



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Geografía

**ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS. CASO DE ESTUDIO: ÁREA DE
REHABILITACIÓN DEL FUNDO PELÁN, COMUNA TIL TIL, REGIÓN
METROPOLITANA DE SANTIAGO**

(Memoria para optar a reválida del Título de Geógrafo)

Riguey Ysabel Valladares Salinas

Profesor guía: María Victoria Soto

SANTIAGO, CHILE

ENERO 2024

DEDICATORIA

*A quienes se esfuerzan por comprender la complejidad de los procesos en la naturaleza
para conservarla y revertir la degradación de las tierras con la gestión e implementación
de soluciones integrales sostenibles.*

*Rigüey Ysabel Valladares Salinas
Santiago de Chile, 27 de noviembre 2023*

AGRADECIMIENTOS

A Dios Padre Todopoderoso, mi fuente inagotable de luz, fortaleza y guía espiritual en cada paso de mi camino.

A mis padres, por haberme brindado una educación sólida, inculcado valores y formado el carácter que me ha permitido alcanzar mis metas.

A mi compañero de vida y colega, Wilmer Lozada, profesor y coordinador del Laboratorio de Suelos del Instituto de Conservación de Recursos Naturales (IGCRN) de la Universidad de Los Andes, por su apoyo constante y sabios consejos a lo largo de este proceso.

A mis hijas, Estefanía y Albani Nava Valladares, y a mi nieta Novalé, quienes han sido mi mayor fuente de inspiración y motivación para avanzar en cada uno de mis proyectos.

A mi hijo político, José Ángel León Briceño, y a toda mi familia, por su presencia constante y su respaldo durante este camino.

A Mauricio Lemus, Gerente General de Biocys, mentor y amigo, por su guía y por haberme orientado en la restauración de ecosistemas degradados.

A Don Julio Plaza de los Reyes, Nicolás Calderón, Vanesa González, Liliana Tapia, Marvin Araujo y Sol Tejada, por el acompañamiento, el apoyo técnico y profesional brindado para mi inserción y desarrollo en Chile.

A la Escuela de Geografía de la Universidad de Chile, y en especial a la Prof. María Victoria Soto, por su minuciosa revisión y los valiosos aportes que enriquecieron esta investigación.

A Ximena Lamas, Jefe de Ambiente del Proyecto Fotovoltaico Santiago Solar, y a los equipos de trabajo de las empresas que colaboraron en las discusiones y aportes que han sido clave para los temas abordados en esta investigación.

A Samuel Francke y Carlos Ravanal, de la Corporación Nacional Forestal, por los conocimientos compartidos y los materiales proporcionados para el desarrollo de este trabajo.

A los profesores y colegas que han sido parte de mi formación, especialmente a Fernando Delgado, Profesor del Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial y del Postgrado en Ordenación del Territorio y Ambiente adscrito al IGCRN de la Universidad de Los Andes, por haberme impartido los fundamentos esenciales en el estudio de la erosión de suelos y su control.

Rigüey Ysabel Valladares Salinas

RESUMEN

La erosión constituye un problema ambiental que ha causado la degradación progresiva de los suelos en Chile, debido a los efectos de la sequía, el sobrepastoreo, los cambios de uso de la tierra y la sobreexplotación del recurso, entre otros factores. Para atender este problema, el Estado chileno exige la ejecución de medidas preventivas, correctivas o mitigantes para el control de erosión que son establecidas a través de compromisos ambientales acordados o exigidos en los estudios de impacto ambiental, los planes de cumplimiento ambiental, entre otros instrumentos de gestión.

Con el propósito de monitorear y medir cuantitativamente la efectividad de estas medidas en una zona destinada a la compensación ambiental, se estimó la erosión mediante la aplicación de Ecuación Universal de la Pérdida de Suelos (WISCHMEIER & SMITH, 1978) previo y posterior a la reforestación y construcción de las obras de conservación de suelos para los años 2017 y 2022, en un área de rehabilitación de ecosistemas ubicada en el Fundo Pelán, Comuna Til Til, Región Metropolitana de Santiago.

Los resultados obtenidos indican una disminución significativa de la pérdida de suelos respecto a la situación inicial. En el Escenario I (2017), la pérdida de suelos estimada varía entre 0 a 200 t.ha⁻¹.año⁻¹; las áreas con menores pérdidas (0 – 5 t.ha⁻¹.año⁻¹) representaban el 35,69% de la superficie total mientras que las superficies con pérdidas mayores a 5 t.ha⁻¹.año⁻¹ representaron el 64,3% de ésta.

Mientras que en el Escenario II (2022), la pérdida de suelos estimada varía entre 0 a 25 t.ha⁻¹.año⁻¹; las áreas con menores pérdidas (0 – 5 t.ha⁻¹.año⁻¹) representaban el 97,34% de la superficie total mientras que las superficies con pérdidas mayores a 5 t.ha⁻¹.año⁻¹ representaron el 2,66% de ésta.

INDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1. PRESENTACIÓN	10
1.1 Introducción	10
1.2 Planteamiento del problema	10
1.3 Hipótesis	12
1.4 Objetivos	12
1.4.1 Objetivo General	12
1.4.2 Objetivos Específicos	12
1.5 Área de estudio	13
1.5.1 Geología	13
1.5.2 Geomorfología.....	15
1.5.3 Suelos	18
1.5.4 Hidrografía.....	23
1.5.5 Climatología.....	23
1.5.6 Vegetación.....	25
1.5.7 Medio humano.....	25
1.5.8 Acciones de restauración de ecosistemas implementadas en el Fundo Pelán .	27
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO.....	32
2.1 Estado del arte	32
2.1.1 Degradación del suelo.....	32
2.1.2 Procesos de degradación de los suelos	32
2.1.3 Fases en el proceso de erosión hídrica	34
2.1.4 Tipos de erosión.....	34
2.1.5 Factores que afectan la erosión hídrica.....	35
2.1.6 Pérdida de suelos	37
2.2 Estudios previos relacionados con la Pérdida de Suelos	39
2.4 Marco legal e institucional.....	41
CAPITULO 3. MARCO METODOLÓGICO	44
3.1 Fase I. Revisión bibliográfica y cartográfica	44
3.2. Fase II. Descripción físico natural y socioeconómica del área de estudio	44

