



Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería en Medioambiente
Ingeniería Ambiental

**RECUPERACIÓN DE SUELOS DEGRADADOS
MEDIANTE TÉCNICAS DE RESTAURACIÓN
AMBIENTAL, EN EL SECTOR DE LOS MAITENES,
COMUNA DE PUCHUNCAVÍ, REGIÓN DE VALPARAÍSO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

Autor: Marcelo Orlando Rojas Cerda

Profesor Guía: Ing. Mg. Jairo Valencia Muñoz

VALPARAÍSO, CHILE

2016

Agradecimientos

Agradecer a mis padres, mis guías y guardianes, junto a mis hermanos somos la demostración de su potencial humano y su trascendencia. Gracias por estar en cada etapa, en cada tropiezo y en cada triunfo. Son los pilares que sustentan mi existir y espero jamás defraudarlos. A mis hermanos Alejandro y Erika, por ser y estar siempre ahí. Su sola presencia es motivación y fuerza. El tiempo y las experiencias nos han unido muchachos.

También a los compañeros que me hicieron compañía, siendo bálsamo en la rutina y apoyo en los momentos difíciles. Agradecer especialmente a Maritza-Catalina, Daniela y Alonso, por ser mis confidentes y amigos. Ojala esto perdure por siempre.

A mi profesor guía Jairo Valencia, por su apoyo y paciencia, por comprender cada gesto, guiar mis motivaciones y despejar mis dudas. Lo que aquí se escribe no sería posible sin su ayuda.

Quiero agradecer a cada uno de los profesores que me mostraron como funciona nuestro entorno, despejando cada una de las interrogantes que perseguí desde mi infancia. Valoro cada una de sus lecciones. Valió la pena. Al Dr. Alexander Neaman por el material entregado, por robustecer este trabajo. También agradecer al Dr. Seth M. Dabney por humanizar el estudio de suelo, por su disposición y sus consejos.

A mi Tío Juan Rojas por darle valor a la tierra, por su entusiasmo y entrega. Gracias por la oportunidad descubrir el pasado y por hacerme parte de esto. Gracias por todo.

Gracias a Stephanie, mi pequeño motor. Por ser mi fundamento y forjarme como persona. Por ser el conector que me faltaba, mi cable a tierra y mí complemento. Porque sé que a tu lado soy mejor y así será hasta el último de mis días. Sabes que esto recién comienza y que aún no llega la mejor parte. Agradezco a Dios la oportunidad de poder amarte. A sus padres y hermana por acogerme como a un hijo y hermano más. Por cuidar de Stephanie en todo momento. Porque han hecho crecer mi familia y ser parte de mí vida. Muchas gracias.

Marcelo.

Resumen

El recurso suelo se encuentra en una situación vulnerable en todo el mundo. En la comuna de Puchuncaví, Región de Valparaíso, Chile, suelos de tradición agrícola y campesina, poseen evidencia de degradación física y presencia de metales pesados debido a impacto de actividades antrópicas cercanas. En la presente investigación se generará un informe técnico enfocado en el manejo del recurso suelo, dónde se evaluó su actual condición, para luego aplicar técnicas de restauración ambiental. Se identifican sitios con evidencia de degradación, se caracterizan y clasifican, midiendo el suelo perdido para aquellos sitios. Se utiliza, además, la valoración paisajística como método de diagnóstico. Luego de identificados los sitios a restaurar, se realizó una evaluación de las técnicas y tecnologías de restauración disponibles. Se llegó a la conclusión de ocupar tratamientos de bioingeniería y aplicación de compost, que posteriormente se espera repercutan en una mejora del elemento paisajístico. Los resultados de la aplicación de estas metodologías fueron modelados con el software RUSLE2, planteándose además el seguimiento de las cárcavas. En algunos casos se esperan resultados a los 6 meses, pero en otros casos, estos no serán visibles después de varios años.

Índice

1	Introducción	1
2	Marco Teórico	2
2.1	El Suelo.....	2
2.1.1	Complejidad.....	4
2.1.2	Dinamismo.....	4
2.1.3	Permeabilidad.....	4
2.2	Recurso suelo	5
2.3	Degradación de suelo	6
2.3.1	Definición.....	6
	• La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)	6
	• Legislación Chilena	10
2.3.2	Erosión de suelo	11
2.3.3	Contaminación del suelo	24
2.3.1	Contaminación visual	26
2.3.2	Pérdida de fertilidad del suelo	27
2.4	Evaluación de suelo	29
2.4.1	Modelos de erosión en la actualidad	31
2.4.2	La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (Universal Soil Loss Equation) (USLE, Wischmeier y Smith, 1978)	42
2.4.3	La Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelos (Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE), (Renard <i>et al.</i> , C.A. Jones R.H. Griggs, J.R. Williams y R. Srinivasan 1991)	44

2.4.4	Rusle2	45
2.4.5	La Ecuación de Erosión Eólica (Wind Erosion Equation, WEQ)	46
2.4.6	La Ecuación Revisada de Erosión Eólica (RWEQ).....	48
2.5	Evaluación paisajística	50
2.6	Tratamiento de suelos degradados	51
2.6.1	Control de Erosión	53
	• Control de cárcavas.....	55
	• Bioingeniería	61
	• Papel de la vegetación en la protección y estabilización de los taludes	68
	• Fitorrecuperación	70
2.6.2	Control de Metales Pesados.....	72
2.7	Restauración	74
2.7.1	Ecológica	74
2.7.2	Ambiental	75
2.8	Caracterización del área de estudio	78
2.8.1	Ubicación del área de estudio	78
2.8.2	Clima	79
2.8.3	Geología.....	80
2.8.4	Geomorfología.....	80
2.8.5	Hidrogeología	81
2.8.6	Flora	82
2.8.7	Vegetación	83
2.8.8	Carta de Ocupación de Tierras (COT)	83
2.8.9	Relieve	86

2.8.10	Arqueología	86
2.8.11	Erosión del suelo.....	87
2.8.12	Erodabilidad del suelo	87
2.8.13	Uso de Suelo	88
2.8.14	Contaminación (concentración de metales pesados y arsénico).....	89
2.8.15	Actividad Humana	91
3	Problema	92
4	Objetivos	93
4.1	Objetivo General.....	93
4.2	Objetivos Específicos	93
5	Metodología.....	94
5.1	Identificación de sectores degradados en el área de estudio	94
5.2	Determinación del grado de degradación del área	94
5.2.1	Pérdida de suelo	94
5.2.2	Evaluación paisajística	96
5.3	Selección de los sitios a restaurar y técnicas a utilizar	103
5.3.1	Selección de los sitios a restaurar	103
5.3.2	Selección de técnicas a utilizar para la restauración.....	104
5.4	Implementación de técnicas de restauración para los sitios degradados	104
5.4.1	Mampostería y contención (cárcavas N°1 y N°5.1).....	105
5.4.2	Especies colonizadoras y compost (cárcavas N°2, N°3, N°4 y N°5.2)	105
5.4.3	Hidrosiembra (laminar N°1 y N°2).....	105
5.5	Evaluación de las técnicas utilizadas mediante modelación de pérdida de suelo	107

5.5.1	Predicción	107
5.5.2	Seguimiento.....	108
5.6	Análisis de costo de las actividades	108
6	Resultados y discusiones	109
6.1	Sitios degradados dentro del área de estudio	109
6.2	Grado de degradación	114
6.2.1	Erosión	114
6.2.2	Evaluación paisajística	115
6.3	Sitios y técnicas seleccionadas para la restauración	119
6.3.1	Selección de los sitios a restaurar	119
6.3.2	Selección de técnicas de restauración	123
6.4	Implementación	126
6.4.1	Mampostería y contención (cárcavas N°1 y N°5.1).....	126
6.4.2	Especies colonizadoras y compost (cárcavas N°2, N°3, N°4 y N°5.2)	129
6.4.3	Hidrosiembra (laminar N°1 y N°2)	130
6.5	Evaluación y seguimiento de los sitios restaurados	132
6.5.1	Modelo.....	132
6.5.2	Monitoreo.....	136
6.6	Costos de implementación de técnicas de restauración	138
7	Conclusión	141
8	Bibliografía	143
9	ANEXOS	153
	ANEXO 1: Principales técnicas de recuperación de suelos (Informe de vigilancia técnica: técnicas de recuperación de suelos contaminados, 2007).	153

ANEXO 2: Tipos de contaminantes tratados en la recuperación de suelos (Informe de vigilancia técnica: técnicas de recuperación de suelos contaminados, 2007).	154
ANEXO 3: Unidades Visuales Paisajísticas	155
ANEXO 4: Papeleta N°1 para encuesta de evaluación paisajística.	159
ANEXO 5: Papeleta N°2 para encuesta de evaluación paisajística.	161
ANEXO 6: Perfiles de taludes en AUTOCAD	162
ANEXO 7: Perfiles de erosión en RUSLE2	164
ANEXO 8: Estimación de costos de implementación	168
ANEXO 9: Piedras encontradas para utilizar en diques.	175
ANEXO 10: Perfiles de erosión en RUSLE2, después de implementación.	176
ANEXO 11: Herramienta clip software Arcgis	180
ANEXO 12: Normativa con posible aplicabilidad en actividades.	181
ANEXO 13: Proyecciones	182
ANEXO 14: Educación ambiental.	184

Índice de Tablas

Tabla 1. Tipos de Erosión (Crosara, 2013).	8
Tabla 2. Clasificación de factores de erosión (Crosara, 2013).	8
Tabla 3. Grupos de erosionabilidad al viento (WEG), e índice de (I) al viento.	47
Tabla 4. Factores de la erosión eólica considerados en la Ecuación Revisada de Erosión Eólica (RWEQ, Fryrear <i>et al.</i> , 1994).	50
Tabla 5. Formas y mecanismos de erosión y obras de estabilización.	54
Tabla 6. Técnicas y Prácticas de bioingeniería en taludes, laderas y cauces.	64
Tabla 7. Aplicación de la bioingeniería en diferentes proyectos o espacios urbanos.	64
Tabla 8 Volumen promedio de agua acumulada para diferentes especies vegetales (adaptado de Styozen y Morgan, 1995)	69
Tabla 9. Composición taxonómica Flora.....	82
Tabla 10. Coordenadas UTM y tipos de muestras de suelo en puntos de muestreo del SITIO C.	90
Tabla 11: Ubicación georreferenciada de las unidades visuales.	97
Tabla 12. Rangos de valoración para la unidad visual (Zambrano <i>et al.</i> , 2002).....	98
Tabla 13. Rangos de valoración de la organización visual (Zambrano <i>et al.</i> , 2002).....	99
Tabla 14. Rangos de valoración de la calidad visual (Zambrano <i>et al.</i> , 2002).....	100
Tabla 15. Rangos de valoración de la calidad escénica (Zambrano <i>et al.</i> , 2002).	101
Tabla 16. Valor Paisajístico del Territorio (Zambrano <i>et al.</i> , 2002).....	103
Tabla 17. Clasificación de pendiente simple y compleja (Soil Survey Stuff, 1993).	103
Tabla 18. Clasificación según profundidad de cárcava (SAGARPA, 2009).....	104
Tabla 19. Posición georreferenciada de los sitios de interés.	113
Tabla 20. Caracterización de cárcavas.....	114
Tabla 21. Dimensiones de áreas con erosión laminar.	114
Tabla 22. Pérdida de suelo en Mg/año.....	114
Tabla 23. Evaluación paisajística para la Unidad Visual A.	115
Tabla 24. Evaluación paisajística para la Unidad Visual B.	116

Tabla 25. Evaluación paisajística para la Unidad Visual C.	116
Tabla 26. Evaluación paisajística para la Unidad Visual D.	117
Tabla 27. Valor paisajístico del territorio.	117
Tabla 28. Tabla resumen de evaluación paisajística.	118
Tabla 29. Segmentos de ladera con pendiente “muy empinada”.	119
Tabla 30. Clasificación de cárcavas según su profundidad.	120
Tabla 31. Evaluación de técnicas de mampostería para cárcavas.	124
Tabla 32. Evaluación de metodologías para generar cobertura vegetal y control de laderas.	125
Tabla 33. Pérdida de suelo post implementación.	133
Tabla 34. Estimación de costos para Dique mixto de biomasa residual.	138
Tabla 35 Estimación de costos para la implementación de compost	139
Tabla 36 Estimación de costos para la implementación de hidrosiembra.....	139

Índice de Figuras

Figura 1. Proceso de erosión.	12
Figura 2. Factores que afectan la susceptibilidad a la erosión de los taludes y laderas (Suárez, 2001).	13
Figura 3. Mecanismo de erosión por acción del viento (Suárez, 2001).	15
Figura 4. Erosión por golpeo de una gota de lluvia (Suárez, 2001).	16
Figura 5. Proceso de erosión laminar (Suárez, 2001).	17
Figura 6. Elementos que intervienen en la formación de surcos (Suárez, 2001).	18
Figura 7. Procesos de formación de surcos y cárcavas (Suárez, 2001).	18
Figura 8. Procesos de formación de cárcavas por flujo subsuperficial.	20
Figura 9. Etapas en el desarrollo de una cárcava (Adaptado de Leopold, Wolman y Miller, 1964).....	22
Figura 10. Esquema general del proceso de erosión en cárcavas.	24
Figura 11. Etapas de degradación del suelo bajo explotación agrícola inadecuada.	28
Figura 12. Parámetros de valoración paisajística. (Fuente: Zambrano <i>et al.</i> , 2002).	51
Figura 13. Diagrama general para el diseño de obras para el control de la erosión (Suárez, 2001).	53
Figura 14. Disposición de dique de postes de madera (CONAF, 1998).	56
Figura 15. Dimensiones de diseño para dique (unidad de medida en (m)) (CONAF, 1998).	57
Figura 16. Disposición de dique de estructuras gavionadas (CONAF, 1998).	57
Figura 17. Dimensiones de diseño para dique (CONAF, 1998).	58
Figura 18. Disposición de dissipador en terreno (CONAF, 1998).	58
Figura 19. Dimensiones de diseño para dissipador (CONAF, 1998).	59
Figura 20. Disposición de presas de mampostería (SAGARPA, 2009).	59
Figura 21. Dimensiones de diseño para presa (SAGARPA, 2009).	60
Figura 22. Disposición de dique de biomasa residual (Caballero <i>et al.</i> , 2009).	61
Figura 23. <i>Oenothera affinis</i> . (El Mercurio de Valparaíso, edición digital).	65
Figura 24. <i>Lolium perenne</i> . (Stevenson Intermountain Seed, Inc.)	66

Figura 25. <i>Oenothera picensis</i> . (Chloris Chile).....	67
Figura 26. Ubicación de la comuna de Puchuncaví.	78
Figura 27. Área de estudio.....	79
Figura 28. Cartografía de Ocupación de Tierras para Formaciones Vegetacionales.	84
Figura 29. Cartografía de ocupación de tierras para catastro florístico.	85
Figura 30. Zonas de ladera, monte y llano del área de estudio.	86
Figura 31. Puntos de muestreo de suelos.	90
Figura 32. Ubicación georreferenciada de perfiles (Elaborado con Google Earth).....	95
Figura 33: Unidades visuales.	96
Figura 34. Ubicación de sitios de interés en el área de estudio (Elaborado con Google Earth).	109
Figura 35. Vista general cárcava N°1.....	110
Figura 36. Vista general cárcava N°2.....	110
Figura 37. Vista general cárcava N°3.....	111
Figura 38. Vista general cárcava N°4.....	111
Figura 39. Vista general cárcava N°5.1 y 5.2.	112
Figura 40. Vista general área Laminar N°1.	112
Figura 41. Vista general área Laminar N°2.	113
Figura 42. Gráfico de perdida de suelo por segmento de ladera, para la cárcava N°1 desde RUSLE2.....	121
Figura 43. Gráfico de perdida de suelo por segmento de ladera, para la cárcava N°5.1 desde RUSLE2.	121
Figura 44. Gráfico de perdida de suelo por segmento de ladera, para la cárcava N°2 desde RUSLE2.....	122
Figura 45. Estructura principal.	126
Figura 46. Disposición de biomasa residual y taludes.....	127
Figura 47. Vista general y disposición de sogas.	127
Figura 48. Pendiente compensada.	128
Figura 49. Cárcava N°5.1, vista general.	128

Figura 50. Subcuenta de cárcava N°5.2, especies colonizadoras.	129
Figura 51. Perfil de la implementación de hidrosiembra.	131
Figura 52. Implementación de hidrosiembra.	131
Figura 53. Cárcava N°1 con pendiente corregida, simulando la implementación de dique.	132
Figura 54. Cárcava N°5.1 con pendiente corregida, simulando la implementación de dique.	132
Figura 55. Valores de pérdida de suelo para las cárcavas con y sin la implementación de dique de mampostería.	134
Figura 56. Valores de pérdida de suelo para las cárcavas con y sin la implementación de abono orgánico.	134
Figura 57. Valores de pérdida de suelo para los sitios con erosión laminar con y hidrosiembra.	135
Figura 58. Papeleta, monitoreo de cárcavas.	137
Figura 59. Perfil cárcava N°1.....	162
Figura 60. Perfil cárcava N°2.....	162
Figura 61. Perfil cárcava N°3.....	163
Figura 62. Perfil cárcava N°4.....	163
Figura 63. Perfil cárcava N°5.....	163
Figura 64. Cárcava N°1 en RUSLE2.	164
Figura 65. Cárcava N°2 en RUSLE2.	164
Figura 66. Cárcava N°3 en RUSLE2.	165
Figura 67. Cárcava N°4 en RUSLE2.	165
Figura 68. Cárcava N°5.1 en RUSLE2.	166
Figura 69. Cárcava N°5.2 en RUSLE2.	166
Figura 70. Laminar N°1 en RUSLE2.	167
Figura 71. Laminar N°2 en RUSLE2.	167
Figura 72. Cárcava N°1 en RUSLE2 después de implementación.....	176
Figura 73. Cárcava N°2 en RUSLE2 después de implementación.....	176

Figura 74. Cárcava N°3 en RUSLE2 después de implementación.....	177
Figura 75. Cárcava N°4 en RUSLE2 después de implementación.....	177
Figura 76. Cárcava N°5.1 en RUSLE2 después de implementación.....	178
Figura 77. Cárcava N°5.2 en RUSLE2 después de implementación.....	178
Figura 78. Laminar N°1 en RUSLE2 después de implementación.	179
Figura 79. Laminar N°2 en RUSLE2 después de implementación.	179
Figura 80. Herramienta Clip.....	180

1 Introducción

El recurso suelo en nuestro país se encuentra en un estado extremadamente frágil (Muñoz, 2007). El sector de Los Maitenes ubicado en el valle de Puchuncaví hasta la década de los sesenta se destacó por poseer tierras destinadas principalmente para rubro agrícola, constituyendo las lentejas el cultivo principal y en menor proporción los cultivos de trigo, cebada y arvejas. Posteriormente, el mal manejo hizo que el recurso suelo perdiera calidad debido al monocultivo. La contaminación desde la refinería de Ventanas, detuvo la actividad agrícola basada en la siembra de legumbres, obligando al cambio por la siembra de trigo de secano y cebada, principalmente. Finalmente, en las últimas décadas prácticamente no ha habido desarrollo de cultivos en el área (Plan regulador comunal Puchuncaví, 2008). En términos generales puede afirmarse que la comuna corresponde a una zona altamente perturbada por prácticas agropecuarias y forestales pasadas.

La localidad de Los Maitenes en el valle de Puchuncaví (Chile central) es un área altamente contaminada por Cu, debido a que recibió por más de 35 años las descargas de emisiones gaseosas emitidas por la Fundición Ventanas (De Gregori *et al.*, 2003; Ginocchio, 2000; Neaman *et al.*, 2009). No obstante, aún existen lugares declarados como zona agrícola en el sector, a lo que se suma la presencia de humedales de gran importancia para la biodiversidad.

En este contexto los esfuerzos y objetivos del presente documento se enfocaran en confeccionar un plan de acción para la recuperación del recurso suelo en el sector de Los Maitenes, comuna de Puchuncaví.

2 Marco Teórico

2.1 El Suelo

El concepto de suelo fue modificándose conforme ha ido avanzado el conocimiento de sus componentes y la relación entre ellos. Así, para el alemán Frank Albert Fallou (1862), el suelo puede considerarse como “el producto de la alteración, que, como dientes, va royendo la superficie de la tierra”. En este mismo sentido, para el también alemán Emil Ramann (1928), el suelo es “la capa superior de alteración de la corteza”. Lavy, pensaba que el suelo no era más que una clase de roca. Se trata de conceptos meramente geológicos.

De acuerdo con el glosario de la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (1984), el suelo puede definirse, como el material mineral no consolidado en la superficie de la tierra, que ha estado sometido a la influencia de factores genéticos y ambientales (material parental, clima, macro y microorganismos y topografía), actuando durante un determinado periodo. Es considerado también como un cuerpo natural involucrado en interacciones dinámicas con la atmósfera y con los estratos que están debajo de él, que influye en el clima y en el ciclo hidrológico del planeta, y que sirve como medio de crecimiento para diversos organismos. Además, el suelo juega un papel ambiental de suma importancia, ya que puede considerarse como un reactor bio-físico-químico en donde se descompone material de desecho que es reciclado dentro de él (Hillel, 1998).

Para la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (F.A.O para sus siglas en inglés) el suelo como otras palabras comunes la palabra suelo tiene varios significados. Su significado tradicional se define como el medio natural para el crecimiento de las plantas. También se ha definido como un cuerpo natural que consiste en capas de suelo (horizontes del suelo) compuestas de materiales de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua. El suelo es el producto final de la influencia

del tiempo y combinado con el clima, topografía, organismos (flora, fauna y ser humano), de materiales parentales (rocas y minerales originarios). Como resultado el suelo difiere de su material parental en su textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, biológicas y físicas.

El suelo es un componente esencial de la "Tierra" y "Ecosistemas". Ambos son conceptos más amplios que abarcan la vegetación, el agua y el clima en el caso de la tierra, y además abarca también las consideraciones sociales y económicas en el caso de los ecosistemas (FAO, 2015).

En la definición de suelo que ofrece el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 1998) y aceptada para esta investigación, el suelo es un cuerpo natural formado por una fase sólida (minerales y materia orgánica), una fase líquida y una fase gaseosa que ocupa la superficie de la tierra, organizada en horizontes o capas de materiales distintos a la roca madre, como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de materia y energía, que tiene capacidad para servir de soporte a las plantas con raíces en un medio natural. Los límites superiores del suelo son la atmósfera, las aguas superficiales poco profundas (es decir, que pueden soportar el crecimiento de raíces), las plantas vivas o el material orgánico que no ha comenzado a descomponerse. Los límites horizontales los constituyen áreas donde el suelo es invadido por aguas profundas (más de 2.5 (m)), materiales estériles, rocas o hielo. El límite inferior está constituido por la roca dura y continua. De manera arbitraria, la profundidad máxima del suelo se establece en 2 (m).

De este modo, la visión del suelo como una intersección de atmósfera, litosfera, hidrosfera y biosfera ha dejado paso a un concepto de suelo como un subsistema de los ecosistemas terrestres.

Este concepto sistémico del suelo implica tres características fundamentales:

2.1.1 Complejidad

El suelo está caracterizado por una atmósfera interna, una economía particular del agua, una flora y fauna determinada, unas partículas minerales y unas partículas orgánicas, estando todos estos componentes fuertemente relacionados.

2.1.2 Dinamismo

El suelo adquiere progresivamente sus propiedades por la acción combinada del medio. La roca madre se altera por influencia del clima y la vegetación; los residuos vegetales y animales son atacados por los microorganismos del suelo, forman complejos orgánicos coloidales que se denominan humus y que después se mineralizan progresivamente; se establecen uniones más o menos íntimas entre los minerales procedentes de la alteración de la roca y el humus; las sustancias solubilizadas y las partículas coloidales sufren migraciones. Así, al fin de su proceso evolutivo, el suelo da lugar a un medio estable y equilibrado con el clima, la vegetación y la roca madre. Sin embargo, este equilibrio puede romperse mediante una modificación apreciable del clima o la vegetación, comenzando un nuevo proceso de evolución.

2.1.3 Permeabilidad

El suelo es un sistema abierto. Esta permeabilidad repercute en la mayor o menor facilidad de degradación (Jordán, 2005).

2.2 Recurso suelo

El suelo es un recurso de singular importancia para el ser humano dada la relación de dependencia que se establece entre ambos donde se encuentra soporte a gran número de actividades productivas de los sectores de alimentos, industria y vivienda, entre otros. Otras actividades no de menor importancia son también las generadas a partir de la expansión urbana (construcción de carreteras, ferrocarriles, aeropuertos, grandes presas, etc.) (WFS, 1996).

Considerando que sobre el suelo se realizan la mayor parte de las actividades productivas y la casi totalidad de los asentamientos humanos, el recurso suelo se ha visto disminuido a medida que la humanidad ha ido creciendo en número de personas, sobre todo y considerando que una actividad humana, sea cual sea está, conlleva consigo impactos sobre el recurso suelo.

Las actividades humanas han ocasionado a menudo una degradación de los recursos de tierra del mundo que constituyen la base para una seguridad alimentaria continua. La evaluación mundial de la degradación antropogénica de los suelos (GLASOD, 1991) ha demostrado que el 15 por ciento de la superficie total de las tierras en todo el mundo ha sufrido daños (en un 13 por ciento de los casos ligeros y moderados, y en un 2 por ciento graves y muy graves), debidos sobre todo a la erosión, la disminución de los nutrientes, la salinización y la compactación física. Estos efectos suelen traducirse en una reducción del rendimiento. La conservación y rehabilitación de tierras constituyen una parte esencial del desarrollo agrícola sostenible. Aunque existen suelos gravemente degradados en casi todas las regiones del mundo, los efectos negativos de un suelo degradado sobre la economía son más severos en los países que más dependen de la agricultura para obtener ingresos (WFS, 1996).

2.3 Degradación de suelo

2.3.1 Definición

- **La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)**

La FAO, en conjunto con la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), definen la degradación del sustrato como el proceso que rebaja la capacidad actual y potencial del suelo para producir, cuantitativa y cualitativamente, bienes y servicios.

La degradación del suelo es un problema para las personas, en gran medida vinculado a las actividades agropecuarias, aunque también hay otras actividades humanas que pueden causarla. Las causas principales son (FAO, 2015):

- Movimiento, despeje y desbrozado de tierras, incluyendo la tala de árboles y deforestación.
- El agotamiento de los nutrientes del suelo por malas prácticas agrícolas, como un mal uso de la rotación de cultivos
- Ganadería, incluyendo el sobrepastoreo.
- Riego y sobreexplotación de recursos hídricos.
- La expansión urbanística y el desarrollo comercial.
- Contaminación del suelo, incluyendo la debida a residuos.
- Circulación de vehículos off-road, es decir, fuera de los caminos y carreteras autorizados.
- Actividad minera, incluyendo la extracción de materiales, como piedra, arena y minerales.

Dentro del amplio concepto de degradación del Suelo se pueden distinguir diferentes clases (Dorronsoro, 2013):

a) Degradación de la fertilidad: Es la disminución de la capacidad del suelo para soportar vida. Se producen modificaciones en sus propiedades físicas, químicas, fisicoquímicas y biológicas que conllevan a su deterioro.

b) Erosión: La erosión, en general, es la disminución del relieve de la corteza terrestre por desgaste o supresión de materia, siendo esto el resultado de la acción combinada de varios factores, entre ellos: calor, frío, agua, viento, los gases y la vida vegetal y animal.

c) Contaminación: El suelo se puede degradar al acumularse en él sustancias a unos niveles tales que repercuten negativamente en el comportamiento de los suelos.

Entre las causas de la degradación de suelos se pueden nombrar las siguientes:

a) Meteorización: consiste en la alteración que experimentan las rocas en contacto con el agua, el aire y los seres vivos. Dentro de este tipo de causas de degradación podemos distinguir dos tipos:

- Meteorización física o mecánica: es aquella que se produce cuando, al bajar las temperaturas que se encuentran en las grietas de las rocas, se congelan con ella, aumenta su volumen y provoca la fractura de las rocas.
- Meteorización química: es aquella que se produce cuando los materiales rocosos reaccionan con el agua o con las sustancias disueltas en ella.

b) Erosión: consiste en el desgaste y fragmentación de los materiales de la superficie terrestre por acción del agua, el viento, etc. Los fragmentos que se desprenden reciben el nombre de detritos. Se puede clasificar en los siguientes tipos (Tabla 1)(Crosara, 2013):

Tabla 1. Tipos de Erosión (Crosara, 2013).

Tipos de erosión	
Por origen	Natural
	Antrópica
Por agentes causantes	Eólica
	Hídrica

Además se pueden clasificar por los factores ambientales que lo provocan. Dentro de los factores de erosión podemos distinguir dos causales naturales y antrópicas (Tabla 2):

Tabla 2. Clasificación de factores de erosión (Crosara, 2013).

Factores	Clasificación
Naturales	Clima
	Relieve
	Vegetación
	Tipo de Suelo
Antrópicos	Uso y manejo
	Tenencia de la tierra: propietario, medianero, arrendatario.
	Educación
	Falta de consulta técnica

Dentro de las consecuencias de la degradación de los suelos podemos encontrar a las cárcavas. Las cárcavas son definidas como zanjas más o menos profundas originadas por socavamientos repetidos sobre el terreno, debido al flujo incontrolado del agua que escurre ladera abajo (agua de escorrentía). Cuando las cárcavas evolucionan con crecimiento hacia arriba y hacia los lados de la ladera, toman el nombre de cárcavas remontantes. La presencia de cárcavas en un terreno indica un grado avanzado de degradación, ya que la mayoría de las veces se inician luego de (FEDERACAFÉ, 1975):

- La pérdida superficial del suelo por efecto del impacto de las lluvias.
- Destrucción de los agregados naturales del suelo.

- La erosión laminar y en surcos.
- Como consecuencia del uso y manejo inadecuado de los suelos y ausencia de prácticas preventivas de conservación.
- Por la construcción de vías sin obras adecuadas para conducción de aguas de escorrentía.
- Por descargas de caudales altos de agua sobre taludes inferiores sin disipación de su energía cinética.

Hudson (1982) explica la formación y avance ilimitado de una cárcava, mediante la fórmula de Manning, la cual relaciona el gradiente y la rugosidad del terreno con la velocidad de flujo, de manera que:

$$V = R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} n$$

Dónde:

V: Velocidad

R: Radio hidráulico

N: Coeficiente de rugosidad (vegetación)

S: Gradiente

Una vez ha comenzado la cárcava, el canal es de sección más angular y profunda que la original, es decir, aumenta R (Radio hidráulico). El cauce está libre de vegetación, de tal forma que el coeficiente de rugosidad (n), disminuye. Para que la velocidad (V) permanezca constante se debe disminuir el gradiente (S), o aumentar el coeficiente de rugosidad (n) mediante establecimiento de vegetación multiestrata. Esto es lo que ocurre casi invariablemente, el gradiente (S) del lecho es más llano que el original. A medida que

la cabeza de la cárcava retrocede curso arriba es mayor la altura de caída del agua. Dicho tramo es el que experimenta por lo general una erosión más activa. El efecto de cascada es el que erosiona el suelo ya que salpica y arremolina contra el escarpe. La parte más baja del mismo se erosiona, dejando la parte alta en saliente, hasta que cae dando lugar a una cara vertical, momento a partir del cual todo el proceso comienza de nuevo.

Al comenzar la cárcava, los cambios se manifiestan en un aumento del radio hidráulico R , disminución del coeficiente de rugosidad (n) y una disminución probable del gradiente (S). En resumen, el efecto general es que aumente la velocidad, razón por la cual, la erosión en cárcavas se perpetúa así misma y no se autocorriges.

- **Legislación Chilena**

Dentro de la legislación chilena la Ley sobre Fomento Forestal (DL 701), por “suelos degradados” se entiende que son aquellos suelos de secano y los de clase IV de riego, según la clasificación que utiliza el Servicio de Impuestos Internos (SII) en la tasación fiscal de los terrenos para determinar los avalúos agrícolas, que presenten categorías de erosión de moderada a muy severa, susceptibles de ser recuperados mediante actividades, prácticas u obras conservacionistas de uso del suelo. Cabe señalar que esta ley tiene por objeto regular la actividad forestal en suelos de aptitud preferentemente forestal y en suelos degradados e incentivar la forestación, en especial, por parte de los pequeños propietarios forestales y aquella necesaria para la prevención de la degradación, protección y recuperación de los suelos del territorio nacional.

Además dentro de las definiciones esta ley define por:

- Erosión moderada: Aquella en que los suelos presentan signos claros de movimiento y arrastre de partículas del manto y surcos.

- Erosión severa: Aquella en que los suelos presentan un proceso activo de movimiento y arrastre de partículas del manto y cárcavas.

Por otra parte, desde el año 1999 hasta 2009, estuvo vigente el decreto con fuerza de ley N°235, que establecía un Sistema de incentivos para la recuperación de suelos (SIRSD). Para los efectos de este decreto se entendía por suelos degradados, aquellos que por la carencia de fósforo, exceso de acidez, niveles de erosión, deterioro de la cubierta vegetal o por presentar otras limitaciones físicas, químicas o estructurales para su ocupación, no pueden ser utilizados eficientemente de modo sustentable en la producción agropecuaria.

Desde el año 2010 y por un plazo de doce años, la ley N°20.412, establece un Sistema de incentivos para la sustentabilidad agroambiental de los suelos agropecuarios (SIRSD-S). El reglamento que regula esta ley establece que:

“Suelos degradados son aquellos que presentan un deterioro de sus cualidades físicas, químicas o biológicas, que provocan una declinación en su capacidad actual o potencial para producir, sustentablemente, bienes y servicios”.

2.3.2 Erosión de suelo

La erosión comprende el desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales de suelo o roca por acción de la fuerza de un fluido en movimiento (Figura 1). La erosión puede ser generada tanto por el agua como por el viento.

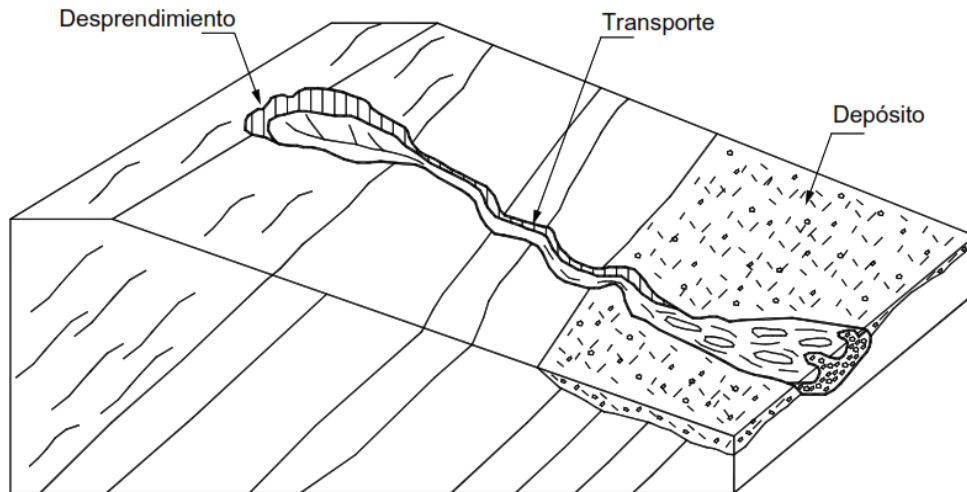


Figura 1. Proceso de erosión.

La erosión es el resultado de la acción de las fuerzas de fricción de gases o fluidos en movimiento. En el caso de la erosión producida por el agua, el proceso puede ser analizado iniciando por el desprendimiento de las partículas de suelo, debido al impacto de las gotas de lluvia y al mismo tiempo ocurre el proceso de flujo superficial o escorrentía, la cual hace que las partículas removidas sean incorporadas a la corriente y transportadas talud abajo. Adicionalmente, las corrientes generan procesos de desprendimiento de partículas por acción de la fuerza del agua en movimiento. Los procesos son muy complejos y es común que varios procesos actúen conjuntamente (Suárez, 2001).

La fuerza tractiva del agua y del viento en movimiento son las principales fuerzas que generan erosión superficial y la fuerza de gravedad es la principal fuerza que produce la erosión en masa. La susceptibilidad a la erosión depende del clima, las características del suelo, la morfología del terreno, la cobertura del suelo, y la intervención antrópica (Figura 2) (Suárez, 2001).

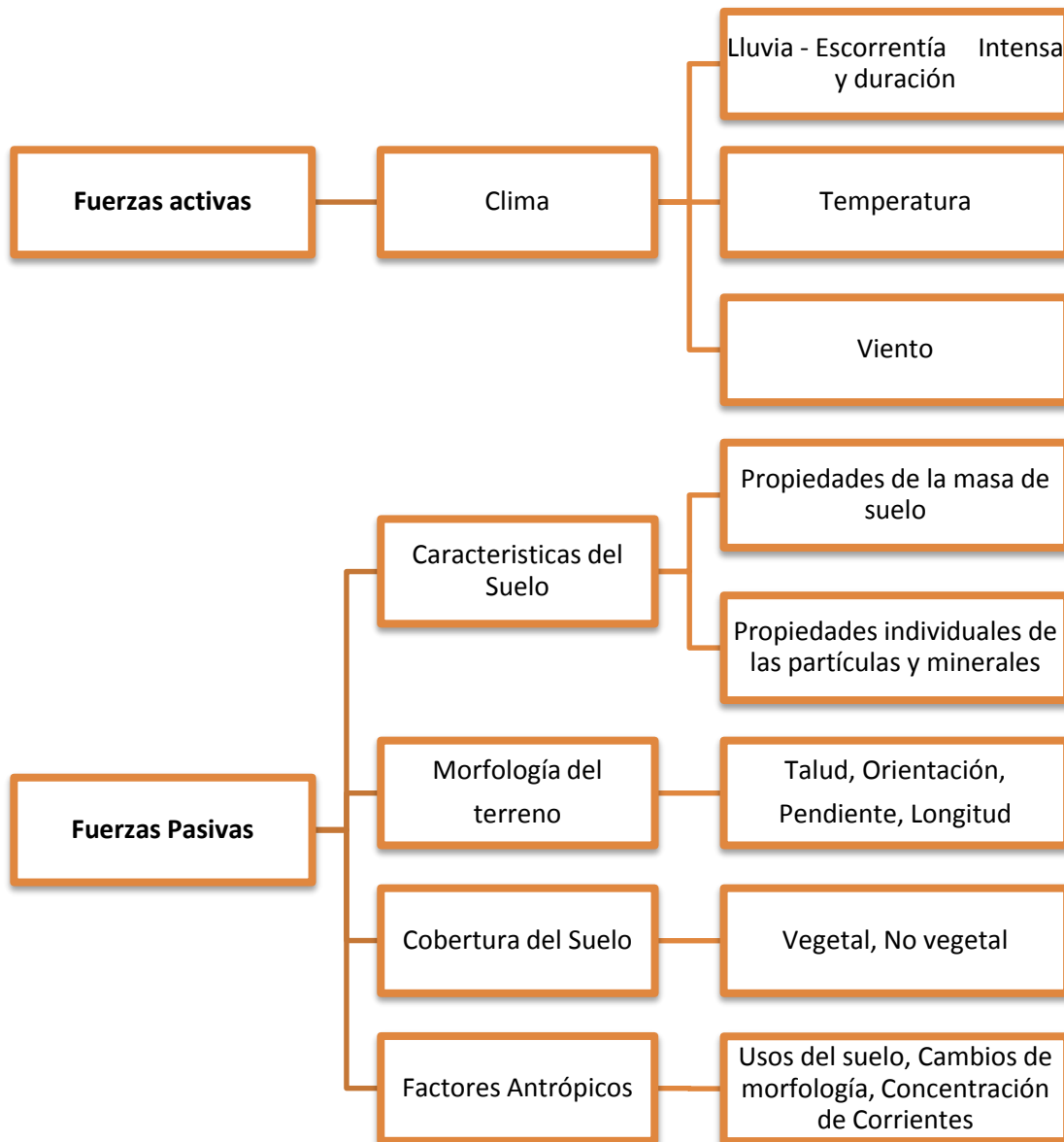


Figura 2. Factores que afectan la susceptibilidad a la erosión de los taludes y laderas (Suárez, 2001).

- **Erosión por el viento**

El movimiento del viento ejerce fuerzas de fricción y levantamiento sobre las partículas de suelo, desprendiéndolas transportándolas y depositándolas. La erosión por el viento ocurre cuando los suelos sin vegetación son expuestos a altas velocidades del viento. Cuando la velocidad del viento genera una fuerza tractiva superior a las fuerzas

gravitacionales y cohesivas de las partículas de suelo, el viento desprende las partículas y las transporta en suspensión (Suárez, 2001).

Las partículas de menor tamaño (0,1 a 0,5 mm) son movidas por el viento en una forma de saltos o brincos. Las partículas gruesas se mueven rodando y las finas son transportadas en suspensión (Figura 3). La acción más visible es la suspensión en la cual se pueden observar tormentas de polvo.

La erosión por viento es muy común en áreas de baja precipitación fluvial (menos de 375 mm / año) con suelos arenosos y bajos niveles de materia orgánica. El caso más frecuente de erosión por viento ocurre en los desiertos.

El movimiento del suelo por acción del viento es un resultado de la turbulencia de la velocidad. La velocidad requerida al iniciar el movimiento aumenta, al aumentar el tamaño de las partículas. Para la mayoría de los suelos esta velocidad es de aproximadamente 20 km/h a una altura de 30 centímetros por encima de la superficie (Gray y Sotir, 1996).

La velocidad requerida para el transporte de las partículas una vez se inició es menos que la requerida para el desprendimiento. La mayor parte de las partículas del suelo se transportan cerca de la superficie de la tierra a una altura no mayor a 1.0 metro. Aproximadamente 62 al 97% del total de las partículas es transportado en esta zona cerca de la superficie. Este hecho sugiere la utilidad de instalar barreras bajas o rompedores de viento para impedir el movimiento de estas partículas. La vegetación por ejemplo puede cumplir con este propósito adicionalmente a la de otras funciones de control de erosión y estabilidad del talud (Gray y Sotir, 1996).

Al disminuir la velocidad del viento o al encontrarse las partículas con una barrera estas caen o se sedimentan por acción de las fuerzas de gravedad.

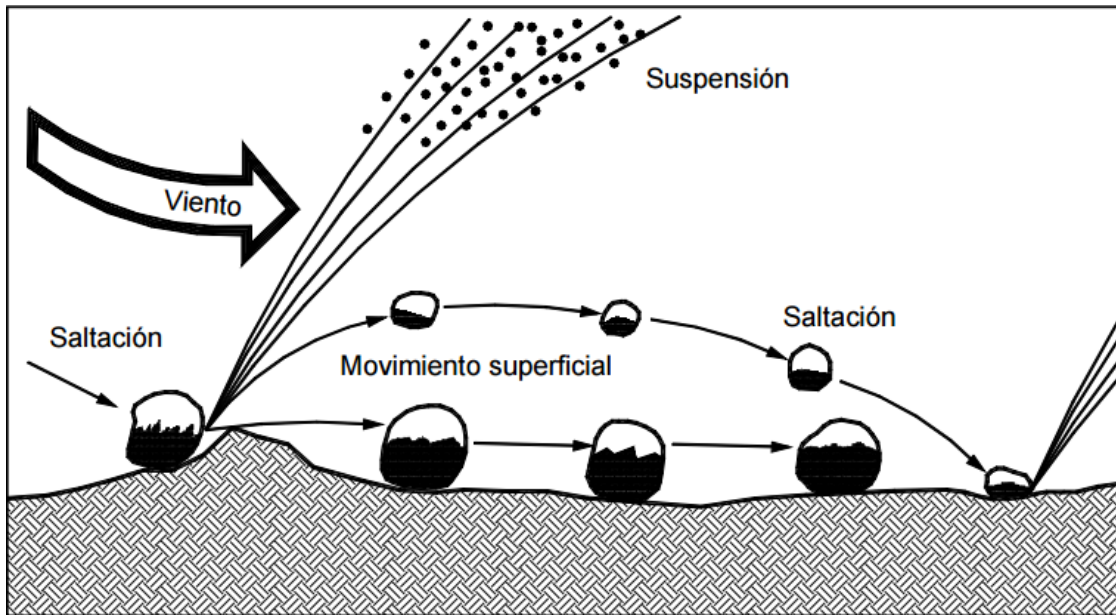


Figura 3. Mecanismo de erosión por acción del viento (Suárez, 2001).

