



FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA PARA LA
SOSTENIBILIDAD
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**“PROTOTIPO DE FITORREMEDIACIÓN DE
SUELO CONTAMINADO CON METALES
PESADOS MEDIANTE EVALUACIÓN FÍSICO-
QUÍMICA DE *Sarcocornia neei* Y *Carpobrotus
chilensis*, Y TRANSMISIÓN DE SU ANÁLISIS EN
LA COMUNA DE PUCHUNCAVÍ”**

Seminario de Título para optar al Título de Ingeniera Ambiental
Y al grado académico de Licenciada en Ciencias de la Ingeniería

VIVIANA MACARENA LÓPEZ CASTRO

Profesora Guía: Mg. Verónica Meza Ramírez
Profesora CO-Guía: Mg. Ximena Espinoza Ortiz

Valparaíso – Chile
2024

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi mamá y papá, quienes me han brindado apoyo incondicional y constante a lo largo de este arduo camino académico, quienes siempre estuvieron pendientes de lo que necesitaba. A mis seres queridos, por su comprensión, ánimo y apoyo en momentos de debilidad, quienes me han ayudado a mantener el equilibrio en momentos de mayor exigencia. A mis profesoras, por su guía experta, paciencia y motivación, sin las cuales este proyecto no habría sido posible. Y finalmente, a todos aquellos quienes de alguna u otra manera contribuyeron a la realización de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera especial a todo el equipo de trabajo del laboratorio, por su grato acompañamiento, dedicación y arduo trabajo realizado durante todo el proceso de implementación del proyecto. Agradezco también a mi profesora Guía de tesis Verónica Meza y a mi profesora Ximena Espinoza por su dedicación a esta gran labor social mediante su experiencia y conocimientos, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Agradezco también a los habitantes de las localidades de Puchuncaví, quienes me recibieron y permitieron conocer sus realidades y nos permitieron desarrollar nuestra investigación y proyecto en sus hogares, agradecida de quienes compartieron parte de sus experiencias y saberes.

A mí familia y amigos, quienes no solo me apoyaron incondicionalmente en el desarrollo de mis estudios, sino que estuvieron constantemente pendientes de mi avance y necesidades.

Y a los núcleos de apoyo que permitieron el desarrollo y sustento de este proyecto de título. Específicamente al Laboratorio de Aprendizaje, Competencias y Democratización de Tecnologías en Comunidades y Suelo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Playa Ancha (LAPTES-FING) bajo los proyectos adjudicados: “Estructuración de intervención comunitaria: Prototipo de Biorremediación de suelos en zonas contaminadas de Quintero-Puchuncaví” financiado por el Gobierno Regional de Valparaíso a través del Fondo de Innovación para la Competitividad Regional (FIC-R), y al “Fortalecimiento de las competencias para la implementación de técnicas de recuperación de suelo y producción segura de alimentos, en mujeres adultas de zonas rurales de Puchuncaví, a través de un programa de prácticas de innovación social” financiado por el Ministerio de Educación a través del Aporte para el Desarrollo de Actividades de Interés Nacional (ADAIN).

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	XII
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XII
RESUMEN	XIII
ABSTRACT.....	XV
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1. Justificación	4
1.2. Problemática.....	4
1.3. Hipótesis	5
1.4. Importancia	6
1.5. Objetivos.....	6
1.5.1. Objetivo General	6
1.5.2. Objetivos Específicos.....	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	8
2.1. Remediación del suelo.....	8
2.1.1. Fitorremediación	8
2.1.2. Mecanismos de fitorremediación.....	9
2.1.3. Factores que afectan la eficiencia de la fitorremediación	10
2.1.4. Selección de especies vegetales	13
2.2. Aprendizaje Basado en Proyectos	14
2.2.1. Principios claves del ABP.....	15
2.2.2. Metodología del ABP	16
2.2.3. Evaluación del ABP.....	17

CAPÍTULO III: ANTECEDENTES GENERALES	18
3.1. Marco conceptual.....	18
3.1.1. Suelo.....	18
3.1.2. Parámetros físico-químicos de evaluación del suelo	18
3.1.3. Contaminación de suelos	23
3.1.4. Comuna de Puchuncaví	29
3.1.5. Complejo Industrial Ventanas	30
3.1.6. Especies de plantas acumuladoras.....	35
3.1.7. Factores de concentración	39
3.2. Marco Jurídico	40
3.2.1. Legislación nacional.....	40
3.2.2. Legislación internacional	41
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA.....	43
4.1. Área de estudio.....	43
4.1.1. Valparaíso.....	44
4.1.2. Puchuncaví	45
4.2. Análisis de suelo	46
4.2.1. Muestreo de suelo.....	46
4.2.2. Análisis de parámetros físico-químicos del suelo	50
4.3. Remediación del suelo.....	56
4.3.1. Manejo y empleo de especies.....	56
4.3.2. Diseño experimental	60
4.4. Análisis de parámetros físico-químicos de las plantas	67
4.5. Análisis de metales pesados.....	69
4.5.1. Análisis de metales pesados.....	70
4.6. Factores de concentración	75
4.6.1. Factor de Bioconcentración.....	75
4.6.2. Factor de Traslocación.....	76
4.6.3. Categorización de las plantas en función de los factores de concentración.....	76
4.7. Análisis Estadístico	78

4.8.	Taller de aplicación ABP	79
4.8.1.	Formación de competencias	79
4.8.2.	Planificación del taller	80
CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN		87
5.1.	Resultados	87
5.1.1.	Resultados parámetros físico-químicos del suelo	87
5.1.2.	Resultados parcelas de experimentación	90
5.1.3.	Resultados análisis de metales pesados en suelo	98
5.1.4.	Resultados análisis de metales pesados en plantas	99
5.1.5.	Resultados Factores de Concentración.....	100
5.1.6.	Resultado análisis estadístico	102
5.1.7.	Comparación de análisis de suelo con normativa internacional.....	104
5.2.	Discusión	104
5.3.	Conclusión	107
BIBLIOGRAFÍA		111
ANEXOS		124
5.4.	Resultados monitoreo parámetros físico-químicos	124
5.4.1.	CIQV	124
5.4.2.	El Rungue	126
5.4.3.	Los Maitenes.....	129
5.4.4.	Pucalán.....	132
5.5.	Resultados análisis de metales pesados muestra foliar	135
5.5.1.	CIQV	135
5.5.2.	El Rungue	136
5.5.3.	Los Maitenes.....	137
5.5.4.	Pucalán.....	138

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Tamaño de partículas del suelo. Fuente: Consejería de Agricultura y Pesca, UE. ...</i>	19
<i>Figura 2: Escala de pH.....</i>	20
<i>Figura 3: Ubicación de empresas principales en bahía de Quintero - Puchuncaví. Fuente: El resumen, 2022.</i>	31
<i>Figura 4: Sarcocornia neei (Lag.) M.A. Alonso & M.B. Crespo.</i>	36
<i>Figura 5: Carpobrotus chilensis (Haw.) N.E.Br.</i>	38
<i>Figura 6: Mapa comuna de Puchuncaví. Fuente: Visor cartográfico de Chile, s.f.....</i>	43
<i>Figura 7: Mapa de ubicación zonas de estudio. Fuente: Google Earth, s.f.</i>	44
<i>Figura 8: Imagen aérea geolocalización muestra de suelo en CIQV, Valparaíso. Fuente: Google Earth, 2024.</i>	47
<i>Figura 9: Imagen aérea geolocalización muestra de suelo en domicilio particular, El Rungue. Fuente: Google Earth, 2024</i>	48
<i>Figura 10: Imagen aérea geolocalización muestra de suelo en Círculo de Inclusión, Los Maitenes. Fuente: Google Earth, 2024.</i>	49
<i>Figura 11: Imagen aérea geolocalización muestra de suelo en domicilio particular, Pucalán. Fuente: Google Earth, 2024</i>	50
<i>Figura 12: Representación procedimiento de tamizado. Fuente: Dynapac, 2017.</i>	51
<i>Figura 13: Triángulo de texturas de suelo. USDA, 2014.</i>	52
<i>Figura 14: Monitoreo especie S. neei en invernadero El Rungue al 10 de noviembre 2023... </i>	57
<i>Figura 15: Monitoreo y poda especie S. neei en invernadero El Rungue al 24 de noviembre 2023.</i>	58
<i>Figura 16: Primera propagación de C. chilensis al 14 de diciembre 2023.</i>	59
<i>Figura 17: Monitoreo especie C. chilensis en invernadero UPLA al 14 de diciembre, 2023....</i>	59
<i>Figura 18: Diseño estructural base parcela experimental. Elaboración propia, 2024.....</i>	61
<i>Figura 19; Construcción parcelas de experimentación en Círculo de Inclusión Los Maitenes, Puchuncaví.</i>	61
<i>Figura 20: Instalación malla raschel perimetral y cubierta superior en Círculo de Inclusión Los Maitenes, Puchuncaví.</i>	62

<i>Figura 21: Diseño estructural de plantación en parcelas de estudio de especies S. neei y C. chilensis. Fuente: Elaboración propia, 2023.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 22: Plantación especies S. neei y C. chilensis en parcela de experimentación en Círculo de Inclusión Los Maitenes, Puchuncaví.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 23: Técnica de propagación "acodo" en especie S: neei parcela de experimentación en domicilio particular de Pucalán, Puchuncaví.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 24: Sistema de Riego en el Blanco del CIQV, Valparaíso.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 25: Sistema de riego en domicilio particular de El Rungue, Puchuncaví.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 26: Sistema de riego en Círculo de Inclusión Los Maitenes, Puchuncaví.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 27: Sistema de riego en domicilio particular de Pucalán, Puchuncaví.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 28: Medición en terreno de especie C. chilensis.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 29: Resultados de textura de suelo por granulometría en triángulo de texturas.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 30: Resultados de elaboración de parcelas de experimentación.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 31: Evidencia fotográfica de cubierta de área de plantas en "Blanco" en CIQV, Valparaíso.</i>	<i>92</i>
<i>Figura 32: Evidencia fotográfica de cubierta de área de plantas en domicilio particular El Rungue, Puchuncaví.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 33: Evidencia fotográfica de cubierta de área de plantas en Círculo de Inclusión Los Maitenes, Puchuncaví.</i>	<i>96</i>
<i>Figura 34: Evidencia fotográfica de cubierta de área de plantas en domicilio particular de Pucalán, Puchuncaví.</i>	<i>98</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Metodología por etapas de aplicación ABP.</i>	16
<i>Tabla 2: Hitos ambientales comunas de Quintero-Puchuncaví. Fuente: Liberona & Ramírez, (2019).</i>	32
<i>Tabla 3: Valores Background suelo Quintero-Puchuncaví. Fuente: PGS SPA (2015).</i>	34
<i>Tabla 4: Concentraciones de metales pesados en suelo de Puchuncaví, Los Maitenes. Fuente: Meza et al. (2018); Meza et al., (2021).</i>	35
<i>Tabla 5: Condiciones ideales para Sarcocornia neei. Elaboración propia, 2024.</i>	36
<i>Tabla 6: Condiciones ideales para Carpobrotus chilensis. Elaboración propia, 2024.</i>	38
<i>Tabla 7: Estándares máximos permitidos de metales pesados para lodos. Fuente: Norma lodos NCh 2952/04.</i>	41
<i>Tabla 8: Estándares de concentraciones máximas permitidas de metales pesados en diferentes tipos canadienses. Elaboración propia, 2023. Fuente: CEPA, 2007. "Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health"</i>	42
<i>Tabla 9: Valores de concentración de la normativa australiana en distintas sustancias para diferente uso de suelo. Fuente: Department of Environment and Conservation (2010).</i>	42
<i>Tabla 10: Geolocalización muestras de suelo en el blanco, CIQV.</i>	47
<i>Tabla 11: Geolocalización muestras de suelo El Rungue, domicilio particular.</i>	48
<i>Tabla 12: Geolocalización muestras de suelo Los Maitenes, Círculo de Inclusión.</i>	48
<i>Tabla 13: Geolocalización muestras de suelo Pucalán, domicilio particular.</i>	49
<i>Tabla 14: Clasificación de suelo según nivel de pH. Fuente: USDA.</i>	53
<i>Tabla 15: Clasificación de suelo según Conductividad Eléctrica (CE). Fuente: USDA.</i>	55
<i>Tabla 16: Especificaciones de materiales para sistema de riego automático por goteo.</i>	64
<i>Tabla 17: Niveles de evaluación visual de vigor y turgencia.</i>	69
<i>Tabla 18: Valores para la determinación de planta hiperacumuladora según concentración del metal en parte aérea. Fuente: Baker y Brooks, 1989.</i>	77
<i>Tabla 19: Valores para la determinación de planta acumuladora según Factor de Bioconcentración. Fuente: Baker, 1981; Yoon, 2006.</i>	77

<i>Tabla 20: Valores para la determinación de planta acumuladora según Factor de Traslocación. Fuente: Baker y Brooks, 1989.</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 21: Concentración de metales pesados de muestras de plantas S. neei y C. chilensis de la localidad de Los Maitenes.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 22: Planificación de actividades taller de aplicación ABP.</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 23: Competencias esperadas de aplicación de taller ABP.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 24: Rúbrica de evaluación de ABP. Fuente: Elaboración propia en base a Navarrete & Belver, 2022.</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 25: Resultados análisis de textura por granulometría de muestras de suelo.</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 26: Resultados análisis de pH de muestras de suelo.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 27: Resultados de Conductividad Eléctrica de muestras de suelo.</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 28: Resultados análisis de Materia Orgánica de muestras de suelo.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 29: Mediciones, en cm², de cubierta de área de plantas en el "Blanco", CIQV, Valparaíso.</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 30: Mediciones, en cm², de cubierta de área de plantas en domicilio particular El Rungue, Puchuncaví.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 31: Mediciones, en cm², de cubierta de área de plantas en Círculo de Inclusión Los Maitenes, Puchuncaví.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 32: Mediciones, en cm², de cubierta de área de plantas en domicilio particular de Pucalán, Puchuncaví.</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 33: Resultados de análisis de metales pesados, en (mg/kg), en muestras de suelo.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 34: Promedio de resultados de análisis de metales pesados, en mg/kg, contenidos en plantas del CIQV, Valparaíso.</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 35: Promedio de resultados de análisis de metales pesados en, mg/kg, contenidos en plantas de El Rungue, Puchuncaví.</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 36: Promedio de resultados de análisis de metales pesados, en mg/kg, contenidos en plantas de Los Maitenes, Puchuncaví.</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 37: Promedio de resultados de análisis de metales pesados, en mg/kg, contenidos en plantas de Pucalán, Puchuncaví.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 38: Resultados cálculo de Factor de Bioconcentración (FBC).</i>	<i>101</i>

<i>Tabla 39: Resultados cálculo Factor de Traslocación.</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 40: Resultados descriptivos análisis estadístico.....</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 41: Resultados Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 42: Resultados prueba T de Student.</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 43: Comparación de resultados de concentración de metal pesado en suelo frente al Background y a la normativa ambiental aplicada de Canadá y Australia.....</i>	<i>104</i>

ÍNDICE DE GRÁFICOS

<i>Gráfico 1: Comparación, en cm², de evolución de cubierta de área en plantas del "Blanco" en el CIQV, Valparaíso.</i>	<i>92</i>
<i>Gráfico 2: Comparación, en cm², de evolución de cubierta de área de plantas en domicilio particular El Rungue, Puchuncaví.</i>	<i>93</i>
<i>Gráfico 3: Comparación, en cm², de evolución de cubierta de área de plantas en Círculo de Inclusión Los Maitenes, Puchuncaví.....</i>	<i>95</i>
<i>Gráfico 4: Comparación, en cm², de evolución de cubierta de área de plantas en domicilio particular de Pucalán, Puchuncaví.....</i>	<i>97</i>

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1: Cálculo de Materia Orgánica (MO).....</i>	<i>56</i>
<i>Ecuación 2: Determinación de concentración de metales en muestras de suelo</i>	<i>73</i>
<i>Ecuación 3: Cálculo de Factor de Bioconcentración.....</i>	<i>75</i>
<i>Ecuación 4: Cálculo de Factor de Traslocación.</i>	<i>76</i>

RESUMEN

La contaminación de suelos por metales pesados constituye una problemática ambiental global que afecta directamente a la salud humana y a los ecosistemas. La fitorremediación, una técnica que utiliza plantas para eliminar, degradar, traslocar o inmovilizar contaminantes del suelo, se presenta como una alternativa sostenible y prometedora para la remediación de sitios contaminados. El presente estudio tiene como objetivo evaluar el potencial remediador de dos especies vegetales nativas como técnica de fitorremediación de suelo contaminado por metales pesados en la comuna de Puchuncaví, principalmente frente a los metales arsénico, cadmio, cobre. Además, se propone una actividad educativa estructurada en base al Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) dirigida a los ciudadanos residentes de las zonas afectadas por la contaminación.

Se seleccionaron dos especies vegetales nativas con potencial remediador, de fácil propagación y con gran tolerancia a condiciones salinas: *S. neei* y *C. chilensis*. Se construyeron parcelas de experimentación con sistemas de riego autónomo a baja escala en tres localidades de Puchuncaví ubicadas a diferentes distancias del Cordón Industrial Ventanas: El Rungue, Los Maitenes y Pucalán. También se construyó una parcela de control en el Campus Interuniversitario Quebrada Verde en la ciudad de Valparaíso. Las especies vegetales fueron propagadas en un ambiente controlado y se realizaron monitoreos regulares de las condiciones ambientales de cultivo necesarias para asegurar el crecimiento y desarrollo de las plantas desde la plantación hasta la extracción. Se recolectaron y enviaron muestras foliares y de suelo a un laboratorio externo para analizar y comparar la concentración de metales pesados en la parte aérea y radicular de ambas especies y en el suelo circundante.

El análisis de concentración de metales pesados arrojó como resultado altos niveles de cobre en la localidad de Los Maitenes (212 mg/kg) y en el punto de control ubicado en Valparaíso (72,3 mg/kg). Estos niveles superan los límites establecidos por la normativa internacional canadiense (63 mg/kg) pero no los de la australiana, que presenta un margen mucho más permisivo (1000 mg/kg). Las localidades de Puchuncaví, en general, presentan elevados niveles de cobre, arsénico y plomo, superando los niveles background para el área. Ambas especies presentaron gran capacidad de absorción y traslocación de metales de manera eficiente. La especie *S. neei* presenta preferencia por la absorción de cobre y en algunos casos de plomo, mientras que la especie de *C. chilensis* demostró preferencia por cadmio y plomo. Ambas especies presentan resultados favorables en la traslocación de plomo y cadmio en un periodo de muestreo aproximado de 3 meses.

Palabras claves: Contaminación de suelos, metales pesados, fitorremediación, absorción, traslocación.

ABSTRACT

Soil contamination by heavy metals constitutes a global environmental issue that directly affects human health and ecosystems. Phytoremediation, a technique that uses plants to remove, degrade, translocate, or immobilize soil contaminants, presents itself as a sustainable and promising alternative for the remediation of contaminated sites. This study aims to evaluate the remediation potential of two native plant species as a phytoremediation technique for soil contaminated by heavy metals in the Puchuncaví community, specifically targeting arsenic, cadmium, and copper. Additionally, an educational activity based on Project-Based Learning (PBL) is proposed for the residents of the affected areas.

Two native plant species with remediation potential, easy propagation, and high tolerance to saline conditions were selected: *Sarcocornia neei* and *Carpobrotus chilensis*. Experimental plots with autonomous irrigation systems were constructed on a small scale in three localities of Puchuncaví, located at different distances from the Ventanas Industrial Belt: El Rungue, Los Maitenes, and Pucalán. A control plot was also constructed at the Interuniversity Campus Quebrada Verde in the city of Valparaíso. The plant species were propagated in a controlled environment, and regular monitoring of the necessary environmental conditions was conducted to ensure the growth and development of the plants from planting to extraction. Foliar and soil samples were collected and sent to an external laboratory to analyze and compare the concentration of heavy metals in the aerial and root parts of both species and the surrounding soil.

The heavy metal concentration analysis revealed high levels of copper in Los Maitenes (212 mg/kg) and in the control point located in Valparaíso (72.3 mg/kg). These levels exceed the limits established by Canadian international standards (63 mg/kg) but not the more permissive Australian standards (1000 mg/kg). The localities of Puchuncaví generally show elevated levels of copper, arsenic, and lead, exceeding the background levels for the area. Both species demonstrated a high capacity for efficient absorption and translocation of metals. *S. neei* showed a preference for absorbing copper and, in some cases, lead, while *C. chilensis* demonstrated a preference for cadmium and lead. Both species showed favorable results in the translocation of lead and cadmium over an approximate sampling period of 3 months.

Keywords: Soil contamination, heavy metals, phytoremediation, absorption, translocat

INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental es un problema global que afecta a todos los ecosistemas del planeta y pone en riesgo la salud humana y la biodiversidad, causando efectos adversos que degradan los ecosistemas. Estas sustancias contaminantes pueden ser de origen antropogénico o natural, y en la actualidad, la humanidad ha representado un importante papel como el principal causante de la contaminación antrópica (Zimicz, 2016), siendo la minería y fundición el rubro más contaminante el que afecta directamente a las matrices de suelo y agua mediante actividades industriales que dañan inevitablemente la estructura natural de los ecosistemas presentes en las zonas cercanas a estas fuentes. El suelo es un recurso fundamental para la vida en la Tierra, ya que proporciona soporte físico, nutrientes y hábitat para una amplia variedad de organismos. Sin embargo, este recurso vital está siendo amenazado por la introducción de sustancias nocivas o alteraciones físicas que comprometen su calidad y capacidad para sostener la vida vegetal, animal y microbiana. La importancia de la protección de los suelos es reconocida a nivel mundial; en la Cumbre de Río (1992) los países adoptaron declaraciones a favor de la protección de los suelos, mientras que la Convención de Lucha contra la Desertificación de las Naciones Unidas (1994) tuvo como objetivo el evitar y reducir la degradación del suelo, rehabilitando y recuperando terrenos degradados y desertificados. En Chile, existe una gran y actual preocupación por la contaminación de los suelos con metales, sin embargo, no existe ninguna legislación nacional que actúe al respecto. En este escenario, surgen interrogantes sobre cómo proceder para regular la matriz suelo frente a situaciones de contaminación que afectan a los ecosistemas naturales sin una línea base que permita evaluar los niveles presentes de los contaminantes.

Las localidades de Puchuncaví, comuna ubicada en la costa de la Región de Valparaíso en Chile, enfrentan un grave problema ambiental: la contaminación del suelo por metales pesados. Esta área, conocida por su intensa actividad industrial, ha sido escenario de diversos incidentes que han resultado en la liberación no controlada de metales pesados al suelo, poniendo en riesgo la salud de sus habitantes y el

equilibrio ecológico local. La contaminación significativa por metales pesados se atribuye principalmente a la presencia de uno de los parques industriales más grandes del país, identificado como la fuente principal de estos contaminantes dispuestos en el suelo. Esta situación representa un riesgo potencial tanto para la flora y fauna del área como para la población que reside en las comunidades cercanas. Las actividades industriales locales, que incluyen la fundición de cobre y otros metales pesados, la generación de energía y la manipulación de gases comprenden gran parte de la problemática, y aunque son importantes para la economía del país, también son la principal causante de la contaminación atmosférica en la zona (Tironi, 2014). Debido a las emisiones de gases contaminantes derivadas de estas actividades, las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví han sido designadas como zonas primarias de protección desde la década de 1990. A pesar de la aplicación de Planes de Prevención y Descontaminación Atmosférica, la comunidad ha enfrentado episodios recurrentes de contaminación y sus efectos negativos debido a los altos niveles de contaminantes en el ambiente. En el suelo de diversas localidades dentro de la comuna de Puchuncaví, se han detectado niveles significativos de contaminación por metales pesados (Meza et al., 2021). Esta contaminación afecta principalmente las actividades agrícolas características de la zona, destinadas tanto al consumo local como a fines comerciales. Estos metales pueden acumularse en los cultivos y en el agua potable, representando un riesgo potencial para la salud de quienes los consumen.

Sin embargo, se ha investigado y desarrollado una técnica innovadora y sostenible: la fitorremediación. Esta técnica aprovecha la capacidad natural de ciertas plantas para absorber, acumular o degradar contaminantes del suelo, contribuyendo así a su descontaminación y restauración. Las plantas fitorremediadoras, conocidas también como plantas hiperacumuladoras, tienen la capacidad única de tolerar y acumular altas concentraciones de metales pesados y otros contaminantes en sus tejidos sin mostrar signos de toxicidad. Este enfoque ha demostrado ser efectivo tanto en suelos contaminados de manera natural como en áreas afectadas por actividades antrópicas intensivas como la minería, la industria y la agricultura (Salinitro et al., 2019). En las zonas costeras de Chile, se destacan especies vegetales nativas como

Sarcocornia neei (*S. neei*) y *Carpobrotus chilensis* (*C. chilensis*) que resultan ser de gran cobertura y muy resistentes a suelos perturbados. Estas especies vegetales pueden crecer fácilmente en suelos salinos y contaminados, y presentan una gran capacidad para prosperar en entornos adversos donde otras plantas no podrían sobrevivir facilitando su aplicación práctica en la rehabilitación de suelos contaminados. Además, su habilidad para acumular metales pesados las convierte en una herramienta prometedora para la restauración de suelos impactados por actividades industriales y mineras (Figueroa et al., 1987).

La fitorremediación ofrece una alternativa prometedora y respetuosa con el medio ambiente para remediar suelos contaminados, en comparación con métodos tradicionales que pueden ser excesivamente costosos, invasivos y generar residuos adicionales. Evaluar el comportamiento de las especies *S. neei* y *C. chilensis* como estrategia de fitorremediación de suelo contaminado por metales pesados en los suelos de la comuna de Puchuncaví comprende el objetivo principal del proyecto.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Justificación

Debido al aumento y gran avance de la actividad industrial, los ecosistemas naturales se encuentran cada vez más degradados. La fitorremediación se ha convertido en una de las prácticas de remediación utilizadas para suelos y relaves contaminados con metales pesados. Esto se debe a sus métodos que se adaptan de manera natural al entorno ambiental, gracias a sus técnicas de aplicación basadas en el crecimiento vegetal y el factor de bioconcentración de metales pesados presente en las plantas. Su técnica resulta más favorable en comparación con los tratamientos químicos y físicos de remediación. Sin embargo, aún se considera una tecnología incipiente, siendo su principal desventaja la falta de antecedentes y resultados concretos debido a la larga duración de los proyectos que la involucran.

1.2. Problemática

El principal problema de contaminación presente en las localidades de Quintero-Puchuncaví se origina en la crisis ocasionada por la nueva política de industrialización por sobre las importaciones, potenciando el mercado interno gracias a una importante participación del Estado (Rojas, 2017). Con el paso del tiempo y los cambios de gobierno, se han aprobado nuevas instalaciones de empresas en el parque industrial que han sido parte fundamental del deterioro del ecosistema y la contaminación atmosférica que obliga a determinar la zona como saturada en los 90's por material particulado, determinación que se repite nuevamente en el año 2015 (MMA, 2017).

Los 60 años de desarrollo industrial en la zona que contribuyen a la contaminación como las emisiones contaminantes sumativas de las empresas existentes, las deficiencias en la regulación y fiscalización de la normativa ambiental en Chile criticada por ser laxa y por no contar con mecanismos efectivos de fiscalización junto con la falta de control y las sanciones insuficientes, en conjunto con la dificultad de aplicación y evaluación de los Planes de Prevención y Descontaminación Ambiental (PPDA) vigentes componen la problemática principal del suelo contaminado por metales pesados y la biomagnificación del metal en las localidades de Puchuncaví.

Sin embargo, la vulnerabilidad de la población y las comunidades expuestas también forman parte importante de la problemática existente en la zona, ya que la desigualdad social expone a la población con difícil acceso a la salud de calidad y a la educación continua a un ambiente perturbado negativamente. La exclusión de la comunidad en la participación de la toma de decisiones relacionadas con la gestión ambiental en la zona, la desinformación sobre los riesgos de la contaminación ambiental y las medidas que se pueden tomar para protegerse en conjunto con la falta de programas activos de educación ambiental que formen líderes en el conocimiento de la problemática local y la aplicación de técnicas de remediación dirigidos a grupos de todas las edades, también forman parte de la problemática de la región.

1.3. Hipótesis

La fitorremediación como estrategia de saneamiento y biorremediación representa una opción viable a largo plazo para la remediación de suelos contaminados con metales pesados en las comunidades de Puchuncaví, resultando favorable en el uso de especies vegetales nativas tolerantes como método de evaluación de los niveles de concentración de metales para lograr recuperar los beneficios ecosistémicos característicos de la zona para así beneficiar el desarrollo de la flora y fauna silvestre y la población en condiciones ideales. Mientras que el Aprendizaje Basado en Proyectos presenta una metodología pedagógica con un gran potencial para transformar la educación ambiental y mejorar los resultados de aprendizaje en

estudiantes principalmente de edad adulta contribuyendo a la formación de ciudadanos críticos, creativos y competentes en la problemática local.

1.4. Importancia

La fitorremediación como método de remediación constituye el uso de plantas naturales de su entorno y los microorganismos asociados a ellas que, mediante técnicas agronómicas, contienen o transforman en compuestos inocuos los contaminantes presentes en el suelo. El alcance de la fitorremediación busca remediar mediante técnicas de saneamiento adaptables y accesibles a la comunidad el espacio natural de localidades pertenecientes a la comuna de Puchuncaví, para generar conocimiento mediante talleres a la comunidad con el objetivo de generar aprendizaje significativo relacionado con los niveles de absorción de metales pesados contenidos en el suelo por parte de las plantas *S. neei* y *C. chilensis*.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Evaluar el comportamiento de las especies nativas *Sarcocornia neei* y *Carpobrotus chilensis* como cubierta vegetal a través de sus propiedades físico-químicas como estrategia de fitorremediación en los suelos contaminados con metales pesados en tres localidades de la comuna de Puchuncaví para determinar el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Analizar comparativamente las tasas de concentración de los metales As, Cd, Cu y Pb en *S. neei* y *C. chilensis* en parte aérea, raíz y suelo circundante a la planta en las localidades de Los Maitenes, El Rungue y Pucalán de la comuna de Puchuncaví y en el blanco ubicado en Valparaíso en relación a parámetros normativos nacionales e internacionales.

- Generar aprendizaje significativo a través de la propuesta de un taller estructurado en base a la metodología del Aprendizaje Basado en Proyectos en temáticas de fitorremediación y potencial capacidad remediadora de las especies *S. neei* y *C. chilensis*.
- Estimar la tasa de absorción de las plantas *S. neei* y *C. chilensis* en las localidades de Los Maitenes, El Rungue y Pucalán para evidenciar su eficiencia en el proceso de fitorremediación mediante la traslocación de metales.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Remediación del suelo

La remediación de suelos corresponde a un proceso de gran importancia para restaurar la calidad y función de un suelo que ha sido contaminado por sustancias nocivas. Este proceso puede incluir técnicas y métodos diseñados para eliminar, reducir o inhibir la presencia de elementos contaminantes en el suelo con el objetivo general de proteger la salud humana y el medio ambiente.