3.3 Fase III. Resultados.....	45
3.3.1 Estimación de la pérdida de suelos.....	45
3.3.1.1 Factor R.....	47
3.3.1.2 Factor K.....	48
3.3.1.3 Factor LS.....	49
3.3.1.4 Factor C.....	49
3.3.1.5 Factor P.....	51
3.3.2 Variación de los factores de la ecuación y la pérdida de suelos de ambos escenarios en el fundo.....	52
3.3.3 Características relevantes de la pérdida de suelos para los Escenarios I y II ...	52
CAPITULO 4. RESULTADOS.....	53
4.1 Estimación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos	53
4.1.1 Factor R.....	53
4.1.2 Factor K.....	55
4.1.3 Factor LS.....	55
4.1.4 Factor C.....	62
4.1.5 Factor P.....	65
4.1.6 Pérdida de suelos (A).....	65
4.2 Variación de los factores de la ecuación y la pérdida de suelos de ambos escenarios en el fundo.	72
4.2.1 Relaciones entre Pérdida de Suelos y el Factor LS.....	72
4.2.2 Relaciones entre Pérdida de Suelos y la Pendiente.....	73
4.2.3 Relaciones entre Pérdida de Suelos y el Factor C.....	74
4.2.4 Relaciones entre Pérdida de Suelos y el Factor P.....	75
4.3 Características relevantes de la pérdida de suelos para los Escenarios I y II	77
4.3.1 Escenario I.....	77
4.3.1.1 Pérdidas de suelos 0 – 5 t.ha ⁻¹ ·año ⁻¹ :.....	77
4.3.1.2 Pérdidas de suelos 5 – 10 t.ha ⁻¹ ·año ⁻¹	77
4.3.1.3 Pérdidas de suelos 10 – 25 t.ha ⁻¹ ·año ⁻¹	77
4.3.1.4 Pérdidas de suelos 25 – 50 t.ha ⁻¹ ·año ⁻¹	77
4.3.1.5 Pérdidas de suelos 50 – 100 t.ha ⁻¹ ·año ⁻¹	78
4.3.1.6 Pérdidas de suelos 100 – 200 t.ha ⁻¹ ·año ⁻¹	78
4.3.2 Escenario II.....	81
4.3.2.1 Pérdidas de suelos 0 – 5 t.ha ⁻¹ ·año ⁻¹	81

4.3.2.2 Pérdidas de suelos 5 – 10 t.ha ⁻¹ ·año ⁻¹	81
4.3.2.3 Pérdidas de suelos 10 – 25 t.ha ⁻¹ ·año ⁻¹	81
CAPITULO 5. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
5.1 Discusión de resultados	83
5.2 Conclusiones	94
5.3 Recomendaciones	95
BIBLIOGRAFÍA	96

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Superficie (ha) afectada por erosión en las comunas de la Provincia Chacabuco de la Región Metropolitana de Santiago	19
Tabla 2. Características físicas del suelo del área de rehabilitación del Fundo Pelán	20
Tabla 3. Población de la comuna de Til Til, Región Metropolitana y Nacional	27
Tabla 4. Marco regulador relacionados con la conservación, protección, restauración y rehabilitación de ecosistemas en Chile	41
Tabla 5. Fuentes de información documental y cartográfica	45
Tabla 6. Factor K de erodabilidad del suelo según la textura	48
Tabla 7. Factor C para praderas permanentes, terrenos baldíos y bosques pastoreados	50
Tabla 8. Valoraciones del Factor C en el área de rehabilitación del Fundo Pelán	50
Tabla 9. Factor P para Prácticas de Conservación	51
Tabla 10. Valoraciones del Factor P en el área de rehabilitación del Fundo Pelán	51
Tabla 11. Pérdida de suelos	52
Tabla 12. Factor K en el área de estudio	55
Tabla 13. Factor LS para los Escenarios I y II	55
Tabla 14. Distribución de rangos de pendientes en el área de rehabilitación del Fundo Pelán, por escenarios.	59
Tabla 15. Estadígrafos de la pendiente promedio y sus diferencias para los Escenarios I y II.	59
Tabla 16. Factor C para los Escenarios I y II	62
Tabla 17. Factor P para los Escenario I y II	65
Tabla 18. Pérdida de suelos mediante la implementación de la Ecuación USLE para los Escenarios I y II.	66
Tabla 19. Comparación entre la Pérdida de suelos y el Factor LS para el Escenario I	72
Tabla 20. Comparación entre la Pérdida de suelos y el Factor LS para el Escenario II	72
Tabla 21. Comparación de las diferencias del Factor LS para los Escenarios I y II por pérdida de suelos	73
Tabla 22. Comparación entre la Pérdida de suelos y la Pendiente para el Escenario I	73
Tabla 23. Comparación entre la Pérdida de suelos y la Pendiente para el Escenario II ...	74
Tabla 24. Comparación de las diferencias de la Pendiente para los Escenarios I y II por pérdida de suelos	74
Tabla 25. Comparación entre la Pérdida de suelos y el Factor C para el Escenario I	74

Tabla 26. Comparación entre la Pérdida de suelos y el Factor C para el Escenario II	75
Tabla 27. Comparación de las diferencias del Factor C para los Escenarios I y II por pérdida de suelos	75
Tabla 28. Comparación entre la Pérdida de suelos y el Factor P para el Escenario I.....	76
Tabla 29. Comparación entre la Pérdida de suelos y el Factor P para el Escenario II.....	76
Tabla 30. Comparación de las diferencias del Factor P para el Escenario I y II por pérdida de suelos	76
Tabla 31. Resumen de las características predominantes por categoría de pérdida de suelos para el Escenario I.....	79
Tabla 32. Resumen de las características predominantes por categoría de pérdida de suelos para el Escenario II.....	82
Tabla 33. Criterios para evaluar la erosión hídrica	87
Tabla 34. Pérdidas de suelos estimadas con el Modelo USLE para cada ladera, según tratamiento.....	90

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de área de rehabilitación del Fundo Pelán, Comuna Til Til, Región Metropolitana de Santiago.	14
Figura 2. Contexto geológico del área de rehabilitación del Fundo Pelán, Comuna Til Til, Región Metropolitana de Santiago	16
Figura 3. Contexto geomorfológico del área de rehabilitación del Fundo Pelán, Comuna Til Til, Región Metropolitana de Santiago	17
Figura 4. Capacidad de uso del área de rehabilitación del Fundo Pelán, Comuna Til Til, Región Metropolitana de Santiago	21
Figura 5. Riesgo de erosión potencial del área de rehabilitación del Fundo Pelán, Comuna Til Til, Región Metropolitana de Santiago	22
Figura 6. Ubicación geográfica de la subsubcuenca del Estero Chacabuco, entre Estero Margarita y Estero Til Til.....	24
Figura 7. Catastro vegetacional.....	26
Figura 8. Microterrazas forestales en el área de rehabilitación del fundo Pelán.....	29
Figura 9. Configuración geométrica de los negarim	30
Figura 10. Microcuencas negarim en el área de rehabilitación del Fundo Pelán.....	30
Figura 11. Bordos semicirculares de tierra en el área de rehabilitación del Fundo Pelán .	31
Figura 12. Tipos de modelos de evaluación de erosión hídrica.....	38
Figura 13. Estructura metodológica para el estudio de la Pérdida de Suelos en el área de rehabilitación de ecosistemas del Fundo Pelán	44
Figura 14. Modelo metodológico para estimar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE).....	47
Figura 15. Factor R estimado para las regiones Atacama, Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana.....	53
Figura 16. Factor R estimado para el área de rehabilitación del Fundo Pelán	54
Figura 17. Factor K del área de rehabilitación del Fundo Pelán.....	56
Figura 18. Factor LS del área de rehabilitación del Fundo Pelán (Escenario I)	57
Figura 19. Factor LS del área de rehabilitación del Fundo Pelán (Escenario II)	58
Figura 20. Pendiente en área de rehabilitación del Fundo Pelán (Escenario I).	60

