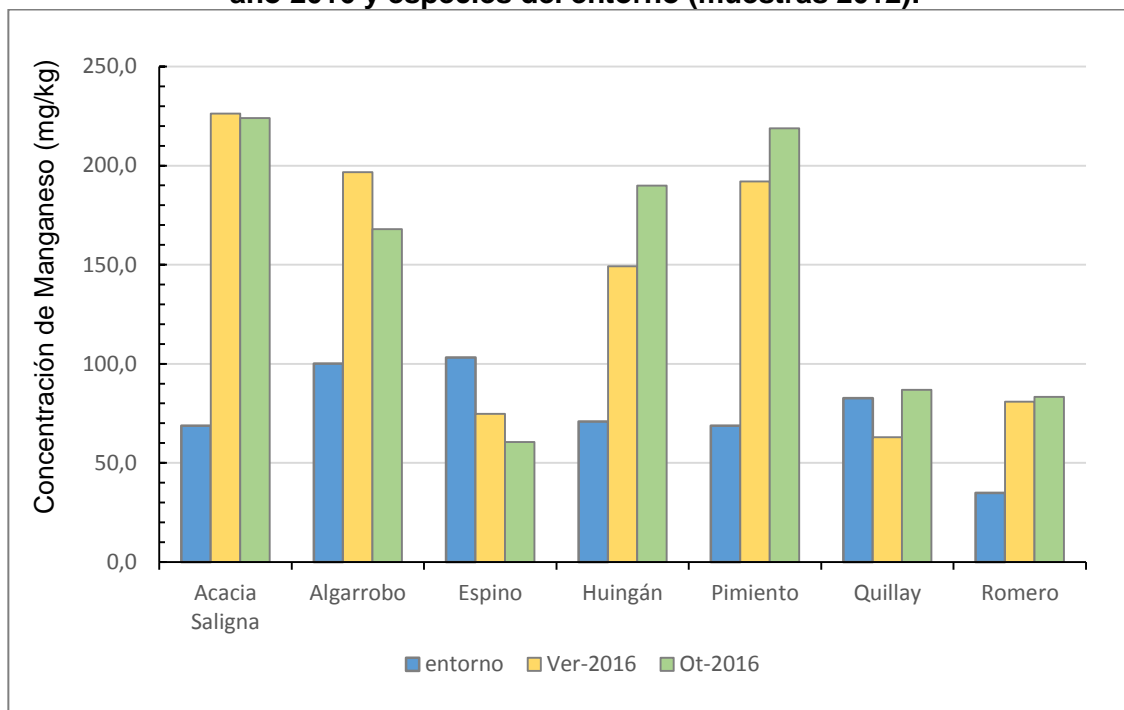


Fuente: Arcadis 2016.

Según se observa en Gráfico 4.4-25, desde el establecimiento del ensayo los niveles de manganeso foliar han sido variables en las especies Acacia saligna, Algarrobo y Pimiento. Estas especies presentaron altas concentraciones de manganeso foliar durante las campañas de muestreo realizadas los años 2013 y 2015. Sin embargo, según las últimas campañas de muestreo realizadas en verano y otoño de 2016, los niveles de manganeso foliar en las especies Acacia saligna, Algarrobo y Pimiento han disminuido a niveles comparables con el resto de las especies, sin sobrepasar los 250 mg kg<sup>-1</sup>. En general, las disminuciones de las concentraciones de elementos metálicos en tejidos pueden ser atribuidas al efecto dilución (Deram, 2006) que se produce por aumentos progresivos de la biomasa de las plantas. Posiblemente, la especie Acacia saligna ha experimentado una disminución de los niveles de manganeso foliar por efecto dilución, ya que en campañas de muestreo previas realizadas en otoño e invierno de 2015, se observaron concentraciones de manganeso foliar superiores a 400 mg kg<sup>-1</sup>, umbral de fitotoxicidad (Kabata-Pendias, 2011) establecido para la mayoría de las plantas. Este nivel de manganeso foliar en Acacia saligna ha disminuido notoriamente, alcanzando en promedio una concentración de 224 mg kg<sup>-1</sup> en la campaña de otoño de 2016.

En relación a los tratamientos, en la campaña de otoño de 2016 se observaron diferencias significativas para manganeso en la especie Espino, en donde el tratamiento T2 presentó una menor concentración de manganeso foliar, en comparación con el resto de los tratamientos. Sin embargo, este resultado no ha sido observado en campañas de muestreo previas, así como tampoco en otras especies del ensayo, lo que permite descartar su importancia.

**Gráfico 4.4-26. Concentración de Manganeso (mg/kg) de las especies muestreadas el año 2016 y especies del entorno (muestras 2012).**

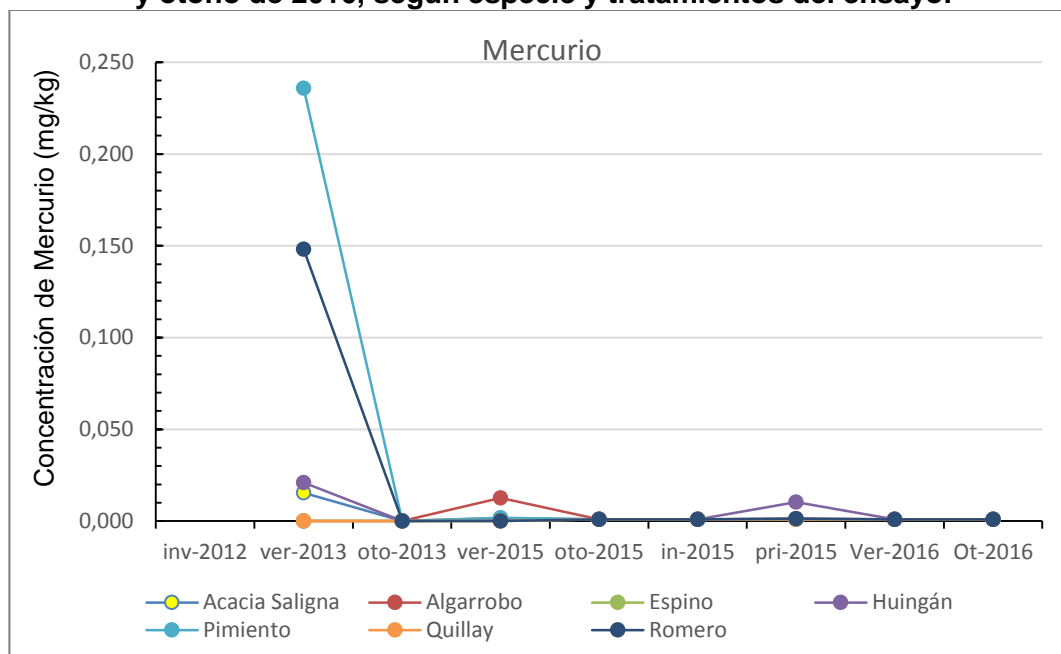


Fuente: Arcadis 2016.

En la campaña de otoño de 2016, los niveles de manganeso foliar observados en las plantas del ensayo han sido altos, en comparación con los determinados en las plantas del entorno, correspondientes a la línea base del ensayo (verano de 2012) (Ver Gráfico 4.4-26). Por ejemplo, las especies *Acacia saligna*, Algarrobo y Huingán, en otoño de 2016 presentaron niveles promedio de manganeso foliar de 224, 168, 190 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente, mientras en la línea base estos niveles fueron de 72, 125, 69 mg kg<sup>-1</sup>. Un comportamiento similar fue observado en las especies Pimiento y Romero. Por otro lado, la especie Espino fue la única que presentó mayores niveles de manganeso foliar en la línea base (130 mg kg<sup>-1</sup>), en comparación con los niveles determinados en otoño de 2016 (61 mg kg<sup>-1</sup>).

#### 4.4.2.9 Mercurio (mg/kg)

**Gráfico 4.4-27. Concentración de Mercurio en tejido foliar (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



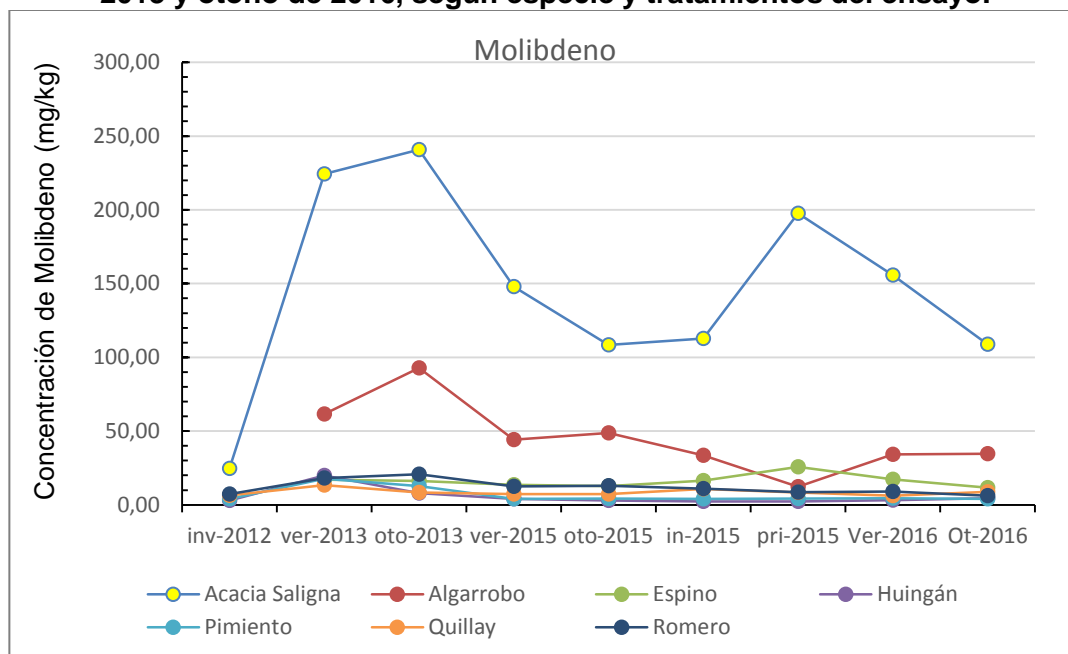
Fuente: Arcadis, 2016.

Durante las campañas de muestreo realizadas entre los años 2013 y 2016, las determinaciones de mercurio en tejido foliar han sido muy bajas, cercanas o equivalentes al límite de detección de los equipos de laboratorio. En general, estos niveles de mercurio son esperables, ya que el relave presenta bajas concentraciones de este elemento ( $<0,8 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

En relación a los tratamientos, no se observan diferencias estadísticamente significativas para mercurio en la campaña de muestreo de otoño de 2016, situación que concuerda con los muestreos realizados en campañas anteriores.

#### 4.4.2.10 Molibdeno (mg/kg)

**Gráfico 4.4-28. Concentración de molibdeno en tejido foliar (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



Fuente: Arcadis 2016.

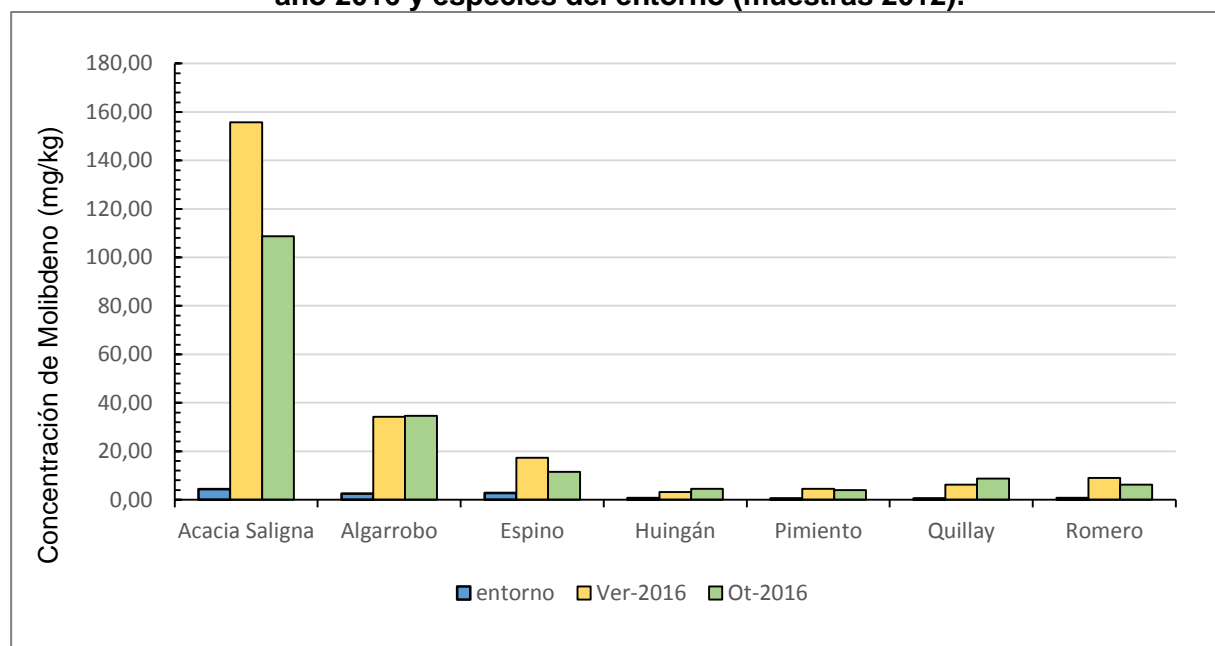
En general, las concentraciones de molibdeno en tejido foliar son bajas en la mayoría de las especies, con excepción de *Acacia saligna* y Algarrobo, las que han presentado mayores niveles de molibdeno foliar en las campañas de muestreo realizadas entre los años 2013 y 2016. Sin embargo, la especie Algarrobo ha experimentado una tendencia al descenso en los niveles de molibdeno foliar, presentando en la campaña de otoño de 2016 niveles comparables al resto de las especies del ensayo. Por otro lado, los altos niveles de molibdeno foliar en la especie *Acacia saligna* pueden ser atribuidos a que es una especie leguminosa, siendo el elemento molibdeno fundamental para una buena actividad de la enzima nitrogenasa, la cual es la responsable de la fijación de nitrógeno atmosférico en los nódulos de las raíces de estas plantas.

Según las campañas de otoño de 2016 y otoño de 2015, se observan niveles similares de molibdeno foliar en la mayoría de las especies del ensayo, correspondiendo en general a valores menores o cercanos a 10 mg kg<sup>-1</sup>, umbral de toxicidad para la mayoría de las plantas (Kabata-Pendias, 2011). Si bien las especies *Acacia saligna* y Algarrobo han presentado niveles de molibdeno mayores al umbral de toxicidad, estos niveles no necesariamente pueden causar efectos detrimentales en el desarrollo de estas especies, más bien podrían ser explicados por corresponder a especies de tipo leguminosas.

En relación a los tratamientos, en la campaña de otoño de 2016 se observaron menores niveles de molibdeno foliar en la especie *Acacia saligna* para el tratamiento T2, resultado que concuerda con las evaluaciones realizadas en otoño de 2015. Este resultado podría ser

explicado por la inmovilización del elemento al adicionar el tratamiento con compost, lo que disminuye la absorción de molibdeno desde el relave. Sin embargo, en otras especies del ensayo no han sido observados estos resultados, lo que puede ser atribuido a que la especie *Acacia saligna* es la única que tiende a concentrar mayores niveles de molibdeno, siendo más propensa a mostrar una respuesta a los tratamientos del ensayo.

**Gráfico 4.4-29. Concentración de Molibdeno (mg/kg) de las especies muestreadas el año 2016 y especies del entorno (muestras 2012).**

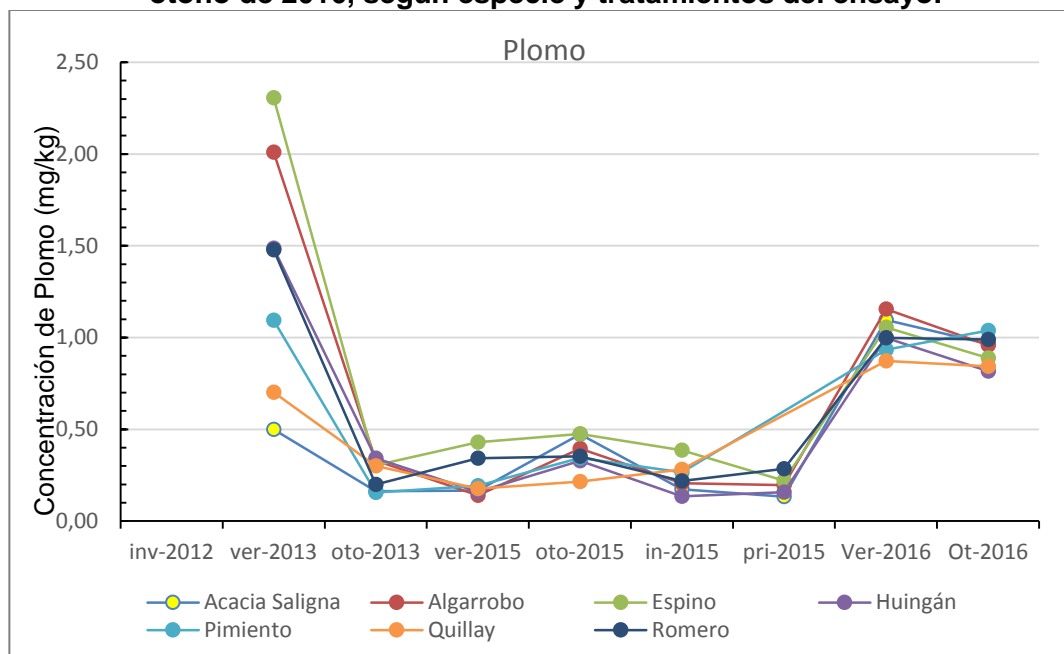


Fuente: Arcadis 2016.

En la campaña de otoño de 2016, los niveles de molibdeno foliar observados en las plantas del ensayo han sido altos, en comparación con los determinados en las plantas del entorno, correspondientes a la línea base del ensayo (verano de 2012) (Ver Gráfico 4.4-29). Por ejemplo, las especies *Acacia saligna*, *Algarrobo* y *Espino*, en otoño de 2016 presentaron niveles promedio de molibdeno foliar de 109, 35 y 12 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente, mientras en la línea base estos niveles fueron de 4,6, 3,3 y 2,1 mg kg<sup>-1</sup>. Un comportamiento similar fue observado para el resto de las especies del ensayo, aunque las diferencias entre los niveles de la línea base y los determinados en la campaña de otoño de 2016 fueron menores.

#### 4.4.2.11 Plomo (mg/kg)

**Gráfico 4.4-30. Concentración de plomo en tejido foliar (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



Fuente: Arcadis 2016.

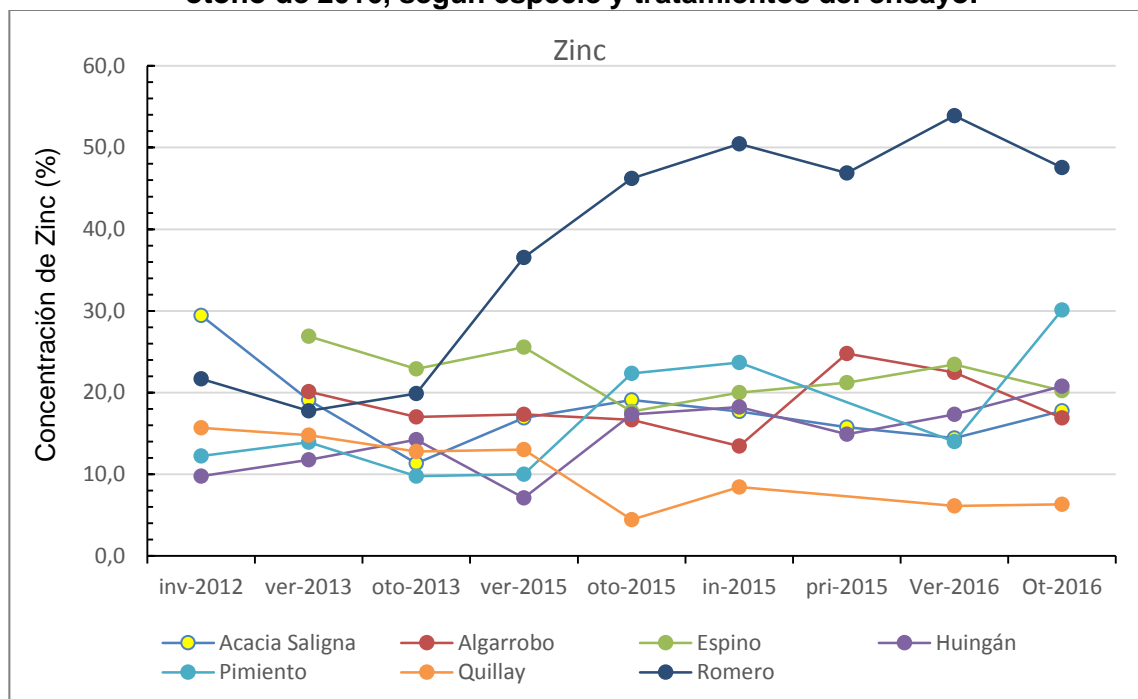
Los niveles de plomo en tejido foliar determinados en la campaña de otoño de 2016 son muy bajos y similares para todas las especies del ensayo, correspondiendo a valores cercanos a 1 mg kg<sup>-1</sup>. Estos niveles se encuentran por debajo del umbral de toxicidad establecido para la mayoría de las plantas, los que se encuentran en el rango de 30 a 300 mg/kg (Kabata-Pendias, 2011).