Existen varios y diversos métodos de remediación de suelo que son aplicados dependiendo de la naturaleza y el alcance del contaminante presente y las características de la zona. Estas herramientas de saneamiento incluyen procedimientos biológicos tales como biorremediación, bioventilación y fitorremediación, y tratamientos fisicoquímicos como lavado, aireación, mezcla, excavación, incineración o vitrificación (Medjimurec, 2014). Cada método tiene sus ventajas y desventajas, y los resultados pueden variar según el tipo de afección. Estas técnicas se pueden utilizar por separado o en combinación, según el sitio específico y los objetivos del tratamiento. La elección del método correcto depende de factores como la concentración y tipo de contaminante, la ubicación y los recursos disponibles.

2.1.1. Fitorremediación

La fitorremediación se refiere al proceso de remediación que utiliza la capacidad de ciertas plantas para eliminar, degradar, neutralizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, el agua o el aire. La tecnología se basa en la capacidad natural de algunas plantas para absorber y acumular metales pesados, compuestos

orgánicos y contaminantes radiactivos en sus tejidos, creando una actividad conjunta entre las plantas y los microorganismos en la rizosfera; el área de suelo circundante a la planta y cercana a las raíces donde se encuentra la vida microbiana (Rittman, 2006). La fitorremediación considera todos los métodos de remediación basados en el uso de plantas que pueden acumular o reducir el riesgo de sustancias tóxicas mediante su conversión química en sustancias estables y destruir otros contaminantes mediante procesos metabólicos. Este sistema representa una tecnología sostenible de restauración del hábitat que reduce la cantidad de contaminantes en el suelo mediante la absorción y acumulación de contaminantes vegetales (Guerra et al., 2021).

La fitorremediación corresponde a una tecnología prometedora para la remediación de tierras contaminadas y su eficacia depende de muchos factores, incluida la selección de plantas adecuadas y las condiciones ambientales locales. Esta tecnología de remediación presenta varias ventajas como un menor costo en comparación con otros métodos de remediación, la capacidad de tratar grandes áreas contaminadas sin causar alteraciones significativas del suelo y la aceptación pública de su naturaleza. Sin embargo, la fitorremediación también tiene algunas limitaciones, como la selección de especies adecuadas al tipo de contaminación y las condiciones del sitio, y la duración del proceso, que puede ser larga en comparación con otros métodos de remediación efectivos.

2.1.2. Mecanismos de fitorremediación

Las prácticas de fitorremediación se refieren a procesos biológicos y químicos específicos mediante los cuales las plantas pueden ayudar a eliminar, destruir o estabilizar los contaminantes del suelo. Las fitotecnologías se basan en el uso de especies vegetales y los sistemas fisiológicos esenciales implementados por los microorganismos involucrados como la transpiración, la fotosíntesis, metabolismo y nutrición.

Según Thangavel y Subhram (2004), dependiendo de las condiciones del suelo, los tipos de contaminantes presentes y el grado de depuración asumido para el uso

previsto se pueden utilizar diferentes tecnologías de fitorremediación como métodos preventivos (rizofiltración, fitoestabilización y fitoinmovilización) o como métodos para la eliminación de contaminantes (fitodegradación, fitoextracción y fitovolatilización).

La fitorremediación mediante la fitoextracción o fitoacumulación de contaminantes, corresponde al método principal utilizado para reducir eficazmente los altos niveles de metales pesados contenidos en el suelo. Esta tecnología implica el desarrollo del proceso de traslocación de metales, el cual ocurre cuando los metales son absorbidos por las raíces de las plantas y transportados a través de su sistema vascular hasta sus ramificaciones. Lo primero a considerar para la aplicación de este método de remediación consiste en la selección de plantas hiperacumuladoras adecuadas para absorber los contaminantes presentes y las características físico-químicas del sitio.

2.1.3. Factores que afectan la eficiencia de la fitorremediación

La eficacia de la fitorremediación de suelos puede estar influenciada por una variedad de factores, incluyendo:

Concentración y tipo de contaminante

Diferentes plantas pueden absorber y acumular diferentes tipos de elementos extraños, por lo que el tipo de contaminantes presentes en el suelo influye en la selección de las plantas adecuadas para la fitorremediación, además, la concentración inicial de contaminantes en el suelo puede afectar la capacidad de las plantas para controlarla. Concentraciones extremadamente altas de contaminantes pueden ser tóxicas para las plantas y limitar su crecimiento y desarrollo. Raskin, Kumar, Dushenkov & Salta (1994), afirmaron que la concentración y la naturaleza química de los elementos presentes en el suelo puede influir en la capacidad de las plantas para almacenar agentes contaminantes.

Tipo de planta

La capacidad de absorción, degradación o inhibición de los contaminantes presentes en el suelo depende del tipo de planta utilizada para la remediación. Las especies vegetales conocidas como plantas remediadoras o hiperacumuladoras presentan características como una gran capacidad de acumulación en sus tejidos, una alta tolerancia a concentraciones relativamente altas de contaminantes, alta tasa de crecimiento, raíces profundas y extensas, gran adaptabilidad a variadas condiciones ambientales, y una gran facilidad de propagación y cultivo. Especies de plantas hiperacumuladoras conocidas y estudiadas como *Thlaspi caerulescens*, *Alyssum murale* y *Arabidopsis halleri* por Brooks (1998), poseen la capacidad de acumular grandes cantidades de metales pesados en sus tejidos sin mostrar síntomas de toxicidad.

Características del suelo

Factores como el pH, textura, estructura, materia orgánica y disponibilidad de nutrientes del suelo afectan la capacidad de las plantas para absorber y acumular contaminantes (Cunningham et al.1995) Algunos contaminantes pueden estar más disponibles para las plantas en determinadas condiciones del suelo. Ebbs & Kochian (1997), mencionan que el manejo adecuado del suelo permite controlar la erosión, actividades como la aplicación de fertilizantes y la gestión del riego, pueden mejorar significativamente la calidad y promover el crecimiento y desarrollo de las plantas de manera ideal para su uso en la fitorremediación.

Clima y condiciones ambientales

El clima y las condiciones ambientales, como la temperatura, la humedad ambiental y la forma de exposición a la radiación solar, pueden afectar el desarrollo de las plantas utilizadas en la fitorremediación. Es importante seleccionar plantas que sean resistentes a las condiciones climáticas locales para maximizar la eficacia de la fitorremediación. (Salt et al., 1995).

Interacciones planta-suelo-contaminante

Las interacciones entre las plantas, el suelo y los contaminantes presentes pueden influir en la eficiencia y los resultados de la fitorremediación. Por ejemplo, algunas plantas pueden exudar compuestos orgánicos a través de sus raíces que pueden movilizar o degradar los contaminantes en el suelo, mientras que otros pueden formar asociaciones simbióticas con microorganismos que promueven la descomposición de los contaminantes.

Diseño experimental y manejo

El diseño experimental y manejo adecuado del sitio de fitorremediación también pueden influir en su eficacia. Esto incluye factores como la densidad de plantación, la frecuencia de riego, la aplicación de fertilizantes y la duración del tratamiento. Mackova et al. (2000) destaca la importancia de seleccionar especies nativas adaptadas a las condiciones específicas del sitio contaminado, mientras que Eide et al. (2001) recomienda diseños experimentales que permitan comparar diferentes tratamientos y evaluar la efectividad de la fitorremediación en diferentes condiciones.

Duración del tratamiento

La fitorremediación es un proceso que puede llevar tiempo, y la duración del tratamiento puede influir en su eficacia. Algunos contaminantes pueden ser eliminados rápidamente por las plantas, mientras que otros pueden requerir tratamientos a largo plazo para lograr una reducción significativa en su concentración en el suelo. En base a la fitorremediación de suelos contaminados con plomo y cadmio, Wang et al. (2009) plantea que se requieren entre 2 y 5 años de tratamiento para reducir niveles de contaminantes a niveles seguros. Mientras que Sheoran et al. (2009) determinó que para la fitorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos el proceso podría completarse en un periodo de 1 a 2 años, dependiendo de la concentración inicial y las condiciones del sitio.

2.1.4. Selección de especies vegetales

Se consideran varios factores al seleccionar las especies vegetales para un proyecto de fitorremediación, como la capacidad de acumulación o tolerancia a los contaminantes específicos, la adaptación al medio ambiente local, la tasa de crecimiento y la disponibilidad de biomasa.

Sepúlveda, Pavez & Tapia (2012), mencionan que el uso de *S. neei* parece ser adecuada para la fitoextracción de elementos químicos desde relaves con fines de fitorremediación, ya que esta planta resiste bien su crecimiento en pasivos ambientales, absorbiendo en grandes cantidades metales como hierro (Fe), cobre (Cu) y manganeso (Mn), postulando a la especie como una gran candidata para iniciativas de remediación de Cu en las zonas de Quintero y Puchuncaví, zonas altamente contaminadas por metales pesados. Meza et al. (2018), realiza el primer estudio de la especie *S. neei* directamente en las localidades de Puchuncaví, tras su hipótesis de relación en la coloración diferenciada de la especie vegetal asociada a las condiciones de contaminación por metales pesados en el suelo en comparación a individuos extraídos de una zona libre de perturbación, lo cual que permitió el uso de *S. neei* como planta indicadora de contaminación por metales pesados analizando concentraciones de As, Cd, Cu y Pb. Siendo en 2021 cuando realizó, mediante condiciones de laboratorio, un proceso de fitorremediación de los suelos contaminados de la comuna de Puchuncaví, analizando y utilizando el potencial fitorremediador de la planta *S. neei*. Otras especies del género *Sarcocornia* han sido ampliamente estudiadas frente a su capacidad de acumular metales pesados, *S. fruticosa* y *S. perennis*, especies vegetales estudiadas en una revisión de Lutts y Lefèvre (2015), postulan que presentan una gran tolerancia al desarrollo en suelos con alta presencia de metales pesados sin sufrir fitotoxicidad. En base a los estudios presentados, el género *Salicornia* puede ser presentado como una planta hiperacumuladora, capaz de acumular metales pesados en su tejido vegetal.

Para el caso del género *Carpobrotus*, no se presentan gran cantidad de estudios respecto de su capacidad remediadora, aunque estas especies vegetales son altamente conocidas por su capacidad para colonizar áreas costeras y terrenos áridos

y su potencial capacidad invasora en zonas introducidas. Sin embargo, estudios realizados a especies *Carpobrotus rossii* y *Carpobrotus edulis*, evidencian éxito en absorción de metales. Chibana et al. (2011), descubrió que la especie de *C. edulis* resulta eficaz para eliminar nitrato, fosfato, Cd y Pb en soluciones acuosas en comparación con otros adsorbentes ya utilizados en la eliminación de iones, mientras que Zhang et al. (2014), menciona que la planta nativa australiana, *C. rossii*, es capaz de hiperacumular Cd y presenta opciones prometedoras para la fitoextracción en suelos contaminados.

2.2. Aprendizaje Basado en Proyectos

El Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) comprende una metodología educativa de enseñanza completa centrada en el aprendizaje activo y significativo a través de la realización de proyectos que permiten adquirir competencias y desarrollar conocimientos y habilidades del siglo XXI. En este modelo de aprendizaje corresponde a los estudiantes planear, implementar y evaluar proyectos que tienen aplicación en el mundo real más allá de la sala de clases (Blank, 1997; Dickinson et al., 1998; Harwell, 1997). Este enfoque de aprendizaje fomenta la participación activa de los estudiantes, la exploración de temas relevantes de la actualidad y la aplicación práctica del conocimiento y competencias adquiridas mediante esta metodología de aprendizaje.

En el ABP, el proyecto corresponde al punto central del proceso de enseñanza-aprendizaje, estos se basan en la investigación en torno a un problema, desafío o pregunta compleja que sea auténtica y motivadora. Estos proyectos suelen ser multifacéticos y pueden requerir que los estudiantes recurran a una variedad de habilidades y conocimientos de diversas áreas.

En esta metodología de enseñanza, los estudiantes se caracterizan por trabajar en equipo, planificando, ejecutando y evaluando el proyecto, toman decisiones sobre el cómo abordar la problemática y utilizan diferentes habilidades y recursos para obtener la información y desarrollar soluciones mediante la comunicación de ideas y resultados entre ellos mismos. Este tipo de aprendizaje tiene como objetivo el lograr

desarrollar habilidades como el pensamiento crítico, la creatividad, comunicación, colaboración y la resolución de problemas, promoviendo un aprendizaje significativo mientras se prepara a los estudiantes para afrontar los desafíos del mundo actual.

2.2.1. Principios claves del ABP

Proyectos Actuales y Relevantes

Los proyectos a desarrollar deben ser diseñados para enfrentar problemáticas del mundo real y situaciones verídicas. Autores como David Kolb y Jean Piaget señalan que los proyectos deben comprender una relevancia para la vida real y conectar con las necesidades e intereses de los estudiantes. El estudio de Estuaria (2016) señala que la elección de un tema relevante y que implique a los estudiantes, fomenta la motivación y facilita la comprensión de conceptos complejos.

Aprendizaje Significativo Autónomo

Debido a que los estudiantes asumen un papel activo en su propio aprendizaje, investigando y creando soluciones, se fomenta la búsqueda de información, el análisis crítico y la construcción del conocimiento por parte de los estudiantes. Redalyc (2019) destaca la importancia del desarrollo y adquisición de estas capacidades y conocimientos en los estudiantes de manera autónoma, ya que estos resultan útiles para ser aplicados en situaciones reales permitiéndoles comprender de mejor manera los conceptos y lograr el desarrollo de habilidades transferibles.

Trabajo en Equipo y Colaboración

El ABP también es una metodología de aprendizaje destacable ya que fomenta el trabajo en equipo y la colaboración entre los estudiantes, en donde aprenden a trabajar juntos, a comunicarse y resolver conflictos permitiendo el compartir ideas, recursos y habilidades para lograr los objetivos en común. El ABP fomenta la empatía, la comunicación efectiva y la capacidad de trabajar en equipo, habilidades esenciales para la vida cotidiana del mundo actual.

2.2.2. Metodología del ABP

La aplicación del ABP contempla una serie de etapas que tienen como objetivo guiar a los estudiantes a través del desarrollo de un proyecto auténtico, actual y significativo. Algunas etapas pueden variar según el autor y el enfoque del proyecto y las competencias esperadas.

Tabla 1: Metodología por etapas de aplicación ABP.

Etapa	Descripción	Objetivos	Desarrollo
Planificación	Selección del tema: Debe ser relevante, significativo y motivador.	- Identificar aprendizajes esperados - Comprender el concepto del material didáctico - Entrenamiento de habilidades	Habilidades y competencias
	Definición del problema: Deber ser claro, desafiante y abierto a diferentes soluciones		
	Establecimiento de objetivos: Deben ser específicos, medibles, alcanzables y relevantes.		
	Planificación de actividades: Deben ser variadas y fomentar el desarrollo de habilidades.		
	Recursos: Definir los materiales y herramientas a utilizar.		
Implementación	Investigación: Los estudiantes deben buscar información y recursos para abordar el problema.	- Diseñar el proyecto - Ejecutar tareas del proyecto	Trabajo del proyecto
	Planificación del proyecto: Los estudiantes deben trabajar en equipo para organizar tareas.		
	Ejecución del proyecto: Los estudiantes deben poner en práctica el plan y trabajar en el proyecto.		
	Evaluación continua: Se realiza un seguimiento del proyecto y una retroalimentación del mismo.		

Evaluación	Del producto final: Se evalúa la calidad final del proyecto.	- Presentar el proyecto	el Evaluación
	Del proceso: Se evalúa el trabajo en equipo, la participación individual y el desarrollo de habilidades.		
	Autoevaluación: Reflexión sobre el aprendizaje autónomo y experiencia en el proyecto.		

Elaboración propia. Fuente: Boss & Krauss (2007); Larmer et al. (2015); Thomas (2000); Blumenfeld et al., (1991)

2.2.3. Evaluación del ABP

La evaluación del ABP comprende una etapa fundamental en el proceso de aprendizaje y enseñanza. La evaluación de los procesos es la que permite una revisión crítica de las estrategias aplicadas en los procesos de adquisición de nuevos conocimientos y habilidades. Esta evaluación debe enfocarse en los objetivos del aprendizaje y debe enfatizar la evaluación formativa y sumativa orientada al proceso, a los resultados y a la retroalimentación.

En este contexto, las rúbricas de evaluación se posicionan como uno de los métodos más adecuados para evaluar el ABP, destacando como una herramienta poderosa y versátil que ofrece ventajas para la evaluación convirtiéndola en una opción muy favorable. Algunos motivos por los que las rúbricas sobresalen en este ámbito son: la claridad y transparencia en los criterios de evaluación que permite reducir la ambigüedad y la subjetividad, la evaluación formativa como guía para el aprendizaje y la retroalimentación, la autoevaluación y coevaluación que permite reflexionar sobre el trabajo propio identificando fortalezas y áreas de mejora, la comunicación y colaboración que facilita el entendimiento mutuo sobre las expectativas y los logros alcanzados, y la adaptabilidad para evaluar diferentes aspectos adaptados a los objetivos específicos del proyecto (Altamirano et al., 2022; Paredes, 2016).

CAPÍTULO III: ANTECEDENTES GENERALES

3.1. Marco conceptual

3.1.1. Suelo

El suelo consiste en la capa superficial más dinámica de la tierra, formado por la interacción de los sistemas atmósferas, hidrósfera y biósfera sobre la superficie de la geósfera (Galán, Romero; 2008). Esta parte superficial de la corteza terrestre, biológicamente activa, proviene de la desintegración mecánica y descomposición física o química de rocas y residuos provenientes de actividades antrópicas que se asientan sobre él.

3.1.2. Parámetros físico-químicos de evaluación del suelo

3.1.2.1. Textura

Los suelos pueden clasificarse en función del tamaño de las partículas que los componen. Esta clasificación se basa en el diámetro de la partícula y se divide en tres tipos principales: arena, limo y arcilla. Estos tipos de suelo se combinan en diversas proporciones para formar diferentes tipos de suelos que pueden variar en textura y propiedades.

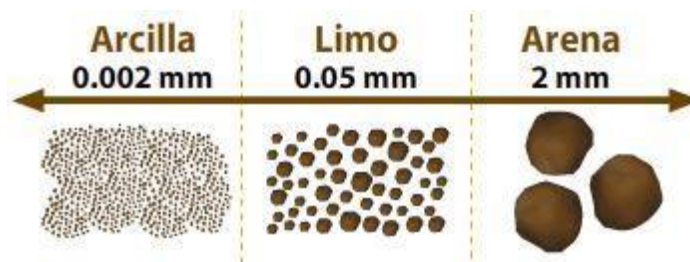


Figura 1: Tamaño de partículas del suelo. Fuente: Consejería de Agricultura y Pesca, UE.

Arena

Las partículas de arena son las más grandes de los tres tipos de suelo, con un diámetro que oscila entre 0,05 y 2,0 milímetros. La arena es suelta y porosa, lo que permite un buen drenaje del agua y una buena circulación de aire en suelo. Sin embargo, debido a su tamaño de partícula, la arena retiene poca agua y nutrientes, lo que puede dificultar el crecimiento de plantas en suelos predominantemente arenosos.

Limo

Las partículas de limo son más pequeñas que las de arena, con un diámetro que varía entre 0,002 y 0,05 milímetros. El limo tiene una textura suave y sedosa cuando está mojado, y puede retener agua y nutrientes mejor que la arena. Los suelos con una alta proporción de limo suelen tener una estructura más compacta que los suelos arenosos, lo que puede afectar la circulación de agua y aire en el suelo.

Arcilla

Las partículas de arcilla son las más pequeñas y finas de los tres tipos de suelo, con un diámetro inferior a 0,002 milímetros. La arcilla es altamente cohesionante y plástica cuando está mojada, pero se vuelve dura y quebradiza cuando se seca. Los suelos arcillosos retienen grandes cantidades de agua y nutrientes, pero tienen una mala circulación de aire y pueden ser propensos a la compactación y el encharcamiento.

3.1.2.2. pH

El pH del suelo es una medida de la acidez o alcalinidad del suelo y corresponde a una de las características químicas más importantes que influyen en la salud y la fertilidad del suelo. El pH del suelo puede variar en una escala de 0 a 14, donde un pH de 7 indica neutralidad. Los valores de pH por debajo de 7 indican suelos ácidos, mientras que los valores por encima de 7 indican suelos alcalinos.

Los niveles de pH del suelo afectan la disponibilidad de nutrientes para las plantas, ya que influye en la solubilidad y la movilidad de los elementos nutrientes en el suelo. Por ejemplo, en suelos ácidos, la disponibilidad de nutrientes como el fósforo, el calcio y el magnesio puede verse comprometida, lo que puede afectar el crecimiento y el desarrollo de las plantas. En suelos alcalinos, la disponibilidad de elementos como el hierro, el manganeso y el zinc puede ser limitada. Gran parte de las especies vegetales prefieren un suelo con pH ligeramente ácido.

Además, el pH del suelo puede afectar la actividad microbiana y la descomposición de la materia orgánica, así como la movilidad y la toxicidad de ciertos elementos como los metales pesados. Por lo tanto, es importante mantener un pH del suelo adecuado para maximizar la salud y la productividad del suelo.

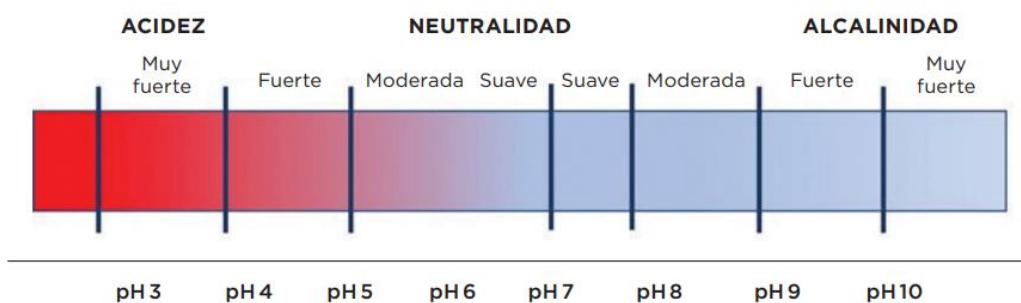


Figura 2: Escala de pH.

3.1.2.3. Conductividad Eléctrica

La Conductividad Eléctrica (CE) del suelo es una medida de la capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica y está influenciada por factores como la cantidad de sales disueltas en el suelo y la humedad del suelo. Aquí tienes una explicación sobre la conductividad eléctrica del suelo con algunas referencias para profundizar en el tema:

La CE del suelo se mide típicamente en unidades de deciSiemens por metro (S/m). Valores más altos de conductividad eléctrica suelen indicar una mayor concentración de sales en el suelo, lo que puede deberse a la salinidad natural del suelo, la irrigación con aguas salinas o la acumulación de sales debido a prácticas agrícolas.

Medir la CE resulta importante en la agricultura y la gestión de suelos dado que puede afectar la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas, así como la salud y productividad del suelo. Por ejemplo, altos niveles de conductividad eléctrica pueden ser indicativos de suelos salinos que pueden ser menos propicios para el crecimiento de cultivos sensibles a la sal. Además, la conductividad eléctrica del suelo puede influir en la distribución de nutrientes en el suelo y la actividad microbiana.

3.1.2.4. Materia orgánica

La Materia Orgánica (MO) del suelo se refiere a cualquier material de origen biológico presente en el suelo, como residuos de plantas y animales en diferentes etapas de descomposición, microorganismos, exudados de raíces y productos de descomposición orgánica. La materia orgánica del suelo desempeña un papel crucial en la salud y la fertilidad del suelo y es fundamental para mantener la productividad de los ecosistemas terrestres.

Funciones de la materia orgánica en el suelo

- Mejora la estructura del suelo: La materia orgánica actúa como un aglutinante que une las partículas del suelo en agregados, mejorando la estructura del suelo

y aumentando la porosidad, la permeabilidad al agua y la circulación de aire en el suelo.

- **Retiene agua y nutrientes:** La materia orgánica tiene una alta capacidad de retención de agua y nutrientes, lo que ayuda a mantener una disponibilidad constante de agua y nutrientes para las plantas.
- **Suministra nutrientes:** La descomposición de la materia orgánica libera nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes en formas disponibles para las plantas.
- **Favorece la actividad microbiana:** La materia orgánica del suelo proporciona alimento y refugio para una amplia variedad de organismos del suelo, como bacterias, hongos, protozoos y nematodos, que desempeñan un papel importante en la descomposición de la materia orgánica, la ciclización de nutrientes y la mejora de la salud del suelo.

Determinación y medición de la materia orgánica del suelo

- La materia orgánica del suelo se puede determinar directamente mediante técnicas de laboratorio, como la oxidación húmica, la combustión seca o la pérdida de masa por calcinación.
- También se pueden utilizar métodos indirectos para estimar la materia orgánica del suelo, como la medición del carbono orgánico total o la determinación de la fracción húmica del suelo.

Importancia agronómica y ambiental

- La materia orgánica del suelo es crucial para mantener la fertilidad del suelo y la productividad agrícola, especialmente en suelos degradados o intensivamente cultivados.

- Además, la materia orgánica del suelo juega un papel importante en la mitigación del cambio climático, ya que el suelo orgánico actúa como un sumidero de carbono, almacenando grandes cantidades de carbono atmosférico.

3.1.3. Contaminación de suelos

Se conoce como contaminación cuando en un entorno ingresan elementos o sustancias que normalmente no deberían estar en él y que afectan el equilibrio del sistema, mientras que la Ley N° 19.300 Sobre las Bases Generales del Medio Ambiente (LBGMA) define la contaminación como “la presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones o concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente”; sin embargo, no existe una normativa vigente que regule la matriz suelo y que nos permita evaluar y comparar valores para determinar el grado o existencia de contaminación en suelos de uso residencial y/o agrícolas cercanos y afectados por la industria.

3.1.3.1. Causas de la contaminación de suelos

La contaminación del suelo comprende un problema ambiental global que resulta de la introducción de sustancias químicas, materia orgánica o agentes patógenos que alteran la calidad y composición del suelo, comprometiendo su capacidad para sustentar la vida vegetal, animal y microbiana (Kabata-Pendias & Pendias, 2001). Esta contaminación puede ser causada por una variedad de actividades humanas y procesos naturales. Las actividades industriales agrícolas y mineras son algunas de las principales fuentes de contaminación, liberando variedad de contaminantes como metales pesados, pesticidas y productos químicos orgánicos y residuos sólidos (Mingorance & Peña, 2011).

Actividades industriales

Las industrias liberan una variedad de productos químicos y desechos que pueden contaminar el suelo. Por ejemplo, metales pesados como el plomo, el

mercurio y el cadmio pueden provenir de fábricas y plantas de producción (Sundaray et al., 2009).

Agricultura intensiva

El uso excesivo de pesticidas, herbicidas y fertilizantes en la agricultura puede contaminar el suelo con residuos químicos. Estos productos químicos pueden infiltrarse en el suelo y persistir durante mucho tiempo, afectando la calidad del suelo y la salud de los ecosistemas (Khan et al., 2000).

Vertederos y basureros

La disposición inadecuada de residuos sólidos en vertederos y basureros puede contaminar el suelo con sustancias tóxicas y nocivas. Los lixiviados producidos por la descomposición de los residuos pueden filtrarse en el suelo, contaminando las capas subterráneas de agua y afectando la calidad del suelo (Tchobanoglous et al., 1993).

Derrames de petróleo y productos químicos

Los derrames de petróleo y productos químicos, ya sea accidentalmente o como resultado de actividades industriales, pueden contaminar el suelo y los cuerpos de agua cercanos. Los productos químicos liberados durante los derrames pueden ser absorbidos por el suelo, causando daños a largo plazo en el medio ambiente (Atlas & Hazen, 2011).

3.1.3.2. Contaminación del suelo por metales pesados

El suelo se ha visto seriamente afectado debido a diversas actividades de origen antropogénico como la ocupación de espacios por construcciones, uso de abonos y plaguicidas en la agricultura, sedimentación de contaminantes atmosféricos de origen industrial y natural, entre otros. Todo esto genera alteraciones en el suelo que suelen ser difícilmente cuantificables y de efectos generalmente irreversibles.

Debido a que el suelo es el intermedio entre la superficie terrestre y la atmósfera (Seoáñez et al., 1999), y producto de la actividad industrial y agrícola, se genera un

incremento relevante en los niveles de metales pesados generando perturbaciones que producen desequilibrios entre ambas capas. El aumento de estos metales pesados en el ambiente tiende a acumularse en la superficie terrestre, quedando dispuestos a la translocación de estos metales a las raíces de las plantas y cultivos varios (Baird, 1999), generando cambios morfológicos en su bioquímica, en sus actividades enzimáticas y en su reproducción (Cervantes et al., 1988).

Las especies vegetales absorben, por lo general, más oligoelementos según disponibilidad y abundancia exista, las plantas que son cultivadas en suelo con presencia de metales pesados pueden generar un impacto negativo en la calidad de los alimentos, afectando a la salud de los seres vivos y del medio ambiente a través de las cadenas tróficas (Gulson et al., 1996).

Los principales elementos emitidos por el complejo industrial ubicado en la zona de Quintero-Puchuncaví y sometidos a evaluación en la matriz suelo corresponden a los metales de Arsénico, Cadmio, Cobre y Plomo.

3.1.3.3. Efectos de la contaminación de suelos

Los efectos de la contaminación pueden ser graves y extensos. Además de afectar la calidad del suelo y la salud de los ecosistemas terrestres, la contaminación del suelo puede tener impactos directos en la salud humana a través de la contaminación de alimentos y agua potable (McBride, 2003). Además, la contaminación del suelo puede contribuir a la erosión del suelo, la pérdida de biodiversidad y la degradación del paisaje (Kabata-Pendias & Pendias, 2001).

La contaminación del suelo producto de los metales pesados puede tener una serie de efectos negativos tanto en el medio ambiente como en la salud humana. Algunos de estos efectos incluyen:

Toxicidad para la vida vegetal

Los metales pesados pueden ser tóxicos para las plantas, afectando su crecimiento, desarrollo y reproducción. Esto puede llevar a una disminución en la

productividad de los cultivos y la calidad de los elementos (Kabata-Pendias & Pendias, 2001).

Acumulación en la cadena alimentaria

Los metales pesados pueden ser absorbidos por las plantas a través de las raíces y acumularse en sus tejidos. Los animales que se alimentan de estas plantas también pueden acumular metales pesados en sus cuerpos, lo que resulta en la bioacumulación de estos contaminantes en cadena alimentaria (Alloway, 2003).

Contaminación del agua subterránea

Los metales pesados pueden lixiviar desde el suelo contaminado hacia las capas freáticas, contaminando el agua subterránea. Esto puede afectar la calidad del agua potable y tener efectos adversos en los ecosistemas acuáticos (Luo et al., 2019).

Degradación de la calidad del suelo

La contaminación por metales pesados puede alterar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, lo que afecta su capacidad para sostener la vida vegetal y microbiana. Esto puede llevar a una disminución en la fertilidad del suelo y una pérdida de biodiversidad (Kabata-Pendias & Pendias, 2001).