- **Erosión por gotas de lluvia**

La erosión por golpeo de la lluvia (Splash erosion) ocurre por el impacto de las gotas de agua sobre una superficie desprotegida, el cual produce el desprendimiento y remoción de capas delgadas de suelo (Figura 4). Este impacto rompe la estructura del suelo y lo separa en partículas relativamente pequeñas. Estas partículas son luego transportadas por la esorrentía. Al caer una gota de lluvia levanta partículas de suelo y las reparte en un área de aproximadamente un metro cuadrado. Parte de la lluvia se infiltra y parte fluye sobre la superficie (Suárez, 2001).

En un suelo sin protección vegetal se calculan hasta cincuenta metros cúbicos de suelo removido por hectárea en una lluvia fuerte de una hora de duración (Suárez, 2001).

La erosión es una función del poder erosionante del agua y de la erosionabilidad del suelo. La erosión causada por la lluvia está determinada por la cantidad, intensidad y duración de la misma. Cuando la intensidad y cantidad de lluvias es alta la erosión será más rápida.

Cuando el terreno tiene pendiente de más del dos por ciento se forman pequeños surcos y en pendientes menores la erosión es laminar por la acción de la escorrentía que transporta el suelo desprendido por la lluvia. Para la eliminación de la erosión por gotas de lluvia se emplea la cobertura vegetal especialmente los pastos (Suárez, 2001).

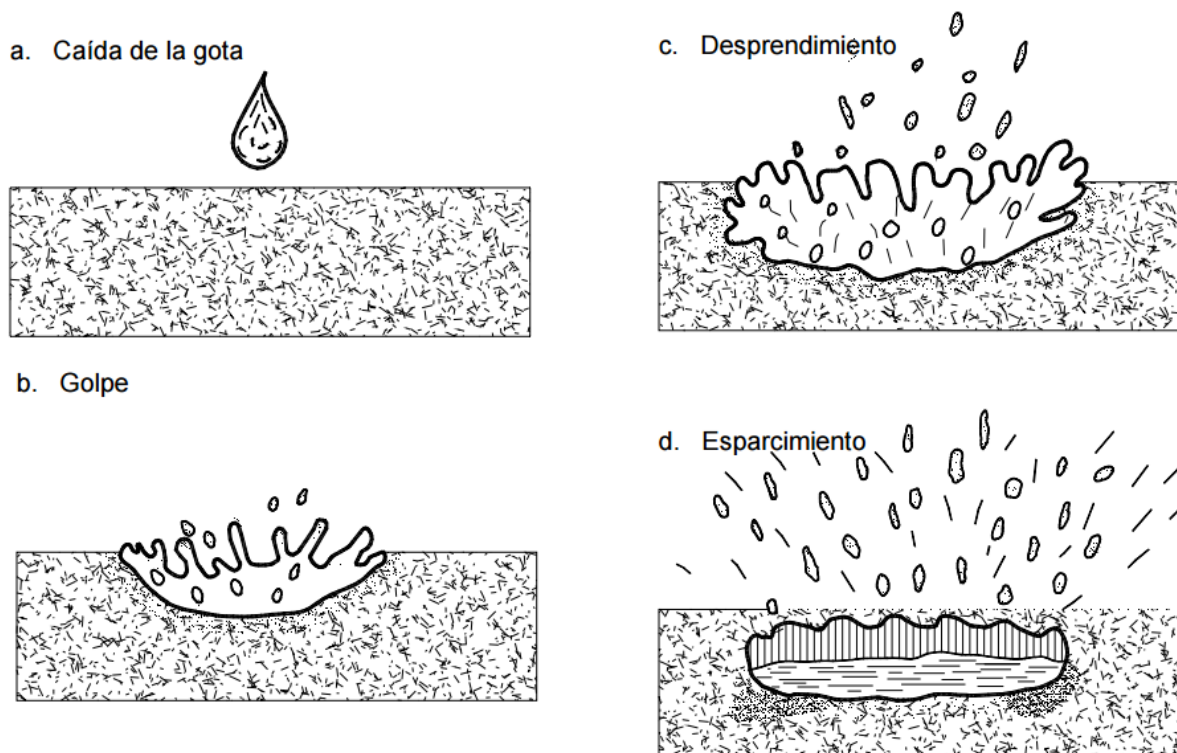


Figura 4. Erosión por golpeo de una gota de lluvia (Suárez, 2001).

- **Erosión laminar**

Las corrientes superficiales de agua pueden producir el desprendimiento de las capas más superficiales de suelo en un sistema de erosión por capas que se profundizan. La erosión laminar consiste en el desprendimiento y transporte en capas bien definidas superficiales de suelo por acción de la escorrentía difusa (Figura 5). El suelo se va perdiendo casi en forma imperceptible. Este tipo de erosión es muy común en los suelos residuales y en las zonas recientemente deforestadas (Suárez, 2001).

La acción de las gotas de lluvia altera el suelo superficial. El agua parcialmente se infiltra y parcialmente se acumula sobre la superficie del terreno formándose una capa delgada de agua con flujos de 2 a 3 milímetros de espesor. El flujo laminar es poco profundo en la cresta de la ladera pero la profundidad de flujo aumenta talud abajo. Éste tiene poco poder erosivo pero en partes se convierte en turbulento, aumentando en forma importante su capacidad de erosión. Al continuar la acción de la lluvia y al mismo tiempo ocurrir el flujo se genera turbulencia en el flujo, aumentando la capacidad de erosión. El flujo de agua toma un color marrón o amarillo por la presencia de sedimento. Las áreas de cultivos no permanentes son extraordinariamente susceptibles a la erosión laminar al igual que los suelos sin vegetación y los sujetos a sobre pastoreo de ganado (Suárez, 2001).

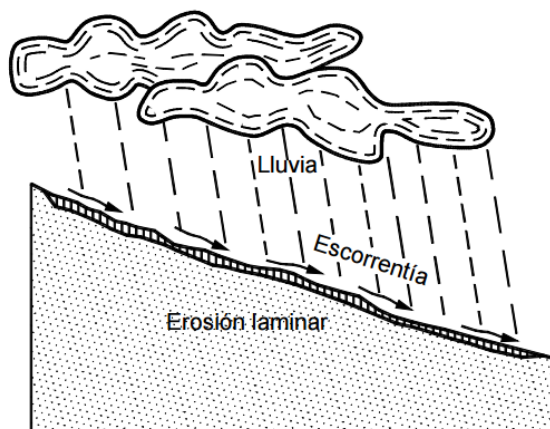


Figura 5. Proceso de erosión laminar (Suárez, 2001).

- **Erosión en surcos**

La concentración del flujo en pequeños canales o rugosidades hace que se profundicen estos pequeños canales formando una serie de surcos generalmente semiparalelos.

La erosión en surcos ocurre cuando el flujo superficial empieza a concentrarse sobre la superficie del terreno, debido a la irregularidad natural de la superficie. Al concentrarse el

flujo en pequeñas corrientes sobre una pendiente, se genera una concentración del flujo el cual por la fuerza tractiva de la corriente produce erosión (Figura 6), formándose pequeños surcos o canales, los cuales inicialmente son prácticamente imperceptibles pero poco a poco se van volviendo más profundos. En estos surcos la energía del agua en movimiento adquiere cada vez, una fuerza mayor capaz de desprender y transportar partículas de suelo. Inicialmente, los pequeños canales presentan una forma en V la cual puede pasar a forma en U (Figura 7) (Suárez, 2001).

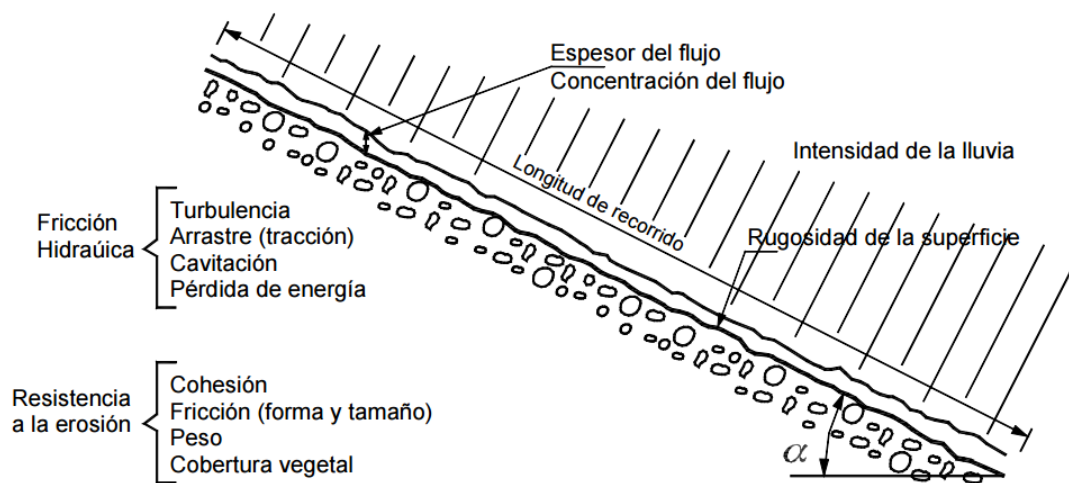


Figura 6. Elementos que intervienen en la formación de surcos (Suárez, 2001).

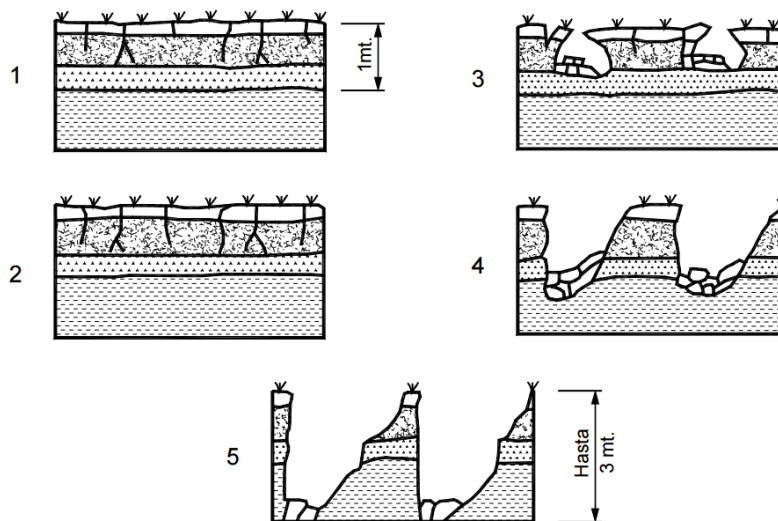


Figura 7. Procesos de formación de surcos y cárcavas (Suárez, 2001).

Los surcos paralelos forman una red de drenaje en la cual los surcos más profundos rompen la divisoria de los surcos más pequeños, llevando el agua al punto más bajo. Este proceso fue llamado por Horton (1945) como «micro piratería». Su efecto es que talud abajoes mayor su espaciamiento y la profundidad predominante es la de los surcos de mayor poder erosivo. Este proceso puede ocurrir durante el tiempo de una sola lluvia o con el proceso continuado de varias lluvias. La capacidad erosiva de los surcos es tal, que si la cobertura vegetal y de raíces no es muy fuerte, puede romper la vegetación. Los surcos en ocasiones pasan por debajo de las raíces.

La erosión en surcos es la causante del mayor porcentaje de producción de sedimentos sobre la superficie de la tierra (Schwab *et al.*, 1981). La mayor parte del volumen total de sedimentos transportados por procesos erosivos ocurre en forma de surcos, después de la acción del golpeo de la lluvia. La acción de golpes de la lluvia y el flujo de agua generado en la dirección principal de la pendiente, forma inicialmente microsurcos de erosión (Rills) y a medida que la longitud de flujo es mayor los surcos se hacen más profundos y de menor densidad por una unidad de área.

Cuando los surcos se hacen más profundos y más anchos se dice que los surcos se convirtieron en cárcavas. Si los canales de erosión tienen profundidades de menos de 30 centímetros se les clasifica como surcos y si la profundidad es mayor, como cárcavas. Los surcos pueden eliminarse con rastrillado y siembra de vegetación. Las cárcavas requieren de obras más complejas de ingeniería.

El poder de erosión de los surcos puede detenerse construyendo barreras de vegetación intensa que actúan como línea de control y construyendo bermas y cunetas.

El agua infiltrada puede fluir subsuperficialmente en forma semiparalela a la superficie del terreno. Si los suelos son muy erosionables, este flujo puede producir erosión interna formando pequeños canales subterráneos o túneles (Figura 8). Estos túneles se presentan

especialmente cuando la cobertura vegetal es pobre y las raíces son poco densas o poco profundas. La erosión en túneles se inicia por el movimiento del agua en suelos dispersivos o erosionables y en ocasiones ocurre a lo largo de estructuras heredadas en el suelo residual o a lo largo de grietas o de cavernas de hormigas u otros animales (Suárez, 2001).

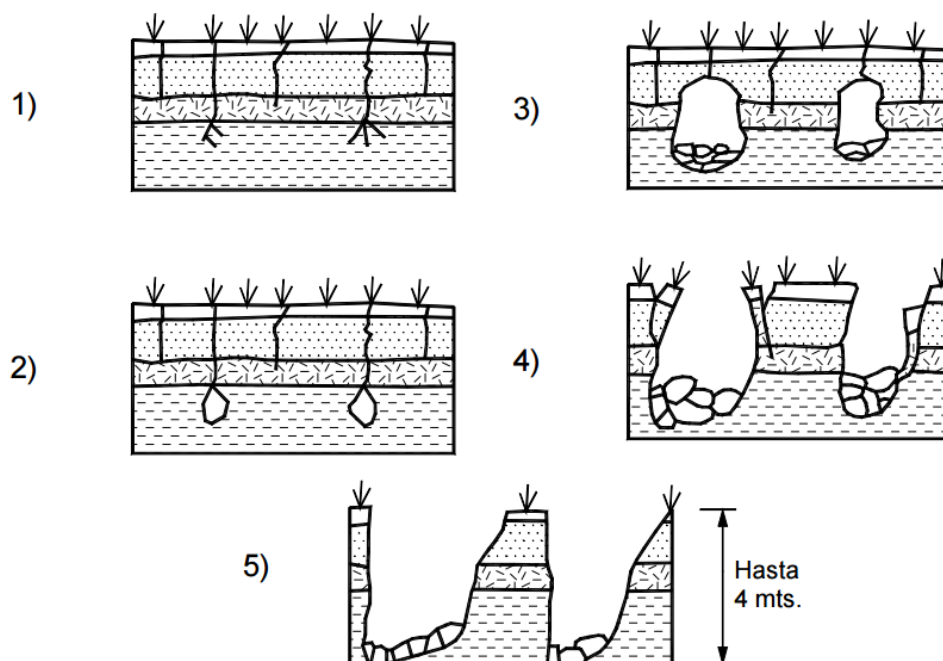


Figura 8. Procesos de formación de cárcavas por flujo subsuperficial.

Los sedimentos en los surcos se transportan por fuerzas muy similares a las de las corrientes de agua permanentes. Parcialmente los sedimentos se transportan suspendidos, mientras las partículas de mayor tamaño van rodando a lo largo del surco (Suárez, 2001).

- **Erosión en cárcavas**

Los surcos pueden profundizarse formando canales profundos o la concentración en un sitio determinado de una corriente de agua importante puede generar canales largos y

profundos llamados cárcavas. Una vez se inicie la cárcava es muy difícil de suspender el proceso erosivo. Al profundizarse y ampliarse los surcos de erosión se convierten en cárcavas, o varios pequeños surcos pueden unirse y crecer para formar una cárcava (Suárez, 2001).

Se denomina cárcava a un canal de erosión con una sección superior a un pie². Estos canales ya no pueden ser eliminados con prácticas agrícolas. Las cárcavas tienen una mayor capacidad de transporte de sedimentos que los surcos, debido a que las tasas de flujo son mayores. Las cárcavas actúan como cauces de concentración y transporte de agua y sedimentos. En este proceso una cárcava con cauce en V captura a las vecinas y va transformando su sección de una V ampliada a U. Al inicio las cárcavas son en V pero generalmente terminan con forma en U. Las cárcavas son canales mucho más largos que los surcos. Estos canales transportan corrientes concentradas de agua durante e inmediatamente después de las lluvias. Las cárcavas van avanzando o remontando hacia arriba formando una o varias gradas o cambios bruscos de pendiente (Figura 9) (Suárez, 2001).

Las áreas más susceptibles a erosión en cárcavas son aquellas de topografía de alta pendiente y mantos de suelo de gran espesor. Las mesetas semiplanas que recogen gran cantidad de aguas de escorrentía y a su vez tienen taludes de pendiente fuerte lateral presentan especial susceptibilidad a la formación de cárcavas, especialmente cárcavas anchas. Las áreas más afectadas por cárcavamientos son aquellas que tienen suelos dispersivos o altamente erosionables.

En el caso de suelos expansivos los procesos de humedecimiento y secamiento facilitan la formación de las cárcavas. La parte más crítica es la superficie del terreno en la parte alta del talud exactamente por debajo de las raíces de vegetación. Esta zona se erosiona, aún después de un proceso de revegetalización del talud general. En el caso en el cual aparecen suelos duros en el talud como afloramientos de roca, se van formando gradas y

la cárcava avanza indistintamente en cada nivel. Así mismo, la eliminación de la cobertura vegetal o la destrucción de la estructura del suelo por remoción de la capa protectora superficial, expone el suelo a la erosión. La formación de cascadas o caídas de agua acelera el proceso de cárcavamiento (Suárez, 2001).

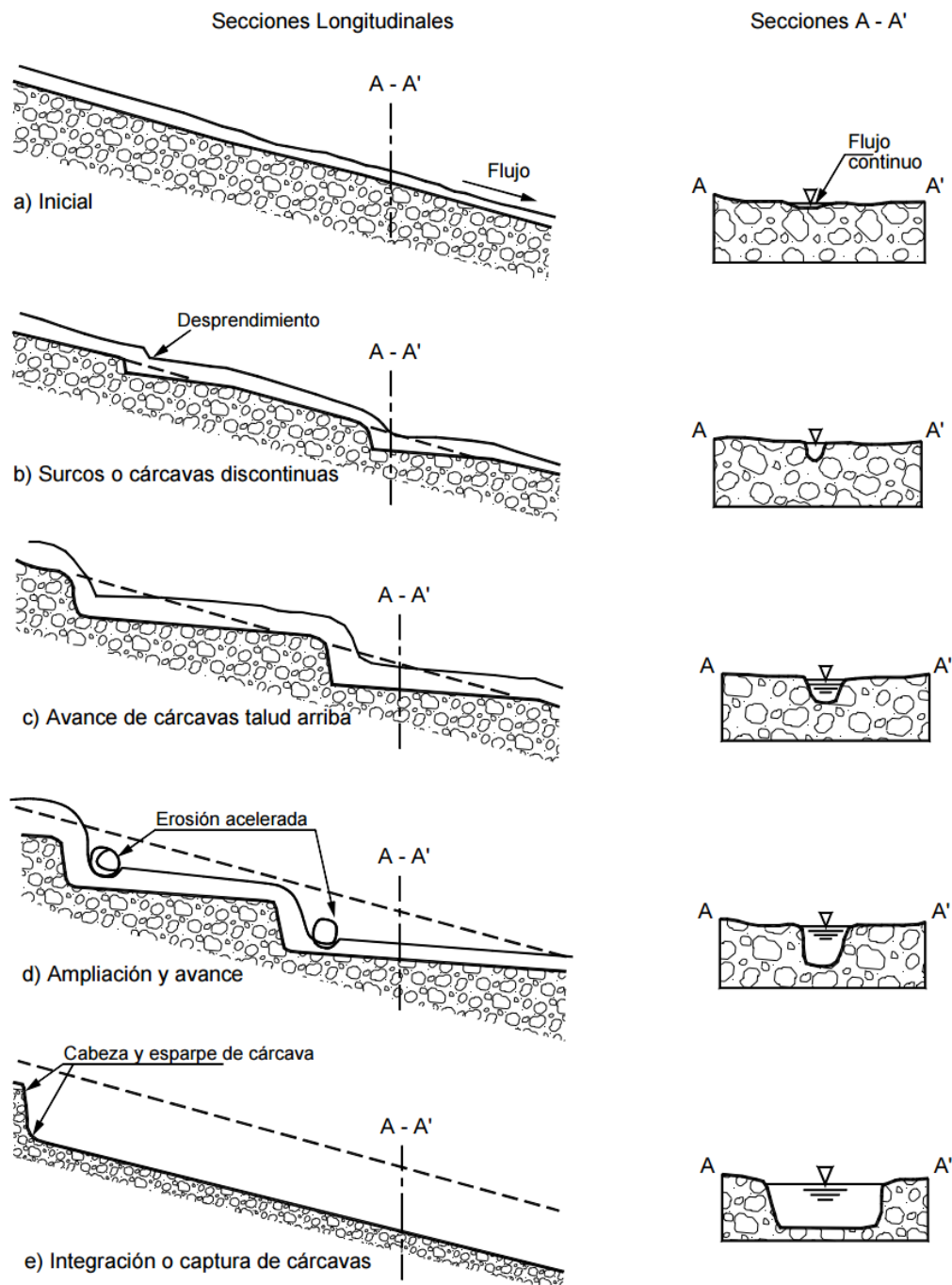


Figura 9. Etapas en el desarrollo de una cárcava (Adaptado de Leopold, Wolman y Miller, 1964)

Aunque el volumen total de pérdidas de suelo en el mundo debida a la erosión en cárcavas es comúnmente menor que la debida a la erosión laminar y en surcos, los daños asociados con la erosión en cárcavas puede ser mucho más significativo y los riesgos para las vidas humanas pueden ser mayores. Las cárcavas no son tan significativas como los surcos en términos del total de sedimentos que se producen en el mundo, pero son mucho más destructivos en términos de daño a carreteras, terraplenes, ciudades, etc. Una cárcava significa la pérdida de grandes volúmenes de suelo en un solo sitio. Las cárcavas profundas y anchas alcanzan profundidades en algunos casos superiores a 50 metros, limitando en forma importante el uso de la tierra y generando grandes fuentes de sedimentos para las corrientes (Suárez, 2001).

Las cárcavas son muy difíciles de estabilizar y controlar y para su estabilización se deben controlar tres partes así (Figura 10):

- Erosión en el fondo
- Erosión lateral o ampliación de la cárcava
- Erosión en la cabeza o avance hacia arriba de la cárcava

La dinámica de la formación de las cárcavas es compleja y no se encuentra totalmente entendida hasta el momento. Se ha propuesto varios modelos estadísticos para predecir el crecimiento y desarrollo de las cárcavas (Beer y Johnson 1963).

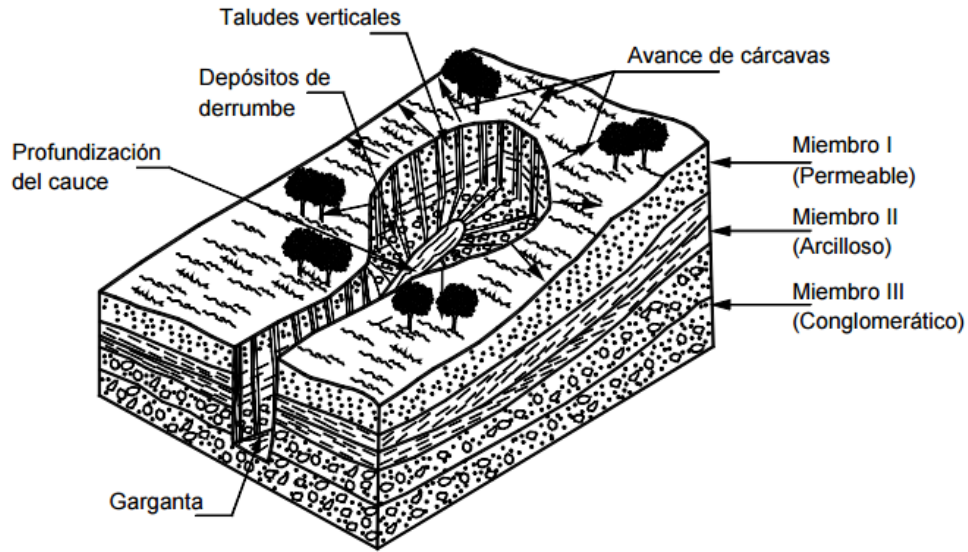


Figura 10. Esquema general del proceso de erosión en cárcavas.

2.3.3 Contaminación del suelo

La contaminación del suelo consiste en una degradación química que provoca la pérdida parcial o total de la productividad del suelo como consecuencia de la acumulación de sustancias tóxicas en unas concentraciones que superan el poder de amortiguación natural del suelo y que modifican negativamente sus propiedades. Esta acumulación se realiza generalmente como consecuencia de actividades humanas exógenas, aunque también se puede producir de forma natural o endógena cuando los procesos de edafización liberan elementos químicos contenidos en las rocas y los concentran en el suelo alcanzando niveles tóxicos. Un ejemplo de esto último lo tenemos en suelos muy evolucionados formados sobre rocas serpentinizadas con altos contenidos en metales pesados como el Cr, Ni, Cu y Mn, entre otros, que se concentran en los suelos a medida que la intensa edafogénesis produce el lavado de otros constituyentes esenciales como el Ca, Mg e incluso el Si. Conforme se desarrolla esta concentración residual metálica, estos elementos que inicialmente eran constituyentes no asimilables de los minerales primarios pasan a formas más activas, solubles y biodisponibles que influyen negativamente sobre la actividad biológica (Macías, 1993).

Es frecuente encontrar elevadas concentraciones de metales pesados, especialmente cobre, que se añaden a la dieta alimenticia como complemento de crecimiento y defensa contra parásitos, que pueden llegar a hacer limitante su aplicación agrícola. Por otra parte, también es frecuente que haya presentes microorganismos patógenos capaces de sobrevivir durante algún tiempo sobre el suelo y los cultivos por lo que el aspecto sanitario debe ser tenido muy en cuenta (Ilarri, 2001).

En Chile la situación de degradación de suelo no escapa a la situación mundial. En este sentido el lugar de estudio posee precedentes de presencia de metales pesados. Es así como el estudio interdisciplinario “Desarrollo de metodologías integradas de biomejoramiento para la recuperación de suelos contaminados con metales pesados”, determinó que en la zona de estudio se presenta una fuerte erosión de los suelos y consecuentemente una disminución de materia orgánica, mostrando en la actualidad un suelo de tipo limo arenoso (PUCV, 2003).

Otra característica de esta situación es la acidez de los suelos lo cual provoca que las plantas tengan dificultad para absorber nutrientes como Ca y Mg, pero aumenta la solubilidad de ciertos metales como el Cu y Zn (esto provoca un efecto tóxico en las plantas) y la disponibilidad del elemento fósforo por la precipitación de fosfato insoluble al aumentar la solubilidad de metales como el hierro (PUCV, 2003).

Tradicionalmente se llama metal pesado a aquel elemento metálico que presenta una densidad superior a 5 g/cm³, aunque a efectos prácticos en estudios medioambientales se amplía esta definición a todos aquellos elementos metálicos o metaloides, de mayor o menor densidad, que aparecen comúnmente asociados a problemas de contaminación (PUCV, 2003).

Algunos de ellos son esenciales para los organismos en pequeñas cantidades, como el Fe, Mn, Zn, B, Co, As, V, Cu, Ni o Mo, y se vuelven nocivos cuando se presentan en

concentraciones elevadas, mientras que otros no desempeñan ninguna función biológica y resultan altamente tóxicos, como el Cd, Hg o el Pb. Estos elementos tienen su origen en el substrato litológico, apareciendo bien como elementos nativos o incorporados normalmente en las estructuras de sulfuros, silicatos, carbonatos, óxidos e hidróxidos. Los aportes dominantes se producen por deposición atmosférica y afectan de forma significativa a los primeros centímetros de suelo. Son fuentes importantes de metales en suelos las cenizas y escorias de los procesos de combustión de carbón fósil o derivados del petróleo (Figura 1), el aporte directo procedente de actividades agrícolas (adición de fertilizantes, pesticidas, lodos de depuradoras, compost, etc) y su acumulación a partir de residuos industriales, urbanos y mineros (metalurgia, fabricación de pinturas, barnices, disolventes, baterías, textiles, curtidos, etc) (PUCV, 2003).

2.3.1 Contaminación visual

La contaminación visual se refiere al abuso de ciertos elementos “no arquitectónicos” que alteran la estética, la imagen del paisaje tanto rural como urbano, y que generan, a menudo, una sobre estimulación visual agresiva, invasiva y simultánea. Dichos elementos pueden ser carteles, cables, chimeneas, antenas, postes y otros elementos, que no provocan contaminación de por sí; pero mediante la manipulación indiscriminada del hombre (tamaño, orden, distribución) se convierten en agentes contaminantes. Todos estos elementos descriptos influyen negativamente sobre el hombre y el ambiente disminuyendo la calidad de vida (Castillo, 2002).

La contaminación visual no es tan sólo un problema de estética, puede afectar tanto a la salud psicofísica como al desenvolvimiento de la conducta humana y a la eficiencia laboral. En última instancia, tiene que ver con nuestra calidad de vida. Una de las definiciones de “Contaminación visual” es: “Cualquier elemento que distorsione la observación del paisaje natural o urbano” (Castillo, 2002).

Para comprender como afecta la contaminación paisajística al caso de esta investigación es necesario conocer cómo se relacionara la instalación existente en el lugar con el entorno y paisaje que este proporciona (Castillo, 2002).

2.3.2 Pérdida de fertilidad del suelo

En términos generales la degradación del suelo provoca alteraciones en el nivel de fertilidad del suelo y consecuentemente en su capacidad de sostener una agricultura productiva.

Según Bertoni y Lombardi Neto (1985) las tierras agrícolas se vuelven gradualmente menos productivas por cuatro razones principales:

- Degradación de la estructura del suelo;
- Disminución de la materia orgánica;
- Pérdida del suelo; y
- Pérdida de nutrientes.

Estas razones son efectos producidos básicamente por el uso y manejo inadecuado del suelo y por la acción de la erosión acelerada.

Según Mielniczuk y Schneider (1984), tres son, esquemáticamente, las etapas básicas de degradación del suelo (Figura 11).

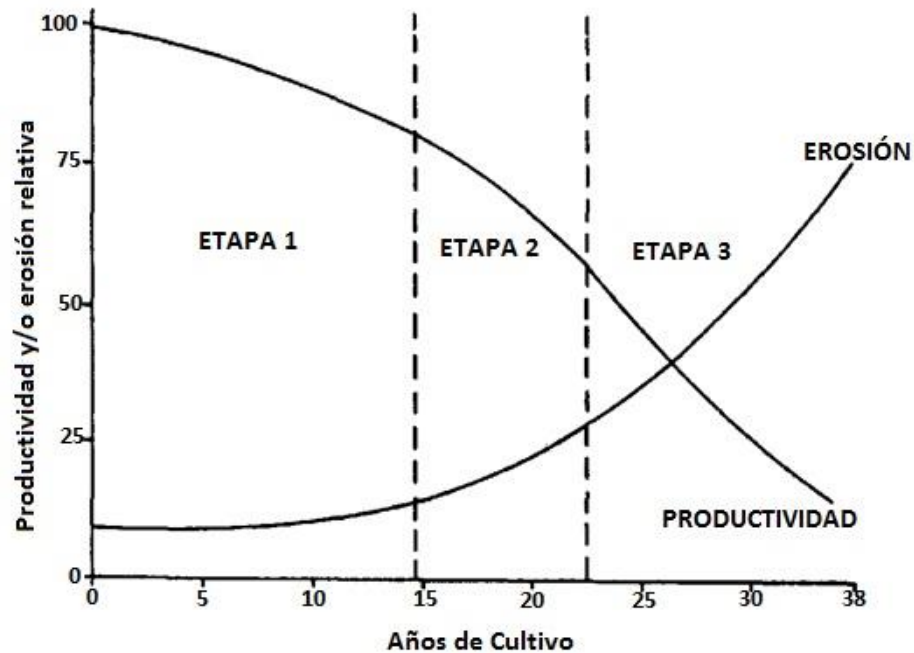


Figura 11. Etapas de degradación del suelo bajo explotación agrícola inadecuada.

En la etapa 1 las características originales (materia orgánica y estructura) son destruidas gradualmente. El usuario de la tierra no percibe este fenómeno, porque la erosión ocurre en niveles tolerantes y el rendimiento de los cultivos se mantiene estable por la aplicación normal de fertilizantes y de enmiendas.

En la etapa 2 la materia orgánica alcanza valores bajos y el suelo pierde estructura. Por el uso intensivo de implementos agrícolas se produce la aparición de una capa compactada que impide la infiltración del agua y la penetración de las raíces. La erosión se vuelve acelerada y el rendimiento de los cultivos se reduce severamente. La aplicación de enmiendas y fertilizantes se vuelve menos eficaz, sea por las condiciones físicas adversas al desarrollo de las plantas, o por las grandes pérdidas de suelo y de nutrientes que han ocurrido por la erosión, disminuyendo su efecto actual y residual.

En la etapa 3 el proceso de erosión es tan violento que la tierra comienza a ser abandonada por el agricultor, debido a la baja productividad y dificultad de operación de máquinas a causa de la existencia de surcos y cárcavas en el campo. El tiempo que lleva a

un suelo cultivado a llegar a la etapa 3 depende de la intensidad de aplicación de las prácticas inadecuadas de manejo, de su pendiente y textura, que se relacionan mucho con su resistencia a la erosión hídrica.

La pérdida de suelo se caracteriza por pérdida de iones, la particularidad que presentan estos iones es su alta movilidad, no siendo retenidos por las partículas coloidales, por lo que con el agua de lluvia o riego, pueden lavarlos fácilmente más allá de la zona radicular, llegando rápidamente al acuífero freático. Los nitratos son buenos indicadores de la contaminación microbiológica del agua del humedal. (Candela et. al., 1998)

En diversos trabajos se ha planteado que la problemática del P en los ecosistemas pasa por las pérdidas de este elemento, por escurrimiento superficial, y termina desembocando en ríos, lagos, lagunas y arroyos generando la eutrofización de los mismos. (Candela et. al., 1998).

En el suelo estos iones son retenidos por las partículas coloidales (arcillas, materia orgánica), fijados o precipitados por iones como el calcio, hierro o aluminio. Debido a esto al agregarlos como fertilizantes orgánicos u inorgánicos se inmovilizan con facilidad y tienen escasa posibilidades de movilizarse (Candela et. al., 1998).

2.4 Evaluación de suelo

Para conocer cuánto suelo se pierde por efecto de la erosión, a lo largo de la historia se han ido desarrollando, diversos métodos. La complejidad de los mismos no estaba definida, pero con los avances de la tecnología y estudios técnicos más acabados, a día de hoy se ha logrado obtener modelos más acabados y estandarizados. En el año 1979 “La metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos”, define tres fuentes de información para la evaluación de degradación de suelos:

- Observación directa.
- Observación por teledetección.
- Observaciones de los factores que afectan a la degradación en los efectos nocivos de la degradación.

Como los datos obtenidos por la observación directa son escasos, normalmente cada proceso de degradación se evaluó mediante el uso de un modelo simple en forma general (GLASOD, 1991):

$$D = f(C, S, T, V, L, M)$$

Dónde:

D: Degradación de suelo

C: Factor de agresividad Climática

S: Factor de suelo

T: Factor Topográfico

V: Factor de Vegetación (natural)

L: Factor de uso de Tierra

M: Factor de Gestión

La relación entre las variables en un comienzo no estaba bien definida, es así como posteriormente se desarrollan modelos para el cálculo de pérdida de suelo. A continuación se describen, cronológicamente, algunos métodos utilizados para la estimación de suelo perdido.

2.4.1 Modelos de erosión en la actualidad

A continuación se presentan diversos modelos disponibles en la web, los cuales han sido desarrollados por organismos tanto nacionales como internacionales (Soil Erosion, 2016):

Erosión hídrica:

- CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems, 1980): es un modelo de simulación de base física, donde se puede estimar en forma diaria la esorrentía, la erosión por transporte de sedimentos, nutrientes de las plantas y el rendimiento de pesticidas de las áreas de gran tamaño. El componente hidrológico consta de dos opciones. Cuando el usuario sólo dispone de los datos de precipitación diaria, el modelo del número de curva SCS se utiliza para estimar la esorrentía superficial. Si se dispone de datos de precipitación por hora o de punto de interrupción, se utiliza un modelo basado en infiltración para simular la esorrentía.
- ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation, 1982): es un modelo destinado a simular el comportamiento de las cuencas hidrográficas que tienen la agricultura como su principal uso de la tierra, durante e inmediatamente después de un evento de lluvia. Su principal aplicación se previó que fuese la planificación y la evaluación de diferentes estrategias para el control de la contaminación de fuentes no puntuales en las zonas de cultivo intensivo.
- GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems, 1987): Este modelo fue desarrollado para simular en campo, las cargas abajo hacia zona radicular de agua, sedimentos, plaguicidas, nutrientes vegetales y de las interacciones complejas de gestión del suelo en base al clima.

- EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator, 1990): es un modelo de cultivo generalizado, que simula el crecimiento del cultivo diario en una escala de una hectárea. Como la mayoría de los modelos de proceso de crecimiento de plantas, predice la biomasa vegetal mediante la simulación de la fijación de carbono, mediante la fotosíntesis, la respiración de mantenimiento, y la respiración de crecimiento. Varios cultivos diferentes pueden ser cultivadas en rotación dentro de la ejecución del modelo. Se utiliza el concepto de eficiencia en el uso de luz en función de la radiación fotosintéticamente disponible (PAR) para predecir la biomasa. EPIC ha sido modificado para simular los efectos directos de dióxido de carbono en la atmósfera sobre el crecimiento vegetal y el uso del agua. El manejo del cultivo se incorpora de manera explícita en el modelo.
- KINEROS2 (Kinematic runoff and erosion model, 1990): es un modelo orientado a eventos de base física que describe los procesos de intercepción, infiltración, escorrentía superficial y la erosión de cuencas pequeñas agrícolas y urbanas. La cuenca está representado por una cascada de canales; las ecuaciones diferenciales parciales que describen flujo superficial, flujo de canal, la erosión y transporte de sedimentos se resuelven mediante técnicas de diferencias finitas. La variación espacial de la precipitación, infiltración, escorrentía, y los parámetros de erosión puede ser acomodadas. KINEROS se puede utilizar para determinar los efectos de diversas características artificiales tales como desarrollos urbanos, pequeños embalses de detención, o canales alineados en hidrogramas de crecida y la producción de sedimentos.
- MWISED (Modelling Within-Storm Sediment Dynamics, 1992): el modelo influyo en el desarrollo de los otros modelos de erosión, en particular el modelo de la erosión del suelo Limburg (LISEM, 1996). Un equipo italiano de Lorenzo Borselli está desarrollando actualmente una nueva versión del modelo.

- LISEM (Limburg Soil Erosion Model, 1994): El modelo utiliza ecuaciones con base física para describir la intercepción, infiltración y el transporte de agua del suelo, almacenamiento en depresiones superficiales, salpicaduras y desprendimiento, y la capacidad de transporte por tierra del canal de flujo.
- EROSION-3D (1995): es un modelo de proceso basado en principios físicos para la predicción de la erosión del suelo en las zonas de captación de agua, causadas por naturalmente o por una serie de eventos de precipitación. Schmidt (1991), en el Instituto de Ciencias Geográficas de la Universidad Libre de Berlín, desarrollo los fundamentos teóricos de este modelo. Estos se instalaron inicialmente en el modelo de pronóstico a la EROSION-2D que se puede aplicar a un perfil con pendiente.
- EROSION-2D/3D (1996): es un modelo de ordenador basado en procesos probados en campo para la predicción de la escorrentía superficial y la erosión del suelo por agua en tierras agrícolas. La aplicación de EROSION-2D/3D requiere información basada en la trama de las condiciones del suelo y las precipitaciones. La mayoría de estas variables son comúnmente accesibles, excepto los siguientes parámetros específicos modelo: factor de daño, la rugosidad superficial y la resistencia a la erosión. La parametrización de la EROSIÓN-2D/3D utiliza un simulador de lluvia en pequeña escala y la simulación de la escorrentía de aguas arriba (Schmidt *et al.*, 1999).
- RILLGrow 1 (1998): fue el primero, muy simple, intento de construir un modelo para la iniciación y el desarrollo de conceptos de riachuelo. Utiliza datos de microtopografía inicial para generar patrones realistas; Sin embargo, no opera dentro de un cierto dominio del tiempo.
- SWAT (Soil and Water Assessment Tool, 1998): modelo de escala desarrollado para cuantificar y predecir los impactos de las prácticas de manejo del suelo sobre el agua, los sedimentos, y los rendimientos químicos para la agricultura en las grandes

cuencas complejas con suelos diferentes, el uso del suelo y las condiciones de manejo durante largos períodos de tiempo.

- AGNPS (Agricultural Non-Point Source pollution model, 1989): es una herramienta para la evaluación de los efectos de las decisiones de gestión, que afectan el agua, los sedimentos y cargas químicas dentro de un sistema de cuencas.
 - AGNPS-UM (Agricultural Non-Point Source pollution model, modified, 1999): se aplica el USLE-M en el modelo de la contaminación de fuentes no puntuales agrícolas.
- MOSES (Modular Soil Erosion System, 2000): Durante el período 1996-2000, los equipos de modelado RUSLE, RWEQ, Weps y WEPP trabajaron juntos en un proyecto conjunto llamado Moses (Sistema modular de la erosión del suelo) con el objetivo de crear una interfaz común y base de datos para llevar a cabo simulaciones con cualquiera de los 4 modelos. Muchas reuniones y sesiones de diseño de pantalla se produjo, ya finales de 2000, el primer prototipo de software MOSES-1 fue liberado que se basa en el modelo de la erosión del agua RUSLE-2 y la interfaz se combina con el modelo de la erosión eólica WEPS.
- RILLGrow 2 (2000): modelo de manera similar utiliza los datos para microtopografía inicial de un área unrilled para predecir patrones Rill, así como las características de transporte de flujo / sedimentos. Mientras que representa los procesos de flujo y la erosión más realista que hace RillGrow 1, todavía es un modelo relativamente simple.
- WATEM (Water and Tillage Erosion Model, 2000): es un modelo para simular la erosión y deposición por procesos hídricos y de labranza en un paisaje de dos dimensiones. A diferencia de los modelos dinámicos más sofisticados (por ejemplo WEPP o EUROSEM), la variabilidad de los parámetros de WATEM se centra en el

espacio, y menos en lo temporal. WATEM permite la incorporación de la estructura del paisaje o la organización espacial de las diferentes unidades de tierra y la conectividad entre ellos. Con el fin de evitar problemas mayores con respecto a la variabilidad espacial de los valores de los parámetros y la incertidumbre de las estimaciones de los parámetros, WATEM es un modelo de topografía simple. El componente de agua de WATEM utiliza una versión adaptada de la USLE Revisada (RUSLE) ya que los valores (aproximados) de los parámetros están disponibles para muchas áreas.