Figura 21. Pendiente en área de rehabilitación del Fundo Pelán (Escenario II).	61
Figura 22. Factor C en área de rehabilitación del Fundo Pelán (Escenario I).....	63
Figura 23. Factor C en área de rehabilitación del Fundo Pelán (Escenario II).....	64
Figura 24. Factor P en área de rehabilitación del Fundo Pelán (Escenario II).....	67
Figura 25. Factores que influyeron en la Estimación de la pérdida de suelos mediante la Ecuación USLE, Escenario I (2017).....	68
Figura 26. Estimación de la pérdida de suelos mediante la Ecuación USLE, Escenario I (2017).....	69
Figura 27. Factores que influyeron en la Estimación de la pérdida de suelos mediante la Ecuación USLE, Escenario II (2022).....	70
Figura 28. Estimación de la pérdida de suelos mediante la Ecuación USLE, Escenario II (2022).....	71
Figura 29. Anomalía pluviométrica - Chile Central.....	84
Figura 30. Perfil ilustrativo de Pérdida de suelos.....	88
Figura 31. Graduación (termómetro) del problema erosivo atendiendo a su magnitud	89

CAPITULO 1. PRESENTACIÓN

1.1 Introducción

La erosión es uno de los problemas ambientales que está afectando a la biodiversidad y los servicios ecosistémicos de los espacios naturales, trayendo como consecuencia la desertificación de las tierras.

Los cambios de uso de la tierra producidos por el incremento de las actividades agrícolas, el desarrollo industrial, las plantaciones forestales, la expansión de los centros poblados, la deforestación, los incendios forestales y la degradación de las tierras han ido generando una alteración y disminución de la superficie ocupada por las coberturas vegetacionales, generando una desprotección del recurso suelo que ha producido el incremento de la erosión, manifestándose en el arrastre de sedimentos, pérdida de nutrientes y por ende, la disminución paulatina en la productividad de las tierras.

Existen distintas metodologías para estimar los volúmenes de pérdida de suelos, en este caso, el objetivo central de la investigación está orientada en aplicar la Ecuación de la Pérdida Universal de Suelos (USLE) (WISCHMEIER & SMITH, 1978) con y sin reforestación y obras de conservación de suelos y aguas, implementadas en un área especial del Fundo Pelán, localizado en la Comuna Til Til, Región Metropolitana de Santiago.

Para cumplir con este propósito, en primer lugar, se realizó una revisión documental para compilar los antecedentes tanto teóricos y metodológicos que sustentan el método de la USLE. Seguidamente se calcularon los factores que inciden en la ecuación, tales como el Factor R para conocer la erosividad de las lluvias, el Factor C para analizar las coberturas existentes en el suelo, el Factor K vinculado a la erodabilidad del suelo, el Factor LS estrictamente relacionado con la longitud de la pendiente y la topografía que condiciona la movilización del agua y los sedimentos y el Factor P relacionado con una valoración de las prácticas conservacionistas implementadas en el Fundo Pelán. Finalmente, se comparan ambas situaciones para relacionar variables y estimar los efectos estadísticamente significativos con respecto a la situación inicial.

1.2 Planteamiento del problema

El escenario de variabilidad y cambio climático que afecta al planeta ha traído consigo distorsiones en el régimen de precipitaciones y temperatura que ha tenido efectos importantes en el ciclo hidrológico, que se manifiestan en la disminución de la precipitación anual, la disminución del número de eventos de lluvia y el aumento de la concentración de las precipitaciones que han traído consigo el incremento de las crecidas, inundaciones y erosión con mayor arrastre de sedimentos, aumento de la evapotranspiración que ha conllevado a un incremento de aridez, entre otros aspectos (IPCC,2007; IPCC, 2022; FAO, 2013).

Estos problemas también inciden en la disponibilidad del recurso hídrico, situación que se agrava más de lo habitual en las zonas áridas y semiáridas, limitando sus posibilidades de desarrollo al ocasionar pérdida de cosechas, daños a los ecosistemas u otras actividades asociadas al progreso económico.

Las actividades humanas han tenido repercusiones ambientales que se manifiestan en los cambios de uso de grandes superficies de suelos de alta capacidad agrícola o cubiertos por remanentes de vegetación nativa.

La expansión física de las ciudades, las actividades mineras, el desarrollo industrial y otra serie de usos de la tierra, han tenido repercusiones ambientales que se manifiestan en los cambios de uso de grandes superficies de suelos de alta capacidad agrícola o cubiertos por remanentes de vegetación nativa, humedales y lechos de ríos y quebradas que al ser urbanizadas han perturbado severamente los flujos naturales de energía, materia, la movilidad y las dinámicas de las cuencas hidrográficas que la circunscriben. En consecuencia, se originado una pérdida de servicios ambientales aunado al apareamiento de islas de calor, humedad y ventilación al interior y en el borde de las ciudades, una creciente contaminación de las aguas, aire y suelos, una degradación de los recursos naturales (ROMERO *et al.*, 2006).

Los problemas de erosión, el sobrepastoreo y los incendios forestales han generado una pérdida de la productividad de las tierras. Algunos ecosistemas tienen una baja resiliencia para regenerarse de manera espontánea al perder nutrientes, fertilidad y baja capacidad de infiltración que permita la restauración y/o rehabilitación del mismo (ALANIS *et al.*, 2019; MORALES *et al.*, 2016).

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. En la década de 2010, CIREN estableció que los sectores con mayores problemas de erosión lo lideran actualmente las regiones de Coquimbo, con el 84% de sus suelos erosionados; Valparaíso, con 57%, y O'Higgins con el 52% de sus suelos (CIREN, 2010).

Generalmente, las áreas deforestadas para proyectos de desarrollo son compensadas con forestaciones; pocas experiencias involucran la implementación de obras de conservación de suelos para controlar la erosión y cosechar aguas de lluvia, y casi en ningún caso se monitorea en el tiempo para verificar los efectos de éstas medidas sobre el ecosistema.

Tradicionalmente, la medición de la erosión se ha realizado mediante métodos descriptivos más no analíticos que entreguen información confiable para orientar las políticas ambientales BENEDETTI Y PIZARRO (2006) En: PIZARRO *et al.*, (2009)

La legislación actual obliga a que se compensen la superficie total de los bosques nativos que son cortados y las principales especies arbóreas que lo componen. Sin embargo, la

recuperación de las especies asociadas (biodiversidad) para replicar la masa de bosque pérdida no suele suceder en el corto ni a mediano plazo debido a distintas razones, entre ellas es que la calidad de los suelos de las áreas involucradas ha estado sometido a procesos de degradación rumbo a la desertificación de las tierras. Por lo tanto, han perdido su capacidad productiva para regenerarse fácilmente.