Efectos en la salud humana

La exposición a metales pesados presentes en el suelo contaminado puede tener efectos adversos en la salud humana. La inhalación de polvo contaminado o la ingestión de alimentos cultivados en suelos contaminados pueden causar problemas de salud como intoxicaciones agudas o crónicas, daño neurológico, problemas reproductivos y cáncer (Khan et al., 2000).

3.1.3.4. Metales pesados y sus efectos en las plantas

Los metales pesados corresponden a elementos químicos que poseen una densidad relativamente alta en comparación a otros elementos, el término se refiere

a aquellos metales cuyo peso específico es superior a 5 g/cm^3 o que tiene un número atómico sobre 20 (Breckle, 1991). Estos elementos químicos a menudo son relacionados con propiedades tóxicas para los organismos vivos en concentraciones y/o permanencia elevada en el ambiente, lo cual genera una preocupación ambiental significativa debido a los efectos perjudiciales que estos elementos pueden ocasionar en la salud humana y en los diversos ecosistemas de flora y fauna.

Arsénico

Elemento químico de número atómico 33, masa atómica 74,92 y símbolo *As*; elemento semimetálico sólido color gris metálico ampliamente distribuido en la corteza terrestre. En su forma inorgánica es altamente tóxico.

El *As* corresponde a un metaloide altamente tóxico que puede afectar gravemente a las plantas, incluso en concentraciones muy bajas en el suelo. El *As* puede inhibir el crecimiento de las plantas (Alloway, 2013), interferir en el proceso de fotosíntesis (Kabata-Pendias & Pendias, 2013), inducir estrés oxidativo al aumentar la producción de especies reactivas de oxígeno (Gill et al, 2016), causar daño estructural a las células de las plantas (Clemens et al., 2013) y, el metal contaminante también puede acumularse en los tejidos vegetales de las plantas, especialmente en las partes comestibles, lo que representa un riesgo para la salud humana y animal si las plantas cultivadas en suelo contaminado por *As* se utiliza como alimento o forraje (Meharg et al., 2013).

Cadmio

Elemento químico de número atómico 48, masa atómica 112,40 y símbolo *Cd*; es un metal blanco plateado, dúctil y maleable. Existen diversas sales de cadmio. Altamente tóxico. Su obtención es casi exclusivamente como subproducto del refinado de minerales de zinc.

El *Cd* corresponde a un metal pesado altamente tóxico y en las plantas puede causar: toxicidad en la raíz inhibiendo su desarrollo y crecimiento (Sharma et al., 2012), disrupción de la homeostasis mineral interfiriendo con la absorción y

translocación de otros nutrientes esenciales (Cuypers et al., 2016), estrés oxidativo (Schutzendubel et al., 2002), alteración de metabolismo de los lípidos resultando en cambios en la permeabilidad y estabilidad de la membrana (Mishra et al., 2017) y acumulación en los tejidos vegetales en partes comestibles (Clemens, 2001).

Cobre

Elemento químico de número atómico 29, masa atómica 63,54 y símbolo *Cu*; es un metal de color rojizo brillante muy maleable y dúctil, resistente a la corrosión y buen conductor de electricidad y calor, considerado el metal más antiguo de uso común.

El cobre es un micronutriente esencial para las plantas en cantidades adecuadas, pero puede volverse tóxico en cantidades mayores a las requeridas. Concentraciones elevadas del cobre en el suelo pueden inhibir el crecimiento de las plantas (Lamhamdi et al., 2015), interferir con la absorción y translocación de nutrientes esenciales (Maksymiec, 2007), estrés oxidativo (Yruela, 2009), disrupción de la fotosíntesis (Schutzendubel, 2002) y alteración de la estructura celular afectando la integridad y función de las membranas celulares (Potters, 2004).

Plomo

Elemento químico de número atómico 82, masa atómica 207,19 y símbolo *Pb*; es un metal sólido azulado, suave y maleable. Existe naturalmente en la corteza terrestre, de donde es extraído y procesado para diversos usos de orden industrial.

El Pb como metal pesado altamente tóxico puede tener efectos adversos significativos en las plantas como: Inhibir el crecimiento de las plantas al afectar negativamente la división celular y el desarrollo de las raíces (Sharma et al., 2010), dañar directamente a la raíz de la planta inhibiendo su elongación y ramificación (Purrut, et al., 2013), interferir con la absorción de nutrientes esenciales (Alloway, 2013), estrés oxidativo (Gill et al., 2016) y alteraciones en la estructura y función celular resultando en la disfunción de órganos celulares y la interrupción de los procesos metabólicos normales (Verbruggen et al., 2009).

3.1.4. Comuna de Puchuncaví

Puchuncaví corresponde a una comuna ubicada en la Región de Valparaíso, en el centro de Chile. Se encuentra aproximadamente a 145 kilómetros al noroeste de Santiago, la capital del país. La comuna pertenece a la provincia y región de Valparaíso, y cuenta con una superficie de 300 km² que comprende 22 localidades y una población de 12.954 habitantes; 14,32% correspondiente a población rural y un 85,68% a población urbana (CENSO, 2017).

La economía de Puchuncaví está principalmente centrada en la industria y la pesca. La comuna alberga varias industrias químicas y de manufactura, incluida la producción de cemento y la refinación de petróleo. Además, la pesca y la acuicultura son actividades importantes en la zona, aprovechando los recursos marinos del Océano Pacífico. Sin embargo, Puchuncaví también ha sido objeto de preocupación debido a problemas ambientales asociados con la contaminación industrial. En particular, ha habido preocupación por la contaminación del aire y del agua en la zona, así como por los efectos en la salud de los residentes y el impacto en el medio ambiente.

La situación ambiental en Puchuncaví ha generado debate y acciones por parte de las autoridades locales y nacionales, así como de la comunidad y organizaciones ambientales, en un esfuerzo por abordar los problemas y mejorar las condiciones de vida en la comuna.

El clima de la zona corresponde a un “Clima templado, cálido lluvioso con influencia mediterránea” según la clasificación de Koppen, en donde el mar cumple un papel importante en la moderación y regulación de la temperatura. Presenta una temperatura media anual de 14 °C; una media de 10°C en el mes de julio correspondiente al más frío, y una media de 18°C en el mes de enero correspondiente al más cálido. (Municipalidad de Puchuncaví, 2009).

La comuna presenta un promedio de 3,6 milímetros de precipitaciones durante los meses de verano, un promedio de 31,1 milímetros de precipitaciones durante los meses de invierno, y un promedio de 10 milímetros de precipitaciones durante los

meses de primavera. La zona corresponde a una región relativamente seca (Municipalidad de Puchuncaví, 2009).

La comuna se encuentra ubicada en una región compuesta de planicies litorales y cuencas del sistema montañoso andino costero, y se define en tres sectores: Sector Litoral, zona costera de arenales bajos, dunas y acantilados rocosos; Planicie Central, extensión de suave colinaje recubierto por areniscas y arcillas marinas; y el Cordón de Cerros montañosos que rodea y limita la planicie.

La hidrografía de la comuna de Puchuncaví consta de tres esteros semipermanentes, los cuales representan la principal fuente de agua para uso agrícola (Municipalidad de Puchuncaví, 2009). Estos corresponden al estero de La Canela que empalma en el límite comunal con el estero Catapilco; el estero de Puchuncaví, que fluye por un valle bajo conocido como la depresión El Rungue y desemboca en la bahía de Quintero, y que también alberga al Humedal Campiche – Maitenes; y el estero Pucalán compuesto por cuatro esteros menores: Los Maquis, Chilicaquén, San Pancrancio y Mal Cara.

3.1.5. Complejo Industrial Ventanas

Dentro de la gran variedad de fuentes de metales pesados contaminantes de suelo, la de mayor importancia debido a su intensidad y permanencia corresponde a la actividad industrial de fundiciones metalíferas (Komárek et al. 2007). Es indiscutible que las actividades mineras y de fundición promueven la creación de empleos y, benefician significativamente la economía del país, sin embargo; la extracción de minerales y procesos afines degradan inevitablemente la composición natural de las matrices de aire, suelo y agua en las áreas circundantes a los procesos, conduciendo principalmente a la contaminación por metales pesados que son tóxicos tanto para el medio ambiente como para los seres vivos.

El Complejo Industrial Ventanas (CIV) considerado uno de los más relevantes de Chile se encuentra ubicado geográficamente en la costa de las comunas de Quintero y Puchuncaví pertenecientes a la V región de Valparaíso. El Cordón Industrial Quintero-Puchuncaví está conformado por más de 11 empresas, siendo 5 de ellas

consideradas como las principales causantes de la contaminación en la zona; Codelco Ventanas, ENAP, Gasmar S.A., Oxiquim y AES Gener, responsables del 76% de emisiones de material particulado, 99% de dióxido de azufre y un 81% de óxidos de nitrógeno (MMA, 2020) y, por consiguiente, responsables de las crisis ambientales ocurridas durante los últimos años en la bahía de Quintero y Puchuncaví.



Figura 3: Ubicación de empresas principales en bahía de Quintero - Puchuncaví. Fuente: El resumen, 2022.

En el año 1994, a través del D.S. N°346/2015 del Ministerio de Agricultura (MINAGRI), se declara la zona circundante al complejo industrial Ventanas como zona saturada por anhídrido sulfuroso (SO_2), entrando en vigencia en el año 1995 el primer plan de descontaminación. Actualmente las comunas de Quintero y Puchuncaví, junto a la comuna de Concón, se encuentran nuevamente declaradas según el D.S. N°10/2015 del MMA, como zona saturada por Material Particulado Fino Respirable ($\text{MP}_{2.5}$) como concentración anual y latente como concentración diaria, y zona latente por Material Particulado Respirable (MP_{10}) como concentración anual, comunas que actualmente cuentan también con el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) dictada por el D.S. N°105/2018 del MMA, que establece una serie de medidas para las principales fuentes de contaminación identificadas en la zona, entre las cuales comprende el control de emisiones de Calderas industriales (MP, SO_2 , NO_x), control de emisiones para Codelco División Ventanas (MP y SO_2), Control

de emisiones para el Complejo Termoeléctrico Ventanas de AES Gener S.A. (MP, SO₂ y NO_x), Control de emisiones para ENAP (MP, SO₂ y NO_x), control de emisiones para COVs y quemas agrícolas, forestales y de calefacción domiciliaria, todo lo anterior en conjunto a la compensación de emisiones, a la gestión de episodios críticos, al seguimiento y vigilancia de la calidad del aire y a la difusión y educación ambiental. En conjunto con lo anterior, la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) dictó medidas provisionales contra seis de las empresas ubicadas en la bahía tras el segundo episodio crítico asociado a las emisiones atmosféricas que han generado afectación a la salud de las personas de la comunidad, medidas asociadas principalmente a la “mala ventilación” y a la “regular ventilación” buscando reducir considerablemente la emisión de COVs. Adicionalmente, se requirió la obligación de informar el detalle de la implementación de las medidas exigibles al tercer año de aplicación del PPDA vigente.

Tabla 2: Hitos ambientales comunas de Quintero-Puchuncaví. Fuente: Liberona & Ramírez, (2019).

1944	Creación comuna de Puchuncaví bajo la Ley N° 7866
1954	Se instala Terminal ENAP en Bahía de Quintero.
1961	Inauguración del Parque Industrial Ventanas.
1964	Inauguración Fundición ENAMI Ventanas y Termoeléctrica a carbón Ventanas (propiedad de AES Gener).
1965	Primer Plan Regulador Comunal (D.S. N°30/1965 del MOP).
1968	Oficio de MINAGRI a Fundición ENAMI por daño a agricultores.
1977	Aumento en altura de chimenea Fundición ENAMI como medida ambiental. Inauguración Termoeléctrica a carbón Ventanas II (propiedad de AES Gener).
1981	Instalación de filtro electrostático Fundición ENAMI (funcionó durante 1 año).
1985	Primer estudio “Determinación de metales pesados en sedimento atmosférico en zona de Puchuncaví-Quintero” del doctor Jaime Chiang.
1990	Formación Comité de Defensa del Medio Ambiente Puchuncaví.
1991	Presentación Programa Ambiental Ventanas (PAV). Se propone Plan de Descontaminación.
1992	Elaboración del Plan de Descontaminación. Inauguración de la Red de Monitoreo.

1993	Decretan Zona Saturada por SO ₂ y MP ₁₀ al área circundante al CIV (D.S. N°346/1993 del MINAGRI).
1993	Publicación D.S. N° 259/1993 del Ministerio de Minería, Plan de Descontaminación del CIV Ventanas.
1994	Ingresan nuevas empresas al CIV.
1999	Se aprueba el Terminal de asfaltos e hidrocarburos CORDEX.
2000	Derrame de 17.000 litros de hidrocarburo proveniente de CORDEX.
2000	Prohibición de venta de moluscos por altos niveles de Cd, As y Cu.
2003	Se crea el Consejo Ecológico de Puchuncaví.
2006	Se aprueba proyecto Central Termoeléctrica a carbón Nueva Ventanas de AES Gener.
2007	Se declara ilegal por Fallo de Corte Suprema el proyecto Central Termoeléctrica a carbón Campiche. Aun así, es construida.
2009	Se crea la organización Hombres Verde de la Escuela La Greda.
2011	Intoxicación de alumnos Escuela La Greda. Se crea el Comité de Defensa de La Greda.
2014	Derrame de 38.000 litros de petróleo de ENAP en Bahía de Quintero
2015	Derrame de petróleo desde el Terminal Marítimo de ENAP.
2015	Se declara Zona Saturada por MP ₂₅ y Zona Latente por MP ₁₀ a Concón, Quintero y Puchuncaví, D.S. N° 10/2015 del MMA.
2016	Derrame de petróleo de ENAP en Bahía de Quintero.
2016	Se crea la agrupación Mujeres de Zonas de Sacrificio en Resistencia.
2016	MMA inicia proceso Plan de Descontaminación.
2017	Contraloría General de la República rechaza el Plan de Descontaminación por no ajustarse a derecho.
2018	Crisis ambiental y sanitaria en comunas de Quintero y Puchuncaví. Levantamiento de movimiento social.

3.1.5.1. Caracterización suelo de Puchuncaví

Las características meteorológicas de la comuna de Puchuncaví (velocidad, dirección del viento, radiación solar, humedad relativa y temperatura) permiten constatar la existencia de un área compleja debido a la variabilidad meteorológica dictada por los efectos térmicos del agua y el mar.

La zona está caracterizada por albergar diversas industrias relacionadas con la minería y la metalurgia. Debido a estas actividades industriales, se han manifestado preocupaciones sobre la contaminación ambiental en la zona, incluido el suelo. Según estudios realizados por la Universidad de Valparaíso, por parte del Instituto de Investigación Agropecuaria y otras instituciones públicas, se ha demostrado la existencia de contaminantes en la comuna de Puchuncaví, principalmente por la presencia de As, anhídrido sulfuroso y metales pesados (Saravia, Armingol y Garland, 2016). Los principales contaminantes presentes en la zona corresponden a metales pesados como As, Cu, Pb y Zn, compuestos orgánicos volátiles (COVs) como benceno, tolueno y xileno, y material particulado PM10, PM2.5 y otros.

Un estudio de plan de muestreo realizado por PGS Chile (2015) para el Ministerio del Medio Ambiente, determinó el background geoquímico de la zona de Quintero-Puchuncaví, correspondiente a los valores base de concentración de metales en el suelo, los elementos de interés en el suelo sin alteración asociada a factores antrópicos.

Tabla 3: Valores Background suelo Quintero-Puchuncaví. Fuente: PGS SPA (2015).

Elemento	Background suelo (ppm)
As	12,8
Cd	0,14
Cu	68,0
Pb	18,86

Meza et al. (2018) a través de un estudio de *S. neei* como indicador de contaminación ambiental, determinaron que en muestras de suelo extraídas del humedal Los Maitenes ubicado frente al CIV presenta altas concentraciones de metales pesados como Cd, Pb y Cu. Mientras que, en 2021, mediante un estudio de remediación de suelos, reafirmó la presencia de metales pesados contaminantes presentes en la zona.

Tabla 4: Concentraciones de metales pesados en suelo de Puchuncaví, Los Maitenes. Fuente: Meza et al. (2018); Meza et al., (2021).

Metal	Suelo Los Maitenes, 2018. (mg/kg)	Suelo Los Maitenes, 2021. (mg/kg)					
		Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6
As		62,4	59,5	56,5	38,8	27,4	26,6
Cd	2,880 ($\pm 0,54$)	-	-	-	-	-	-
Cu	523,3 ($\pm 98,13$)	-	-	-	-	-	-
Pb	26,70 ($\pm 10,24$)	101	110	99,1	69,7	48	40
Hg		5,62	9,09	9,26	4,00	7,78	1,87

3.1.6. Especies de plantas acumuladoras

3.1.6.1. *Sarcocornia neei*

Sarcocornia neei (Lag.) M.A. Alonso & M.B. Crespo, (*S. neei*), también conocida como *Salicornia neei* o espárrago de mar, corresponde a una especie perenne y halófito que pertenece a la familia *Amaranthaceae* y que se encuentra distribuida a lo largo de la costa del océano Pacífico de América del Sur. Crece en forma erecta u horizontal, y los brotes verdes y succulentos alcanzan entre los 80 y 130 cm de altura, posee ápices redondeados y un tallo robusto y leñoso. Su coloración comúnmente verde puede verse alterada a rojizo debido al estrés hídrico o por exposición excesiva a alta radiación UV. Corresponde a una especie no introducida con fotosíntesis tipo CAM (Metabolismo Ácido de Crasulácea) que separa temporalmente la fijación de carbono y el ciclo de Calvin, lo cual le permite, entre otras cosas, una resistencia a los altos niveles de salinidad de su hábito natural principalmente en humedales costeros de suelos húmedos, débilmente ácidos y ricos en nitrógeno con un pH ideal entre 4,5 y 7,5 (Riquelme et al., 2016; Cervellini, P., y Angeletti, S., 2016). Esta planta se destaca por su capacidad de desarrollo en ambientes extremadamente salinos, como los estuarios y las marismas salinas, donde pocas otras plantas pueden sobrevivir. Esto la convierte en una candidata ideal para la fitorremediación de suelos y aguas contaminadas con altas concentraciones de sales y otros contaminantes.



Figura 4: Sarcocornia neei (Lag.) M.A. Alonso & M.B. Crespo.

Para su desarrollo óptimo, la planta requiere condiciones específicas en cuanto a:

Tabla 5: Condiciones ideales para Sarcocornia neei. Elaboración propia, 2024.

Suelo	Salinidad	Alta salinidad, tolera hasta un 40% de NaCl.
	Textura	Suelos arenosos o limosos con buen drenaje.
	pH	Entre 7 y 9, pH ideal igual a 8.
Agua	Salinidad	Agua salada o salobre.
	Disponibilidad	Suelos húmedos sin encharcamiento.
	Riego	Riego regular.
Luz	Requerimiento	Alta intensidad de luz solar
	Exposición	Al menos 6 horas de luz solar directa.
Temperatura	Rango ideal	Entre 15 y 30°C
	Tolerancia	Temperaturas frías hasta 5°C y temperaturas cálidas hasta 40°C.
Nutrientes	Requerimientos	Nitrógeno, fósforo y potasio
	Fertilización	Específico para plantas halófitas durante el crecimiento.
Otros	Competencia	Se recomienda eliminar plantas competidoras.
	Plagas	Susceptible a mosca blanca y mildiu.

S. neei ha sido objeto de investigación debido a su potencial uso en la remediación de suelos, así como para la restauración de ecosistemas costeros degradados. Se ha

demostrado que esta planta puede acumular y tolerar altas concentraciones de sales, así como también ayudar a reducir la salinidad del suelo y mejorar la calidad del suelo y agua en los ambientes en los que crece. Sepúlveda, Pavez y Tapia (2013) evaluaron el uso de plantas de *S. neei* en la absorción de contaminantes y los resultados indican que absorbe los metales pesados sin sufrir fitotoxicidad y que acumulan diferentes tipos de elementos químicos en su parte aérea y raíz, además, en estudios posteriores, indican que la planta es capaz de bioabsorber eficazmente metales pesados y arsénico de suelos contaminados (Sepúlveda et al., 2020), lo que potencialmente ayuda en la fitorremediación y reduce la contaminación por partículas finas de relaves mineros y suelos contaminados. La planta resulta útil como indicador de contaminación por metales pesados con fines remediadores (Meza et al., 2021).

Además de su papel en la fitorremediación, *S. neei* también proporciona hábitats importantes para la vida silvestre en los ecosistemas costeros, sirviendo como refugio y fuente de alimento para una variedad de especies de animales, incluyendo aves acuáticas y peces.

3.1.6.2. *Carpobrotus Chilensis*

Carpobrotus chilensis (Haw.) N.E.Br. (*C. chilensis*) conocida popularmente como Doca, corresponde a una especie de planta perenne y suculenta perteneciente a la familia Aizoaceae originaria de América del Sur, distribuida ampliamente a lo largo de la zona costera de Chile, especialmente en la zona central y sur del país. Sus tallos rastreros presentan forma postrada y carnosas hojas opuestas de sección triangular y sus flores son de gran tamaño, solitarias y terminales en color rosa o amarillo. Esta especie de planta es de rápido crecimiento y muy invasiva, presentan una gran propensión a la reproducción clonal (Campoy et al., 2018). requiere baja cantidad de agua y nutrientes, y es de fácil manejo, lo que es recomendada para cobertura principalmente en zonas industriales para contener la erosión del suelo. Se encuentra naturalmente en dunas costeras, acantilados y laderas rocosas cerca del mar.



Figura 5: Carpobrotus chilensis (Haw.) N.E.Br..

Tabla 6: Condiciones ideales para Carpobrotus chilensis. Elaboración propia, 2024.

Suelo	Textura	Suelo arenoso o rocoso con buen drenaje.
	pH	Entre 6 y 8, pH ideal igual a 7
	Nutrientes	No es exigente.
Agua	Requerimiento	Poco riego.
	Tolerancia	Tolera sequía y condiciones áridas.
	Riego	Esporádico.
Luz	Requerimiento	Alta intensidad de luz solar.
	Exposición	Al menos 6 horas de luz solar directa.
Temperatura	Rango ideal	Temperatura entre 15 y 25°C
	Tolerancia	Temperaturas frías hasta 0°C y temperaturas cálidas hasta 40°C.
Viento	Tolerancia	Viento y brisa marina.
Salinidad	Tolerancia	Salinidad del suelo y agua.
Otros	Competencia	Planta invasora que desplaza a otras especies.
	Plagas	Susceptible a la cochinilla y mildiu.

Esta planta ha sido utilizada tradicionalmente por sus propiedades medicinales y culinarias. Las hojas se han utilizado en la medicina popular para tratar problemas

gastrointestinales y para aliviar quemaduras y heridas menores. Además, los frutos comestibles son ricos en vitamina C y se consumen frescos o se utilizan para hacer mermeladas y jugos.

3.1.7. Factores de concentración

Existen ciertos índices o factores cuantitativos que permiten conocer la capacidad de las plantas de absorber y acumular los metales pesados del suelo y traslocar desde sus raíces hasta su parte aérea, factor que permite evaluar la capacidad de remediación del suelo de las especies vegetales utilizadas.

3.1.7.1. Factor de bioconcentración

El factor de bioconcentración (FBC) es utilizado para cuantificar y medir la capacidad de las plantas para captar un metal a través de sus raíces y su parte aérea en relación a la concentración del contaminante en el suelo circundante. Este índice especifica cuánta concentración del contaminante se acumula en la planta y se utiliza como una medida de eficiencia de acumulación de metales en la biomasa.

El FBC se calcula como la relación entre la concentración del compuesto en el tejido de la planta (radicular y parte aérea) y la concentración del mismo compuesto en el medio a evaluar. Un resultado de FBC indica que el organismo acumula el compuesto en mayor concentración que el medio circundante y que es una especie potencialmente hiperacumuladora, ideal para utilizar en procesos que impliquen la fitoextracción (Audet y Charest, 2007).

3.1.7.2. Factor de traslocación

El Factor de traslocación (TF) corresponde al cociente entre la concentración del metal en las ramificaciones de la planta; raíz y órganos aéreos. Este índice brinda la información sobre el grado de movilidad del elemento contaminante en la planta, específica cuánto se trasloca el contaminante desde las raíces de la planta hacia otras partes de la misma como tallos, hojas y frutos.

El TF se calcula típicamente como la relación entre la concentración del elemento en las partes aéreas de la planta y la concentración del mismo contaminante en las raíces. Un resultado mayor a 1 sugiere una gran capacidad de traslocación e indica que la planta es hiperacumuladora, mientras que las plantas no acumuladoras presentan una mayor concentración de metal en la raíz que en sus partes aéreas (Baker, 1981; Brown, 1995).

3.2. Marco Jurídico

3.2.1. Legislación nacional

Bajo la Ley N°19.300 del año 1994 modificada por la nueva Ley N°20.417 del año 2010 sobre las Bases Generales del Medio Ambiente (LBGMA), no existe legislación vigente o estándares normativos que permitan regular los niveles de contaminación máximas permisibles de metales en el suelo. Debido a esto, se debe recurrir a normativas de orden internacional para lograr evaluar y contrastar los niveles de contaminantes presentes en la capa superficial terrestre.

En Chile existe una institucionalidad ambiental robusta en la que podría ser implementada un sistema de gestión de suelos contaminados e instrumentos capaces de evaluar las condiciones actuales, y es por esto que, se encuentra en preparación la primera norma de calidad para suelos en Chile, donde el 21 de abril de 2023 y siendo publicado en el Diario Oficial, se da inicio a la elaboración del Anteproyecto de la Norma Primaria de Calidad Ambiental para Suelos de Chile, sin duda un gran avance para la legislación ambiental respecto de esta matriz no controlada. Mientras tanto, corresponde al Decreto Supremo N°40 del año 2013 perteneciente al Ministerio del Medio Ambiente (MMA) que aprueba el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) en el artículo N°11 que determina las normas internacionales permitidas a referenciar corresponden a los países de: Alemania, Argentina, Australia, Brasil, Canadá, España, Estados Unidos de América, México, Nueva Zelanda, Holanda, Italia, Japón, Suecia y Suiza.

Actualmente Chile, cuenta con la NCh 2952/04 de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas en que se establecen los requisitos y condiciones para un plan de aplicación en suelos, regulación más cercana de protección existente a nivel nacional en conjunto con otras normas técnicas que complementan la labor de muestreo en suelos.

- NCh 3414: Calidad de suelo - Determinación de pH en el suelo.
- NCh 3415: Calidad de suelo - Determinación de materia seca y del contenido de agua en base a masa-métodos Gravimétricos.
- NCh 3400/1: Calidad de suelo - Directrices para el diseño de programas de muestreo.
- NCh 3400/2: Calidad de suelos - Directrices sobre técnicas de muestreo.

Tabla 7: Estándares máximos permitidos de metales pesados para lodos. Fuente: Norma lodos NCh 2952/04.

País		Elementos (mg kg ⁻¹)			
		Cu	Pb	As	Cd
Chile	Macro zona Norte pH>6,5	150	75	20	2
	Macro zona Norte pH<6,5	100	50	12,5	1,25
	Macro zona Sur pH>5	75	50	10	2

3.2.2. Legislación internacional

3.2.2.1. Canadá

En el caso de la normativa ambiental aplicable en Canadá para la protección de la salud de las personas y del medio ambiente, se presenta la norma Canadian Soil Quality Guidelines for the protection of Environmental and Human Health, la cual diferencia entre 4 tipos de suelos; agrícola, residencial/parques, comercial e industrial, presentando valores referenciales para cada elemento contaminante más específicos y exigentes.

Tabla 8: Estándares de concentraciones máximas permitidas de metales pesados en diferentes tipos canadienses. Elaboración propia, 2023. Fuente: CEPA, 2007. "Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health"

Elementos	Concentraciones en diferentes tipos de suelo (mg/kg)			
	Agrícola	Residencial	Comercial	Industrial
As	12	12	12	12
Cd	1,4	10	22	22
Cu	63	63	91	91
Pb	70	140	260	600

3.2.2.2. Australia

Assessment levels for soil, sediment and water, Department of Environment Regulation del año 2010 es una guía australiana que indica las concentraciones máximas permitidas de diversas sustancias enfocadas en la evaluación de riesgo que podría obtenerse en la salud humana.

Tabla 9: Valores de concentración de la normativa australiana en distintas sustancias para diferente uso de suelo. Fuente: Department of Environment and Conservation (2010).

Sustancia	Residencial con jardín (mg/kg)	Residencial con mínimo acceso al suelo (mg/kg)	Parque (mg/kg)	Comercial/Industrial (mg/kg)
As	100	400	200	500
Cd	20	80	40	100
Cu	1000	4000	2000	5000
Pb	300	1200	600	7200

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

La metodología para el presente estudio tendrá como finalidad cumplir los objetivos del mismo, para esto se describe a continuación:

4.1. Área de estudio

El estudio se realizó en tres localidades pertenecientes a la comuna de Puchuncaví: Los Maitenes, El Rungue y Pucalán, zonas que se encuentran altamente contaminadas por metales pesados provenientes de las actividades industriales. Con el objetivo de realizar el análisis comparativo para la absorción de metales de las plantas que permita una referencia para aumentar la confiabilidad de los resultados, el blanco se realizó en la comuna de Valparaíso, en el Campus Interuniversitario para el Desarrollo Sustentable - Quebrada Verde (CIQV) sector camino a Laguna Verde.

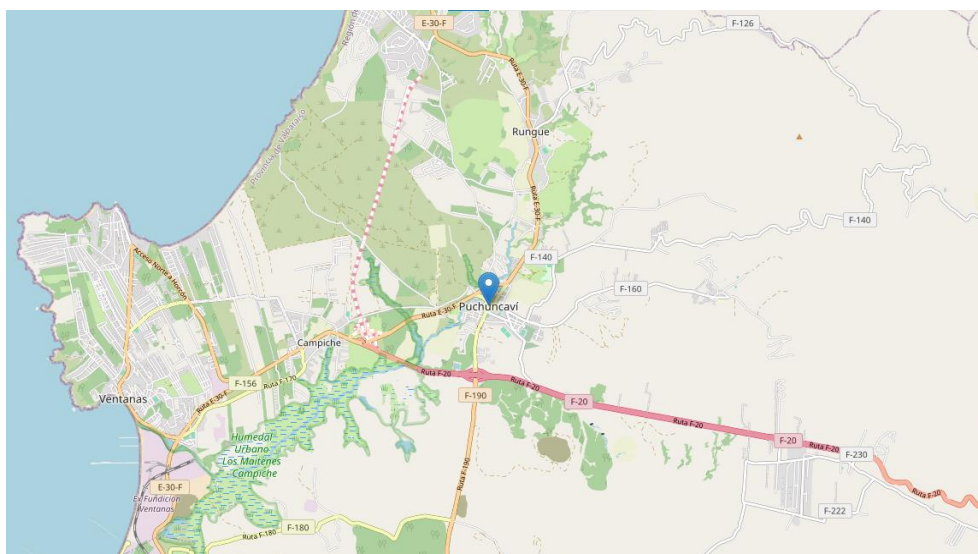


Figura 6: Mapa comuna de Puchuncaví. Fuente: Visor cartográfico de Chile, s.f.