- EGEM (Ephemeral Gully Erosion Model, 1999): tiene dos componentes principales, de los cuales el componente de la hidrología es un modelo de proceso físico basado en el número de la curva. El componente de la erosión utiliza las salidas de la hidrología para resolver una combinación de relaciones empíricas y ecuaciones de proceso físico con el fin de calcular la anchura final y la profundidad de la hondonada efímera.
 - REGEM (Revised Ephemeral Gully Erosion Model, 2001): incluye flujos inestables de escorrentía o tormenta. Permite también determinar la anchura del canal de descarga, permitiendo predecir la forma y anchura en un punto de tiempo y espacio definido. Además, permite el enrutamiento de cinco distintas clases de tamaño para partículas (arcilla , limo , arena y pequeñas y grandes agregados) a través del barranco y la clasificación aguas abajo de estos sedimentos
- SERAE (Soil Erosion Risk Assessment in Europe, 2001): el objetivo de este trabajo fue desarrollar y aplicar una metodología basada en los conocimientos y los datos disponibles para la evaluación del riesgo de erosión del suelo a escala europea. Los factores que influyen en la erosión se clasificaron para las diversas situaciones geográficas existentes en Europa y los mecanismos de erosión se expresaron con la ayuda de reglas empíricas y experimentales definidos por expertos. La ocupación del suelo y la formación de costras en los suelos cultivados fueron considerados como

factores clave que influyen en la escorrentía y el riesgo de erosión. El modelo se basa en la premisa de que la erosión del suelo se produce cuando el agua que no puede infiltrarse en el suelo se convierte en escorrentía superficial y se mueve por el suelo pendiente abajo.

- STREAM (Sealing, Transfer, Runoff, Erosion, Agricultural Modification, 2001): modelo utiliza la metodología definida por Souchère para calcular el flujo. Entre los campos, caminos y pistas se consideran tanto cuando son impermeable y lisas y mantienen el comportamiento de un modelo habitual escorrentía topográfico derivado de un modelo de elevación digital (DEM) hacia el movimiento de flujo de agua, es decir, el flujo se dirige hacia la celda adyacente más bajo. Zanjales o surcos pueden volver a imponer su dirección en el flujo superficial. Dentro de las parcelas cultivadas, incluyendo los surcos falsos, una función discriminante permite decidir si la dirección del flujo será impuesta por el método estándar o pendiente abajo por la dirección de arado.
- PESERA (Pan-European Soil Erosion Risk Assessment, 2003): es un modelo distribuido de base física y espacial desarrollado para la cuantificación de la erosión del suelo en zonas ambientalmente sensibles pertinentes a escala regional europeo y la definición de las estrategias de conservación de suelos. La versión actual del modelo se desarrolló durante la ejecución del modelo PESERA, combinando el efecto de la topografía, el clima y el suelo en un solo pronóstico, integrando la escorrentía y la erosión del suelo.
- WEPP (Water Erosion Prediction Project, 1985): es un modelo de simulación de erosión de base física construido sobre los fundamentos de la hidrología, ciencia hidráulica y mecánica de erosión. El modelo fue desarrollado por un equipo interinstitucional de científicos para reemplazar la Ecuación Universal de Pérdida de suelo (USLE), siendo ampliamente utilizado en los Estados Unidos y el mundo. WEPP

requiere cuatro entradas, es decir, el clima, la topografía, el suelo y la gestión (vegetación); proporciona varios tipos de salidas, incluyendo el balance de agua (escorrentía superficial, flujo subsuperficial, y evapotranspiración), desprendimiento de suelo y la deposición en los puntos a lo largo de la pendiente, la descarga de sedimento, y el crecimiento de la vegetación. El modelo WEPP ha sido mejorado continuamente desde su entrega pública en 1995, y es aplicable para una variedad de áreas (por ejemplo, las tierras de cultivo, pastizales, la silvicultura, la pesca y la superficie de extracción de carbón).

- GeoWEPP (Geo-spatial interface for WEPP, 2003): utiliza la información digital georeferenciada como los modelos digitales de elevación (DEM) y mapas topográficos para derivar y preparar los parámetros y valores predeterminados para iniciar la planificación de la conservación del suelo y el agua del sitio específico para una pequeña cuenca con un solo suelo y uso de la tierra para cada entrada del modelo válidos subcuenca.
- WEPP interfaces (US Forest Service, 2000): permitir un uso muy fácil y rápido del modelo, permitiendo el acceso a las bases de datos de suelo, clima y gestión existentes.
- EUROSEM (European Soil Erosion Model, 1998): fue desarrollado con el apoyo financiero de la “Comisión europea de recursos” desde el año 1986 al 2010. Es un modelo distribuido dinámico, capaz de simular el transporte de sedimentos, erosión y deposición por procesos de surco y en tormentas individuales para campos individuales y pequeñas cuencas. La salida del modelo incluye escorrentía total, pérdida total del suelo, la gráfica de un hidrograma de tormenta y los sedimentos en tormenta.

- EUROSEM-2010 (2010): permite evaluar el riesgo de erosión y opera sobre un caso base. Es útil para buscar medidas de protección del suelo.
- USLE (Universal Soil Loss Equation): esta ecuación se desarrolló en EEUU a hacia 1930 por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos.
 - APSIM (Agricultural Production Simulator, 1996): es reconocido internacionalmente como un simulador avanzado para sistemas agrícolas. Contiene un conjunto de módulos que permiten la simulación de sistemas que cubren una amplia gama de plantas, animales, suelo, clima y gestión de interacciones. APSIM está en continuo desarrollo, con la nueva capacidad añadida a versiones regulares de las versiones oficiales. Su desarrollo y el mantenimiento se base en las normas de ciencia e ingeniería de software rigurosos. La Iniciativa APSIM se ha establecido para promover el desarrollo y uso del software de módulos de ciencia e infraestructura de APSIM.
 - TMDL (Total Maximum Daily Load, 2000): es una aplicación de software basado en Windows para la estimación de cargas de fuentes difusas de sedimentos dentro de un contexto de cuenca. La interfaz de usuario es similar a una hoja de cálculo y permite a los usuarios seleccionar e introducir parámetros utilizados para estimar la carga de sedimentos fácilmente.
 - USLE-2D (Universal Soil Loss Equation 2D, 2000): está diseñado para calcular el LS en la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) a partir de un modelo de elevación digital basada en cuadrículas. En una situación de dos dimensiones real, el flujo superficial y la pérdida de suelo que resulta en realidad no depende de la distancia a la división o la pendiente ascendente borde del campo, pero en el área por unidad de longitud de contorno, contribuye escorrentía a ese punto. Este último puede diferir considerablemente de la longitud de la pendiente si se

mide manualmente, ya que se encuentra fuertemente afectada por la convergencia de flujo y/o divergencia. USLE-2D supera este problema mediante la sustitución de la longitud de la pendiente por la zona que contribuye a la unidad. USLE-2D ofrece diferentes algoritmos de encaminamiento para el cálculo del área de aporte y varios algoritmos para LS.

- USLE (MS Excel™ versión, 2003): esta calculadora Excel permite al usuario aplicar fácilmente el modelo USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo) con el fin de obtener una estimación aproximada (promedio a largo plazo) de la erosión del suelo a escala de granja (no a escala de cuenca). Pérdidas de suelo por erosión en cárcavas, deslizamientos, erosión del suelo, erosión de las orillas están excluidos del cálculo. La calculadora de USLE fue desarrollado por Paolo Bazzoffi, director de investigación de la CRA-ABP (Consejo de Investigación Agrícola, Agrobiología y Centro de Investigación Edafología, en Florencia) para evaluar la eficacia ambiental de las medidas agroambientales y las normas adoptadas en Italia bajo Políticas de Agricultura.
- USLE-M (Universal Soil Loss Equation Modification, 1998): es una versión modificada de la USLE basado en el factor de erosividad por precipitaciones para un evento que es el producto del índice de 30 min-erosividad (EI30) y la relación de escorrentía (QR). Como consecuencia USLE-M contiene una consideración explícita de los efectos del cultivo del suelo y manejo del cultivo sobre la escorrentía y la concentración de sedimentos. También la consideración explícita de la escorrentía significa que los valores de muchos de los otros factores utilizados en la USLE tienen que ser reevaluados porque los efectos de las variaciones en factores como el suelo y el manejo de los cultivos en la escorrentía, están siendo tratados por separado de los efectos sobre la concentración de sedimentos.

- USPED (Unit Stream Power-based Erosion Deposition, 1998): es un modelo simple que predice la distribución espacial de las tasas de erosión y deposición de un flujo superficial en estado estacionario con las condiciones de exceso de precipitaciones uniformes para el caso de limitada capacidad de transporte del proceso de erosión. El modelo se basa en la teoría descrita originalmente por Moore y Burch 1986 con numerosas mejoras.
- RUSLE 1 y 2 (1992-2015): RUSLE1 y RUSLE2 son utilizados por las agencias gubernamentales de todo el mundo para evaluar la erosión y el inventario para ayudar al desarrollo de políticas públicas, como herramientas de planificación de regulación y conservación. Consultores privados utilizan RUSLE1 y RUSLE2 para seleccionar planes de control de erosión para garantizar la protección ambiental rentable. Tanto RUSLE1 y RUSLE2 son de uso independiente y se pueden utilizar en las tierras de cultivo, bosques perturbados, pastizales, obras de construcción, terreno minado, terrenos de ganado, campos de entrenamiento militar, rellenos sanitarios, vertederos de desechos y otras tierras donde las precipitaciones asociadas al flujo superficial, causa de la erosión del suelo.

Erosión eólica (Solo de arranque)

- TOPMODEL (1979): es un modelo lluvia-escorrentía que aprovecha la información topográfica (zona de captación específica y el índice de humedad) en relación con la generación de escorrentía. A menudo se considera que no es un paquete de modelado hidrológico, sino más bien un conjunto de herramientas conceptuales que se pueden utilizar para reproducir el comportamiento hidrológico (en particular, la dinámica de la superficie o del subsuelo que contribuye áreas).

- TCRP (Tillage-Controlled Runoff Pattern model, 2001): este modelo requiere como entrada de un modelo digital de elevación (DEM), un mapa de uso de la tierra, y la dirección de la labranza importante en cada campo. En el modelo se definen en primer lugar, las líneas de flujo correspondientes a la orientación del suelo. Posteriormente, la dirección del flujo dentro de estas líneas se define por la elección de la dirección que se corresponde con la dirección del suelo de aguas abajo. Cuando se produce la convergencia de flujo, por ejemplo, en vaguadas (lugares bajos), el flujo se encamina en la dirección topográfica. Direcciones de flujo a lo largo de los límites del campo se definen por separado. A este fin, se define la dirección del borde del campo, basado en el mapa de uso del suelo. La dirección del flujo a lo largo del borde del campo se define a continuación, en base a la inclinación de la pendiente a lo largo del borde del campo. Este modelo crea automáticamente TCRP promontorios a lo largo de bordes de los campos que no son paralelos a la orientación del suelo.

Erosión eólica

- CAESAR (Cellular Automaton Evolutionary Slope and River model, 2002): puede ser utilizado para simular el impacto de eventos extremos de precipitación, ya que los datos de series de tiempo para los eventos reales o simulados de lluvia, se pueden utilizar como entrada. Esta capacidad es un atributo modelo crítico como el sitio de mina de Ranger rehabilitado debe contener de forma segura los contaminantes durante periodos de tiempo largos sin la exposición al medio ambiente. Es probable que uno o más extremos eventos de lluvia se producen durante ese tiempo. las pruebas evento extremo de los parámetros de diseño propuestos para la forma de relieve construida ha cobrado mayor importancia dada la posibilidad de un aumento en la frecuencia de los períodos de lluvias intensas, como consecuencia del cambio climático.

- WILSIM (Web-based Interactive Landform Simulation Model, 2004): la versión lineal de WILSIM es simple y fácil de implementar. Sin embargo, no simula explícitamente el comportamiento no lineal de la erosión de los sedimentos y el transporte y se opone a la simulación de las interacciones entre precipitaciones (es decir, cada precipitación, o evento de tormenta, es independiente de cualquier otra precipitación).

Erosión de cultivos

- WATEM (Water and Tillage Erosion Model, 2000): se distribuye espacialmente modelo para simular la erosión y la deposición por procesos de agua y de labranza en un paisaje de dos dimensiones. A diferencia de los modelos dinámicos más sofisticados (por ejemplo WEPP o EUROSEM), WATEM se centra en el espacio, y menos lo temporal, la variabilidad de los parámetros pertinentes. Como tal, WATEM permite la incorporación de la estructura del paisaje o la organización espacial de las diferentes unidades de tierra y la conectividad entre ellos. Con el fin de evitar problemas mayores con respecto a la variabilidad espacial de los valores de los parámetros y la incertidumbre de las estimaciones de los parámetros, WATEM es un modelo simple impulsado por la topografía. El componente de agua de WATEM utiliza una versión adaptada de la (RUSLE) ya que aproxima los valores de los parámetros que están disponibles para muchas áreas. Estudios recientes han reconocido la importancia de dirigir el movimiento del suelo por la labranza de la erosión del suelo en tierras agrícolas.

2.4.2 La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (Universal Soil Loss Equation) (USLE, Wischmeier y Smith, 1978)

El modelo U.S.L.E. corresponde al resultado de múltiples esfuerzos teóricos y de campo incentivados por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), en la primera mitad del siglo 20. Los estudios fueron compilados por los investigadores Walter

Wischmeier y Dwight Smith, quienes presentaron el modelo elaborado de USLE en 1954, como un esfuerzo conjunto entre USDA y la Universidad de Purdue.

USLE es un método que utiliza seis factores: erosividad de la lluvia (R), susceptibilidad de erosión del suelo (K), largo de la pendiente (L), magnitud de la pendiente (S), cubierta y manejo de cultivos y residuos (C), y prácticas de conservación (P), para estimar la pérdida de suelos promedio (A) por el período de tiempo representado por R, generalmente un año.

A pesar del carácter “universal” que se le asignó, el modelo USLE basó sus datos y calibraciones en los distintos suelos encontrados en Estados Unidos, incluyendo los territorios de Hawái y Puerto Rico. En total, se estima que fueron utilizadas más de 10.000 parcelas por año, para la elaboración del modelo.

La representación matemática de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo es:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

Dónde:

A: Pérdida media anual de suelo (expresado en unidades escogidas para K y período abarcado en R, $\text{ton-ha}^{-1}\text{-año}^{-1}$).

R: Erosividad de la lluvia, en $\text{MJ-cm-ha}^{-1}\text{-h}^{-1}$.

K: Erodabilidad del suelo, expresado en $\text{ton-ha-MJ}^{-1}\text{-ha}^{-1}\text{-cm}^{-1}$.

L: Longitud de la pérdida, en metros.

S: Pendiente, en m-m^{-1} .

C: Cubierta vegetal y manejo del recurso, sin unidades de medida.

P: Técnica de conservación aplicada (cultivo en contorno, fajas o terrazas), sin unidades de medida.

2.4.3 La Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelos (Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE), (Renard *et al.*, C.A. Jones R.H. Griggs, J.R. Williams y R. Srinivasan 1991)

La metodología RUSLE fue desarrollada para superar algunas de las limitaciones de USLE. Sus avances incluyen:

- Computarización de algoritmos para facilitar los cálculos.
- Nuevos valores de erosividad de lluvias-escurrimientos (R) en el oeste de los Estados Unidos (condiciones áridas), basado en más de 1 200 localidades.
- Desarrollo de un término de susceptibilidad del suelo a la erosión estacionalmente variable (K) y métodos alternativos de estimación de K cuando el nomograma no es aplicable.
- Un nuevo método para calcular el factor cubierta-manejo (C), utilizando subfactores que incluyen uso previo de la tierra, cubierta de cultivos, cubierta vegetal del suelo y rugosidad del terreno.
- Nuevas formas de estimar los factores de largo y magnitud de la pendiente (LS) que consideran porcentajes de erosión en surcos e ínter-surcos.
- La capacidad de ajustar el LS para pendientes de forma variable.
- Nuevos valores de prácticas de conservación (P) para cultivo en fajas alternadas, uso de drenaje subterráneo y praderas.

RUSLE aún está siendo desarrollado, y tal vez se introduzcan otras modificaciones. Al igual que el USLE, el RUSLE no fue diseñado para estimar rendimientos de sedimento en pendientes complejas donde puede ocurrir sedimentación, ni en grandes cuencas.

2.4.4 Rusle2

Sucesivas revisiones del modelo desarrollado por la USDA para erosión de suelo, dieron lugar al desarrollo de RUSLE 2, (Revised Universal Soil Loss Equation, versión 2). RUSLE2 estima pérdida de suelo, producción de sedimento y características del sedimento proveniente de la erosión originada por las precipitaciones y el consecuente escurrimiento superficial. Para ello, utiliza factores que representan los efectos del clima (erosividad, precipitación y temperatura), erodabilidad del suelo, topografía, cobertura-manejo y prácticas de conservación de las tierras. Se trata de un modelo matemático que utiliza un sistema de ecuaciones implementado en un programa de computadora para estimar las tasas de erosión. Otro componente importante del mismo es la base de datos que contiene una gran matriz de valores que el usuario puede utilizar para describir una condición sitio-específica, de manera que RUSLE2 modele valores de erosión que reflejen las condiciones particulares de un sitio.

Este programa es usado para evaluar las tasas de erosión potencial en sitios específicos, guiar el planeamiento de la conservación y control de la erosión, inventariar las tasas de erosión sobre grandes áreas geográficas y estimar la producción de sedimentos en las tierras altas que pueden pasar a ser sedimentos en las cuencas.

RUSLE2 se encuentra liberado para todo usuario por la USDA en la web y puede ser utilizado en cultivos extensivos, pasturas, ambientes naturales y todas aquellas áreas donde el suelo está expuesto al impacto de la gota de lluvia y al escurrimiento superficial producido cuando la intensidad de precipitación excede a la infiltración.

2.4.5 La Ecuación de Erosión Eólica (Wind Erosion Equation, WEQ)

Caso similar a lo ocurrido con la erosión hídrica, para la estimación de la pérdida de suelo por erosión eólica surgió a mediados de la década de los sesenta. La WEQ, desarrollada por Woodruff & Siddoway (1965), es un modelo empírico que permite estimar tasas anuales de pérdidas de suelo por erosión eólica, determinar la cantidad de cobertura vegetal necesaria para lograr una pérdida tolerable de suelo, establecer un ancho de faja adecuado para el control de la erosión o comparar la eficacia de manejos alternativos para controlar el proceso.

Las relaciones matemáticas de la WEQ son complicadas, pero la adopción se intensificó mediante el uso de nomogramas y programas computados. Este modelo, si bien fue muy difundido y mejorado (Skidmore *et al.*, 1970; Skidmore, 1987) cuenta con algunas limitaciones, dado que sólo es factible realizar estimaciones anuales y no para determinadas épocas del año. Por otra parte, considera valores únicos para variables del suelo muy dinámicas, como humedad, y no tiene en cuenta otras, como la formación de costras superficiales. Para efectuar cualquiera de esos cálculos es necesario ajustar los factores que la componen, que son:

$$E' = f (I', K', V', L', C')$$

Dónde:

E: erosión potencial medida en tn/ha/año.

I': índice de erodabilidad del suelo.

K': factor de rugosidad.

C': factor climático local.

L': longitud del terreno en la dirección prevaleciente de los vientos.

V: el equivalente de cobertura de vegetación medida en kg/ha.

La erosionabilidad eólica del suelo, I' : representa el potencial de pérdida de suelo y depende de la granulometría de éste. Se expresa en Mg/ac/año y se determina clasificando el suelo dentro de un grupo de erosionabilidad (8 posibles) según las propiedades de la superficie del suelo, y a partir del porcentaje de agregados del suelo seco mayores de 0,8 mm. Las propiedades más importantes del suelo, en relación a la erosión eólica, son: 1) textura del suelo, 2) contenido en materia orgánica, 3) contenido en carbonato cálcico, 4) estado de humedad del suelo, y, 5) estabilidad estructural. El índice toma un valor mínimo de 0 (suelos con alto contenido en elementos gruesos en la superficie o húmedos) y un valor máximo de 310 (suelos arenosos, y con porcentaje de agregados del suelo seco mayores de 0,8 mm del 1 %) (Ver Tabla 3).

Tabla 3. Grupos de erosionabilidad al viento (WEG), e índice de (I) al viento.

WEG	Suelo	% (peso) Agregados en suelo seco > 0,8mm	I (ton/ac/yr)
1	Arenoso muy fino, arenoso fino, arenoso, o arenoso grueso	1	310 (a)
		2	250
		3	220
		5	180
		7	160
2	Arenoso francoso muy fino, areno francoso fino, areno francoso, areno francoso grueso ; y materiales orgánicos sapric (Soil Taxonomic)	10	134
3	Franco arenoso, franco arenoso muy fino, franco arenoso fino, franco arenoso grueso	25	86
4	Arcilloso, arcillo limoso, franco arcilloso no calcáreo, y franco arcillo limoso no calcáreo con un contenido en arcilla mayor del 35%	25	86
4L	Calcáreo (b) franco y franco limoso, o franco arcilloso y arcillo limoso calcáreo	25	86
5	Franco y franco limoso no calcáreo que tienen menos de un 20% de arcilla, o franco arcillo arenoso, arcillo arenoso, y materiales orgánicos hemic (Soil Taxonomy)	40	56
6	Franco y franco limoso no calcáreo que tienen más de un 20% de arcilla, o no calcáreo franco arcilloso que tienen menos de un 35 % de arcilla	45	48

WEG	Suelo	% (peso) Agregados en suelo seco > 0,8mm	I (ton/ac/yr)
7	Limoso, no calcáreo franco arcillo limoso con un porcentaje de arcilla menor del 35%, y materiales orgánicos fibric	50	38
8	Suelos no susceptibles a la erosión eólica debido a la presencia de elementos gruesos en superficie o humedad	-	0

a) Los valores de "I" varían desde 160 para arenoso grueso a 310 para arenoso muy fino. El valor de 220 es medio. Si el porcentaje de fragmentos gruesos (% volumen) es del 15-35 % se reduce el valor de I en el siguiente grupo con un ratio más favorable, si el porcentaje es del 35-60 % se reduce el valor de I en dos grupos. Si el porcentaje en fragmentos gruesos es mayor al 60 % en volumen se usa un valor de "I" de 0. Fuente: NSSH (Exhibit 618-16).

b) Calcáreo: tiene una efervescencia fuerte y violenta en la fracción tierra fina con el HCl (1N)

2.4.6 La Ecuación Revisada de Erosión Eólica (RWEQ)

En los años noventa, el Agricultural Research Service (ARS) desarrollo un nuevo modelo para predecir la erosión eólica, la Ecuación Revisada de Erosión Eólica (RWEQ), que salvará las limitaciones de la WEQ (predicciones anuales, baja precisión en función de las variables relacionadas con el manejo, particularmente cobertura con residuos y canopeo).

Las propiedades usadas en la RWEQ para caracterizar los suelos pueden dividirse en dos amplios rangos:

- Propiedades intrínsecas: que son más o menos estáticas y que cambian muy lentamente a través del tiempo (Ej: materia orgánica, proporción de arcillas).
- Propiedades temporales dinámicas: que cambian rápidamente en respuesta al manejo o influencias climáticas. (Ej: densidad aparente, distribución de agregados), con la RWEQ podrían estimarse a diario las pérdidas debidas a erosión eólica, como así también la variabilidad a campo en tiempo y espacio definidos.

Por lo tanto, las subrutinas de la RWEQ estimarían cambios temporales de las propiedades de los suelos. Dentro de la opción "Manejo" se tienen en cuenta tipo de labranzas, cambios en las condiciones superficiales del suelo y niveles de residuos luego de la

práctica. También se evalúa el tamaño, forma y orientación del potrero, la vegetación y las barreras.

Dentro del modelo de “Suelo”, que presenta el modelo, se tienen en cuenta propiedades como porcentajes de arena, limo y arcilla, carbono orgánico, carbonato de calcio y superficie del suelo con rocas y otros parámetros como la fracción erodible, costra del suelo y rugosidad.

Mediante el submodelo “Tiempo” se considera la magnitud y la dirección del viento, la densidad del aire, las temperaturas máximas y mínimas del aire, la radiación solar, los días de lluvia e intensidad de las precipitaciones (Zobeck, 1991).

Las ecuaciones de transporte de masa han sido desarrolladas para la aplicación al movimiento de suelos agrícolas o arenas del desierto. El transporte de masa a través de una superficie erodable fue medida por Bagnold (1941), Chepil (1945) y Stout (1990), entre otros. La ecuación básica que define la distribución horizontal de la masa transportada es:

$$b(x) \left(\frac{dQ(x)}{dx} + Q(x) - Q_{\max}(x) + S_r(x) \right) = 0$$

Dónde:

$Q(x)$: máximo transporte en la distancia x , en kg/m de ancho

$Q_{\max}(x)$: transporte máximo, kg/m de ancho.

$S_r(x)$: coeficiente de retención superficial

X : distancia desde el borde del potrero, m.

$b(x)$: escala de longitud del potrero, m.

En la Tabla 4 se consignan los factores considerados en la RWEQ.

Tabla 4. Factores de la erosión eólica considerados en la Ecuación Revisada de Erosión Eólica (RWEQ, Fryrear *et al.*, 1994).

Factor	Variable	Característica
Climático	Viento	F (velocidad del viento)
	Dirección del viento	
	Temperaturas medias del aire	T°C máx. y mín. diarias
	Radiación solar	Valores acumulados p/periodo
	Precipitaciones	Pptac. Totales por periodo
Suelo	Fracción erodable	<0.84mm, f(Text., MO, CaCO ₃)
	Factor de encostramiento	f(ercilla)
	Humedad	f(ETP,P, tiempo)
	Rugosidad	
	Congelamiento/deterioro	En desarrollo
Terreno		Forma rectangular o circular
Irrigación		En desarrollo
Cultivo	Residuos planos	f(coertura y descomposición)
	Residuos erectos	f(silueta)
	Canopeo	f(plantas emergentes)
	Barreras eólicas	f(densidad, altura)

Estudios comparativos de la RWEQ y la WEQ realizados por Fryrear *et al.*, (1999), demostraron en suelos de 16 localidades de 7 estados en EEUU, que las tasas de erosión calculadas en ensayos con cortinas de árboles, arrojaron valores inferiores con la RWEQ que aquellos estimados con la WEQ, debido a que en el primer caso se tienen en cuenta la densidad de la cortina y las condiciones de la superficie del suelo en el período considerado, en cambio la WEQ asume solamente que la zona protegida es igual a 10 veces la altura de la cortina. El conocimiento de la cantidad y calidad de suelo que se erosiona eólicamente, y el ajuste de los parámetros citados en la RWEQ, permitirán plantearse estrategias de manejo adecuadas a cada zona.

2.5 Evaluación paisajística

De acuerdo a la definición del SERNATUR (Servicio Natural de Turismo Chile), se entiende por paisaje la expresión visual del entorno e incluye la forma de percepción de la naturaleza, el territorio, un área geográfica, el medio ambiente, un componente globalizador del sistema, un recurso natural más, hábitat, escenario visual. El paisaje es

una manifestación espacial que da cuenta de una imagen del estado del territorio, por lo tanto, es un indicador o clave de los procesos que tienen lugar en el territorio, ya sea en el ámbito natural, humano o interacción de ambos.

Al ser el paisaje una componente ambiental que debe ser percibida por el ser humano a través de su sentido visual, para evaluarlo se utilizará la metodología propuesta por Zambrano *et al.*, (2002), la cual propone elaborar un modelo visual que refleja todas las cualidades paisajísticas visuales de un territorio, que permite objetivizar los parámetros de análisis, los cuales se presentan en la Figura 12.

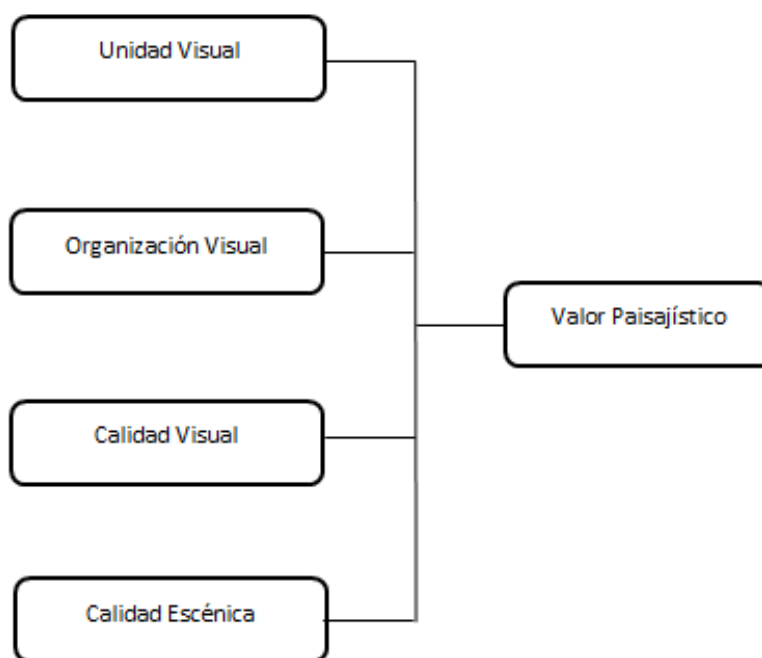


Figura 12. Parámetros de valoración paisajística. (Fuente: Zambrano *et al.*, 2002).

2.6 Tratamiento de suelos degradados

En la actualidad se dispone de un amplio abanico de tecnologías de recuperación de suelos contaminados, algunas de aplicación habitual y otras todavía en fase experimental, diseñadas para aislar o destruir las sustancias contaminantes alterando su estructura

química mediante procesos generalmente químicos, térmicos o biológicos. Su aplicación depende de las características del suelo y del contaminante, de la eficacia esperada con cada tratamiento, de su viabilidad económica y del tiempo estimado para su desarrollo (Reddy *et al.*, 1999). Según la forma en la que se apliquen las técnicas de recuperación de suelos se habla de tratamientos in situ, que actúan sobre los contaminantes en el lugar en el que se localizan, y tratamientos ex situ, que requieren la excavación previa del suelo para su posterior tratamiento, ya sea en el mismo lugar (tratamiento on-site) o en instalaciones externas que requieren el transporte del suelo contaminado (tratamiento off-site). Los tratamientos in situ requieren menos manejo pero por lo general son más lentos y más difíciles de llevar a la práctica dada la dificultad de poner en contacto íntimo a los agentes de descontaminación con toda la masa de suelo contaminada. Los tratamientos ex situ suelen ser más costosos pero también más rápidos, consiguiendo normalmente una recuperación más completa de la zona afectada (Informe de Vigilancia Tecnológica, 2007).

En función de los objetivos que se quieren alcanzar a la hora de recuperar un suelo contaminado, se puede distinguir entre:

- Técnicas de contención, que aíslan el contaminante en el suelo sin actuar sobre él, generalmente mediante la aplicación de barreras físicas en el suelo.
- Técnicas de confinamiento, que reducen la movilidad de los contaminantes en el suelo para evitar su migración actuando directamente sobre las condiciones fisicoquímicas bajo las que se encuentran los contaminantes.
- Técnicas de descontaminación, dirigidas a disminuir la concentración de los contaminantes en el suelo.

En el Anexo 1 se presenta algunas técnicas de recuperación para suelos con signos de degradación. En el Anexo 2 se describen los distintos contaminantes tratados por las técnicas de recuperación.

2.6.1 Control de Erosión

Los profesionales de control de erosión deben tener en cuenta que los problemas de erosión generalmente obedecen a fenómenos los cuales deben analizarse, y obtenerse parámetros para realizar el diseño. La presión para tomar decisiones prematuras debe resistirse con lógica y hacer entender a los involucrados que se requiere obtener información y realizar análisis previamente a los diseños. En Suárez (2001) se propone un análisis sistemático puede ayudar a identificar tanto los problemas como las alternativas de solución (Figura 13).

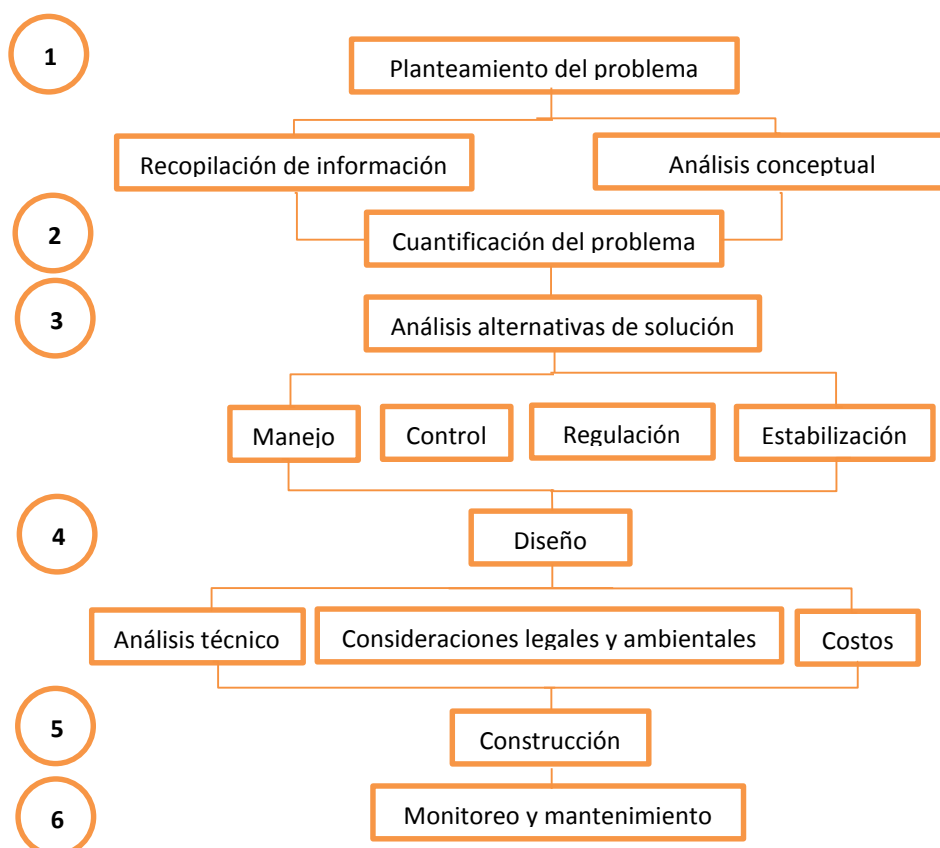


Figura 13. Diagrama general para el diseño de obras para el control de la erosión (Suárez, 2001).

Se proponen además, diversas formas de tratamiento dependiendo de la forma y mecanismo de erosión (Tabla 5)(Suárez, 2001):

Tabla 5. Formas y mecanismos de erosión y obras de estabilización.

Elemento erosionante	Forma	Mecanismo	Obras de estabilización
Gotas de lluvia	Semilaminar	Golpeo, desprendimiento y esparcimiento	Cobertura vegetal de altura media y baja, revestimientos tratamiento químico, impermeabilización.
Escorrentía	Semilaminar (Difusa)	Transporte de suelos desprendidos por la lluvia y arrastre de materiales sueltos.	Cobertura vegetal, canales, recubrimiento con suelos resistentes.
	En surcos	Desprendimiento y transporte a lo largo de canales intermitentes con avance hacia arriba.	Recubrimientos diversos, cobertura vegetal, barreras, canaletas.
	En cárcavas	Desprendimiento, turbulencia en canales intermitentes con avance hacia arriba.	Recubrimientos diversos, trinchos, muros, barreras, canaletas, lavaderos, bioingeniería y biotecnología.
Agua quieta o en movimiento	Disolución	Los componentes químicos solubles en agua son disueltos por el agua.	Impermeabilización
	Dispersión	Desmoronamiento o separación de las partículas al saturarse	Impermeabilización, geotextiles, recubrimientos.
Flujo tangencial	Profundización y/o ampliación del cauce	Corrosión en el perímetro mojado del cauce.	Recubrimientos, muros, enrocados, espigones, retardadores, biotecnología.
Flujo curvilíneo	Avance lateral de la ribera	Erosión por velocidad del agua y aportes por falla lateral de riberas verticales.	Recubrimientos, muros, enrocados, espigones, retardadores, biotecnología
Flujo alrededor de obstáculos	Erosión localizada por turbulencias	Socavación alrededor del obstáculo, pila de puente, etc. por cambio de dirección del flujo.	Recubrimiento del fondo, hexápodos, enrocados.
Construcción de represas	Profundización por eliminación de sedimentos	Al no aparecer sedimentos para reposición de erosión el cauce se profundiza.	Recubrimiento estructuras del fondo del cauce, biotecnología
Cambios artificiales del cauce	Profundización y/o sedimentación	Todo cambio en el régimen del río produce erosión y la socavación.	Recubrimientos, estructuras de fondo, biotecnología.
Afloramiento de agua	Cárcavas en taludes	El gradiente hidráulico del afloramiento desprende el suelo en cáscaras o flujo.	Drenes de pantalla, subdrenes de penetración, biotecnología
Movimiento de aguas Subterráneas	Erosión interna	Desprendimiento y transporte interno de suelo por velocidades altas del agua subterránea.	Impermeabilización, barreras enterradas, subdrenes.
	Tubificación a lo largo de los	Gradientes hidráulicos superiores a la capacidad de tracción del	Barreras enterradas, geotextiles, subdrenes de

Elemento erosionante	Forma	Mecanismo	Obras de estabilización
	contactos	suelo.	penetración.
Oleaje	Erosión y movimiento litoral en playas	Erosión y transporte de sedimentos hacia arriba, abajo y lateralmente en La orilla del mar.	Espigones, rompeolas, muros.
	Cavernas en taludes de presas	Desprendimientos y descascaramiento por la acción de olas repetidas.	Enrocados, recubrimientos, rompeolas.
Gravedad y presión de poros	Deslizamientos	Disminución de la resistencia al corte y falla por movimientos en masa.	Muros, pantallas ancladas, subdrenes, abatimientos, bermas, bioingeniería, biotecnología
	Flujos de suelo o roca. Erosión en masa	Los materiales se comportan como un fluido viscoso y fluyen talud abajo.	Estructuras de fondo, muros, recubrimientos, bioingeniería, biotecnología.

- **Control de cárcavas**

Una de las limitantes principales en el control de cárcavas remontantes son los costos en su control cuando la solución se enfoca hacia la Ingeniería Convencional con estructuras de concreto y por el desconocimiento de otras soluciones alternas, más eficientes, eficaces y de menor costo, como son los tratamientos de tipo biológico, utilizando los recursos existentes en el pueblo, zona urbana o área de influencia al problema.

Según Hudson (1982), en el control de la erosión por cárcavas, es más eficaz un bulto de fertilizante que un bulto de cemento, ya que aunque las obras de concreto son a veces necesarias, es preferible restaurar las cárcavas mediante el uso de la vegetación. Las estructuras ya sean de hormigón, concreto, madera o cualquier otro tipo de material de construcción, se deterioran y socavan con el tiempo, lo que las hace menos eficaces. La vegetación por el contrario, al multiplicarse, prospera y mejora a través de los años.

Para el caso de esta investigación se consideraron y evaluaron dos formas de recuperación de cárcavas:

Tratamientos de regulación de flujos hídricos en causes.

- Diques de postes de madera: se compone de postes de pino impregnados dispuestos en sentido vertical y horizontal (Figura 14). Los postes verticales se colocan a intervalos de 1 (m), siguiendo el perfil de las cárcavas, y a una profundidad de 0,4 (m). Los postes horizontales se alambran y se clavan a los verticales y en sus extremos se empotran entre 0,2 y 0,3 (m) a ambos lados de la cárcava (Figura 15) (CONAF, 1998).



Figura 14. Disposición de dique de postes de madera (CONAF, 1998).

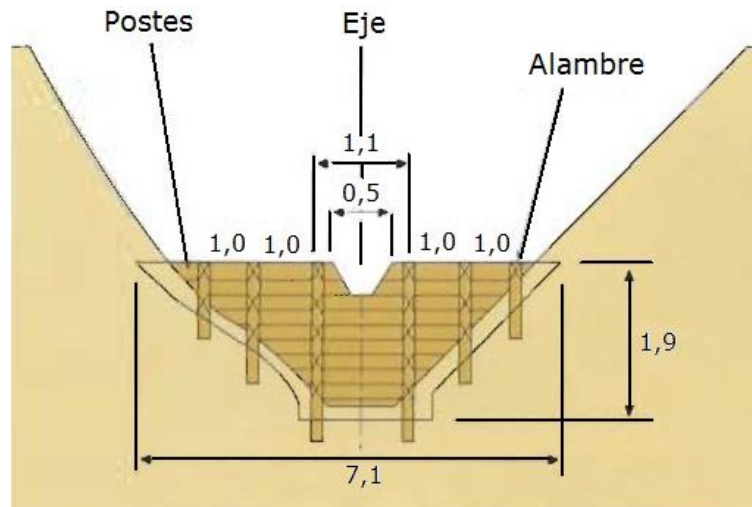


Figura 15. Dimensiones de diseño para dique (unidad de medida en (m)) (CONAF, 1998).

- Dique de estructuras gavionadas: consiste en disponer gaviones en el lecho de la cárcava, que están hechos de mallas de alambre recubierto en forma cubica, relleno con bolones (Figura 16). Se debe excavar hasta encontrar una capa impermeable o sino se encuentra, en nivelar y compactar firmemente el suelo. La primera corrida de gaviones debe enterrarse en el lecho a un mínimo de 0,2 (m). La segunda corrida se dispone sobre la primera, aunque solo en los extremos, lo que conforma el vertedero hacia el centro (Figura 17) (CONAF, 1998).



Figura 16. Disposición de dique de estructuras gavionadas (CONAF, 1998).

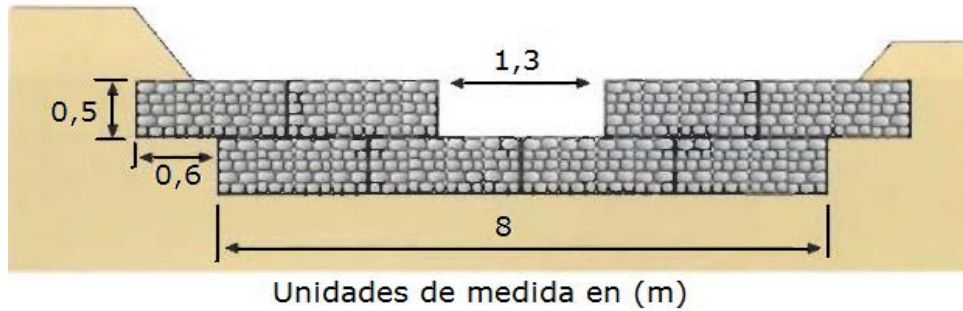


Figura 17. Dimensiones de diseño para dique (CONAF, 1998).

- Disipador: El cauce se excava hasta alcanzar una sección de 1 x 1 x 0,2 (m) de profundidad. Se utilizan cuatro postes de pino impregnados de 1 (m) que se estacan en los vértices de la sección a una profundidad bajo el suelo de 0,25 (m) (Figura 18). Se acerca la sección con oreos postes en sentido horizontal, se clavan y se alambrian en los verticales. Esta obra se complementa con otros tratamientos de regulación, conducción y evacuación de aguas. Finalmente la estructura se rellena con la mezcla de materiales como bolones, gravas y ripios (Figura 19) (CONAF, 1998).



Figura 18. Disposición de disipador en terreno (CONAF, 1998).