Las concentraciones de plomo en el tejido foliar en la campaña de otoño de 2016 son superiores a las determinadas para la campaña de otoño de 2015 en la mayoría de las especies. Este comportamiento podría ser explicado por el proceso de acidificación que ha experimentado el relave, lo cual aumenta la disponibilidad de plomo para las plantas.

En relación a los tratamientos, no se observan diferencias estadísticamente significativas en la campaña de muestreo de 2016 para plomo en tejido foliar, con excepción de la especie *Acacia saligna*, la que presentó mayores niveles de plomo foliar para el tratamiento T2, en comparación con el resto de los tratamientos. Este resultado no ha sido observado en campañas de muestreo previas para la especie *Acacia saligna*, aunque en otoño de 2015 se observaron mayores niveles de plomo en la especie Espino en los tratamientos T2 y T3. En otras campañas de muestreo, no se han encontrado diferencias significativas entre tratamientos para la concentración de plomo en tejido foliar.

#### 4.4.2.12 Zinc (mg/kg)

**Gráfico 4.4-31. Concentración de zinc en tejido foliar (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



Fuente: Arcadis 2016.

Desde la campaña de otoño de 2013, la especie Romero ha presentado mayores niveles de zinc, en comparación al resto de las especies. Estos niveles han mostrado un aumento progresivo en el tiempo, alcanzando durante las campañas de verano y otoño de 2016 concentraciones cercanas a 50 mg kg<sup>-1</sup>. Por otro lado, de acuerdo con los niveles que establece la literatura, niveles deficientes de zinc corresponden a un rango de 10 a 20 mg/kg (Kabata-Pendias, 2011), por lo que este elemento puede ser considerado como deficiente en la mayoría de las plantas del ensayo, con excepción de las especies Romero y Pimiento. Este comportamiento concuerda con los bajos niveles de zinc que presenta el relave, el cual promedió 12,3 mg kg<sup>-1</sup> según la determinación de otoño de 2016.

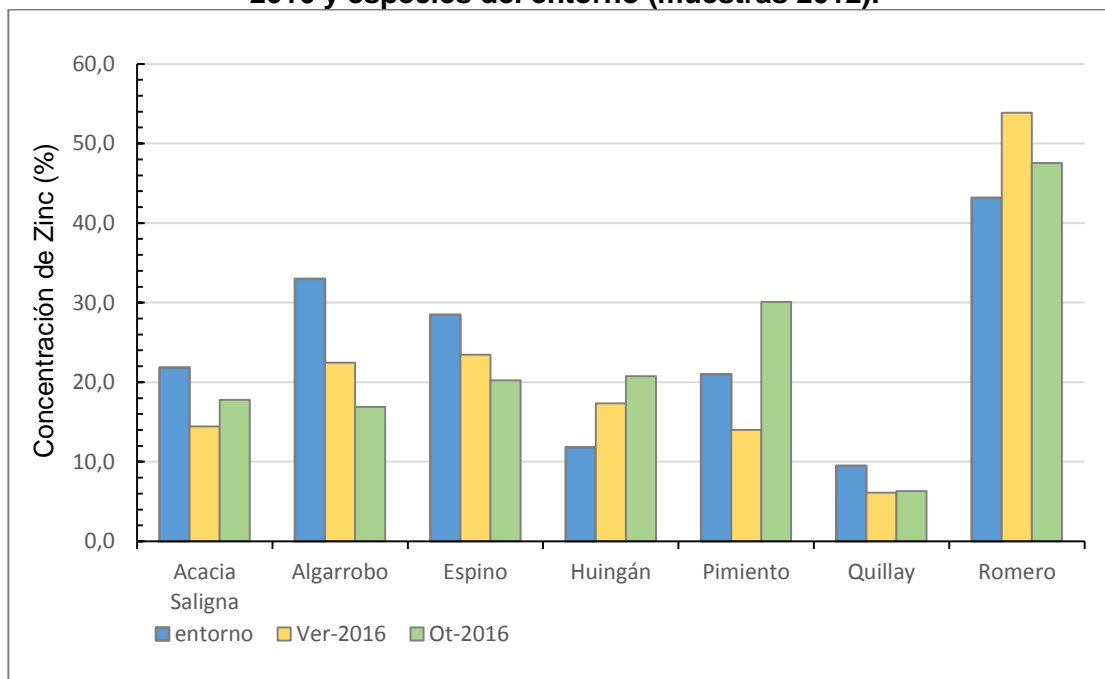
En general, al comparar las campañas de otoño de 2016 y otoño de 2015, las especies del ensayo han mostrado niveles de zinc estables en el tiempo, predominando niveles cercanos al umbral de deficiencia en la mayoría de las especies.

En relación a los tratamientos, las especies Pimiento y Romero presentaron diferencias estadísticas entre tratamientos para la campaña de otoño de 2016, en donde la especie Pimiento presentó mayores niveles de zinc para los tratamientos T1 y T2, mientras que la Romero presentó una mayor concentración de zinc foliar para el tratamiento T2, en comparación con el resto de los tratamientos. En la campaña de muestreo de otoño de 2015, las especies *Acacia saligna*, Espino y Romero presentaron diferencias estadísticas para el tratamiento T2, en comparación con el resto de los tratamientos, observándose mayores



niveles de zinc foliar cuando se adicionó el tratamiento con compost. Debido a la amplia variabilidad en los resultados de los análisis estadísticos en el tiempo, no es posible establecer un efecto de los tratamientos sobre las concentraciones de este elemento.

**Gráfico 4.4-32. Concentración de Zinc (mg/kg) de las especies muestreadas el año 2016 y especies del entorno (muestras 2012).**



Fuente: Arcadis 2016.

En la campaña de otoño de 2016, los niveles de zinc foliar observados en las plantas del ensayo han sido más bajos o similares a los determinados en las plantas del entorno, correspondientes a la línea base del ensayo (verano de 2012). En general, las especies Algarrobo, Espino y Quillay han presentado niveles de zinc foliar menores, en comparación con las determinaciones de la línea base, mientras que el resto de las especies Huingán y Romero presentaron niveles levemente superiores en las plantas del ensayo, respecto a la línea base. Ver Gráfico 4.4-32.

---

#### **4.4.3 Seguimiento en tejido radical**

En **Tabla 4.4-6** presentan los resultados de análisis de raíces de las 8 especies vegetales muestreadas en otoño de 2016. Adicionalmente, de forma comparativa, en Tabla 4.4-7 y Tabla 4.4-8 se presentan los resultados de análisis foliar realizado en otoño de 2015 y otoño de 2013, respectivamente, de las mismas 8 especies vegetales.

El análisis estadístico entre tratamientos fue efectuado para los análisis de raíces de otoño de 2016. Este análisis es representado por el valor P de la Tabla 4-8 y muestra que en la mayoría de los casos no existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, debido a que el valor P es mayor 5%.

Tabla 4.4-6. Resultados de análisis de raíces realizado en otoño de 2016.

Especie	Tratamiento	N (%)	P (%)	K (%)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Acacia	T1	1,63	0,11	0,64	0,64	0,01	86,67	0,33	1,37	32,67	93,00	1,29	12,33
	T2	1,57	0,17	0,78	0,82	0,01	50,00	0,21	2,00	147,33	87,33	1,28	19,33
	T3	1,53	0,16	0,67	0,75	0,01	64,67	0,18	0,92	56,33	83,00	1,26	12,00
	Valor P (%)	94,03	36,73	13,22	82,04	sd	62,08	62,08	52,89	36,73	82,64	82,64	13,22
Algarrobo	T1	1,32	0,10	0,62	0,12	0,01	14,67	0,13	0,56	78,67	27,33	0,84	9,33
	T2	1,55	0,08	0,58	0,14	0,01	10,00	0,04	0,54	110,67	29,67	0,64	10,67
	T3	1,40	0,10	0,64	0,13	0,01	12,67	0,06	0,61	107,33	28,00	0,61	10,67
	Valor P (%)	<b>0,37</b>	44,44	82,64	93,44	sd	82,64	<b>0,37</b>	62,08	82,64	58,78	<b>3,31</b>	90,70
Espino	T1	1,86	0,10	0,64	0,19	0,01	34,67	0,11	0,60	69,00	30,67	0,50	11,33
	T2	1,79	0,12	0,70	0,35	0,01	35,67	0,10	0,80	52,67	32,33	0,72	13,33
	T3	1,93	0,12	0,68	0,23	0,01	30,33	0,07	0,52	84,67	33,67	0,47	10,33
	Valor P (%)	79,01	<b>3,31</b>	52,89	79,01	sd	94,03	79,01	44,44	30,86	79,01	79,01	93,44
Huingán	T1	0,32	0,19	0,90	0,22	0,01	11,00	0,22	0,66	96,67	40,00	0,74	18,67
	T2	0,40	0,24	1,03	0,37	0,01	10,00	0,11	0,73	113,33	40,67	0,89	34,00
	T3	0,38	0,26	1,13	0,28	0,01	9,67	0,13	0,75	84,00	46,33	0,64	19,00
	Valor P (%)	30,86	4,94	30,86	75,11	sd	82,64	79,01	100,00	82,64	30,86	30,86	<b>3,31</b>
Pimiento	T1	0,33	0,30	1,22	0,25	0,01	12,00	0,22	0,69	113,33	37,33	1,01	11,67
	T2	0,33	0,35	1,35	0,40	0,01	9,67	0,21	1,16	122,67	32,67	0,77	15,67
	T3	0,29	0,32	1,17	0,28	0,01	7,33	0,24	0,84	82,33	38,33	0,49	10,33
	Valor P (%)	52,89	79,01	79,01	44,44	44,44	79,01	44,44	<b>&lt;0,01</b>	79,01	30,86	79,01	30,86
Quillay	T1	0,27	0,06	0,65	0,24	0,01	32,67	0,29	0,42	180,33	39,00	0,67	12,00
	T2	0,37	0,13	0,76	0,48	0,01	37,33	0,18	0,68	108,00	34,00	0,88	27,00
	T3	0,33	0,09	0,67	0,46	0,01	41,33	0,25	0,55	119,00	40,33	0,64	13,67
	Valor P (%)	<b>0,37</b>	<b>0,37</b>	<b>&lt;0,01</b>	<b>4,94</b>	sd	44,44	44,44	<b>4,94</b>	<b>4,94</b>	30,86	44,44	<b>4,94</b>
Romero	T1	0,30	0,06	1,26	0,21	0,01	10,00	0,46	0,47	39,00	29,33	0,90	12,67
	T2	0,26	0,07	1,12	0,35	0,01	7,67	0,52	0,70	120,00	31,00	0,67	13,00
	T3	0,24	0,06	1,22	0,43	0,01	6,33	0,40	0,61	84,67	32,00	0,66	12,67
	Valor P (%)	11,11	58,78	62,08	93,44	sd	44,44	52,89	36,73	<b>0,37</b>	82,64	<b>3,31</b>	75,11
Talhuen	T1	0,85	0,10	0,54	0,76	0,01	49,33	0,25	0,58	96,00	33,00	0,71	8,00
	T2	0,88	0,11	0,55	1,46	0,01	43,67	0,15	0,81	80,33	39,67	0,96	13,67
	T3	0,82	0,09	0,58	1,08	0,01	41,33	0,15	0,65	290,33	36,00	0,69	10,33
	Valor P (%)	52,89	44,44	94,03	13,22	sd	94,03	82,64	13,22	18,00	62,08	36,73	21,78

Valor P corresponde a prueba estadística de Friedman (n=3, α=5%). Sd= sin dato.

Fuente: Arcadis 2016.

Tabla 4.4-7. Resultados de análisis de raíces realizado en otoño de 2015.

Especie	Tratamiento	N (%)	P (%)	K (%)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Acacia saligna	T1	1,71	0,13	0,98	0,27	0,001	74,49	0,16	1,44	70,00	80,00	1,31	13,00
	T2	1,87	0,17	0,85	0,96	0,01	70,38	0,16	2,32	59,00	89,00	2,46	24,00
	T3	1,44	0,14	0,83	0,37	0,001	60,19	0,21	1,24	49,33	57,33	1,44	7,00
	Valor P	<b>4,90</b>	44,40	79,00	30,90	11,10	30,90	93,40	82,60	79,00	<b>4,90</b>	79,00	13,20
Algarrobo	T1	1,27	0,08	0,73	0,13	0,001	15,77	0,09	0,64	50,00	34,67	0,83	3,67
	T2	1,32	0,09	0,72	0,12	0,001	11,27	0,05	1,09	40,00	31,67	0,93	10,00
	T3	1,25	0,09	0,64	0,27	0,001	11,54	0,06	0,74	170,33	29,00	0,42	5,00
	Valor P	79,00	<b>0,40</b>	36,70	25,00	0,00	79,00	62,10	44,40	79,00	62,10	30,90	<b>3,30</b>
Espino	T1	1,45	0,11	0,81	0,12	0,001	44,10	0,15	1,19	88,33	43,00	0,67	5,67
	T2	1,68	0,16	0,94	0,44	0,001	36,41	0,10	1,52	115,67	42,00	1,27	15,33
	T3	1,67	0,10	0,74	0,34	0,001	34,90	0,10	1,25	136,33	37,00	1,45	6,67
	Valor P	30,90	30,90	0,00	25,00	44,40	79,00	58,80	44,40	79,00	100,00	79,00	62,10
Huingán	T1	0,44	0,23	1,09	0,19	0,001	15,12	0,29	1,41	124,67	50,67	1,07	13,00
	T2	0,34	0,26	1,17	0,24	0,001	18,51	0,12	1,22	101,33	41,33	1,09	26,33
	T3	0,34	0,19	1,12	0,38	0,001	12,80	0,12	0,98	184,33	49,33	0,75	12,33
	Valor P	79,00	13,40	44,40	100,00	44,40	79,00	79,00	79,00	<b>4,90</b>	62,10	44,40	44,40
Pimiento	T1	0,24	0,29	1,32	0,06	0,001	10,86	0,30	0,71	65,33	36,00	1,33	7,67
	T2	0,38	0,29	1,34	0,15	0,001	7,15	0,10	0,72	51,67	30,67	1,13	9,33
	T3	0,30	0,25	1,32	0,27	0,001	10,96	0,18	1,02	118,00	54,00	0,78	10,67
	Valor P	82,60	79,00	79,00	<b>4,90</b>	0,00	30,90	<b>0,40</b>	44,40	79,00	<b>4,90</b>	79,00	21,80
Quillay	T1	0,33	0,07	0,82	0,16	0,001	38,55	0,65	0,66	121,67	48,67	1,03	11,33
	T2	0,42	0,13	0,91	0,56	0,001	33,93	0,17	1,76	58,33	57,00	2,15	32,00
	T3	0,28	0,08	0,81	0,15	0,001	33,91	0,32	0,47	592,33	56,67	0,79	13,00
	Valor P	0,00	<b>0,40</b>	52,90	<b>4,90</b>	0,00	44,40	<b>4,90</b>	0,00	0,00	100,00	<b>4,90</b>	<b>4,90</b>
Romero	T1	0,24	0,07	1,23	0,47	0,001	8,96	0,41	1,00	45,00	47,67	1,43	9,00
	T2	0,25	0,06	1,26	0,17	0,001	7,69	0,25	0,73	73,00	32,33	0,79	12,00
	T3	0,32	0,05	1,21	0,15	0,001	5,29	0,30	1,25	48,67	52,00	1,34	8,67
	Valor P	<b>4,90</b>	36,70	100,00	75,00	0,00	<b>4,90</b>	36,90	30,90	44,40	44,40	44,40	<b>4,90</b>
Talhuén	T1	0,72	0,07	0,83	0,65	0,001	48,31	0,43	1,00	196,00	26,67	1,07	6,33
	T2	1,10	0,13	0,90	0,64	0,001	40,40	0,12	2,03	247,33	49,33	1,57	21,00
	T3	0,82	0,09	0,97	0,40	0,001	41,45	0,17	0,92	385,33	41,33	0,62	9,33
	Valor P	<b>4,90</b>	0,00	79,00	30,90	0,00	79,00	36,90	0,00	79,00	79,00	44,40	<b>0,40</b>

Valor P corresponde a prueba estadística de Friedman (n=3, α=5%). Fuente: Arcadis 2016.