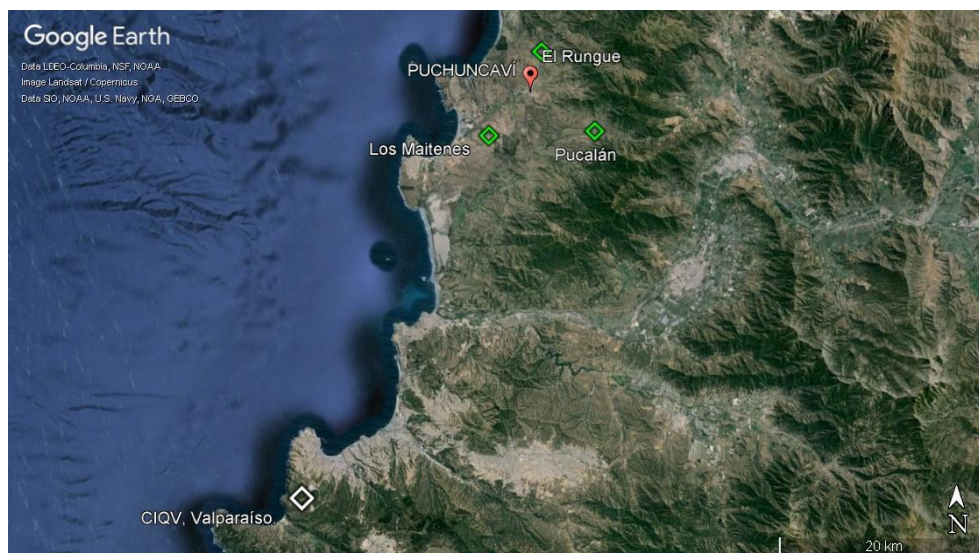


Figura 7: Mapa de ubicación zonas de estudio. Fuente: Google Earth, s.f.

4.1.1. Valparaíso

El área de estudio del blanco se localiza en interior del CIQV, ubicado a 5 kilómetros al sur de Valparaíso por la carretera F-98 en dirección a la localidad de Laguna Verde. El parque natural y cultural es administrado por cuatro Universidades de la región de Valparaíso pertenecientes al Consejo de Rectores de las Universidades Chilenas (CRUCH) y corresponde a un espacio colaborativo en donde se realizan actividades de educación, divulgación y desarrollo científico en áreas de investigación enfocados principalmente, pero no exclusivamente, a la conservación y preservación de recursos naturales de la región a través de la gestión y administración de un área del fundo Quebrada Verde que se encuentra libre de actividades contaminantes. El parque cuenta con un área de desarrollo agroforestal con alta presencia de especies autóctonas, endógenas, endémicas locales, flora y fauna en su carácter de territorio ambientalmente protegido, área que incluye las especies de *S. neei* y *C. chilensis* de forma natural.

4.1.2. Puchuncaví

Las tres áreas de estudio principales se ubicaron en tres localidades pertenecientes a la comuna de Puchuncaví: El Rungue, Los Maitenes y Pucalán.

La Comuna de Puchuncaví abarca 300 km² y se encuentra ubicada a 8 km sureste del CIV. Aunque la zona es naturalmente rica en metales como el Cu, los niveles presentes en el área se encuentran extremadamente elevados (González, 1986). El suelo de Puchuncaví se encuentra altamente contaminado por metales pesados a causa de la quema de combustibles de las empresas pertenecientes al CIV, actividades que acentúan la contaminación por metales pesados y su posterior incorporación a las cadenas tróficas. Según resultados obtenidos por el Laboratorio de Suelos PUCV (2014), la zona se encuentra altamente intervenida por los metales pesados As, Cd, Cr, Cu y Pb.

4.1.2.1. El Rungue

Localidad ubicada en la ruta F-30 a latitud 32°69'S y longitud 71°41'W a 3,8 km al N de la comuna de Puchuncaví, región de Valparaíso. El Rungue se destaca por poseer grandes atractivos turísticos gastronómicos.

La zona de estudio específica de experimentación se encuentra ubicada al interior de un domicilio particular ubicado a 11 kilómetros del CIV y a 49 kilómetros de distancia del blanco

4.1.2.2. Los Maitenes

Localidad ubicada en la ruta F-180 a latitud 32°45 'S y longitud 71°27'W a 6 km al SE de la comuna de Puchuncaví, región de Valparaíso. Los Maitenes se destaca por contener el sitio ecológico humedal Los Maitenes-Campiche, el cual contiene vegetación palustre y donde se puede encontrar de forma natural la especie *S. neei* y *C. chilensis*.

La zona de estudio específica de experimentación se encuentra ubicada al interior del Círculo de Inclusión Los Maitenes ubicado a 2,5 kilómetros de distancia del CIV y a 39 kilómetros de distancia del blanco.

4.1.2.3. Pucalán

Localidad ubicada en la ruta F-20 a latitud $320^{\circ}75'S$ y longitud $710^{\circ}34'W$ a 8,4 km al SO de la comuna de Puchuncaví, región de Valparaíso. Pucalán se destaca por su principal fuente de ingreso proveniente de la actividad agrícola.

La zona de estudio específica de experimentación se encuentra ubicada al interior de un domicilio particular ubicado a 13 kilómetros de distancia del CIV y a 45 kilómetros de distancia del blanco.

4.2. Análisis de suelo

4.2.1. Muestreo de suelo

Se recolectaron un total de cuatro muestras de suelo, una de cada localidad de estudio: El Rungue, Pucalán y Los Maitenes de la comuna de Puchuncaví, y una muestra del blanco ubicado en el CIQV de Valparaíso.

Para la obtención de las muestras, se empleó el método de muestreo compuesto establecido en la norma NCh 3400/2:2016. En base al método, se estableció un punto central de muestreo en el centro del área seleccionada que actuó como referencia para, posteriormente, determinar cuatro puntos adicionales de extracción. En total, cada muestra compuesta contiene 5 submuestras de suelo.

Para iniciar con el procedimiento de extracción, se referenció cada punto central de la muestra con GPS portátil Garmin Etrex 22x y se retiró la capa superficial de residuos de animales y vegetales en el área implicada utilizando un rastrillo de mano, posteriormente se cavó un agujero con una pala de mano a una profundidad de corte aproximada de entre 10 y 20 cm debido a las diferencias en la dureza del suelo en cada una de las localidades. Se replicó el corte de extracción en cuatro puntos

ubicados a 1 m del punto central y en dirección de los puntos cardinales. Las submuestras extraídas se homogeneizaron manualmente en un recipiente adecuado para obtener la muestra compuesta de cada zona, fracturando grumos de tierra y eliminando residuos de gran tamaño como raíces y piedras.

Cada muestra compuesta se almacenó en una bolsa de papel y se recubrió en una bolsa plástica. Posteriormente se identificaron con el número de muestra correspondiente, zona de extracción con su respectiva geolocalización y masa medida en pesa portátil, se estableció como rango mínimo de 400 g por cada una de ellas.

4.2.1.1. Campus Interuniversitario Quebrada Verde, Valparaíso

Tabla 10: Geolocalización muestras de suelo en el blanco, CIQV.

Localidad	Muestra	Geolocalización	
Blanco CIQV	LV1	19H 253072	UTM 6336829



Figura 8: Imagen aérea geolocalización muestra de suelo en CIQV, Valparaíso. Fuente: Google Earth, 2024.

4.2.1.2. El Rungue

Tabla 11: Geolocalización muestras de suelo El Rungue, domicilio particular.:

Localidad	Muestra	Geolocalización	
El Rungue	R1	19H 0274914	UTM 6380280

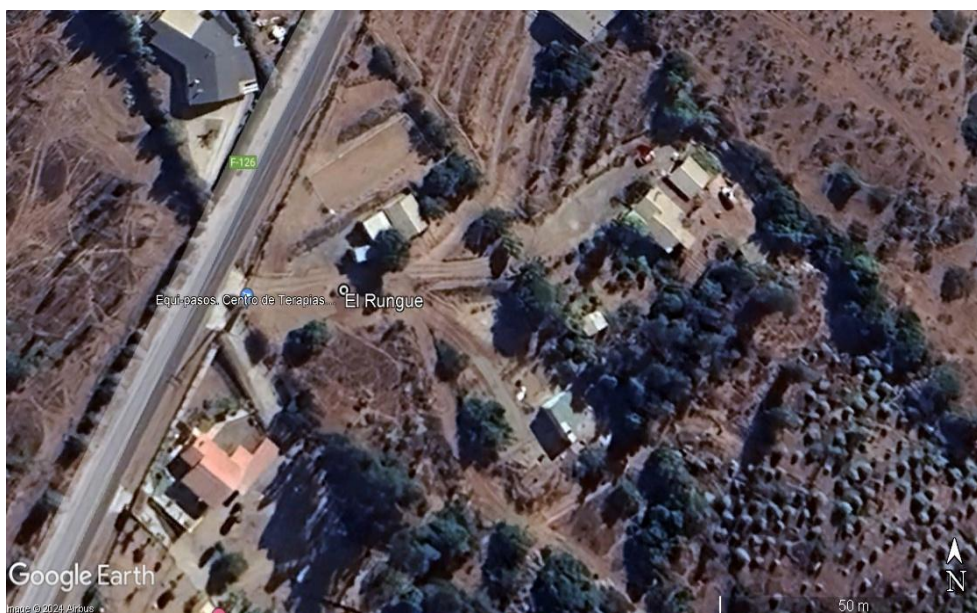


Figura 9: Imagen aérea geolocalización muestra de suelo en domicilio particular, El Rungue.
 Fuente: Google Earth, 2024

4.2.1.3. Los Maitenes

Tabla 12: Geolocalización muestras de suelo Los Maitenes, Círculo de Inclusión.

Localidad	Muestra	Geolocalización	
Los Maitenes	M3	19H 0270063	UTM 6372080



Figura 10: Imagen aérea geolocalización muestra de suelo en Círculo de Inclusión, Los Maitenes.
 Fuente: Google Earth, 2024.

4.2.1.4. Pucalán

Tabla 13: Geolocalización muestras de suelo Pucalán, domicilio particular.

Localidad	Muestra	Geolocalización	
Pucalán	P1	19H 0280169	UTM 6372719



*Figura 11: Imagen aérea geolocalización muestra de suelo en domicilio particular, Pucalán.
Fuente: Google Earth, 2024*

4.2.2. Análisis de parámetros físico-químicos del suelo

4.2.2.1. Textura

Para realizar el procedimiento de identificación de tipo de suelo según la textura de las muestras extraídas, se utilizaron tamices para clasificar las partículas de suelo según su tamaño. Los tamices utilizados funcionan típicamente mediante un conjunto de tamices de malla de diferentes aberturas que permiten retener las partículas de diferentes tamaños en cada nivel.

Inicialmente se tomaron 100 g de cada muestra compuesta y se dejaron secar al aire y a temperatura ambiente días antes de iniciar con el procedimiento. Se seleccionaron tamices previamente etiquetados y de medidas 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm y 0,075 mm, los cuales se ubicaron en orden ascendente de tamaño; comenzando con el tamiz más grueso en la parte superior y terminando con el tamiz más fino en la parte inferior.

Se tomó cada muestra de suelo y se colocó en el tamiz superior, se agitó suavemente la torre hasta que las partículas más grandes quedaron retenidas en el primer tamiz mientras que, las partículas de menor tamaño, pasaron a través de la

mallla hacia el tamiz siguiente. Se continuó el proceso de agitación suave y transferencia de la muestra a través de los tamices hasta que la totalidad del suelo pasó por todos los tamices.

Una vez completo el tamizado, se separó la torre y se recogieron las partículas retenidas en cada nivel. Se pesó cada fracción de muestra retenida y se registraron. Se calculó el porcentaje de suelo retenido en cada tamiz en relación con el peso inicial de 100 g por cada muestra para determinar el tipo de suelo según las fracciones representativas de suelo de diferentes tamaños.



Figura 12: Representación procedimiento de tamizado. Fuente: Dynapac, 2017.

Se utilizó el sistema de identificación de clase de textura del United States Department of Agriculture (USDA) para determinar el tipo de suelo según los resultados obtenidos, este sistema define doce clasificaciones principales de textura del suelo. La textura del suelo se clasifica por las fracciones de cada suelo separadas (arena, limo y arcilla) presentes en el suelo. Las clasificaciones se nombran por el tamaño de partículas constituyentes primarias o una combinación de los dos tamaños de partículas más abundantes.

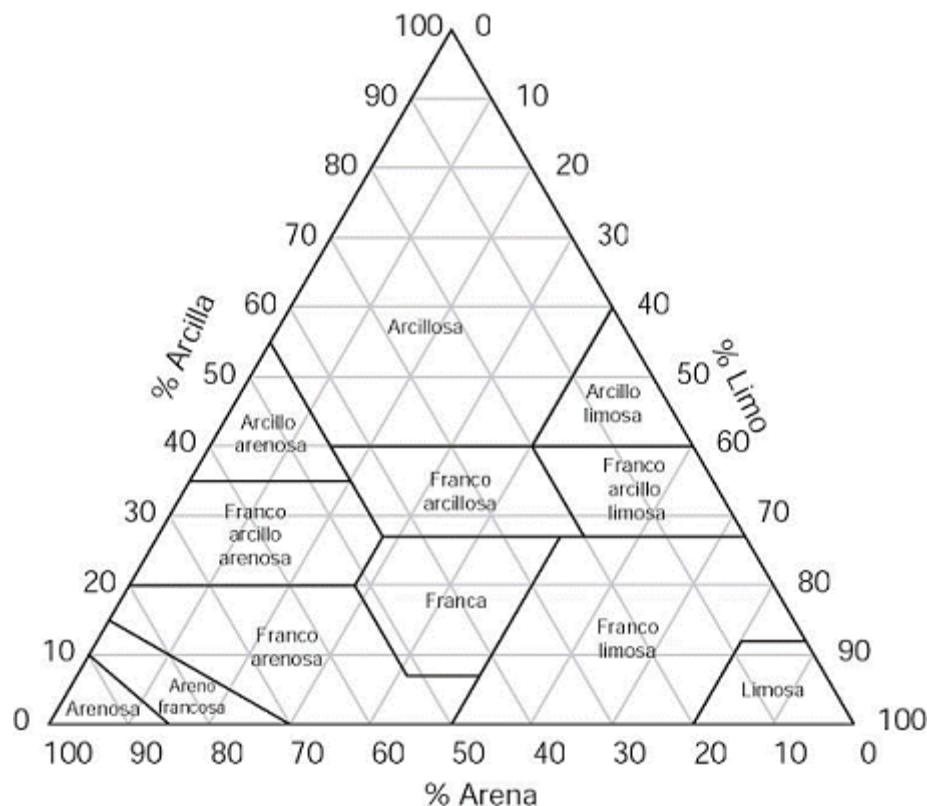


Figura 13: Triángulo de texturas de suelo. USDA, 2014.

4.2.2.2. Determinación potenciométrica de pH

El método de análisis de pH de las muestras de suelo se realizó mediante el instrumento pHmetro para suelos “HI 99121”, kit de medición de HANNA° Instruments (HI), medidor de pH diseñado para diversas aplicaciones, incluyendo análisis de agua, suelo, alimentos y productos químicos.

Para comenzar con el procedimiento, inicialmente se preparó la muestra de suelo en un vaso precipitado de 100 ml hasta alcanzar la marca de 80 ml, se midió la cantidad de muestra en gramos mediante una pesa analítica de laboratorio y se registraron los datos. Se realizó un agujero en el centro de la muestra utilizando un barreno para proporcionar un espacio adecuado para la inserción estable del electrodo del pHmetro.

Antes de comenzar con la utilización del instrumento, se verificó que el electrodo de pH se encontrara limpio y en condiciones adecuadas para la medición, y se verificó además la correcta calibración según las instrucciones del fabricante. Aprobada la revisión visual del instrumento, se introdujo el electrodo de pH en una solución de calibración de pH conocido incluido en el kit de medición, de pH 4.01 y pH 7.01. Se ajustó el medidor de pH a los valores conocidos de las soluciones de calibración y se limpiaron los restos con agua destilada.

Listo y dispuesto el instrumento para comenzar la medición, se introdujo la sonda del pHmetro en el agujero central de la muestra y, para asegurar una medición precisa, se esperó durante 3 minutos la estabilización del medidor. Se obtuvieron los datos de medición de cada muestra y se registraron para la posterioridad.

Se categorizó el resultado en base a la clasificación de suelos según el valor del pH de la USDA.

Tabla 14: Clasificación de suelo según nivel de pH. Fuente: USDA.

Valor de pH	Clasificación	Descripción
< 4,5	Extremadamente ácido	Baja disponibilidad de nutrientes, alta acidez, aluminio tóxico, textura arenosa o franco arenosa, propensos a la erosión.
4,5 – 5,5	Fuertemente ácido	
5,6 – 6,0	Medianamente ácido	Mayor disponibilidad de nutrientes que los suelos muy ácidos, acidez moderada, textura variable, menos propensos a la erosión.
6,1 – 6,5	Ligeramente ácido	
6,6 – 7,3	Neutro	Buena disponibilidad de nutrientes, acidez ideal para la mayoría de cultivos, textura variable, menos propensos a la erosión.
7,4 – 7,8	Medianamente básico	Alta disponibilidad de nutrientes, pH neutro, textura variable, menos propensos a la erosión.
7,9 – 8,4	Básico	Baja disponibilidad de algunos nutrientes, alta alcalinidad, textura variable, propensos a la salinidad.
8,5 – 9,0	Ligeramente alcalino	Muy baja disponibilidad de nutrientes, alta alcalinidad tóxica, textura variable, muy propensos a la salinidad.
9,1 – 10	Alcalino	
> 10	Fuertemente alcalino	

*Esta clasificación es general y las características específicas de un suelo pueden variar dentro de cada rango de pH.

4.2.2.3. Conductividad eléctrica

El método de análisis de conductividad eléctrica (CE) de las muestras de suelo se realizó mediante el instrumento con sonda “HI 76305”, kit de medición de HANNA° Instruments, medidor de conductividad eléctrica diseñado para análisis de muestras de suelo, agua y soluciones.

Reutilizando las muestras ya preparadas anteriormente para la medición de pH, se hidrataron con agua destilada antes de proceder con la medición de conductividad. Una vez lograda la muestra homogénea tras un tiempo de espera que varió según el tipo de suelo, se introdujo la sonda de acero inoxidable del instrumento en el centro de la muestra y se encendió el equipo. Para realizar específicamente la medición en muestra de suelo, se adecuó el instrumento para acceder a la medición correspondiente.

Se realizó un agujero en la muestra utilizando el barreno, y se introdujo la sonda “S” específica para la medición de conductividad eléctrica en suelo. Estabilizada la lectura de los datos, se registraron para la posterioridad. Se categorizó el suelo según la escala de CE establecida por la USDA.

Tabla 15: Clasificación de suelo según Conductividad Eléctrica (CE). Fuente: USDA

Rango de CE (dS/m)	Clasificación	Características
0,0 – 2,0	Suelos no salinos	Baja concentración de sales disueltas, buena disponibilidad de nutrientes, estructura de suelo favorable, drenaje adecuado
2,1 – 4,0	Suelos ligeramente salinos	Concentración moderada de sales disueltas, disminución en la disponibilidad de algunos nutrientes como hierro y fósforo, posible afectación de la estructura del suelo, drenaje puede verse afectado.
4,1 – 8,0	Suelos salinos	Alta concentración de sales disueltas, severa disminución en la disponibilidad de nutrientes, deterioro de la estructura del suelo, drenaje deficiente.
8,1 – 16	Suelos muy salinos	Muy alta concentración de sales disueltas, prácticamente nula disponibilidad de nutrientes para la mayoría de cultivos, estructura del suelo muy deteriorado, drenaje extremadamente deficiente.
>16	Suelos extremadamente salinos	Excesivamente alta concentración de sales disueltas, totalmente no apto para cultivo agrícola, impedimento para el crecimiento de la mayoría de plantas.

*La clasificación es general y las características específicas de un suelo pueden variar dentro de cada rango de CE.

4.2.2.4. Materia Orgánica

Para evaluar el contenido de materia orgánica (MO) en cada una de las muestras de suelo, se empleó el método de calcinación, el cual permite determinar el contenido de MO en el suelo al eliminar completamente la misma a través de combustión a altas temperaturas.

Para la preparación de la muestra, se realizaron manualmente cápsulas de papel de aluminio para contener de entre 5 a 10 g de suelo. Se realizó un duplicado de cada muestra para verificar resultados al final del procedimiento, obteniendo un total de ocho muestras.

Contenidas las muestras y registrado el peso inicial, se introdujeron en un horno a 105 °C por 2 horas para secar. Se dejó enfriar en desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente y se registró nuevamente la masa. Para comenzar con la medición de MO, se introdujeron las muestras ya secas en la mufla previamente preparada a 550 °C durante 3 horas para asegurar una combustión completa de la MO. Pasado el tiempo, se retiraron las muestras y se dejaron secar en el desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente para, posteriormente, registrar nuevamente la masa de cada una de ellas.

Para calcular el contenido de MO en cada muestra de suelo, se restó la masa de las cenizas de la masa inicial de la muestra y se dividió el resultado por la masa inicial de la muestra, luego, se multiplicó el resultado por 100 para obtener el porcentaje final de MO contenida en cada una de las ocho muestras.

Ecuación 1: Cálculo de Materia Orgánica (MO).

$$\% \text{ Materia Orgánica} = \left(\frac{\text{Masa inicial de la muestra} - \text{Masa de las cenizas}}{\text{Masa inicial de la muestra}} \right) \times 100$$

4.3. Remediación del suelo

4.3.1. Manejo y empleo de especies

4.3.1.1. *Sarcocornia neei*

Se trabajó con especies previamente extraídas desde la localidad de los Molles de la comuna de La Ligua, región de Valparaíso, desde un área libre de contaminación. Las plantas madres libres de contaminación se encontraban almacenadas en invernaderos pertenecientes a la Universidad de Playa Ancha; uno ubicado en la Facultad de Ingeniería en la ciudad de Valparaíso y el otro ubicado en un domicilio particular de la localidad de El Rungue, comuna de Puchuncaví. Para la primera propagación, se recolectaron 200 esquejes de entre 6 y 10 cm de longitud de plantas sanas y vigorosas. Se plantó un esqueje por cada contenedor plásticos de

reproducción de cultivo para viveros dispuestos para su propagación. El sustrato utilizado consistió en tierra orgánica certificada adquirida de manera comercial. Los esquejes se regaron inicialmente con agua de remojo de lentejas para facilitar su enraizamiento y, posteriormente, con agua de pozo disponible en las inmediaciones del invernadero con frecuencia de un día por medio. Los recipientes se ubicaron al costado del invernadero en dirección este, lugar donde las especies se encuentran la mayor parte del día expuestas a mayor temperatura producto del sol directo en espera de su aclimatación. Por disponibilidad de espacio y para facilitar el acceso a riego; 80 recipientes se trasladaron de posición a la zona central del invernadero y puestas bajo un mesón, por lo que la exposición a alta temperatura y sol directo disminuyó.



Figura 14: Monitoreo especie S. neei en invernadero El Rungue al 10 de noviembre 2023.



Figura 15: Monitoreo y poda especie S. neei en invernadero El Rungue al 24 de noviembre 2023.

4.3.1.2. **Carpobrotus chilensis**

Las plantas madres utilizadas inicialmente se extrajeron desde la vía pública en la comuna de Quilpué, región de Valparaíso, y se almacenaron en el invernadero perteneciente a la Universidad de Playa Ancha ubicado en la Facultad de Ingeniería en la comuna de Valparaíso. Para la primera propagación, se recolectaron 200 esquejes de entre 10 y 20 cm de longitud de plantas sanas y se plantó uno por cada contenedor plástico. El sustrato utilizado consistió en la misma tierra orgánica certificada adquirida de manera comercial. Los esquejes se ubicaron en repisas dentro del invernadero y se regaron inicialmente con agua de remojo de lentejas para facilitar su enraizamiento y luego, el riego habitual se realizó con agua potable obtenida directamente desde las instalaciones de la universidad.



Figura 16: Primera propagación de *C. chilensis* al 14 de diciembre 2023.



Figura 17: Monitoreo especie *C. chilensis* en invernadero UPLA al 14 de diciembre, 2023.

4.3.2. Diseño experimental

4.3.2.1. Elaboración de parcelas

Se realizaron parcelas de estudio en cada una de las tres localidades de Puchuncaví, y una parcela “blanco” en el CIQV de la ciudad de Valparaíso.

En cada sector se realizó la construcción de una parcela destinada para la plantación de las especies. La parcela se diseñó y elaboró según el tamaño de origen de tablas adquiridas comercialmente de dimensiones 1x4” y 3,20 m de largo utilizadas para determinar la base cuadrada. Se realizó un cercado perimetral utilizando dos listones de 2x2” reducidos a 1 m de largo para ser ubicados como poste de apoyo en cada esquina y medio del perímetro de la parcela. Posterior a la base estructurada, se instaló malla raschel para prevenir el ingreso de fauna silvestre a la zona de plantación. Además, se instalaron mallas raschel como cubierta superior para evitar el sol directo en las localidades de El Rungue, Los Maitenes y Pucalán.

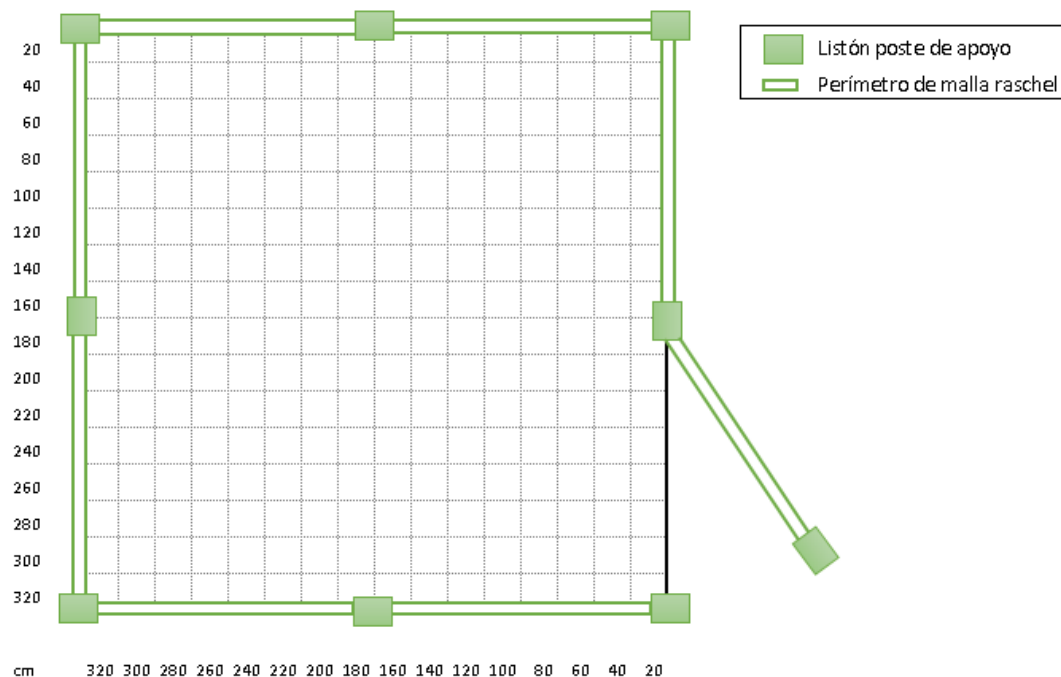


Figura 18: Diseño estructural base parcela experimental. Elaboración propia, 2024.



Figura 19; Construcción parcelas de experimentación en Círculo de Inclusión Los Maitenes, Puchuncaví.



Figura 20: Instalación malla raschel perimetral y cubierta superior en Círculo de Inclusión Los Maitenes, Puchuncaví.

4.3.2.2. Diseño de plantación

Luego de la instalación estructural de las parcelas se procedió con la plantación en cuatro lotes de trece plantas de cada especie respectivamente con el objetivo de replicar la forma natural de expansión de las plantas utilizadas. Los individuos se plantaron bajo el método “acodo”; técnica sencilla de cultivo y reproducción de plantas suculentas que se basa en generar un nuevo individuo a partir de una rama o tallo aéreo postrado sin ser separado de su planta madre con el objetivo de facilitar y replicar el estado natural de reproducción de las especies.

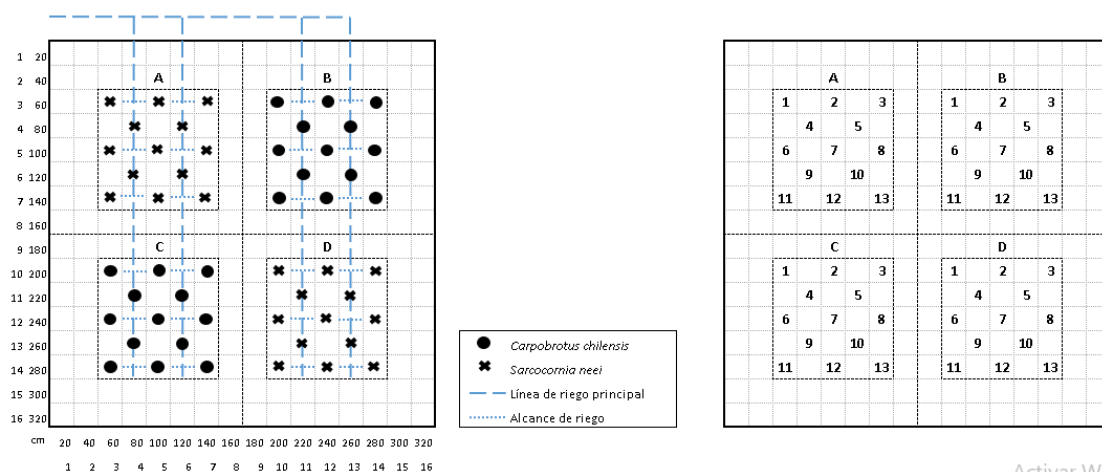


Figura 21: Diseño estructural de plantación en parcelas de estudio de especies *S. neei* y *C. chilensis*. Fuente: Elaboración propia, 2023.



Figura 22: Plantación especies *S. neei* y *C. chilensis* en parcela de experimentación en Círculo de Inclusión Los Maitenes, Puchuncaví.



Figura 23: Técnica de propagación "acodo" en especie *S. neei* parcela de experimentación en domicilio particular de Pucalán, Puchuncaví.

4.3.2.3. Sistema de riego

Para el cuidado y mantención de las especies vegetales ubicadas en cada una de las parcelas de experimentación, se adecuó un sistema de riego por goteo automatizado por gravedad para lograr el suministro de agua de forma continua y precisa directamente al área radicular de las plantas de manera controlada y uniforme. El sistema de riego general consistió en la instalación de un contenedor plástico de capacidad 200 litros conectado a líneas de riego simple de mangueras plásticas con goteros y a una válvula automatizada con programador de riego que permite controlar el tiempo de riego y los ciclos de programación del mismo.