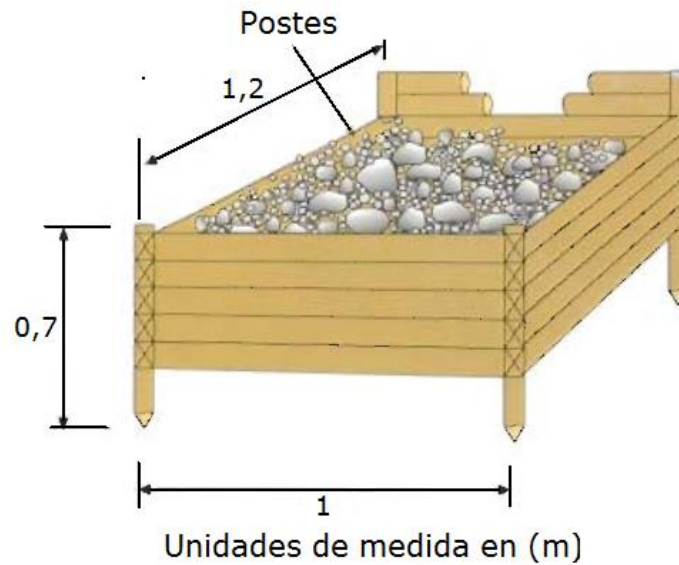


Figura 19. Dimensiones de diseño para disipador (CONAF, 1998).

- Presas de mampostería: son estructuras permanentes construidas con piedra, arena y cemento, ubicadas de forma transversal a la corriente dentro de un cauce o una cárcava, con el fin de reducir la velocidad del escurrimiento superficial, retener azolves y almacenar agua. Su uso se recomienda en cárcavas de cualquier tamaño pero con profundidades mayores a dos metros (SAGARPA, 2009)(Figura 20 y Figura 21)



Figura 20. Disposición de presas de mampostería (SAGARPA, 2009).

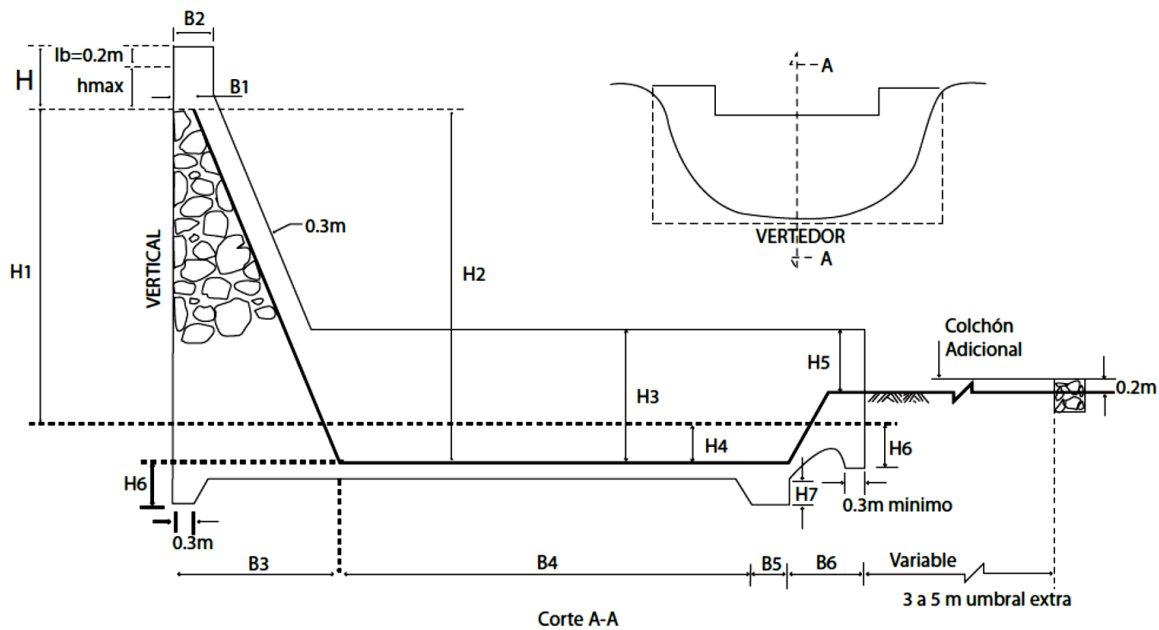


Figura 21. Dimensiones de diseño para presa (SAGARPA, 2009).

- Dique de biomasa residual: El esquema simplificado de este elemento consiste en un conjunto formado por estacas verticales y largueros horizontales que crean un espacio tridimensional que se rellena con una matriz de restos vegetales. Además, a ambos lados, se colocan taludes de piedra con la función de conseguir un perfil hidrodinámico. La rigidez de la fajina armada se consigue, además de con el peso de los taludes de piedras, mediante un arriostrado con soga biodegradable que se ancla al terreno circundante (Figura 22).

Las mayores dimensiones construidas, a día de hoy, son de más de dos metros de altura y diez metros de longitud. Los diámetros de los distintos elementos varían con las dimensiones de la fajina armada y, dada la colaboración entre los distintos elementos, son lo suficientemente pequeños como para evitar que esto sea una limitación (Caballero et al., 2009).



Figura 22. Disposición de dique de biomasa residual (Caballero *et al.*, 2009).

- **Bioingeniería**

Con un sentido amplio el empleo de la vegetación en el control de la erosión y la estabilización de taludes en suelos y rocas se conoce como Bioingeniería. Precisando un poco más la terminología R. P. C. Morgan y R. J. Rickson (1995) usan este término para referirse al uso de cualquier forma de vegetación con características y comportamiento cuantificable, como materiales de ingeniería con los fines inicialmente descritos e introducen el término, Ingeniería Biotécnica, para designar las técnicas en las cuales la vegetación es combinada con estructuras inertes tales como muros de cajón u otras, de tal manera que se comparte el beneficio estructural de ambos componentes: el material vegetal y el material inerte.

Más recientemente A. Petrone y F. Preti (Universidad de Florencia) utilizan el término Ingeniería Naturalística para referirse a la Ingeniería Biotécnica y lo definen como una disciplina técnico-científica relacionada con el uso de las plantas vivas, de partes de

plantas o incluso de asociaciones vegetales enteras como materiales de construcción, con frecuencia unidos a materiales no vivos como piedra, tierra, madera y acero.

Si bien, el uso de la vegetación para estabilizar taludes y laderas es muy antiguo, las primeras experiencias documentadas del uso de la vegetación se dieron en Alemania, Suiza y Austria, en Europa y Estados Unidos y Canadá, en América. Aunque el uso de la bioingeniería ha sido exitoso, el volumen de casos documentados parece aun reducido para conocer el verdadero potencial de estas técnicas.

C. Morgan y R. J. Rickson (op. Cit) entre otros, consideran que las técnicas usadas tradicionalmente en ingeniería para estabilizar taludes con muros de gaviones y otras estructuras inertes, conocidas como “soluciones grises”, no son sostenibles en el largo plazo debido a su alto costo inicial incrementado con los costos de reparación y mantenimiento, debido al deterioro de los materiales; comparadas estas técnicas con las de bioingeniería, identificadas como “soluciones verdes”, las cuales han demostrado ser más rentables, si se tiene en cuenta el menor costo inicial de la vegetación por tratarse de material del sitio y su capacidad de regenerarse y responder dinámicamente y de manera natural a los cambios en las condiciones del sitio sin comprometer o perder las propiedades mecánicas. Se mencionan muchos ejemplos en los cuales las soluciones con muros o concreto han sido reemplazadas por técnicas que usan vegetación, tanto en estabilización de taludes como en canalización o fijación de cauces en torrentes y ríos, con efectos aparentemente más ventajosos desde el punto de vista hidráulico, estético y económico. Dados esos resultados hoy día se percibe un creciente interés de los ingenieros por el papel potencial de la vegetación en trabajos de ingeniería.

Por lo demás es importante destacar que la diferencia en costo de las “soluciones grises” convencionales y el uso de “soluciones verdes” con vegetación puede ser significativo en zonas donde la disponibilidad de materiales como el concreto, tablestacas, recubrimientos ligeros, gaviones etc. es relativamente restringido e inaccesible económicamente como

ocurre en algunos países en desarrollo, donde además persisten condiciones de atraso en el nivel tecnológico.

La bioingeniería se originó en el campo forestal con diferentes tipologías y criterios de intervención, para proteger suelos de ladera, recuperar ambientalmente las minas, controlar la erosión en botaderos y otras áreas degradadas y embellecer el paisaje. Se usan las plantas, combinadas o no con materiales inertes, con el fin de proteger de la erosión o reforzar los taludes, revegetalizar las laderas y recuperar los cauces frente a socavación, mediante obras de fijación de orillas o control torrencial.

Como un valor agregado muy atractivo, además de servir para recuperar o preservar la estabilidad del terreno, la bioingeniería reduce el impacto visual de las obras de ingeniería en general, con beneficios ecológicos, paisajísticos, económicos (menor costo) y sociales (mayor mano de obra), y en algunos casos con el aprovechamiento de los cultivos incorporados.

La bioingeniería se basa en cuatro principios:

- a) Ecosistémico: Trabaja con la lógica de la naturaleza viviente.
- b) Paisajístico conservacionista: Minimiza el impacto en el paisaje.
- c) Independencia externa de insumos: Hace uso de los elementos vivientes nativos propios que se encuentran en el entorno para la recuperación de zonas degradadas.
- d) Económico: Minimiza costos, a favor de presupuestos públicos y privados.

Se pueden apreciar diversas técnicas de bioingeniería en taludes, laderas y cauces en la Tabla 6.

Tabla 6. Técnicas y Prácticas de bioingeniería en taludes, laderas y cauces.

Elementos del relieve	Técnicas o Prácticas	Efecto	Valor Agregado
Taludes	Coberturas vegetales combinadas o no con materiales inertes	Protección del suelo en superficie con algún reforzamiento en profundidad.	Contribución paisajística, ecológica, económica y social.
Laderas	Revegetalización o Reforestación. Prácticas de uso y manejo del suelo.	Preservación de la capa vegetal y protección del suelo, control de la humedad superficial y sub-superficial y refuerzo del suelo con incremento de la resistencia.	
Cauces de torrentes y ríos.	Obras de corrección Torrencial y fijación de orillas.	Reducción de la socavación de fondo y lateral con recuperación de orillas y vertientes.	

En espacios urbanos la bioingeniería se puede aplicar en diversas situaciones. a continuación en la Tabla 7 se describen algunas de ellas.

Tabla 7. Aplicación de la bioingeniería en diferentes proyectos o espacios urbanos.

Proyectos o espacios	Propósitos
Carreteras o caminos	Estabilización de taludes de cortes, terraplenes y rellenos de disposición, principalmente en zonas de ladera. Reducción de aporte de sedimentos a los canales de drenaje y cauces en general
Extracciones mineras	Recuperación ambiental
Parques, senderos peatonales y otras zonas de recreación y reserva	Ambientación, paisajismo, protección.
Zonas de pantanos y otras degradadas	Recuperación y rescate para el desarrollo

Para tratar la erosión del área de estudio se evaluaron los siguientes tipos de tratamiento:

Fitorremediación, adición de compost y banco de semillas.

- Efectos del encalado y fertilización nitrogenada sobre el desarrollo de *Oenothera affinis* en un suelo afectado por la minería del cobre: considera el uso de plantas

capaces de almacenar los metales en sus estructuras subterráneas, reduciendo así su movimiento desde el suelo contaminado al aire y al agua. El éxito del tratamiento depende de la aplicación de enmiendas adecuadas que reducen la solubilidad de los metales en los suelos y, a la vez, mejoran sus condiciones para el desarrollo de la planta *Oenothera affinis*. El éxito del tratamiento depende de la aplicación de enmiendas adecuadas que reducen la solubilidad de los metales en los suelos y, a la vez, mejoran sus condiciones para el desarrollo de la planta. Se evaluó el efecto del encalado y la fertilización nitrogenada sobre la emergencia de cotiledones, supervivencia, producción de biomasa y acumulación de cobre en *Oenothera affinis* cultivada en un suelo del valle de Puchuncaví bajo condiciones controladas. Se concluye que con encalado la especie tiene potencial de utilización para fitoestabilización (Mueña V. *et al.*, 2010) (Figura 23).



Figura 23. *Oenothera affinis*. (El Mercurio de Valparaíso, edición digital).

- Enmiendas para promover el desarrollo de *Lolium perenne* en suelos afectados históricamente por operaciones de fundición de cobre: Evaluamos eficacia de la cal, cenizas volantes, el compost, y el polvo de hierro como enmiendas para inmovilizar Cu en suelos y promover el crecimiento de las plantas. Suelos enmendados se cultivaron con *Lolium perenne* de 60 días bajo condiciones controladas. La enmienda

más eficaz con respecto a la producción de biomasa rodaje fue una combinación de cal y abono (Goecke *et al.*, 2011) (Figura 24).



Figura 24. *Lolium perenne*. (Stevenson Intermountain Seed, Inc.)

- Quelato biodegradable para mejorar la fitoextracción de cobre por *Oenothera picensis* cultivada en suelos ácidos contaminados con cobre: Se evaluaron los efectos del quelato biodegradable MGDA (ácido metilglicindiacético) en la extracción de cobre por *Oenothera picensis* y en la lixiviación de cobre a través del perfil del suelo, el uso de experiencias ex-situ con columnas de suelo de diferentes alturas. Se pudo comprobar que las aplicaciones de MGDA son una forma eficaz y ambientalmente segura de mejorar la extracción de cobre por esta especie en este tipo de suelos (González I. *et al.*, 2011) (Figura 25).

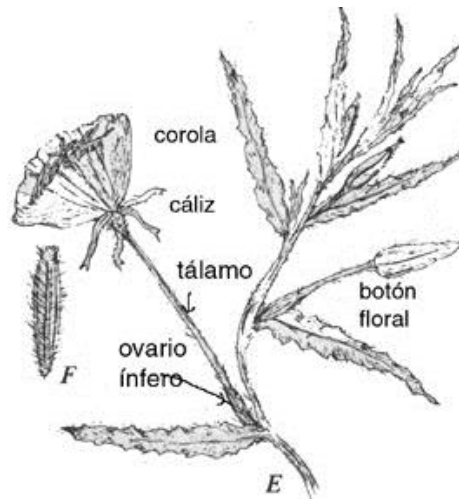


Figura 25. *Oenothera picensis*. (Chloris Chile).

- El efecto de enmiendas de cal y compost en el potencial de revegetación de suelos ácidos contaminadas con metales: se estudió la revegetación de los suelos afectados por la contaminación histórica del complejo industrial de Ventanas. En forma espontánea y asistida se evaluó el restablecimiento de la vegetación y los cambios en las propiedades físico-químicas de suelos con enmiendas de cal o cal + compost. El banco de semillas del suelo nativo fue suficiente para que en consecuencia la planta produjera suficiente de biomasa y cubierta después de la aplicación de las enmiendas del suelo (Cordova *et al.*, 2011).
- Cal y compost para promover la revegetación de plantas en suelos ácidos contaminados por metal: fue evaluada en parcelas de campo modificado con cal y/o compost, la recolonización del banco de semillas existente de plantas del suelo y cambios en las propiedades físico-químicas del suelo. Se encontró que la aplicación de cal y / o compost disminuyó la actividad de los iones de Cu_2^+ y Cu intercambiable en el suelo, mostrando una eficaz inmovilización en el suelo superficial. No hubo diferencia significativa entre el compost y tratamientos de cal + abono con respecto a la productividad de la planta. Por lo tanto, la aplicación de abono sin cal sería el tratamiento más eficaz y rentable (Ulriksen *et al.*, 2012).

- Efecto de compost y quelato biodegradable en fitoextracción de cobre por *Oenothera picensis* en suelos ácidos contaminados con Cobre: fueron evaluados los efectos de abono, en régimen de aplicación de 5 (kg/m²) y quelato biodegradable MGDA (ácido metilglucindiacético), en régimen de aplicación de 6 mmol por planta, en *Oenothera picensis*, en parcelas de campo. La especie presenta una correlación positiva y significativa para las dos variables, es decir, la concentración de Cobre intercambiable y contenido de materia orgánica (González I. *et al.*, 2013).
- **Papel de la vegetación en la protección y estabilización de los taludes**

La vegetación incluyendo árboles, arbustos, hierbas y pastos representan la mejor protección contra la erosión. Las observaciones de los taludes naturales muestra que estos son más estables con vegetación que sin ella; Sin embargo, no existe claridad suficiente sobre los procedimientos de diseño de esta cobertura vegetal, especialmente en lo referente al efecto de las raíces de pastos, hierbas y árboles. La remoción de la cobertura vegetal expone el suelo a la acción de la lluvia, la escorrentía y el viento, facilitando la erosión. La vegetación es multifuncional, relativamente económica, se auto repara, es visualmente atractiva y no requiere generalmente, de equipos pesados o complejos para su instalación. Sin embargo, hay ciertas limitaciones como la susceptibilidad a las quemas y sequías, la dificultad de establecimiento en taludes de alta pendiente y la imposibilidad de resistir fuerzas de socavación o acción del oleaje, así como su lentitud de germinación y crecimiento (Abramson, 1996).

El follaje intercepta la lluvia impidiendo el impacto directo sobre el suelo y amortiguando la energía de las gotas. La retención de agua en el follaje demora o modifica el ciclo hidrológico en el momento de una lluvia. Este fenómeno disminuye la rata de agua de escorrentía, disminuyendo su poder erosivo pero puede aumentar la rata de infiltración. La retención de agua en el follaje depende del tipo de vegetación, sus características y la intensidad de la lluvia.

Las raíces absorben humedad del suelo, la cual es transmitida a la atmósfera por evapotranspiración. La evapotranspiración incluye el efecto combinado de evaporación de la humedad de la corteza terrestre por extracción, a través de las raíces y la transpiración por el follaje.

El agua acumulada en el follaje retrasa el flujo y disminuye el potencial de avenidas torrenciales. La cantidad de lluvia acumulada por la vegetación depende especialmente de la densidad interna del follaje medida por el total de área de hojas por área nominal (Tabla 8) Generalmente el volumen de agua acumulada llega a un máximo y a partir de ese momento el follaje no tiene capacidad para acumular más agua. En lluvias intensas el porcentaje acumulado es relativamente pequeño comparado con el volumen total de la lluvia pero en lluvias cortas de poca intensidad este porcentaje puede ser alto.

Tabla 8 Volumen promedio de agua acumulada para diferentes especies vegetales (adaptado de Styzen y Morgan, 1995)

Especie vegetal	Altura de lluvia acumulada (mm)
Pasto bajos	1
Pastos altos	2
Bosques tropicales	2,5
Bosques poco densos	0,5
Bosques de coníferas	1
Caña de azúcar	0,6
Maíz	0,8
Tabaco	1,8

Al disminuirse la velocidad del agua por acción de la vegetación se aumenta la retención del flujo y la infiltración. Cuando el agua de la lluvia alcanza el suelo y existe vegetación, las posibilidades de infiltración son mayores que cuando el suelo está desnudo. La materia orgánica, las raíces, las lombrices, las termitas y el alto nivel de actividad biológica que se presenta junto a las plantas ayuda a crear un sistema continuo de poros y por lo tanto una mayor conductividad, es ésta tal vez la principal forma de disminución de la escorrentía durante una lluvia por acción de la vegetación (Suárez, 2001).

En Suárez (2001) se propone que para el diseño de los elementos vegetativos se deben tener en cuenta las siguientes etapas:

- Análisis del sitio.
- Selección de las especies vegetales.
- Preparación del sitio.
- Manejo de los materiales vegetales.
- Sistema de establecimiento.
- Mantenimiento.

Generalmente los programas más efectivos de revegetalización se obtienen con plantas nativas del área del proyecto. Las plantas nativas ya están adaptadas a las características del sitio como pendiente, clima, elevación, tipo de suelo, nutrientes, etc.

En este caso de estudio se ocuparon los criterios establecidos por Suárez (2001) para el tratamiento de la erosión laminar.

- **Fitorrecuperación**

La fitorrecuperación es un tratamiento natural, limpio y económico, alternativo a otros procesos físicos y químicos más invasivos. De acuerdo con Wenzel *et al.*, (1999), se pueden distinguir cinco procesos básicos de contención (fitoestabilización o fitoinmovilización) o eliminación (fitoextracción, fitodegradación, fitovolatilización y rizofiltración) de contaminantes por los que las plantas pueden ser empleadas en la recuperación de suelos y aguas contaminadas:

- a) La Fitoestabilización consiste en la reducción de la biodisponibilidad de los contaminantes mediante la revegetación con especies vegetales tolerantes a la

toxicidad que inactiven los contaminantes para reducir el riesgo para el medio ambiente y la salud humana e implica una mejora mecánica de las propiedades físicas del suelo y su protección frente a la erosión y el transporte de contaminantes. Por su parte, la fitoinmovilización provoca la inmovilización y reducción de la biodisponibilidad de los contaminantes mediante la producción de compuestos químicos en la interfaz suelo-raíz que inactiven las sustancias tóxicas, ya sea por procesos de absorción/adsorción o precipitación.

- b) La Fitoextracción, también llamada fitoacumulación, emplea la capacidad de las plantas para extraer el contaminante, principalmente metales, y acumularlo en sus raíces, tallos u hojas. Una vez terminado el proceso, las plantas son retiradas junto con el contaminante y destruidas o recicladas.
- c) La Fitodegradación consiste en la degradación de los contaminantes por la acción de las plantas y de los microorganismos asociados a ellas. Los contaminantes son metabolizados dentro de los tejidos vegetales y las plantas producen enzimas, como la dehalogenasa y la oxigenasa, que ayudan a catalizar la degradación. En el caso de la rizodegradación o rizorrecuperación, la degradación tiene lugar alrededor de las raíces de las plantas en contribución con las poblaciones rizomicrobianas. Las raíces liberan sustancias naturales que suministran nutrientes a los microorganismos asociados como bacterias, levaduras y hongos, estimulando su actividad biológica.
- d) La Fitovolatilización, en la que la planta da lugar a la volatilización de los contaminantes del suelo.
- e) La Rizofiltración, que produce la absorción de metales en aguas contaminadas a través de las raíces de las plantas.

2.6.2 Control de Metales Pesados

De las opciones expuestas en el Anexo 2, las que corresponden a descontaminación in situ para metales son las siguientes:

- a) Flushing: es un tratamiento in situ que consiste en anegar los suelos contaminados con una solución que transporte los contaminantes a una zona determinada y localizada donde puedan ser eliminados. Así, los contaminantes son extraídos del suelo haciéndole pasar agua u otras soluciones acuosas mediante un sistema de inyección o infiltración.
- b) Adición de enmiendas: Los mecanismos de secuestro de metales en suelos por estas enmiendas no se conocen por completo (Hamon *et al.*, 2002; Adriano, 2001). Aunque los experimentos en campo indican la eficacia de estos tratamientos de inmovilización in situ, existen dudas sobre si estos mecanismos de recuperación son permanentes o reversibles en el tiempo. Si el tratamiento in situ induce su efecto a través de un cambio de pH, dando lugar a una mayor precipitación o adsorción, entonces una reacidificación del suelo podría aumentar de nuevo la biodisponibilidad de los metales y su toxicidad (Hamon *et al.*, 2002). Sin embargo, si las enmiendas promueven el secuestro de metales en formas no lábiles en suelo, atrapados en las estructuras de las arcillas o complejados por enlaces covalentes, entonces la inmovilización de los metales puede ser mucho más duradera (Adriano *et al.*, 2004).
- c) Barreras permeables activas: Esta novedosa técnica desarrollada en la última década (Kalin, 2004), se basa en la instalación in situ de una pantalla perpendicular al flujo de la pluma de contaminación a través de la cual pasa el agua subterránea contaminada y cuyo material de relleno puede adsorber, precipitar o degradar biótica o abióticamente los contaminantes.

d) Biotransformación de metales: Los microorganismos pueden movilizar metales a través de lavado, quelación por metabolitos microbianos y sideróforos, transformaciones redox, metilación y consecuente volatilización. Dichos procesos pueden dar lugar a la disolución de compuestos metálicos insolubles y minerales, incluidos óxidos, fosfatos, sulfuros y menas metálicas, y a la desorción de los metales de arcillas o materia orgánica del suelo (Gadd, 2004).

La inmovilización microbiana de metales en suelos se lleva a cabo fundamentalmente a través de los procesos de biosorción y acumulación intracelular, y precipitación. El término de biosorción se utiliza para describir la acumulación pasiva de metales y elementos radioactivos, solubles e insolubles, por materiales biológicos mediante mecanismos de intercambio iónico, adsorción y microprecipitación (Schiewer and Volesky, 2000).

Los microorganismos también pueden inmovilizar metales pesados a través su capacidad para reducir estos elementos a un estado redox más bajo, generando especies metálicas menos bioactivas y con claras aplicaciones en biorrecuperación.

e) Fitorrecuperación: es una técnica emergente que utiliza la capacidad de ciertas especies vegetales para sobrevivir en ambientes contaminados con metales pesados y sustancias orgánicas y a la vez extraer, acumular, inmovilizar o transformar estos contaminantes del suelo. Las plantas utilizadas en la fitorrecuperación presentan mecanismos constitutivos y adaptados para tolerar o acumular un elevado contenido de metales en su rizosfera y en sus tejidos. El éxito de este tratamiento está controlado por la selección de las especies vegetales adecuadas para recuperar un suelo determinado, así como de la cuidada selección de enmiendas (materia orgánica, agentes quelantes, cal, etc.) que permitan mejorar las propiedades del suelo y fomenten la supervivencia y el crecimiento de las plantas (Clemente *et al.*, 2005).

La Fitorrecuperación es un procedimiento que no perturba en gran medida el suelo o el paisaje, de bajo coste y fácil aplicación, aunque presenta inconvenientes como que es un proceso lento, está limitado a suelos poco profundos, en ocasiones las elevadas concentraciones de contaminantes pueden ser tóxicas para las plantas y requiere una buena gestión de la biomasa resultante para impedir que los contaminantes entren en la cadena trófica.

2.7 Restauración

Cuando un suelo se encuentra en estado de degradación, este puede ser sometido a diversos procesos bajo los cuales se pretende llegar a restablecer las características que el medio físico poseía antes de encontrarse en su actual estado. De esta manera la restauración de medios físicos en estado de degradación posee un carácter integral que incluye en su proceso diversas técnicas que permiten restablecer las condiciones del medio dependiendo del alcance con el cual se pretende generar el establecimiento de las condiciones.

2.7.1 Ecológica

Según Laura L. Jackson (1993), la “Sociedad de Restauración Ecológica” define la restauración ecológica como " El proceso de alterar intencionalmente un sitio para establecer un ecosistema". La meta de este proceso es imitar la estructura, función, diversidad y dinámica del ecosistema específico a restaurar.

Existen tres formas básicas de restaurar un área degradada (Machlis, 1993):

- Recuperarla: volviendo a cubrir de vegetación la tierra con especies apropiadas.
- Rehabilitarla: Usando una mezcla de especies nativas y exóticas para recuperar el área.

- Restaurarla: Restableciendo en el lugar el conjunto original de plantas y animales con aproximadamente la misma población que antes.

Existe un nivel de degradación por debajo del cual no habrá recuperación (Finegan, 1993; Machlis, 1993). En este sentido, Machlis (1993), plantea que la restauración es indicada cuando el proceso normal de recuperación sería demasiado lento o no ocurriría porque se traspasó algún límite ecológico (Gálvez, 2002). Ejemplos de dichos límites son:

- Cuando el área es vulnerable ante trastornos recurrentes (como por ejemplo incendios).
- Cuando hay pocos remanentes de las comunidades originales y las distancias de dispersión son largas (como por ejemplo en las islas).
- Cuando la tasa de dispersión de las principales especies animales o vegetales es baja.
- Cuando ciertas especies clave no pueden recolonizar sin ayuda externa (por ejemplo especies poco comunes o en peligro de extinción, o especies de vital importancia funcional).
- Cuando hay una cantidad excesiva de malas hierbas y plagas.

2.7.2 Ambiental

La restauración ambiental se entiende por el proceso de reconversión de terrenos perturbados a su estado original u otro uso productivo, o también el proceso de transformación de un medio perturbado que haga posible el establecimiento de los organismos originarios u otros que se aproximen a la biocenosis primitiva (CERENER,

2013) . Cuando se refiere a las perturbaciones sobre el medio, se entiende las que tienen carácter catastrófico, determinadas por un cambio de uso o actividad o por la alteración esporádica de sus propiedades físicas consecuencia de un efecto extraordinario (decapado del suelo, contaminación del suelo, tala de un bosque, derrumbe de un rodal arbóreo consecuencia del viento, etcétera) a diferencia de la perturbaciones regulares o cíclicas ecológicas a las que los organismos se adaptan biológicamente (régimen de temperatura y humedad, temperamento, fuego, etcétera) (UDP, 2014).

En definitiva la restauración ambiental trata del conjunto de actuaciones que se llevan a cabo con el fin de reducir, mitigar e incluso revertir en algunos casos, los daños producidos en el medio físico. El término de la restauración implica o lleva implícito dos cuestiones que es necesario abordar: lo que provocó la alteración sobre el medio y la corrección de la afección que se haya producido (UDP, 2014).

Dentro del concepto de restauración ambiental se entiende que cada uno de los procesos de transformación del territorio o de abandono de las actividades dejan espacios alterados, en el sentido amplio de la palabra, ya sea con carácter paisajístico o bien bajo una alteración menos perceptible que afecta a alguno de los elementos del geosistema (alteración del suelo, alteración del ciclo hidrológico, contaminación, etcétera), entonces se habla de un espacio del medio físico alterado que constituye un área degradada (García, 2013).

En la restauración ambiental un área degradada es aquella en la que por causas naturales, por acción directa, indirecta o cese de la actividad humana, no se consigue alguno o todos los objetivos siguientes (García, 2013):

- Mantenimiento de los procesos ecológicos esenciales y los sistemas vitales. Esto incluiría la regeneración y protección de suelos, el mantenimiento correcto del ciclo del agua y el reciclado de nutrientes.

- Aprovechamiento sostenido de especies y ecosistemas.
- Capacidad productiva.
- Mantenimiento de la diversidad genética
- Integración en el paisaje.

La consideración de un área degradada exige que se cumplan las siguientes dos premisas en relación a los valores ambientales modificados y a función antrópica que desempeña (García, 2013):

- La alteración o modificación del área representa una pérdida de valor o un resultado de valor negativo en relación con sus características ecológicas, económicas, paisajísticas, de protección, científico-cultural, etcétera; respecto al valor anterior o potencial del territorio. Son frecuente los casos de zonas, donde por ejemplo, caracterizadas por la ausencia de vegetación o de cierto tipo de vegetación, cuando potencialmente podrían albergarla, o incluso poseer otros tipos de estadio de vegetación acorde a las condiciones ecológicas de ese espacio. El área degradada es el reflejo de la alteración que han sufrido los posibles bosques potenciales y primigenios y que en la actualidad se presentan como etapas o estadios previos a etapas más avanzadas del proceso de sucesión ecológica. Entonces, se dice que representan etapas de degradación, aunque el proceso de recuperación se haya iniciado, pues siempre actúa.
- Carencia de función social alguna que por un lado, justifique el estado de degradación parcial, y por otro lado, denote una práctica insatisfactoria de dicha función o bien una localización inadecuada de la actividad en el entorno en el que está localizada.

2.8 Caracterización del área de estudio

2.8.1 Ubicación del área de estudio

El lugar de estudio para esta investigación consta de alrededor de 2 hectáreas ubicadas en la zona de Los maitenes, Puchuncaví, región de Valparaíso, Chile (Figura 26).

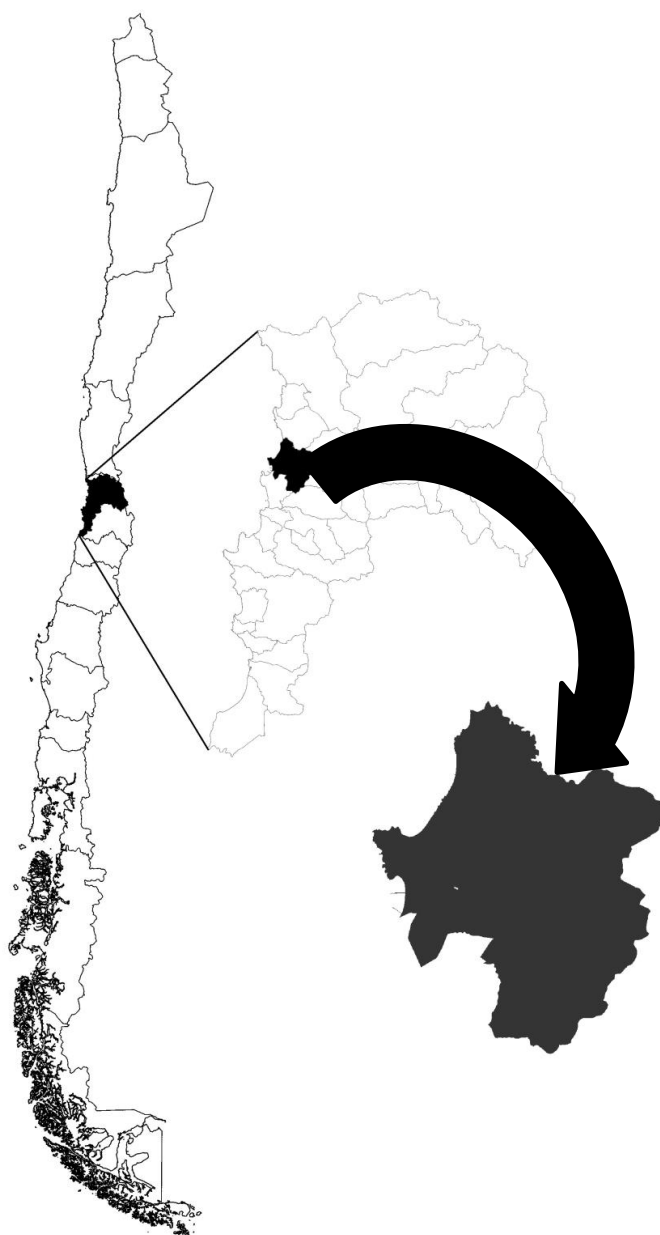


Figura 26. Ubicación de la comuna de Puchuncaví.

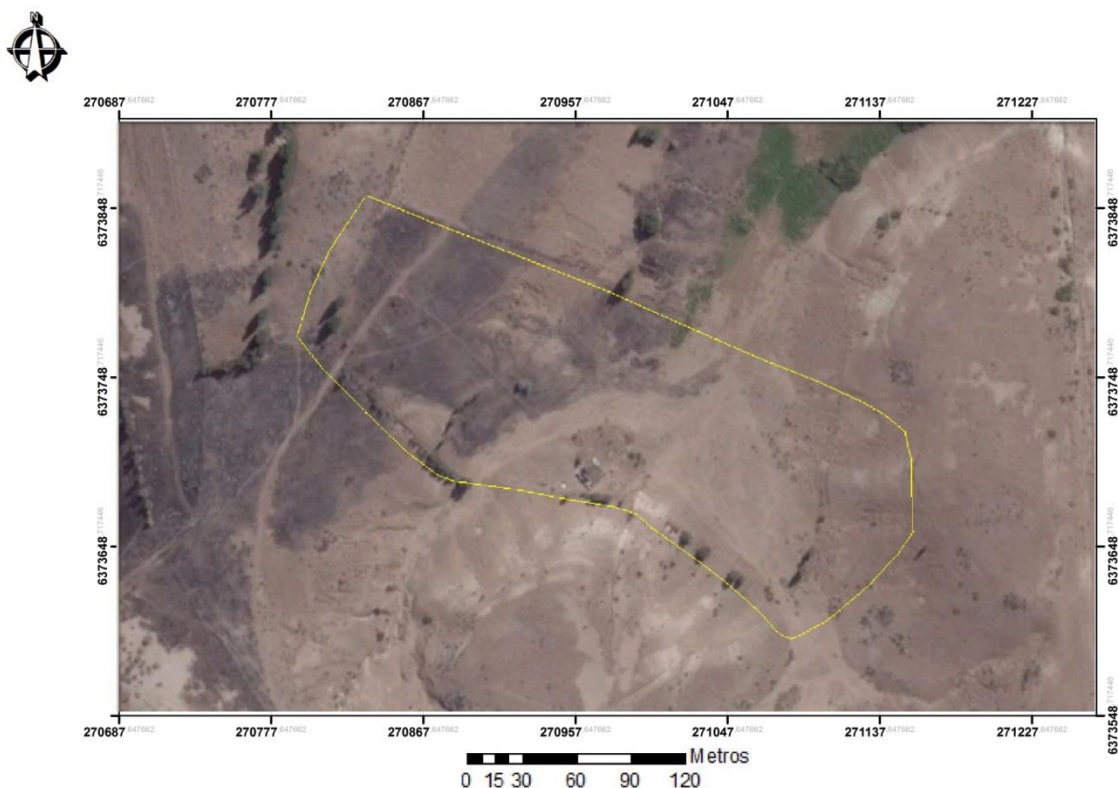


Figura 27. Área de estudio.

Pertenece a la sucesión Rojas Leiva y su Rol es el 201-17 La laguna (Figura 27), según el Conservador de Bienes Raíces de Quintero.

2.8.2 Clima

Según la clasificación de Koppen el clima de esta zona corresponde a “Clima templado, cálido lluvioso con influencia mediterránea”, en donde la cercanía del mar influye de manera importante en la moderación de la temperatura.

Es de marcada influencia marítima, toda vez que el cordón de cerros conforma un hemicíclo que retiene la humedad del mar, exceptuándose el sector de La Canela debido a su situación de encierro. Corresponde a un clima templado cálido, con temperatura media

anual de 14°C; el mes más frío es Julio con una media de 10°C y el más caluroso Enero con una media de 18°C.

La lluvia presenta un promedio de 3,6 (mm) durante los meses de verano; 31.1 (mm) durante los meses de invierno; y de 10 (mm) en primavera. Es una región relativamente seca, con una precipitación promedio anual de 370 (mm). Con concentración en los meses de mayo a agosto (Plan de Desarrollo Comunal Puchuncaví, 2009 – 2012).

2.8.3 Geología

La geología característica de la región está definida por la presencia de afloramientos pertenecientes al basamento cristalino en toda la franja litoral, con mayor desarrollo transversal al sur del río Aconcagua. Al norte del valle de Aconcagua, en ambas cordilleras están expuestas las series sedimentarias paleozoicas y mesozoicas de origen marino y continental; en las planicies litorales afloran sedimentos marinos del Cenozoico; los valles transversales por su parte, han recibido una activa sedimentación durante el Cuaternario.

El área de estudio presenta terrazas marinas con texturas de media a fina. De origen en la era del Cenozoico, última era del Eón Fanerozoico, periodo del Neógeno, pertenecen a la época del Mioceno Superior-Plioceno. Son secuencias sedimentarias clásticas de piedemonte, aluviales, coluviales o fluviales: conglomerados, areniscas y limolitas (SERNAGEOMIN, 2003).

2.8.4 Geomorfología

Puchuncaví se ubica en la región de las planicies litorales y cuencas del sistema montañoso andino costero, limitando con el sector de Costa Arenosa, predominante en la bahía de Quintero. El área de estudio se encuentra en el Sector Litoral que comprende las playas y arenales entre el límite comunal con Quintero y la desembocadura del Estero de Campiche y el Estero de Catapilco, donde se dan formaciones de dunas pertenecientes al

cuaternario que reflejan la acción constante del viento sur oeste que afecta la zona (Plan de Desarrollo Comunal 2009 – 2012).

Las Planicies litorales Conforman un conjunto de terrazas que poseen un ancho variable de 5 a 30 kilómetros y alturas superiores a los 300 metros. Sobre ellas se desarrollan densos centros poblados como Valparaíso y Viña del Mar en la costa, y Quilpué, Villa Alemana y Limache hacia el interior.

El suelo del área de estudio según Cosió *et al.*, (2007), se clasifica como franco arcillo arenoso, pardo rojizo en la superficie y similar en profundidad. Descansa sobre clastos redondeados y, ocasionalmente, sobre arenisca granítica cementada, de drenaje lento.

2.8.5 Hidrogeología

La hidrografía se remite a la existencia de tres esteros semi-permanentes, los que representan la principal fuente de agua para la agricultura del sector. Dichos esteros son el de la Canela, de Puchuncaví y de Pucalán.

El estero de la Canela fluye desde el Sur-Este hacia el Nor-Este, nace en la loma del Lindero, en el sector de la Canela, y se convierte en un tributario del estero Catapilco, en el límite comunal.

El estero de Puchuncaví fluye desde el Nor-Este hacia el Sur-Oeste, por un valle bajo y pantanoso conocido como la depresión del Rungue. Dicho estero apoya las labores agrícolas del sector que cruza, antes de desembocar en la bahía de Quintero.

El estero de Pucalán fluye en dirección Nor-Este a Sur-Oeste y tiene como tributarios a cuatro esteros menores: Los Maquis, Chilicauquén, San Pancrancio y Mal Cara conocido como Malacara. Esta red de esteros se concentra en el cuadrante Sur-Este de la comuna y

nace en el sector de más altas cumbres. Sus aguas desembocan en la comuna de Quintero, formando una amplia vega de terrenos bajos en dicho sector.

Para el caso particular del área regulada por el instrumento territorial, se encuentran dentro del alcance del mismo Sector Catapilco, Subsector La Laguna, Sector Horcón, Estero Puchuncaví. La superficie que abarca la delimitación de cada uno de estos sectores ubicados en las Cuencas Costera Aportantes a los Acuíferos.

El área de estudio se sitúa a menos de 100 m de un humedal catastrado por el Inventario Nacional de humedales y el seguimiento ambiental del Ministerio de Medio Ambiente (MMA, 2011).

2.8.6 Flora

La composición taxonómica del área se presenta en la Tabla 9 la flora del área alcanza una riqueza taxonómica de 9 familias, 11 géneros y 12 especies de plantas vasculares, basada en la nomenclatura de Marticorena y Quezada (1985), mediante campañas en terreno, durante diciembre del 2014. Cada especie fue fotografiada en terreno y luego identificada mediante bibliografía.

Tabla 9. Composición taxonómica Flora.

División	Familia	Especie
Magnoliophyta	Fabaceae	<i>Adesmia</i>
Angiospermae	Polygonaceae	<i>Muehlenbeckia Hastulata</i>
Magnoliophyta	Anacardiaceae	<i>Schinus latifolius</i>
Magnoliophyta	Fabaceae	<i>Prosopis chilensis</i>
Magnoliophyta	Plantaginaceae	<i>Plantago canceolata</i>
Magnoliophyta	Polygonaceae	<i>Rumex acetosa</i>
Magnoliophyta	Asteraceae	<i>Cynara cardunculus</i>
Magnoliophyta	Asteraceae	<i>Baccharis paniculata</i>
Magnoliophyta	Poaceae	<i>Cynodon dactylon</i>
Magnoliophyta	Poaceae	<i>Bromus berterianus</i>
Magnoliophyta	Brassicaceae	<i>Sisymbrium officinale</i>
Magnoliophyta	Fabaceae	<i>Trifolium michelianum</i>
Pinophyta	Pinaceae	<i>Pinus sylvestris</i>
Magnoliophyta	Myrtaceae	<i>Eucalyptus</i>

2.8.7 Vegetación

La vegetación de la zona según Gajardo (1994) correspondería a la de la formación de Bosque Esclerófilo Costero. Debido a las alteraciones humanas, principalmente plantaciones forestales de pino, actualmente la vegetación natural de esta zona se presenta en forma de renuevos por monte bajo (Gajardo 1994).

Según la clasificación de Lubert y Pliscoff (2006), el área de estudio se encuentra en el piso vegetacional de Matorral arborescente esclerófilo mediterráneo costero de *Peumus boldus* y *Schinus latifolius*.