**Tabla 4.4-8. Resultados de análisis de raíces realizado en otoño de 2013.**

Especie	Tratamiento	N (%)	P (%)	K (%)	Mo (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cr (mg/kg)
<i>Acacia saligna</i>	T1	1,80	0,16	0,96	82,34	<0,001	0,12	0,34	194,50	69,79	2,14	8,52	1,21
	T2	2,19	0,25	1,07	74,93	0,19	0,04	0,50	116,03	79,18	2,84	38,76	2,96
	T3	1,78	0,25	1,01	69,17	<0,01	<0,01	0,33	98,57	42,37	0,92	10,57	1,29
Algarrobo	T1	1,28	0,14	0,89	17,46	<0,001	<0,02	0,15	36,79	55,77	<0,99	9,12	1,17
	T2	1,47	0,17	0,98	18,75	<0,001	<0,001	0,18	213,52	63,93	1,74	19,82	1,82
	T3	1,29	0,12	0,76	13,43	<0,001	<0,001	0,12	33,30	45,60	<0,60	7,70	1,01
Espino	T1	1,91	0,20	0,98	39,65	<0,001	<0,04	0,21	64,41	42,81	0,41	13,43	0,83
	T2	2,26	0,26	1,04	32,88	<0,060	<0,02	0,18	88,67	56,16	1,20	23,35	1,94
	T3	1,95	0,21	0,95	50,33	<0,050	<0,02	0,23	136,67	59,83	0,99	15,20	1,40
Huingán	T1	0,62	0,14	1,92	68,57	<0,001	<0,04	0,19	296,17	100,00	0,79	11,07	0,79
	T2	0,74	0,21	1,75	39,01	<0,001	0,05	0,24	111,41	70,23	2,07	30,07	1,83
	T3	0,59	0,16	1,77	33,40	<0,001	<0,001	0,29	172,67	91,20	1,41	11,20	1,10
Pimiento	T1	0,45	0,15	1,54	15,96	<0,001	<0,02	0,18	28,17	43,73	<0,61	6,41	0,56
	T2	0,56	0,27	2,11	16,85	<0,001	<0,05	0,23	70,40	55,47	2,05	21,35	1,93
	T3	0,51	0,20	1,93	31,97	<0,001	<0,02	0,21	68,73	65,53	0,78	7,53	0,97
Quillay	T1	0,68	0,16	1,09	37,00	<0,001	<0,07	0,37	182,67	66,37	0,56	14,37	0,87
	T2	0,89	0,20	1,29	34,25	<0,080	<0,01	0,29	80,85	77,30	2,73	44,00	1,14
	T3	0,76	0,17	1,08	37,30	<0,001	<0,001	0,40	45,00	60,97	<0,72	14,43	0,43
Romero	T1	0,56	0,08	1,76	22,07	<0,001	<0,11	0,35	80,48	54,19	1,43	7,08	0,83
	T2	0,45	0,12	2,00	14,58	<0,001	<0,01	0,24	55,33	44,33	<1,10	12,79	1,01
	T3	0,50	0,11	1,71	34,83	<0,001	<0,001	0,29	112,80	45,77	<0,48	7,00	0,60
Talhuén	T1	1,62	0,15	0,70	54,45	<0,001	0,05	0,28	97,09	64,34	0,73	20,00	1,04
	T2	1,56	0,20	0,80	55,98	0,117	0,07	0,26	104,487	79,61	1,62	39,76	1,33
	T3	1,57	0,17	0,69	59,07	<0,001	0,08	0,34	110,400	63,87	1,33	19,63	1,15

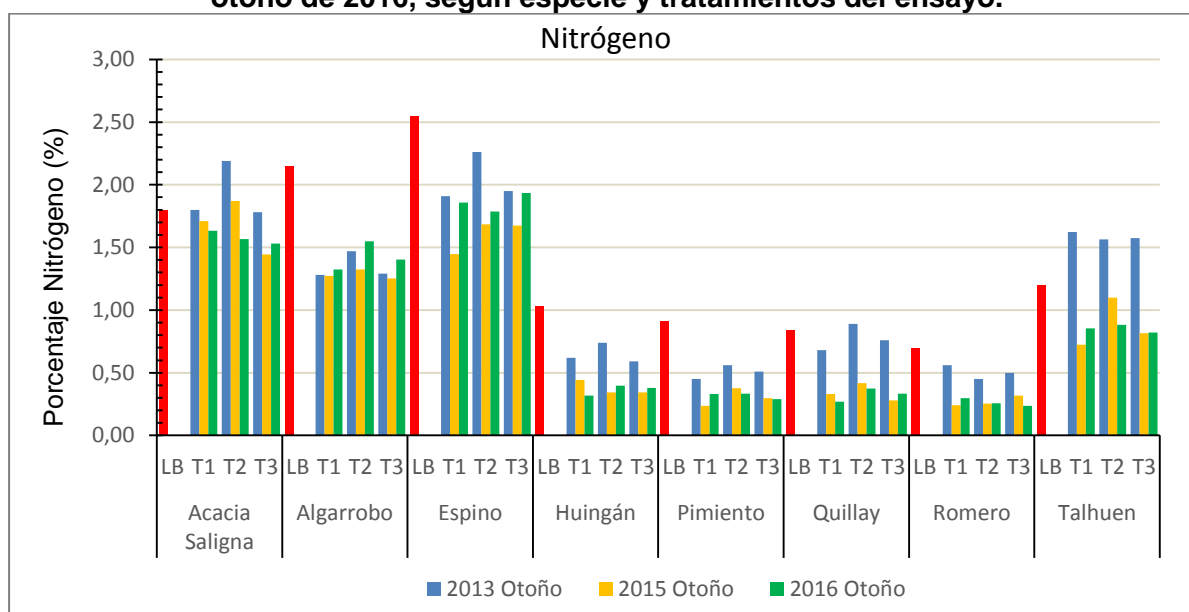
Fuente: SKM, 2013

A continuación, se presentan gráficos para aquellos elementos químicos determinados en el tejido radical en las distintas especies vegetales para las campañas de muestreos de otoño de 2013 y otoño de 2015 y otoño de 2016. Además, se agrega la información de las especies muestreadas del entorno (LB), obtenidas en el año 2012.

- Nitrógeno, fósforo y potasio
- Metales y metaloides: Arsénico, cadmio, cromo, cobre, manganeso, mercurio, molibdeno, plomo y zinc.

#### 4.4.3.1 Nitrógeno (%)

**Gráfico 4.4-33. Concentración de nitrógeno en tejido radical (%) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



Fuente: Arcadis 2016.

En las especies *Acacia saligna*, Algarrobo y Espino se observan los niveles más altos de nitrógeno en raíces para la campaña de otoño de 2016, lo que concuerda con las tendencias observadas en la campaña de otoño de 2015 y otoño de 2013. Estas especies, al ser de tipo leguminosas, tiene la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, por lo que es esperable encontrar mayores niveles de nitrógeno en la planta, tanto en tejido radical como en el tejido foliar.

En la campaña de otoño de 2016 y en la campaña de otoño de 2015, los niveles de nitrógeno fueron similares para la mayoría de las especies, aunque más bajos que los niveles determinados en la campaña de otoño de 2013. Esta disminución generalizada de los niveles de nitrógeno en el tejido radical puede ser atribuida al fuerte proceso de acidificación del relave, el cual disminuye la disponibilidad de este elemento en suelos o relaves debido a una menor actividad microbiológica y por lo tanto, se reduce la tasa mineralización de este elemento (Havlin *et al.*, 2014). Cabe destacar que todas las especies del ensayo han presentado niveles

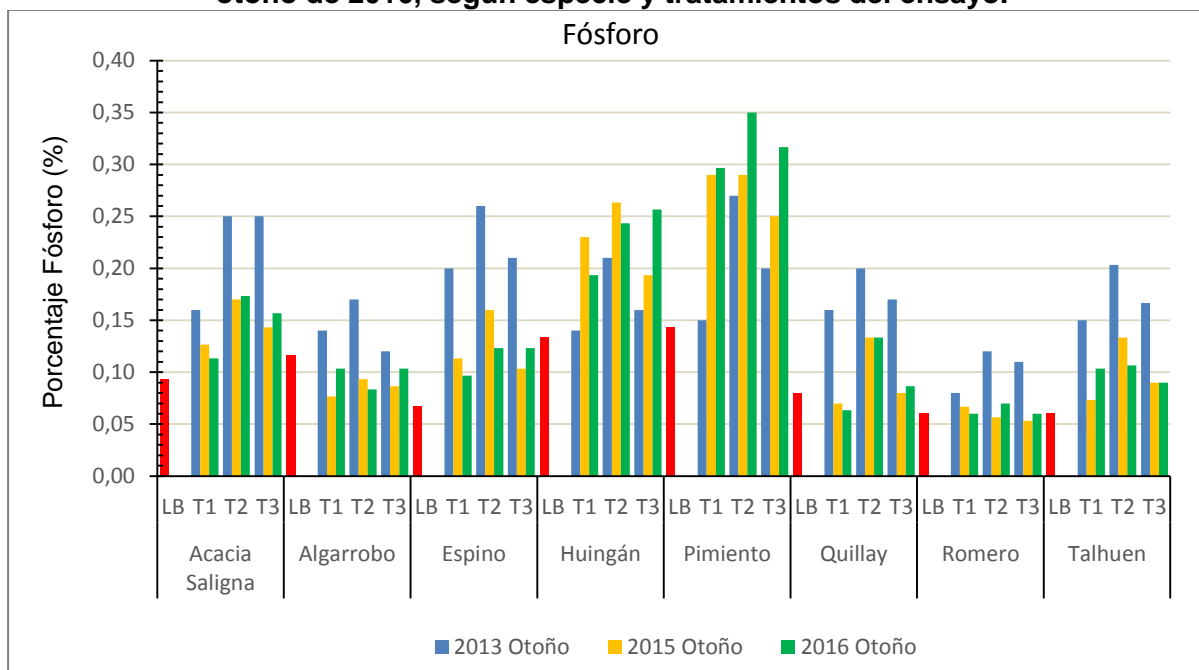
de nitrógeno en el tejido radical más bajos que los observados en el muestreo de línea base del ensayo.

En relación a los tratamientos, en la campaña de otoño de 2016 se observaron diferencias significativas para las especies Algarrobo y Quillay, las que presentaron mayores niveles de nitrógeno en el tratamiento T2, en comparación con el resto de los tratamientos. Previamente, en la campaña de otoño de 2015, las mismas especies presentaron mayores niveles de nitrógeno en el tejido radical para el tratamiento T2, siendo un resultado que se ha mantenido constante entre campañas de muestreo. De esta forma, la adición de compost a la casilla de plantación ha promovido mayores niveles de nitrógeno en el tejido radical de Algarrobo y Quillay, efecto que no ha sido observado en el resto de las especies.



#### 4.4.3.2 Fósforo (%)

**Gráfico 4.4-34. Concentración de fósforo en tejido radical (%) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



Fuente: Arcadis 2016.

Según los niveles de fósforo observados en el tejido radical en las campañas de otoño de 2016 y otoño de 2015, en la mayoría de las especies del ensayo se ha observado una disminución de los niveles de fósforo en relación a las determinaciones de la campaña de otoño de 2013. La excepción a lo anterior corresponde a las especies Huingán y Pimiento, las que han presentado mayores niveles de fósforo en las campañas de otoño de 2016 y otoño de 2015, en comparación con la campaña de otoño de 2013.

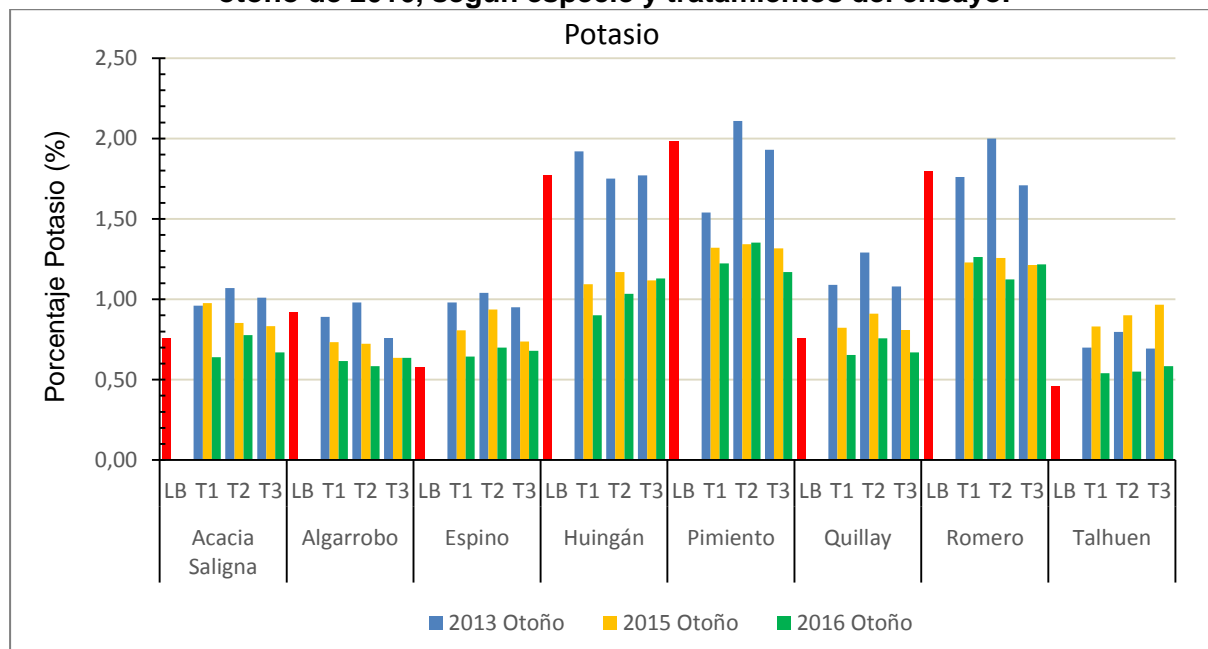
En general, la disminución de los niveles de fósforo en el tejido radical puede ser atribuida al fuerte proceso de acidificación del relave, el cual disminuye la disponibilidad de este elemento en suelos o relave debido a que, en estas condiciones, el elemento es retenido con mayor fuerza por la fase sólida (Havlin et al., 2014). Los niveles de fósforo en el tejido radical son similares a los determinados para el tejido foliar, con excepción de la especie Pimiento, la que ha mostrado mayores concentraciones de fósforo en el tejido foliar en las campañas de otoño de 2016 y otoño de 2015, en comparación con las concentraciones de fósforo que se han observado para el tejido radical. Ver Gráfico 4.4-17 y Gráfico 4.4-34.

En relación a los tratamientos, sólo la especie Quillay presentó diferencias significativas entre tratamientos para fósforo en otoño de 2016, en donde el tratamiento T2 presentó mayores niveles de fósforo en el tejido radical (así como en el tejido foliar), en comparación con el resto de los tratamientos. Este resultado también fue observado en la campaña de otoño de 2015, en donde, además, las especies Algarrobo y Talhuén presentaron un comportamiento similar,

siendo atribuido este resultado al aporte de nutrientes producto de la adición de compost en la casilla de plantación.

#### 4.4.3.3 Potasio (%)

**Gráfico 4.4-35. Concentración de potasio en tejido radical (%) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



Fuente: Arcadis 2016.

Al comparar las campañas de otoño de 2013 y otoño de 2016, se observa que todas las especies del ensayo muestran una disminución de los niveles de potasio en el tejido radical. Por otro lado, los niveles de potasio son similares y en general no sobrepasan un 1%, con excepción de las especies Pimiento y Romero, las que presentan los mayores niveles del elemento tanto en tejido radical como en el tejido foliar. En general, la disminución de los niveles de potasio puede ser atribuida, posiblemente, al aumento de la acidez del relave, ya que, en estas condiciones, una alta concentración de aluminio intercambiable crea un ambiente desfavorable para la absorción de este nutriente (Havlin et al., 2014).

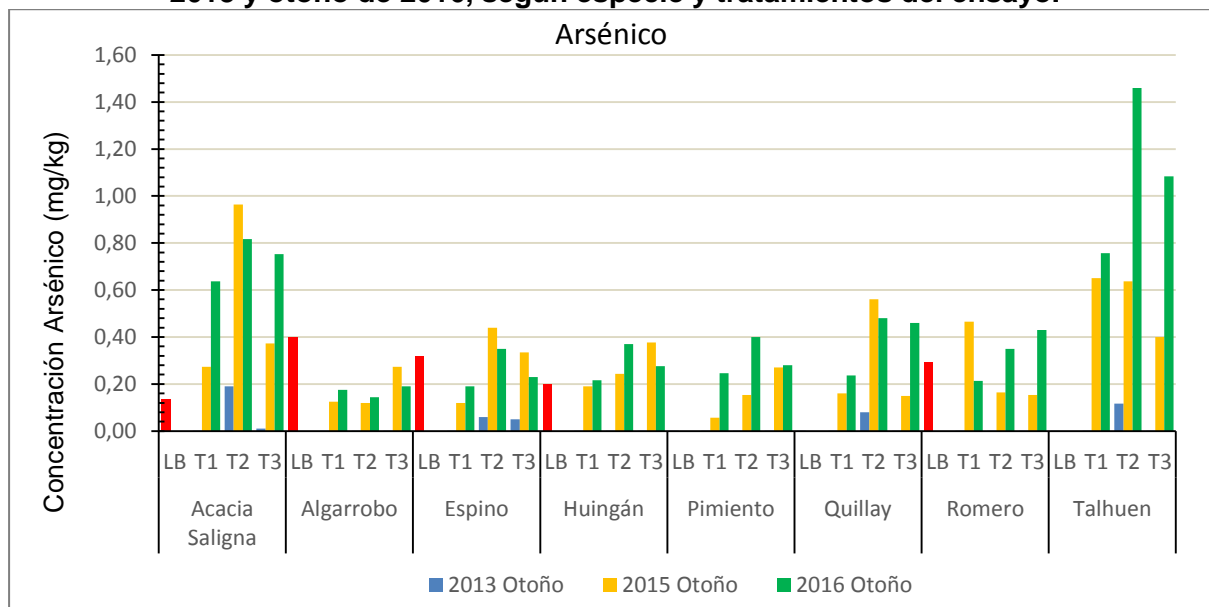
Según se muestra en **Gráfico 4.4-35**, la especie Espino y talguén presentan mayores concentraciones de potasio en tejido radical en las plantas del ensayo, en comparación con los niveles observados en la línea base del ensayo, mientras que el resto de las especies presenta niveles similares de potasio respecto a la línea base.

En relación a los tratamientos, en la campaña de otoño de 2016 sólo la especie Quillay presentó mayores niveles de potasio en el tratamiento T2, en comparación con el resto de los tratamientos. Previamente, en la campaña de otoño de 2015, la especie Espino presentó un comportamiento similar, mostrando niveles más altos de potasio en el tejido radical para el tratamiento T2, en comparación al resto de los tratamientos. Sin embargo, la falta de

continuidad en los resultados obtenidos en las especies mencionadas permite descartar la importancia de este resultado.

#### 4.4.3.4 Arsénico (mg/kg)

**Gráfico 4.4-36. Concentración de arsénico en tejido radical (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



Fuente: Arcadis 2016.

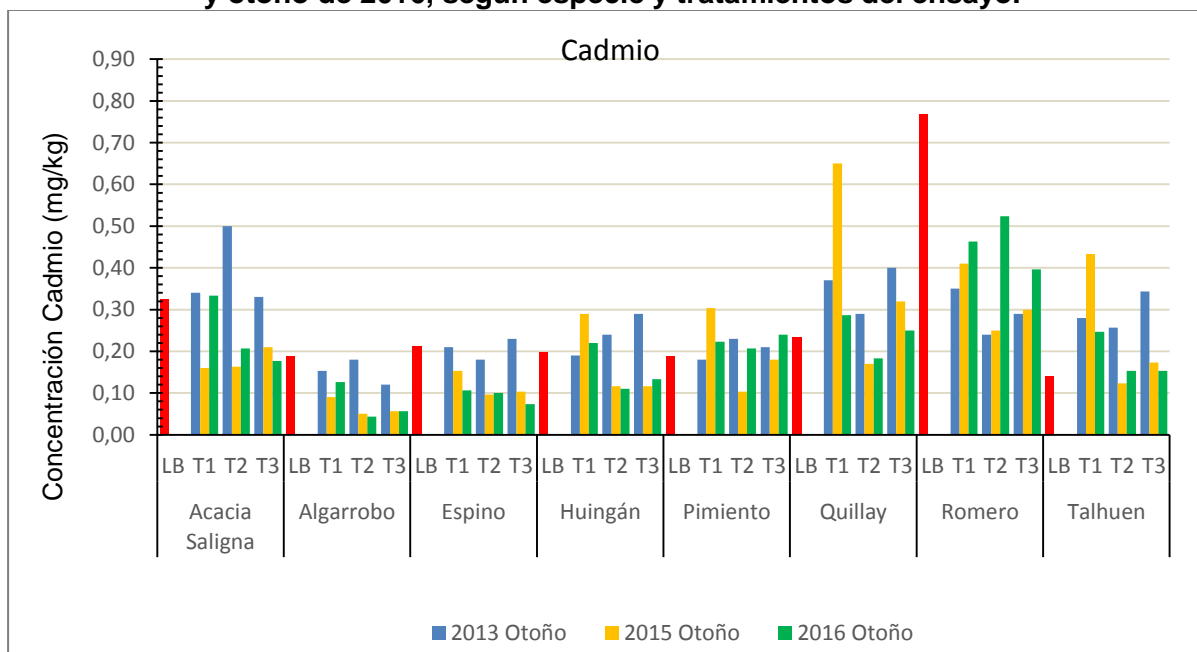
En el caso del elemento arsénico, al comparar la campaña de otoño de 2013 con las campañas de otoño de 2015 y otoño de 2016, se observó un aumento en los niveles de este elemento en el tejido radical en todas las especies del ensayo a excepción del Algarrobo. Sin embargo, las concentraciones en raíces, así como también en el tejido foliar son bajas y no advierten problemas para el correcto desarrollo de las plantas del ensayo.

Respecto a los niveles de arsénico de la línea base (plantas del entorno), se observan mayores niveles en los tejidos radicales de las plantas del ensayo en otoño de 2016 y otoño de 2015, sin embargo, las concentraciones de arsénico son muy bajas según todas las evaluaciones realizadas desde el establecimiento del ensayo.

En relación a los tratamientos, en la campaña de otoño de 2016 no se observan diferencias estadísticamente significativas para arsénico. Anteriormente, en la campaña de otoño de 2015, la especie Pimiento presentó mayores niveles de arsénico en el tejido radical en los tratamientos T2 y T3, mientras que la especie Quillay presentó un mayor nivel del elemento solamente en el tratamiento T2, en comparación con el resto de los tratamientos. En relación a estos resultados, se debe destacar que las concentraciones detectadas en el tejido radical son bajas, lo que junto con la falta de continuidad, no permite establecer un efecto de los tratamientos sobre los niveles de arsénico del tejido radical.