Tabla 16: Especificaciones de materiales para sistema de riego automático por goteo

Especificación de materiales
Programador Riego Pilas Estanques Baja Presión Zero Rain
Tanque de agua de lluvia plegable para jardín, contenedor de recolección de PVC fuerte con escurridor 250L
Kit Sistema De Riego Por Goteo 20m
Kit manguera 1/2" 20 m verde Roots
Pack 100 Goteros Autocompensado 8 L/H
Tee Reducción Polietileno 3/4 x 1/2
Riego Programador Automático Timer Digital
Copla unión rápida 1/2 pulg

En el Banco ubicado en el CIQV de Valparaíso, se instaló el contenedor de agua a una distancia de 3 metros y a una diferencia de altura de 1 metro por sobre la parcela de experimentación. El agua utilizada para riego se extrajo directamente de la conexión de red de la Universidad de Playa Ancha y se trasladó en contenedores de menor capacidad hacia el CIQV. La válvula automatizada consistió en el modelo “Zero Rain” para estanques de baja presión y se programó para un riego por goteo durante 20 minutos cada 48 horas.



Figura 24: Sistema de Riego en el Blanco del CIQV, Valparaíso.

En la localidad de El Rungue, el suministro de agua para riego se obtuvo de agua de pozo extraída mediante bomba de extracción y almacenada en un estanque de agua preexistente en el domicilio particular ubicado a 115 metros de distancia y a una diferencia de altura de 9 metros por sobre la parcela de experimentación. La válvula automatizada se conectó directamente a la manguera de alcance desde el estanque hasta la parcela y se programó a un riego por goteo de 20 minutos cada 48 horas.



Figura 25: Sistema de riego en domicilio particular de El Rungue, Puchuncaví.

En la localidad de los Maitenes, se instaló el contenedor de agua a 6 metros de distancia y a 1 metro de altura en pendiente por sobre la parcela de experimentación, y fue relleno con agua potable obtenida de la red pública y trasladada de forma manual en contenedores de menor capacidad. En esta localidad se instaló una válvula de riego automatizada “Zero Rain” para estanques de baja presión y se programó para un riego por goteo controlado durante 30 minutos cada 48 horas.



Figura 26: Sistema de riego en Círculo de Inclusión Los Maitenes, Puchuncaví.

En la localidad de Pucalán, se instaló el contenedor de agua de capacidad 200 litros por sobre una estructura preexistente en el domicilio particular ubicado a 10 metros de distancia y a 2,5 metros de altura por sobre la parcela de experimentación. El estanque se relleno con agua proveniente directamente de la red de conexión de agua potable y se instaló una válvula automatizada de riego desde el contenedor de agua programada a 20 minutos de riego cada 48 horas.



Figura 27: Sistema de riego en domicilio particular de Pucalán, Puchuncaví.

4.4. Análisis de parámetros físico-químicos de las plantas

Se realizaron visitas de monitoreo recurrentes a todas las localidades de Puchuncaví y al blanco en el CIQV con el objetivo de realizar un registro de mediciones de propiedades físico-químicas y verificación de estado de las plantas para evidenciar su desarrollo y adaptación a cada zona de estudio.

Se monitorearon y evaluaron parámetros físicos de las plantas mediante el uso de herramientas de medición como el pie de metro, regla y huincha de medir. Para evaluar el crecimiento y desarrollo de las plantas, utilizando una huincha de medir se registró el alto, ancho y largo de tres plantas ubicadas diagonalmente por cada grupo, 12 plantas en total en cada parcela. Se midió, también, el grosor de cada planta anterior a través de un pie de metro.



Figura 28: Medición en terreno de especie C. chilensis.

Para evaluar aspectos generales de las plantas, se implementó un enfoque integral para evaluar el vigor considerando aspectos de salud y desarrollo mediante una evaluación visual detallada que contempló detalles como coloración, rigidez, presencia de plagas y/o enfermedades y su apariencia general. También, se realizó una evaluación táctil y visual para determinar la turgencia de la planta, considerando aspectos como el estado de hidratación y rigidez de cada una de ellas. Los parámetros de vigor y turgencia se categorizaron de la siguiente manera:

Tabla 17: Niveles de evaluación visual de vigor y turgencia.

	(1) Muy poco vigorosa	(2) Semi vigorosa	(3) Vigorosa	(4) Muy vigorosa
	La planta se observa débil y de coloración anormal. Presenta poco o nada de crecimiento vegetal.	La planta se observa firme y de color anormal. Presenta poco crecimiento vegetal.	La planta se observa firme y del color correspondiente. Presenta crecimiento vegetal.	La planta se observa fuerte, firme y de color correspondiente. Presenta un notable crecimiento vegetal.
Vigor				
	(1) Muy poco turgente	(2) Semi turgente	(3) Turgente	(4) Muy turgente
	La planta se observa opaca, su estructura es elástica.	La planta se observa erguida, su estructura es semi quebradiza.	La planta se observa firme y erguida, su estructura es semi quebradiza.	La planta se observa firme y erguida, su estructura es abultada y tirante.
Turgencia				

Se evaluaron características termodinámicas de las condiciones ambientales de las plantas como temperatura ambiental, temperatura del suelo y humedad del suelo mediante el uso de arduinos, el cual se utilizó como un micro controlador independiente capaz de capturar los datos del ambiente y reflejarlos en un programa genérico en un teléfono celular de uso personal.

4.5. Análisis de metales pesados

Para obtener una muestra representativa de las especies remediadoras, se hace necesario aplicar una técnica estadística que permita obtener las características buscadas sin tener que estudiar a toda la población para obtener resultados iguales o bastante aproximados a la totalidad.

Para el análisis de contenido de metales pesados en suelo y plantas, las muestras fueron enviadas al “Laboratorio de Suelos y Análisis Foliar PUCV” perteneciente a la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y ubicado en la Escuela de Agronomía, comuna de Quillota. El laboratorio trabaja mediante los “Protocolo de Métodos de análisis para suelos” INIA 2007, “Métodos de análisis de tejidos vegetales” INIA 2007,

“Métodos de análisis recomendados para suelos de Chile” INIA 2006 y los “Métodos de análisis de Compost” INIA 2005. El laboratorio se encuentra actualmente acreditado por el Instituto de Normalización Nacional (INN), acreditaciones LE 789 y LE 790, por la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, por el Centro Nacional del Medio Ambiente y por Instituto Boliviano de Metrología.

4.5.1. Análisis de metales pesados

Para el análisis de muestras, el laboratorio utiliza el equipo de Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) modelo GBC SensAA Dual. El EAA funciona mediante la medición de la absorción de la luz emitida para determinar la concentración de elementos metálicos en una muestra, para la cual se requiere una digestión previa (Zagal & Sadzawka, 2007).

La metodología utilizada para la determinación de los metales pesados en el suelo corresponde al “Protocolo de métodos de análisis de suelos y lodos” de Zagal & Sadzawka, 2007. Para la determinación de concentración de metales pesados, el laboratorio realizó una digestión con reactivos de ácido nítrico y perclórico definidos en el método 7.1, para luego mediante la EAA con aspiración directa, obtener los resultados de concentración de los metales pesados en las muestras mediante los métodos 9.1.1 para AS y 8.2 para Cd, Cu y Pb.

4.5.1.1. Preparación de las muestras de suelo

Las muestras de suelo enviadas al Laboratorio de Lodos y Suelos de la PUCV se prepararon en base al procedimiento propuesto por el “Protocolo de Métodos de Análisis para Suelos y Lodos” de Zagal & Sadzawka, 2007, el cual determina que las muestras deben ser preparadas de tal forma que permitan la homogeneización de sus partículas para ser usadas de manera eficaz en los análisis químicos y físicos solicitados.

La homogenización de la muestra consistió en la disgregación manual de terrones, eliminando piedras y residuos vegetales de mayor tamaño como hojas y raíces secas. Se separó una fracción de 500 g de cada muestra de suelo y se

esparció, en una capa no mayor a 15 mm de grosor, sobre una bandeja cubierta con una lámina de plástico para posteriormente secar en estufa a una temperatura no superior a $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, cuidando sobrepasar la pérdida de masa por sobre el 5% en un periodo máximo de 24 horas. La muestra ya seca se tamizó mediante el tamiz de 2 mm, disgregando los terrones en un mortero y eliminando fragmentos orgánicos extraños. La muestra se homogeneizó y se dispuso en un contenedor plástico para ser sometidas posteriormente a los análisis químicos.

4.5.1.2. Preparación de las muestras foliares

Las muestras foliares enviadas al Laboratorio de Lodos y Suelos de la PUCV se prepararon en base al procedimiento propuesto por el “Método de Análisis de Tejidos Vegetales” de Sadzawka et al., 2007, el cual determina que la preparación adecuada de las muestras de tejidos vegetales es crítica para obtener resultados analíticos confiables.

Las muestras foliares separadas en su parte radicular y aérea respectivamente, se limpiaron y se dejaron libres de sustancias extrañas como partículas de polvo y residuos de aplicaciones foliares que puedan influir en los resultados analíticos y se realizó la descontaminación de las muestras más frescas y turgentes preservando la integridad de las mismas. Se separó cada planta en parte aérea y raíz para analizar por separado.

Para la descontaminación, las muestras se lavaron con agua potable, luego con ácido clorhídrico 0,1 mol/L y se enjuagaron con agua destilada asegurando su integridad en el proceso durante no más de 30 segundos. Posteriormente, las muestras se dejaron secar inmediatamente para estabilizar el tejido y detener las reacciones enzimáticas.

Para el secado, se introdujeron las muestras en bolsas de papel y se colocaron en una estufa con aire forzado para secar a $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ en un periodo mayor a 12 horas.

Para la molienda, se utilizó un molino equipado con tamices de tamaño de poro 1,0 mm y 0,5 mm para asegurar la homogeneización y facilitar la destrucción de la materia orgánica. Después de la molienda, se separaron las muestras disponibles en porciones de entre 5 y 10 g para los análisis y almacenaje.

Se dispusieron las muestras representativas ya secas, molidas y homogeneizadas en recipientes herméticos de plástico y, mientras las primeras muestras se analizaron, las pendientes se almacenaron en un lugar oscuro, frío y seco.

4.5.1.3. Digestión de muestras con ácido nítrico-ácido perclórico

Definido en el método 7.1 del “Protocolo de métodos de análisis de suelos y lodos para Chile”, procedimientos de digestiones para suelos y lodos. En tubos de digestión de vidrio de 250 mL de capacidad, con tapones de teflón y tubos refrigerantes para permitir la condensación de vapores, se pesó alrededor de 1 g de muestra seca a $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y $<0,5$ mm de suelo. Se incluyó 1 blanco y 1 muestra de referencia fortificada con 2 mL de solución para fortificar y 1 duplicado de la muestra fortificada. Se agregó 25 mL de ácido nítrico, HNO_3 100% densidad 1,52 kg/L, y se agitó manualmente en matraz para homogeneizar la muestra. Se colocaron los tapones de teflón con los refrigerantes y se digirió a 60°C durante toda la noche. Luego de mezclar bien, se digirió a 120°C durante 1 hora y se dejó enfriar para luego mezclar y remover los refrigerantes. A continuación, se calentó la muestra a 140°C hasta que quedó un volumen de alrededor de 5 mL para luego dejar enfriar a menos de 60°C . Una vez a menor temperatura, se agregó cuidadosamente 5 mL de ácido perclórico, HClO_4 70% densidad 1,66 kg/L, se colocaron nuevamente los refrigerantes y se digirió a 220°C durante media hora. Finalmente se filtró y se diluyó en 100 mL y se registraron las lecturas de datos.

4.5.1.4. Determinación de concentraciones de metales pesados

Arsénico

Para determinar la concentración de arsénico se utilizó el método 9.1.1 determinada en el “Protocolo de métodos de análisis de suelos y lodos para Chile”

utilizando el equipo EAA con generador de hidruros previa aplicación de yoduro de potasio y ácido ascórbico. Inicialmente se comenzó a montar y alinear el horno de grafito y seleccionar las condiciones de operación definidas en las instrucciones del fabricante del EAA. Se calibró cada instrumento inyectando un volumen adecuado de cada una de las soluciones de la serie de estándares de As con un volumen igual de solución de níquel. Se leyó a 193,7 nm cada solución estándar en triplicado para verificar la precisión del método. Se inyectó una alícuota, de volumen igual al usado con la serie de estándares, de los digeridos provenientes del método 7.1 de digestión, incluyendo las muestras, el blanco y la muestra fortificada y su duplicado. Se inyectó el mismo volumen de solución de níquel. Se aplicó el programa seleccionado para As y se repitió hasta obtener resultados reproducibles.

Para examinar los valores obtenidos de concentración de As en los digeridos, se calculó mediante la siguiente expresión en mg/kg de As total en base a muestra seca a 105°C±5°C.

Ecuación 2: Determinación de concentración de metales en muestras de suelo

$$Metal \left(\frac{mg}{kg} \right) = \frac{(a - b) \times v \times d}{m \times 1000} \times Fh$$

Donde:

a = concentración, en µg/L, del metal en la muestra

b = concentración, en µg/L, del metal en el blanco

v = volumen, en mL, de digerido (7.1)

d = factor de dilución, si corresponde

m = masa, en g, de muestra (7.1)

Fh = factor de corrección por humedad

Cadmio

Para la determinación de concentración de Cd, se utilizó el método 8.2 del “Protocolo de métodos de análisis de suelos y lodos para Chile” mediante el equipo EAA llama de aire - acetileno por aspiración directa, para el cual se tomó la muestra proveniente del método 7.1 de digestión. Se seleccionó un estándar 0 y tres soluciones estándares que cubrieron el rango de concentración esperado de la muestra y que estuvieran en el rango óptimo del Cd. Se eligió la lámpara a utilizar y se dejó calentar por un mínimo de 15 min, mientras, se alineó el equipo, se seleccionó la longitud de onda específica para el Cd de 228,8 nm y el ancho del slit. Se encendió la llama y se reguló el flujo de acetileno y del oxidante. Se aspiró un blanco cero consistente en agua con ácido en la misma concentración de las muestras y de la serie de estándares. Se ajustó al 0 del instrumento, se aspiró una solución estándar y se ajustó la velocidad de aspiración del nebulizador hasta obtener la máxima respuesta. Se ajustó el mechero, vertical y horizontalmente, hasta obtener la máxima respuesta. Se aspiró el blanco cero nuevamente y se reajustó al 0 del instrumento. Luego, se aspiró una solución estándar de concentración cercana al medio del rango, se aspiró el blanco cero nuevamente y se reajustó al 0. A continuación, se calibró el instrumento con la serie de soluciones estándares empezando por el estándar 0 y terminando con el estándar más alto. Se aspiró el blanco cero nuevamente y se reajustó al 0. Se aspiró y se registró la absorbancia o la concentración del elemento en los blancos del método y en la muestra. Se diluyó necesariamente, y finalizado el análisis, se aspiró el blanco cero, se cerró la válvula de acetileno primeramente y luego la del aire. Los resultados se obtuvieron directamente del sistema de lectura del equipo.

Cobre

Para determinar la concentración de Cu, se replicó el método 8.2 del “Protocolo de métodos de análisis de suelos y lodos para Chile” mediante el EAA de llama de aire-acetileno por aspiración directa seleccionando las condiciones de operación del instrumento según las instrucciones del fabricante del Espectrofotómetro utilizando la lámpara específica de Cu y calibrando a la longitud de onda específica de 324,7 nm

con la serie de estándares del metal. Se leyeron las concentraciones de Cu en los digeridos del método 7.1, incluyendo las muestras del blanco, de la muestra de referencia fortificada y del duplicado. Los resultados se obtuvieron directamente del sistema de lectura del equipo.

Plomo

Para realizar el cálculo de concentración de Pb en las muestras de suelo, se aplicó nuevamente el método 8.2 del “Protocolo de métodos de análisis de suelos y lodos para Chile” mediante el EAA de llama de aire-acetileno por aspiración directa, seleccionando las condiciones de operación según las instrucciones del fabricante de espectrofotómetro utilizando la lámpara de Pb y calibrando a 283,3 nm con la serie de estándares correspondientes al metal. Se leyó la concentración de Pb proveniente de los digeridos del método 7.1, incluyendo las muestras del blanco, la de referencia fortificada y del duplicado. Los resultados se obtuvieron directamente del sistema de lectura del equipo.

4.6. Factores de concentración

4.6.1. Factor de Bioconcentración

El FBC se calculó utilizando los datos obtenidos de la concentración de cada uno de los metales contenidos en la parte radicular de las plantas y el nivel de metales existentes en el suelo circundante mediante la siguiente ecuación matemática:

Ecuación 3: Cálculo de Factor de Bioconcentración.

$$FBC = \frac{[metal]_{raíz}}{[metal]_{suelo}}$$

Donde:

FBC = Factor de bioconcentración de la planta.

$[metal]_{raíz}$ = Concentración del metal solo en la parte radicular de la planta, en mg/kg.

$[metal]_{suelo}$ = Concentración del metal en el suelo, en mg/kg.

4.6.2. Factor de Traslocación

El TF se calculó utilizando los datos obtenidos de la concentración de cada uno de los metales contenidos en la parte radicular y aérea de la planta, cada uno por separado, mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 4: Cálculo de Factor de Traslocación.

$$FT = \frac{[metal]_{aérea}}{[metal]_{raíz}}$$

Donde:

TF = Factor de traslocación de metales.

$[metal]_{aérea}$ = Concentración del metal solo en la parte aérea de la planta, en mg/kg.

$[metal]_{raíz}$ = Concentración del metal solo en la parte radicular de la planta, en mg/kg.

4.6.3. Categorización de las plantas en función de los factores de concentración

Las especies de plantas conocidas como hiperacumuladoras son aquellas capaces de retener metales tóxicos dentro de su sistema en una porción de al menos 1% de su masa seca, excluyendo las raíces (Syta et al., 2020), y que no presenten

síntomas de fitotoxicidad. En este estudio, se caracterizó a las plantas como acumuladoras de metales pesados considerando que la concentración del metal en tejido seco es al menos 10 veces mayor que la concentración de referencia en el suelo.

a. Concentración del metal en parte aérea de la planta

Tabla 18: Valores para la determinación de planta hiperacumuladora según concentración del metal en parte aérea. Fuente: Baker y Brooks, 1989.

Si As (mg/kg) > 1000 mg/kg	Es planta hiperacumuladora
Si Cd (mg/kg) >100 mg/kg	Es planta hiperacumuladora.
Si Cu (mg/kg) >1000 mg/kg	Es planta hiperacumuladora.
Si Pb (mg/kg) > 1000 mg/kg	Es planta hiperacumuladora.

b. Factor de bioconcentración en parte radicular de la planta

Tabla 19: Valores para la determinación de planta acumuladora según Factor de Bioconcentración. Fuente: Baker, 1981; Yoon, 2006.

Si FBC < 1	La planta es excluyente.
Si 1 < FBC < 10	La planta es acumuladora.
Si FBC > 10	La planta es hiperacumuladora.

c. Factor de traslocación

Tabla 20: Valores para la determinación de planta acumuladora según Factor de Traslocación. Fuente: Baker y Brooks, 1989.

Si TF > 1	La planta traslada eficazmente los metales pesados desde la raíz a la parte aérea de la planta, por lo que la planta es potencialmente hiperacumuladora de metales en su parte aérea.
Si TF < 1	La planta no traslada eficazmente los metales pesados desde la raíz a la parte aérea de la planta, por lo que la planta es potencialmente fitoestabilizadora de metales en su parte radicular.

4.7. Análisis Estadístico

Mediante el uso de Jamovi, un software estadístico en línea de acceso libre y de código abierto según la definición de la Licencia Pública General (GNU) de la Free Software Foundation (FSF), se analizaron estadísticamente las concentraciones de cada metal pesado individualmente para cada especie de planta considerando las concentraciones de metales pesados obtenidas para cada una de las cuatro muestras de plantas por especie extraídas de la localidad de Los Maitenes y enviadas al laboratorio de análisis de la PUCV.

*Tabla 21: Concentración de metales pesados de muestras de plantas *S. neei* y *C. chilensis* de la localidad de Los Maitenes.*

Especie	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Pb (mg/kg)
<i>S. neei</i>	30,9	1,26	5,26	4,275
<i>S. neei</i>	24,1	1,025	3,455	2,23
<i>S. neei</i>	23,9	0,99	5,835	0,68
<i>S. neei</i>	45,3	1,025	3,455	4,55
<i>C. chilensis</i>	33,05	1,82	9,23	3,38
<i>C. chilensis</i>	21,9	1,685	6,31	2,305
<i>C. chilensis</i>	23,05	1,5	9,23	3,64
<i>C. chilensis</i>	24,25	1,82	9,98	4,085

Se aplicó una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para evaluar si los datos provienen de una distribución normal. La prueba devuelve dos valores; W, que muestra un valor entre 0 y 1 indicando la evidencia de que la muestra proviene de una distribución normal cuando W sea más cercano a 1; y p, que indicia la probabilidad de obtener un estadístico W tan extremo asumiendo que la muestra proviene de una distribución normal. Valor de insignificancia de 0,05.

Para determinar la significancia del estudio se aplicó, también, la prueba de t de Student para muestras independientes considerando que las mediciones de concentración de metales pesados para cada especie de planta provienen de diferentes individuos, es decir, si existen diferencias significativas en la absorción y concentración de metales pesados en cada una de las especies de *S. neei* y *C. chilensis*. Se consideró un nivel de insignificancia de 0,05 y una hipótesis nula de que las medias de las dos poblaciones de muestras para cada especie son iguales.

4.8. Taller de aplicación ABP

4.8.1. Formación de competencias

La falta de competencias en la comunidad de las localidades de Puchuncaví respecto de la participación activa en la biorremediación de suelos contaminados, comprende la problemática a solucionar mediante la aplicación de un taller práctico que adopta el enfoque, la organización y la estructura de la metodología activa de aprendizaje ABP.

El taller se realizará en la comunidad residente de la localidad de El Rungue posterior a la presentación del proyecto y será dirigido al grupo de nivel avanzado compuesto de mujeres de la tercera edad. Mediante la aplicación de este taller se propone formar competencias a través de actividades prácticas relacionadas al conocimiento científico-ambiental respecto del cultivo, propagación y monitoreo de la especie *C. chilensis*, y de la réplica del procedimiento de remediación del suelo mediante las plantas *S. neei* y *C. chilensis*.

Los participantes del taller, al finalizar, deberán ser capaces de evocar y reconocer datos mediante la metodología de aprendizaje aplicada; comprender e interpretar la información en base al conocimiento previo al proyecto, asociando los efectos de la contaminación con la calidad de vida y la salud; y, utilizar los datos entregados para completar tareas, diferenciar y discutir hipótesis y evidencias, siendo capaces de concluir, comparar y discutir los resultados obtenidos.

4.8.2. Planificación del taller

4.8.2.1. Alcance

El taller se diseñó para el grupo de trabajo de nivel avanzado correspondiente a mujeres de la tercera edad vecinas de la localidad de El Rungue, quienes participarán de actividades grupales e individuales en que interactúen con materia y conceptos científico-ambientales relacionados a la propagación, cuidado y monitoreo de especies vegetales y a su aplicación en la remediación del suelo.

4.8.2.2. Planificación

El taller se realizará con fecha posterior a la presentación del proyecto y con una duración máxima de 90 minutos. El taller lleva por título “Técnicas de fitorremediación de suelo mediante el uso de *Sarcocornia neei* y *Carpobrotus chilensis*”; y comprende el desarrollo de actividades que tienen por objetivo comprender y aplicar la fitorremediación como una técnica de limpieza ambiental que utiliza plantas para eliminar contaminantes presentes en el suelo.

A través del ABP, se diseñará y se pondrá en práctica una réplica de las parcelas de experimentación de fitorremediación, aprendiendo durante el proceso sobre los principios científicos y las aplicaciones prácticas de esta técnica innovadora. Las tareas comprendidas en el taller están orientadas a la adquisición de conocimiento y a la formación de competencias desde un nivel básico a un nivel avanzado mediante las actividades realizadas y descritas a continuación:

Tabla 22: Planificación de actividades taller de aplicación ABP.

Taller: “Técnicas de fitorremediación de suelo mediante el uso de <i>Sarcocornia neei</i> y <i>Carpobrotus chilensis</i>”.			
Etapas	Contenidos	Actividades	Materiales
Etapas Etapas 1: Introducción a la fitorremediación.	¿Qué es la fitorremediación? Contaminantes del suelo	Lluvia de ideas.	Papel y lápiz Tríptico informativo

	Tipos de fitorremediación Beneficios de la fitorremediación		
Etapa 2: Especies vegetales remediadoras	Caracterización de <i>S. neei</i> y <i>C. chilensis</i> . Beneficios del uso de especies nativas. Cuidados y monitoreo de ambas especies.	Cuadro comparativo de especies. Propagación y cuidados de ambas especies.	Papel y lápiz Esquejes ambas especies Sustrato de tierra para cultivo Bolsas plásticas almacigueras
Etapa 3: Fitorremediación como técnica de remediación	Metodología adecuada de plantación de ambas especies para remediar. Parámetros físico- químicos relevantes para monitorear y evidenciar un correcto desarrollo de las plantas.	Construcción parcela de experimentación. Plantación y metodología de riego. Monitoreo de propiedades físico-químicas y registro de datos.	Tablas y/o listones varios Malla raschel Sierra de mano Martillo y clavos Arduino Huincha de medir

4.8.2.3. Competencias esperadas

Cada parte del taller tendrá como objetivo acceder a los diferentes niveles de competencias expuestos por Marzano, considerando el rango etario de tercera edad predominante en los grupos de aplicación. Cada actividad tendrá apoyo audiovisual y una guía estructurada de cada actividad a realizar en la que cada participante podrá registrar comentarios y respuestas.

Tabla 23: Competencias esperadas de aplicación de taller ABP.

Competencias esperadas	Mecanismo	Nivel de Marzano
Identifica y discute problemáticas ambientales propias de la localidad	Lectura y discusión	Nivel 1

Identifica y comprende estructuración morfológica de cada especie vegetal empleada	Observación y comparación	Nivel 2
Aplica técnicas de propagación y evaluaciones posteriores	Observación y aplicación	Nivel 3
Determina y analiza propiedades físico-químicas a evaluar	Observación y aplicación	Nivel 3
Identifica y utiliza de manera apropiada los instrumentos de medición	Observación y aplicación	Nivel 4
Comprende y explica procedimientos de análisis de propiedades físico-químicas	Observación y discusión	Nivel 4

4.8.2.4. Evaluación del taller

Rúbrica de evaluación para determinar el desempeño de los estudiantes en el taller ABP “Técnicas de fitorremediación de suelo mediante el uso de *Sarcocornia neei* y *Carpobrotus chilensis*”.

Tabla 24: Rúbrica de evaluación de ABP. Fuente: Elaboración propia en base a Navarrete & Belver, 2022.

Criterio	Descripción	Nivel 1 No cumple con el criterio de manera satisfactoria	Nivel 2 Cumple con el criterio de manera básica	Nivel 3 Cumple con el criterio de manera satisfactoria	Nivel 4 Cumple con el criterio de manera sobresaliente
Conocimiento conceptual	Demuestra una comprensión profunda de los conceptos y principios clave relacionados con el proyecto.	No identifica los conceptos clave.	Identifica algunos conceptos clave de manera superficial.	Identifica la mayoría de conceptos clave y los comprende de manera básica.	Identifica y comprende todos los conceptos clave de manera profunda.

Habilidades de pensamiento crítico	Analiza información de manera crítica y creativa para resolver problemas relacionados con el proyecto.	No analiza la información ni propone soluciones.	Analiza la información de manera básica y propone soluciones simples.	Analiza la información de manera crítica y propone soluciones creativas y viables.	Analiza la información de manera crítica y creativa, proponiendo soluciones innovadoras y efectivas.
Habilidades de colaboración y comunicación	Trabaja en equipo de manera efectiva, comunicándose de forma clara, respetuosa y asertiva.	No participa en el trabajo en equipo ni se comunica con sus compañeros.	Participa en el trabajo en equipo de manera básica, pero la comunicación es poco efectiva.	Participa activamente en el trabajo en equipo, comunicándose de manera clara y respetuosa.	Participa activamente en el trabajo en equipo, comunicándose de manera clara, respetuosa, asertiva y fomentando la colaboración entre sus compañeros.
Habilidades de autogestión y responsabilidad	Gestiona su tiempo y recursos de manera eficiente, asumiendo la responsabilidad de sus tareas y cumpliendo con los plazos establecidos.	No gestiona su tiempo ni recursos, no cumple con las tareas ni los plazos.	Gestiona su tiempo y recursos de manera básica, cumple con las tareas y los plazos con algunas dificultades.	Gestiona su tiempo y recursos de manera eficiente, cumple con las tareas y los plazos de manera responsable.	Gestiona su tiempo y recursos de manera óptima, excediendo las expectativas en el cumplimiento de tareas y plazos, demostrando gran responsabilidad y proactividad.
Producto final		El producto final del proyecto es de baja calidad, no cumple con	El producto final del proyecto es de calidad básica, cumple con	El producto final del proyecto es de buena calidad, cumple con los requisitos y	El producto final del proyecto es de excelente calidad, supera los

	los requisitos mínimos y no refleja un aprendizaje significativo.	los requisitos mínimos, pero refleja un aprendizaje poco significativo.	refleja un aprendizaje satisfactorio.	requisitos y refleja un aprendizaje profundo y significativo.
--	---	---	---------------------------------------	---

4.8.2.5. Actividad de reforzamiento

El objetivo de la actividad de reforzamiento es que los estudiantes comprendan el proceso de fitorremediación y su aplicación en la remediación de suelos contaminados por metales pesados, así como también el desarrollar habilidades de investigación, análisis crítico y trabajo en equipo.

La actividad de reforzamiento consistirá en la presentación de un escenario ficticio en el cual se deberá diseñar un proyecto de fitorremediación para un sitio contaminado aplicando los conocimientos adquiridos previamente sobre el tema al diseño del proyecto, desarrollando habilidades de planificación, investigación, análisis y el trabajo en equipo mediante la comunicación efectiva.

Escenario ficticio:

“Una empresa minera ha cesado sus operaciones y ha dejado un área de terreno significativo contaminado con metales pesados como Pb, Cd y Hg. Ante la situación, las autoridades locales están buscando soluciones sostenibles y económicamente viables para remediar y restaurar el sitio. La fitorremediación ha sido propuesta como una opción prometedora para abordar la problemática ambiental.”

Roles de los participantes:

- Guía del taller: Facilitará la actividad proporcionando información y guiando a los participantes.

- Estudiantes: Reforzarán conocimientos y competencias adquiridas previamente sobre la fitorremediación, investigando sobre plantas adecuadas y contribuirán al desarrollo de un plan de acción.
- Facilitadores: Ayudarán con la organización y apoyo técnico durante el desarrollo de la actividad.