A ojo desnudo se identifican en el área de estudio

2.8.8 Carta de Ocupación de Tierras (COT)

En Google Earth se identificaron las formaciones vegetales según Etienne y Prado (1982). Luego los límites de cada formación fueron corroborados con un dispositivo GPS. Se comenzó identificando las formaciones vegetacionales tal como muestra la Figura 28.

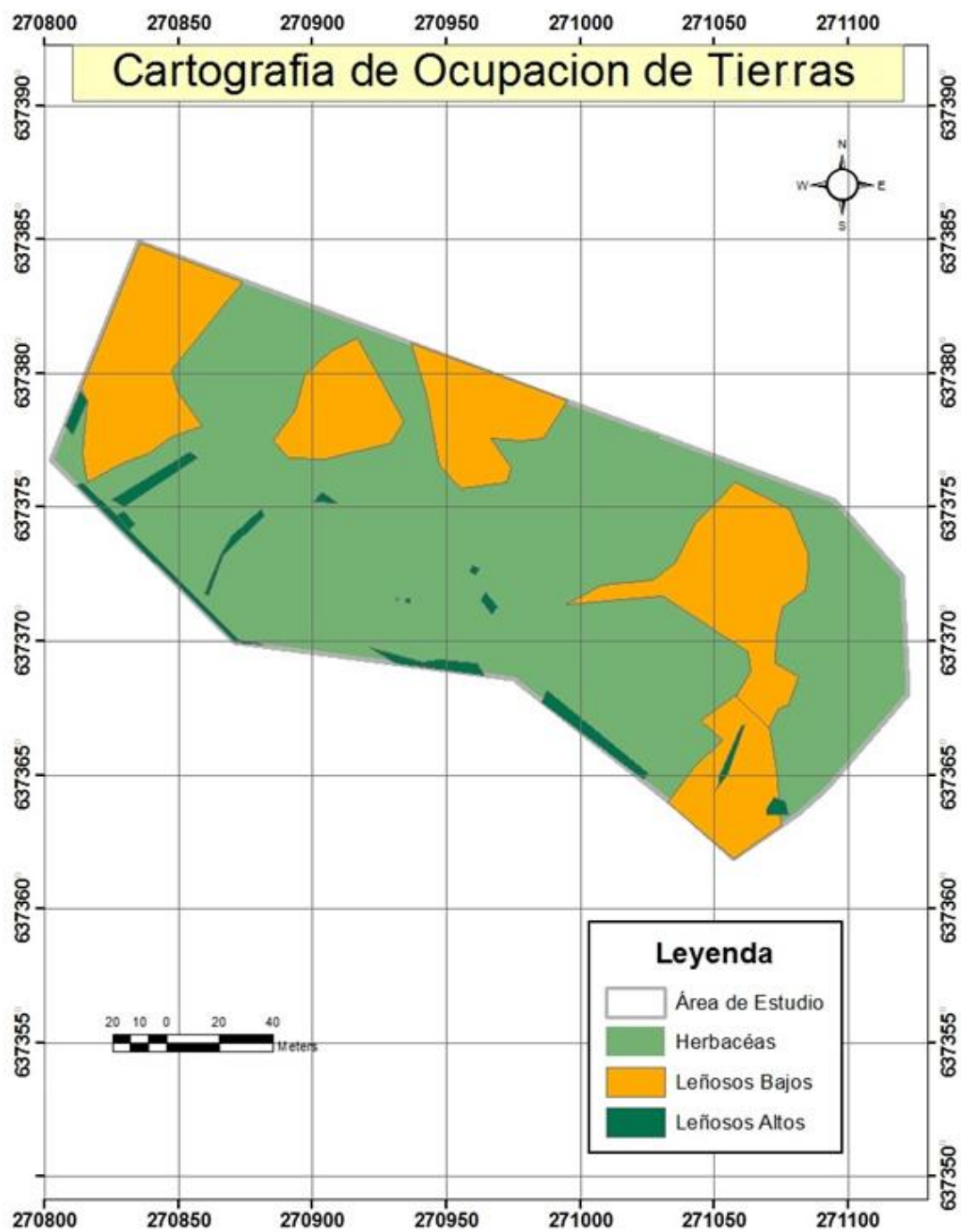


Figura 28. Cartografía de Ocupación de Tierras para Formaciones Vegetacionales.

En la Figura 29 se incluyen todas las especies identificadas el catastro florístico y su distribución:

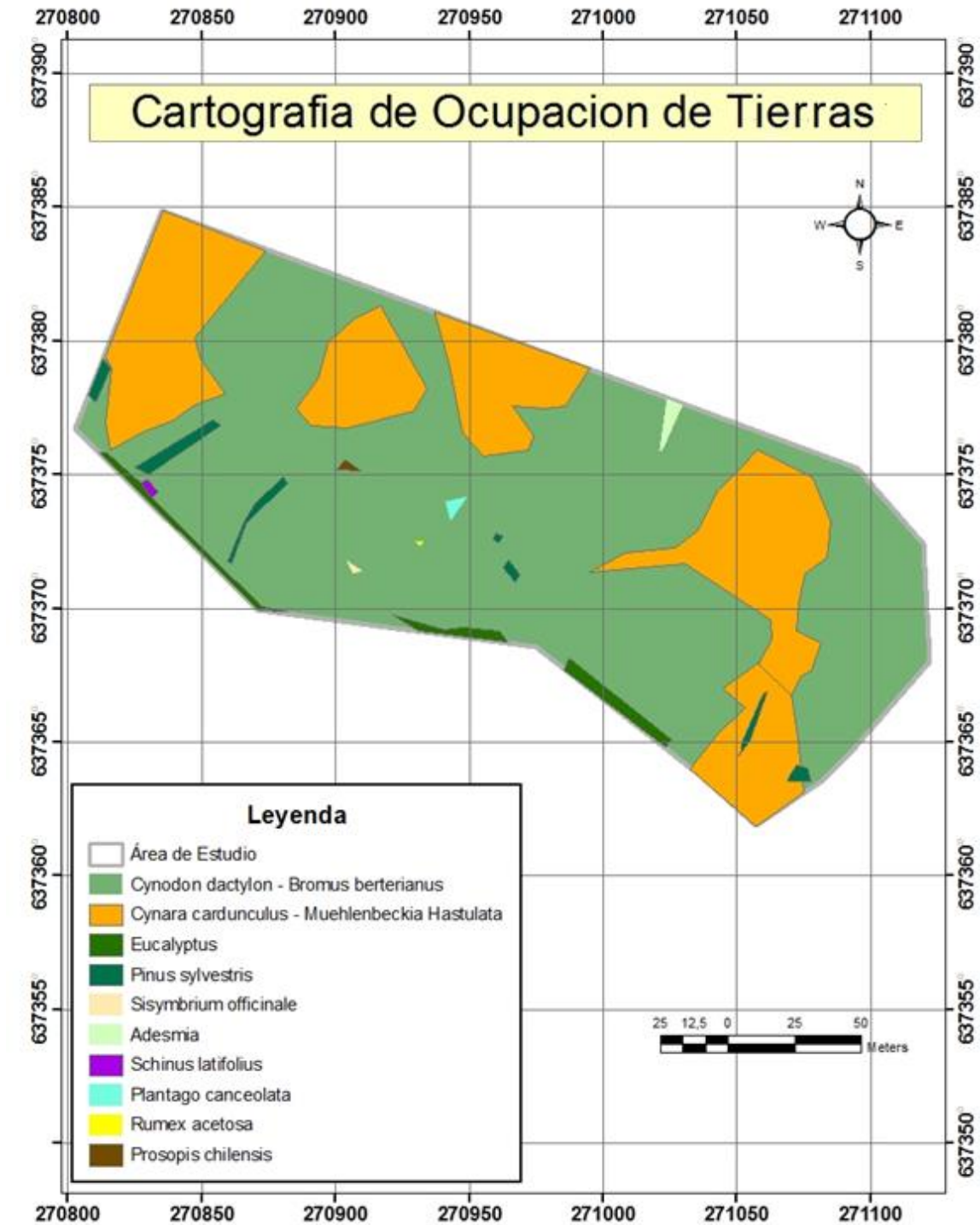


Figura 29. Cartografía de ocupación de tierras para catastro florístico.

2.8.9 Relieve

Se distinguen en la Figura 30 las zonas de laderas, monte y llano del área de estudio.

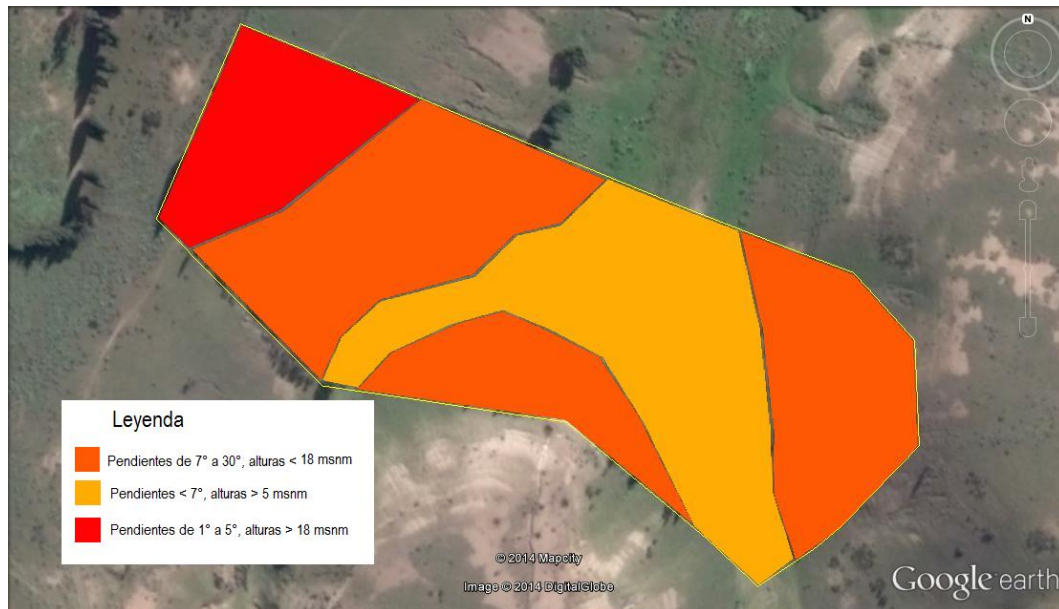


Figura 30. Zonas de ladera, monte y llano del área de estudio.

2.8.10 Arqueología

El área de estudio se encuentra ubicada cerca al Yacimiento paleontológico de Los Maitenes, está ubicado a tres km de la línea de la costa. Allí se han encontrado abundantes moldes internos de bivalvos y gastrópodos, así como una gran cantidad de restos óseos de cetáceos misticeto (ballenas) dispersos y articulados, pudiéndose observar 35 sitios de afloramiento de fósiles en el área. También se han encontrado dientes de tiburón blanco y numerosas ignitas. El perfil estratigráfico se caracteriza por presentar una línea de bolones sobre el cual se encuentran los estratos con ballenas y bajo él los estratos con invertebrados. Desde el punto de vista geomorfológico y paisajístico, se puede indicar la presencia de pequeños cañones formados por erosión hídrica, y además entre ellos se pueden observar claramente los perfiles, en que se visualiza la paleoduna en su estrato superior y los sedimentos marinos en su estrato inferior. De acuerdo a los antecedentes y

cartas geológicas, el Yacimiento Paleontológico Los Maitenes de Puchuncaví puede ser asignado a la Formación Horcón correspondiendo al período Plioceno (Sociedad Geológica).

Actualmente Puchuncaví se encuentra postulando para convertirse en un Geoparque avalado por la UNESCO.

2.8.11 Erosión del suelo

A nivel nacional, se puede observar que la mayor cantidad de suelos erosionados aumentan de sur a norte. Una superficie de 36,8 millones de hectáreas, equivalentes al 49,1% del territorio nacional presenta algún grado de erosión. La región de Valparaíso, donde se encuentra el área de estudio, presenta un 57% de suelo erosionados, solo inferior a la región de Coquimbo con un 84%. Las regiones con mayor riesgo de erosión actual severo y muy severo, indican que las regiones con mayores índices son Coquimbo (65,3%), Valparaíso (38,1%) y O'Higgins (37,6%), respecto de la superficie de suelos de cada región. Mientras en la zona norte predomina la erosión natural, en estas regiones lo hace la erosión antrópica o acelerada (CIREN, 2010).

Según la “Cartografía de Erosión Actual” (CIREN, 2010), el área de estudio se encuentra en un estado de erosión “severa”.

2.8.12 Erodabilidad del suelo

La región de Valparaíso es la que presenta un mayor índice de riesgo de erosión potencial severo y muy severo con un 75,8% de la superficie de la región, con 926.282 (ha) de un total de 1.600.738 (ha) (CIREN, 2010).

Para la comuna de Puchuncaví, 19.942 (ha) de un total de 30.172 (ha), presentan riesgo de erosión potencial severa o muy severa.

Según la “Cartografía de Riesgo de Erosión Potencial” (CIREN, 2010), el área de estudio se encuentra en un índice de erosión potencial “severa”.

2.8.13 Uso de Suelo

De acuerdo con el PREMVAL (Plan Regulador Metropolitano de Valparaíso) vigente, el área de estudio se encuentra fuera del área urbana y dentro de la zona delimitada como “Área rural”.

En este se indica que se establecen los siguientes usos de suelo permitidos:

- Vivienda del propietario y sus trabajadores
- Viviendas sociales o de hasta un valor de 1.000 unidades de fomento.
- Balneario o campamento turístico
- Industrias
- Equipamiento

También, se establece específicamente para el área rural perteneciente al territorio de la comuna de Puchuncaví, la prohibición de instalación de industrias de impacto intercomunal calificadas como peligrosas, conforme a lo dispuesto en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones.

2.8.14 Contaminación (concentración de metales pesados y arsénico)

La presencia de metales pesados es expuesta en base a registros tomados por el proyecto “Evaluación de la exposición a pasivos ambientales mineros sobre poblados aledaños mediante la determinación de metales pesados y especiación de arsénico en agua de consumo y suelo superficial” del Departamento de Química y Bioquímica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valparaíso, proyecto a cargo del Dr. M. Gabriela Lobos Valenzuela.

En “Metales pesados y arsénico en suelos y aguas de poblados aledaños a pasivos ambientales mineros” (Jara, Lattapiat; 2012) evaluaron muestras de aguas de consumo y suelos superficiales, mediante la determinación de concentraciones de metales pesados (Cd, Cr, Cu, Mn, Zn, Pb, Mo) y As totales y su caracterización fisicoquímica, donde establecieron relaciones y comparaciones con criterios de calidad nacionales e internacionales.

En “Metales pesados y arsénico en suelos y aguas de poblados aledaños a pasivos ambientales mineros” (Jara, Lattapiat; 2012) evaluaron muestras de aguas de consumo y suelos superficiales, mediante la determinación de concentraciones de metales pesados (Cd, Cr, Cu, Mn, Zn, Pb, Mo) y As. Se evaluaron tres puntos descritos en la Figura 31, cuyas ubicaciones georreferenciadas se encuentran en la Tabla 10.



Figura 31. Puntos de muestreo de suelos.

Tabla 10. Coordenadas UTM y tipos de muestras de suelo en puntos de muestreo del SITIO C.

Punto de muestreo	Coordenada UTM	Altura (msnm)	Tipo de muestra	Nomenclatura muestra
CS1	19H 270025 6372215	38	Suelo superficial patio residencia	CS1
CS2	19H 270471 6372837	42	Suelo superficial contigua a FMP/A "Montecarmelo"	CS2
CS3	19H 269941 6372426	19	Suelo superficial patio residencia	CS3

El orden de concentraciones metálicas para dos puntos de muestreo en suelos del pueblo de maitenes (suelos superficiales de patios residenciales) fue $Mn > Cu > Zn > Pb > As > Cr > Cd > Mo$, donde todas las concentraciones sobrepasaron los LMP (límites máximos permitidos) excepto para Cr y Mo. Según las Directivas de Kelley, estos suelos clasifican como suelos ligeramente contaminados por Mn, As y Cd. Para el punto de muestreo cercano al pasivo ambiental minero el orden de concentración fue: $Zn > Cu > Pb > As > Cd$

> Mn > Mo > Cr, los que presentaron concentraciones que superaron los LMP, calificando como suelo contaminado por Mn y extremadamente contaminado por As, Pb y Cd.

Los poblados aledaños a PAM se encuentran expuestos en mayor o menor grado a altos contenidos de As y metales pesados detectados en muestras de suelo superficial, lo que implica un riesgo para la salud de las personas ya que en su mayoría estos suelos son agrícolas lo que hace muy probable la incorporación de los metales a los cultivos (Jara, Lattapiat; 2012).

La localidad de Los Maitenes en el Valle de Puchuncaví (Chile central) donde se desarrollan actividades agrícolas, actualmente es un área altamente contaminada por Cobre (Cu), ya que a que ha recibido por más de 35 años las descargas de emisiones gaseosas emitidas por la Fundición Ventanas. Debido a lo anterior, el ecosistema mediterráneo semiárido del valle ha estado expuesto a la deposición atmosférica de dióxido de azufre (SO₂) y partículas ricas en metales desde 1964 hasta 1992 (Folchi, 2006). Después de 1992, la empresa incorpora una serie de tecnologías para reducir emisiones a la atmósfera de SO₂ y partículas para cumplir con las nuevas regulaciones ambientales chilenas. Sin embargo, los suelos circundantes ya habían acumulado Cobre (Cu) y otros elementos en altas concentraciones, resultando la acidificación de los mismos y su posterior erosión, habiendo perdido gran parte de su cubierta vegetal nativa (De Gregori *et al.*, 2003; Ginocchio, 2000; Neaman *et al.*, 2009).

2.8.15 Actividad Humana

El área de estudio posee una cabaña y un pozo. A ojo desnudo se evidencias el tránsito de animales característicos de la actividad ganadera y de pastoreo. Consta de una instalación de aproximadamente 6x6 m² y un baño de pozo ubicado a aproximadamente 7 metros.

3 Problema

En Chile un 64% del suelo, es decir, aproximadamente 36,8 millones de hectáreas, presentan algún tipo de erosión, que si bien en general tiene causas naturales, pueden ser generadas por actividades humanas asociadas a prácticas agrícolas inadecuadas. Se estima que en la región de Valparaíso más del 50% del territorio presenta problemas de erosión moderada, severa o muy severa causada en gran medida por la intervención humana (OCHISAP, 2015). La erosión de los suelos en Chile, constituye en la actualidad uno de los problemas ambientales más significativos del sector silvoagropecuario (Araneda *et al.*, 1999; Bonilla *et al.*, 2010). Esta situación se ve reflejada en la zona de Puchuncaví, que se caracterizó por poseer grandes extensiones de suelo destinadas a la actividad agrícola, especialmente enfocada a hortalizas leguminosas. A mediados del siglo XX, y tras la instalación del parque industrial Las Ventanas, se terminó por cambiar radicalmente el uso de suelo del lugar. En la última década diversos estudios (De Gregori *et al.*, 2003; Ginocchio, 2000; Neaman *et al.*, 2009) han logrado demostrar el estado de degradación y contaminación de los suelos cercanos al parque industrial. En esta investigación se manejara el recurso suelo, generando un plan de acción enfocado a la restauración ambiental de un sector en Los Maitenes, Puchuncaví.

4 Objetivos

4.1 Objetivo General

Desarrollar un plan para la recuperación de suelos degradados mediante técnicas de restauración ambiental en el sector de Los Maitenes, Puchuncaví.

4.2 Objetivos Específicos

- 1.- Identificar sectores degradados dentro del área de estudio.
- 2.- Evaluar el grado de degradación de los sitios degradados y del área de estudio.
- 3.- Seleccionar sitios degradados y técnicas a utilizar.
- 4.- Aplicar las técnicas de restauración idóneas para la situación de degradación.
- 5.- Evaluar las técnicas empleadas para la restauración de sitios degradados.
- 6.- Realizar un análisis de costos de las actividades.

5 Metodología

5.1 Identificación de sectores degradados en el área de estudio

Se evaluó preliminarmente el área de estudio en base al concepto de unidades ambientales homogéneas, definiendo unidades que permiten conocer la fisiografía y vegetación.

En un terreno realizado el mes de Noviembre del año 2014, se reconocieron sitios con evidencias de pérdida de suelo, donde se consideraron las cárcavas remontantes, ya que la erosión en cárcavas es la principal fuente de sedimento y el mayor proceso de degradación del suelo (Bravo-Espinosa *et al.*, 2008) y alguna otra evidencia de erosión como surcos o erosión laminar. Se georreferenció con un dispositivo GPS las ubicación de cada sitio identificado.

5.2 Determinación del grado de degradación del área

Se determinó el grado de degradación de acuerdo a dos parámetros: por erosión, y paisajísticamente.

5.2.1 Pérdida de suelo

Los perfiles de los sitios medidos se aprecian en la Figura 32, donde se distingue su longitud con respecto al área de estudio.



Figura 32. Ubicación georreferenciada de perfiles (Elaborado con Google Earth).

Con una cinta métrica se midieron las dimensiones de los sitios con evidencia de degradación. Las cárcavas fueron caracterizadas según Jesús E. Santiago (2012) y se valoraron las dimensiones de los sitios con erosión laminar.

La medición de los perfiles de erosión de cada cárcava encontrada, se realizaron midiendo la pendiente con un Clinómetro Óptico SUUNTO modelo PM-5/1520, mientras que con una huincha se registró el largo de la sección de ladera con esa inclinación. El comienzo de cada cárcava, así como su término, se georreferenció con dispositivo GPS.

Los perfiles para cada cárcava, se realizaron con ayuda del software AutoCAD versión 2007, para conocer la sección transversal.

Una vez caracterizadas las laderas, se reprodujeron en el software Rusle2 versión 2.5.2.11 de la USDA. Para ello se utilizó un SUELO “sandy clay loam (low-mod OM, v. slow perm.)” y una cobertura de MANEJO que corresponde a la opción del software “cool season grass;

not harvested moderate stand”. Este tipo de manejo indica la presencia de una cobertura vegetal de estación fría, con un bajo soporte. Para el CLIMA se consideraron las condiciones del área de estudio, con temperatura media anual de 14°C; el mes más frío con una media de 10°C y el más caluroso una media de 18°C y 370 mm anuales de precipitación (ver sección 2.8.2), utilizando la opción correspondiente a “Santa Barbara_R15”.

Para los perfiles de los sitios con erosión laminar se utilizó un SUELO “sandy clay loam, (subsoil, substratum)”, sin cobertura de manejo.

5.2.2 Evaluación paisajística

La evaluación fue realizada durante el mes de diciembre del año 2014. Identificando un total de cuatro “Unidades Visuales”. Una vez escogidas las Unidades Visuales fueron georreferenciadas con un dispositivo GPS. Los puntos desde los cuales se evaluó cada Unidad Visual se muestran en la Figura 33. En la Tabla 11 se puede apreciar las posiciones georreferenciadas y la altura (msnm) de cada una.



Figura 33: Unidades visuales.

Tabla 11: Ubicación georreferenciada de las unidades visuales.

Unidad Visual	Coordenada UTM	Altura (msnm)
A	19H270962 6373702	9
B	19H 271097 6373709	19
C	19H 271017 6373777	2
D	19H 270861 6373798	19

Por cada Unidad Visual se registraron tres imágenes con una cámara digital SONY Cyber-shot modelo No. DSC-W180 de 10.1 Mega pixeles en modo instantáneo suave. Las Unidades Visuales fueron evaluadas en terreno por tres evaluadores. Las imágenes fotografiadas fueron posteriormente mostradas a siete evaluadores más (contando las tres personas que se encontraban en terreno), para obtener un total de diez evaluadores. El método no es de subjetividad controlada, ya que la mejora del problema de la falta de representatividad no será resuelto por la evaluación a unos pocos "expertos", sino que sumando grupos de personas cuya opinión global sea socialmente representativa y valorado con encuestas en base a listas de adjetivos, que tienen una expresión numérica que facilite su procesamiento e interpretación. Se pretende, de este modo, obtener un equilibrio entre la opinión del público y los "expertos" (Daniel *et al.*, 1983).

La evaluación de cada unidad se hizo según análisis cualitativo con la siguiente clasificación y puntuación; Clase Alta (3), Clase Media (2) y Clase Baja (1) (Zambrano *et al.*, 2002), descrito e identificado cada rango de valoración de la unidad como se muestra a continuación:

a) Unidad Visual del Paisaje (UVP)

Su definición depende de elementos, tanto bióticos como abióticos, de actuaciones humanas y de modificaciones naturales o artificiales de la vida terrestre. Los rangos de valoración para la unidad visual se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Rangos de valoración para la unidad visual (Zambrano *et al.*, 2002).

Unidad Visual	Alto	Valor	Medio	Valor	Bajo	Valor
Abiótico	Predominio de elementos físicos, influyentes en la calidad y composición de una escena agradable a observar	3	Elementos que dan calidad a la composición o escena, pero que por su atractivo tienen un valor medio	2	Elementos poco notorios, o que no están presentes en la escena y que disminuyen la calidad de la composición, paisajes poco atractivos	1
Biótico	Predominio de elementos físicos, influyentes en la calidad y composición de una escena agradable a observar	3	Elementos que dan calidad a la composición o escena, pero que por su atractivo tienen un valor medio	2	Elementos poco notorios, o que no están presentes en la escena y que disminuyen la calidad de la composición, paisajes poco atractivos	1
Antrópico	Predominio de elementos físicos, influyentes en la calidad y composición de una escena agradable a observar	3	Elementos que dan calidad a la composición o escena, pero que por su atractivo tienen un valor medio	2	Elementos poco notorios, o que no están presentes en la escena y que disminuyen la calidad de la composición, paisajes poco atractivos	1

La ponderación para cada factor corresponde a un 33,3%; entonces, el valor de la unidad visual del paisaje (UVP) se determinará de la siguiente manera:

$$UVP = \left[\frac{1}{3} \times Abiótico \right] + \left[\frac{1}{3} \times Biótico \right] + \left[\frac{1}{3} \times Antrópico \right]$$

b) Organización Visual del Paisaje (OVP)

La organización visual se relaciona con la integridad e interrelación que presentan los elementos que forman el paisaje dentro del territorio.

Se evaluará a través de un análisis de las características básicas del paisaje en función del contraste visual, dominancia visual e importancia relativa de las características visuales.

Los rangos de valoración de la organización visual del paisaje se clasifican según la Tabla 13.

Tabla 13. Rangos de valoración de la organización visual (Zambrano *et al.*, 2002).

Organización Visual	Alto	valor	Medio	Valor	Bajo	valor
Contraste Visual	Un contraste alto entre cada uno de los elementos del paisaje	3	Contrate medio entre cada uno de los elementos	2	Bajo contraste entre cada uno de los elementos integrados de la unidad visual	1
Dominancia Visual	Dominio total de la apreciación del paisaje	3	Dominio parcial de los elementos	2	Presencia de un elemento de forma negativa dentro de la unidad visual	1
Importancia Relativa de las Características Visuales	Igual presencia entre contraste y la dominancia de cada una de las características visuales	3	Una interrelación entre contraste y dominancia de carácter medio	2	Carácter y dominancia de carácter bajo	1

La ponderación para cada factor corresponde a un 33,3%; entonces, el valor de la organización visual del paisaje (OVP), se determinará de la siguiente manera:

$$OVP = \left[\frac{1}{3} \times \text{Contraste Visual} \right] + \left[\frac{1}{3} \times \text{Dominancia} \right] + \left[\frac{1}{3} \times \text{Importancia Relativa} \right]$$

c) Calidad Visual del Paisaje (CVP)

La calidad visual del paisaje se evaluará según los siguientes parámetros; diversidad, naturalidad, singularidad, complejidad topográfica y actuaciones humanas. Los rangos de valoración de la calidad visual del paisaje se clasifican según la Tabla 14.

Tabla 14. Rangos de valoración de la calidad visual (Zambrano *et al.*, 2002).

Calidad Visual	Alto	valor	Medio	valor	Bajo	valor
Diversidad	Gran variedad de elementos biofísicos, características visuales	3	Diversidad media de vegetación, presencia de actuaciones humanas	2	Escasa diversidad, paisajes monótonos	1
Naturalidad	Mantiene íntegramente las características naturales	3	Poca intervención humana en la naturaleza	2	Naturaleza altamente modificada	1
Singularidad	Presencia de elementos únicos o poco corrientes con alto grado de atracción. Gran potencial visual por su escasez o valoración histórica	3	Escaso grado de atracción visual, no existe un realce histórico	2	La presencia de elementos pasan por desapercibidos. Son comunes en la región	1
Complejidad Topográfica	Presencia de un relieve montañoso notorio	3	Formas montañosas interesantes pero poco dominio	2	Colinas suaves y ondulaciones en el terreno poco notorias	1
Actuaciones Humanas	Actuaciones humanas que estéticamente no agreden el entorno	3	Actuaciones armoniosas sin calidad estética	2	Modificaciones intensas que reducen la calidad estética	1

La ponderación para cada factor corresponde a un 20%, lo que asigna un peso equitativo para cada parámetro, entonces; el valor de la calidad visual del paisaje (CVP), se determinará de la siguiente manera:

$$CVP = \left[\frac{1}{5} \times Diversidad \right] + \left[\frac{1}{5} \times Naturalidad \right] + \left[\frac{1}{5} \times Singularidad \right] \\ + \left[\frac{1}{5} \times Complejidad \right] + \left[\frac{1}{5} \times Actuaciones Humanas \right]$$

d) Calidad Escénica del Paisaje (CEP)

Se entiende como calidad escénica a una unidad visual cuyo carácter paisajístico muestra un alto grado de variedad, armonía y contraste entre sus elementos visuales básicos, los que determina un paisaje agradable de observar (Castillo, 2002).

Está definida por los siguientes parámetros de evaluación; topografía, vegetación, formas de agua, color y rareza. Los rangos de valoración de la calidad escénica del paisaje se clasifican según en la Tabla 15.

Tabla 15. Rangos de valoración de la calidad **escénica** (Zambrano *et al.*, 2002).

Calidad Escénica	Alto	valor	Medio	valor	Bajo	valor
Topografía	Relieve con pendiente mayor a 60% o de gran variedad superficial, o muy erosionado, o con presencia de rasgos singulares y dominantes	3	Pendientes entre 30%-60%. Formas erosivas interesantes y variadas. Presencia de formas y detalles interesantes pero no dominantes o excepcionales	2	Pendiente entre 0% y 30% colinas suaves, fondos de valles planos, pocos o ningún detalle singular. Sin rasgos dominantes	1
Vegetación	Grandes masas boscosas, gran variedad de tipos de vegetación, con formas, texturas y distribución interesante	3	Cubierta vegetal casi continua. Poca variedad en la distribución de vegetación. Diversidad de especies media	2	Poca o ninguna variedad o contraste en distribución de la vegetación.	1
Formas de agua, ríos o lagos	Factor dominante en el paisaje, apariencia limpia y clara, aguas blancas o grandes láminas de agua en reposo	3	Agua en movimiento o en reposo, pero no dominante en el paisaje, con características bastante comunes en su recorrido y caudal.	2	Torrentes esteros y arroyos intermitentes en las diferentes estaciones del año, con poca variación en su caudal. Pueden pasar en forma inapreciable o estar ausente	1
Color	Combinaciones de color intensas y variadas, o contrastes agradables entre suelo, vegetación, cerros y agua	3	Alguna variedad e intensidad en los colores y contrastes del suelo, vegetación, cerros y agua, pero no actúa como elemento dominante.	2	Muy poca variación de color contraste. Colores apagados.	1
Rareza	Único o poco corriente o muy raro en la región.	3	Característico aunque similar a otros en la región	2	Bastante común en la región	1

La ponderación para cada factor corresponde a un 20%, lo que asigna un peso equitativo para cada parámetro, entonces; el valor de la calidad escénica del paisaje (CEP), se determinará de la siguiente manera:

$$CEP = \left[\frac{1}{5} \times Topografía \right] + \left[\frac{1}{5} \times Vegetación \right] + \left[\frac{1}{5} \times Formas de Agua \right] \\ + \left[\frac{1}{5} \times Color \right] + \left[\frac{1}{5} \times Rareza \right]$$

Finalmente el Valor Paisajístico del Territorio estará dado por el siguiente modelo:

$$VTP = \left[\frac{1}{4} \times UVP \right] + \left[\frac{1}{4} \times OVP \right] + \left[\frac{1}{4} \times CVP \right] + \left[\frac{1}{4} \times CEP \right]$$

Dónde:

UVP: Unidad Visual del Paisaje.

OVP: Organización Visual del Paisaje.

CVP: Calidad Visual del Paisaje.

CEP: Calidad Escénica del Paisaje.

La ponderación para cada factor corresponde a un 25%, lo que asigna un peso equitativo para cada parámetro.

Luego manera para obtener el Valor Paisajístico del territorio se promediaron los valores obtenidos por los 10 evaluadores.

Los rangos de valor tendrán una puntuación entre 1 y 3 clasificándose como muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Valor Paisajístico del Territorio (Zambrano *et al.*, 2002).

Índice	Descripción	Rango
1	Zona con calidad paisajística Baja	1 – 1,6
2	Zona con calidad paisajística Media	1,7 – 2,3
3	Zona con calidad paisajística Alta	2,4 – 3,0

Se realizó una evaluación de cada Unidad Visual según Zambrano *et al.*, 2002. Esta se hizo en modo de encuesta in-situ por tres personas y posteriormente con siete personas ex - situ. Se dispuso de dos papeletas una con la información que distinguen el valor las clases a evaluar (Anexo N°3) y otra para rellenar (Anexo N°4), mostrando las fotografías de cada Unidad Visual a los encuestados (Anexo N°5).

5.3 Selección de los sitios a restaurar y técnicas a utilizar

5.3.1 Selección de los sitios a restaurar

Los sitios de interés evaluados, se clasificaron de acuerdo a su pendiente (Soil Survey Stuff, 1993) (Tabla 17), según su profundidad (Tabla 18) (SAGARPA, 2009) y por la cantidad de suelo perdido por año. De esta manera se pudo conocer mejor la forma en la cual pueden ser tratados. La pendiente de cada cárcava nos permitió conocer que técnica es la idónea para poder disminuir la inclinación en secciones de ladera visiblemente afectadas por la erosión, manejando las zonas de acumulación de sedimento. La profundidad de cada signo de degradación indicó su estado y permitió obtener dimensiones para el diseño de las técnicas a aplicar.

Tabla 17. Clasificación de pendiente simple y compleja (Soil Survey Stuff, 1993).

Clases		Límites gradiente de pendiente			
Pendiente simple	Pendiente Compleja	Mínimo (%)	Máximo (%)	Mínimo (°)	Máximo (°)
Casi nula	Casi nula	0	3	0	2
Pendiente suave	Ondulada	1	8	1	5
Inclinada	Rodada	4	16	2	9
Moderadamente empinada	Montañoso	10	30	6	17
Empinada	Empinado	20	60	11	31
Muy empinada	Muy empinada	>45		24	

Tabla 18. Clasificación según profundidad de cárcava (SAGARPA, 2009).

Clase	Profundidad (m)	Área de drenaje (ha)
Pequeñas	< 1	< 2
Medianas	1 a 5	2 a 20
Grandes	> 5	> 20

5.3.2 Selección de técnicas a utilizar para la restauración

Se realizó una búsqueda bibliográfica de las técnicas y tecnologías disponibles en la actualidad para la recuperación de suelos degradados, en situaciones similares al caso estudiado. Se consideraron para este propósito papers científicos, revistas, artículos de gobierno y cualquier publicación en la que se realizaron experiencias similares.

Una vez colectadas las técnicas, estas fueron evaluadas por su costo económico, su invasividad y su facilidad de implementación. Además se consideró la actualidad de la técnica.

Para el caso de los sitios con erosión laminar se diseñó un tratamiento, siguiendo los criterios establecidos por Suárez (2001).

5.4 Implementación de técnicas de restauración para los sitios degradados

Se describe la forma en la cual se implementara cada una de las técnicas de restauración seleccionadas en los sitios degradados. Para este caso de estudio se siguieron dos corrientes de investigación, coincidentes con las formas de degradación encontradas en el área de estudio.

5.4.1 Mampostería y contención (cárcavas N°1 y N°5.1)

Se implementara un dique mixto de biomasa residual en las cárcavas que presentaron una pendiente más elevada siguiendo las indicaciones de (Caballero *et al.*, 2009).

En la cárcava N°1, se implementara un dique de biomasa residual en su parte intermedia de ubicada a 8,7 (m) del inicio del talud. Esta cárcava muestra en su sección más ancha 5,6 (m) y una inclinación de 24° (45%).

Para la cárcava N°5.1 se consideró la sub-cuenca que presentaba mayor pendiente y menos especies colonizadoras. Se implementara a 10 (m) del inicio de la cárcava. Esta posee un ancho de 2(m) y una altura de 1,5 (m).

5.4.2 Especies colonizadoras y compost (cárcavas N°2, N°3, N°4 y N°5.2)

En estas cárcavas mediante observación in-situ se identificaron especies colonizadoras. Con el fin de utilizar el banco de semillas presente se utilizara un método de aplicación de enmiendas, siguiendo las indicaciones de Ulriksen *et al.*, (2012). Utilizando una herramienta manual se rastrillara la superficie hasta llegar a una profundidad de 5 (cm). Luego siguiendo la metodología de Córdova *et al.*, (2011) se aplicara compost a una tasa de 60 g kg⁻¹ de suelo (133 t ha⁻¹) (sobre una base de peso en seco), que se encuentra dentro del rango recomendado por los U.S. EPA (2007) para la remediación de suelos contaminados con metales.

5.4.3 Hidrosiembra (laminar N°1 y N°2)

Se diseñó un tratamiento de hidrosiembra considerando los criterios de Suarez (2001) y el diseño de CONAF (1998):

1. Análisis del sitio

Se analizaron las características de cada sitio laminar. De esta manera se conoció mejor la forma en la cual debe ser preparado el suelo para su tratamiento.

2. Selección de las especies vegetales

Se consideró el tipo de pasto *Cynodon Dactylon* (chépica), que se encuentra en abundancia en el área de estudio y por ende acostumbrada a las características climáticas y nutritivas del lugar.

3. Preparación del sitio

Para la preparación del área de estudio se consideró una preparación física y una nutritiva. De esta manera se utilizara una remoción manual con chuso y rastrillo, posteriormente aplicando compost en una proporción de 60g kg⁻¹ de suelo.

4. Manejo de los materiales vegetales

Acorde a lo planteado por CONAF (1998) para la hidrosiembra, las semillas serán manejadas de tal manera que la mezcla con el agua este en reposo por lo menos por una hora.

5. Sistema de establecimiento

Se manipulara manualmente el pitón y la manguera a una distancia de 15 a 20 m del terreno, delineando círculos concéntricos.

6. Mantenimiento

Se deberá tener la precaución de proteger la fauna de las especies de avifauna del lugar.

5.5 Evaluación de las técnicas utilizadas mediante modelación de pérdida de suelo

5.5.1 Predicción

Los resultados de la implementación de las técnicas de restauración, se modelarán con el software Rusle2, en donde se agregarán a los perfiles realizados para cada sitio en estudio, las opciones de manejo que brinda esta herramienta.

Para modelar las cárcavas que se tratarán con diques mixtos de biomasa residual se corrigió en el software la pendiente compensada que se espera recuperar luego del periodo lluvioso, tal como expresa Caballero *et al.*, (2009).

Las cárcavas que se trataran con aplicación de compost, fueron modeladas con un MANEJO “cool season grass; not harvested”, ya que el mayor beneficiado por la implementación de compost será el forraje de las diversas especies presentes en el lugar. Además se cambió el tipo de SUELO de “sandy clay loam (low-mod OM, v. slow perm)” (franco arcillo arenoso con baja proporción de materia orgánica y baja permeabilidad) a uno “sandy clay loam (high OM)” (franco arcillo arenoso con alta proporción de materia orgánica), asumiendo una mayor proporción de materia orgánica luego de la implementación de la técnica.

Y un CLIMA correspondiente a Santa Barbara_R15, el cual coincide con el clima del área de estudio (Ver sección **2.8.2**), con temperatura media anual de 14°C; el mes más frío con una media de 10°C y el más caluroso una media de 18°C .

Los sitios con erosión laminar se modelaron con una cobertura de SUELO que paso de “sandy clay loam, (subsoil, substratum)” a “sandy clay loam (mod-high OM, v. slow perm”. También se agregó un MANEJO de “cool season grass; not harvested por stand”.

5.5.2 Seguimiento

Las variables físicas de cada sitio a tratar serán monitoreadas y registradas para la evaluación futura de las técnicas a aplicar.

Las cárcavas se enumeraran de la misma forma en que se presentan en este informe. Para ello se utilizaron estacas puestas en la parte alta de la cárcava y en la parte más baja de cada una. Las estacas deberán sobresalir entre 0,2 y 0,5 (m) sobre el suelo y llevarán inscriptas la numeración de cada una.

5.6 Análisis de costo de las actividades

Se analizaron y cuantificaron los costos asociados a la realización de las actividades que enmarcan la implementación de las técnicas de restauración. Se consideró para este caso los costos de materiales y mano de obra. El valor de los materiales fue consultado en diversas fuentes optando siempre por la opción más económica.

6 Resultados y discusiones

6.1 Sitios degradados dentro del área de estudio

La ubicación de los sitios degradados identificados se observa en la Figura 34. En la Tabla 19 se muestra la ubicación georreferenciada para cada una.



Figura 34. Ubicación de sitios de interés en el área de estudio (Elaborado con Google Earth).

Se identificaron en el área de estudio cinco cárcavas (Figuras 35, 36, 37, 38, y 39). La cárcava N°5 se dividió en dos (cárcavas 5.1 y 5.2) ya que poseían diferente estructura y características, las cuales fueron determinantes cuando se buscó identificar una técnica para su recuperación. Además se identificaron dos sitios con síntomas de erosión laminar (Laminar N°1 y Laminar N°2)(Figura 40 y 41).



Figura 35. Vista general cárcava N°1.



Figura 36. Vista general cárcava N°2.



Figura 37. Vista general cárcava N°3.



Figura 38. Vista general cárcava N°4.



Figura 39. Vista general cárcava N°5.1 y 5.2.



Figura 40. Vista general área Laminar N°1.



Figura 41. Vista general área Laminar N°2.

Tabla 19. Posición georreferenciada de los sitios de interés.

Sitio	Coordenada UTM	Altura (msnm)
Cárcava		
1	19H270919 6373784	9
2	19H 271081 6373728	9
3	19H 271081 6373700	9
4	19H 271095 6373672	11
5	19H 271104 6373680	19
Laminar		
1	19H 271014 6373766	2
2	19H 271076 6373698	11

Las cárcavas fueron medidas y caracterizadas según Jesús E. Santiago (2012), como muestra la Tabla 20.

Tabla 20. Caracterización de cárcavas.

Cárcava (N°)	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Área (m²)	Área (ha)	Volumen (m³)
1	26,5	5,6	1,5	148,4	0,0148	222,6
2	18,0	2,3	0,9	41,4	0,0041	35,6
3	14,6	1,3	0,3	18,3	0,0018	6,2
4	18,9	3,4	0,8	64,3	0,0064	53,3
5.1*	25,7	14,7	2,5	366,2	0,0366	732,5
5.2*	16,3	4,5	1,1	73,4	0,0073	77,0

*Cárcava dividida en 2 secciones ya que está compuesta de 2 cárcavas contiguas.

La dimensión de cada sitio con síntomas de erosión laminar (Laminar) se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21. Dimensiones de áreas con erosión laminar.