#### 4.4.3.5 Cadmio (mg/kg)

**Gráfico 4.4-37. Concentración de cadmio en tejido radical (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



Fuente: Arcadis 2016.

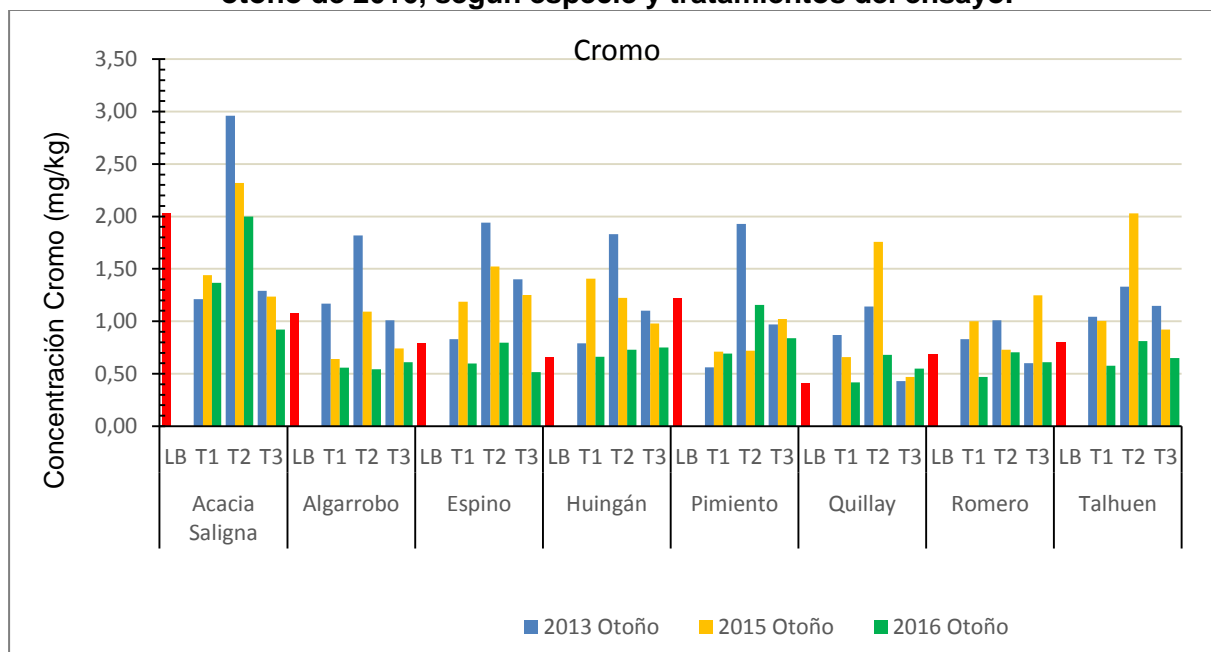
Al igual que en el tejido foliar, según las determinaciones de otoño de 2016 y otoño de 2015, la especie que ha presentado los mayores niveles de cadmio en el tejido radical corresponde a Romero. Por otra parte, según se muestra en **Gráfico 4.4-37**, los niveles de cadmio en raíces se han mantenido estables entre campañas de muestreo, presentando mínimas variaciones en la mayoría de las especies.

Los niveles de cadmio en el tejido radical de la línea base del ensayo (plantas del entorno) son similares a los determinados en otoño de 2016 en la mayoría de las especies. Sin embargo, se destaca que la especie Romero presentó los mayores niveles de este elemento en la línea base ( $0,77 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en comparación con el resto de las especies, tendencia que es consecuente con los niveles encontrados de cadmio en el tejido radical en la campaña de otoño de 2016.

En relación a los tratamientos, la especie Algarrobo presentó diferencias estadísticas, en donde el tratamiento T2 presentó menores niveles de cadmio en el tejido radical, en comparación con el resto de los tratamientos. Sin embargo, las concentraciones de cadmio en el tejido radical en la especie Algarrobo son muy bajas (al igual que en el resto de las especies), lo que, junto con la falta de continuidad de los resultados observados, permite descartar su importancia.

#### 4.4.3.6 Cromo (mg/kg)

**Gráfico 4.4-38. Concentración de cromo en tejido radical (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



Fuente: Arcadis 2016.

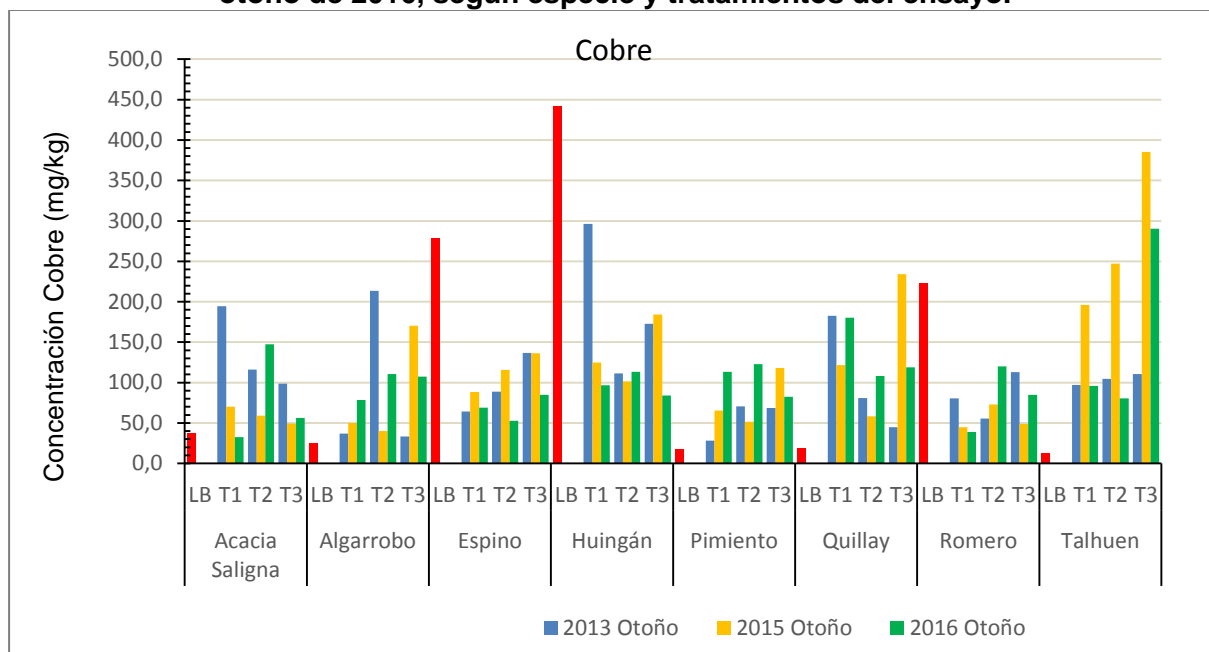
Las concentraciones de cromo en el tejido radical han experimentado una disminución generalizada en las especies del ensayo durante el periodo de otoño de 2013 a otoño de 2016. Esta disminución puede ser atribuida a un aumento en la biomasa de raíces y consecuente efecto dilución (Deram et al., 2006) de cromo.

Respecto a los niveles de cromo en el tejido radical determinados en la línea base (plantas del entorno), en la campaña de otoño de 2016, las especies Espino, Quillay, Romero y Talhuén presentaron niveles similares a la línea base, mientras que el resto de especies mostraron menores niveles de cromo en el tejido radical.

En relación a los tratamientos, en la campaña de otoño de 2016, las especies Pimiento y Quillay presentaron mayores niveles de cromo en el tejido radical para el tratamiento T2, mostrando un efecto de la aplicación de compost sobre este elemento. Al respecto, en la campaña de otoño de 2015, la especie Quillay presentó un resultado similar (junto con la especie Talhuén), mientras que el resto de las especies no presentó diferencias estadísticas entre tratamientos.

#### 4.4.3.7 Cobre (mg/kg)

**Gráfico 4.4-39. Concentración de cobre en tejido radical (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



Fuente: Arcadis 2016.

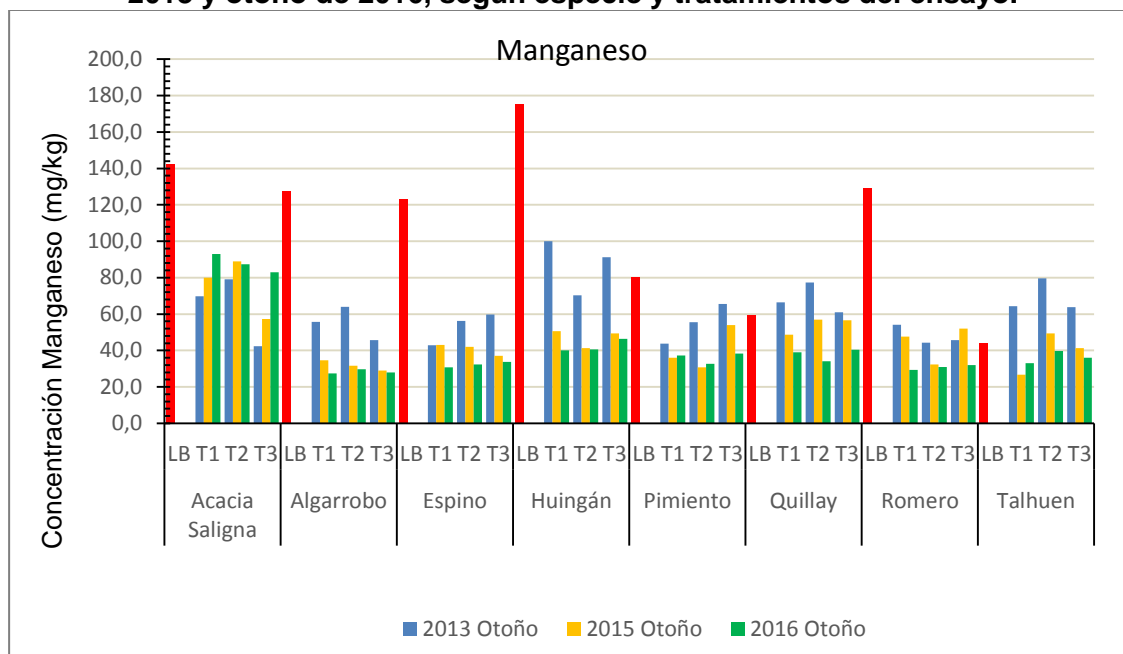
El elemento cobre ha presentado un comportamiento variable durante el periodo transcurrido entre otoño de 2013 y otoño de 2016. Las especies Pimiento, Quillay y Talhuén han mostrado una tendencia al aumento de los niveles de cobre en raíces, mientras que las especies *Acacia saligna*, Espino y Huigán han tendido a disminuir las concentraciones de cobre en raíces, según se muestra en **Gráfico 4.4-39**. El resto de las especies (Algarrobo y Romero) han presentado niveles similares entre las campañas de otoño de 2013 y otoño de 2016.

En relación a las concentraciones de cobre en tejido radical determinadas en la línea base del ensayo (plantas del entorno), el comportamiento es variable, ya que las especies *Acacia saligna*, Algarrobo, Pimiento, Quillay y Talhuén presentaron mayores niveles de cobre en las plantas del ensayo, mientras que el resto de las especies (Espino, Huigán y Romero) presentaron niveles más altos de cobre en la línea base, en comparación con las determinaciones de otoño de 2016.

En relación a los tratamientos, en la campaña de otoño de 2016 las especies Quillay y Romero presentaron diferencias significativas entre tratamientos. En la especie Quillay se encontraron menores concentraciones de cobre en raíces en el tratamiento T2, mientras que en Romero se observó lo contrario, presentando una mayor concentración de cobre para el tratamiento T2. El resultado en la especie Quillay ha sido previamente observado en la campaña de otoño de 2015, en donde el tratamiento T2 presentó menores niveles de cobre en el tejido radical, en comparación con el resto de los tratamientos.

#### 4.4.3.8 Manganeseo (mg/kg)

**Gráfico 4.4-40. Concentración de manganeso en tejido radical (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



Fuente: Arcadis 2016.

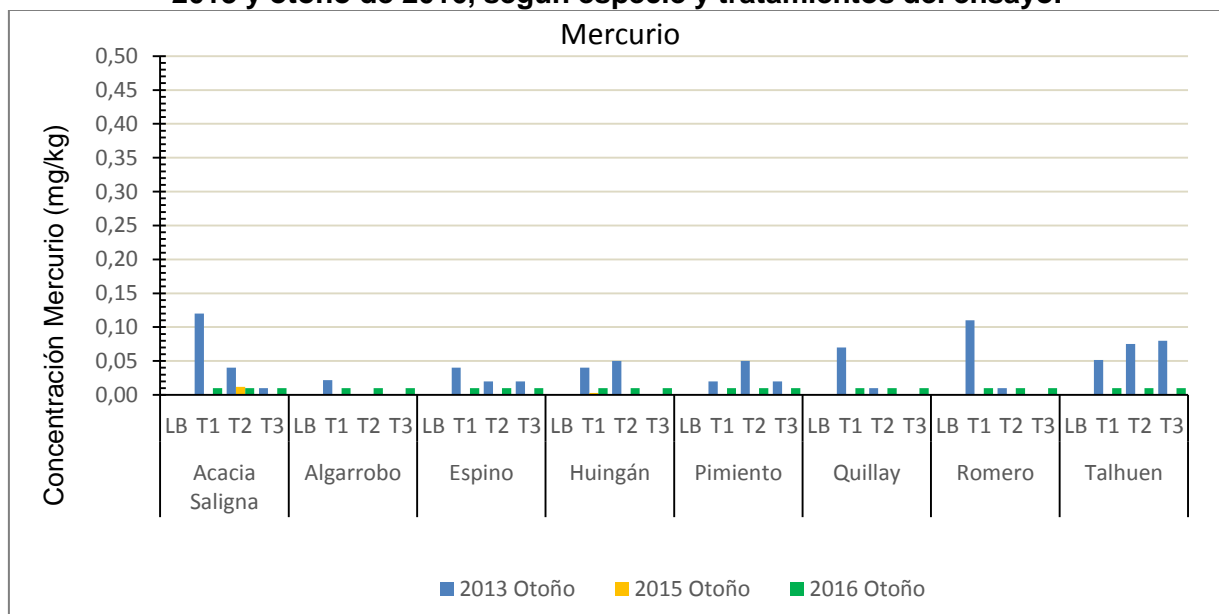
Según se muestra en **Gráfico 4.4-40**, las concentraciones de manganeso en el tejido radical han presentado una tendencia a la disminución entre las campañas de otoño de 2013 y otoño de 2016, con excepción de la especie *Acacia saligna*, la que ha presentado un aumento en los niveles de manganeso en raíces entre las campañas de muestreo mencionadas. Por otro lado, en la campaña de otoño de 2016, la especie *Acacia saligna* presenta los niveles más altos de manganeso en raíces, encontrándose en el rango de 83 a 93 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que el resto de las especies presentan niveles de manganeso menores o cercanos a 40 mg kg<sup>-1</sup>.

Los niveles de manganeso determinados en el tejido radical de las plantas del ensayo en otoño de 2016, así como en campañas previas, son menores a los determinados en la línea base del ensayo, con excepción de la especie *Talhuén*, la que ha presentado niveles de manganeso similares a los determinados en la línea base del ensayo.

En relación a los tratamientos, en la campaña de otoño de 2016 no fueron observadas diferencias estadísticas significativas para manganeso. Al respecto, en la campaña de otoño de 2015, la especie *Acacia saligna* presentó mayores niveles de manganeso en el tejido radical en los tratamientos T1 y T2, en comparación con el tratamiento T3. Cabe destacar que este comportamiento no había sido detectado en campañas anteriores, por lo que junto con los análisis de otoño de 2016, es posible descartar la importancia de este resultado.

#### 4.4.3.9 Mercurio (mg/kg)

**Gráfico 4.4-41. Concentraciones de Mercurio en tejido radical (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



Fuente: Arcadis 2016.

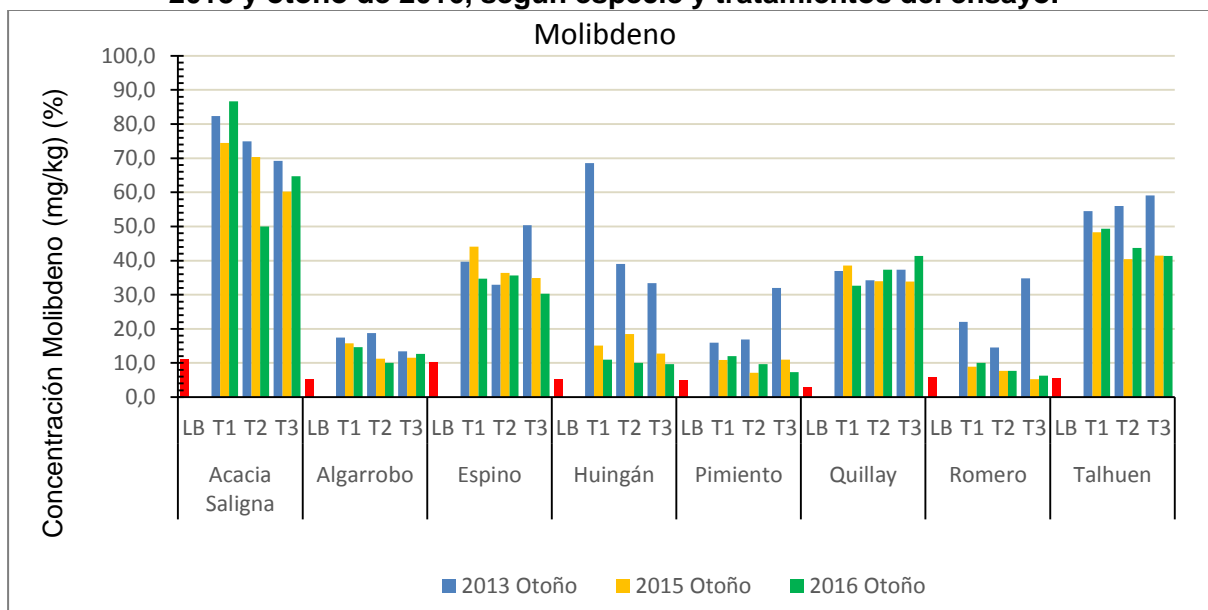
Según se muestra en **Gráfico 4.4-41**, los niveles de mercurio en el tejido radical de las plantas del ensayo son muy bajos o equivalentes al límite de detección de los equipos de laboratorio. Según la campaña de otoño de 2013, la máxima concentración de mercurio se observó en la especie *Acacia saligna* y no sobrepasó el valor de 0,12 mg kg<sup>-1</sup>. Posteriormente, en las campañas de otoño de 2015 y otoño de 2016, las concentraciones de mercurio en todas las especies del ensayo son muy bajas y menores al límite de detección de los equipos de laboratorio.

Cabe destacar que en la línea base del ensayo (plantas del entorno) no se detectó mercurio en el tejido radical de las plantas.



#### 4.4.3.10 Molibdeno (mg/kg)

**Gráfico 4.4-42. Concentración de molibdeno en tejido radical (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



Fuente: Arcadis 2016.