Desarrollo de la actividad:

I. Introducción al tema: a. Presentación inicial sobre la fitorremediación y sus beneficios. b. Discusión breve sobre la contaminación por metales pesados y su impacto en la salud y el medio ambiente.	II. Investigación en grupo: a. Dividir a los participantes en pequeños grupos. b. Proveer material sencillo de lectura sobre diferentes plantas y sus características para uso en fitorremediación. c. Cada grupo deberá investigar y seleccionar una planta que consideren adecuada para tratar el suelo contaminado
III. Planificación de la fitorremediación: a. Con la guía de los educadores, los grupos desarrollarán un plan para plantar y cuidar las plantas seleccionadas. b. Discusión sobre cómo monitorear el progreso de la remediación.	IV. Práctica de fitorremediación: a. Sesión práctica donde los participantes puedan plantar ejemplares en una parcela de demostración a escala. b. Instrucciones sobre el cuidado de las plantas y la importancia de su papel en la remediación del suelo.
V. Monitoreo y seguimiento: a. Establecer un calendario para visitas regulares al sitio de plantación para observar y documentar el crecimiento de las plantas.	VI. Reflexión y socialización: a. Reunión final para presentar resultados, compartir experiencias, reflexionar sobre lo aprendido y socializar.

b. Discusiones periódicas sobre los avances y cualquier ajuste necesario en el plan.

b. Actividades complementarias como talleres de jardinería, charlas sobre sostenibilidad, etc.

Evaluación:

La valoración de resultados obtenidos se realizará mediante una autoevaluación personal y grupal en base a:

- La participación activa y el interés mostrado durante la actividad.
- La comprensión básica de la fitorremediación y su aplicación.
- La habilidad para trabajar en equipo y contribuir al desarrollo del plan de acción.
- Observaciones y notas tomadas durante las simulaciones de monitoreo.

Esta actividad no solo educará a los participantes sobre la fitorremediación, sino que también proporcionará una experiencia enriquecedora y socialmente beneficiosa.

CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Resultados

5.1.1. Resultados parámetros físico-químicos del suelo

Las muestras de suelo extraídas de las localidades de Puchuncaví se sometieron a los análisis de parámetros físicos y químicos según la instrumentación dispuesta en Laboratorio Ambiental de la Facultad de Ingeniería UPLA y se obtuvieron los siguientes resultados para cada una de las zonas de estudio:

5.1.1.1. Textura

Tabla 25: Resultados análisis de textura por granulometría de muestras de suelo.

Localidad	Muestra	Textura			
		Arena %	Limo %	Arcilla %	Tipo de suelo
CIQV	LV1	66,2	33,8	0,1	Franco arenoso
El Rungue	R1	34,3	0,1	65,6	Arcilloso
Los Maitenes	M1	32,2	62,3	5,5	Franco limoso
Pucalán	P1	84,9	14,6	0,5	Areno francoso

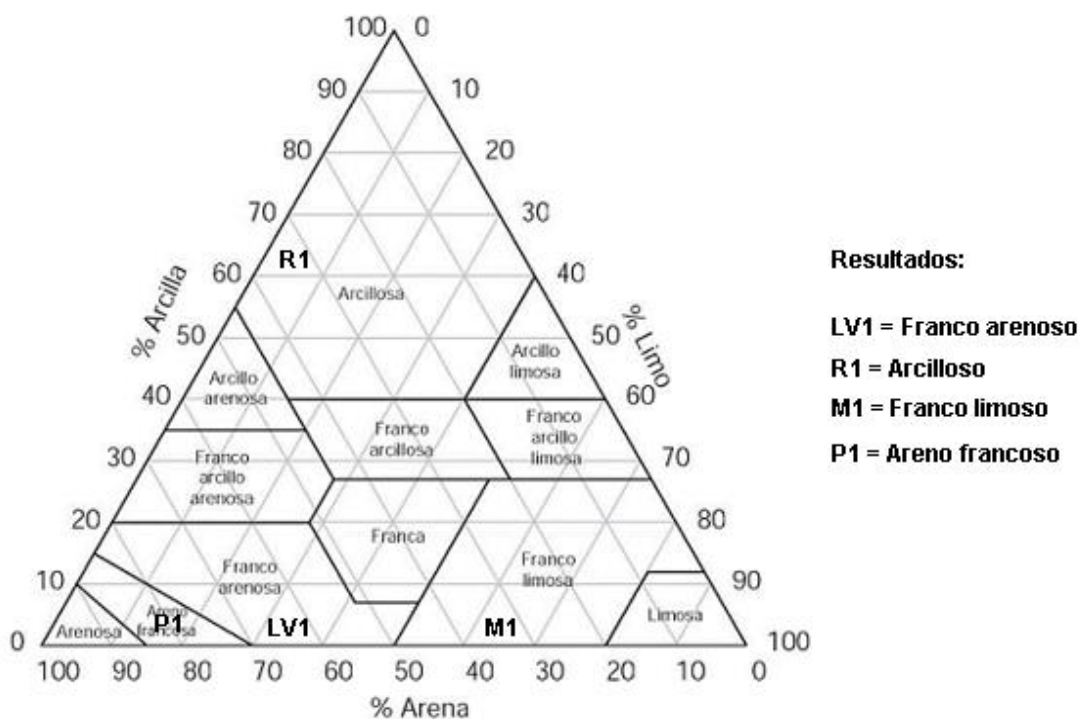


Figura 29: Resultados de textura de suelo por granulometría en triángulo de texturas.

5.1.1.2. pH

Resultados de análisis de pH en terreno en todas las localidades de Puchuncaví y en el CIQV:

Tabla 26: Resultados análisis de pH de muestras de suelo.

Localidad	Muestra	pH	Tipo de suelo
CIQV	LV1	5,59	Medianamente ácido
El Rungue	R1	4,59	Fuertemente ácido
Los Maitenes	M1	4,33	Extremadamente ácido
Pucalán	P1	4,59	Fuertemente ácido

5.1.1.3. Conductividad Eléctrica

Resultados de análisis de conductividad eléctrica en terreno en todas las localidades de Puchuncaví y en el CIQV:

Tabla 27: Resultados de Conductividad Eléctrica de muestras de suelo.

Localidad	Muestra	Conductividad Eléctrica (dS/m)	Tipo de conductividad	Clase de salinidad
Blanco	LV1	0,2	Baja	No salino
El Rungue	R1	0,12	Baja	No salino
Los Maitenes	M1	0,02	Baja	No salino
Pucalán	P1	0,12	Baja	No salino

5.1.1.4. Materia Orgánica

Tabla 28: Resultados análisis de Materia Orgánica de muestras de suelo.

Localidad	Muestra	Masa Inicial (g)	Masa después de la estufa (g)	Masa después de la mufla (g)	Volátiles	% Volátiles	MO	% MO
CIQV	LV1 A	5,0012	4,9708	4,6415	0,7552	15,1004	1,0845	21,68
	LV1 B	5,0065	5,4411	5,0888	0,5697	11,37924	0,9220	18,42
El Rungue	R1 A	5,0033	5,7025	5,4631	0,2013	4,02	0,4407	8,81
	R1 B	5,0042	6,4290	6,1830	0,2098	4,19	0,4558	9,12
Los Maitenes	M1 A	5,0017	4,9494	4,8375	0,0523	1,05	0,1642	3,28
	M1 B	5,0022	4,9556	4,8397	0,0466	0,93	0,1625	3,25
Pucalán	P1 A	5,0016	4,8051	4,3552	0,20	3,93	0,65	12,92
	P1B	5,0004	4,7991	4,3969	0,20	4,03	0,60	12,07

5.1.2. Resultados parcelas de experimentación

5.1.2.1. Monitoreo de especies antes de la plantación

Para la especie *S. neei*, los esquejes se consideraron aclimatados cuando se observó crecimiento longitudinal y nuevos brotes. De las plantas almacenadas en invernadero El Rungue, los recipientes ubicados bajo el mesón mostraron un desarrollo más avanzado pese a no estar expuestos al sol directo. Al cabo de 4 meses, se encuentran 198 de 200 plantas físicas, 175 plantas con brotes visibles, 87,5% de sobrevivencia.

Para la especie *C. chilensis*, los esquejes se consideraron aclimatados cuando se observó un rápido crecimiento longitudinal, nuevos brotes y florecimiento. Las plantas presentaron un nivel de desarrollo similar independiente de la ubicación dispuesta dentro del invernadero. Al cabo de 4 meses, se encontraron 190 de 200 plantas físicas, 171 plantas con brotes visibles, 85,5% de sobrevivencia.

5.1.2.2. Resultados elaboración diseño experimental de parcelas

Se cumplió con el diseño preestablecido de construcción de las parcelas planificadas inicialmente para cada una de las localidades de Puchuncaví y en el blanco. Los sistemas de riego cumplieron la función del riego programado y automático.

Evidencia fotográfica de elaboración de parcelas de experimentación: (a) Parcela de experimentación “Blanco” en CIQV, Valparaíso. (b) Parcela de experimentación Círculo de Inclusión, Los Maitenes, Puchuncaví. (c) Parcela de experimentación en domicilio particular de Pucalán, Puchuncaví. (d) Parcela de experimentación en domicilio particular de El Rungue, Puchuncaví.

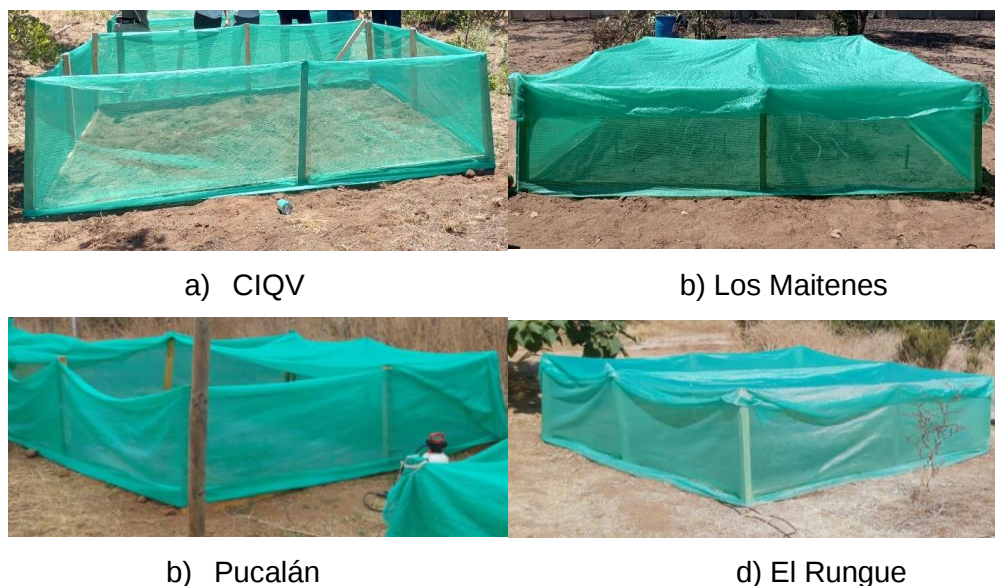


Figura 30: Resultados de elaboración de parcelas de experimentación.

5.1.2.3. Resultados parámetros físico-químicos de las plantas

Los resultados de adaptación, desarrollo y crecimiento de las plantas a cada zona y tipo de suelo en el “Blanco” del CIQV y en cada localidad de Puchuncaví se evidenció en el crecimiento y cubierta de área de cada planta evaluada en el monitoreo de parámetros físico-químicos en función del tiempo.

CIQV, Valparaíso

Tabla 29: Mediciones, en cm², de cubierta de área de plantas en el “Blanco”, CIQV, Valparaíso.

ÁREA S. neei	26 enero (cm ²)	02 febrero (cm ²)	16 febrero (cm ²)	ÁREA C. chilensis	26 enero (cm ²)	02 febrero (cm ²)	16 febrero (cm ²)
A1	147	368	306	B1	180	925	764
A5	252	590	451	B7	390	2088	1667
A13	210	500	317	B13	782	1013	1910
D1	240	435	368	C1	340	1344	2048
D7	352	506	495	C7	340	700	1927
D12	756	874	844	C13	925	780	1421

Gráfico 1: Comparación, en cm^2 , de evolución de cubierta de área en plantas del "Blanco" en el CIQV, Valparaíso.

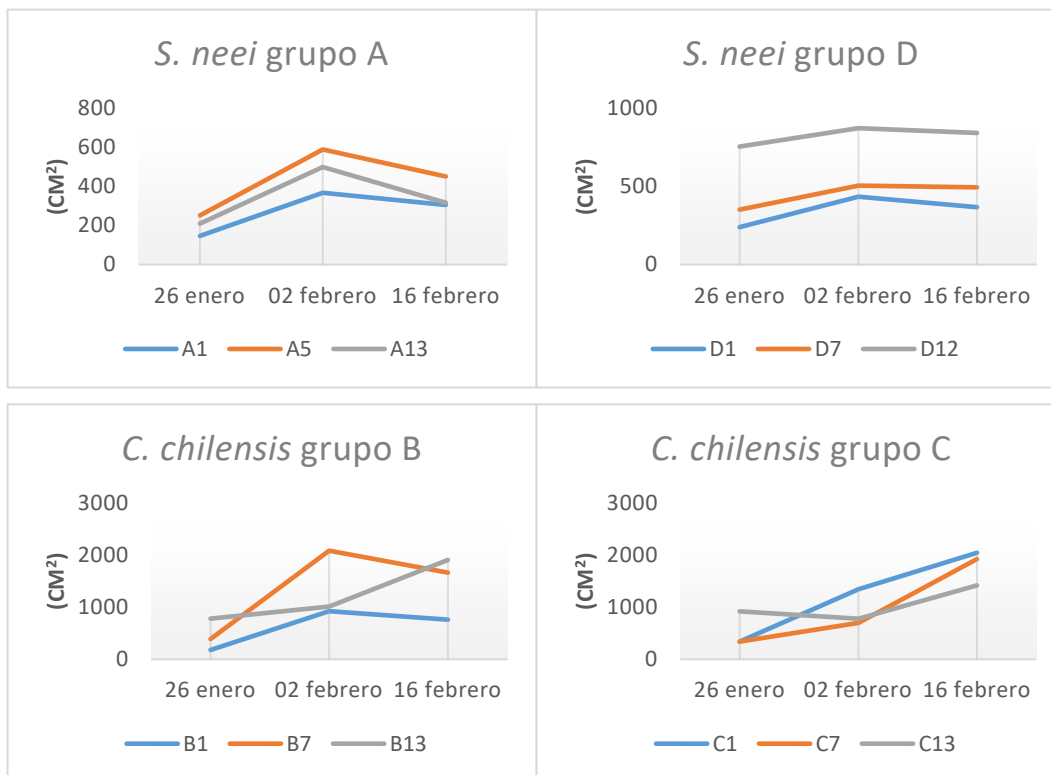


Figura 31: Evidencia fotográfica de cubierta de área de plantas en "Blanco" en CIQV, Valparaíso.

El Rungue

Tabla 30: Mediciones, en cm^2 , de cubierta de área de plantas en domicilio particular El Rungue, Puchuncaví.

ÁREA S. neei	19 enero (cm^2)	01 febrero (cm^2)	29 febrero (cm^2)	ÁREA C. chilensis	19 enero (cm^2)	01 febrero (cm^2)	29 febrero (cm^2)
A4	208	240	340	B1	413	798	1860
A10	177	196	129	B7	240	567	1974
A13	224	255	720	B13	130	585	4480
D1	77	96	150	C1	160	399	1036
D7	66	234	117	C7	100	439	663
D113	80	204	384	C13	122	128	148

Gráfico 2: Comparación, en cm^2 , de evolución de cubierta de área de plantas en domicilio particular El Rungue, Puchuncaví.

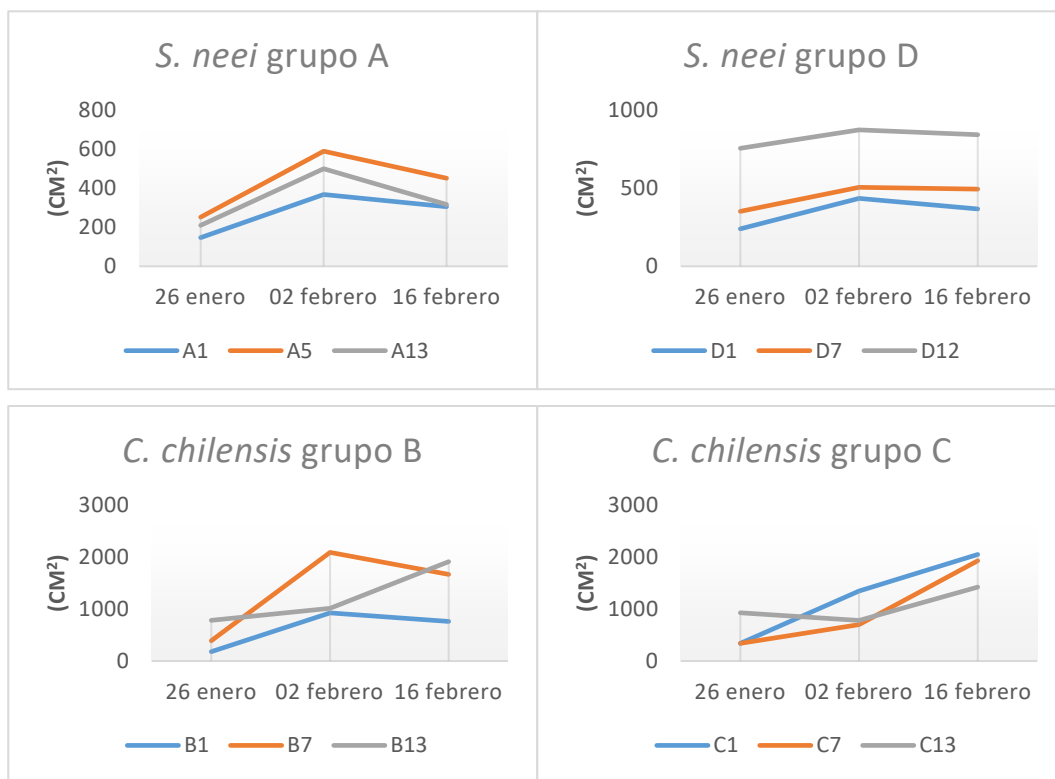




Figura 32: Evidencia fotográfica de cubierta de área de plantas en domicilio particular El Rungue, Puchuncaví.

Los Maitenes.

Tabla 31: Mediciones, en cm², de cubierta de área de plantas en Círculo de Inclusión Los Maitenes, Puchuncaví

ÁREA S. neei	16 enero (cm ²)	13 febrero (cm ²)	29 febrero (cm ²)	ÁREA C. chilensis	16 enero (cm ²)	13 febrero (cm ²)	29 febrero (cm ²)
A1	65	504	542,5	B1	96	414	621
A7	140	450	435	B7	272	1404	2263
A13	120	434	608	B13	126	780	1471,5
D1	221,5	178,5	198	C1	90	650	1014
D5	143	90,25	100	C7	448	1144	875,5
D13	108	208	221	C13	272	800	1353

Gráfico 3: Comparación, en cm^2 , de evolución de cubierta de área de plantas en Círculo de Inclusión Los Maitenes, Puchuncaví.

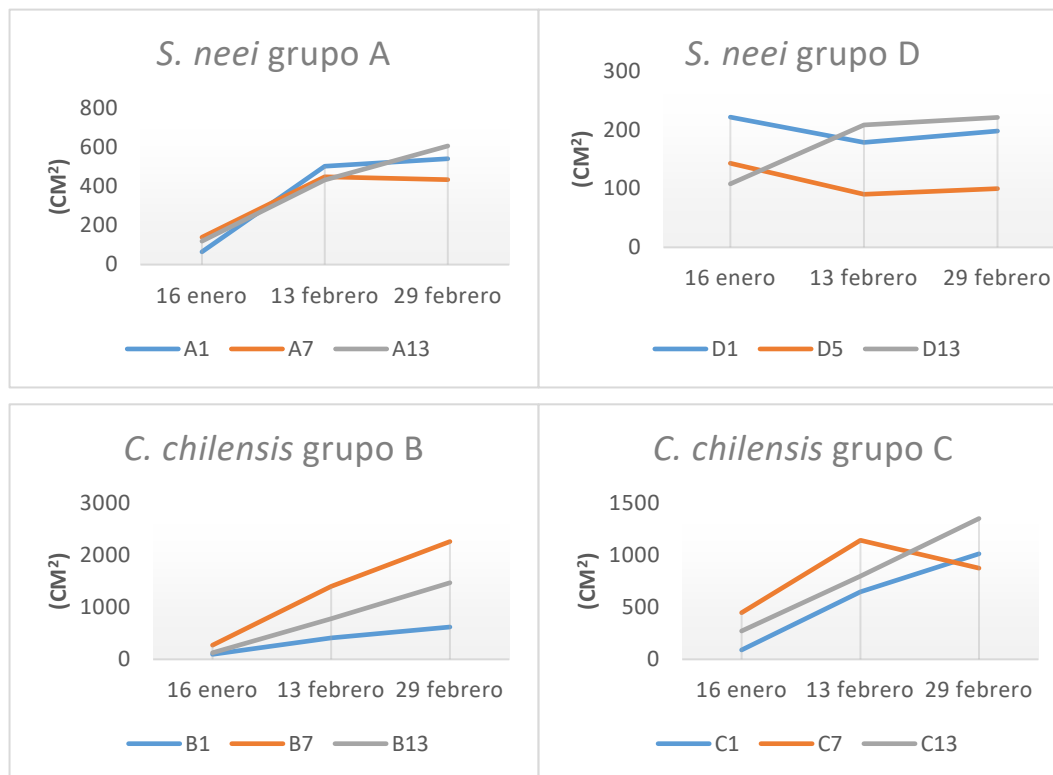


Figura 33: Evidencia fotográfica de cubierta de área de plantas en Círculo de Inclusión Los Maitenes, Puchuncaví.

Pucalán

Tabla 32: Mediciones, en cm², de cubierta de área de plantas en domicilio particular de Pucalán, Puchuncaví.

ÁREA S. neei	30 enero (cm ²)	13 febrero (cm ²)	27 febrero (cm ²)	ÁREA C. chilensis	30 enero (cm ²)	13 febrero (cm ²)	27 febrero (cm ²)
A1	169	304	264	B1	494	850	1955
A7	171	540	558	B5	324	1376	1219
A11	66	910	777	B11	459	576	820
D1	150	702	756	C6	210	870	820
D7	112	588	588	C9	236	1085	1040
D13	290	234	448	C13	361	640	1444

Gráfico 4: Comparación, en cm^2 , de evolución de cubierta de área de plantas en domicilio particular de Pucalán, Puchuncaví.

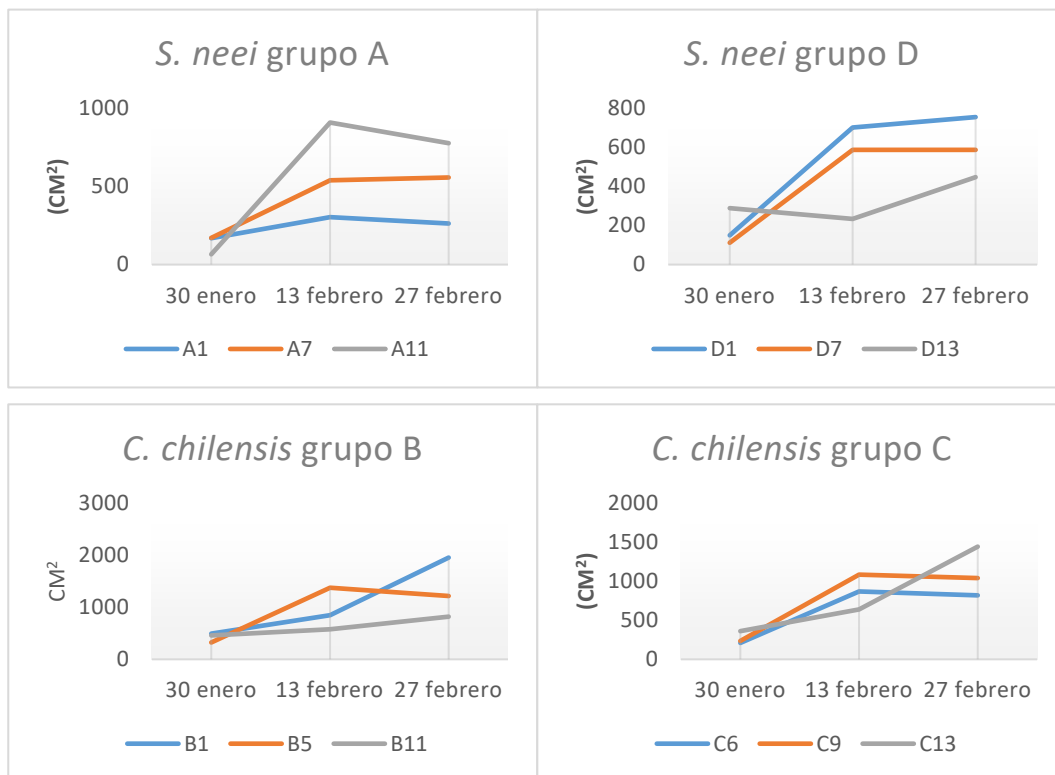




Figura 34: Evidencia fotográfica de cubierta de área de plantas en domicilio particular de Pucalán, Puchuncaví.

5.1.3. Resultados análisis de metales pesados en suelo

Resultados evaluados y obtenidos desde el Laboratorio de análisis de suelo de la PUCV de análisis de contenido de metales pesados en muestras de suelo de las zonas de experimentación.

Tabla 33: Resultados de análisis de metales pesados, en (mg/kg), en muestras de suelo.

Zona	Cu (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	As (mg/kg)
CIQV	72,3	1,60	19,7	3,34
El Rungue	-	-	-	-
Los Maitenes	212	2,00	21,6	10,1
Pucalán	-	-	-	-

5.1.4. Resultados análisis de metales pesados en plantas

Resultados evaluados y recibidos desde el Laboratorio de análisis de suelo de la PUCV de análisis de contenido de metales pesados en zona folicular y radicular de las plantas *S. neei* y *C. chilensis* extraídas de todas las zonas de experimentación. Los siguientes resultados están presentados como valor promedio por área de la planta evaluada, por especie y por el total de la zona de estudio:

CIQV, Valparaíso.

Tabla 34: Promedio de resultados de análisis de metales pesados, en mg/kg, contenidos en plantas del CIQV, Valparaíso.

Zona	Cu (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	As (mg/kg)
$\bar{X}$ S. neei Raíz	37,05	1,08	10,83	0,66
$\bar{X}$ S. neei Aéreo	8,81	2,22	18,60	<0,02
$\bar{X}$ S. neei total	22,93	1,65	14,72	0,33
$\bar{X}$ C. chilensis Raíz	38,65	2,02	24,70	1,37
$\bar{X}$ C. chilensis Aéreo	20,38	2,57	24,93	0,69
$\bar{X}$ C. chilensis total	29,52	2,30	24,81	1,03

El Rungue

Tabla 35: Promedio de resultados de análisis de metales pesados en, mg/kg, contenidos en plantas de El Rungue, Puchuncaví.

Zona	Cu (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	As (mg/kg)
$\bar{X}$ S. neei Raíz	31,85	1,20	2,46	4,53
$\bar{X}$ S. neei Aéreo	17,43	1,70	7,26	0,57
$\bar{X}$ S. neei total	24,64	1,45	4,85	2,55
$\bar{X}$ C. chilensis Raíz	24,35	1,28	4,97	3,29
$\bar{X}$ C. chilensis Aéreo	16,20	2,61	14,35	0,11
$\bar{X}$ C. chilensis total	20,28	1,94	9,66	1,70

Los Maitenes

Tabla 36: Promedio de resultados de análisis de metales pesados, en mg/kg, contenidos en plantas de Los Maitenes, Puchuncaví.

Zona	Cu (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	As (mg/kg)
$\bar{X}$ S. neei Raíz	39,95	0,65	0,19	4,81
$\bar{X}$ S. neei Aéreo	22,15	1,50	8,82	1,06
$\bar{X}$ S. neei total	31,05	1,07	4,48	2,93
$\bar{X}$ C. chilensis Raíz	29,13	1,67	4,60	5,17
$\bar{X}$ C. chilensis Aéreo	22,00	1,74	12,77	1,54
$\bar{X}$ C. chilensis total	25,56	1,71	8,69	3,35

Pucalán

Tabla 37: Promedio de resultados de análisis de metales pesados, en mg/kg, contenidos en plantas de Pucalán, Puchuncaví.

Zona	Cu (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	As (mg/kg)
$\bar{X}$ S. neei Raíz	21,00	0,47	6,34	1,09
$\bar{X}$ S. neei Aéreo	18,63	1,90	8,75	0,71
$\bar{X}$ S. neei total	19,81	1,19	7,52	0,90
$\bar{X}$ C. chilensis Raíz	29,30	1,64	9,87	2,13
$\bar{X}$ C. chilensis Aéreo	12,10	1,68	6,53	0,71
$\bar{X}$ C. chilensis total	20,70	1,66	8,20	1,42

5.1.5. Resultados Factores de Concentración

5.1.5.1. Factor de Bioacumulación (FBC)

Resultados de cálculo de FBC para cada especie en cada zona de experimentación en base a la concentración de metales pesados contenida en la parte

radicular de las plantas y su relación frente a la concentración de metales pesados contenidos en el suelo.

Tabla 38: Resultados cálculo de Factor de Bioconcentración (FBC).

Localidad	Especie	Cu	Cd	Pb	As
CIQV	<i>S. neei</i>	0,512	0,675	0,550	0,198
	<i>C. chilensis</i>	0,535	1,263	1,254	0,410
El Rungue	<i>S. neei</i>	-	-	-	-
	<i>C. chilensis</i>	-	-	-	-
Los Maitenes	<i>S. neei</i>	0,188	0,325	0,009	0,476
	<i>C. chilensis</i>	0,137	0,835	0,213	0,512
Pucalán	<i>S. neei</i>	-	-	-	-
	<i>C. chilensis</i>	-	-	-	-

5.1.5.2. Factor de Traslocación (FT)

Resultados de cálculo de FT para cada especie en cada zona de experimentación en base a la concentración de metales pesados contenida en la parte aérea de las plantas y su relación frente a la concentración de metales pesados en su parte radicular.

Tabla 39: Resultados cálculo Factor de Traslocación.

Localidades	Especie	Cu	Cd	Pb	As
CIQV	S. neei	0,238	2,056	1,717	0,030
	C. chilensis	0,527	1,272	1,009	0,504
El Rungue	S. neei	0,547	1,417	2,951	0,126
	C. chilensis	0,665	2,039	2,887	0,033
Los Maitenes	S. neei	0,554	2,308	46,421	0,220
	C. chilensis	0,755	1,042	2,776	0,298
Pucalán	S. neei	0,887	4,043	1,380	0,651
	C. chilensis	0,413	1,024	0,662	0,333

5.1.6. Resultado análisis estadístico

Resultados descriptivos de análisis estadístico de concentraciones de metales pesados para las muestras foliares de la localidad de Los Maitenes.