Laminar (N°)	Largo (m)	Ancho (m)	Área (m²)	Área (ha)
1	3,96	2,15	8,5	0,00085
2	9,4	5,1	47,94	0,00479

6.2 Grado de degradación

6.2.1 Erosión

En el Anexo 6 se observan las laderas reproducidas en AUTOCAD para conocer la sección horizontal de los taludes. Posteriormente este dato fue ingresado en el software RUSLE 2. Los perfiles para cada sitio erosionado en el software Rusle2, se observan en el Anexo 7. Los resultados para la pérdida de suelo por año para cada cárcava, obtenidos por el modelo se presentan en la Tabla 22:

Tabla 22. Pérdida de suelo en Mg/año.

Cárcava (N°)	Área (ha)	Pérdida de suelo (Mg/ha/año)	Pérdida de suelo (Mg/año)	Pérdida de suelo (kg/año)
1	0,0148	0,091	0,0013468	1,3468
2	0,0041	0,076	0,0003116	0,3116
3	0,0018	0,059	0,0001062	0,1062
4	0,0064	0,03	0,000192	0,192
5.1	0,0366	0,064	0,0023424	2,3424

Cárcava (N°)	Área (ha)	Pérdida de suelo (Mg/ha/año)	Pérdida de suelo (Mg/año)	Pérdida de suelo (kg/año)
5.2	0,0073	0,04	0,000292	0,292
Laminar (N°)	Área (ha)	Pérdida de suelo (Mg/ha/año)	Pérdida de suelo (Mg/año)	Pérdida de suelo (kg/año)
1	0,00085	5,7	0,004845	4,845
2	0,00479	200	0,958	958

6.2.2 Evaluación paisajística

El detalle para la evaluación paisajística de las Unidades Visuales A, B, C y D, se muestran en las Tablas 23, 24, 25 y 26 respectivamente.

Tabla 23. Evaluación paisajística para la Unidad Visual A.

Puntos	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Promedio
Unidad visual del paisaje											
Abiótico	3	2	3	3	3	2	3	3	3	3	3
Biótico	3	2	2	1	2	1	1	3	2	2	2
Antrópico	2	1	1	2	1	2	3	2	1	2	2
Organización visual del paisaje											
Contraste visual	2	1	1	3	1	2	2	1	2	3	2
Dominancia visual	3	3	2	3	3	2	3	1	3	3	3
Importancia relativa de las características visuales	2	1	1	2	3	2	1	2	1	2	2
Calidad visual del paisaje											
Diversidad	2	2	1	3	2	1	3	2	2	2	2
Naturalidad	2	2	2	3	3	1	1	3	2	1	2
Singularidad	2	2	1	1	2	2	1	2	1	2	2
Complejidad topográfica	2	2	2	2	1	2	1	2	2	3	2
Actuaciones humanas	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	1
Calidad escénica del paisaje											
Morfología o topografía	1	1	1	2	1	3	1	2	1	1	1
Vegetación	2	2	2	1	2	2	1	3	2	1	2
Formas de aguas – ríos- lagos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Color	2	1	1	2	2	2	3	1	3	2	2
Rareza	2	2	2	2	2	1	2	3	2	1	2

Tabla 24. Evaluación paisajística para la Unidad Visual B.

Puntos	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Promedio
Unidad visual del paisaje											
Abiótico	3	2	2	1	2	1	2	3	2	2	2
Biótico	2	2	2	2	3	2	1	2	1	2	2
Antrópico	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1
Organización visual del paisaje											
Contraste visual	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1
Dominancia visual	1	1	1	1	1	1	1	2	3	1	1
Importancia relativa de las características visuales	2	1	1	2	3	1	1	1	1	1	1
Calidad visual del paisaje											
Diversidad	2	2	1	3	2	2	2	2	3	1	2
Naturalidad	2	2	2	1	2	2	3	1	2	2	2
Singularidad	2	2	1	1	2	1	2	2	3	2	2
Complejidad topográfica	2	2	2	3	2	2	1	2	2	2	2
Actuaciones humanas	1	1	1	2	1	1	1	1	2	3	1
Calidad escénica del paisaje											
Morfología o topografía	1	1	1	1	3	1	2	1	1	2	1
Vegetación	2	2	2	1	1	3	2	2	3	2	2
Formas de aguas – ríos- lagos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Color	2	1	1	2	3	1	1	1	1	1	1
Rareza	2	2	2	2	1	2	1	3	1	1	2

Tabla 25. Evaluación paisajística para la Unidad Visual C.

Puntos	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Promedio
Unidad visual del paisaje											
Abiótico	3	2	2	3	2	1	2	2	1	1	2
Biótico	2	2	2	2	3	2	1	1	2	2	2
Antrópico	2	1	1	2	1	1	1	1	1	3	1
Organización visual del paisaje											
Contraste visual	2	1	1	3	1	1	1	2	1	1	1
Dominancia visual	3	1	2	3	2	2	2	1	2	2	2
Importancia relativa de las características visuales	2	1	1	2	3	1	1	1	1	1	1
Calidad visual del paisaje											
Diversidad	1	2	1	3	1	1	1	1	2	1	1
Naturalidad	2	1	2	1	2	3	2	2	2	2	2
Singularidad	1	2	1	1	1	1	1	1	2	3	1
Complejidad topográfica	2	1	2	1	2	2	2	2	3	2	2
Actuaciones humanas	1	3	1	1	1	2	1	1	1	2	1
Calidad escénica del paisaje											
Morfología o topografía	1	1	1	2	1	2	3	1	1	1	1
Vegetación	3	1	1	2	2	2	3	2	2	2	2
Formas de aguas – ríos- lagos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Color	3	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1
Rareza	2	3	2	1	1	2	2	2	1	2	2

Tabla 26. Evaluación paisajística para la Unidad Visual D.

Puntos	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Promedio
Unidad visual del paisaje											
Abiótico	3	2	3	2	3	3	1	2	3	3	3
Biótico	2	3	1	2	2	2	1	3	2	2	2
Antrópico	1	1	1	1	3	2	1	3	2	2	2
Organización visual del paisaje											
Contraste visual	3	2	3	3	2	3	1	2	3	3	3
Dominancia visual	3	1	2	3	3	2	3	3	3	3	3
Importancia relativa de las características visuales	2	1	1	2	2	3	2	1	2	3	2
Calidad visual del paisaje											
Diversidad	3	2	2	3	2	3	1	3	3	3	3
Naturalidad	2	2	2	2	1	1	3	2	1	2	2
Singularidad	1	2	1	1	1	1	1	2	1	3	1
Complejidad topográfica	2	1	2	2	1	1	2	3	2	1	2
Actuaciones humanas	2	2	3	2	2	3	1	2	1	2	2
Calidad escénica del paisaje											
Morfología o topografía	2	1	1	2	2	1	3	2	1	2	2
Vegetación	1	2	1	1	1	1	1	1	3	2	1
Formas de aguas – ríos- lagos	2	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1
Color	1	3	2	1	1	2	2	2	2	2	2
Rareza	3	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2

La evaluación paisajística del territorio se muestra en la Tabla 27:

Tabla 27. Valor paisajístico del territorio.

Puntos	Unidades Visuales			
	A	B	C	D
UNIDAD VISUAL DEL PAISAJE				
Abiótico	3	2	2	3
Biótico	2	2	2	2
Antrópico	2	1	1	2
UVP	2,3	1,7	1,7	2,3
ORGANIZACIÓN VISUAL DEL PAISAJE				
Contraste Visual	2	1	1	3
Dominancia Visual	3	1	2	3
Importancia relativa de las características Visuales	2	1	1	2
OVP	2,3	1,0	1,3	2,7
CALIDAD VISUAL DEL PAISAJE				
Diversidad	2	2	1	3
Naturalidad	2	2	2	2
Singularidad	2	2	1	1
Complejidad topográfica	2	2	2	2

Puntos	Unidades Visuales			
	A	B	C	D
Actuaciones Humanas	1	1	1	2
CVP	1,8	1,8	1,4	2,0
CALIDAD ESCENICA DEL PAISAJE				
Morfología o Topografía	1	1	1	2
Vegetación	2	2	2	1
Formas de aguas-ríos-lagos	1	1	1	1
Color	2	1	1	2
Rareza	2	2	2	2
CEP	1,6	1,4	1,4	1,6
Valor Paisajístico del Territorio	2,0	1,5	1,5	2,2

En la Tabla 28 se muestra un resumen del valor paisajístico de las Unidades Visuales evaluadas y el valor paisajístico total del territorio:

Tabla 28. Tabla resumen de evaluación paisajística.

Puntos	Unidades Visuales				
	A	B	C	D	Total
UVP	2,3	1,7	1,7	2,3	2
OVP	2,3	1,0	1,3	2,7	1,8
CVP	1,8	1,8	1,4	2,0	1,8
CEP	1,6	1,4	1,4	1,6	1,5
VPT	2,0	1,5	1,5	2,2	1,8

La evaluación paisajística arrojó que el paisaje un valor de 1,8, lo cual lo clasifica como una Zona con calidad paisajística Media. Esto lo sitúa más cercano al rango de zona de calidad paisajística baja (1 - 1,6), que del rango para la zona de calidad paisajística alta (2,4 - 3,0). Los sitios que obtuvieron un mayor valor fueron el Sitio A y el Sitio D. El único parámetro evaluado que obtuvo un valor mayor al rango de calidad paisajística media (1,7 - 2,3), fue la Organización Visual del Sitio D. En la Tabla 28 se muestran las evaluaciones para cada una de las Unidades Visuales reconocidas en el área de estudio.

El valor paisajístico de cada unidad visual se podría ver mejorado considerando que el estudio fue hecho entrando a época seca (Diciembre 2014), donde no se presentaban praderas verdes. Aun y considerando esta posibilidad esto solo influiría en la Organización visual en su variable de “Contraste Visual”; en la Calidad Escénica en las variables de

“Vegetación” y “Color”. De esta manera las actividades generadas serían un agente de cambio de la Valoración Paisajística del Territorio. Si se consideran, además, las actividades generadas como beneficiosas para las “Actuaciones Humanas” dentro de la “Calidad Visual”, podremos ver como el valor paisajístico del sitio A pasaría de 2 a 2,3; del sitio B de 1,5 a 1,7; del sitio C de 1,4 a 1,7 y del sitio D de 2,1 a 2,4, considerándose este último sitio como de calidad paisajística alta.

6.3 Sitios y técnicas seleccionadas para la restauración

6.3.1 Selección de los sitios a restaurar

En la Tabla 29 se muestran los segmentos de los sitios degradados con pendiente “muy empinada”, según la clasificación del Soil Survey Staff (1993).

Tabla 29. Segmentos de ladera con pendiente “muy empinada”.

Segmento (N°)	Inclinación (°)	Longitud segmento (m)
Cárcava N°1		
1	30	12
2	24	9,7
Cárcava N°2		
2	32	2
4	26	2,5
Cárcava N°5.1		
2	32	1,6
3	45	2,5
Cárcava N°5.2		
2	35	1,8
3	25	4,6
Laminar N°2		
1	30	

Considerando lo establecido por SAGARPA (2009), según su profundidad, la clase a la que corresponde cada cárcava se muestra en la Tabla 30:

Tabla 30. Clasificación de cárcavas según su profundidad.

Cárcava (N°)	Profundidad (m)	Clase
1	1,5	Mediana
2	0,86	Pequeña
3	0,34	Pequeña
4	0,83	Pequeña
5.1*	2,5	Mediana
5.2*	1,05	Mediana

Las cárcavas de clase mediana según su profundidad son las cárcavas N°1, N°5.1 y N° 5.2. Considerando la pérdida de suelo de cada cárcava (Tabla 22), las cárcavas que presentan mayor pérdida de suelo son las cárcavas N°1 y la cárcava N°5.1.

La cárcava N°1 posee dos segmento con pendiente “muy empinada” y una profundidad de 1,5 (m). Además en ella se pierden 1,3468 (kg/año), lo cual la ubica como la segunda cárcava con mayor pérdida de suelo. Como muestra la Figura 42, en el segmento N°1 es en donde hay mayor pérdida de suelo. Caso similar a la cárcava N°5.1, de clase mediana según su profundidad (con 2,5 m) y con 2 segmentos con pendiente “muy empinada” (siendo su segmento N°3, el de mayor inclinación de todas las medidas con 45°). Es la cárcava con mayor pérdida de suelo (2,342 kg/año. Considerando las características de ambas cárcavas y la condición actual de perdida de suelo, es necesario crear alguna barrera contención física, para revertir esta situación, e impedir la formación de cárcavas remontantes.

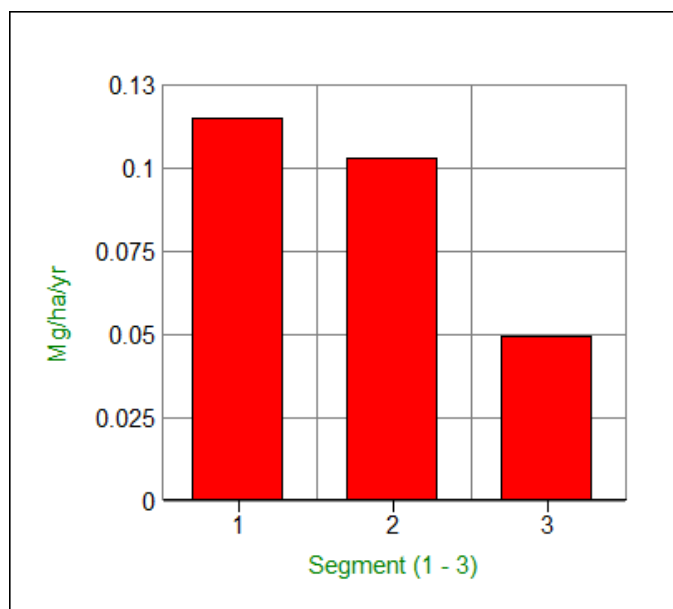


Figura 42. Gráfico de pérdida de suelo por segmento de ladera, para la cárcava N°1 desde RUSLE2.

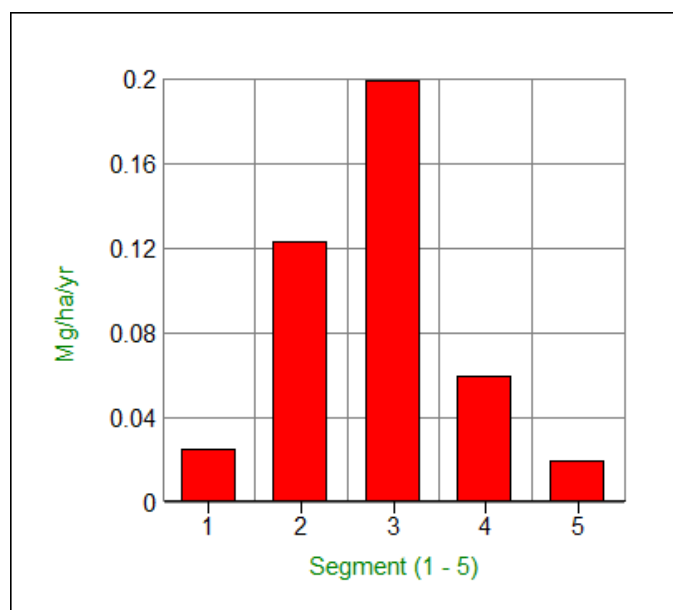


Figura 43. Gráfico de pérdida de suelo por segmento de ladera, para la cárcava N°5.1 desde RUSLE2.

El caso de las cárcavas N°3 Y N°4 ambas de profundidad pequeña y sin segmentos con inclinación significativa (sin segmento que sobrepasen la clase de “moderadamente empinada”, exceptuando el segmento N°4 de la cárcava N°3), y con pérdidas de suelo que no superan los 0,192 (kg/año), ambas cárcavas pueden considerarse como cárcavas

pequeñas en comparación con las cárcavas N°1 y N°5.1. Como medida de control sería suficiente con crear una cobertura vegetal que permita mejorar la permeabilidad del suelo y a amortiguar la erosión hídrica.

Para la cárcava N°2, con una inclinación pequeña y dos segmentos de ladera de clase muy empinada (segmentos N°2 y N°4), si bien en sus segmento N°2 y N°4 el suelo perdido se asemeja a los segmentos con mayor pérdida de las cárcavas N°1 y N°5.1, (Figura 44) su pérdida final solo llega a los 0,3116 kg/año. Considerando lo anterior, y su cercanía con la cárcava N°1, ambas podrían considerarse como surcos que poseen la potencialidad de ser parte de una misma cuenca. Ante el control propuesto para la cárcava N°1, considerando que su ancho aun es solo de 2,3 (m) (la cárcava más pequeña de estas mediciones), con medidas de control, aumentando su cobertura vegetal, se debería obtener resultados significativos.

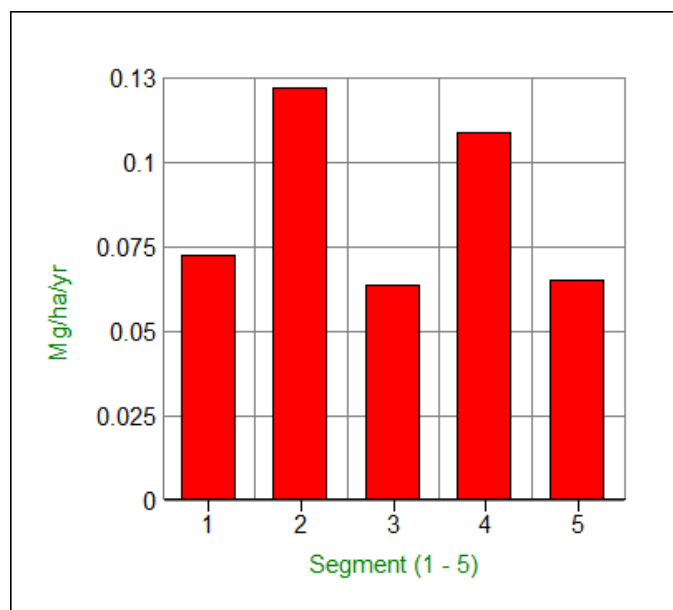


Figura 44. Gráfico de pérdida de suelo por segmento de ladera, para la cárcava N°2 desde RUSLE2.

La cárcava N°5.2, con profundidad mediana y dos segmentos con pendiente “muy empinada”, presenta condiciones distintas a los casos anteriores. Como se observa en la

Figura 39 presenta especies colonizadoras que han sido capaces de sobreponerse a las condiciones de degradación del lugar. Para este caso la utilización del banco de semillas de estas especies es la opción más útil.

Para los sitios con erosión laminar se consideró una cobertura vegetal. En el caso de los sitios identificados, estos se encuentran en un estado de degradación severo, donde a ojo desnudo en terreno se puede apreciar la carencia de una capa de materia orgánica.

6.3.2 Selección de técnicas de restauración

Se evaluaron dos tipos de técnicas de restauración, para implementar en los sitios degradados:

6.3.2.1 Mampostería y contención

Para encontrar la técnica que se implementara en las cárcavas N°1 y N° 5.1, se evaluaron las siguientes técnicas:

- Diques de postes de madera.
- Diques de estructuras gavionetadas.
- Disipador.
- Dique mixto de biomasa residual.
- Presas de mampostería.

En la Tabla 31 se muestran las características de las técnicas que se evaluaron, según los criterios establecidos en la sección 5.3.2. Esta evaluación se hizo en tres clases que van desde un valor alto, valor medio y valor bajo.

Tabla 31. Evaluación de técnicas de mampostería para cárcavas.

Técnica	Costo económico*	Invasividad	Dificultad de implementación	Año de difusión
Diques de postes de madera	Alto	Media	Media	1998
Diques de estructuras gavionetadas	Alto	Alta	Alta	1998
Disipador	Alto	Alta	Alta	1998
Presas de mampostería	Bajo	Alta	Media	2009
Dique mixto de biomasa residual	Bajo	Media	Media	2009

*Estimación de costos en Anexo 8.

El dique mixto de biomasa residual posee un valor económico bajo en comparación con las otras técnicas, y es una invasividad y dificultad de implementación media. Nace como una variación de los diques utilizados en los utilizados en décadas anteriores. Posee la ventaja de ser biodegradable. Esta técnica se implementó en las cárcavas N°1 y N°5.1.

6.3.2.2 Especies colonizadoras y cobertura vegetal

Para las cárcavas N°2, N°3, N°4, N°5.2, se buscó especies o técnicas que hayan sido estudiadas en condiciones similares al caso de estudio (presencia de metales pesados, presencia de cárcavas, acidez del suelo, síntomas de degradación, etcétera). Se evaluaron estudios realizados en el Valle de Puchuncaví, o incluso en el pueblo de Los Maitenes. Los estudios encontrados fueron los siguientes:

- Efectos de encalado y la fertilización de nitrógeno en el desarrollo de *Oenothera affinis* en un terreno afectado por la minería del cobre (Muena *et al.*, 2010).
- Enmiendas para promover el desarrollo de *Lolium perenne* en suelos afectados históricamente por operaciones de fundición de cobre (Goecke *et al.*, 2011).
- Quelato biodegradable para mejorar la fitoextracción de cobre por *Oenothera picensis* cultivada en suelos ácidos contaminados con cobre (González I. *et al.*, 2011)

- El efecto de enmiendas de cal y compost en el potencial de revegetación de suelos ácidos contaminadas con metales (Córdova *et al.*, 2011).
- Cal y compost para promover la revegetación de plantas en suelos ácidos contaminados por metal (Ulriksen *et al.*, 2012).
- Efecto de compost y quelato biodegradable en fitoextracción de cobre por *Oenothera picensis* en suelos ácidos contaminados con Cobre (González I. *et al.*, 2013)

Esta evaluación se hizo en tres clases que van desde un valor alto, valor medio y valor bajo (Tabla 32).

Tabla 32. Evaluación de metodologías para generar cobertura vegetal y control de laderas.

Estudio	Especie	Dificultad de obtención	Costo Económico	Dificultad de implementación	Año de difusión
Muena <i>et al.</i> , 2010	<i>Oenothera affinis</i>	Alta	Bajo	Alto	2010
Goecke <i>et al.</i> , 2011	<i>Lolium perenne</i>	Alta	Medio	Alto	2011
González <i>et al.</i> , 2011	<i>Oenothera picensis</i>	Alta	Bajo	Alto	2011
Córdova <i>et al.</i> , 2011	Banco de Semillas (cal y compost)	Baja	Bajo	Bajo	2011
Ulriksen <i>et al.</i> , 2012	Banco de semillas (compost)	Baja	Bajo	Bajo	2012
González <i>et al.</i> , 2013	<i>Oenothera picensis</i>	Alta	Bajo	Bajo	2013

La dificultad de implementar la cantidad necesaria de semillas, o plántulas, para el área de cada cárcava y en las condiciones necesarias, hace que la opción de implementar compost sea la más indicada. La implementación de compost, sin cal, resulta de mayor viabilidad e incorpora al banco de semillas ya existente en el lugar. La metodología de Ulriksen *et al.*, (2012) se implementara en las cárcavas N°2, N°3, N°4, N°5.2.

Para el caso de los sitios con erosión laminar se siguieron los lineamientos de Suárez, los cuales indican los pasos a seguir para el tratamiento de sitios erosionados utilizando con cubiertas vegetales, en especial con pastos de todo tipo.

6.4 Implementación

6.4.1 Mampostería y contención (cárcavas N°1 y N°5.1)

Se implementará un dique mixto de biomasa residual en las cárcavas que presentaron una pendiente más elevada siguiendo las indicaciones de (Caballero *et al.*, 2009).

En la cárcava N°1, se implementará un dique de biomasa residual en su parte intermedia de 15,7 (m) en su sección horizontal. Esta cárcava muestra en su sección más ancha 5,6 (m) y una inclinación de 24° (45%). Se colocarán cada 1,1 (m) estacas verticales de 1,5 (m) enterradas 0,3 (m) bajo el suelo. Luego se apilarán largueros de 5,5 (m), que serán asegurados con estacas al otro costado de donde estarán dispuestas las primeras como muestra la Figura 45. Paralelamente a 0,5 (m) de la primera, se instalará una segunda fila de estacas.

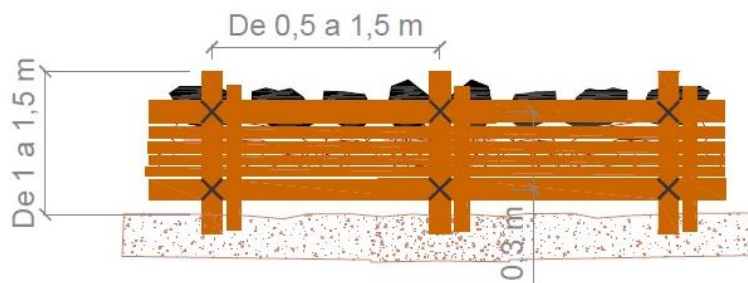


Figura 45. Estructura principal.

Una vez realizado lo anterior, se dispuso de biomasa residual de las laderas (ramas) entre ambas estructuras y totoras secas del humedal cercano al caso en estudio. Luego se colocaron los taludes, utilizando piedras encontradas en el lugar de estudio (Anexo 9) tal como muestra la Figura 46, para luego anclar la estructura con sogas biodegradables como en la Figura 47.

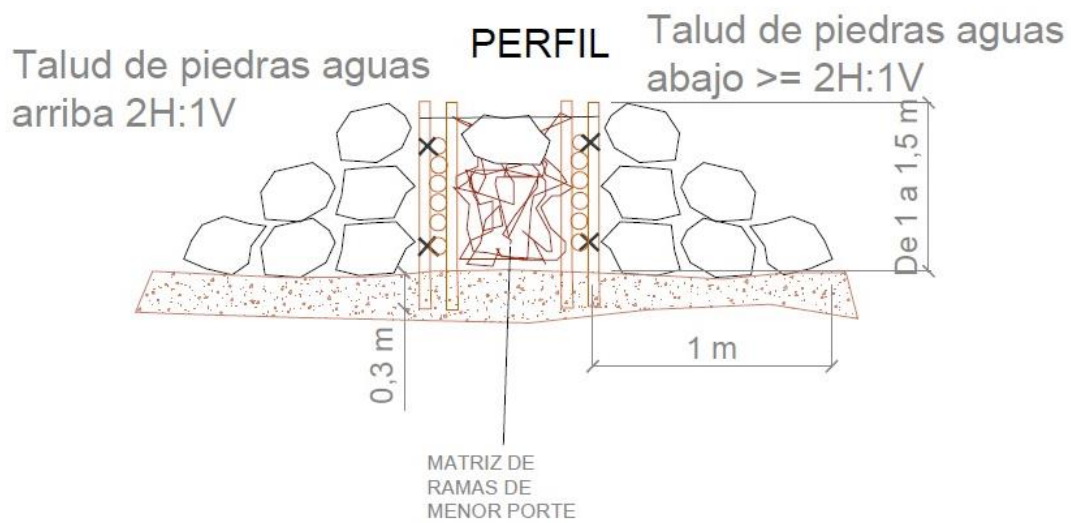


Figura 46. Disposición de biomasa residual y taludes.

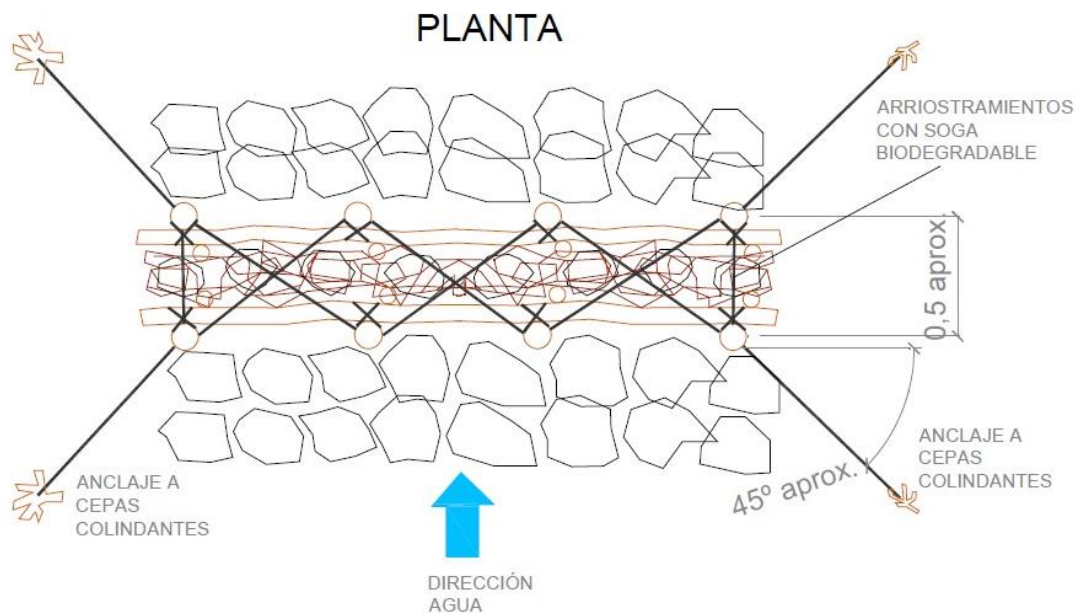


Figura 47. Vista general y disposición de sogas.

Luego, 9,7 (m) más abajo, se implementara un nuevo dique sólo que ajustado a 1 (m) de ancho. De esta manera se esperó compensar la pendiente tal cual muestra la Figura 48.

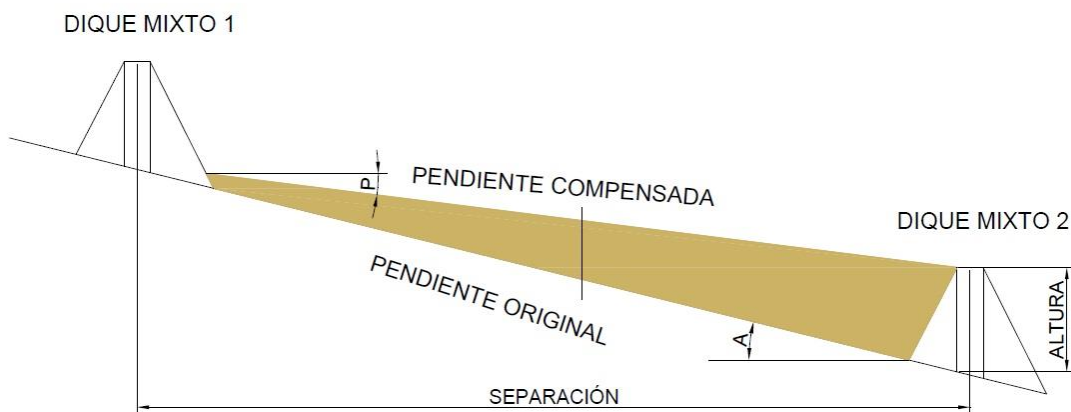


Figura 48. Pendiente compensada.

Para la cárcava N°5.1 se considerara la sub-cuenca que presentaba mayor pendiente y menos especies colonizadoras. Se implementara a 10 (m) del inicio de la cárcava. Esta posee un ancho de 2(m) y una altura de 1,5 (m). La implementación del dique en esta cárcava se ejecutara siguiendo las mismas indicaciones descritas para la cárcava N°1, solo que ajustando el diseño a las dimensiones de ella. En este caso solo se implementara un dique, ya que se busca disminuir la velocidad de las aguas lluvias y considerando que la sección posee una apertura como muestra la Figura 49.



Figura 49. Cárcava N°5.1, vista general.

En la cárcava N°1 y una sub-cuenca de la cárcava N°5 se implementarán “Dique mixto de biomasa residual”. Si bien esta técnica fue diseñada para controlar la erosión en la Corona

Forestal del Teide, tras un gran incendio que asoló más de 18.000 hectáreas, su aplicación no se limita sólo a terrenos forestales ya que los materiales utilizados en la construcción de los diques mixtos son biodegradables y permiten la creación de un nuevo sustrato para la posterior colonización de las especies autóctonas del entorno (Caballero *et al.*, 2009). Estas estructuras transversales se han colocado en varias cárcavas de la zona en una primera fase de experimentación. Tras los dos primeros meses de lluvia, es visible su buen funcionamiento (Caballero *et al.*, 2009).

6.4.2 Especies colonizadoras y compost (cárcavas N°2, N°3, N°4 y N°5.2)

En estas cárcavas mediante observación in-situ se identificaron especies colonizadoras. Con el fin de utilizar el banco de semillas presente este método se utilizará, siguiendo las indicaciones de Ulriksen *et al.*, (2012). Utilizando una herramienta manual se rastrillara la superficie hasta llegar a una profundidad de 5 (cm). Luego siguiendo la metodología de Córdova *et al.*, (2011) se aplicara compost a una tasa de 60 g kg⁻¹ de suelo (133 t ha⁻¹) (sobre una base de peso en seco), que se encuentra dentro del rango recomendado por los U.S. EPA (2007) para la remediación de suelos contaminados con metales.



Figura 50. Subcuenta de cárcava N°5.2, especies colonizadoras.

En el caso de la cárcava N° 5 (dividida en dos sub-cuencas más pequeñas), se aplicara compost en la sección que aparece en la Figura 50, la cual presenta una mayor cantidad de especies colonizadoras.

La incorporación de abono orgánico en los suelos del área de estudio, se realizará en las cárcavas N°2, N°3, °4 y una sub-cuenca de la cárcava N° 5. En la aplicación de este método la precipitación de 62 (mm) acumulativos de lluvia es suficiente para causar una reacción química entre las enmiendas y el suelo en un plazo de 2 meses. En resumen, la técnica estudiada podría ser útil para una remediación a gran escala de los suelos ácidos, contaminados con metales del Valle Puchuncaví, siendo suficiente la aplicación de compost (sin cal en la mezcla) (Ulriksen *et al.*, 2012). Como último fin se espera ver indicios visuales de recuperación de las áreas degradadas en un período de seis meses para las aplicaciones bioingenieriles (Rivera, 2002).

6.4.3 Hidrosiembra (laminar N°1 y N°2)

Primeramente se arma el aparataje con un motor de 6 a 12 hp, una bomba centrífuga, un estanque móvil de 500 a 1500 (l), un agitador hidráulico, mangueras reforzadas con un pitón de salida con válvula de cierre manual con un alcance de hasta 30 (m). En el estanque se incorporarán las semillas de la especie seleccionada (*Cynodon dactylon*), dejándose en reposo por lo menos por una hora (Figura 51 y 52).

Posteriormente se comenzará con el trabajo previo del talud o sitio erosionado:

- Se empareja el talud con las herramientas manuales, rellenando los canalículos o surcos que se encontraron. Luego se incorpora el compost en una proporción de 60 (g kg⁻¹) de suelo.

- En el caso de Laminar N°2 con una pendiente más inclinada (30°) inclinación, se realiza un emparejamiento más acabado del talud.
- Antes de activar el motor y la bomba se agregara agua al estanque activando el agitador hidráulico. Posteriormente se operará manualmente el pitón y la manguera a una distancia de 15 a 20 m del terreno, delineando círculos concéntricos
- Una vez finalizada la faena se debe proteger las semillas del ataque de avifauna con una malla raschel.

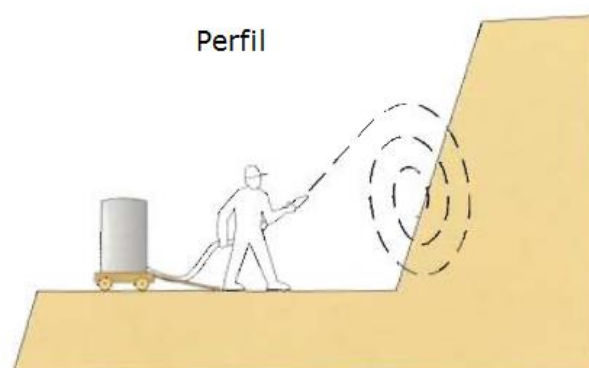


Figura 51. Perfil de la implementación de hidrosiembra.



Figura 52. Implementación de hidrosiembra.

6.5 Evaluación y seguimiento de los sitios restaurados

6.5.1 Modelo

Con el software RUSLE2 se modeló para cada sitio degradado tratado, el impacto generado por la implementación de cada técnica.

Los datos ingresados al modelo para la cárcava N°1 se muestra en la Figura 53 y en la Figura 54 para la cárcava N°5.1, en ellos se aprecia la pendiente que compensa la instalación de un dique de biomasa residual:

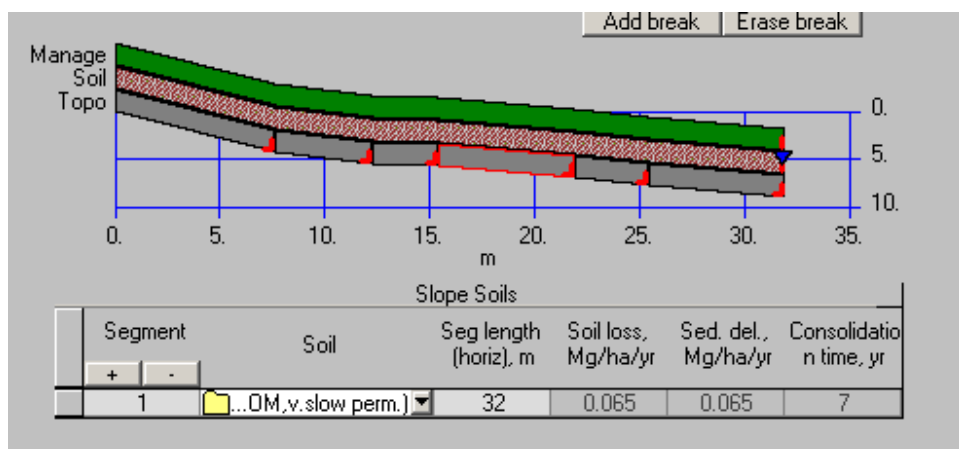


Figura 53. Cárcava N°1 con pendiente corregida, simulando la implementación de dique.

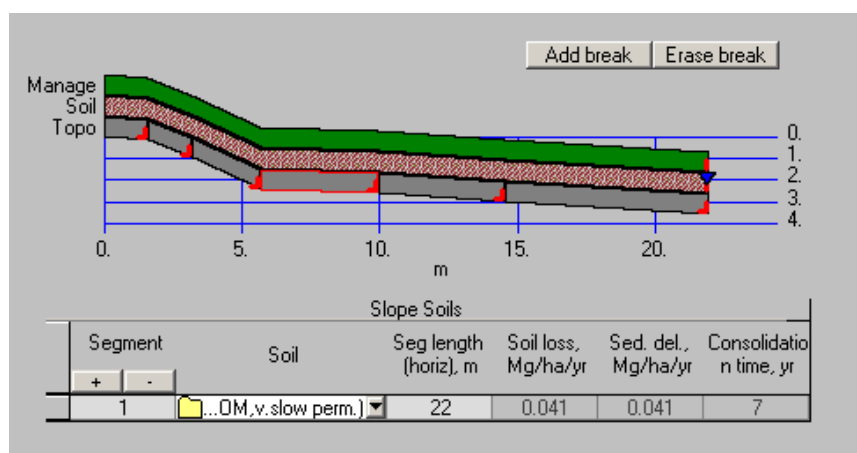


Figura 54. Cárcava N°5.1 con pendiente corregida, simulando la implementación de dique.

Las cárcavas tratadas con aplicación de compost, fueron modeladas con un MANEJO “cool season grass; not harvested”. Además se cambió el tipo de SUELO de “sandy clay loam (low-mod OM, v. slow perm” (franco arcillo arenoso con baja proporción de materia orgánica y baja permeabilidad) a uno “sandy clay loam (high OM)” (franco arcillo arenoso con alta proporción de materia orgánica).

Los resultados para la pérdida de suelo luego de la implementación de cada técnica se muestran en la Tabla 33.

En la Figura 55 se muestra en grafica la comparación entre la pérdida de suelo de las cárcavas N°2, N°3, N°4 y N°5.2 luego de la implementación de compost.

Tabla 33. Pérdida de suelo post implementación.

Cárcava (N°)	Área (ha)	Pérdida de suelo (Mg/ha/año)	Pérdida de suelo Pre-implementación (kg/año)	Pérdida de suelo Post-implementación (kg/año)	Diferencia de suelo perdido (kg/año)	Suelo recuperado (%)
1	0,0148	0,091	1,3468	0,962	0,3848	28,6
2	0,0041	0,076	0,3116	0,041	0,2706	86,8
3	0,0018	0,059	0,1062	0,01458	0,09162	86,3
4	0,0064	0,03	0,192	0,02752	0,16448	85,7
5.1	0,0366	0,064	2,3424	1,5006	0,8418	35,9
5.2	0,0073	0,04	0,292	0,04161	0,25039	85,8
Laminar (N°)	Área (ha)	Pérdida de suelo (Mg/ha/año)	Pérdida de suelo Pre-implementación (kg/año)	Pérdida de suelo Post-implementación (kg/año)	Diferencia de suelo perdido (kg/año)	Suelo recuperado (%)
1	0,00085	5,7	4,845	0,0714	4,7736	98,5
2	0,00479	200	958	4,79	953,21	99,5

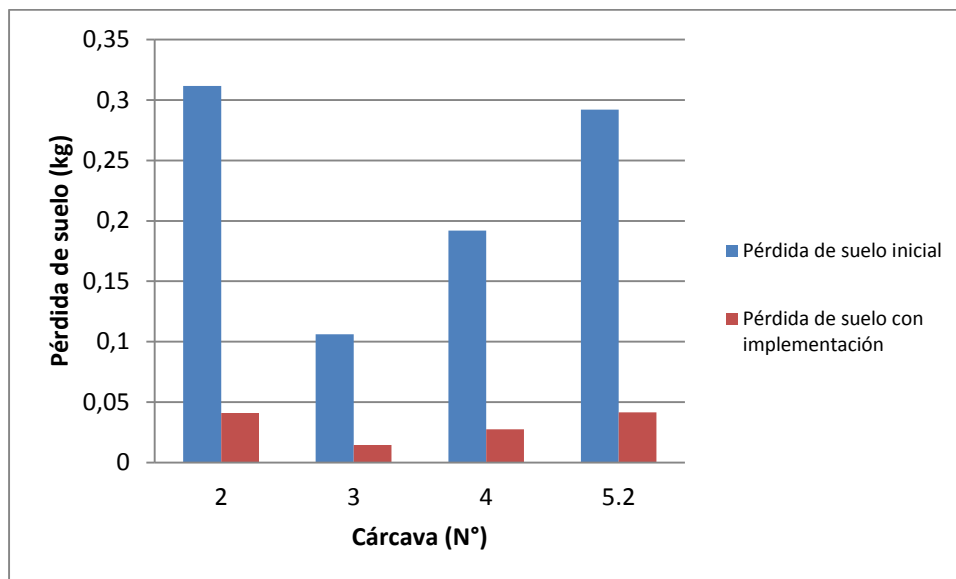


Figura 55. Valores de perdida de suelo para las cárcavas con y sin la implementación de dique de mampostería.

En la Figura 56 se observa la variación de perdida de suelo en las cárcavas donde se implementó diques de biomasa residual.