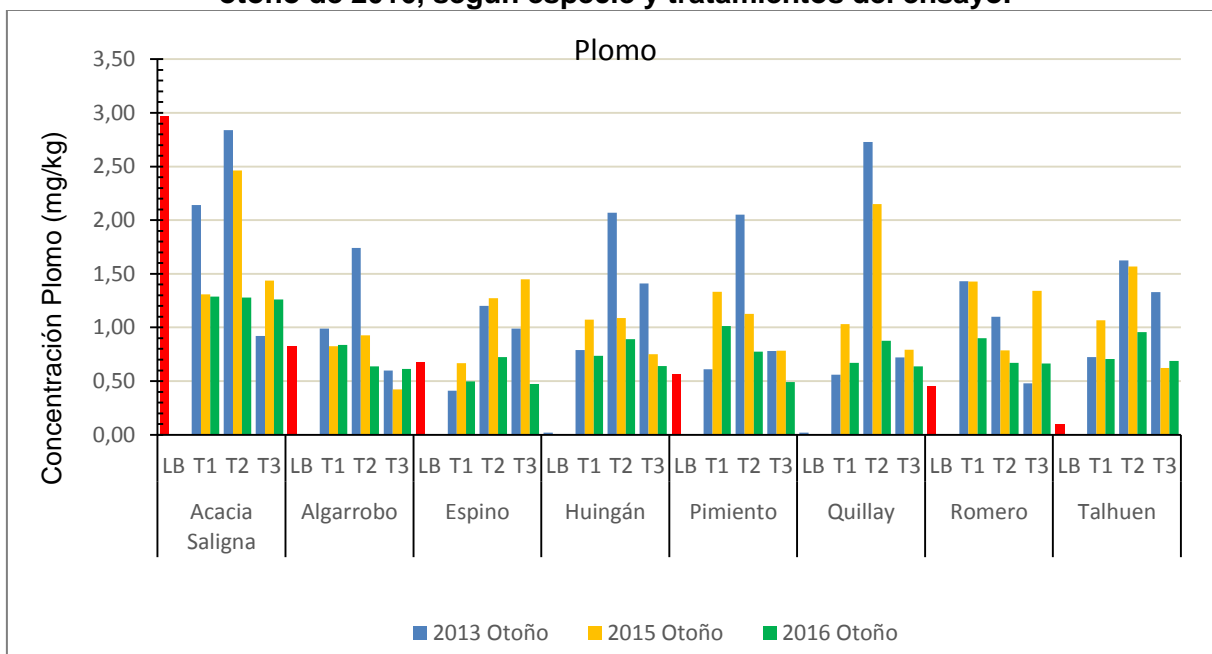
Según se muestra en **Gráfico 4.4-42**, los niveles de molibdeno en raíces de las especies Huingán, Pimiento, Talhuén, Romero y Acacia saligna han experimentado una disminución entre las campañas de otoño de 2013 y otoño de 2016, mientras que el resto de las especies ha presentado niveles de molibdeno similares entre campañas de muestreo. En la campaña de otoño de 2016, la especie Acacia saligna ha presentado los mayores niveles de molibdeno en el tejido radical, encontrándose en el rango de 50 a 87 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que los menores niveles de este parámetro son observados en las especies Algarrobo, Huingán, Pimiento y Romero, las que presentan valores cercanos o menores a 10 mg kg<sup>-1</sup>.

En general, los niveles de molibdeno de las plantas del ensayo son mayores a los observados en la línea base.

En relación a los tratamientos, en la campaña de otoño de 2016 no se han observado diferencias significativas para molibdeno. Al respecto, en la campaña de otoño de 2015, la especie Romero presentó diferencias estadísticas, observándose menores niveles de molibdeno en raíces en los tratamientos T2 y T3, en comparación con T1. Sin embargo, estos resultados no fueron observados en la campaña de otoño de 2016, siendo descartada la importancia del resultado observado en otoño de 2015.

#### 4.4.3.11 Plomo (mg/kg)

**Gráfico 4.4-43. Concentración de plomo en tejido radical (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



Fuente: Arcadis 2016.

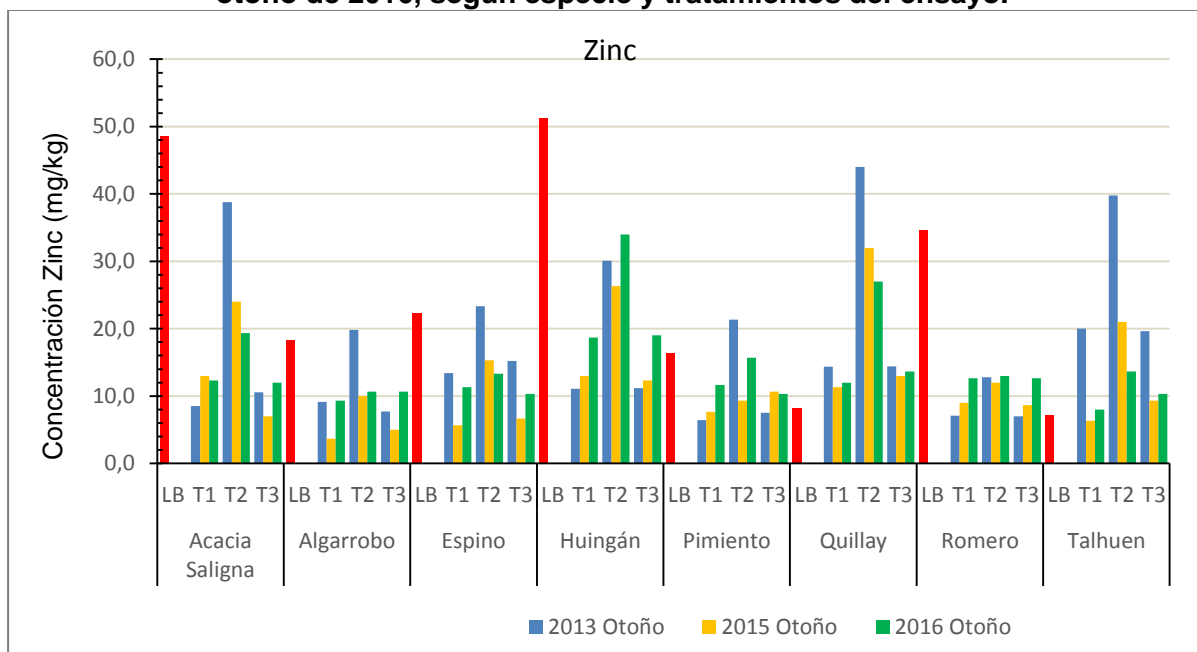
Según se muestra en **Gráfico 4.4-43**, los niveles de plomo en el tejido radical de las especies del ensayo son bajas y han mostrado una tendencia a la disminución entre las campañas de otoño de 2013 y otoño de 2016. Según la campaña de otoño de 2013, las especies Acacia saligna, Quillay y Huigán presentaron las concentraciones de plomo más altas del ensayo. Sin embargo, según las campañas de otoño 2015 y otoño de 2016, los resultados indican que todas las especies presentan niveles bajos y similares, correspondiendo a concentraciones cercanas a 1 mg kg<sup>-1</sup>.

En comparación con los niveles de la línea base, sólo la especie Acacia saligna ha presentado niveles de plomo menores en las plantas del ensayo, mientras que el resto de las especies del ensayo han presentado niveles similares (Algarrobo, Espino, Pimiento) o mayores (Huigán, Quillay, Romero y Talhuén) de plomo en raíces.

En relación a los tratamientos, en la campaña de otoño de 2016 sólo la especie Romero presentó diferencias estadísticas, en donde los tratamientos T2 y T3 presentaron menores niveles de plomo en raíces, en comparación con el tratamiento T1. Al respecto, en la campaña de otoño de 2015 se observaron diferencias estadísticas en la especie Quillay, la que presentó mayores niveles de plomo en el tejido radical para el tratamiento T2, en comparación con el resto de los tratamientos. Cabe destacar que los resultados de los análisis estadísticos de plomo en tejido radical no han sido estables en el tiempo, permitiendo descartar su importancia.

#### 4.4.3.12 Zinc (mg/kg)

**Gráfico 4.4-44. Concentración de zinc en tejido radical (mg/kg) entre otoño de 2013 y otoño de 2016, según especie y tratamientos del ensayo.**



Fuente: Arcadis 2016.

Entre las campañas de otoño de 2013 y otoño de 2015, se observa leve una tendencia a la disminución de los niveles de zinc en las especies *Acacia saligna*, Espino, Quillay y Talhuén, mientras que, en el resto de las especies del ensayo, los niveles de zinc en raíces se han mantenido relativamente estable en el tiempo, con excepción de la especie Huingán, en la que se observa un aumento promedio de  $17 \text{ mg kg}^{-1}$  (otoño de 2013) a  $24 \text{ mg kg}^{-1}$  (otoño de 2016).

En relación a los niveles de la línea base, la mayoría de las especies del ensayo presentan menores niveles de zinc en raíces. Sólo en la especie Talhuén se han observado niveles superiores de este parámetro en otoño de 2016 ( $11 \text{ mg kg}^{-1}$ ), con respecto a las determinaciones de la línea base ( $7 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

En relación a los tratamientos, sólo fueron observadas diferencias estadísticas en zinc para la especie Quillay, en donde el tratamiento T2 presentó mayores niveles de zinc en raíces, en comparación con el resto. Este resultado fue observado en la campaña de otoño de 2015, en donde la especie Quillay, junto con las especies Algarrobo, Romero y Talhuén, presentaron mayores niveles de zinc en el tratamiento T2, en comparación con el resto de los tratamientos.

---

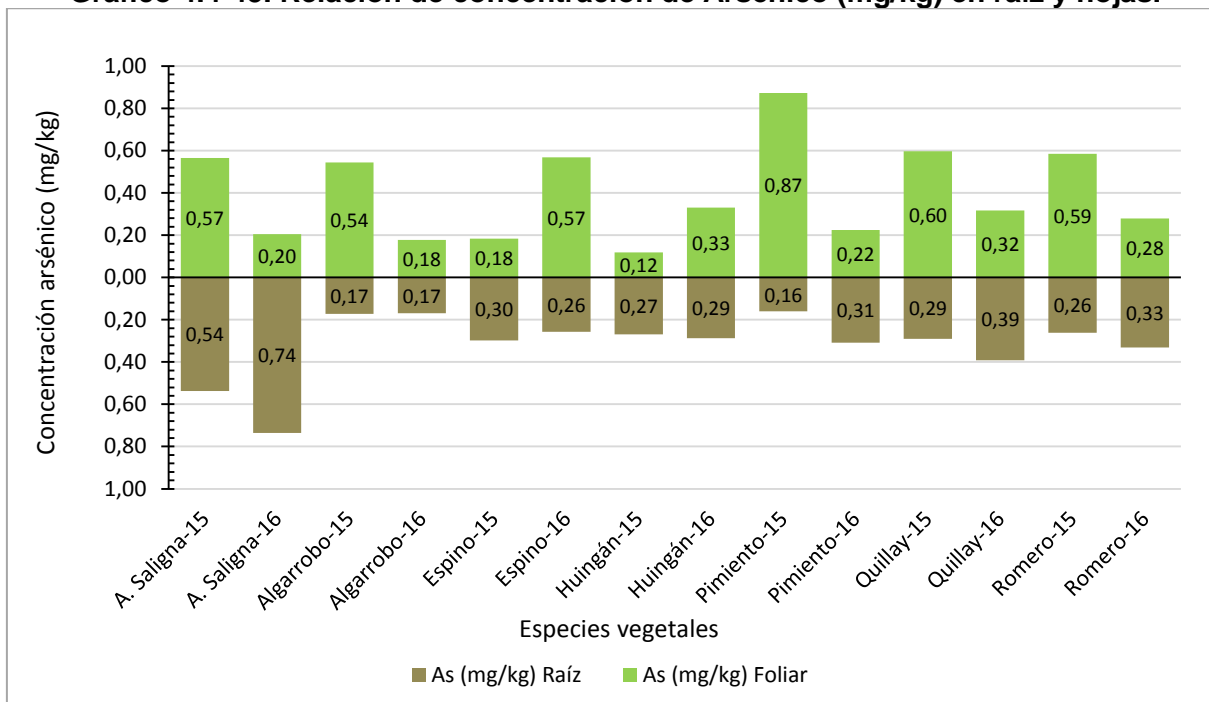
#### **4.4.4 Relación de concentración de metales en tejido foliar versus tejido radical**

A modo de ejemplificar las concentraciones de metales presentes en el tejido vegetal de los ejemplares muestreados, a continuación se presenta gráficamente dichas concentraciones para un mejor entendimiento.

A continuación se presenta la relación de concentraciones de los metales y metaloides presentes en hojas y raíces cuyas muestras se han obtenido de las campañas otoño 2015 y otoño 2016.

#### 4.4.4.1 Arsénico

**Gráfico 4.4-45. Relación de concentración de Arsénico (mg/kg) en raíz y hojas.**

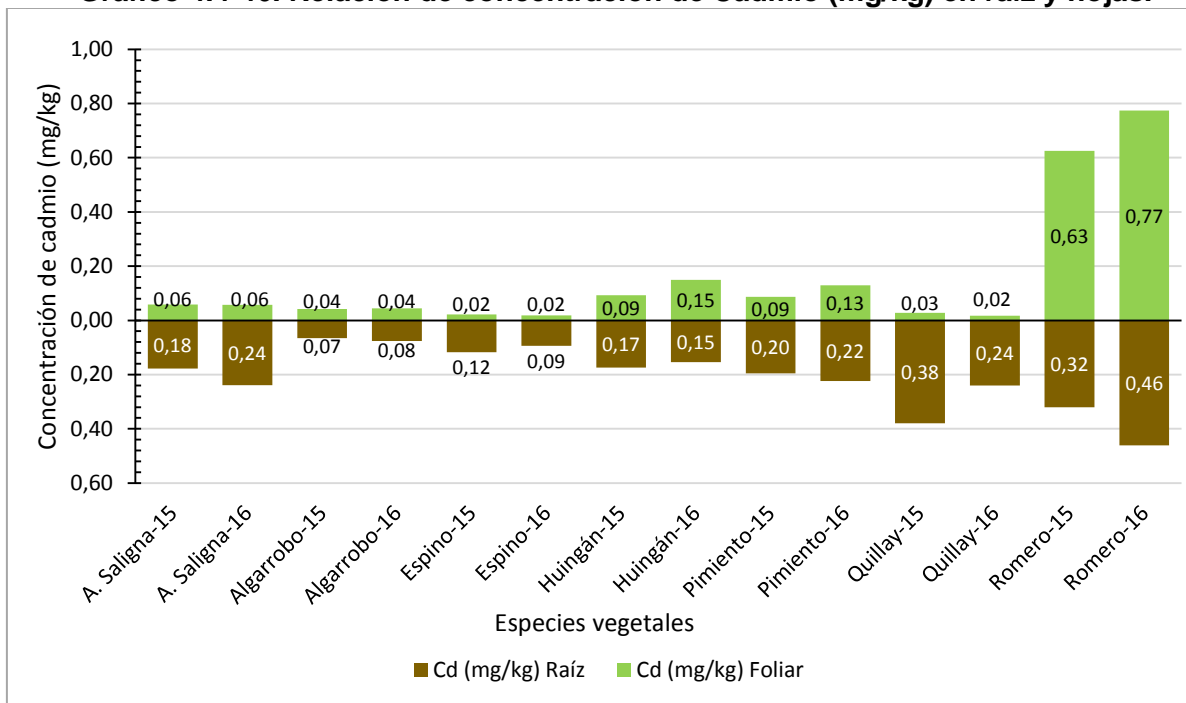


Fuente: Arcadis 2016.

El arsénico es un elemento tóxico para las plantas, ya que reacciona con varias enzimas, interrumpiendo el flujo de energía celular e inhibiendo el crecimiento de raíces (Kabata-Pendias, 2007). En general, según se muestra en Gráfico 4.4-45, las concentraciones de arsénico en el tejido foliar en las campañas de otoño de 2015 y otoño de 2016 son muy bajas, sin alcanzar el rango de toxicidad establecido para la mayoría de las plantas (5-20 mg kg<sup>-1</sup>; Kabata-Pendias 2011). Un comportamiento similar ha sido observado en raíces, presentado concentraciones similares a las de tejido foliar en la mayoría de las plantas del ensayo. Al respecto, se han observado índices de translocación mayores a 1 en varias especies del ensayo, aunque este comportamiento ha sido variable entre temporadas. Sin embargo, se destaca que las concentraciones son muy bajas y no advierten problemas desde el punto de vista de la fitotoxicidad. Además, las bajas concentraciones en todas las especies y campañas no permiten diagnosticar un comportamiento fitoextractor del arsénico.

#### 4.4.4.2 Cadmio

**Gráfico 4.4-46. Relación de concentración de Cadmio (mg/kg) en raíz y hojas.**

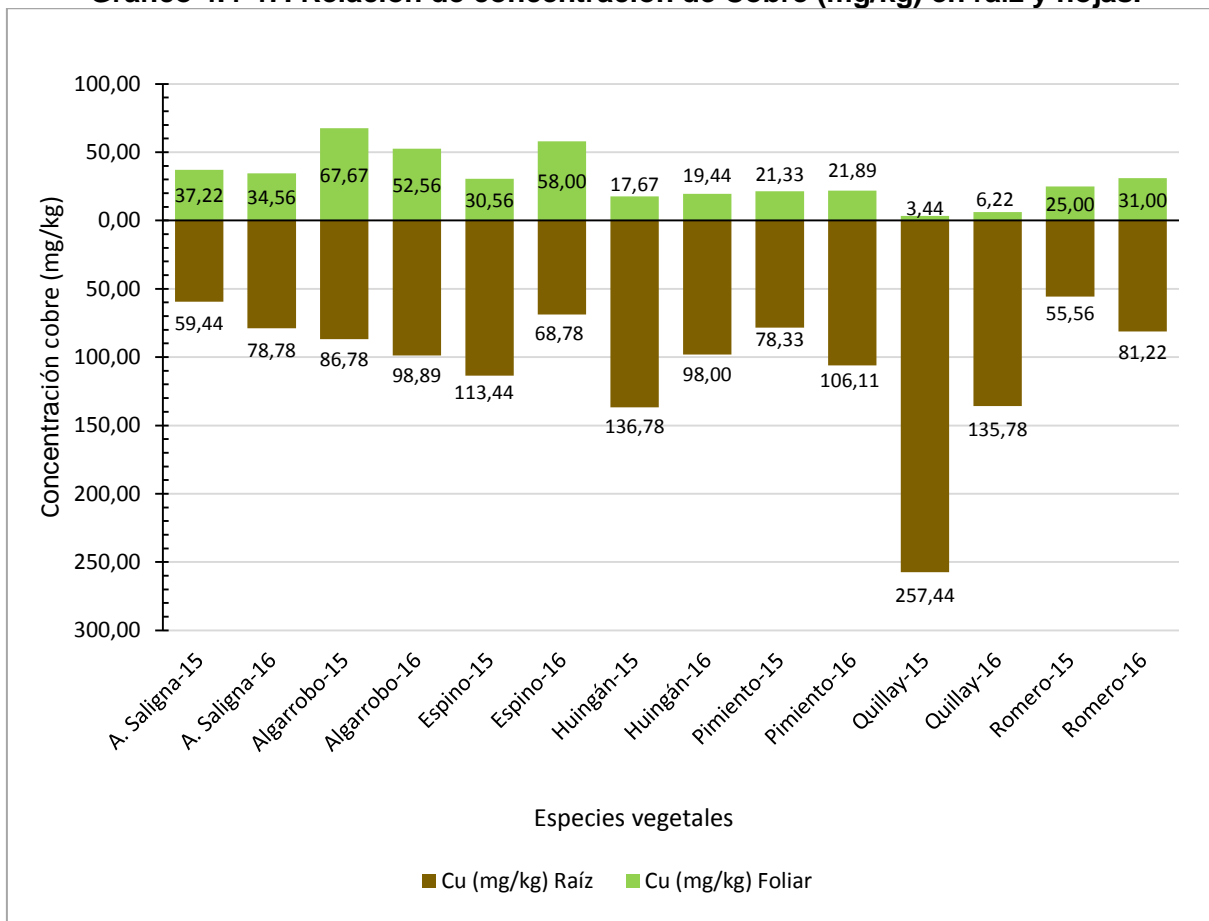


Fuente: Arcadis 2016.

El cadmio tiene un efecto tóxico en el metabolismo de las plantas. Reduce los niveles de ascorbato y glutatión, inhibe la formación de clorofila, inhibe la fotosíntesis y perturba la permeabilidad de las membranas celulares. Además, puede retardar el crecimiento, producir daño a raíces y causar clorosis (Kabata-Pendias, 2007). Según se muestra en Gráfico 4.4-46, todas las especies del ensayo han mostrado similares concentraciones de cadmio en hojas y raíces en las campañas de otoño de 2015 y otoño de 2016. En general, los niveles de cadmio son bajos en ambos tejidos, lo que es atribuido a la baja concentración de cadmio en el relave (concentración menor a 0,01 mg kg<sup>-1</sup> según campaña de otoño de 2016). Por otro lado, todas las especies han mostrado bajos índices de translocación de cadmio, presentando valores menores a 1,0 en la mayoría de las especies. Una excepción a lo anterior se observó en la especie Romero, ya que en las campañas de otoño de 2015 y otoño de 2016 presentó índices de translocación de 2,0 y 1,7, respectivamente. Esto indica que la especie Romero tiende a movilizar el cadmio desde las raíces a la parte aérea, comportamiento que es indeseado desde el punto de vista de la fitoestabilización. Sin embargo, las bajas concentraciones de cadmio a nivel foliar no advierten mayores inconvenientes, ya que no sobrepasan el rango de toxicidad establecido para la mayoría de las especies (5 – 30 mg kg<sup>-1</sup>; Kabata-Pendias, 2011).