En el año 2017, la empresa de energía fotovoltaica Santiago Solar a través de la Consultora Ambiental Soluciones Ambientales Estratégicas SPA Biocys, inició la rehabilitación ambiental de 147 hectáreas (ha) en el Fundo Pelán mediante la reforestación de especies nativas, construcción de obras de conservación de suelos y agua, acompañado de un monitoreo continuo a través de distintas estrategias. Ambas empresas promueven el desarrollo de investigación aplicada para generar una metodología y la publicación de resultados que contribuyan al conocimiento orientado a revertir la desertificación en tierras áridas y semiáridas de Chile como mecanismo de adaptación al cambio climático.

Bajo esta perspectiva, se plantea como pregunta de investigación la siguiente:

¿Cuál es la pérdida de suelos estimada en el área de rehabilitación del Fundo Pelán antes y después de la reforestación e implementación de obras de conservación de suelos y aguas?

1.3 Hipótesis

Las acciones de rehabilitación de ecosistemas implementadas mediante la reforestación y construcción de obras de conservación de suelos y aguas para favorecer la biodiversidad, incrementar el número de ejemplares arbóreos por hectárea, el control de erosión y la cosecha de aguas de lluvias generan cambios que reducen pérdidas de suelos, estimadas mediante la Ecuación de Pérdida de Suelos (USLE) WISCHMEIER & SMITH (1978).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

1.4.1.1 Estimar la pérdida de suelos en un área de rehabilitación de ecosistemas para el periodo 2017-2022. Caso de estudio: Fundo Pelán, Comuna Til Til, Región Metropolitana de Santiago.

1.4.2 Objetivos Específicos

1.4.2.1 Estimar los factores que influyen en la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelos previo y posterior a la construcción de las obras de conservación de suelos.

1.4.2.2 Comparar la variación de los factores de la ecuación y la pérdida de suelos de ambos escenarios en el área de estudio.

1.5 Área de estudio

El área de estudio abarca una superficie de 145,64 ha localizadas en el Fundo Pelán, Comuna Til Til de la Región Metropolitana de Santiago. Se ubica aledaño a la carretera Ruta 5 Norte, a 20 km al Este de la ciudad de Til Til (Fig. 1). Forma parte de la subcuenca Maipo Bajo perteneciente a la Cuenca del Río Maipo en los relieves transicionales de lomas y colinas de la Depresión Central ubicada entre la Cordillera de Los Andes y la Cordillera de la Costa MUNICIPALIDAD DE TIL TIL (2008). Presenta una variación altitudinal entre 600 msnm a 700 msnm. Predominan exposiciones suroeste, noroeste, oeste y este (Fig. 2) con pendientes entre el 15% al 45%. Forma parte del área de compensación ambiental de la resolución de calificación ambiental 310/216 del 13 de junio de 2016 del Proyecto Fotovoltaico Santiago Solar, ubicado en el Fundo Los Aromos en la Ruta 5 Norte de la misma comuna.

1.5.1 Geología

En el contexto regional, se observa la presencia de depósitos y acumulaciones aluviales, intrusiones hipabisales y granodioritas, así como formaciones geológicas de secuencias piroclástica y volcánicas sedimentarias. En el área en estudio específicamente, se presenta sobre Depósitos coluviales (Qc), Intrusivos hipabisales (Mh y OIMh) y la Formación Las Chilcas (Killc). Las estructuras más frecuentes consisten en sistemas de fallas subverticales locales de dirección NNE-SSW, NNW-SSE, N-S y E-W que presentan pequeños desplazamientos en el rumbo.

A continuación, en la Fig. 2 se presentan las características de las unidades geológicas descritas en la Hoja Geológica de Til Til a escala 1:100.000, según GANA *et al.* (1999).

ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS. CASO DE ESTUDIO: ÁREA DE REHABILITACIÓN DEL FUNDO PELÁN, COMUNA TIL TIL, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

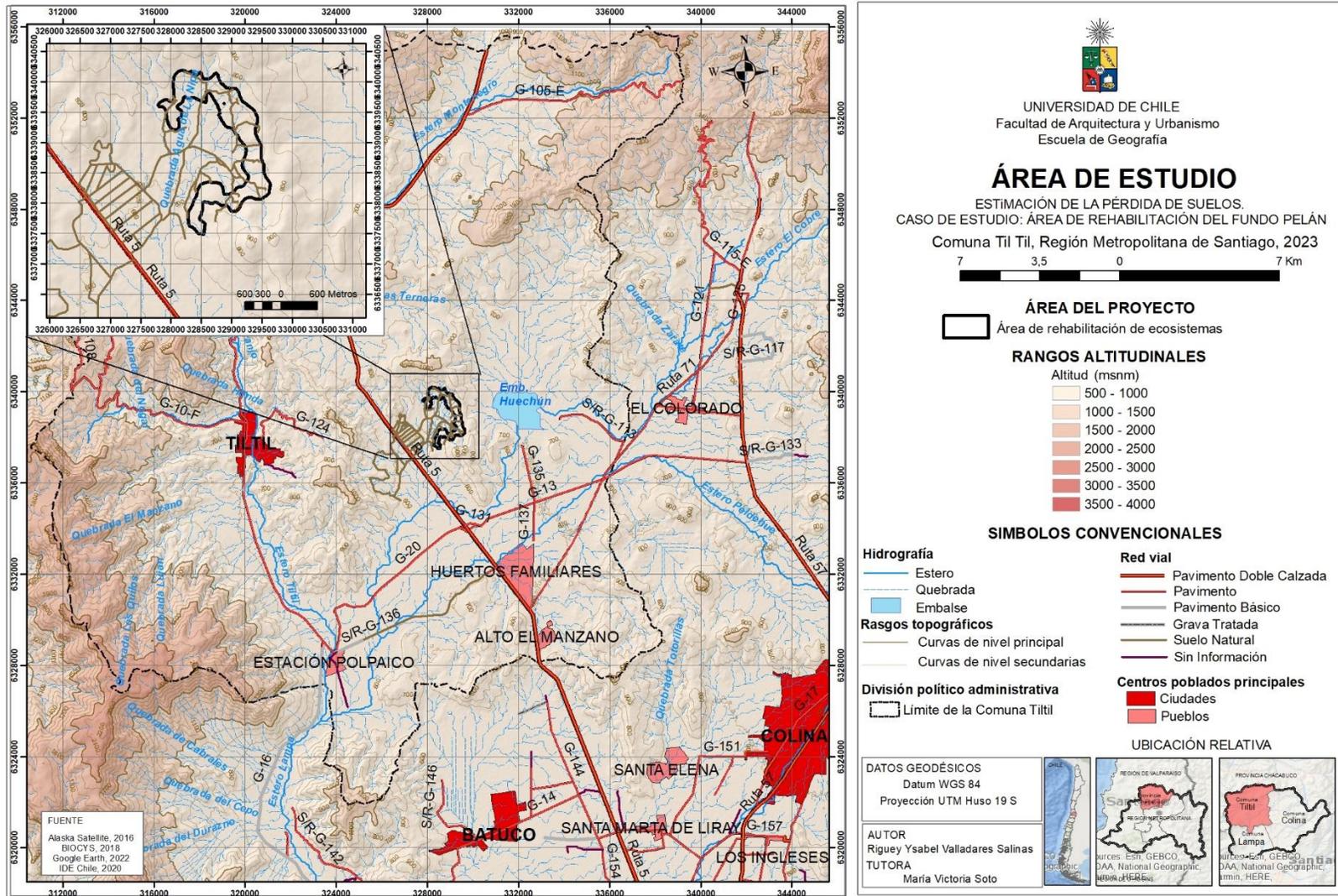


Figura 1. Localización de área de rehabilitación del Fundo Pelán, Comuna Til Til, Región Metropolitana de Santiago.