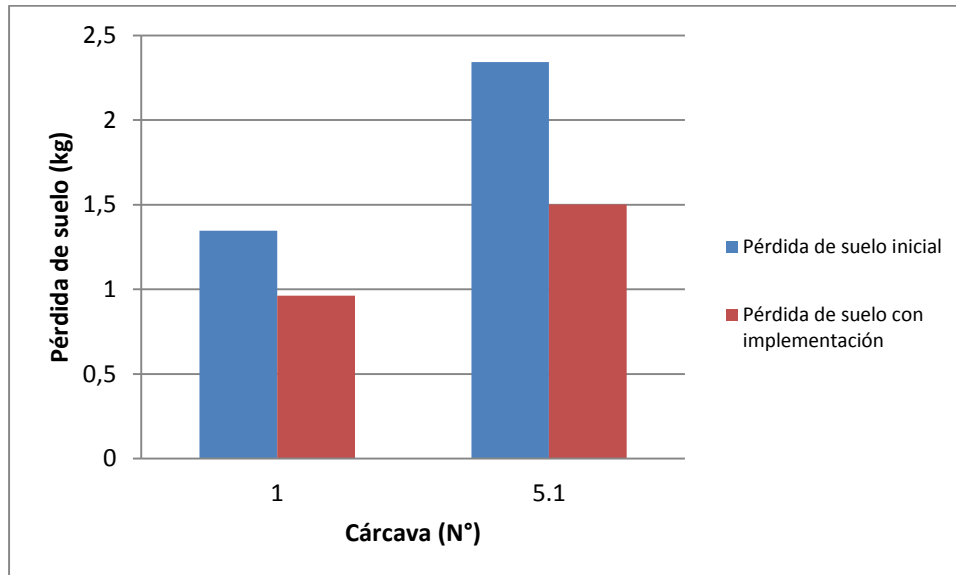


Figura 56. Valores de perdida de suelo para las cárcavas con y sin la implementación de abono orgánico.

En la Figura 57 se muestra la variación de perdida de suelo para los sitios con erosión laminar tratados.

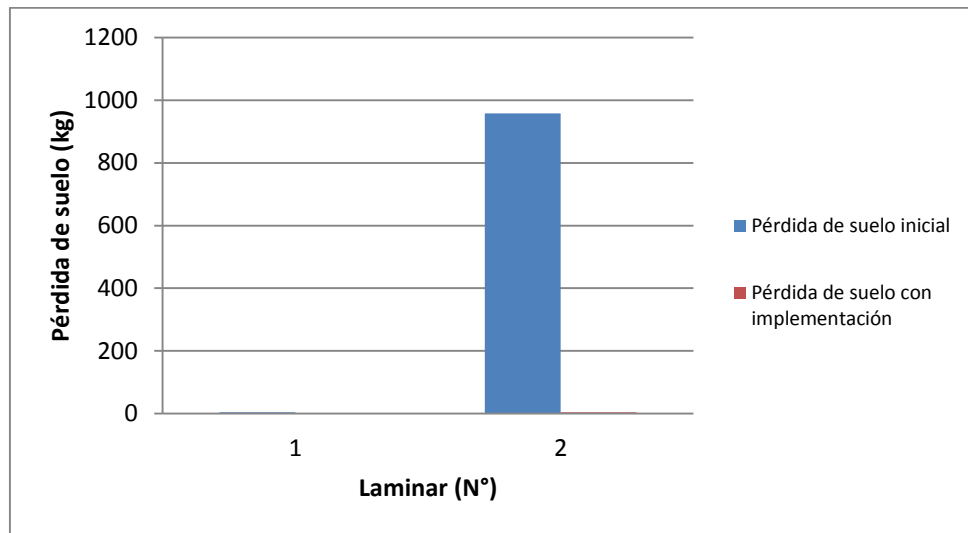


Figura 57. Valores de pérdida de suelo para los sitios con erosión laminar con y hidrosiembra.

El uso del software RUSLE2 para este caso, resultó ser de bastante ayuda. Si bien, los casos de estudio no se presentan con opciones dentro del modelo, los resultados esperados si se pueden modelar. Por ejemplo para el caso del uso de enmiendas, las cárcavas luego de un tiempo determinado después de las lluvias presentarían coberturas vegetales de especies colonizadoras o en el peor de los casos de diversos tipos de pastos presentes en el lugar. Para las cárcavas donde se implementaron diques, posterior a las primeras lluvias, verían compensada su pendiente, modelando en este caso con la pendiente compensada debido a los diques. Además se agregaron quiebres en los lugares donde se implementaron las estructuras. Luego de discutir con Seth M. Dabney (Líder en investigación de la Unidad de investigación de procesos físicos de cuencas en la USDA; quien proporciona liderazgo para el desarrollo y apoyo del modelo de erosión del suelo RUSLE2) sobre la tecnología de los “Diques mixtos de biomasa residual”, hizo el alcance de la pendiente producida luego del quiebre de los diques, la cual produciría demasiada energía dejando sin efecto los beneficios del dique. La teoría indica que el diseño con biomasa proporciona características biodegradables a la estructura, lo cual en la práctica compensaría tal energía.

El modelo estimó que la presencia de mayor biomasa, mitigaría en un 86,1% en promedio el suelo perdido, en comparación con la situación inicial. Para el modelo de los diques de biomasa residual, este arrojó un 28,6% y un 35,9%, para las cárcavas N°1 y N°5.1 respectivamente. Es de considerar que la ladera en la cual se encuentran las cárcavas N°1, N°2, N°3 y N°4, no hay presencia de surcos laminares. Esto puede indicar un proceso de recuperación natural de la erosión ya que los restos del pastoreo que es muy común en el lugar de estudio, resulta beneficioso para la proliferación de biomasa. La presencia de las cárcavas y los sitios con erosión laminar muy severa, son indicios de un momento histórico en el cual el suelo se encontraba totalmente desnudo.

6.5.2 Monitoreo

Considerando que para este caso de estudio solo se hace enfoque en la restauración se propuso el seguimiento de las variables físicas de las cárcavas, englobando la actividad dentro de la recuperación del recurso suelo donde se comprende como fin último la condición en la cual el recurso suelo pueda sostener actividad productiva dentro del área restringida para este estudio. Esto debe estar enmarcado en la actividad de alguna organización gubernamental u otra que posea tales fines e interés en la investigación y divulgación del buen trato del suelo. Las proyecciones para este fin se presentan en el Anexo 13.

Se propone además realizar luego de la implementación de las técnicas estudiadas, nuevamente la evaluación paisajística, para tener una unidad de medida que indique la mejora esperada en el valor paisajístico del área de estudio.

En la Figura 58 se presenta una papeleta de seguimiento para las variables física de las cárcavas.

Figura 58. Papeleta, monitoreo de cárcavas.

Restauración ambiental de suelos degradados	
Etapa:	Parámetro:

Logo
organización

Fecha	N° de Cárcava	Variables			
		Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Inclinación (°)

Realizado por:

Firma:

Supervisado por:

Firma:

6.6 Costos de implementación de técnicas de restauración

Los costos de los materiales para la implementación de las técnicas de restauración, se estimaron considerando un dique de 5,6 (m) para la cárcava N°5.1 y una de 2 (m) para la cárcava N°1. La incorporación de compost en las cárcavas N°2, N°3, N°4 y N° 5.2, se implementara en una proporción de 60g por kg⁻¹ de suelo (133 t ha⁻¹) para una superficie de total de 0,0196 ha y en el caso de la hidrosiembra para 0,00564 ha (Tabla 34, 35, 36).

Tabla 34. Estimación de costos para Dique mixto de biomasa residual.

Sección	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Materiales	Estaca (rollete 1,5m)	m	26	1.875	48.750
	Tablas (1,5m)	m	32	645	20.640
	Soga Yute fibra natural (resistencia 300 kg, 10m)	kg	4	3.790	15.160
Herramientas	Chuzo 1 1/4" x 1.70 mts	unid	2	17.811	35.622
	Pala punta huevo	unid	2	4.890	9.780
	Martillo	unid	2	7.990	15.980
	Clavos	kg	5	1.246	6.230
	Combo	unid	1	22.990	22.990
Arriendo de maquinaria	Sierra eléctrica circular	día	2	2.990	5.980
	Generador electricidad diésel	día	2	10.690	21.380
Personal	Maestro 1º	día	1	30.000	30.000
	Jornalero 1º	día	1	15.000	15.000
	Jornalero 2º	día	1	15.000	15.000
	Leyes Sociales	%	0,17	60.000	10.200
EPP*	Zapatos de seguridad	par	3	45.000	135.000
	Guantes de seguridad	par	3	2.990	8.970
	Ropa de seguridad	unid	3	8.290	24.870
	Bloqueador	unid	3	3.868	11.604
	Lentes de Seguridad	unid	3	4.990	14.970
	Casco de Seguridad	unid	3	9.990	29.970
	Protector solar para casco	unid	3	2.090	6.270
Extras	Colación	unid	3	6.850	20.550
	Movilización	unid	6	1.800	10.800
	Flete	km	50	1.500	75.000
Total (\$)					610.716

* Elementos de protección personal.

Tabla 35 Estimación de costos para la implementación de compost

Sección	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Materiales	Compost 50 kg	kg	45	6.990	314.550
Herramientas	Pala redonda con punta huevo	unid	1	11.990	11.990
	Horqueta curva 5 dientes	unid	1	15.490	15.490
	Set 3 herramientas mango corto	set	1	5.490	5.490
Personal	Maestro 1º	día	2	30.000	60.000
	Leyes Sociales	%	0,17	60.000	10.200
EPP*	Zapatos de seguridad	par	1	45.000	45.000
	Guantes de seguridad	par	1	2.990	2.990
	Ropa de seguridad	unid	1	8.290	8.290
	Bloqueador solar	unid	1	3.868	3.868
	Lentes de seguridad	unid	1	4.990	4.990
	Casco de seguridad	unid	1	9.990	9.990
	Protector solar para casco	unid	1	2.090	2.090
Extras	Colación	unid	2	6.850	13.700
	Movilización	unid	4	1.800	7.200
	Flete	km	50	1.500	75.000
Total (\$)					590.838

* Elementos de protección personal.

Tabla 36 Estimación de costos para la implementación de hidrosiembra

Sección	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Materiales	Compost 50 kg	kg	45	6.990	314.550
	mallla (Raschel)sombra 60% cobertura 42m2	m2	1,3	18990	24.687
	Semillas	kg	56,44	2549	143.866
Herramientas	Pala redonda con punta huevo	unid	1	11.990	11.990
	Horqueta curva 5 dientes	unid	1	15.490	15.490
	Set 3 herramientas mango corto	set	1	5.490	5.490
Arriendo de maquinaria	Motor de 6 a 12 hp	día	2	2.980	5.960
	Bomba centrífuga con mangueras reforzadas	día	2	11.990	23.980
	Estanque móvil 500 a 1500 lt	día	2	1.500	3.000
	agitador hidráulico	día	2	2.490	4.980
Personal	Maestro 1º	día	2	30.000	60.000
	Leyes Sociales	%	0,17	60.000	10.200
EPP*	Zapatos de seguridad	par	1	45.000	45.000

Sección	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
	Guantes de seguridad	par	1	2.990	2.990
	Ropa de seguridad	unid	1	8.290	8.290
	Bloqueador solar	unid	1	3.868	3.868
	Lentes de seguridad	unid	1	4.990	4.990
	Casco de seguridad	unid	1	9.990	9.990
	Protector solar para casco	unid	1	2.090	2.090
Extras	Colación	unid	2	6.850	13.700
	Movilización	unid	4	1.800	7.200
	Flete	km	50	1.500	75.000
Total (\$)					797.311

* Elementos de protección personal.

7 Conclusión

Tras la campaña en terreno se logró identificar siete sitios erosionados, cinco cárcavas (algunas con características de surcos, en pleno crecimiento o cárcavas consolidadas y sitios con especies colonizadoras) que luego pasarían a ser seis y dos sitios con avanzada erosión laminar. Se logró caracterizarlos y clasificarlos, con metodologías de campo y trabajo en gabinete, obteniendo los datos necesarios para hacer un diagnóstico.

Se determinó mediante el software RUSLE2, el suelo perdido actualmente por las cárcavas cada año. El área de estudio se dividió en cuatro Unidades Visuales, las cuales fueron evaluadas, obteniendo así, un parámetro para contrastar la mejora de valor paisajístico del lugar.

Los sitios identificados fueron clasificados, para conocer mejor que técnica de restauración era idónea en cada caso, distinguiendo tres tipos de implementaciones útiles para la restauración ambiental. Se evaluaron técnicas de restauración para conocer cual metodología sería más idónea para cada caso de degradación. Así, se logró identificar metodologías actuales que según estudios presentaran resultados visibles en poco tiempo.

Siguiendo la metodología establecida por los estudios citados, se implementaran “diques de biomasa residual” en dos cárcavas y compost en las cuatro cárcavas restantes. Además se implementara la técnica de hidrosiembra, en los lugares que presentaron erosión laminar severa.

Utilizando el modelo RUSLE2, se estimó el suelo perdido para cada cárcava, ante una nueva situación de restauración. Además se propuso un seguimiento para la restauración de cada cárcava.

Se calculó el valor de los materiales para la implementación de las actividades a realizar, considerando materiales, mano de obra y transporte.

En conclusión, se logró identificar diversas técnicas de restauración de ambiental, que concuerdan con el tipo de degradación que presenta el área de estudio. La evaluación paisajística resultó ser útil como parámetro de comparación entre la situación inicial y la situación final posterior a la futura implementación.

8 Bibliografía

- Abramson L. W., (1996). «Slope Stabilization methods». Slope stability and stabilization methods. John Wiley & Sons, Inc. New York, pp 441-582.
- Araneda, A. Cisternas, M. Urrutia, R. (1999). USLE y análisis isotópicos en la reconstrucción de la historia erosional en una cuenca lacustre. Bosque (Valdivia) vol.20, no.2, p.95-105. ISSN 0717-9200. Chile.
- Beer, C.E., Johnson H.P. (1963), Factors in gully growth in deep loess area of Western Iowa. Transactions ASAE 6 (3). 237-240.
- Bertoni, J. y Lombardi Neto, F. (1985). Conservação do solo. Piracicaba, Livrocetes, 392 p.
- Bravo-Espinosa, M. Mendoza, M. Medina-Orozco, L. Sáenz-Reyes, T. (2008). Characteristics and control of gully erosion. Campo Experimental Uruapan-INIFAP. Av. Latinoamericana 1101, Col. Revolución. 60500 Uruapan. Michoacán. México.
- Bruno, C. (1992). El viento y el relieve como factores geográficos determinantes en la dispersión descontaminantes derivados de los procesos productivos del cobre (comuna de Puchuncaví, V Región). Tesis de Magíster en Asentamientos Humanos y Medio Ambiente. 103 pp. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago. Chile.
- Caballero, C. Cerrillo, G. (2009). Dique mixto de biomasa residual: un nuevo elemento para controlar la erosión. PROFOYMA, Estudios y Proyectos. S.L. España.

- Candela, L. et al (1998). Soil and groundwater pollution from agricultural activities. Learning material. Technical Documents in Hydrology, nº 19. International Hydrological Programme.
- Casanova, M. Luzio, W. Salazar, O. Vera, W. (2004). Edafología. Departamento de ingeniería y suelos. Facultad de ciencias agronómicas. Universidad de Chile. Santiago. Chile.
- Castillo, B. (2002). Estructura y composición de un paisaje fragmentado y su relación con especies arbóreas indicadoras en una zona de bosque muy húmedo tropical. Costa Rica. Tesis (Mag. Sc.). Turrialba. Costa Rica.
- CERENER. (2013). CERENER S. L. Consultoría Ambiental [En línea] < www.cerener.es > [consulta: Mayo 2013]
- CIREN. (2010). Determinación de erosión potencial y actual de Chile. Centro de Información de Recursos Naturales, CIREN. Diciembre de 2010. Chile.
- CONAF. (1998). Corporación Nacional Forestal, Ministerio de Agricultura. Programa de Ordenación y Manejo de Cuencas, Proyecto Cuencas CONAF – JICA “Control de Erosión y Forestación en Cuencas Hidrográficas de la Zona Semiárida”. Chile.
- Cordova, S. Neaman, A. Gonzalez, I. Gionocchio, R. Fine, P. (2011). The effect of lime and compost amendments on the potential for the revegetation of metal-polluted, acidic soils. Área del Medio Ambiente. Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Quillota. Chile.

- Cosió, F. Negrón, M. Gastó, J. Villate, G. (2007). Distritos y Sitios de la Provincia Templada Seco estival Nubosa o Valparaíso: secano de la costa. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 7, 38-61.
- Crosara A. (2013). Curso de Edafología. Universidad de la República Uruguay. Facultad de Ciencias. Uruguay.
- WFS. (1996). Cumbre Mundial de la Alimentación. Roma.
- Daniel, T.C. Vinning, J. (1983). Methodological issues in the assessment of landscape quality. En: Altman I & JF Wohlwil (eds) *Behavior and natural environment*. Freeman & Company, New York. New York. USA.
- De la Barrera, A. Oporto, A. Sepúlveda, G. Moraga, S. (2010). Evaluación de la vegetación de acuerdo con la nueva Ley de Bosque Nativo (20283): aplicación en el caso de un área urbanizable (Lo Barnechea, Chile). *Chloris Chilensis*, año 12 N° 2. <<http://www.chlorischile.cl>>, [consulta: Julio 2013].
- De Gregori, I., Fuentes, E. Rojas, M. Pinochet, H. Potin-Gautier, M. (2003). Monitoring of copper, arsenic and antimony levels in agricultural soils and non-impacted mining activities. (287–295). from three regions in Chile. *Journal of Environmental Monitoring*.
- Dorronsoro. (2013). Degradación del suelo (Universidad de Granada, España) [En línea] < www.edafologia.net > [consulta: Mayo 2013].
- ECBI-CHILE. Enfoque sistémico [En línea] < <http://www.ecbichile.cl/enfoque-sistemico/> > [consulta: Marzo 2015]

- FAO. (2015). Portal de Suelos de la FAO [En línea] < <http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>> [consulta: Junio 2015]
- FEDERACAFÉ. (1975). Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Manual de conservación de suelos de ladera 1ª edición. Chinchiná (Colombia), Cenicafe. 267 p.
- Finegan. (1993). Procesos dinámicos en bosques naturales tropicales. Curso de bases ecológicas para la producción sostenible. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 25 p.
- Folchi, M. (2006). Historia ambiental de las labores de beneficio en la minería de cobre en Chile. siglos XIX y XX. Tesis de doctorado. Departamento de Economía y de Historia Económica. Universidad Autónoma de Barcelona. España.
- Gajardo, R. (1994). La Vegetación Natural de Chile. Clasificación y Distribución Geográfica. 165p. Editorial Universitaria. Santiago. Chile.
- Gálvez. (2002). La restauración Ecológica: Conceptos y aplicaciones, Universidad Rafael Landívar. Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas. Instituto de Agricultura. Recursos Naturales y Medio Ambiente.
- García. (2013). Vicente Luis García Gil, arquitecto. “Separata para el estudio de Integración Paisajístico y Plan de Participación Pública”. Segorbe. España.
- Ginocchio, R. (2000). Effects of a copper industrial complex on a grassland community in the Puchuncavi Valley. Chemosphere 41. (15–23).Chile.
- GLASOD. (1991). World map of the status of human-induced soil degradation. Global assessment of Soil Degradation. Oldeman. L.R.

- Goecke, P. Ginocchio, R. Mench, M. Neaman, A. (2011). Amendments promote the development of *Lolium Perenne* in soils affected by historical copper smelting operations.
- González, I. Muená, v. Cisterna, M. Neaman, A. (2008). Victoria Muená, Mauricio Cisternas y Alexander Neaman. Acumulación de cobre en una comunidad vegetal afectada por contaminación minera en el valle de Puchuncaví, Chile central. Rev.Chil. Hist. Nat. Chile.
- González, I. Cortes, A. Neaman, A. Rubio, P. (2011). Biodegradable chelate enhances the phytoextraction of copper by *Oenothera picensis* grown in copper-contaminated acid soils. Chemosphere 84 (2011) 490–496.
- González I. Neaman, A. Cortes, A. Rubio, P. (2013). Effect of compost and biodegradable chelate addition on phytoextraction of copper by *Oenothera picensis* grown in Cu-contaminated acid soils. Chemosphere 95 (2014) 111–115.
- Gray D. H., Sotir R.B. (1996), “Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization”. John Wiley & Sons. P.378
- Hillel, D. (1998). Environmental soil physics. Academic Press.
- Hudson, Norman. (1982). Soil Conservation. B T Batsford Limited.
- Ilarri, R. (2001). Fuentes de contaminación del suelo: prevención y monitorización. Curso sobre contaminación de suelos y aguas subterráneas. 24-28 Septiembre de 2001. Universidad de Politécnica de Valencia.

- Informe de Vigilancia Tecnológica. (2007). Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Universidad de Alcalá. Universidad Rey Juan Carlos. España.
- INIA-RAIHUÉN. (2008). Gobierno de Chile Ministerio de Agricultura. ISSN 0716-6265.
- Jara, E. Lattapiat, M. (2012). "Metales pesados y arsénico en suelos y aguas de poblados aledaños a pasivos ambientales mineros".
- López, L. (2005). Manual de Edafología. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Universidad de Sevilla. España.
- Machlis, G. (1993). Áreas protegidas en un mundo cambiante: Los aspectos científicos. En Parques y progreso. UICN, BID. IV Congreso mundial de parques y áreas protegidas. pp 37-53. Caracas. Venezuela.
- Macías, F. (1993). Contaminación de suelos: algunos hechos y perspectivas. En: Ortiz Silla, R., (Ed.), Problemática Geoambiental y Desarrollo, Tomo I, pp. 53-74. V Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. Murcia.
- Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. (1979). FAO, UNESCO, UNEP. Food and Agriculture organization of the United Nations. Roma. Italia.
- MMA. (2011). Centro de Ecología Aplicada. Diseño del inventario nacional de humedales y el seguimiento ambiental. Ministerio de Medio Ambiente. 164 pp. Santiago. Chile.

- Muenia, V. Gonzalez, I. Neaman, A. (2010). Efectos del encalado y la fertilización nitrogenada sobre el desarrollo de *Oenothera affinis*, en un suelo afectado por la minería del cobre. R.C. Suelo Nutr. Veg. 10(2): 102 – 114.
- Mineduc. Curriculum en línea [En línea] < <http://www.curriculumenlineamineduc.cl> > [consulta: Marzo 2015]
- Minner DD, Levy AJ, Century, J. (2010). Inquiry-based science instruction –what is it and does it matter? Results from a research synthesis years 1984-2002. Journal of Research in Science Teaching, 47 (4), 474- 496.
- Muñoz, O. (2007). Memoria de Título: “El suelo: Diagnostico de la Situación del Recurso”, Centro de Derecho Ambiental, Universidad de Chile.
- Neaman, A. Reyes, L.. Trolard, F. Bourrié, G. Sauvé, S. (2009). Copper mobility in contaminated soils of the Puchincaví valley central Chile. (150, 359–366).Geoderma.
- Leopold L.B., Wolman M.G., John P.M. (1964) “Fluvial Process in Geomorphology”.
- Lubert y Pliscoff. (2006). Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Editorial Universitaria.
- OCHISAP. (2015). Observatorio chileno de salud pública. Escuela de Salud Pública, Instituto de Salud Poblacional. Facultad de Medicina. Universidad de Chile. [En línea] <<http://www.ochisap.cl/>> [consulta: Mayo 2015]
- Ovalle, C. del Pozo, A. Lavín, A. Hirzel, J. (2007). Cover crops in vineyards: performance of annual forage legume mixtures and effects on soil fertility, Instituto de

Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigacion Quilamapu, Casilla 426. Chillan. Chile.

- Plan de Desarrollo Comunal 2009 – 2012, comuna de Puchuncaví.
- PUCV. (2003). “Desarrollo de metodologías integradas de biomejoramiento para la recuperación de suelos contaminados con metales pesados”.
- Mielniczuk, I. y Schneider, P. 1984. Aspectos socio-economicos do manejo de solo no Sul do Brasil, In: T Simposio de Manejo do Solo e Plantío Direto no Sul do Brasil e III Simposio de Conservação de Solo do Planalto. Passo Fundo, RS. 1983. Anais. Passo Fundo. p.3-19.
- Morgan, R. Rickson, R. (1995). Modelling methodology for soil erosion assessment and soil conservation desing: the EUROSEM approach. Outlook in Agriculture.
- Reddy A, et al. (1999) Glycosylation of the overlapping sequons in yeast external invertase: effect of amino acid variation on site selectivity in vivo and in vitro. Glycobiology 9(6):547-55
- SAGARPA. (2009). Secretaria de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación. “Control de cárcavas”. Especialidad de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados. Montecillos. Estado de México.
- Salguero. (2013). Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, Área Tecnología, Subarea Manejo de Suelo y Agua. Laboratorio de Suelo y Agua. Ing. Agr. Marvin Roberto Salgueroaux. Guatemala.

- Schmidt, J. Werner, M. Michael, A. (1999). Application of the EROSION 3D model to the CATSOP watershed, The Netherlands.
- Schwab G.O., R, K. Frevert, T.W. Edminster and K. K. Barnes (1981), "Soil and Water Conservation Engineering", 3a. ed. John Wiley & Sons.
- SERNAGEOMIN. (2003). Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería. Publicación Geológica Digital. No. 4 (CD-ROM, versión1.0, 2003). Santiago. Chile.
- Skidmore, E. Fisher, P. Woodruff, N. (1970). Wind erosion equation: computer solution and application. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 34 (5).
- Soil Erosion. (2016). En línea. <http://soilerosion.net/doc/models_menu.html>
- Soil Survey Division Staff. (1993). Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18.
- Sociedad Geológica, [En línea] <<http://www.sociedadgeologica.cl/>>, [consulta: Noviembre 2014].
- Styczen M.E., Morgan R.P.C. (1995). "Engineering Properties of Vegetation". Slope Stabilization and Erosion Control. A Bioengineering Approach. Editors R.P.C. Morgan y R.J. Rickson. E y FN Spon. Cambridge Inglaterra. pp5-58.
- Suárez Díaz, J. (2001). Control De Erosión en Zonas Tropicales, ISBN 958-33-2734-4.
- UDP. (2014). Universidad Politécnica de Valencia, Master en Jardinería y Paisaje. Restauración y Gestión de Áreas Degradadas, Espacios Degradados y Restauración Ambiental.

- Ulriksen, C . Ginocchio, R. Mench, M. Neaman, A. (2012). Lime and compost promote plant re-colonization of metal-polluted, acid soils. Área del Medio Ambiente. Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Quillota. Chile.
- U.S. EPA. (2007). The use of soil amendments for remediation, revitalization and reuse. Environmental Protection Agency/National Service Center for Environmental Publications. Cincinnati.
- Zambrano, M. González, V. Molinet, E. (2002). La valoración en el Ordenamiento Territorial.

9 ANEXOS

ANEXO 1: Principales técnicas de recuperación de suelos (Informe de vigilancia técnica: técnicas de recuperación de suelos contaminados, 2007).

Tratamiento	Tipo	Tratamiento	Aplicación
Descontaminación	Físico-Químico	Extracción	In situ
		Lavado	Ex situ
		Flushing	In situ
		Electrocinética	In situ
		Adición de enmiendas	In situ
		Barreras permeables activas	In situ
		Inyección de aire comprimido	In situ
		Pozos de recirculación	In situ
		Oxidación ultravioleta	Ex situ
	Biológico	Biodegradación asistida	In situ
		Biotransformación de metales	In situ
		Fitorremediación	In situ
		Bioventing	In situ
		Landfarming	Ex situ
		Biopilas	Ex situ
		Compostaje	Ex situ
		Lodos biológicos	Ex situ
	Térmico	Incineración	Ex situ
		Desorción térmica	Ex situ
	Mixto	Extracción multifase	In situ
		Atenuación natural	In situ
Contención		Barreras verticales	In situ
		Barreras horizontales	In situ
		Barreras de suelo seco	In situ
		Barreras hidráulicas	In situ
Confinamiento		Estabilización físico-química	Ex situ
		Inyección de solidificantes	In situ
		Vitrificación	Ex situ-In situ

ANEXO 2: Tipos de contaminantes tratados en la recuperación de suelos (Informe de vigilancia técnica: técnicas de recuperación de suelos contaminados, 2007).

Tratamiento	Tipo de contaminantes tratados
Extracción	Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, combustibles, metales, PCBs, hidrocarburos aromáticos policíclicos, disolventes halogenados y clorados.
Lavado	Compuestos orgánicos semivolátiles, hidrocarburos derivados del petróleo, cianuros y metales
Flushing	Todo tipo de contaminantes, especialmente inorgánicos
Electrocinética	Especialmente metales solubles o complejados
Adición de enmiendas	Fundamentalmente sales y metales
Barreras permeables activas	Contaminantes orgánicos biodegradables, metales, nitratos, sulfatos
Inyección de aire comprimido	Solventes clorados, sustancias volátiles y semivolátiles ligeras como xileno, benceno, tolueno, tetracloruro de carbono, tricloroetano, cloruro de metilo
Pozos de recirculación	Tricloroetileno, derivados del petróleo, compuestos orgánicos no halogenados, semivolátiles, pesticidas y compuestos inorgánicos
Oxidación ultravioleta	Amplio espectro de contaminantes orgánicos y explosivos (hidrocarburos del petróleo, hidrocarburos clorados, compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, alcoholes, cetonas, aldehidos, fenoles, éteres, pesticidas, dioxinas, PCBs, TNT, RDX y HMX)
Biodegradación asistida	Amplio espectro de contaminantes orgánicos biodegradables
Biotransformación	Metales
Fitorremediación	Metales, pesticidas, solventes, explosivos, hidrocarburos aromáticos policíclicos, crudo
Bioventing	Hidrocarburos del petróleo de peso mediano, explosivos (DDT, DNT)
Landfarming	Fundamentalmente hidrocarburos del petróleo de peso mediano
Biopilas	Derivados del petróleo, compuestos orgánicos volátiles halogenados y no halogenados, compuestos orgánicos semivolátiles y pesticidas
Compostaje	Explosivos (TNT, RDX y HMX), hidrocarburos aromáticos policíclicos, hidrocarburos del petróleo, clorofenoles y pesticidas
Lodos biológicos	Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles no halogenados, explosivos, hidrocarburos del petróleo, petroquímicos, solventes y pesticidas
Incineración	Explosivos, hidrocarburos clorados, PCBs y dioxinas
Desorción térmica	Compuestos orgánicos volátiles no halogenados, combustibles, algunos compuestos orgánicos semivolátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos, PCBs, pesticidas y metales volátiles
Extracción multifase	Compuestos orgánicos volátiles, en disolución y compuestos orgánicos
Atenuación natural	Compuestos BTEX (benceno, tolueno, etil benceno y xileno), hidrocarburos clorados, algunos pesticidas y compuestos inorgánicos
Barreras verticales	Contaminantes orgánicos e inorgánicos
Barreras horizontales	Contaminantes orgánicos e inorgánicos
Barreras de suelo seco	Contaminantes orgánicos e inorgánicos
Sellado profundo	Contaminantes orgánicos e inorgánicos
Barreras hidráulicas	Contaminantes orgánicos e inorgánicos
Estabilización físico-química	Fundamentalmente compuestos inorgánicos como metales pesados, limitada eficacia para contaminantes orgánicos y pesticidas
Inyección de solidificantes	Fundamentalmente compuestos inorgánicos, eficacia mucho menor para compuestos orgánicos semivolátiles y pesticidas
Vitrificación	Contaminantes inorgánicos (principalmente Hg, Pb, Cd, As, Ba, Cr y cianuros).

ANEXO 3: Unidades Visuales Paisajísticas

- Unidad Visual A



Unidad Visual con orientación al Oeste. Se observan pendientes pronunciadas y contrastes cromáticos poco llamativos. Destaca por su dominancia visual y la integración de sus componentes abióticos.



- **Unidad Visual B**



Unidad Visual con orientación Nor-NorEste. Se observa la influencia de las actuaciones humanas y sus contrastes cromáticos poco llamativos.



- **Unidad Visual C**



Unidad Visual con orientación al Sur. Se observan pendientes pronunciadas y contrastes cromáticos poco llamativos. Destaca por su dominancia naturalidad y su complejidad topografica.

- **Unidad Visual D**



Unidad Visual con orientación al Sur-Oeste. Se observa una gran diversidad en su organización visual y contrastes cromáticos poco llamativos. Destaca por su dominancia visual y el contraste visual de sus componentes.



ANEXO 4: Papeleta N°1 para encuesta de evaluación paisajística.

PUNTOS	VALOR		
	Alto (3)	Medio (2)	Bajo (1)
Unidad Visual del Paisaje			
Abiótico	Predominio de elementos físicos, influyentes en la calidad y composición de una escena agradable a observar.	Elementos que dan calidad a la composición o escena, pero que por su atractivo tienen un valor medio.	Elementos poco notorios, o que no están presentes en la escena y que disminuyen la calidad de la composición, paisajes poco atractivos.
Biótico	Predominio de elementos físicos, influyentes en la calidad y composición de una escena agradable a observar.	Elementos que dan calidad a la composición o escena, pero que por su atractivo tienen un valor medio.	Elementos poco notorios, o que no están presentes en la escena y que disminuyen la calidad de la composición, paisajes poco atractivos.
Antrópico	Predominio de elementos físicos, influyentes en la calidad y composición de una escena agradable a observar.	Elementos que dan calidad a la composición o escena, pero que por su atractivo tienen un valor medio.	Elementos poco notorios, o que no están presentes en la escena y que disminuyen la calidad de la composición, paisajes poco atractivos.
Organización Visual del Paisaje			
Contraste Visual	Un contraste alto entre cada uno de los elementos del paisaje.	Contraste medio entre cada uno de los elementos.	Bajo contraste entre cada uno de los elementos integrados de la unidad visual.
Dominancia Visual	Dominio total de la apreciación del paisaje.	Dominio parcial de los elementos.	Presencia de un elemento de forma negativa dentro de la unidad visual.
Importancia relativa de las características Visuales	Igual presencia entre contraste y la dominancia de cada una de las características visuales.	Una interrelación entre contraste y dominancia de carácter medio.	Carácter y dominancia de carácter bajo.
Calidad Visual del Paisaje			
Diversidad	Gran variedad de elementos biofísicos, características visuales.	Diversidad media de vegetación, presencia de actuaciones humanas.	Escasa diversidad, paisajes monótonos.
Naturalidad	Mantiene íntegramente las características naturales.	Poca intervención humana en la naturaleza.	Naturaleza altamente modificada.
Singularidad	Presencia de elementos únicos o poco corrientes con alto grado de atracción. Gran potencial visual por su escasez o valoración histórica.	Escaso grado de atracción visual, no existe un realce histórico.	La presencia de elementos pasan por desapercibidos. Son comunes en la región.
Complejidad topográfica	Presencia de un relieve montañoso notorio.	Formas montañosas interesantes pero poco dominio.	Colinas suaves y ondulaciones en el terreno poco notorias.
Actuaciones Humanas	Actuaciones humanas que estéticamente no agreden el entorno.	Actuaciones armoniosas sin calidad estética.	Modificaciones intensas que reducen la calidad estética.

PUNTOS	VALOR		
	Alto (3)	Medio (2)	Bajo (1)
Calidad Escénica del Paisaje			
Morfología o Topografía	Relieve con pendiente mayor a 60% o de gran variedad superficial, o muy erosionado, o con presencia de rasgos singulares y dominantes.	Pendientes entre 30%-60%. Formas erosivas interesantes y variadas. Presencia de formas y detalles interesantes pero no dominantes o excepcionales.	Pendiente entre 0% y 30% colinas suaves, fondos de valles planos, pocos o ningún detalle singular. Sin rasgos dominantes.
Vegetación	Grandes masas boscosas, gran variedad de tipos de vegetación, con formas, texturas y distribución interesante.	Cubierta vegetal casi continua. Poca variedad en la distribución de vegetación. Diversidad de especies media.	Poca o ninguna variedad o contraste en distribución de la vegetación.
Formas de aguas-ríos-lagos	Factor dominante en el paisaje, apariencia limpia y clara, aguas blancas o grandes láminas de agua en reposo.	Agua en movimiento o en reposo, pero no dominante en el paisaje, con características bastante comunes en su recorrido y caudal.	Torrentes esteros y arroyos intermitentes en las diferentes estaciones del año, con poca variación en su caudal. Pueden pasar en forma inapreciable o estar ausente.
Color	Combinaciones de color intensas y variadas, o contrastes agradables entre suelo, vegetación, cerros y agua.	Alguna variedad e intensidad en los colores y contrastes del suelo, vegetación, cerros y agua, pero no actúa como elemento dominante.	Muy poca variación de color contraste. Colores apagados.
Rareza	Único o poco corriente o muy raro en la región.	Característico aunque similar a otros en la región.	Bastante común en la región.

ANEXO 5: Papeleta N°2 para encuesta de evaluación paisajística.

PUNTOS	Unidades Visuales			
	A	B	C	D
Unidad Visual del Paisaje				
Abiótico				
Biótico				
Antrópico				
Organización Visual del Paisaje				
Contraste Visual				
Dominancia Visual				
Importancia relativa de las características Visuales				
Calidad Visual del Paisaje				
Diversidad				
Naturalidad				
Singularidad				
Complejidad topográfica				
Actuaciones Humanas				
Calidad Escénica del Paisaje				
Morfología o Topografía				
Vegetación				
Formas de aguas-ríos-lagos				
Color				
Rareza				

ANEXO 6: Perfiles de taludes en AUTOCAD





Figura 61. Perfil cárcava N°3.



Figura 62. Perfil cárcava N°4.

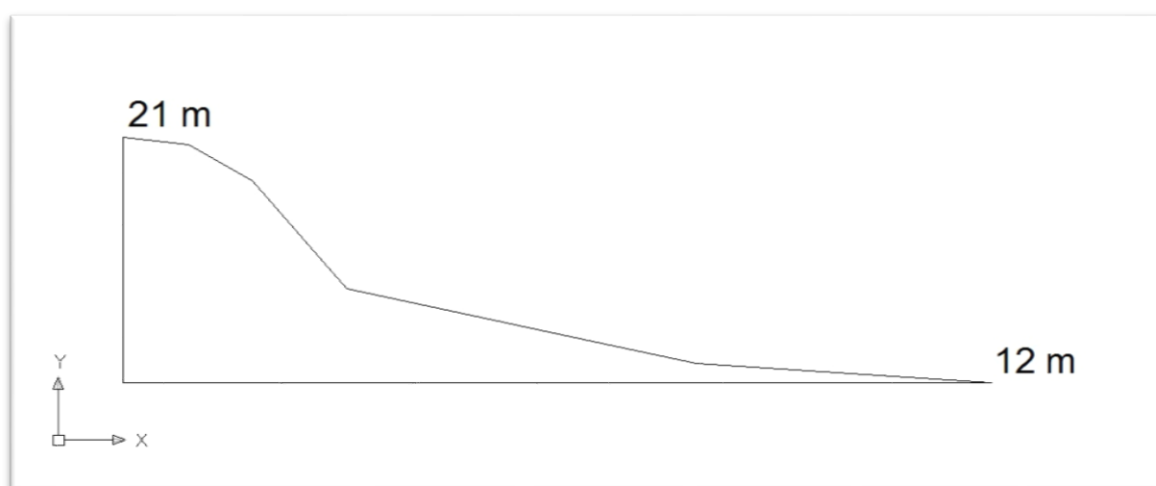


Figura 63. Perfil cárcava N°5.

ANEXO 7: Perfiles de erosión en RUSLE2

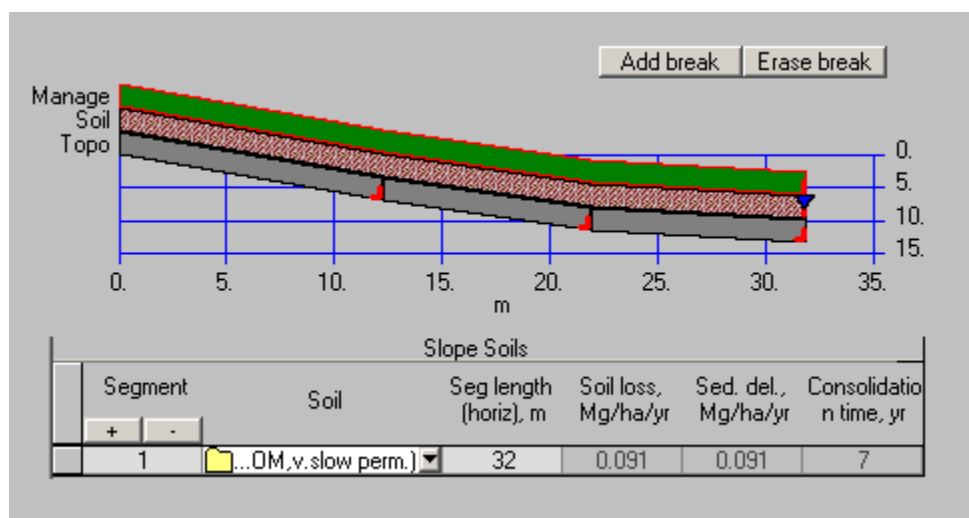


Figura 64. Cárcava N°1 en RUSLE2.

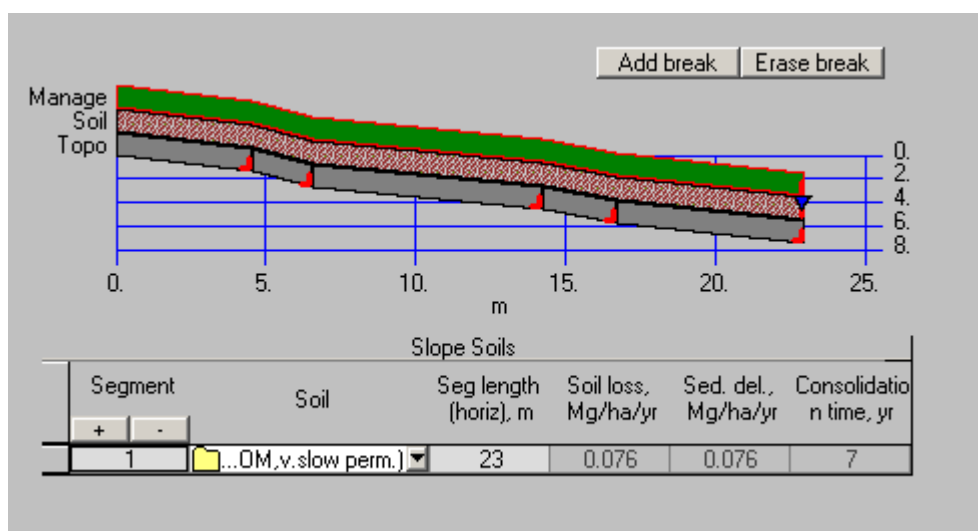


Figura 65. Cárcava N°2 en RUSLE2.

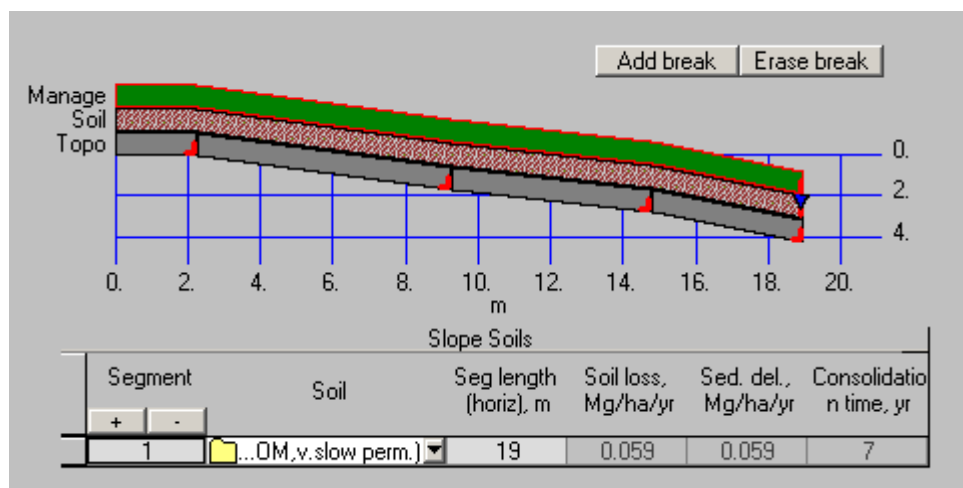


Figura 66. Cárcava N°3 en RUSLE2.