#### 4.4.4.3 Cobre

**Gráfico 4.4-47. Relación de concentración de Cobre (mg/kg) en raíz y hojas.**

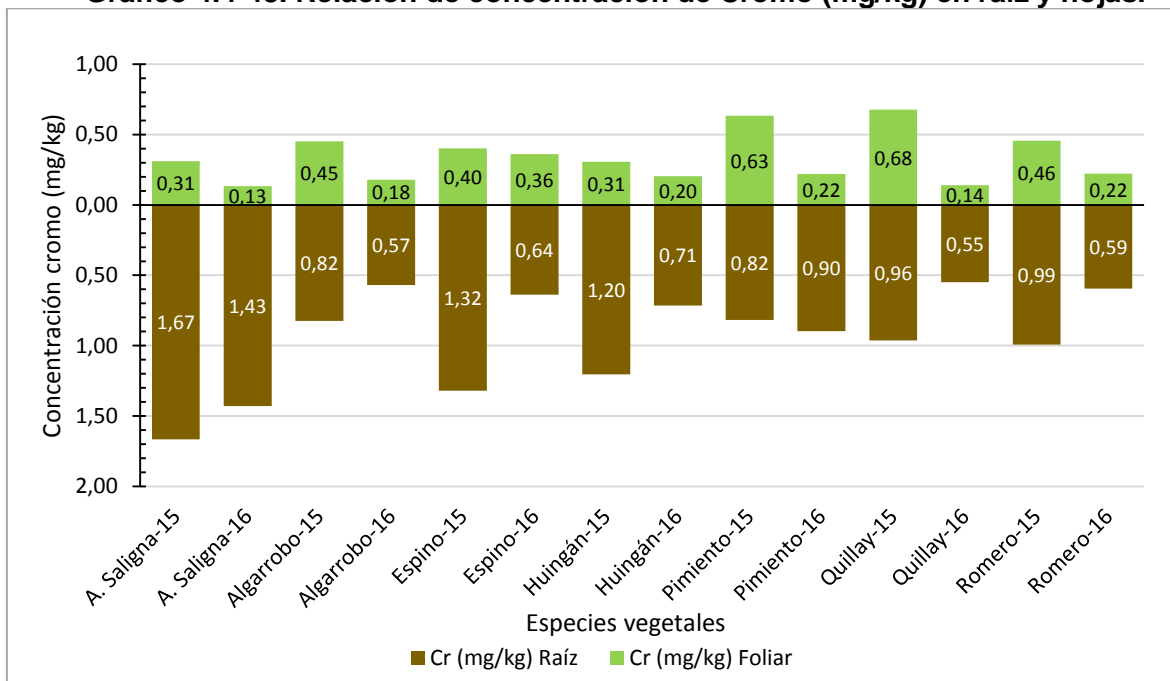


Fuente: Arcadis 2016.

El cobre es un metal esencial para las plantas y tiene un rol en varios procesos fisiológicos, tales como respiración, fotosíntesis, metabolismo de proteínas, entre otros. La mayoría de las plantas son tolerantes a altas concentraciones de cobre. Sin embargo, en exceso puede ser tóxico, causando disminución de la eficiencia fotosintética, daño al ADN y daño en la permeabilidad de las membranas celulares, entre otros síntomas (Kabata-Pendias, 2007). Según se muestra en Gráfico 4.4-47, las concentraciones de cobre foliar han sido estables entre las temporadas de otoño de 2015 y otoño de 2016. Por otro lado, las concentraciones de cobre en el tejido radical han presentado un comportamiento similar, con excepción de las especies Espino y Quillay, en donde se ha observado una disminución de las concentraciones de cobre, lo que puede ser explicado por un aumento de la materia seca de raíces y consecuente efecto dilución del metal (Deram et al., 2006). En general, todas las especies han presentado índices de translocación menores a 1, indicando que el elemento es concentrado de forma preferencial en las raíces de las plantas, comportamiento que es deseado desde el punto de vista de la fitoestabilización.

#### 4.4.4.4 Cromo

**Gráfico 4.4-48. Relación de concentración de Cromo (mg/kg) en raíz y hojas.**



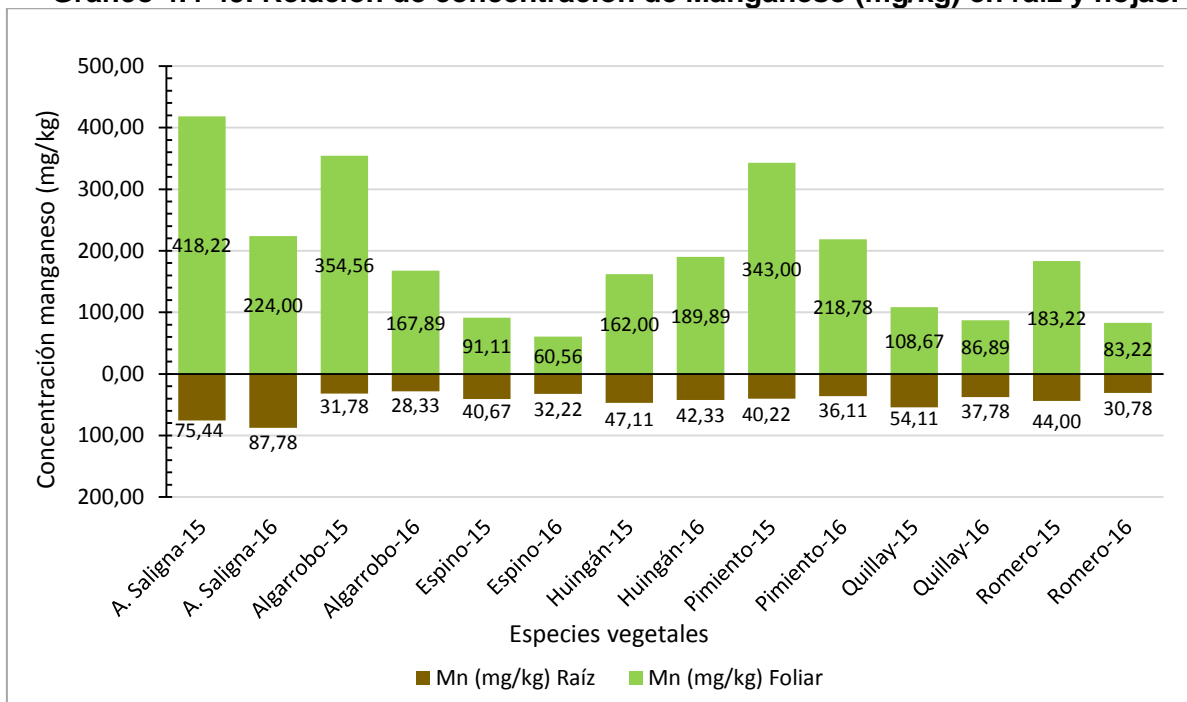
Fuente: Arcadis 2016.

El cromo es un elemento que tiene efectos tóxicos en plantas, afectando la formación de proteínas debido a la alteración en el metabolismo del nitrógeno, además de disminuir los procesos fotosintéticos (Kabata-Pendias, 2007). Según se muestra en Gráfico 4.4-48, los niveles de cromo en los tejidos foliar y radical son bajos y no advierten problemas de toxicidad para las plantas del ensayo. Esto se debe a la baja concentración de cromo en el relave (promedio de 8,7 mg kg<sup>-1</sup> en la temporada de otoño de 2016). Por otro lado, las concentraciones de cromo en estos tejidos no han presentado cambios importantes entre las campañas de otoño de 2015 y otoño de 2016, observándose mayores concentraciones en el tejido radical en comparación con las concentraciones del tejido foliar, comportamiento que determina bajos índices de translocación de cromo en todas las plantas del ensayo. De acuerdo a lo anterior, todas las especies cumplen con el objetivo de la estrategia de fitoestabilización de cromo.



#### 4.4.4.5 Manganese

**Gráfico 4.4-49. Relación de concentración de Manganese (mg/kg) en raíz y hojas.**



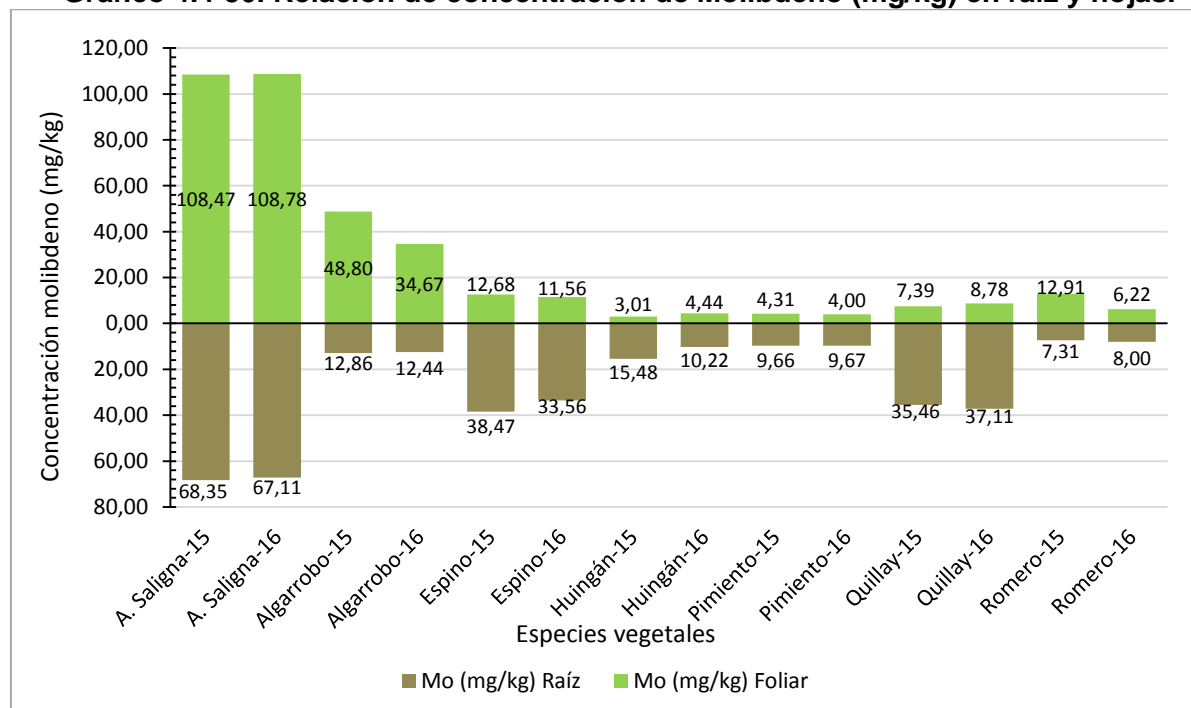
Fuente: Arcadis 2016.

El manganeso es un elemento esencial para las plantas, siendo importante debido a su participación en procesos de óxido-reducción. Es componente de las enzimas arginasa y fosfotransferasa, y tiene un importante rol en la fotosíntesis (asimilación de CO<sub>2</sub>; síntesis de clorofila). Si bien las plantas pueden tolerar altas concentraciones de manganeso en el suelo, un exceso de manganeso puede ser tóxico, produciendo manchas marrones en hojas y pardeamiento de raíces (Kabata-Pendias, 2007; Silva y Rodríguez, 1995). Según se observa en Gráfico 4.4-49, todas las especies translocan mayoritariamente el manganeso hacia la parte aérea de las plantas, encontrándose en concentraciones en hojas que varían ampliamente entre especies. Por ejemplo, en otoño de 2016 la especie Espino presentó una concentración de manganeso en hojas de 61 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que en la campaña de otoño de 2015, en la especie Acacia saligna se observó una concentración de manganeso en hojas de 418 mg kg<sup>-1</sup>. Por otro lado, se observa que las concentraciones de manganeso en el tejido radical son menos variables entre especies y campañas de muestreo, en comparación con las concentraciones de manganeso en hojas, encontrándose en un rango de 32 – 75 mg kg<sup>-1</sup> en otoño de 2015 y 28 – 87 mg kg<sup>-1</sup> en otoño de 2016. En general, es normal encontrar mayores concentraciones de manganeso en hojas, en comparación a las concentraciones de otros micronutrientes esenciales. Cabe destacar que según Marschner (2012), la mayoría de las plantas presentan mecanismos de resistencia al manganeso en hojas y brotes, evitando de esta forma la interferencia de funciones metabólicas esenciales. Sin embargo, no es recomendable que las concentraciones de manganeso en hojas superen los 400 mg kg<sup>-1</sup>, umbral de toxicidad establecido para la mayoría de las plantas (Kabata-Pendias, 2011). Por

último, respecto a las concentraciones foliares, se ha observado una disminución de las concentraciones de manganeso en otoño 2016 comparado con las concentraciones obtenidas en la campaña 2015.

#### 4.4.4.6 Molibdeno

**Gráfico 4.4-50. Relación de concentración de Molibdeno (mg/kg) en raíz y hojas.**



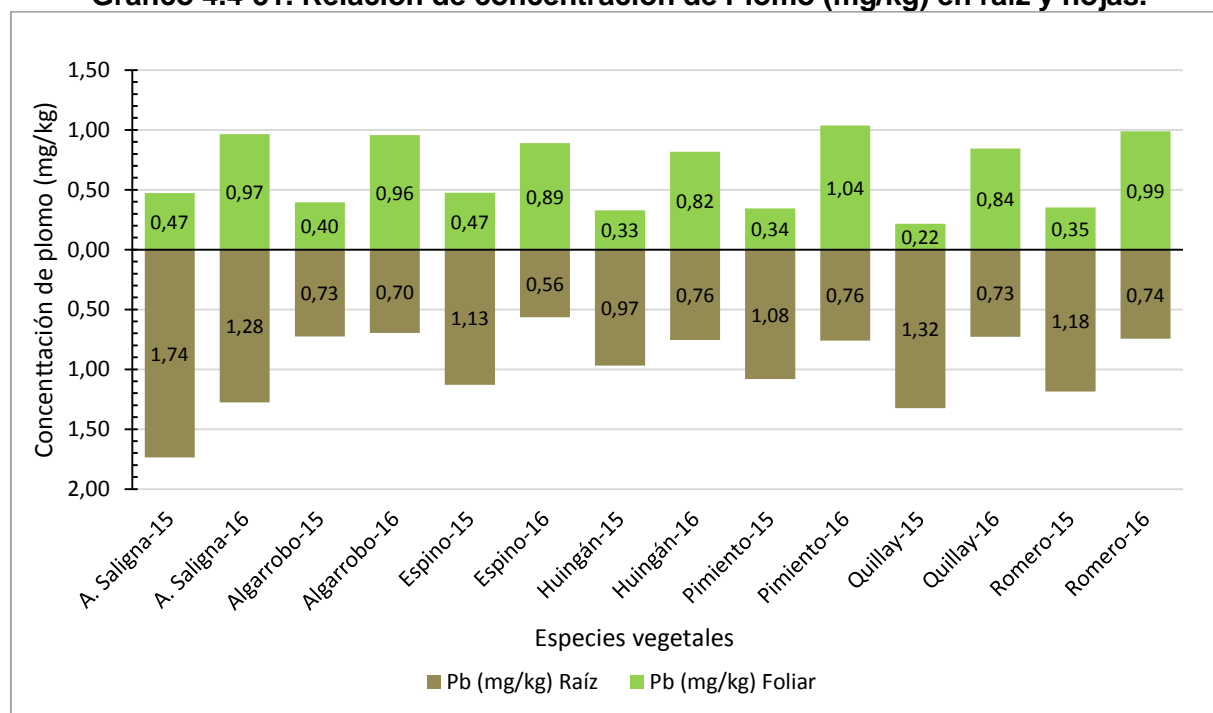
Fuente: Arcadis 2016.

El molibdeno es un elemento esencial para las plantas, aunque el requerimiento de este elemento es relativamente bajo. Es componente esencial de varias enzimas, tales como nitrato reductasa, xantina deshidrogenasa, entre otras. Sin embargo, altas concentraciones pueden ser tóxicas, provocando coloraciones rojizas en los márgenes de las hojas y malformación de éstas (Kabata-Pendias, 2007; Marschner, 2012). Según se observa en Gráfico 4.4-50, durante las temporadas de otoño de 2015 y otoño de 2016, sólo las especies Acacia saligna y Algarrobo presentaron altas concentraciones de molibdeno en hojas, mientras que el resto de las especies presentaron concentraciones de molibdeno menores a 13 mg kg<sup>-1</sup> en ambas campañas. Por otro lado, las mayores concentraciones de molibdeno en raíces fueron observadas en las especies Acacia saligna, Espino y Quillay. Al respecto, en la especie Acacia saligna se ha observado un comportamiento muy estable entre temporadas, presentando altas concentraciones de molibdeno en hojas (108-109 mg kg<sup>-1</sup>) y en raíces (67-68 mg kg<sup>-1</sup>). Este comportamiento es esperable, debido a que las especies de tipo leguminosas presentan mayores concentraciones de molibdeno, en comparación al resto de las especies, sobrepasando los rangos establecidos como excesivos o tóxicos para la mayoría de las plantas (10 – 50 mg kg<sup>-1</sup>; Kabata-Pendias, 2011). Sin embargo, estos rangos deben ser evaluados con precaución, ya que según Marschner (2012), una característica única de la nutrición de

molibdeno es el amplio rango de variación entre las concentraciones que pueden ser consideradas deficientes y las concentraciones que pueden tener efectos tóxicos. Respecto a la translocación del molibdeno en las plantas del ensayo, en las campañas de otoño de 2015 y otoño de 2016, se han observado índices de translocación mayores a 1 en las especies *Acacia saligna* y *Algarrobo*, mientras que la especie *Romero* ha presentado índices cercanos a 1. Este comportamiento indica que estas especies tienden a concentrar el molibdeno en hojas, aunque no necesariamente a niveles que puedan causar síntomas de toxicidad. El resto de las especies han presentado índices de translocación menores a 1 en ambas campañas de muestreo, comportamiento deseado desde el punto de vista de la fitoestabilización.

#### 4.4.4.7 Plomo

**Gráfico 4.4-51. Relación de concentración de Plomo (mg/kg) en raíz y hojas.**



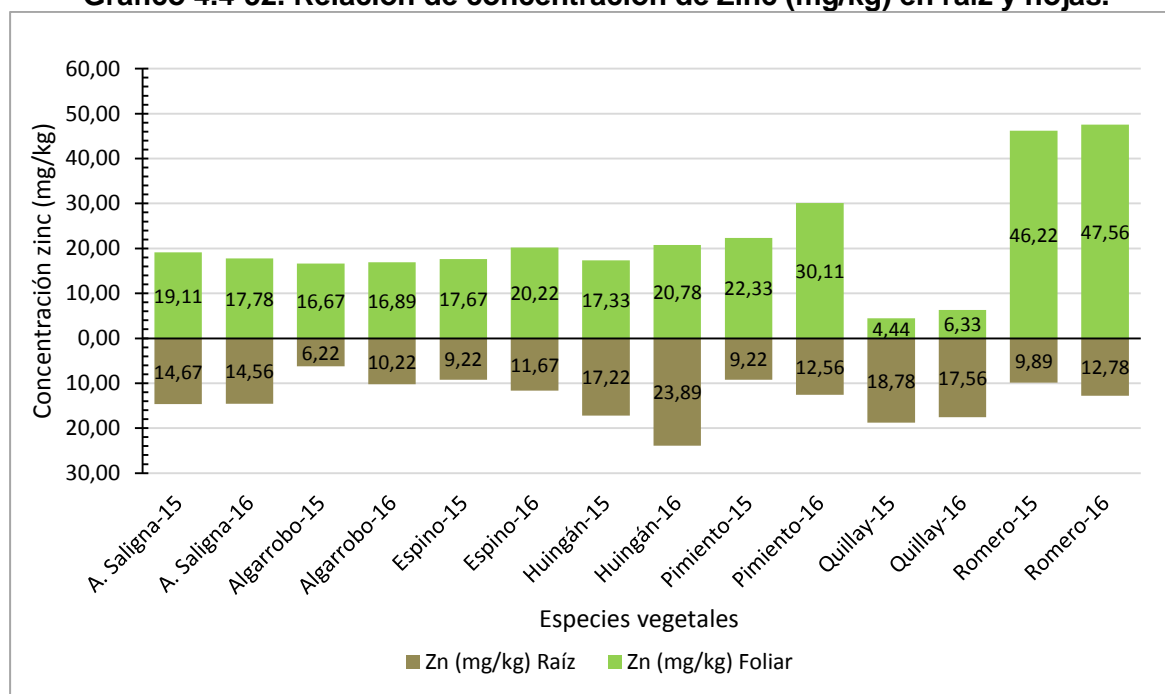
Fuente: Arcadis 2016.