Tabla 40: Resultados descriptivos análisis estadístico.

Descriptivas

	Especie	N	Media	Desviación Estándar	Varianza	Mínimo	Máximo
As (mg/kg)	S. neei	4	31.05	10.042	100.8367	23.900	45.30
	C. chilensis	4	25.56	5.083	25.8373	21.900	33.05
Cd (mg/kg)	S. neei	4	1.07	0.124	0.0155	0.990	1.26
	C. chilensis	4	1.71	0.152	0.0230	1.500	1.82
Cu (mg/kg)	S. neei	4	4.50	1.231	1.5146	3.455	5.83
	C. chilensis	4	8.69	1.624	2.6372	6.310	9.98
Pb (mg/kg)	S. neei	4	2.93	1.824	3.3286	0.680	4.55
	C. chilensis	4	3.35	0.757	0.5724	2.305	4.08

Para los resultados de la prueba de normalidad, los valores de p para todos los metales pesados en ambas especies vegetales son mayores que el nivel de insignificancia de 0.05, indicando que no se rechaza la hipótesis nula de que la muestra proviene de una distribución normal. Esto significa que no hay evidencia suficiente para concluir que los datos no son normales.

Tabla 41: Resultados Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk.

Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilk)		
	W	P
As (mg/kg)	0.871	0.156
Cd (mg/kg)	0.944	0.648
Cu (mg/kg)	0.875	0.169
Pb (mg/kg)	0.967	0.870

Nota. Un valor p bajo sugiere una violación del supuesto de normalidad

En la prueba de T de Student para muestras independientes, Los valores de p obtenidos indican que para los metales As y Pb ($p > 0,05$), no se rechaza la hipótesis nula y se resuelve que no hay evidencia suficiente para respaldar una diferencia en los niveles medios de absorción de metales entre las dos especies de plantas, mientras que para los metales de Cd y Cu ($p < 0,05$), se rechaza la hipótesis nula y se resuelve que existe una diferencia estadísticamente significativa en los niveles medios de absorción de metales entre las dos especies de plantas.

Tabla 42: Resultados prueba T de Student.

Prueba T para Muestras Independientes				
		Estadístico	Gl	p
As	T de Student	0.975	6.00	0.367
Cd	T de Student	-6.439	6.00	< .001
Cu	T de Student	-4.109	6.00	0.006
Pb	T de Student	-0.424	6.00	0.686

5.1.7. Comparación de análisis de suelo con normativa internacional

La comparación de resultados obtenidos frente a la normativa ambiental internacional que permite evaluar los parámetros para contaminantes corresponde al promedio de concentración de todas las plantas evaluadas en una zona de estudio, y la normativa ambiental internacional corresponde a los parámetros aplicados a suelos de uso residencial.

Tabla 43: Comparación de resultados de concentración de metal pesado en suelo frente al Background y a la normativa ambiental aplicada de Canadá y Australia.

Metal (mg/kg)	Concentración metales pesados en suelo				Background suelo Puchuncaví	Normativa internacional	
	CIQV	El Rungue	Los Maitenes	Pucalán		Canadá	Australia
As	3,34	-	10,1	-	12,8	12	100
Cd	1,6	-	2	-	0,14	10	20
Cu	72,3	-	212	-	68	63	1000
Pb	19,7	-	21,6	-	18,86	140	300

5.2. Discusión

El presente estudio evaluó el potencial fitorremediador de las especies *S. neei* y *C. chilensis* en suelos contaminados con los metales pesados As, Cd, Cu y Pb. Los resultados sugieren que ambas especies son prometedoras para la fitorremediación, sin embargo, se identifican aspectos relevantes a considerar para su implementación a gran escala.

La alta concentración de Cu evidenciados en el suelo de la localidad de Los Maitenes (212 mg/kg) coincide con los hallazgos de estudios previos en la zona realizados por Meza et. al, lo que confirma la problemática ambiental existente de contaminación del suelo en la comuna. Este nivel de Cu supera los límites

establecidos por la norma canadiense para suelo de uso residencial (63 mg/kg), la cual es más exigente en comparación con la norma australiana. La presencia de Cu en niveles tan altos representa un riesgo potencial para la salud de los habitantes de la zona, especialmente para niños pequeños y mujeres gestantes, quienes componen a los grupos más susceptibles a los efectos adversos de este contaminante.

Los resultados del análisis de suelo en Puchuncaví revelan que no solo los niveles de Cu se encuentran elevados, sino que para el As y Pb también se superan los límites establecidos por la normativa ambiental internacional para suelo de uso residencial y los niveles preexistentes del background del suelo en las tres localidades de la comuna. Esto confirma la grave contaminación por metales pesados que afecta a Puchuncaví, lo que representa un riesgo significativo para la salud de la población y el medio ambiente. Se requieren medidas urgentes de remediación y control de contaminación para reducir los niveles de metales pesados en el suelo y proteger la salud pública.

La sorprendente presencia de metales pesados en la parcela blanco del CIQV, principalmente Cu (72,3 mg/kg), comprende un hallazgo inesperado que requiere mayor investigación. Esta situación podría indicar una contaminación cruzada durante el proceso de análisis en laboratorio o una posible contaminación preexistente en el área donde se encuentra actualmente ubicado el CIQV. Es crucial determinar el origen de esta contaminación para tomar las medidas correctivas necesarias y garantizar la confiabilidad de los análisis futuros.

En su efectividad, ambas especies acumularon cantidades significativas de Cu, Cd y As, demostrando su capacidad para absorber y concentrar estos metales pesados. Las plantas de *S. neei* presentaron mayor acumulación de Cu y Cd, mientras que la especie *C. chilensis* acumuló mayores niveles de As. Esta especificidad indica el potencial de utilizar ambas especies en conjunto para abordar una amplia gama de contaminantes metálicos. Los resultados del análisis estadístico de la prueba de T de Student respaldan el potencial de *S. neei* y *C. chilensis* como especies fitorremediadoras para suelos contaminados con metales pesados, los valores p que proporcionó la prueba varían desde altamente significativos (0,001 y 0,006) hasta no

significativos (0,367 y 0,686). Este patrón indica que algunas comparaciones muestran pruebas sólidas de una diferencia en las concentraciones de metales pesados en ambas especies vegetales, mientras que otras no. Los hallazgos positivos de remediación concuerdan con los resultados presentados por Meza et al. (2018 y 2021), en que analizaron y demostraron que el suelo de Puchuncaví está contaminado por metales pesados y que la especie *S. neei* resulta prometedora para la fitorremediación del suelo en la zona afectada.

Algunas limitaciones del estudio y consideraciones para su implementación a gran escala consideran la duración del experimento, el cual se limitó a un periodo relativamente corto de 3 meses aproximados, cuando se requieren estudios a largo plazo para evaluar la eficacia sostenida de la fitorremediación y la capacidad de las plantas para mantener la acumulación de metales pesados a lo largo del tiempo. Sal et al. (1998) y Zornoza et al. (2009) proponen un periodo mínimo de 5 a 10 años para la fitorremediación de suelo contaminado con Pb y de 7 a 17 años para fitorremediar un suelo contaminado por Cd respectivamente. Por otro lado, las condiciones ambientales del experimento como el clima extremo pueden haber influido en el rendimiento de las plantas, dar mayor importancia a factores como la variación de temperatura, la humedad, la luz solar y la caracterización precisa de la calidad del suelo al diseñar estrategias de fitorremediación a gran escala es crucial para comprender la disponibilidad de metales pesados para las plantas y la efectividad de la fitorremediación. El monitoreo continuo de la concentración de metales pesados en el suelo y en las plantas es esencial para evaluar la eficacia de la fitorremediación y realizar ajustes en la estrategia de tratamiento si es necesario, además, el combinar la fitorremediación con otras técnicas de remediación puede acelerar significativamente la limpieza del suelo. Se debe considerar que la eficiencia de la fitorremediación del suelo no depende únicamente de la planta y el tiempo mínimo de experimentación, factores como el tipo de contaminante, la concentración inicial del mismo, las características del suelo y las condiciones ambientales pueden generar variaciones considerables en los resultados esperados de la remediación. La biodegradabilidad y la movilidad del contaminante en el suelo son factores claves que determinan el tiempo necesario para su eliminación, una mayor concentración inicial

del contaminante generalmente requiere un tiempo de fitorremediación más prolongado, mientras que la textura, la estructura, el pH y la capacidad de retención de agua del suelo influyen también en la disponibilidad del contaminante para las plantas y en la actividad microbiana.

La propuesta del taller estructurado en base a la metodología ABP resulta relevante para fomentar el aprendizaje significativo permitiendo a los estudiantes construir su propio conocimiento a través de la investigación, el análisis y la resolución de problemas reales relacionados con la fitorremediación, lo que a su vez les permitirá desarrollar habilidades esenciales de trabajo en equipo y comunicación efectiva que les serán útiles para abordar problemáticas ambientales existentes en el entorno.

La consideración de las variables del suelo, las condiciones ambientales y el monitoreo continuo son cruciales para el éxito de la fitorremediación, y la combinación de esta técnica de remediación con otras metodologías similares en su análisis de costo-beneficio resultan ser la mejor opción para la remediación del suelo en las localidades mayormente afectadas ambiental y socialmente de la comuna de Puchuncaví. La fitorremediación, como técnica sostenible y amigable con el medio ambiente, puede ser una herramienta valiosa para la recuperación de suelos contaminados y la restauración de ecosistemas degradados, sin embargo, su implementación a gran escala requiere una investigación profunda y un enfoque integral que considere las variables anteriormente mencionadas.

5.3. Conclusión

La problemática de la contaminación presente en las localidades de Quintero – Puchuncaví producto, principalmente, de las industrias y empresas presentes en el CIV desde hace 60 años, la dificultad de aplicación y regulación de los PPDA vigentes en la “Zona de Sacrificio” y la falta total de una normativa ambiental aplicable a la matriz suelo que permita evaluar los componentes contaminantes específicos en cuestión, corresponden a los principales agentes que originan la problemática de la contaminación del suelo por metales pesados en la región y su biomagnificación, contaminantes que no se degradan por sí mismos y solo se bioacumulan en los seres

vivos a través de la cadena trófica de animales y personas. La importancia de abordar esta problemática desde el aspecto social, mediante técnicas de remediación fácilmente comprensibles y replicables en la comunidad, permite impactar positivamente en el desarrollo y crecimiento agrícola de la zona partiendo por los agentes principalmente afectados.

En este experimento de fitorremediación, se investigó la capacidad de las especies *S. neei* y *C. chilensis* para eliminar los contaminantes de As, Cd, Cu y Pb contenidos en el suelo de las localidades de Puchuncaví. El experimento se llevó a cabo durante 4 meses contemplando sus etapas de construcción, plantación y extracción, en un sitio contaminado con metales pesados. Se comparó el crecimiento de las plantas y la concentración de los metales pesados evaluados en el suelo de las localidades de Puchuncaví frente al punto de control “Blanco” en el CIQV de Valparaíso, para evaluar la efectividad de la fitorremediación. También se evaluó, frente a normativa ambiental aplicable de orden internacional, el grado de contaminación del suelo por los metales pesados evaluados en este proyecto.

Las plantas *S. neei* y *C. chilensis*, al ser altamente resistentes a entornos no ideales, además de formar parte natural del entorno salino, se adaptaron fácilmente a las condiciones ambientales disponibles de cada localidad en la que fueron plantadas, mostraron un crecimiento evidente y positivo durante el experimento. En la localidad de Pucalán, zona con mayor nivel de materia orgánica disponible, las plantas sobrevivieron en su totalidad y se adaptaron muy bien a las condiciones ambientales, el crecimiento y cubierta de área es evidente a través de los datos medidos y registros fotográficos del monitoreo. En la localidad de El Rungue, las plantas evidenciaron también un desarrollo y crecimiento favorable, a pesar de agentes externos como la intervención de animales domésticos que afectaron a algunas de ellas. En la localidad de Los Maitenes, sin embargo, se presentó un desarrollo lento en comparación a las otras localidades de Puchuncaví; las plantas en general presentaron un crecimiento y cubierta de área notoria, pero el avance y desarrollo de las mismas fue lento y dificultoso debido a las condiciones del suelo y el entorno. En el Blanco ubicado en el CIQV de Valparaíso, las plantas se adaptaron de igual manera presentando un desarrollo y cubierta de área notoria; sin embargo,

no fue el resultado esperado considerando que la zona se encontraba sin intervención de contaminantes previos. La metodología de plantación acodo y en grupo de plantas cercanas, permitió un crecimiento y desarrollo esperado en la especie *C. chilensis*, evidenciando una gran cubierta de área y un desarrollo similar al observado su entorno natural. *C. chilensis* resulta ser una planta fácilmente tratable y de gran adaptabilidad a entornos dificultosos o intervenidos.

Respecto de los resultados obtenidos del análisis de concentración de metales pesados, las muestras de suelo evidencian un alto nivel de Cu en la localidad de Los Maitenes, 212 mg/kg, correspondiendo a valores estudiados por autores en proyectos anteriores realizados en la zona. Sorprendentemente, el Blanco en el CIQV también demostró una alta presencia de metales pesados en el suelo, principalmente Cu en una cantidad de 72,3 mg/kg. En comparación a la normativa ambiental internacional aplicada que establece los parámetros permitidos para metales pesados en suelo de uso residencial, se sobrepasan únicamente los niveles de Cu permitidos en la norma canadiense, la cual resulta ser la norma más exigente en comparación a la australiana. La norma canadiense establece un nivel máximo permitido de Cu de 63 mg/kg y la australiana de 1000 mg/kg, mientras que los resultados de Cu obtenidos de los análisis de suelo en Puchuncaví varían por sobre los 200 mg/kg. En comparación al background del suelo en Puchuncaví, se sobrepasa nuevamente los niveles de Cu, As y Pb para todas las localidades de la comuna en cuestión.

Los resultados obtenidos de la fitorremediación, evidencian que las plantas son capaces de remediar, absorbiendo y traslocando los metales pesados en su parte radicular y aérea, aunque no en los niveles esperados. Según su concentración de metal en la parte aérea, ninguna planta resulta ser hiperacumuladora dado que en ningún caso de absorben más de 100 mg/kg de metal pesado, aunque la especie *S. neei* evidencia alta preferencia por absorber el Cu del suelo, y en algunos casos, el Pb. Según el valor obtenido de FBC, las plantas resultan ser generalmente excluyentes; sin embargo, la especie *C. chilensis* evidencia una preferencia por acumular Cd y Pb. Según los valores obtenidos de FT, ambas especies resultan ser altamente eficientes en trasladar los metales pesados desde la raíz a su parte aérea, principalmente el Pb y Cd, para un periodo de muestreo aproximado de 3 meses.

El diseño y la planificación del taller estructurado en base a la metodología del Aprendizaje Basado en Proyectos con el objetivo de generar aprendizaje significativo en temáticas de fitorremediación y potencial capacidad remediadora de las especies *S. neei* y *C. chilensis*, indica la obtención de resultados positivos en la adquisición de competencias y el aprendizaje significativo del grupo de estudiantes. Al ser una actividad estructura en base al ABP y considerando que el taller se encuentra centrado en un problema auténtico y relevante para las comunidades de Puchuncaví, se asegura que promueve el trabajo colaborativo y la interacción entre pares, que proporciona a los estudiantes la oportunidad de investigar, analizar y sintetizar información relevante en el contexto socioambiental actual y fomenta el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico y la resolución de problemas permitiendo al grupo avanzado aplicar sus conocimientos previos y adquiridos a situaciones reales.

BIBLIOGRAFÍA

Abella, V. Ausín, V., Delgado, V., Casado, R. (2020). Aprendizaje basado en proyectos y estrategias de evaluación formativas: Percepción de los estudiantes universitarios. *Revista Iberoamericana de Evaluación Educativa*, 13(1) ,93-110. <https://doi.org/10.15366/riee2020.13.1.004>

Alloway, B. J. (2013). Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. Springer Science & Business Media.

Alloway, B. J. (2013). Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (3rd ed.). Springer.

Alloway, B. J. (2013). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. Springer.

Alonso-Vargas, M.; Crespo, MB Notas taxonómicas y de nomenclatura sobre taxones sudamericanos de Sarcocornia (Chenopodiaceae). *Ana. Bot. Fenn.* 2008, 45, 241–254.

Altamirano Galván, S. G., Méndez Ramírez, A. L., & Rojas Galindo, M. B. (2022). Beneficios del uso de la rúbrica en la enseñanza-aprendizaje del diseño. *Zincografía*, 6(11), 228-244.

Atlas, R. M., & Hazen, T. C. (2011). "Oil biodegradation and bioremediation: A tale of the two worst spills in U.S. history." *Environmental Science & Technology*, 45(16), 6709-6715.

Audet, P., & Charest, C. (2007). Heavy metal phytoremediation from a meta-analytical perspective. *Environmental Pollution*, 147(1), 231-237. doi: 10.1016/j.envpol.2006.08.011

Ausubel, D. (1983). Teoría del aprendizaje significativo. Fascículos de CEIF, 1-10.

Baird, C. (1999). Environmental chemistry (2nd ed.). W. H. Freeman and Company.

Baker, A. J. M. (1981). Accumulators and excluders: Strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*, 3(1-4), 643-654.

Bellinger, D. C. (2008). Lead neurotoxicity and socioeconomic status: Conceptual and analytical issues. *Neurotoxicology*, 29(5), 828-832.

Bernard, A. (2004). Renal dysfunction induced by cadmium: Biomarkers of critical effects. *Biometals*, 17(5), 519-523.

Blank, W. (1997). Authentic instruction. In W. E. Blank & S. Harwell (Eds.), *Promising practices for connecting high school to the real world* (pp. 15-21). Tampa, FL: University of South Florida. (ERIC Document Reproduction Service No. ED407586)

Breckle, S. (1991). Growth under stress: Heavy metals. In Y. Waisel, A. Eshel, & V. Kafkafi (Eds.), *Plant roots: the hidden half* (pp. 351-373). Marcel Dekker, Inc.

Brewer, G. J. (2010). Copper excess, zinc deficiency, and cognition loss in Alzheimer's disease. *BioFactors*, 36(2), 136-142.

Brown, S. L., Chaney, R. L., Angle, J. S., & Baker, A. M. (1995). Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown in nutrient solution. *Soil Science Society of America Journal*, 59(1), 125-133.

Campoy, J. G., Acosta, A. T., Affre, L., Barreiro, R., Brundu, G., Buisson, E., ... & Fagúndez, J. (2018). Monografías de plantas invasoras en Europa: *Carpobrotus*. *Cartas de Botánica*, 165(3-4), 440-475.

CEPA, CEPA (2007). Directrices canadienses de calidad del suelo para la protección de la salud humana y ambiental. Quebec, Canadá: Oficina Nacional de Normas y Directrices.

Cervantes, G. (1988). Cuantificación de microelementos y metales presentes en el suelo de chinampas en Xochimilco. San Luis T Y Mixqic [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].

Cervellini, P., & Angeletti, S. (2016). Sarcocornia: la vedette dentro del mundo vegetal. *Haciendo CyT*, 3(14-17).

Chen, Y., Wu, F., Graziano, J. H., & Parvez, F. (2019). Arsenic exposure from drinking water and mortality from cardiovascular disease in Bangladesh: A prospective cohort study. *BMJ Open*, 9(4).

Chiban, M., Soudani, A., Sinan, F., & Persin, M. (2011). Adsorción simple, binaria y multicomponente de algunos aniones y metales pesados en la planta *Carpobrotus edulis* respetuosa con el medio ambiente. *Journal of Hazardous Materials*, 187(1-3), 275-283.

Clemens, S. (2001). Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. *Planta*, 212(4), 475-486. doi: 10.1007/s004250000458

Clemens, S., et al. (2013). Arsenic tolerance in *Arabidopsis* is mediated by two ABC-type phytochelatin transporters. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(46), 21187-21192.

Codex Alimentarius Commission. (2015). Norma general para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos. CODEX STAN 193-1995.

Conesa, H., García, G., Faz, A., Arnaldos, R. (2007). Dynamics of metal tolerant plant communities' development in mine tailings from the Cartagena-La Unión Mining District (SE Spain) and their interest for further revegetation purposes. *Chemosphere*, 68 (6): 1180-1185.

Cunningham, S. D., Berti, W. R., & Huang, J. W. (1995). Phytoremediation of contaminated soils. *Trends in Biotechnology*, 13(9), 393-397.

Cuypers, A., Smeets, K., Ruytinx, J., Opdenakker, K., Keunen, E., Remans, T., Horemans, N., Vanhoudt, N., Van Sanden, S., Van Belleghem, F., Guisez, Y., Colpaert, J., & Vangronsveld, J. (2016). The cellular redox state as a modulator in cadmium and copper responses in *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Journal of Plant Physiology*, 168(4), 309-316. doi: 10.1016/j.jplph.2010.07.

Department of Environment and Conservation. (2010). Assessment levels for Soil, Sediment and Water (Cuarta ed.). The Government of Western Australia, 1-56.

Dickinson, K.P., Soukamneuth, S., Yu, H.C., Kimball, M., D'Amico, R., Perry, R., et al. (1998). Providing educational services in the Summer Youth Employment and Training Program [Technical assistance guide]. Washington, DC: U.S. Department of Labor, Office of Policy & Research.

Eide, E. M., Carroll, A. T., & Krznicki, E. G. (2001). Factors affecting metal accumulation by wetland plants. In R. R. Brooks, D. A. Thomas, & S. J. McLellan (Eds.), *Plants and Pollution* (pp. 357-377). Blackwell Science.

Estuaria, M. A. (2016). Aprendizaje basado en proyectos: Una estrategia para el desarrollo de competencias en el siglo XXI. *Revista de Investigación Educativa*, 34(2), 295-314.

Figueroa, E., Jiménez-Nieva, J., Carranza, J., & González, C. (1987). Distribución y nutrición mineral de *Salicornia ramosissima* J. Woods, *Salicornia europaea* L., y *Salicornia dolichostachya* Moss, en el estuario de los ríos Odiel y Tinto (Huelva, SO España). *Limnetica*, 3(2), 307-310.

Gaitán, A., Galindo, P., Pedrera, A., & Pérez, L. (n.d.). Agricultura ecológica [Unidad didáctica 4]. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, Consejería de Agricultura y Pesca. Unión Europea. Recuperado de

Galán, E., & Romero, A. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Macla*, 10, 48-60.

Galán, H. E., & Romero, B. A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. [En línea].

Galeana, L. (2006). Aprendizaje basado en proyectos. *Revista Ceupromed*, 1(27), 1-17.

Gill, S. S., Gill, R., Trivedi, D. K., Anjum, N. A., Sharma, K. K., Ansari, M. W., ... & Tuteja, N. (2016). *Piriformospora indica*: potential and significance in plant stress tolerance. *Frontiers in microbiology*, 7, 332.

González, S. (1986). Edta en suelos del Valle Aconcagua. *Agricultura Técnica (Chile)*, 46(3), 323-327.

Guerra Sierra BE, Muñoz Guerrero J, Sokolski S. Fitorremediación de metales pesados en suelos tropicales: una visión general. *Sustainability* . 2021; 13(5):2574.

Guha Mazumder, D. N. (2005). Chronic arsenic toxicity: Clinical features, epidemiology, and treatment. In *Handbook of Arsenic Toxicology* (pp. 367-393).

Gulson, B. L., Mizon, K. J., Korsch, M. J., & Howarth, D. (1996). Non-orebody sources are significant contributors to blood lead of some children with low to moderate lead exposure in a major mining community. *Science of the Total Environment*, 181, 223-230.

Gupta, A., Rosenman, K. D., & Gardiner, J. C. (1997). "Copper toxicity." *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 39(12), 1116-1122.

Harwell, S. (1997). Project-based learning. In W.E. Blank & S. Harwell (Eds.), *Promising practices for connecting high school to the real world* (pp. 23–28). Tampa, FL: University of South Florida.

Instituto Nacional de Estadística (INE). (2017). Resultados Definitivos - Censo 2017 - Población y Vivienda.

Instituto Nacional de Normalización (2004). Lodos, Requisitos y condiciones para un plan de aplicación en suelos (Norma Chilena N°2952). Santiago, Chile: Autor.

Instituto Nacional de Normalización (INN). (2004). Norma NCh 2952/04: Uso de lodos [Norma chilena].

International Agency for Research on Cancer (IARC). (2012). Arsenic and arsenic compounds. In IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans (Vol. 100C, pp. 41-93). World Health Organization

Kabata-Pendias, A. (2010). Trace Elements in Soils and Plants (4th ed.). CRC Press.

KAS Ingeniería. (2009). Análisis General del Impacto Económico y Social de una norma de Emisión para Termoeléctricas. Informe Final. Geo Aire. Preparado para el Gobierno de Chile.

Khan, S., Cao, Q., Zheng, Y. M., Huang, Y. Z., & Zhu, Y. G. (2000). Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. *Environmental Pollution*, 152(3), 686-692.

Khan, S., Cao, Q., Zheng, Y. M., Huang, Y. Z., & Zhu, Y. G. (2000). Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. *Environmental Pollution*, 152(3), 686-692.

Knox, A., Gerner, A., Adriano, D., Kolka, R., Kaplan, D. (1999). Sources and practices contributing to soil contamination. In: *Bioremediation of Contaminated Soils*, DC Adriano, J.-M. Bollag, WT Frankenberger, Jr., and RC Sims Eds.

Komárek, M., Chrastný, V., & Stíchová, J. (2007). Metal/metalloid contamination and isotopic composition of lead in edible mushrooms and forest soils originating from a smelting area. *Environment international*, 33, 677-684.

Lamhamdi, A., Ghalit, M., Gharibi, E., Anaflous, A., Elyounsi, K., Essaki, F., ... & Zarrouk, A. (2015). Physico-chemical and bacteriological study of water from a few sources in al hoceima region–Morocco. *Pharm. Lett*, 7, 195-202.

Luo, L., Ma, Y., Zhang, S., Wei, D., Zhu, Y. G., & An, S. (2019). Heavy metal contamination in soils and vegetables near an e-waste processing site, South China. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 1035-1042.

Lutts, S.; Lefèvre, I. ¿Cómo podemos aprovechar las propiedades halófitas para hacer frente a la toxicidad de los metales pesados en las zonas afectadas por la sal? *Ana. Bot.* 2015, 115, 509–528.

Mackova, M., Chytranova, M., Tlustoš, P., & Zaliberova, M. (2000). Phytoremediation of heavy metals polluted soils: Effect of selected plant species. *Ekologia (Bratislava)*, 19(2), 183-189.

Maksymiec, W. (2007). Signaling responses in plants to heavy metal stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 29(3), 177-187. doi: 10.1007/s11738-007-0036-3

McBride, M. B. (2003). *Environmental chemistry of soils*. Oxford University Press..

Medjimurec, N. G. (2014). *Handbook of research on advancements in environmental engineering*. IGI Global.

Meharg, A. A., et al. (2013). Arsenic and old plants: Arsenic species in terrestrial plants and lichen.

Mermo, I. (2003) Heavy metals in the context of EU policies on soil and waste. European Comission, DG Environment.

Meza, V., Lillo, C., Rivera, D., Soto, E., & Figueroa, R. (2018). *Sarcocornia neei* as an indicator of environmental pollution: A comparative study in coastal wetlands of central Chile. *Plants*, 7(3), 1-9.

Meza-Ramírez, V., Espinoza-Ortiz, X., Ramírez-Verdugo, P., Hernández-Lazcano, P., & Rojas Hermosilla, P. (2021). Suelo contaminado con Pb de Quintero-Ventanas, Chile: Remediación utilizando *Sarcocornia neei*. *The Scientific World Journal*, 2021, 2974786, 17 páginas.

Ministerio del Medio Ambiente. (2017). Quintero Puchuncaví: PROGRAMA PARA LA RECUPERACIÓN AMBIENTAL Y SOCIAL. Quintero y Puchuncaví, Programa para la recuperación social y ambiental. De: <https://pras.mma.gob.cl/>

Ministerio del Medio Ambiente. (2020, junio). Plan para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví. PPDA/MMA.

Mishra, S., et al. (2017). Phytotoxicity of cadmium: Physiological mechanisms and remediation strategies.

Mitsch et al. Al, 2000 Mitsch, WJ; Gosselink, JG El valor de los humedales: Paisajes y perspectivas institucionales. *Ecol. Economía* 2000, 35, 25–33.

Mulligan, C., & Bronstein, A. C. (2017). Wilson's Disease: An Overview and Approach to Management. In *StatPearls* [Internet]. StatPearls Publishing.

Municipalidad de Puchuncaví. (2009). Plan de Desarrollo Comunal. Puchuncaví, Chile: Autor.

Muñoz, O., Bastias, J. M., Araya, M., Morales, A., Pizarro, F., & Orellana, C. et al. (2011). "Copper as a risk factor for noncirrhotic portal hypertension: An epidemiological study." *Liver International*, 31(5), 722-728.

Navarrete-Arttime, C., & Belver Domínguez, J. L. (2022). Evaluar con Rúbricas. Una Propuesta Exitosa dentro del ABP. *Revista Iberoamericana De Evaluación Educativa*, 15(1).
<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/10864822221102944>

Navas-Acien, A., Guallar, E., Silbergeld, E. K., & Rothenberg, S. J. (2009). Lead exposure and cardiovascular disease—a systematic review. *Environmental Health Perspectives*, 115(3), 472-482.

Nawrot, T., Plusquin, M., Hogervorst, J., Roels, H. A., Celis, H., Thijs, L., ... & Staessen, J. A. (2010). Environmental exposure to cadmium and risk of cancer: A prospective population-based study. *The Lancet Oncology*, 11(12), 1160-1168.

Nawrot, T., Plusquin, M., Hogervorst, J., Roels, H. A., Celis, H., Thijs, L., & Staessen, J. A. (2010). Environmental exposure to cadmium and risk of cancer: A prospective population-based study. *The Lancet Oncology*, 11(12), 1160-1168.

Needleman, H. L. (2004). Lead poisoning. *Annual Review of Medicine*, 55, 209-222.

Paredes-Curin, Carlos Rodolfo. (2016). Aprendizaje basado en problemas (ABP): Una estrategia de enseñanza de la educación ambiental, en estudiantes de un liceo municipal de Cañete. *Revista Electrónica Educare*, 20(1), 119-144.

Parvez, F., Wasserman, G. A., Factor-Litvak, P., Liu, X., Slavkovich, V., Siddique, A. B., et al. (2013). Arsenic exposure and motor function among children in Bangladesh. *Environmental Health Perspectives*, 121(1), 110-114.

PGS SPA. (2015). Muestreo de suelos para las comunas de Quintero y Puchuncaví, región de Valparaíso. Santiago, Ministerio del Medio Ambiente. 1-116. Obtenido de:

Potters, G., Horemans, N., & Jansen, M. A. K. (2004). The cellular redox state in plant stress biology – A charging concept. *Plant Physiology and Biochemistry*, 42(5), 292-300. doi: 10.1016/j.plaphy.2003.12.008

Pourrut, B., Shahid, M., Douay, F., Dumat, C., & Pinelli, E. (2013). Lead uptake, toxicity, and detoxification in plants. In M. Whitacre (Ed.), *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* (Vol. 213, pp. 113-136). Springer. doi: 10.1007/978-1-4419-9860-6_6

Redalyc. (2019). Aprendizaje basado en proyectos: Una experiencia de innovación docente. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 21(2), 1-16.