Depósitos coluviales. Qc. (*Pleistoceno Superior-Holoceno*). Corresponde a sedimentos no consolidados, localizados en las faldas y al pie de los cerros, a la salida de quebradas y en pequeños valles intermontanos. Generalmente, están formados por clastos y bloques mal seleccionados. Conforman mantos adosados a los cerros con pendientes de 4° a 10° con estratificación paralela a las laderas.

MIOCENO

Intrusivos hipabisales andesíticos y dacíticos. Mh. (20-19 Ma). Están compuestos por stocks y diques andesíticos y dacíticos de anfíbola (52-72% SiO₂) de hasta 4 km² de superficie, que intruyen a la Formación Lo Vallen en cerro Las Tórtolas y en varias localidades. Son rocas leucocráticas, porfídicas, con fenocristales de plagioclasa (An₃₈₋₄₆), hornblenda y, en menor proporción, piroxeno parcial o totalmente transformado en anfíbola, que están inmersos en una masa fundamental compuesta por plagioclasa, cuarzo y escasa magnetita.

EOCENO-MIOCENO INFERIOR

Intrusivos hipabisales (OIMh) (34-19 Ma). Están constituidos por stocks, filones manto, cuellos volcánicos y diques, cuya composición varía desde gabros a andesitas de piroxeno, forman cuerpos de tamaño inferior a 8 km². Dentro de este grupo se incluyen gabros y dioritas, basaltos y andesitas basálticas, dioritas y dioritas cuarcíferas y andesitas.

Cretácico medio

Formación Las Chilcas (Aptiano? - Albiano). Secuencia volcánica y sedimentaria, de aproximadamente 3.000 metros de espesor, que aflora en la zona oriental de la cordillera de la Costa, desde donde se extiende hacia el este hasta el portezuelo El Manzano y el área del embalse Huechún. Se dispone en aparente concordancia sobre la Formación Veta Negra y subyace en discordancia de erosión a la Formación Lo Valle. Está intruida por granitoides. Se destaca la existencia de una secuencia sedimentaria calcárea que se exhibe entre los cerros Alto de La Peña y Cabras de Til Til.

1.5.2 Geomorfología

La morfogénesis de la subsubcuenca de Chacabuco está vinculada a la dinámica de la cuenca tectónica de Santiago que ha dado origen a la depresión intermedia entre la Cordillera de Los Andes y la Costa, de acuerdo a MUNICIPALIDAD DE TIL TIL (2008).

El contexto regional del área se enmarca en sistemas de vertientes y acumulación que originan relieves monoclinales, conos, terrazas y glacis definidos por ARAYA-VERGARA, (1985) y SOTO *et al.* (2007). Específicamente, el área de rehabilitación, según SOTO *et al.* (2007) corresponde a un sistema de vertientes conformados por monoclinales en substrato detrítico-volcánico y con formas asociadas a la arroyada, sean los glacis (Fig. 3).

Los relieves monoclinales están asociados a vertientes de influencia estructural en media y baja montaña de borde consecuente (conformes) y obsecuente (inversas o discordantes).

ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS. CASO DE ESTUDIO: ÁREA DE REHABILITACIÓN DEL FUNDO PELÁN, COMUNA TIL TIL, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

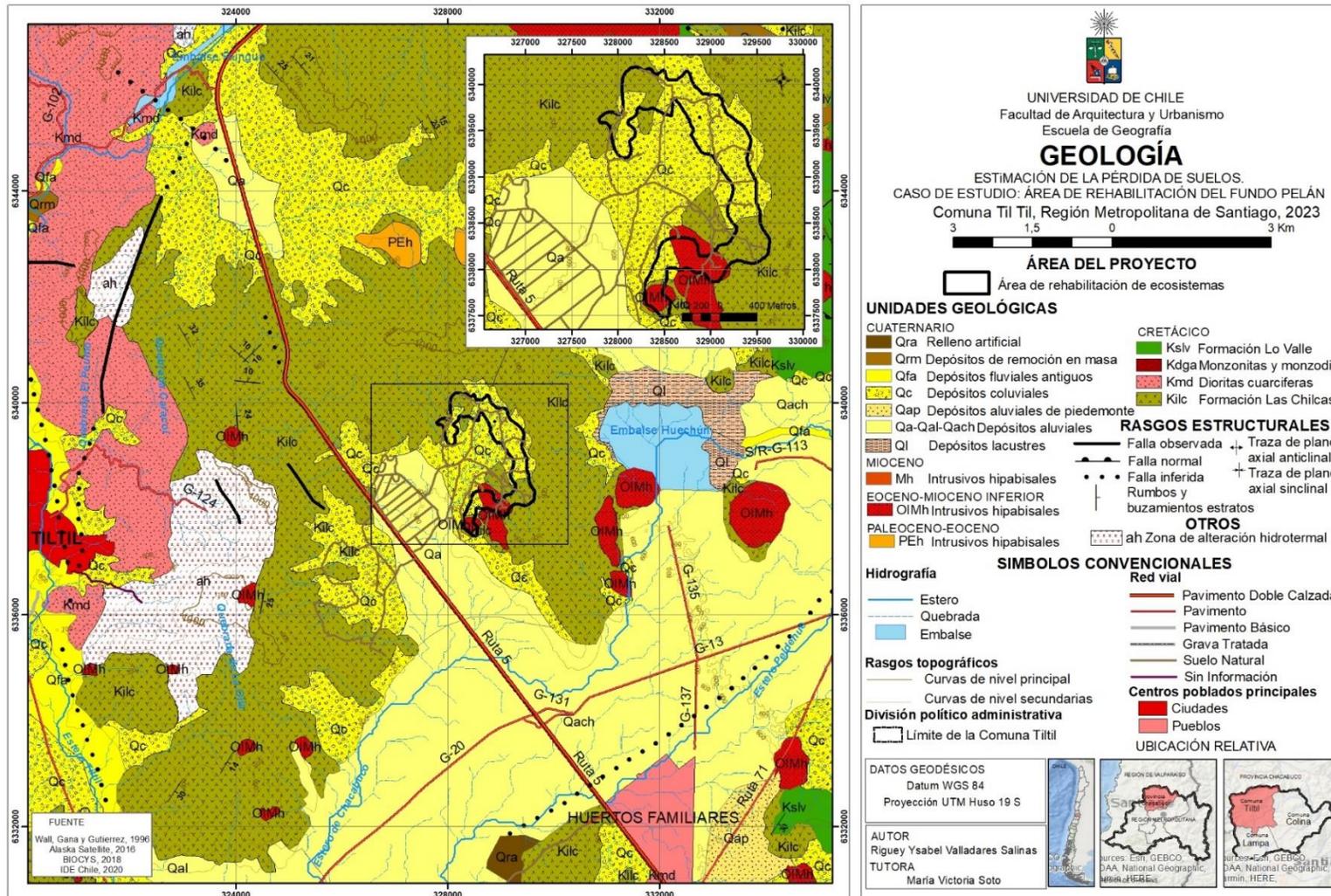


Figura 2. Contexto geológico del área de rehabilitación del Fundo Pelán, Comuna Til Til, Región Metropolitana de Santiago
 Fuente: GANA *et al.*, (1999)

ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS. CASO DE ESTUDIO: ÁREA DE REHABILITACIÓN DEL FUNDO PELÁN, COMUNA TIL TIL, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

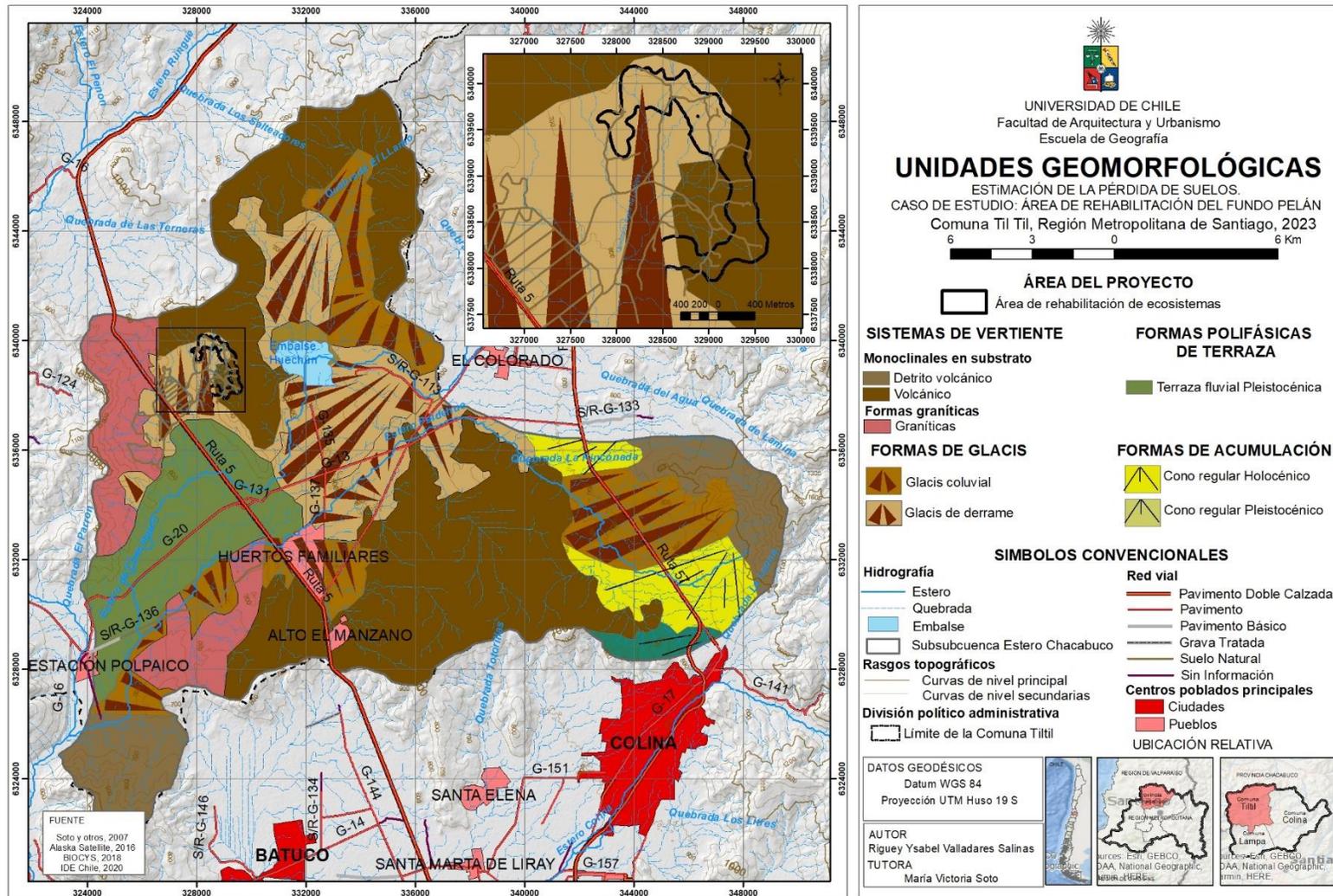


Figura 3. Contexto geomorfológico del área de rehabilitación del Fundo Pelán, Comuna Til Til, Región Metropolitana de Santiago
Fuente: SOTO *et al.*, (2007)

Se distinguen formas graníticas, meteorización profunda con la presencia de superficies residuales derivada de los efectos de la tectónica

Los glacis de derrame son depósitos que se forman a partir de sedimentos finos provenientes desde los conos aluviales (ARAYA-VERGARA, 1985).

En relación a los peligros de remociones en masa e inundaciones, el área de rehabilitación se encuentra un área de bajo peligrosidad a ser afectado por remociones en masa tipo flujo de detritos, así como de crecidas fluviales. Las zonas de baja pendiente corresponden a terrenos permeables y con buen drenaje, en los que las aguas de lluvias escurren o se infiltran sin ocasionar inundaciones mayores (SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA, 2003)

1.5.3 Suelos

A grandes rasgos, la comuna Til Til presenta como principales órdenes de suelos los Alfisoles y los Entisoles. Los Alfisoles son suelos que se desarrollan en regiones desérticas, áridas y semiáridas, lo que genera que el perfil del suelo se presente seco en gran parte del año debido al déficit de humedad permanente o semipermanente. Algunos de éstos suelos poseen exceso de sales y/o sodio que constituyen una limitante para el progreso de los cultivos. Los Entisoles son suelos muy jóvenes con escasa acumulación de material orgánica, provenientes de depósitos aluviales recientes o muy delgados sobre roca en pendientes fuertes, por ende, carecen de horizontes bien desarrollados debido a que el material parental del que se origina es resistente a la meteorización (MUNICIPALIDAD DE TIL TIL, 2008; CIREN, 2015)

En la subsubcuenca Chacabuco en los cerros y lomas prevalecen suelos capacidad VII y VIII, con pocas aptitudes agrícolas. En los valles del área del estero de Til Til, se encuentran suelos áridos de potencial agrícola III y IV, y en menor medida suelos de clase I y II asociados al estero de Chacabuco, Peldehue, Huechún, Huertos Familiares y Polpaico. (MUNICIPALIDAD DE TIL TIL, 2019?) destaca evidencias de procesos de desertificación.