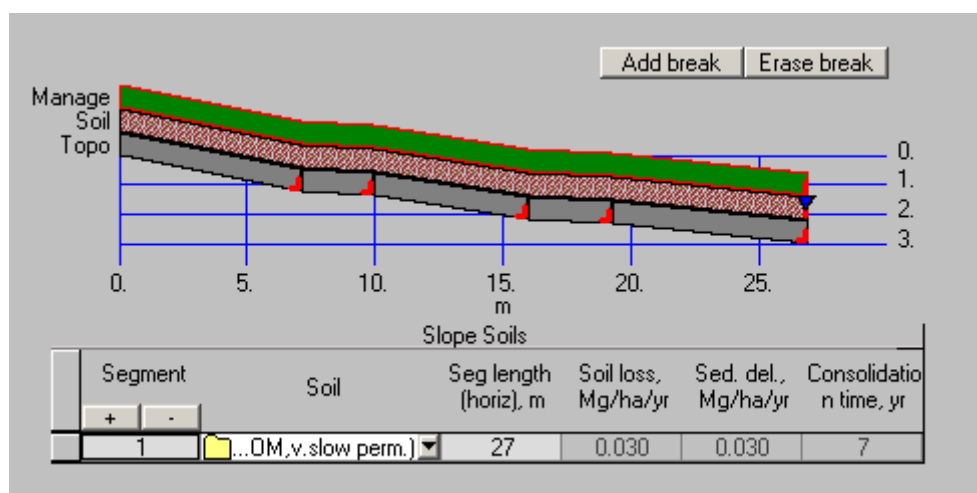


Figura 67. Cárcava N°4 en RUSLE2.

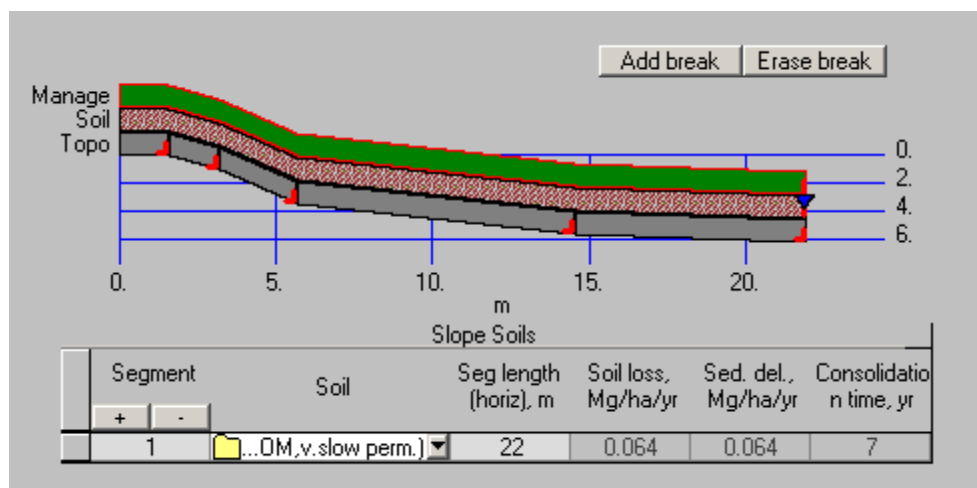


Figura 68. Cárcava N°5.1 en RUSLE2.

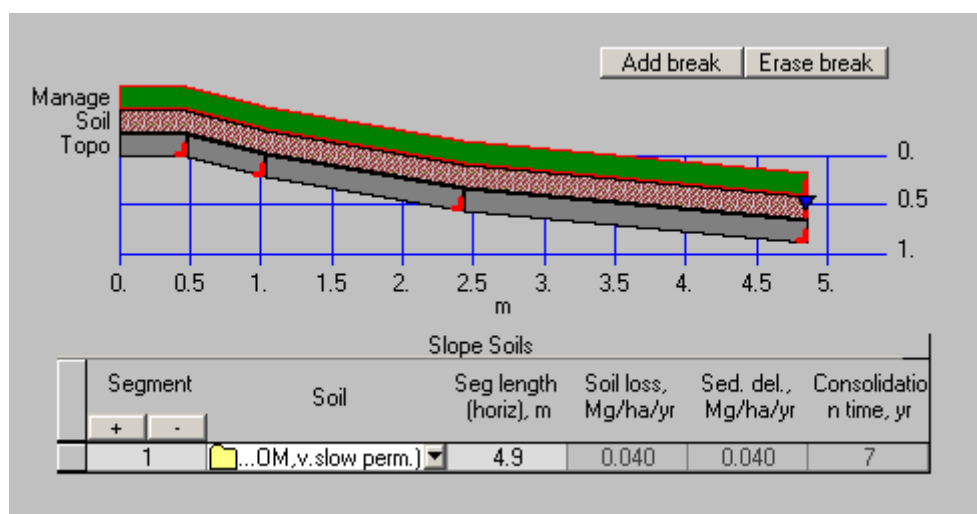


Figura 69. Cárcava N°5.2 en RUSLE2.

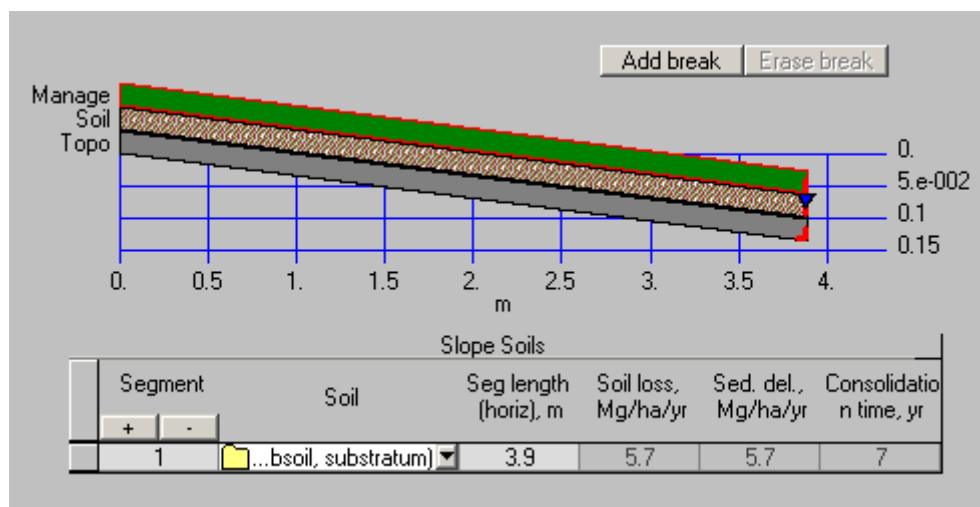


Figura 70. Laminar N°1 en RUSLE2.

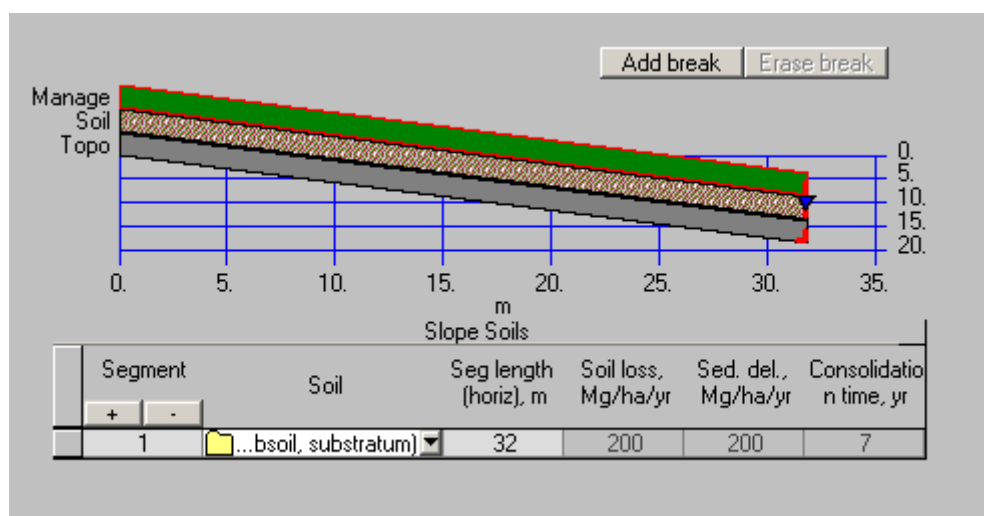


Figura 71. Laminar N°2 en RUSLE2.

ANEXO 8: Estimación de costos de implementación

Estimación de costos para Dique de postes madera

Sección	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Materiales	Poste 2,40 m, 4" Bruto	m	66,175	17.521	1.159.460
	Alambre N°14	kg	5,165	2.090	10.795
	Clavos N°5"	kg	2,582	1.740	4.493
	Saco de Yute	kg	12,912	465	6.004
	Sacos de malla (Raschel)sombra 60% cobertura 60x40cm	kg	14,042	86	1.204
	Grapas 1,5"	kg	0,968	22.700	21.983
Herramientas	Martillo	unid	2	7.990	15.980
	Alicate	unid	2	7.660	15.320
	Alicate pequeño	unid	2	8.700	17.400
	Alambre genérico multiuso	unid	100	46	4.600
	Nivel	unid	1	9.990	9.990
Arriendo de maquinaria	Sierra eléctrica circular	día	2	2.990	5.980
	Generador electricidad diésel	día	2	10.690	21.380
Personal	Maestro 1º	día	2	30.000	60.000
	Jornalero 1º	día	2	15.000	30.000
	Jornalero 2º	día	2	15.000	30.000
	Leyes Sociales	%	0,17	120.000	20.400
EPP*	Zapatos de seguridad	par	3	45.000	135.000
	Guantes de seguridad	par	3	2.990	8.970
	Ropa de seguridad	unid	3	8.290	24.870
	Bloqueador solar	unid	3	3.868	11.604
	Lentes de seguridad	unid	3	4.990	14.970
	Casco de seguridad	unid	3	9.990	29.970
	Protector solar para casco	unid	3	2.090	6.270
Extras	Colación	unid	6	6.850	41.100
	Movilización	unid	12	1.800	21.600
	Flete	km	50	1.500	75.000
Total (\$)					1.804.343

* Elementos de protección personal

Estimación de costos para Dique de estructuras gavionetadas

Sección	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Materiales	Gaviones Alambre recubierto 2x1x0,5	m	16	22626	362.016
	Bolones	m3	18	14.000	252.000
	Saco de Yute	kg	16	465	7.440
	Tablas 3,2 m, 3/4x5"	kg	10	1.600	16.000
Herramientas	Martillo	unid	2	7.990	15.980
	Alicate	unid	2	7.660	15.320
	Alicate pequeño	unid	2	8.700	17.400
	Alambre genérico multiuso	unid	100	46	4.600
Arriendo de maquinaria	Sierra eléctrica circular	día	2	2.990	5.980
	Generador electricidad diésel	día	2	10.690	21.380
Personal	Maestro 1º	día	2	30.000	60.000
	Jornalero 1º	día	2	15.000	30.000
	Jornalero 2º	día	2	15.000	30.000
	Leyes Sociales	%	0,17	120.000	20.400
EPP*	Zapatos de seguridad	par	3	45.000	135.000
	Guantes de seguridad	par	3	2.990	8.970
	Ropa de seguridad	unid	3	8.290	24.870
	Bloqueador solar	unid	3	3.868	11.604
	Lentes de seguridad	unid	3	4.990	14.970
	Casco de seguridad	unid	3	9.990	29.970
	Protector solar para casco	unid	3	2.090	6.270
Extras	Colación	unid	6	6.850	41.100
	Movilización	unid	12	1.800	21.600
	Flete	km	50	1.500	75.000
Total (\$)					1.227.870

* Elementos de protección personal.

Estimación de costos para Disipador

Sección	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Materiales	Poste 2,40 m, 4" Bruto	m	30	17.521	525.630
	Estacas 0,6 m, 4"	m	6	612	3.672
	Alambre N°14	kg	0,9	2.090	1.881
	Clavos N°5"	kg	0,09	1.740	157
	Balones y ripio	m3	1,29	28.000	36.120
Herramientas	Martillo	unid	2	7.990	15.980
	Alicate	unid	2	7.660	15.320
	Alicate pequeño	unid	2	8.700	17.400
	Alambre genérico multiuso	unid	100	46	4.600
	Nivel	unid	1	9.990	9.990
Arriendo de maquinaria	Sierra eléctrica circular	día	2	2.990	5.980
	Generador electricidad diésel	día	2	10.690	21.380
Personal	Maestro 1º	día	2	30.000	60.000
	Jornalero 1º	día	2	15.000	30.000
	Jornalero 2º	día	2	15.000	30.000
	Leyes Sociales	%	0,17	120.000	20.400
EPP*	Zapatos de seguridad	par	3	45.000	135.000
	Guantes de seguridad	par	3	2.990	8.970
	Ropa de seguridad	unid	3	8.290	24.870
	Bloqueador solar	unid	3	3.868	11.604
	Lentes de seguridad	unid	3	4.990	14.970
	Casco de seguridad	unid	3	9.990	29.970
	Protector solar para casco	unid	3	2.090	6.270
Extras	Colación	unid	6	6.850	41.100
	Movilización	unid	12	1.800	21.600
	Flete	km	50	1.500	75.000
Total (\$)					1.167.864

* Elementos de protección personal

Estimación de costos para Presa de mampostería

Sección	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Materiales	Piedra Granítica (m³)	m3	2,7	13.234	35.732
	Arena gruesa (40kg)	kg	26,08	890	23.211
	Cemento (42,5)	kg	4,09	4.900	20.041
	Agua (m³)	m3	6,68	32	215
	Arena gruesa (40)	kg	17	890	15.130
	Cemento (42,5)	kg	3,2	4.900	15.680
	Agua (m³)	m3	5,5	32	177
Herramientas	Pala concretera	unid	2	10.990	21.980
	Nivel	unid	1	9.990	9.990
	Platacho de Madera	unid	1	5.490	5.490
	Espátula	unid	1	3.990	3.990
Arriendo de maquinaria	Arriendo de Trompo Betonero	dia	2	5.390	10.780
	Generador electricidad diésel	dia	2	10.690	21.380
Personal	Maestro 1º	día	2	30.000	60.000
	Concretero	día	2	25.000	50.000
	Jornalero 1º	día	2	15.000	30.000
	Jornalero 2º	día	2	15.000	30.000
	Leyes Sociales	%	0,17	170.000	28.900
EPP*	Zapatos de seguridad	par	4	45.000	180.000
	Guantes de seguridad	par	4	2.990	11.960
	Ropa de seguridad	unid	4	8.290	33.160
	Bloqueador	unid	4	3.868	15.472
	Lentes de Seguridad	unid	4	4.990	19.960
	Casco de Seguridad	unid	4	9.990	39.960
	Protector solar para casco	unid	4	2.090	8.360
Extras	Colación	unid	8	6.850	54.800
	Movilización	unid	16	1.800	28.800
	Flete	km	50	1.500	75.000
Total (\$)					775.168

* Elementos de protección personal

Estimación de costos para Dique mixto de biomasa residual

Sección	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Materiales	Estaca (rollete 1,5m)	m	26	1.875	48.750
	Tablas (1,5m)	m	32	645	20.640
	Soga Yute fibra natural (resistencia 300 kg, 10m)	kg	4	3.790	15.160
Herramientas	Chuzo 1 1/4" x 1.70 mts	unid	2	17.811	35.622
	Pala punta huevo	unid	2	4.890	9.780
	Martillo	unid	2	7.990	15.980
	Clavos	kg	5	1.246	6.230
	Combo	unid	1	22.990	22.990
Arriendo de maquinaria	Sierra eléctrica circular	día	2	2.990	5.980
	Generador electricidad diésel	día	2	10.690	21.380
Personal	Maestro 1º	día	1	30.000	30.000
	Jornalero 1º	día	1	15.000	15.000
	Jornalero 2º	día	1	15.000	15.000
	Leyes Sociales	%	0,17	60.000	10.200
EPP*	Zapatos de seguridad	par	3	45.000	135.000
	Guantes de seguridad	par	3	2.990	8.970
	Ropa de seguridad	unid	3	8.290	24.870
	Bloqueador	unid	3	3.868	11.604
	Lentes de Seguridad	unid	3	4.990	14.970
	Casco de Seguridad	unid	3	9.990	29.970
	Protector solar para casco	unid	3	2.090	6.270
Extras	Colación	unid	3	6.850	20.550
	Movilización	unid	6	1.800	10.800
	Flete	km	50	1.500	75.000
Total (\$)					610.716

* Elementos de protección personal.

Estimación de costos para la implementación de compost.

Sección	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Material	Compost 50 kg	kg	45	6.990	314.550
Herramientas	Pala redonda con punta huevo	unid	1	11.990	11.990
	Horqueta curva 5 dientes	unid	1	15.490	15.490
	Set 3 herramientas mango corto	set	1	5.490	5.490
Personal	Maestro 1º	día	2	30.000	60.000
	Leyes Sociales	%	0,17	60.000	10.200
EPP*	Zapatos de seguridad	par	1	45.000	45.000
	Guantes de seguridad	par	1	2.990	2.990
	Ropa de seguridad	unid	1	8.290	8.290
	Bloqueador solar	unid	1	3.868	3.868
	Lentes de seguridad	unid	1	4.990	4.990
	Casco de seguridad	unid	1	9.990	9.990
	Protector solar para casco	unid	1	2.090	2.090
Extras	Colación	unid	2	6.850	13.700
	Movilización	unid	4	1.800	7.200
	Flete	km	50	1.500	75.000
Total (\$)					590.838

* Elementos de protección personal

Estimación de costos para la implementación de hidrosiembra

Sección	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Materiales	Compost 50 kg	kg	45	6.990	314.550
	mallá (Raschel)sombra 60% cobertura 42m2	m2	1,3	18990	24.687
	Semillas	kg	56,44	2549	143.866
Herramientas	Pala redonda con punta huevo	unid	1	11.990	11.990
	Horqueta curva 5 dientes	unid	1	15.490	15.490
	Set 3 herramientas mango corto	set	1	5.490	5.490
Arriendo de maquinaria	Motor de 6 a 12 hp	dia	2	2.980	5.960
	Bomba centrífuga con mangueras reforzadas	dia	2	11.990	23.980
	Estanque móvil 500 a 1500 lt	dia	2	1.500	3.000
	agitador hidráulico	dia	2	2.490	4.980
Personal	Maestro 1º	día	2	30.000	60.000
	Leyes Sociales	%	0,17	60.000	10.200
EPP*	Zapatos de seguridad	par	1	45.000	45.000
	Guantes de seguridad	par	1	2.990	2.990
	Ropa de seguridad	unid	1	8.290	8.290
	Bloqueador solar	unid	1	3.868	3.868
	Lentes de seguridad	unid	1	4.990	4.990
	Casco de seguridad	unid	1	9.990	9.990
	Protector solar para casco	unid	1	2.090	2.090
Extras	Colación	unid	2	6.850	13.700
	Movilización	unid	4	1.800	7.200
	Flete	km	50	1.500	75.000
Total (\$)					797.311

* Elementos de protección personal.

ANEXO 9: Piedras encontradas para utilizar en diques



Se observan clastos de aproximadamente 0,3 x 0,3 (m), en la ladera de orientación este de la parcela de estudio. Estos clastos fueron de utilidad para la confección de los



ANEXO 10: Perfiles de erosión en RUSLE2, después de implementación

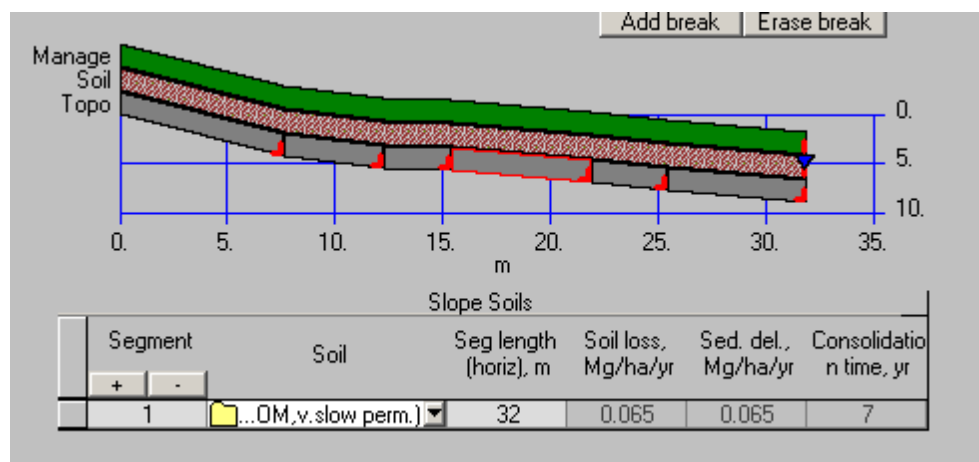


Figura 72. Cárcava N°1 en RUSLE2 después de implementación.

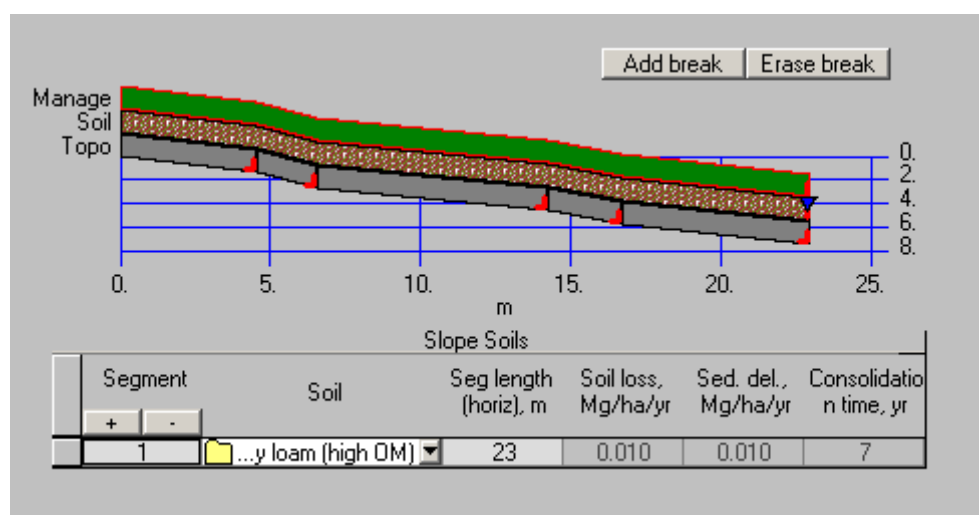


Figura 73. Cárcava N°2 en RUSLE2 después de implementación.

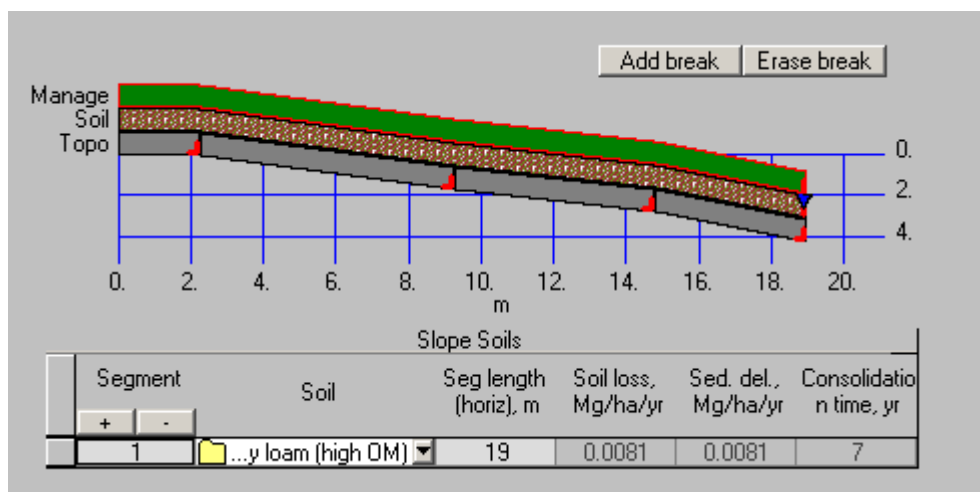


Figura 74. Cárcava N°3 en RUSLE2 después de implementación.

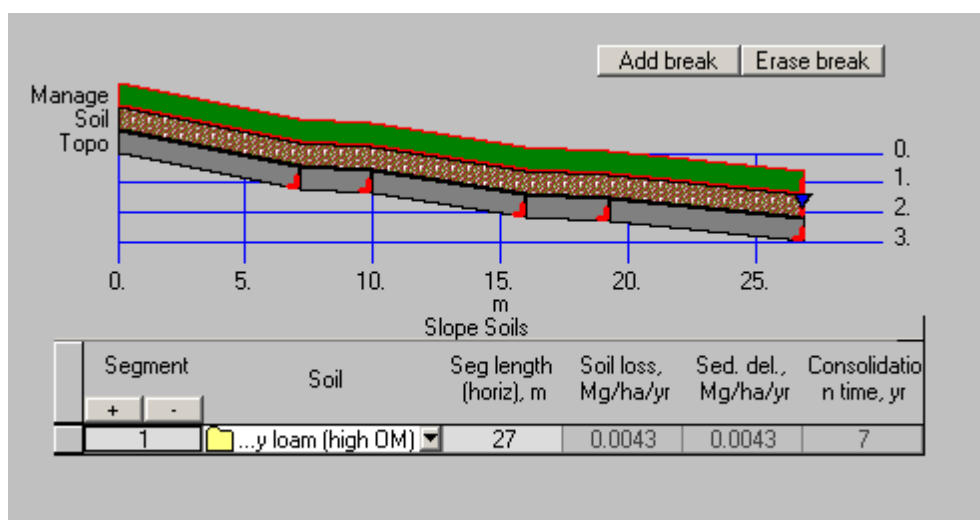


Figura 75. Cárcava N°4 en RUSLE2 después de implementación.

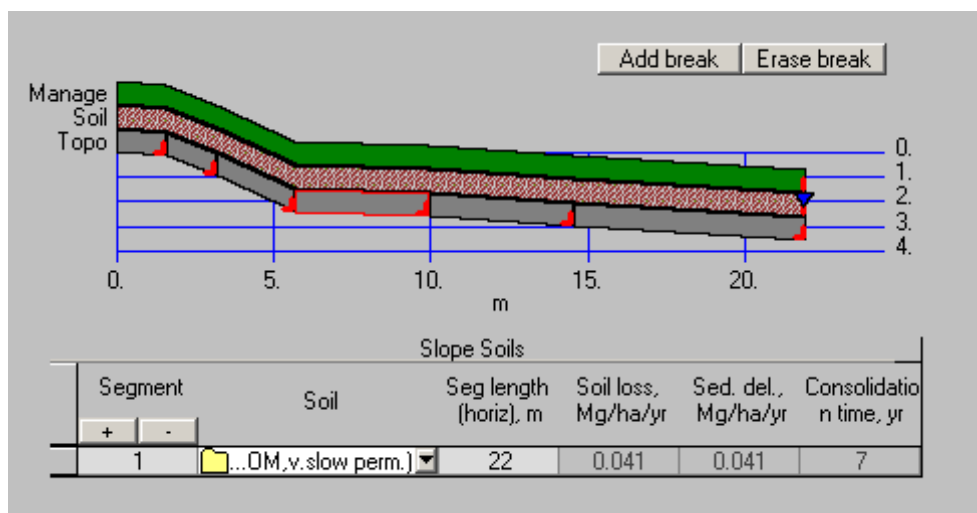


Figura 76. Cárcava N°5.1 en RUSLE2 después de implementación.

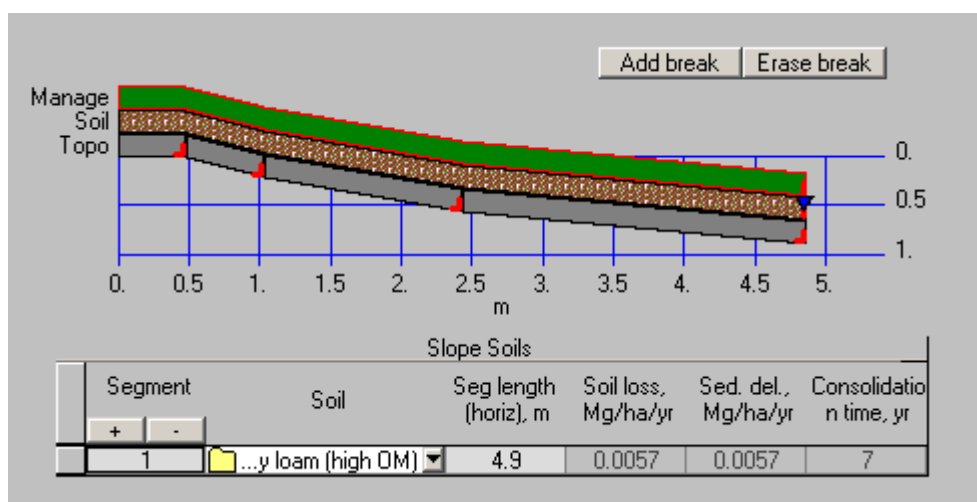


Figura 77. Cárcava N°5.2 en RUSLE2 después de implementación.

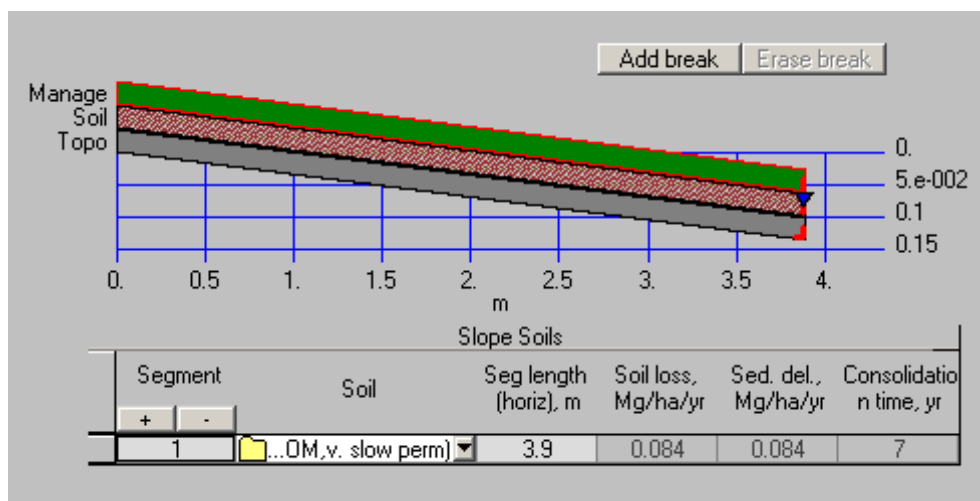


Figura 78. Laminar N°1 en RUSLE2 después de implementación.

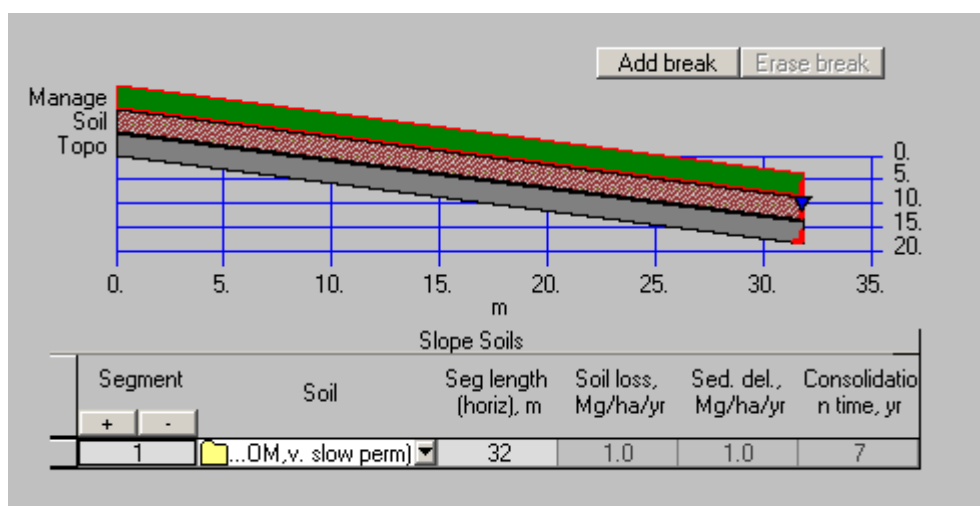


Figura 79. Laminar N°2 en RUSLE2 después de implementación.

ANEXO 11: Herramienta clip software Arcgis

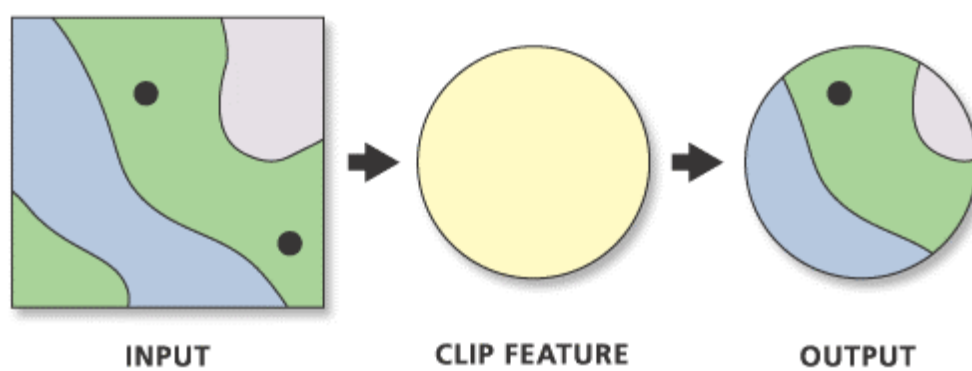


Figura 80. Herramienta Clip

Fuente: www.resources.esri.com

ANEXO 12: Normativa con posible aplicabilidad en actividades

Ley 19.300/1994 Bases Generales del Medio Ambiente, Ministerio del Medio Ambiente.

- Artículo 39. La ley velará porque el uso del suelo se haga en forma racional, a fin de evitar su pérdida y degradación.
- Artículo 42. El organismo público encargado por la ley de regular el uso o aprovechamiento de los recursos naturales en un área determinada, exigirá, de acuerdo con la normativa vigente, la presentación y cumplimiento de planes de manejo de los mismos, a fin de asegurar su conservación. Estos incluirán, entre otras, las siguientes consideraciones ambientales: conservación de suelos

NCh 1333/1978 Requisitos de calidad del Agua para diferentes usos.

- En el Punto 6. Requisitos del agua para riego debe cumplir con los requisitos físico-químicos como: el pH, elementos químicos, Razón de absorción de sodio, Conductividad específica y sólidos disueltos totales y por último los requisitos bacteriológicos.

Ley 15020/1962. Reforma Agraria. Ministerio de Agricultura

- Artículo 55°- En los predios agrícolas ubicados en áreas erosionadas o en inminente riesgo de erosión, deberán aplicarse aquellas técnicas y programas de conservación que indique el Ministerio de Agricultura. Con tal objeto, el Presidente de la República, por decreto expedido a través del Ministerio de Agricultura, podrá crear en las áreas mencionadas, "distritos de conservación de suelos, bosques y aguas." El Banco del Estado de Chile, y demás instituciones de crédito y fomento en que el Estado tenga aportes de capital o representación, no podrán conceder créditos a las actividades agropecuarias en los distritos aludidos sin que el propietario se someta a las normas sobre conservación y mejoramiento de los recursos naturales que se señalen por el Ministerio de Agricultura.

ANEXO 13: Proyecciones

Las variables físicas de cada erosionado serán monitoreadas y registradas para la evaluación futura de las técnicas aplicadas. Considerando que el área de estudio se encuentra enmarcado dentro de un futuro “Centro de Actividades Medio Ambientales” se consideraran para efecto del seguimiento, personal capacitado para la medición de las variables físicas de las cuales se espera algún cambio dentro del proceso de restauración.

En tal caso la restauración se comprenderá dentro de cuatro etapas de las cuales este trabajo solo comprende la primera de ellas. Por consiguiente se entiende como fin último la condición en la cual el recurso suelo pueda sostener actividad productiva dentro del área restringida para este estudio. De esta manera las etapas que comprenden la restauración del suelo para este fin son las siguientes:

1. Estructura y restauración: comprende las etapas vistas en este trabajo, donde luego de un diagnóstico del lugar, se busca disminuir el grado de degradación del sitio. En casos similares al área de estudio abarcada, se buscaría remediar la contaminación por metales o de desechos de cualquier tipo y corregir la erosión física. En los casos en que la erosión sea de características distintas a las observadas en este caso se recomienda consulta con CONAF (1998).
2. Nutrición (coberturas vegetales): dependiendo de las condiciones del lugar, se procederá a preparar y nutrir el suelo. La degradación por pérdida de fertilidad del suelo puede deberse a muchos aspectos. Los más característicos son la falta de nutrientes y la acidificación del suelo. En este caso de estudio se vio como el compost puede agregar nutrientes al suelo degradado. Sin embargo en casos donde la acidez del suelo sea mayor al caso de Los Maitenes se recomienda primero el encalado del suelo como muestra Muenia *et al.* (2010).

3. Parcelación: se busca ordenar el territorio de manera de optimizar el espacio, distinguiendo entre los sectores que resulten más óptimos para el cultivo. En este caso, al ser con fines demostrativos se busca generar cultivos de manera que se vean favorecidos por la orientación de las laderas. Se tomara como ejemplo el Centro de Transferencia Tecnológica en Agricultura Orgánica de la Universidad de Valparaíso (CTT Orgánico). Cuando se trate de parcelas de cultivo se recomienda priorizar por conservar parte de la vegetación nativa e intercalar los cultivos. Esto garantiza la presencia de materia orgánica y los beneficios que esta otorga en el cuidado del suelo.
4. Cultivo: para el cultivo se espera generar diversos tipos de especies vegetales. Sin embargo esto dependerá de las especies que se acomoden a las características tanto climáticas como geográficas. Cabe recordar que la zona donde está ubicada el área de estudio se caracterizó en un pasado por el cultivo de hortalizas y legumbres.

ANEXO 14: Educación ambiental

En el desarrollo de este informe se consideraron diversos temas. Uno de ellos, que no logro alcanzar objetivos en este informe, fue la planificación de actividades enmarcadas en la difusión del suelo como un recurso. Se buscó poner énfasis en la enseñanza de ciencias a partir de experiencias Exsitu, bajo la tesis que este tipo de actividades abarca gran cantidad de objetivos académicos, genera interés en el estudio de ciencias y desarrolla habilidades científicas. A continuación se presenta una de ellas:

Se diseñó un módulo enmarcado en la educación de ciencias para 6° año de Educación Básica. De esta manera se identificó que durante la Unidad 1 en el eje “Ciencias de la Tierra y el Universo/ La Tierra y sus cambios”, se proponía dentro de sus objetivos de aprendizaje la enseñanza de la asignatura de Ciencias Naturales.

Las actividades para cada módulo serian organizadas en forma cronológica en una visita a terreno de 6 horas. De esta manera se comienza de lo general a lo particular, y de lo simple a lo complejo.

El primer módulo es una presentación del suelo como recurso, pasando de comprenderlo como tierra a un ente más complejo. Luego, en el segundo módulo, esta complejidad se demuestra mediante la interacción con el agua. Finalmente en el tercer módulo se invita a los alumnos a interactuar con el recurso, proporcionándoles elementos como semillas y compost.

En la Tabla 20, “OA 16-17, los alumnos deben levantar registro en el primer y segundo módulo. Para su diseño se ocuparon las definiciones de los distintos tipos de suelo cuando se considera su fracción textural (limo, arena y arcilla), agregando además para esta actividad la textura de rocas.

A continuación se presenta la Ficha donde se describe la actividad:

Recurso Suelo

Nivel: 6° Básico

N° de monitores por niño: 1/8

Asignatura: Ciencias Naturales

Eje: Ciencias de la Tierra y el Universo / La Tierra y sus cambios

Duración: 6 horas

Unidad: Unidad 1

Objetivo general: Conocer la importancia del Recurso Suelo como sustento de la vida a través de habilidades Básicas y Generales de Método Científico

Objetivos específicos:

1. Identificar características de diferentes tipos de suelo
2. Comparar las interacciones del recurso suelo con condiciones del medio ambiente, viento, temperatura , agua, etc...
3. Definir las características importantes del recurso suelo para la producción de especies vegetales

Habilidades Científicas Básicas:

1. Observación
2. Identificación
3. Comparar
4. Clasificación
5. Registro

Habilidades Científicas Generales:

1. Sistematización de los registros.

Habilidades Sociales. Fortalecer el trabajo en equipo, la socialización del conocimiento para afianzar la conciencia de grupo curso.

Tabla resumen de los módulos.

Objetivo	Actividades	Habilidad	Recursos	Evaluación
OEsp.-1 CN06 OA 16 Describir las características de las capas de la Tierra (atmósfera, litósfera e hidrósfera) que posibilitan el desarrollo de la vida y proveen recursos para el ser humano, y proponer medidas de protección de dichas capas.	- Inicio de actividad: -Presentación del medio y descripción de su importancia y las características que lo componen, así como parte de su taxonomía básica. - Desarrollo: -Observación del entorno. -Manipulación del suelo conociendo e interpretando sus características. -Levantamiento de Información y utilización de la tabla AO-16-17	- Observación - Identificación - Comparar - Registro	- Muestras de suelo arcilloso, limoso, arenoso y de rocas. - Alcohol gel o desinfectante a fin. - Lápices - Tabla AO-16-17	Utilizando la tabla OA-16-17 identificar entre las opciones disponibles el tamaño, la suavidad y la adhesividad del suelo.
OEsp.-2 CN06 OA 17 Investigar experimentalmente la formación del suelo, sus propiedades (como color, textura y capacidad de retención de agua) y la importancia de protegerlo de la contaminación, comunicando sus resultados. CN06 OA 18 Explicar las consecuencias de	- Introducción: -Incorporar a los conocimientos previos la convivencia del agua con el medio, incorporando términos como; escorrentía superficial, erosión hídrica, pendiente, etc. - Desarrollo: -Observación del comportamiento del suelo en interacción con agua en diversos tipos y estados de suelo. -Manipulación del suelo y levantamiento de Información y utilización de la tabla AO-16-17.	Observación Identificación Comparar Clasificación Registro	- Siete maseteros con diversos tipos de suelo en diversos estados de degradación. - Agua	Utilizando la tabla OA-16-17 identificar entre las opciones disponibles la saturación y la plasticidad del suelo. Posteriormente evaluar el total de cada una de las opciones identificando a qué tipo corresponde el suelo estudiado.

Objetivo	Actividades	Habilidad	Recursos	Evaluación
la erosión sobre la superficie de la Tierra, identificando los agentes que la provocan, como el viento, el agua y las actividades humanas.				
OEsp.-3 CN06 OA 03 Analizar los efectos de la actividad humana sobre las redes alimentarias.	- Introducción: Resaltar la importancia del suelo como sustento de vida, incorporando al medio biótico. - Desarrollo: Manipulación de compost y semillas - Cierre de actividad.		- Saco de compost - Semillas - Alcohol gel o desinfectante afín.	

Tabla OA-16-17.

Conociendo mi Suelo					
F: OA-16-17		Tipos de suelo			
	Variables	Arcilla	Limo	Arena	Roca
M1	Tamaño				
	Suavidad				
	Adhesividad				
M2	Saturación				
	Plasticidad				
	Total				

Definiciones

Tamaño: Dimensión del grano mediante observación directa.

Suavidad: Sensación en las manos ante la manipulación del recurso.

Adhesividad: Cantidad de sedimento en después de ser manipulado.

Saturación: Comportamiento horizontal del agua en el suelo.

Plasticidad: Sensación al intentar moldear el recurso húmedo.

Guía para determinar manualmente la clase textural de los suelos
(Casanova, M. *et al*, 2004)