Riquelme, Javiera, Olaeta, José Antonio, Gálvez, Lena, Undurraga, Pedro, Fuentealba, Claudia, Osses, Andrea, Orellana, Jaime, Gallardo, José, & Pedreschi, Romina. (2016). Caracterización nutricional y funcional de *Sarcocornia neri* silvestre y cultivada en Chile. *Ciencia e investigación agraria*, 43 (2), 283-293.

Rittmann B. E. (2006). Microbial ecology to manage processes in environmental biotechnology. *Trends in biotechnology*, 24(6), 261–266.

Rodríguez Heredia, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. *MEDISAN*, 21(12).

Rodríguez-Liévana, JA, Mingorance, MD, & Peña, A. (2011). Sorción de pesticidas hidrofóbicos en un suelo mediterráneo afectado por aguas residuales, materia orgánica disuelta y sales. *Revista de Gestión Ambiental*, 92(3), 650-654.

Rojas Barrera, G. (2017). Historia ambiental de la generación termoeléctrica en Ventanas: La producción ecológica de la compensación económica. Universidad de Chile.

Sadzawka R., A., M.A. Carrasco R., R. Grez Z., M.L. Mora G., H. Flores P. y A. Nearnan. 2006. Métodos de análisis de recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Actas INIA Nº 34, Santiago, Chile, 164p.

Salazar, N. (2022). Artículo “Más allá de Codelco Ventanas: las otras 10 empresas contaminantes de Quintero Puchuncaví”. En *Medio Ambiente*, Resumen.

Salinitro, M., Tassoni, A., Casolari, S., de Laurentiis, F., Zappi, A., & Melucci, D. (2019). Potencial de bioindicación de metales pesados de las malezas comunes *Senecio vulgaris* L., *Polygonum aviculare* L. y *Poa annua* L. *Moléculas*, 24(15),

Salt, D. E., Blaylock, M., Kumar, N. P. B. A., Dushenkov, V., Ensley, B. D., Chet, I., & Raskin, I. (1995). Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotechnology*, 13(5), 468-474.

Saravia Ramos, P., Armingol Jaime, K., & Garland Castro, B. (2016). El derrame de petróleo en Quintero, V región de Chile. Una mirada desde las organizaciones sociales. *Población & Sociedad*, 23 (2), 179-206.

Scheiber, I., Dringen, R., Mercer, J. F., & Glover, T. W. (2014). Copper: Effects of deficiency and overload. *Metallomics*, 6(7), 1103-1115.

Schützendübel, A., et al. (2002). Heavy metal-induced oxidative stress in plants: Impact on growth, stress tolerance and biofortification

Schutzendubel, A., Polle, A. (2002). Respuestas de las plantas al estrés abiótico: estrés oxidativo inducido por metales pesados y protección por micorrización. *Journal of Experimental Botany*. Volumen 53, número 472. 1351-1365.

Seoanez, G. 1999. Contaminación de suelo: Estudios y tratamientos y gestión. Ediciones Mundi-Prensa, España. 1-335 pp.

Sepúlveda, B., Tapia, M., Tapia, P., Milla, F. y Pavez, O. (2020). Bioabsorción de metales pesados y estabilización del suelo por *Sarcocornia neri* a partir de suelos experimentales que contienen relaves de minas. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 36, 567-575.

Sepúlveda, B.A., Pavez O., Tapia M. (2013). Uso de la *Salicornia* sp. en la fitorremediación de relaves. XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extractiva & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology, Goiânia.

Sharma, P. et al. (2010). Interactive effect of lead and copper on physiological, biochemical and yield attributes in *Triticum aestivum* cultivars.

Sharma, S. S., et al. (2012). Interactive effect of cadmium and zinc on growth, photosynthesis and oxidative defense system of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings.

Sheoran, N., Sheoran, S., & Verma, M. P. (2009). Phytoremediation of heavy metals: A review of mechanisms, environmental factors, and potential applications. *Environmental Science & Technology*, 43(9), 3300-3312.

Sotes, G. J., Cavieres, L. A., & Rodríguez, R. (2015). *Carpobrotus edulis* (L.) NE Br. (Aizoaceae) y su presencia en la flora de Chile. *Gayana. Botánica*, 72(1), 149-151.

Sundaray, S. K., Nayak, B. B., Lin, S., & Bhatta, D. (2009). "Marine pollution: Sources, fate and effects of pollutants in coastal ecosystems." *Environmental Chemistry Letters*, 7(3), 191-226.

Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. A. (1993). Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues. McGraw-Hill, Inc.

Tellez-Plaza, M., Navas-Acien, A., Menke, A., Crainiceanu, C. M., Pastor-Barriuso, R., & Guallar, E. (2013). "Cadmium exposure and all-cause and cardiovascular mortality in the U.S. general population." *Environmental Health Perspectives*, 121(10), 1017-1022.

Tironi, M. (2014). Hacia una Política Atmosférica: Químicos, Afectos y Cuidado en Puchuncaví. *Revista Pléyade*, (16), 165-189.

U.S. Department of Agriculture (USDA) Natural Resources Conservation Service. Web Soil Survey.

Vaziri, N. D., Gonick, H. C., & Gonick, H. C. (2008). Cardiovascular effects of lead exposure. *Indian Journal of Medical Research*, 128(4), 426-435.

Verbruggen, N., Hermans, C., & Schat, H. (2009). Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. *New phytologist*, 181(4), 759-776.

Wang, J., Li, X., Wu, Z., Wang, G., & Liu, X. (2009). Phytoremediation of heavy metal contaminated soils: Effects of EDTA and citric acid on lead bioavailability and maize growth. *Journal of Environmental Science*, 21(3), 326-332.

Yruela, I. (2009). Cobre en plantas: adquisición, transporte e interacciones. *Biología Funcional de Plantas*, 36 (5), 409-430.

Zagal, P. A., & Sadzawka, A. (2007). Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos. Universidad de Concepción. Servicio Agrícola y Ganadero: Santiago, Chile.

Zhang, C., Sale, PW, Doronila, AI, Clark, GJ, Livesay, C. y Tang, C. (2014). La especie de planta nativa australiana "Carpobrotus rossii (Haw.) Schwantes muestra el potencial de la fitorremediación del cadmio. *Investigación sobre ciencias ambientales y contaminación*, 21, 9843-9851. *Coloides y Superficies B: Biointerfaces*, 82 (2), 267-276.

Zimicz, N. (2016). The role of technology in the development of second language writing skills. *The Writing Instructor*, 16(1), 1-17.

ANEXOS

5.4. Resultados monitoreo parámetros físico-químicos

5.4.1. CIQV

Fecha: 02-02-2024

Grupo	N° planta diagonal	N° de planta real	Propiedades físicas							Propiedades termodinámicas			
			Largo área cubierta (cm)	Ancho área cubierta (cm)	Altura (cm)	Grosor (cm)	Área (cm ²)	Turgencia	Vigor	Humedad ambiental (%)	Humedad del suelo (%)	Temperatura del suelo (°C)	pH
A	<i>S. neei</i>	1	23	16	20	0,25	368	1	2	45,8	54	29,5	
	<i>S. neei</i>	5	29,5	20	14,5	0,28	590	3	2	45,5	87	25,9	
	<i>S. neei</i>	13	25	20	24,5	0,25	500	4	4	49,8	33	23,4	
D	<i>S. neei</i>	1	29	15	28	0,26	435	2	3	39,2	70	33,7	6,24
	<i>S. neei</i>	7	23	22	23	0,25	506	1	3	31,9	87	42,5	6,36
	<i>S. neei</i>	12	38	23	21	0,17	874	2	1	42	45,5	33,7	6,37
B	<i>C. chilensis</i>	1	37	25	15,5	1,2	925	4	4	49,7	92	29,9	6,84
	<i>C. chilensis</i>	7	58	36	18	1	2088	4	4	55,5	90	41,5	6,74
	<i>C. chilensis</i>	13	40,5	25	14	1,6	1012,5	4	4	50	90	43,6	6,73
C	<i>C. chilensis</i>	1	48	28	14	1,6	1344	3	4	29,4	31	30,3	5,94
	<i>C. chilensis</i>	7	25	28	18	1	700	4	4	31,9	40	42,9	6,04
	<i>C. chilensis</i>	13	39	20	14	0,8	780	4	4	34,9	30	39,2	6,81

Fecha: 16-02-2024

Grupo	Especie	N° de planta real	Propiedades físicas							Propiedades termodinámicas			
			Largo área cubierta (cm)	Ancho área cubierta (cm)	Altura (cm)	Grosor (cm)	Área (cm ²)	Turgencia	Vigor	Humedad ambiental (%)	Humedad del suelo (%)	Temperatura del suelo (°C)	pH
A	<i>S. neei</i>	1	25,5	12	12,8	0,4	306	3	2	59,1	77	25	
	<i>S. neei</i>	5	22	20,5	15,5	0,35	451	4	4	66,3	75	22,6	
	<i>S. neei</i>	13	23,5	13,5	24	0,25	317,25	4	3	67,3	30	24,4	
D	<i>S. neei</i>	1	23	16	29	0,4	368	3	4	54,4	66	26,9	
	<i>S. neei</i>	7	27,5	18	28	0,35	495	4	4	55,3	78	26,2	
	<i>S. neei</i>	12	37,5	22,5	14,3	0,32	843,75	3	3	55,3	90	26,4	
B	<i>C. chilensis</i>	1	32,5	23,5	17	2	763,75	3	3	52,6	90	26,4	
	<i>C. chilensis</i>	7	50,5	33	20,3	1,8	1666,5	4	4	59,6	70	25,7	
	<i>C. chilensis</i>	13	57	33,5	14,5	1,6	1909,5	4	4	77	62,2	22,6	
C	<i>C. chilensis</i>	1	64	32	23	1,8	2048	4	4	70,3	53	21,9	
	<i>C. chilensis</i>	7	47	41	15	2	1927	4	4	53,8	59	22,2	
	<i>C. chilensis</i>	13	58	24,5	16	2,1	1421	4	4	64	58	22,1	

5.4.2. El Rungue

Fecha 19-01-2024

Grupo	Especie	N° planta	Propiedades físicas								Propiedades termodinámicas			
			Largo área cubierta (cm)	Ancho área cubierta (cm)	Altura (cm)	Grosor (cm)	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Turgencia	Vigor	Humedad ambiental (%)	Humedad del suelo (%)	Temperatura del suelo (°C)	pH
A	<i>S. neei</i>	4	16	13	16	0,14	208	3328	1	2	36,4	89	35	5,96
	<i>S. neei</i>	10	13,6	13	14	0,17	176,8	2475,2	1	2	36,4	89	35	5,96
	<i>S. neei</i>	13	16	14	18	0,2	224	4032	3	3	36,4	89	35	5,96
D	<i>S. neei</i>	1	11	7	9	0,2	77	693	2	3	36,4	89	33,2	5,96
	<i>S. neei</i>	7	11	6	9	0,21	66	594	2	2	36,4	89	33,2	5,96
	<i>S. neei</i>	13	10	8	11	0,18	80	880	2	3	36,4	89	33,2	5,96
B	<i>C. chilensis</i>	1	25	16,5	8	0,8	412,5	3300	2	3	52,5	80	30,7	6,34
	<i>C. chilensis</i>	7	16	15	14	0,7	240	3360	4	3	52,5	80	30,7	6,34
	<i>C. chilensis</i>	13	13	10	11	1,3	130	1430	4	3	52,5	80	30,7	6,34
C	<i>C. chilensis</i>	1	14,5	11	10	1	159,5	1595	2	2	50	78	35,6	6,34
	<i>C. chilensis</i>	7	10	10	11	1,3	100	1100	4	3	50	78	35,6	6,34
	<i>C. chilensis</i>	13	15,2	8	9	1,6	121,6	1094,4	4	3	50	78	35,6	6,34

Fecha 01-02-2024

Grupo	Especie	N° planta real	Propiedades físicas								Propiedades termodinámicas			
			Largo área cubierta (cm)	Ancho área cubierta (cm)	Altura (cm)	Grosor (cm)	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Turgencia	Vigor	Humedad ambiental (%)	Humedad del suelo (%)	Temperatura del suelo (°C)	pH
A	<i>S. neei</i>	4	16	15	17	0,2	240	4080	4	4	-	-	22,7	6,46
	<i>S. neei</i>	10	14	14	15	0,2	196	2940	2	2	-	-	21,5	5,58
	<i>S. neei</i>	13	17	15	19	0,35	255	4845	4	3	-	-	21,4	6,1
D	<i>S. neei</i>	4	12	8	11	0,25	96	1056	4	4	-	-	21,2	6,87
	<i>S. neei</i>	10	18	13	13	0,3	234	3042	4	4	-	-	21	6,85
	<i>S. neei</i>	13	17	12	12	0,3	204	2448	4	4	-	-	21	6,85
B	<i>C. chilensis</i>	1	38	21	12	1,1	798	9576	3	3	-	-	20,6	5,21
	<i>C. chilensis</i>	7	27	21	16	1,2	567	9072	4	4	-	-	22,7	4,8
	<i>C. chilensis</i>	13	39	15	14	1,1	585	8190	4	4	-	-	22,5	4,95
C	<i>C. chilensis</i>	1	21	19	11	0,9	399	4389	3	4	-	-	23	6,65
	<i>C. chilensis</i>	7	21	20	12	1,2	439	5040	4	4	-	-	22	6,28
	<i>C. chilensis</i>	13	16	8	12	1,2	128	1536	3	3	-	-	21,7	5,76

Fecha 29-02-2024

Grupo	Especie	N° planta	Propiedades físicas								Propiedades termodinámicas			
			Largo área cubierta (cm)	Ancho área cubierta (cm)	Altura (cm)	Grosor (cm)	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Turgencia	Vigor	Humedad ambiental (%)	Humedad del suelo (%)	Temperatura del suelo (°C)	pH
A	<i>S. neei</i>	4	17	20	19	0,3	340	6460	4	4	40,6	77	33	-
	<i>S. neei</i>	10	14,3	9	14	0,22	128,7	1801,8	4	4	43	89	33,1	-
	<i>S. neei</i>	13	30	24	17	0,33	720	12240	4	4	42	96	32,9	-
D	<i>S. neei</i>	1	15	10	12	0,2	150	1800	3	3	43,5	93	32,2	-
	<i>S. neei</i>	7	13	9	13	0,27	117	1521	3	3	41,7	95	33	-
	<i>S. neei</i>	13	24	16	12,5	0,31	384	4800	4	4	41,7	82	33,6	-
B	<i>C. chilensis</i>	1	60	31	15	2	1860	27900	4	4	43,8	91	31,6	-
	<i>C. chilensis</i>	7	47	42	21,5	3	1974	42441	4	4	46,6	91	30,5	-
	<i>C. chilensis</i>	13	88	51	21,5	3	4488	96492	4	4	46,1	63	30,8	-
C	<i>C. chilensis</i>	1	37	28	14	1,5	1036	14504	3	3	44,6	85	31,4	-
	<i>C. chilensis</i>	7	25	26,5	16	1,5	662,5	10600	3	3	45,8	74	31,7	-
	<i>C. chilensis</i>	13	18,5	8	13,3	1	148	1968,4	2	2	42,7	68	32,4	-

5.4.3. Los Maitenes

Fecha: 16-01-2024

Grupo	Especie	N° de planta real	Propiedades físicas							Propiedades termodinámicas			
			Largo área cubierta (cm)	Ancho área cubierta (cm)	Altura (cm)	Grosor (cm)	Área (cm ²)	Turgencia	Vigor	Humedad ambiental (%)	Humedad del suelo (%)	Temperatura del suelo (°C)	pH
A	<i>S. neei</i>	1	10,9	6	9,6	0,3	65,4	3	4			32,2	6,04
	<i>S. neei</i>	7	28	5	10,9	0,3	140	3	4			32,2	6,04
	<i>S. neei</i>	13	24	5	15	0,25	120	3	4			32,2	6,04
D	<i>S. neei</i>	1	29,5	7,5	13	0,2	221,25	3	3			32,2	6,04
	<i>S. neei</i>	5	13	11	18,2	0,15	143	2	3			32,2	6,04
	<i>S. neei</i>	13	12	9	6	0,15	108	3	3			32,2	6,04
B	<i>C. chilensis</i>	1	16	6	9,6	0,4	96	3	4			25,9	5,83
	<i>C. chilensis</i>	7	34	8	10,9	0,7	272	4	4			25,9	5,83
	<i>C. chilensis</i>	13	18	7	14	0,4	126	3	4			25,9	5,83
C	<i>C. chilensis</i>	1	15	6	9,8	0,4	90	3	4			25,9	5,83
	<i>C. chilensis</i>	7	32	14	14	1	448	4	4			25,9	5,83
	<i>C. chilensis</i>	13	17	16	12,5	0,9	272	3	3			25,9	5,83

Fecha: 13-02-2024

Grupo	Especie	N° de planta real	Propiedades físicas							Propiedades termodinámicas			
			Largo área cubierta (cm)	Ancho área cubierta (cm)	Altura (cm)	Grosor (cm)	Área (cm ²)	Turgencia	Vigor	Humedad ambiental (%)	Humedad del suelo (%)	Temperatura del suelo (°C)	pH
A	<i>S. neei</i>	1	28	18	25	0,4	504	4	4	52	68	28,7	4,74
	<i>S. neei</i>	7	30	15	18	0,45	450	4	4	55,2	79	28,9	5,41
	<i>S. neei</i>	13	31	14	17	0,4	434	4	4	52,9	83	29,3	5,96
D	<i>S. neei</i>	1	17	10,5	18	0,3	178,5	4	4	54,3	84,5	29,6	5,58
	<i>S. neei</i>	5	9,5	9,5	1	0,15	90,25	4	4	47,6	90	29,6	6,14
	<i>S. neei</i>	13	16	13	24	0,3	208	4	2	50,4	83	29,8	6,22
B	<i>C. chilensis</i>	1	23	18	16	1,8	414	3	4	51,6	81	6,16	6,16
	<i>C. chilensis</i>	7	54	26	13	2	1404	4	4	50,5	85	5,41	5,41
	<i>C. chilensis</i>	13	39	20	16	2	780	4	4	51	90	6,65	6,65
C	<i>C. chilensis</i>	1	26	25	16	1,8	650	4	4	55,6	65	29	6,22
	<i>C. chilensis</i>	7	44	26	15	2	1144	4	3	55,4	64	29,1	6,41
	<i>C. chilensis</i>	13	40	20	16	2	800	4	4	52	81	29,1	6,47

Fecha 29-02-2024

Especie	N° de planta real	Propiedades físicas							Propiedades termodinámicas			
		Largo área cubierta (cm)	Ancho área cubierta (cm)	Altura (cm)	Grosor (cm)	Área (cm ²)	Turgencia	Vigor	Humedad ambiental (%)	Humedad del suelo (%)	Temperatura del suelo (°C)	pH
<i>S. neei</i>	1	31	17,5	26	3,5	542,5	4	4	55,9	46	27,4	6,45
<i>S. neei</i>	7	30	14,5	16	0,32	435	4	4	56,7	48	27,5	6,8
<i>S. neei</i>	13	32	19	19	0,3	608	4	4	53,1	40	28	7,35
<i>S. neei</i>	1	18	11	20	0,3	198	4	4	47	50	29,1	6,8
<i>S. neei</i>	5	10	10	5	0,2	100	3	3	46	40	30,5	6,75
<i>S. neei</i>	13	17	13	13,5	0,28	221	3	3	44	31	31,2	7,2
<i>C. chilensis</i>	1	27	23	21	1,9	621	4	4	60,2	73	24,4	6,41
<i>C. chilensis</i>	7	73	31	17	2,1	2263	4	4	61,5	41	24,4	6,2
<i>C. chilensis</i>	13	54,5	27	18	1,8	1471,5	4	4	62,2	64,4	24,3	6,4
<i>C. chilensis</i>	1	39	26	17	1,8	1014	4	4	65,1	50	24,8	6,97
<i>C. chilensis</i>	7	51,5	17	28,5	1,9	875,5	3	4	61,1	47	24,9	6,99
<i>C. chilensis</i>	13	41	33	18	2	1353	4	4	60,9	33	24,9	7,1

5.4.4. Pucalán

Fecha: 30-01-2024

Grupo	Especie	N° de planta real	Propiedades físicas							Propiedades termodinámicas			
			Largo área cubierta (cm)	Ancho área cubierta (cm)	Altura (cm)	Grosor (cm)	Área (cm ²)	Turgencia	Vigor	Humedad ambiental (%)	Humedad del suelo (%)	Temperatura del suelo (°C)	pH
A	S. neei	1	13	13	16	0,3	169	2	3	53,6	96	28,5	7,53
	S. neei	7	19	9	15	0,3	171	4	4	75,5	97	25,4	6,96
	S. neei	11	11	6	4	0,3	66	2	2	52,5	96	30,1	6,75
D	S. neei	1	15	10	14	0,2	150	4	4	52,5	96	30,1	6,89
	S. neei	7	14	8	19	0,2	112	2	3	67,8	97	27,1	7,38
	S. neei	13	29	10	7,5	0,2	290	2	4	68,7	98	25,3	7,18
B	C. chilensis	1	24,7	20	12	0,9	494	4	4	48,7	98	29,4	6,89
	C. chilensis	4	27	12	12	0,9	324	3	4	49,7	83	28,5	7,18
	C. chilensis	11	27	17	11	1	459	3	4	49,7	89	28,5	7,38
C	C. chilensis	6	15	14	11	0,9	210	2	3	49	91	26,8	7,78
	C. chilensis	9	19	12,4	10	1,1	235,6	2	3	49,7	89	31,6	6,87
	C. chilensis	13	19	19	14	1,3	361	4	4	48,6	98	28,7	7,16

Fecha: 13-02-2024

Grupo	N° planta diagonal	N° de planta real	Propiedades físicas							Propiedades termodinámicas			
			Largo área cubierta (cm)	Ancho área cubierta (cm)	Altura (cm)	Grosor (cm)	Área (cm ²)	Turgencia	Vigor	Humedad ambiental (%)	Humedad del suelo (%)	Temperatura del suelo (°C)	pH
A	<i>S. neei</i>	1	16	19	22	0,32	304	3	3	53	86	26,4	
	<i>S. neei</i>	7	27	20	27	0,35	540	4	4	53	90	26,2	
	<i>S. neei</i>	11	26	35	24	0,33	910	4	4	52,9	72	27,1	
D	<i>S. neei</i>	1	27	26	20	0,25	702	4	4	51	90	27	
	<i>S. neei</i>	7	28	21	25	0,3	588	4	4	55,5	81	26,8	
	<i>S. neei</i>	13	18	13	18	0,25	234	4	4	51	90	27	
B	<i>C. chilensis</i>	1	34	25	14,5	1,4	850	4	4	55,5	81	27,5	
	<i>C. chilensis</i>	5	43	32	17	2	1376	4	4	52,5	74	27,5	
	<i>C. chilensis</i>	11	32	18	15	2	576	4	4	55,7	94	27,4	
C	<i>C. chilensis</i>	6	47	18,5	14	2	869,5	4	4	50,1	89	27,3	
	<i>C. chilensis</i>	9	31	35	17	2	1085	4	4	49,7	92	27,1	
	<i>C. chilensis</i>	13	32	20	14	2	640	4	3	50,5	89	26,4	

Fecha: 27-02-2024

Grupo	Especie	N° de planta real	Propiedades físicas							Propiedades termodinámicas			
			Largo área cubierta (cm)	Ancho área cubierta (cm)	Altura (cm)	Grosor (cm)	Área (cm ²)	Turgencia	Vigor	Humedad ambiental (%)	Humedad del suelo (%)	Temperatura del suelo (°C)	pH
A	<i>S. neei</i>	1	15,5	17	18	0,3	263,5	3	4	90	53,3	25,6	6,68
	<i>S. neei</i>	7	31	18	27	0,33	558	4	4	44,3	68	34	6,51
	<i>S. neei</i>	11	37	21	11	0,2	777	3	3	44,3	68	27,3	6,66
D	<i>S. neei</i>	1	27	28	24	0,35	756	4	4	31,1	73	34,2	6,78
	<i>S. neei</i>	7	28	21	19	0,27	588	3	4	49,4	95	34,6	5,85
	<i>S. neei</i>	13	28	16	21	0,4	448	4	4	49,4	95	34,6	6,2
B	<i>C. chilensis</i>	1	85	23	12	1,3	1955	4	4	33	84	38,6	6,67
	<i>C. chilensis</i>	5	53	23	13	1,5	1219	4	4	44,1	83	35,4	6,4
	<i>C. chilensis</i>	11	41	20	15	2	820	4	4	40,5	91	35,5	6,6
C	<i>C. chilensis</i>	6	41	20	11,5	2	820	4	4	37,2	92	38	6,85
	<i>C. chilensis</i>	9	38,5	27	15	1,8	1039,5	4	4	53	94	35	6,35
	<i>C. chilensis</i>	13	38	38	16	1,8	1444	4	4	46,6	95	31,7	6,67

5.5. Resultados análisis de metales pesados muestra foliar

5.5.1. CIQV

Fecha de extracción de muestras: 11/03/2024

Grupo	Especie	N° de planta	Masa	Código de muestra	Parte	Cu (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	As (mg/kg)
A	<i>S. neei</i>	5	249	LSA5	Raíz	39,3	0,73	6,54	0,66
					Aéreo	11	1,67	15,6	<0,02
	<i>S. neei</i>	11	262	LSA11	Raíz	39,3	0,73	6,54	0,66
					Aéreo	8,41	2,45	19,6	<0,02
D	<i>S. neei</i>	4	269	LSD4	Raíz	39,3	0,73	6,54	0,66
					Aéreo	10	1,83	15,6	<0,02
	<i>S. neei</i>	13	259	LSD13	Raíz	39,3	0,73	6,54	0,66
					Aéreo	8,41	2,45	19,6	<0,02
B	<i>C. chilensis</i>	8	245	LCB8	Raíz	30,3	2,14	23,7	0,64
					Aéreo	8,41	2,14	19,6	<0,02
	<i>C. chilensis</i>	12	368	LCB12	Raíz	30,3	2,14	23,7	0,64
					Aéreo	8,41	2,14	19,6	<0,02
C	<i>C. chilensis</i>	1	573	LCC1	Raíz	30,3	2,14	23,7	0,64
					Aéreo	8,41	2,61	24,7	<0,02
	<i>C. chilensis</i>	11	521	LCC11	Raíz	30,3	2,14	23,7	0,64
					Aéreo	6,51	3,08	25,7	<0,02

5.5.2. El Rungue

Fecha de extracción de muestras: 29/02/2024

Grupo	Especie	N°	Masa (g)	Código final	Parte	Cu (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	As (mg/kg)
A	S. neei	4	246	RSA4	Raíz	33,2	1,22	0,53	4,08
					Aéreo	14,1	1,66	2,11	1,35
	S. neei	13	281	RSA13	Raíz	22,5	0,87	0,01	3,67
					Aéreo	16,6	0,87	13,2	0,11
D	S. neei	4	29	RSD4	Raíz	37,1	2,16	9,21	6,33
					Aéreo	17,5	2,29	0,53	<0,02
	S. neei	12	449	RSD12	Raíz	34,6	0,55	<0,07	4,05
					Aéreo	21,5	1,97	13,2	0,78
B	C. chilensis	1	231	RCB1	Raíz	34,2	1,5	8,42	5,96
					Aéreo	15,2	2,77	14,7	<0,02
	C. chilensis	11	93	RCB11	Raíz	14,5	1,22	2,51	<0,02
					Aéreo	11,2	2,29	17,9	0,38
C	C. chilensis	1	302	RCC1	Raíz	23,5	1,2	2,11	1,18
					Aéreo	22,2	2,29	11,6	<0,02
	C. chilensis	11	863	RCC11	Raíz	25,2	1,18	6,84	5,99
					Aéreo	16,2	3,08	13,2	<0,02

5.5.3. Los Maitenes

Fecha de extracción de muestras: 29/02/2024

Grupo	Especie	N°	Masa (g)	Código final	Parte	Cu (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	As (mg/kg)
A	<i>S. neei</i>	1	170	MSA1	Raíz	34,4	1,02	0,53	6,85
					Aéreo	27,4	1,5	9,99	1,7
	<i>S. neei</i>	12	194	MSA12	Raíz	27,8	0,87	<0,07	3,56
					Aéreo	20,4	1,18	6,84	0,9
D	<i>S. neei</i>	10	194	MSD10	Raíz	27,4	<0,01	<0,07	0,87
					Aéreo	20,4	1,97	11,6	0,49
	<i>S. neei</i>	11	301	MSD11	Raíz	70,2	0,71	<0,07	7,94
					Aéreo	20,4	1,34	6,84	1,16
B	<i>C. chilensis</i>	5	451	MCB5	Raíz	40,1	1,82	5,26	5
					Aéreo	26	1,82	13,2	1,76
	<i>C. chilensis</i>	4	319	MCB4	Raíz	21,6	1,87	2,63	3,36
					Aéreo	22,2	1,5	9,99	1,25
C	<i>C. chilensis</i>	1	274	MCC1	Raíz	27,4	1,18	5,26	6,4
					Aéreo	18,7	1,82	13,2	0,88
	<i>C. chilensis</i>	11	210	MCC11	Raíz	27,4	1,82	5,26	5,91
					Aéreo	21,1	1,82	14,7	2,26

5.5.4. Pucalán

Fecha de extracción de muestras: 27/02/2024

Grupo	Especie	N°	Masa (g)	Código de muestra	Parte	Cu (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	As (mg/kg)
A	<i>S. neei</i>	10	500	PSA10	Raíz	24,90	0,93	16,50	1,17
					Aéreo	18,30	2,33	14,20	0,63
	<i>S. neei</i>	5	402	PSA5	Raíz	23,50	0,32	<0,07	1,48
					Aéreo	19,30	1,24	<0,07	0,49
D	<i>S. neei</i>	6	612	PSD6	Raíz	15,00	0,63	8,73	0,72
					Aéreo	14,70	2,33	15,30	0,48
	<i>S. neei</i>	5	358	PSD5	Raíz	20,60	0,01	<0,07	0,99
					Aéreo	22,20	1,71	5,42	1,22
B	<i>C. chilensis</i>	2	342	PCB2	Raíz	18,30	1,50	2,11	2,95
					Aéreo	10,20	1,66	3,68	0,68
	<i>C. chilensis</i>	11	574	PCB11	Raíz	23,90	0,39	<0,07	2,57
					Aéreo	10,20	1,34	11,60	1,06
C	<i>C. chilensis</i>	8	344	PCC8	Raíz	48,50	3,25	22,00	1,46
					Aéreo	17,60	1,86	6,52	0,64
	<i>C. chilensis</i>	12	427	PCC12	Raíz	26,50	1,40	15,30	1,53
					Aéreo	10,40	1,86	4,31	0,44