Específicamente en el área de rehabilitación se distingue capacidad de uso Clase VI y Clase VIII (Fig.4), que de acuerdo al CIREN (2010); presentan las siguientes características:

Los terrenos Clase VI están caracterizados por suelos inadecuados para los cultivos y su uso está limitado a pastos y forestales. Generalmente, sus limitaciones se deben a las pendientes pronunciadas, presentan áreas susceptibles a severa erosión, pedregosidad excesiva, zona radicular poco profunda que limita el desarrollo de las plantas, excesiva humedad o anegamientos, clima severo, baja retención de humedad y alto contenido de sales o sodio.

En la Clase VIII predominan suelos sin valor agrícola, ganadero o forestal. Su uso preferencial está limitado a la vida silvestre, recreación o protección de hoyas hidrográficas.

El 44% de la superficie de la Región Metropolitana presenta algún grado de erosión. En el 63% de la superficie de la comuna Til Til se presentan signos de erosión; de ésta el 35% corresponde a severa y muy severa (Tabla 1). De acuerdo al CIREN (2010), el área de rehabilitación presenta un riesgo potencial de erosión moderado y bajo (S/C) (Fig. 5).

Tabla 1. Superficie (ha) afectada por erosión en las comunas de la Provincia Chacabuco de la Región Metropolitana de Santiago

Región/Provincia / Comuna	Sin erosión	Erosión/Superficie (ha)					Otras categorías	Suelos erosionados	Total
		Ligera	Moderada	Severa	Muy severa	No aparente			
Metropolitana	354.241	93.359	189.453	213.450	186.785	68.015	435.293	683.047	1.540.596
Chacabuco	66.292	11.575	36.542	49.248	28.476	4.660	10.853	125.841	207.646
Colina	24.425	3.163	14.878	26.491	20.064	978	7.097	64.596	97.096
Lampa	23.163	4.726	6.604	5.320	3.058	1.273	872	19.708	45.016
Til Til	18.704	3.685	15.060	17.437	5.353	2.409	2.883	41.535	65.531

Fuente: CIREN (2010)

En líneas generales, CIREN (2015) describe las categorías de erosión de la siguiente manera:

La erosión baja, se caracteriza por presentar cambios de color de la superficie del suelo (erosión ligera de manto). Se observa la presencia de algunos canaliculos o estrías y diferencias en el desarrollo de las plantas que forman la cobertura vegetal. Presentan pedregosidad superficial y ocasionalmente algunos pedestales de erosión con una incipiente depositación de materiales eólicos. Algunas veces se presentan deslizamientos de suelos que se evidencian por incipientes escalones o peldaños y desarrollo de grietas. La cubierta vegetal ocupa más de un 70% de la superficie.

La erosión moderada, presenta signos claros de erosión de manto y de surcos. Se pueden observar cambios de color de la superficie del suelo que evidencia la exposición de horizontes inferiores. Se pueden observar pedestales de erosión y pavimento de erosión visibles. En los sectores con cubierta vegetal pobre se observan algunos pavimentos pedregosos. La superficie del terreno se presenta quebrada, debido al desarrollo de peldaños por los deslizamientos de suelos. Las grietas tienen varios centímetros de ancho y presentan una profundidad equivalente a varias veces su ancho. Los flujos de masas afectan entre un 10 y 25% de la superficie del área. La cubierta vegetal ocupa entre un 30 y 70% de la superficie.

La erosión severa presenta procesos activos de erosión de manto, surcos y cárcavas, inclusive deslizamientos con desniveles de hasta 20 cm con grietas de 10 cm ancho y profundidad mayor a 80 cm. Además, los flujos de masas afectan entre un 25 y 40% de la superficie del área involucrada. Eventualmente es posible identificar el horizonte superficial del suelo. El subsuelo es visible en gran parte y la vegetación está seriamente afectada, ocupando menos del 30% de la superficie afectada.

La erosión muy severa denota sitios con presencia de cárcavas profundas. La capa de suelo ha sido removida casi completamente o sólo pueden observarse algunos parches de éste. Generalmente se presenta a la vista el subsuelo y en muchas áreas el material parental. Es frecuente observar deslizamientos de suelos, coronas de deslizamiento en forma de escarpes consecutivos junto con un intrincado diseño de grietas de diversa magnitud. Los flujos de masas afectan a más de un 40% de la superficie.

En relación a los suelos presentes en el área de rehabilitación, son poco profundos e inexistentes, en algunos sitios se presentan grietas de desecación que evidencian la existencia de un tipo de arcilla expansiva que puede estar ocasionando erosión subsuperficial en algunos sectores. Es un predio que ha sido dedicado a la ganadería de ovinos, por lo tanto, sus suelos se encuentran compactados por sobrepastoreo. De acuerdo a un análisis de 24 muestras de laboratorio las texturas de los suelos presentes son arcillosas, franco arcillosa y franco con densidad aparente varía entre 1,2 a 1,5 g/cm³ reflejando alta compactación. Así mismo, la humedad aprovechable varía entre 10,33% a 12,62% (Tabla 2).

Tabla 2. Características físicas del suelo del área de rehabilitación del Fundo Pelán

Textura	Densidad aparente g/cm³ promedio	Nivel de compactación	Humedad aprovechable %
Arcillosa	1,2	Alta	12,62
Franco arcillosa	1,33	Alta	10,33
Franco	1,51	Alta	10,8

Fuente: BIOCYS (2018)

ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS. CASO DE ESTUDIO: ÁREA DE REHABILITACIÓN DEL FUNDO PELÁN, COMUNA TIL TIL, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