El plomo es un elemento no esencial para las plantas y puede tener efectos altamente fitotóxicos. El exceso de plomo conduce a una inhibición de la biosíntesis de clorofila, disminución en la producción de biomasa y una menor elongación de brotes y raíces (Pourrut et al., 2011). Según se muestra en Gráfico 4.4-51, en las campañas de otoño de 2015 y otoño de 2016 se observa que las concentraciones de plomo en todas las especies del ensayo son bajas, tanto en hojas como en raíces, lo que es esperable debido a las bajas concentraciones de plomo del relave (promedio de 23,6 mg kg<sup>-1</sup> en otoño de 2016). Estos niveles de plomo no advierten problemas de toxicidad para las plantas del ensayo, ya que se encuentran muy por debajo del rango considerado excesivo o tóxico para la mayoría de las plantas (30 – 300 mg kg<sup>-1</sup>; Kabata-Pendias, 2011). En relación a la translocación del elemento en la planta, la mayoría de las especies presentan índices de translocación menores a 1, lo que indica que el

plomo tiende a ser concentrado de forma preferencial en raíces, siendo un comportamiento deseado desde el punto de vista de la fitoestabilización. Sin embargo, algunos casos particulares se han observado con índices de translocación mayores a 1, comportamiento que no ha sido estable entre las campañas de muestreo de otoño de 2015 y otoño de 2016, siendo más bien atribuido a las bajas concentraciones determinadas en los tejidos vegetales de las plantas del ensayo. Cabe destacar que los niveles de plomo bajos en hojas y raíces de las plantas del ensayo, pueden conducir a valores de índices de translocación que no representan el comportamiento general de las plantas del ensayo.

#### 4.4.4.8 Zinc

**Gráfico 4.4-52. Relación de concentración de Zinc (mg/kg) en raíz y hojas.**



Fuente: Arcadis 2016.

El zinc es un elemento esencial para las plantas. Las funciones del zinc están relacionadas con el metabolismo de varios compuestos: proteínas, carbohidratos, fosfatos, ribosomas y RNA. Además, promueve hormonas de crecimiento y la formación de almidón. En altas concentraciones puede ser tóxico, causando lesiones necróticas en hojas y afectado el crecimiento radical (Kabata-Pendias, 2007). Según se observa en Gráfico 4.4-52, las concentraciones de zinc en hojas y raíces son bajas y no advierten problemas de toxicidad para las plantas del ensayo, ya que el rango considerado como excesivo de zinc corresponde a 100-400 mg kg<sup>-1</sup> (Kabata-Pendias, 2011). En relación a la distribución de las concentraciones de zinc en las plantas del ensayo, tanto en la campaña de otoño de 2015 y otoño de 2016, se observan mayores concentraciones de zinc en hojas en comparación a las concentraciones de las raíces, lo que determina que la mayoría de las especies presenten índices e translocación mayores a 1, comportamiento no deseado desde el punto de vista de la fitoestabilización. Sin embargo, debido a la naturaleza de micronutriente esencial, el

comportamiento observado es normal, ya que ante los niveles deficientes de zinc que presenta el relave (promedio de 12,3 mg kg<sup>-1</sup> en otoño de 2016), las plantas tienden a concentrar el elemento en los tejidos que son fotosintéticamente activos. Por otro lado, se destacan las bajas concentraciones en hojas, las que en la mayoría de las plantas del ensayo se encuentran en el rango de deficiencia (10 – 20 mg kg<sup>-1</sup>; Kabata-Pendias, 2011), con excepción de la especie Romero, la que presenta un claro comportamiento de fitoextracción de zinc.

## 5 ELECCIÓN DE ESPECIES

A continuación se presenta el análisis realizado para la selección de las especies que son parte del ensayo

### 5.1 RESULTADO ETAPAS

#### 5.1.1 Resultados primera etapa

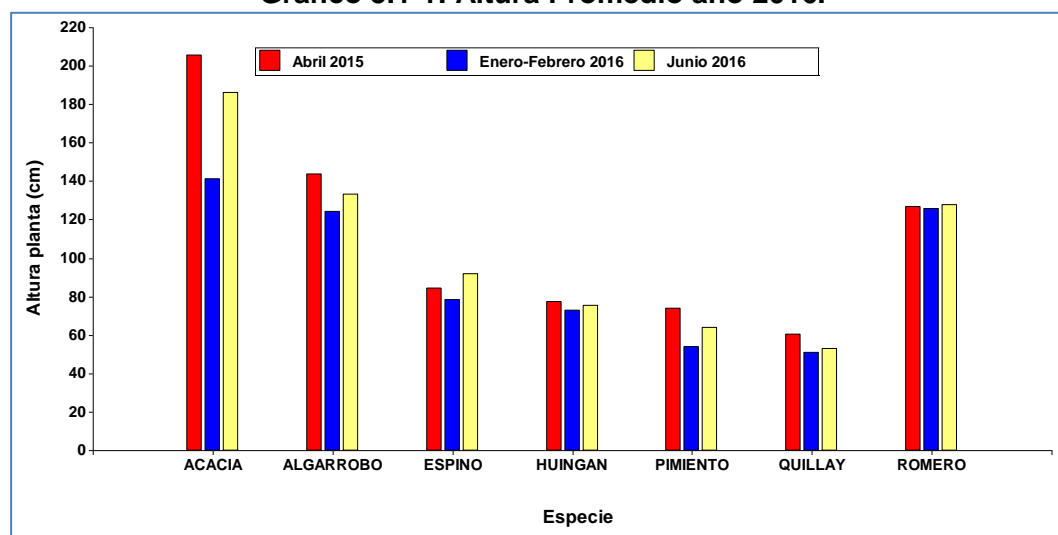
Para el análisis de las especies se utilizó la información de las mediciones dendrométricas realizadas durante el año 2016.

**Tabla 5.1-1. Altura promedio de las especies en temporada 2016.**

Especie	n	Altura planta (cm)
Acacia	60	191,5
Algarrobo	277	133,4
Espino	305	90,4
Huingán	954	75,6
Pimiento	287	64,2
Quillay	338	53,0
Romero	849	128,0

Fuente: U. de Chile, 2016.

**Gráfico 5.1-1: Altura Promedio año 2016.**



Fuente: Arcadis 2016.

En el Gráfico 5.1-1, se puede observar que las especies que presentan mayor altura son la Acacia saligna, Algarrobo seguido de Romero. Las especies de menor altura son el Quillay y Pimiento.

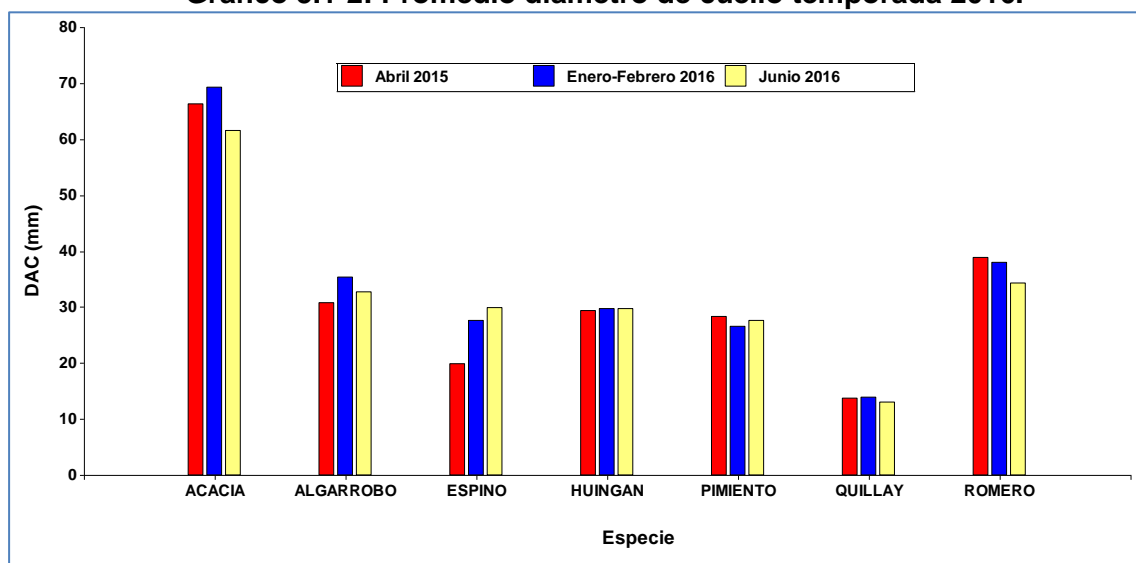
En cuanto al diámetro del tallo basal (DAC), los datos obtenidos el año 2016 indican que la especie Acacia saligna presenta el mayor diámetro en comparación al resto. En un segundo grupo se encuentra el Algarrobo, Espino, Huingán, Pimiento y Romero. Ver Tabla 5.1-2 y Gráfico 5.1-2.

**Tabla 5.1-2. Diámetro de cuello basal promedio de las especies en temporada 2016.**

Especie	n	DAC (mm)
Acacia	60	64,6
Algarrobo	277	35,0
Espino	305	28,9
Huingán	954	29,7
Pimiento	287	27,6
Quillay	338	13,0
Romero	850	34,2

Fuente: Arcadis 2016.

**Gráfico 5.1-2: Promedio diámetro de cuello temporada 2016.**



Fuente: Arcadis 2016.

En cuanto a la cobertura, esta se relaciona con la estructura de la especie, que es importante como superficie de influencia en el entorno como sombreadero, como especie nodriza, entre otras. La especie que tiene mayor diámetro de copa es el Algarrobo y la Acacia saligna. El Quillay es la especie de menor cobertura. Ver Tabla 5.1-3 y Gráfico 5.1-3.

**Tabla 5.1-3. Diámetro de copa (cobertura) de las especies en temporada 2016**  
**Período Enero-Febrero 2016.**

Especie	n	DC prom
Acacia	60	151,4
Algarrobo	272	230
Espino	280	96,3
Huingan	870	91,4
Pimiento	197	73,7
Quillay	196	67,8
Romero	844	135,9

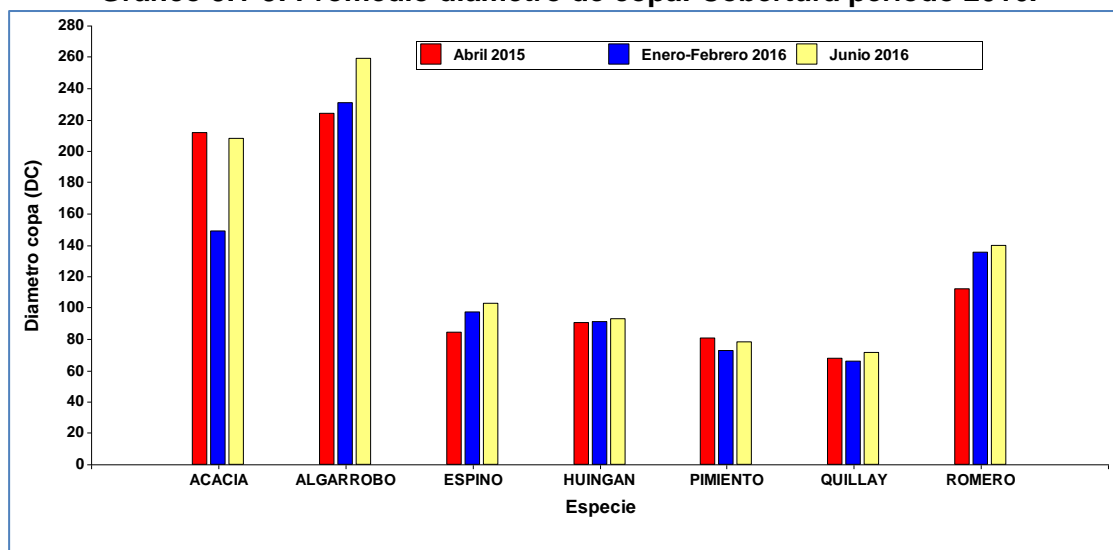
**Período Junio 2016.**

Especie	n	DC prom
Acacia	58	212,2
Algarrobo	269	258,8
Espino	281	102
Huingan	782	92,9
Pimiento	167	79,2
Quillay	161	72,1
Romero	838	140,1

Fuente: U. de Chile, 2016

Fuente: Arcadis 2016.

**Gráfico 5.1-3: Promedio diámetro de copa: Cobertura período 2016.**



Fuente: Arcadis 2016.

Respecto al Estado (vigor), la Acacia saligna, Algarrobo, Espino y Romero se caracterizan por tener mejor indicadores de Vigor. El Pimiento y Quillay son especies que se presentan deprimidas respecto al resto. Ver Tabla 5.1-4.



**Tabla 5.1-4. Tabla de Estado (vigor), temporada 2016.**  
**Frecuencias absolutas según Especie (Filas) y nivel de Estado (Columnas). Período Enero-Febrero 2016.**

Especie	CATEGORÍA					Total
	1	2	3	4	5	
Acacia	0	5	9	41	9	64
Algarrobo	0	5	17	144	111	277
Espino	0	5	46	201	53	305
Huingan	3	50	319	564	23	959
Pimiento	7	59	151	67	3	287
Quillay	3	63	193	80	1	340
Romero	0	4	131	651	64	850
<b>Total</b>	<b>13</b>	<b>191</b>	<b>866</b>	<b>1748</b>	<b>264</b>	<b>3082</b>

**Frecuencias relativas por filas expresadas como porcentaje según Especie (Filas) y nivel de Estado (Columnas). Período Enero-febrero 2016.**

Especie	1	2	3	4	5	Total
Acacia	0,0	7,8	14,1	64,1	14,1	100
Algarrobo	0,0	1,8	6,1	52,0	40,1	100
Espino	0,0	1,6	15,1	65,9	17,4	100
Huingan	0,3	5,2	33,3	58,8	2,4	100
Pimiento	2,4	20,6	52,6	23,3	1,1	100
Quillay	0,9	18,5	56,8	23,5	0,3	100
Romero	0,0	0,5	15,4	76,6	7,5	100
<b>Total</b>	<b>0,4</b>	<b>6,2</b>	<b>28,1</b>	<b>56,7</b>	<b>8,6</b>	<b>100</b>

**Frecuencias absolutas según Especie (Filas) y nivel de Estado (Columnas). Período Junio 2016.**

Especie	1	2	3	4	5	Total
Acacia	0	3	14	39	4	60
Algarrobo	2	8	22	230	15	277
Espino	2	8	98	192	5	305
Huingan	14	132	617	190	2	955
Pimiento	22	88	152	23	2	287
Quillay	17	109	184	28	0	338
Romero	2	10	205	633	0	850
<b>Total</b>	<b>59</b>	<b>358</b>	<b>1292</b>	<b>1335</b>	<b>28</b>	<b>3072</b>

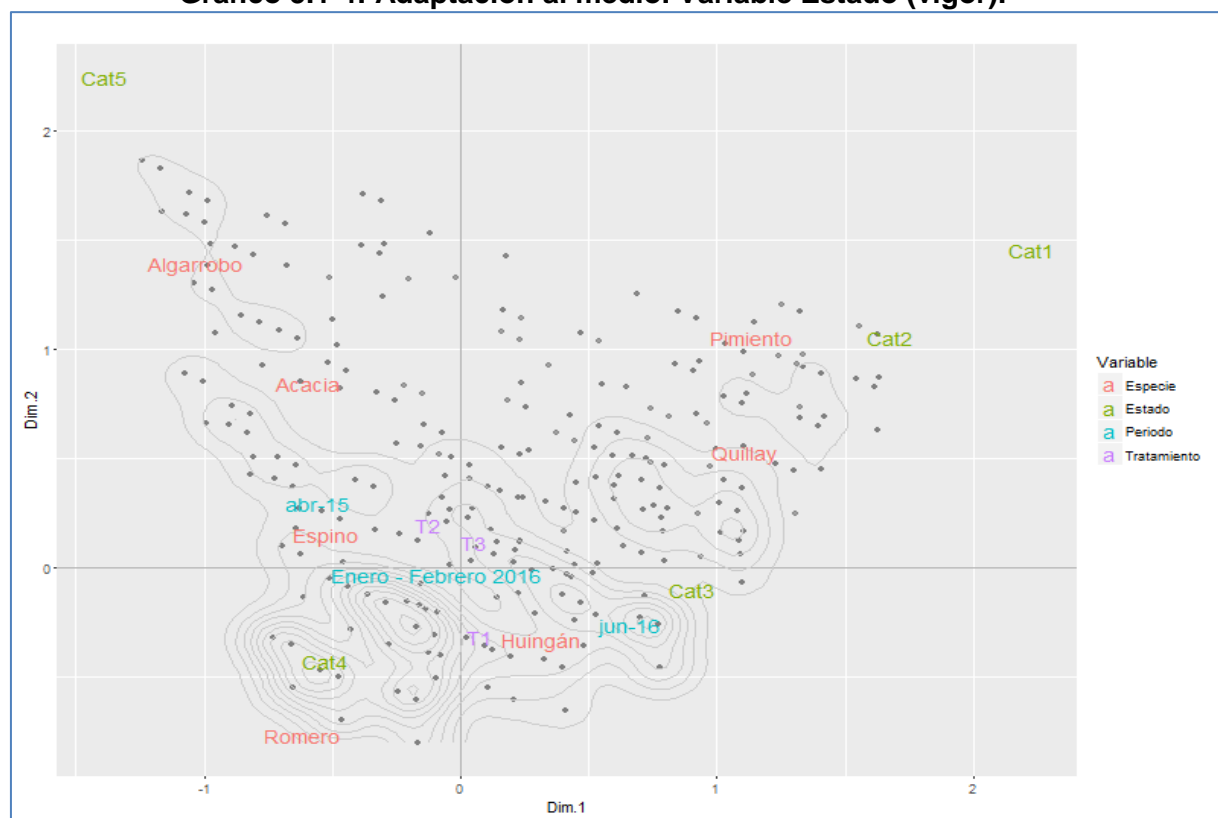
**Frecuencias relativas por filas expresadas como porcentaje según Especie (Filas) y nivel de Estado (Columnas). Período Junio 2016.**

Especie	1	2	3	4	5	Total
Acacia	0,0	5,0	23,3	65,0	6,7	100
Algarrobo	0,7	2,9	7,9	83,0	5,4	100
Espino	0,7	2,6	32,1	63,0	1,6	100

Especie	1	2	3	4	5	Total
Huingan	1,5	13,8	64,6	19,9	0,2	100
Pimiento	7,7	30,7	53,0	8,0	0,7	100
Quillay	5,0	32,3	54,4	8,3	0,0	100
Romero	0,2	1,2	24,1	74,5	0,0	100
<b>Total</b>	<b>1,9</b>	<b>11,7</b>	<b>42,1</b>	<b>43,5</b>	<b>0,9</b>	<b>100</b>

Fuente: U. de Chile, 2016

**Gráfico 5.1-4: Adaptación al medio. Variable Estado (vigor).**



Nota: Análisis de correspondencia múltiple sobre la variable Especie, Categoría (Cat), tratamiento (T1, T2 y T3) y periodo evaluación.

Fuente: U. de Chile, 2016

En este gráfico (Gráfico 5.1-4), se puede observar que las especies Algarrobo y Acacia, están en la misma dirección que el estado 5 (representado como Cat 5), y se encuentran bastante correlacionados, así como las especies Espino y Romero (Cat4) y Pimiento y Quillay al Estado 1 y 2 (Cat1 y Cat2)

Del análisis anterior se genera la siguiente matriz que resume los datos de crecimiento y desarrollo de las especies del ensayo:

**Tabla 5.1-5. Matriz de evaluación de las especies en la primera etapa.**

Especie	Crecimiento		Cobertura	Estado (Vigor)	Valoración final
	Altura	DAC	D copa		
A. Saligna	3	3	3	3	√√√
Algarrobo	3	2	3	3	√√√
Espino	2	1	2	2	√√
Huingán	2	1	2	2	√√
Pimiento	2	1	1	1	√
Quillay	2	1	1	1	√
Romero	3	2	2	2	√√

Fuente: Arcadis 2016.

alto	√√√
medio	√√
Bajo	√

De esta matriz se puede indicar que:

- Las mejores especies para esta primera etapa son: Acacia saligna y Algarrobo.
- En segundo término se destaca el Espino, Huingán y Romero.
- Las especies que presentan menor crecimiento y desarrollo son Pimiento y Quillay.

### 5.1.2 Resultados Segunda etapa

En la siguiente tabla se observan los índices de Translocación:  $Ti = [Hojas] / [Raíz]$

**Tabla 5.1-6. Índice de translocación (Ti) determinado para las campañas de muestreo de otoño de 2015 y otoño de 2016.**

Especie/Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Mo	Pb	Zn
A. Saligna-15	1,1	0,3	0,2	0,6	0,2	5,5	1,6	0,3	1,3
A. Saligna-16	0,3	0,2	0,1	0,4	0,1	2,6	1,6	0,8	1,2
Algarrobo-15	3,1	0,6	0,5	0,8	1,0	11,2	3,8	0,5	2,7
Algarrobo-16	1,0	0,6	0,3	0,5	0,1	5,9	2,8	1,4	1,7
Espino-15	0,6	0,2	0,3	0,3	1,0	2,2	0,3	0,4	1,9
Espino-16	2,2	0,2	0,6	0,8	0,1	1,9	0,3	1,6	1,7
Huingán-15	0,4	0,5	0,3	0,1	0,6	3,4	0,2	0,3	1,0
Huingán-16	1,1	1,0	0,3	0,2	0,1	4,5	0,4	1,1	0,9
Pimiento-15	5,5	0,4	0,8	0,3	1,0	8,5	0,4	0,3	2,4
Pimiento-16	0,7	0,6	0,2	0,2	0,1	6,1	0,4	1,4	2,4
Quillay-15	2,1	0,1	0,7	0,0	1,0	2,0	0,2	0,2	0,2
Quillay-16	0,8	0,1	0,3	0,0	0,1	2,3	0,2	1,2	0,4
Romero-15	2,2	2,0	0,5	0,5	1,0	4,2	1,8	0,3	4,7
Romero-16	0,8	1,7	0,4	0,4	0,1	2,7	0,8	1,3	3,7

Fuente: Arcadis 2016.

En la Tabla 5.1-6 se observan los valores de TI, donde se destacan los valores mayores a 1 (Negrilla), en que habría mayor concentración del elemento en las hojas respecto a la raíz, situación no deseable para la fitoestabilización. Destaca el Manganeseo cuya concentración aparece mayor en las hojas en todas las especies del ensayo. Es importante para este análisis revisar las concentraciones de metales que dan origen a esta relación, que en el caso de los metales pesados (As, Cd, Cr, Hg, Pb y Zn), las concentraciones son bajas y no causan problemas de toxicidad para el normal crecimiento de las plantas. Ver Tabla 3.3-6, Tabla 4.4-3 y Tabla 4.4-6.

A continuación se presentan los datos del Factor de Bioconcentración en raíces (FBCR)

$$(FBCR) = [raíz] / [Relave base]$$

**Tabla 5.1-7. Factor de bioconcentración en raíces (FBCR) determinados para las campañas de muestreo de otoño de 2015 y otoño de 2016.**

Especie /Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Mo	Pb	Zn
A. Saligna-15	<b>76,67</b>	<b>59,26</b>	0,18	0,09	0,01	<b>1,03</b>	<b>5,06</b>	0,67	<b>1,07</b>
A. Saligna-16	<b>105,08</b>	<b>79,63</b>	0,16	0,12	0,03	<b>1,20</b>	<b>4,97</b>	0,49	<b>1,06</b>
Algarrobo-15	<b>24,68</b>	<b>21,85</b>	0,09	0,13	0,00	0,43	0,95	0,28	0,45
Algarrobo-16	<b>24,21</b>	<b>25,19</b>	0,06	0,15	0,03	0,39	0,92	0,27	0,75
Espino-15	<b>42,62</b>	<b>39,26</b>	0,15	0,17	0,00	0,55	<b>2,85</b>	0,43	0,67
Espino-16	<b>36,67</b>	<b>31,11</b>	0,07	0,10	0,03	0,44	<b>2,49</b>	0,22	0,85
Huingán-15	<b>38,57</b>	<b>58,15</b>	0,13	0,20	0,00	0,64	<b>1,15</b>	0,37	<b>1,26</b>
Huingán-16	<b>41,11</b>	<b>51,48</b>	0,08	0,15	0,03	0,58	0,76	0,29	<b>1,74</b>
Pimiento-15	<b>22,86</b>	<b>65,19</b>	0,09	0,12	0,00	0,55	0,72	0,42	0,67
Pimiento-16	<b>44,13</b>	<b>74,44</b>	0,10	0,16	0,03	0,49	0,72	0,29	0,92
Quillay-15	<b>41,43</b>	<b>126,67</b>	0,11	0,38	0,00	0,74	<b>2,63</b>	0,51	<b>1,37</b>
Quillay-16	<b>56,03</b>	<b>80,00</b>	0,06	0,20	0,03	0,52	<b>2,75</b>	0,28	<b>1,28</b>
Romero-15	<b>37,30</b>	<b>106,67</b>	0,11	0,08	0,00	0,60	0,54	0,46	0,72
Romero-16	<b>47,30</b>	<b>153,70</b>	0,07	0,12	0,03	0,42	0,59	0,29	0,93

Fuente: Arcadis 2016.

Como se puede observar en la Tabla 5.1-7, los elementos molibdeno y zinc presentan una tendencia a la acumulación en el tejido radical en la mayoría de las especies, con excepción de la especie Romero, la que tiende a translocar el molibdeno hacia el tejido foliar. Respecto al FBCR de cadmio, los altos valores son explicados por la baja concentración de cadmio en el relave, tendiendo a existir una ligera acumulación en el tejido radical, sin advertir inconvenientes para las plantas del ensayo. Respecto a los elementos: arsénico y mercurio, se descarta la importancia de estos resultados debido a las bajas concentraciones de estos elementos en el tejido radical y en el relave.

A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos y la asignación de puntaje de acuerdo a metodología original.

**Tabla 5.1-8 . Matriz de valoración de atributos por especie respecto a la concentración de metales.**

Especie	Ti>1 (negativo)		Subtotal Ti	FBCR>1 (positivo)		Subtotal FBCR	Valoración total
	Elementos Esenciales	Otros Elementos		Elementos Esenciales	Otros Elementos		
Acacia Saligna	Mn Mo	Zn	0	Mn Mo Zn	Cd	9+3	12
Algarrobo	Mn Mo	Zn Pb	0		Cd	3	3
Espino	Mn	Zn Pb	0	Mo	Cd	3+3	6
Huingán	Mn		0	Mo Zn	Cd	6+3	9
Pimiento	Mn	Zn	0		Cd	3	3
Quillay	Mn		0	Mo Zn	Cd	6+3	9
Romero	Mn Mo	Cd Zn	0		Cd	3	3

(\*) En el análisis no está el Talhuén por no contar con información. No se pudo obtener tejido foliar para el análisis durante otoño.

Según se observa en tabla, cuando el índice Ti es superior a 1, esto puede ser considerado como un atributo negativo desde el punto de vista de la fitoestabilización, ya que se relacionan con una tendencia a la acumulación de metales en el tejido foliar (fitoextracción). Por otra parte, un FBCR mayor a 1 puede ser considerado un atributo positivo, ya que indica una tendencia a la acumulación de metales en el tejido radical, situación deseable en el tranque de relaves Los Quillayes.

Continuando con la metodología propuesta por SKM, los atributos positivos o favorables pueden ser puntuados con “3”, mientras que a una condición negativa o desfavorable del atributo es puntuado con “0”. En Tabla 5.1-8 se puede observar la valoración propuesta, en que cada elemento en la columna correspondiente al FBCR (atributo positivo) suma un puntaje de “3”. En el caso del índice Ti, esta columna no sumaría puntos en ningún caso, ya que todas las especies presentaron un  $Ti > 1$  en algunos de los metales evaluados, es decir, la planta acumuló en el tejido foliar preferentemente el metal, lo que no es deseado desde el punto de vista de la fitoestabilización.

En la tabla se puede observar que la especie Acacia se comporta de mejor forma en la fitoestabilización. Luego está el Huingán y el Quillay.

**Tabla 5.1-9 . Tabla de elección de especies en primera y segunda etapa.**

Especie	Primera Etapa					Segunda Etapa		
	Crecimiento		Cobertura	Vigor	Total 1 <sup>ra</sup> Etapa	Elementos Esenciales	Otros Elementos	Total 2 <sup>da</sup> Etapa
	Altura	DAC	D copa					
Acacia Saligna	3	3	3	3	√√√	Mn Mo Zn	Cd	12
Algarrobo	3	2	3	3	√√√		Cd	3
Espino	2	1	2	2	√√	Mo	Cd	6
Huingán	2	1	2	2	√√	Mo Zn	Cd	9
Pimiento	2	1	1	1	√		Cd	3
Quillay	2	1	1	1	√	Mo Zn	Cd	9
Romero	3	2	2	2	√√		Cd	3

**Tabla 5.1-10 . Tabla sintetizada de elección de especies en primera y segunda etapa.**

Especie	Primera Etapa	Segunda Etapa
Acacia Saligna	√√√	12
Algarrobo	√√√	3
Espino	√√	6
Huingán	√√	9
Pimiento	√	3
Quillay	√	9
Romero	√√	3

De la Tabla 5.1-10, se observa que:

- Para la Primera Etapa las mejores especies son: Acacia saligna y Algarrobo, seguido de Espino, Huingán y Romero.
- Para la Segunda Etapa Las mejores especies son: Acacia saligna, seguida de huingán y Quillay. En tercer lugar está el Espino. Finalmente, con menor puntuación se encuentra el Pimiento y Romero.

## 6 CONCLUSIONES

### 6.1 SOBREVIVENCIA

El ensayo presenta una alta tasa de sobrevivencia, presentando muerte de un 4% de las 25.680 plantas establecidas originalmente (dato junio 2015). Luego del replante realizado en julio 2015 (980 ejemplares), se constataron 492 ejemplares muertos.

### 6.2 MEDICIONES DENDROMÉTRICAS

De acuerdo a las condiciones en que se realizó el ensayo y a los resultados de la data analizada se puede concluir que:

- Las especies que lograron un mayor desarrollo de las plantas, es decir un mayor incremento de altura, un mayor incremento de diámetro de cuello (DAC), y mayor diámetro de copa promedio fueron: Acacia, Algarrobo y Romero.
- Por otra parte Quillay, Espino, Pimiento y Huingán fueron especies que se caracterizaron por lograr un menor desarrollo de las plantas.
- Los resultados indican que en la medida que avanzaron los períodos evaluados los estados de plantas en general decayeron, probablemente por la situación climática de octubre 2015 donde se presentaron 2 nevazones con bajas temperaturas.
- Las especies que lograron un mejor estado de plantas en el último período de evaluación (junio 2016) fueron Algarrobo, Romero, Acacia y Espino, mientras que las especies que lograron un regular o mal estado de plantas fueron Quillay, Pimiento y Huingán.
- No se evidenciaron diferencias entre los tratamientos para ninguna de las variables analizadas.

### 6.3 MUESTREO DE SUSTRATO

El pH del relave continúa siendo ácido, lo que no es recomendable para los objetivos de fitoestabilización debido a que aumenta la biodisponibilidad de los metales en el relave. El aumento de la acidez se atribuye al alto nivel de azufre extractable del relave, así como también, en menor medida debido al aporte de hierro del agua de riego.

Respecto a los parámetros de fertilidad del relave, los niveles de fósforo, potasio y zinc son deficientes, mientras que los niveles de nitrógeno son normales en el relave. La disminución de los niveles disponibles de fósforo y potasio en el relave puede ser atribuida al proceso de acidificación del relave, mientras que la deficiencia de zinc se debe a la baja concentración total y, por consecuencia bajos niveles disponibles del elemento.



A raíz de esta situación durante los últimos meses se aplicó compost a los bosquetes que no forman parte del muestreo cotidiano, situación que debe analizarse para ver si existe una mejora en las condiciones de las plantas.

No se observan diferencias significativas respecto a los tratamientos.

#### 6.4 MUESTREO FOLIAR Y RADICAL

Desde el punto de vista de la nutrición, la mayoría de las especies presentan niveles deficientes para fósforo, potasio y zinc. En general, las plantas presentan niveles de elementos traza metálicos que no son tóxicos, excepto casos particulares para los elementos cobre y molibdeno.

La mayoría de los elementos traza metálicos presentan una mayor concentración en el tejido radical con respecto al tejido foliar, excepto en casos particulares, como los observados en manganeso y zinc.

En general todas las especies cumplen con el objetivo de la fitoestabilización de metales y metaloides del relave.

No se observan diferencias significativas respecto a los tratamientos

#### 6.5 ELECCIÓN DE ESPECIES

- Para la Primera Etapa (establecimiento), las mejores especies son: Acacia saligna y Algarrobo, seguido de Espino, Huingán y Romero.
- Para la Segunda Etapa (Fitoestabilización), las mejores especies son: Acacia saligna, seguida de huingán y Quillay. En tercer lugar está el Espino. Finalmente, con menor puntuación se encuentra el Pimiento y Romero.

#### 6.6 CONCLUSIÓN GENERAL

Los análisis estadísticos de los datos obtenidos en terreno tanto para mediciones dendrométricas como de muestras de sustrato y tejido vegetal, indican que no hay diferencias significativas respecto a los tratamientos. Sin embargo, es importante señalar que el aporte de materia orgánica a través del aporte de compost es importante para mejorar la condición de suelo en cuanto a mejorar sus características físico-químicas que implican un mejor establecimiento de las plantas. Queda por evaluar si existe alguna mejora en la condición de plantas luego de la aplicación de compost realizada durante el 2016, acción realizada para mitigar las deficiencias de elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

El ensayo cuenta con información relevante de las variables dendrométricas para poder determinar la primera etapa: **establecimiento**, con un plan de manejo agronómico-forestal adecuado para establecer una plantación en el Tranque Quillayes. Queda por analizar especies como el Quilo, que se comporta de buena forma y algunas especies arbustivas que han crecido en forma natural como Adesmys sp.

En el caso de la segunda etapa de la plantación, desde el punto del análisis químico de sustrato y tejido vegetal, los resultados obtenidos hasta el momento nos entregan información de tendencias que es importante continuar su análisis.

Los análisis de raíces entregan información muy valiosa ya que las plantas acumulan elementos y compuestos químicos que son necesarios evaluar. Hasta el momento contamos con datos de otoño 2013, 2015 y otoño 2016. Es importante continuar con este muestreo para alimentar los índices de acumulación.

Aún no se cuenta con muestras de frutos para saber el comportamiento de los metales, dato importante para tomar decisiones para la segunda etapa. Es importante también obtener frutos del entorno a modo de testigo para comparar con los datos obtenidos.

## **7 RECOMENDACIONES**

- Desde el punto de vista de fertilidad del relave es recomendable aumentar el pH, el contenido de materia orgánica, potasio y zinc, mediante la adición de una enmienda en base, por ejemplo, a humato de potasio o superfosfato triple. En el caso de zinc, no aplicar fertilizantes que contengan sales de azufre (sulfato de zinc).
- Es necesario realizar un monitoreo periódico del hierro en el agua de riego. También se deben realizar labores preventivas para evitar la utilización de aguas con exceso de hierro, ya que estas contribuyen al proceso de acidificación del relave.
- En cuanto a manejo en general, se hace énfasis en la aplicación periódica de materia orgánica al relave.
- Mantener el muestreo de las especies del ensayo para tener datos más precisos respecto a la acumulación de metales en tejidos de la planta y sustrato.
- Se debe comenzar con la evaluación ecosistémica del ensayo, determinando la incorporación de datos de flora acompañante, fauna silvestre y suelo.

## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEVEDO, E.; M.A. CARRASCO; O. LEÓN; E. MARTÍNEZ; P. SILVA; G. CASTILLO; I. AHUMADA; G. BORIE Y S. GONZÁLEZ. 2005. Informe: Criterios de calidad de suelos agrícolas. División de Protección de los Recursos Naturales Renovables (SAG) y Universidad de Chile. Santiago, Chile. 217 pág.

BERNIER, R. Y G. BORTOLAMEOLLI. 2000. Seminario taller para productores - técnicas de diagnóstico de la fertilidad del suelo, fertilización de praderas, cultivos y mejoramiento de praderas. Centro Regional de Investigación Remehue. Instituto de Investigaciones Agropecuarias.

CCME. 2016. Canadian Environmental Quality Guidelines. [En línea] [http://www.ccme.ca/en/resources/canadian\\_environmental\\_quality\\_guidelines/](http://www.ccme.ca/en/resources/canadian_environmental_quality_guidelines/) [Consulta: 05-03-2016]

DERAM A, DENAYER F-O, DUBOURGIER H-C, PETIT D, VAN HALUWYN C. 2006. Seasonal variations of cadmium and zinc in *Arrhenatherum eliatum*, a perennial grass species from highly contaminated soils. *Environmental Pollution*. 140: 62–70.

HAVLIN, J., TISDALE, S., NELSON, W., BEATON, J. 2014. Soil fertility and fertilizers. Ed. Pearson, 516 pág.

INIA. 2010. Interpretación de resultados de análisis químico de suelos. [En línea] [http://www.laboratoriosuelosinia.cl/in\\_q\\_s.htm](http://www.laboratoriosuelosinia.cl/in_q_s.htm)

HOSSNER, L. Y H. SHAHANDEH. 2005. Rehabilitation of Minerals Processing Residue (Tailings). p. 1450-1455. En: Lal R. (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker. New York.

JONES, J. 2002. *Agronomic handbook: Management of crops, soils and their fertility*. CRC press.

KABATA-PENDIAS, A. 2011. *Trace Elements in Soil and Plants*. Fourth Edition. CRC Press New York. 520 pág.

RODRÍGUEZ, J., PINOCHET, D., MATUS, F.J. 2001. *Fertilización de los cultivos*. Editorial LOM. Santiago, Chile. 117 p.

SERRATO, F. B., LÓPEZ, S. R., DÍAZ, M. A. R., BROTONS, J. M., & SARRIA, F. A. 2009. Contaminación de suelos por "metales pesados" en la sierra minera de Cartagena-La Unión y su entorno (Sureste de España). In *Avances en estudios sobre desertificación: aportaciones al Congreso Internacional sobre Desertificación en memoria del profesor John B. Thornes*, (Murcia, 2009), *Advances in studies on desertification: contributions to the International Conference on Desertification in memory of professor Jo* (Universidad de Murcia). 171-174 pág.

SKM. 2013. Ensayo de Fitoestabilización Tranque Quillayes MLP. Informe Final. 292 pág.

SILVA, H. Y J. RODRÍGUEZ. 1995. Fertilización de plantaciones frutales. Facultad de Agronomía Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ciencias Vegetales. Alfabeta impresores. Santiago, Chile.

### **Análisis Estadístico**

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat. 2016. Grupo InfoStat, Facultad Ciencias Agronómicas, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Gabriel, K. 1971. The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. Biometrika 58: 453-467.

Härdle, W. and Simar, L. 2007. Applied multivariate statistical analysis. Springer, Berlin, Germany. 455p.

Härdle, W. and Hlávka, Z. 2007. Multivariate analysis. Exercises and solutions. Springer, Berlin, Germany. 367 p.

Peña, D. 2002. Análisis de datos multivariantes. Editorial McGraw Hill, Madrid, España. 539 p.

R Core Team. 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org>