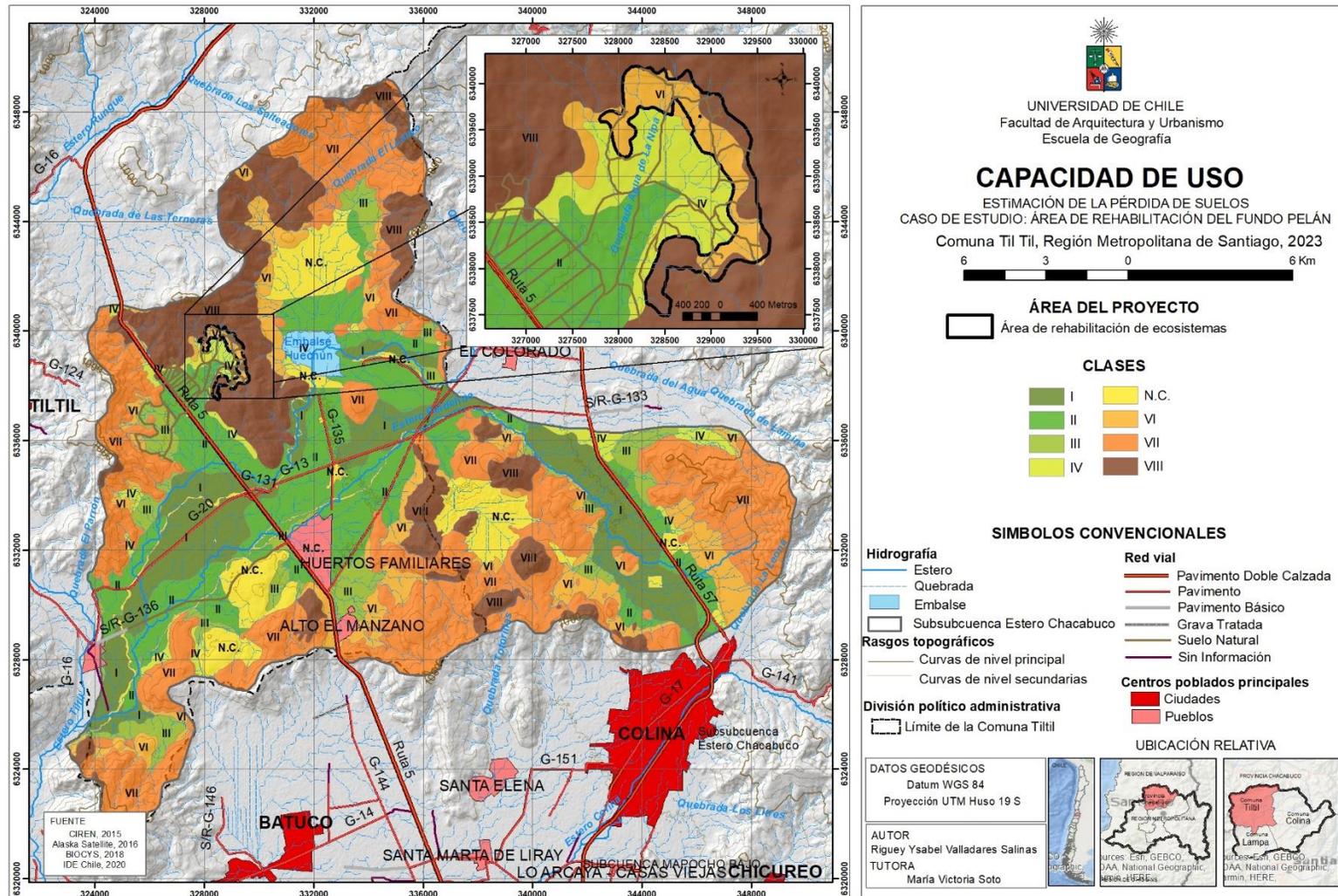


Figura 4. Capacidad de uso del área de rehabilitación del Fundo Pelán, Comuna Til Til, Región Metropolitana de Santiago. Fuente: CIREN (2015)

ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS. CASO DE ESTUDIO: ÁREA DE REHABILITACIÓN DEL FUNDO PELÁN, COMUNA TIL TIL, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

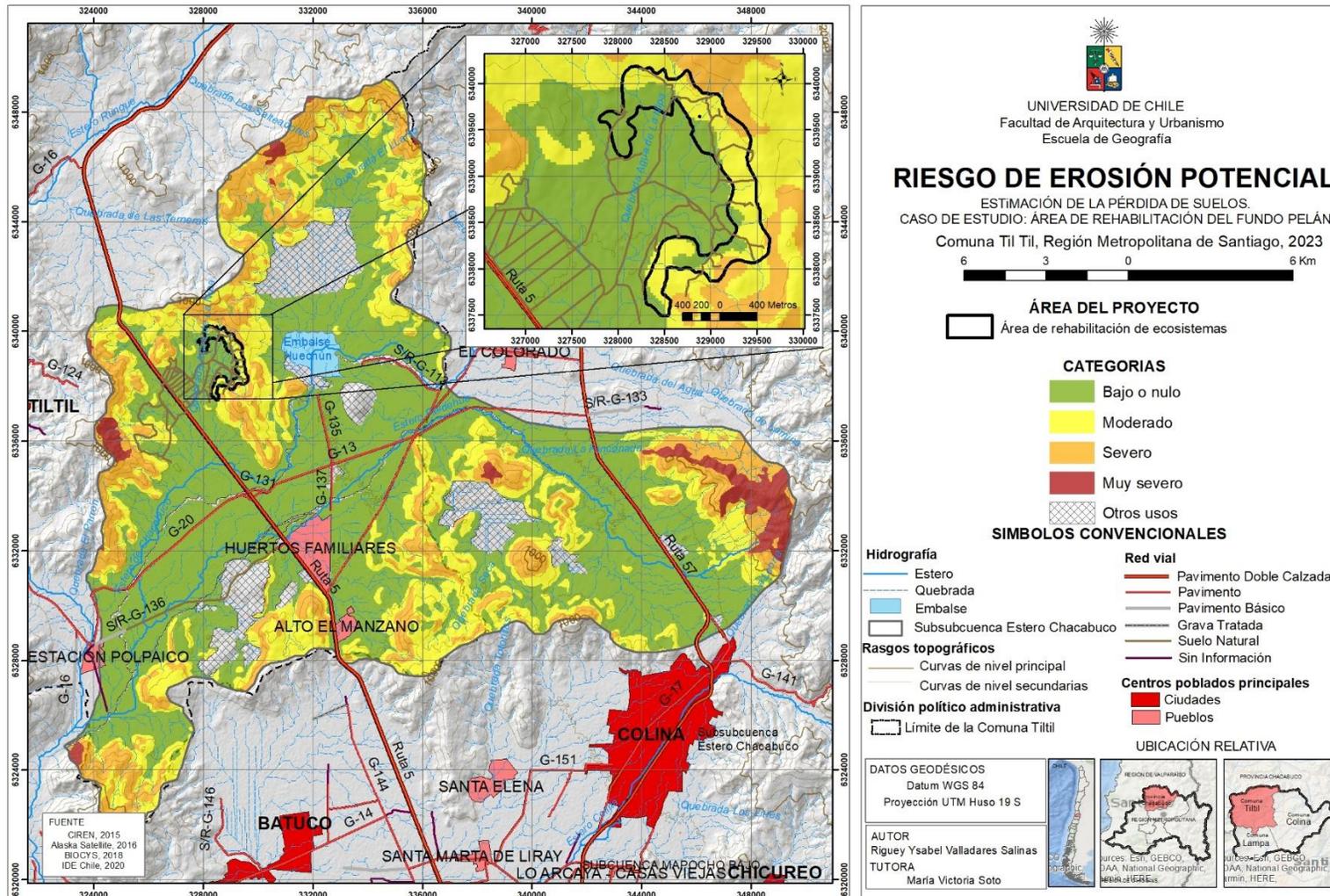


Figura 5. Riesgo de erosión potencial (SIC) del área de rehabilitación del Fondo Pelán, Comuna Til Til, Región Metropolitana de Santiago. Fuente: CIREN (2015)

1.5.4 Hidrografía

En relación a la ubicación hidrográfica, el área en estudio se localiza en la Cuenca del Río Maipo, Subcuenca Mapocho Bajo, Subsubcuenca Estero Chacabuco, entre Estero Margarita y Estero Til Til, de acuerdo a la subdivisión de subcuencas publicadas por el MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS (2014) en la Infraestructura de datos Espaciales y los criterios definidos por la SUBSECRETARÍA DE DESARROLLO REGIONAL Y ADMINISTRATIVO DEL GOBIERNO DE CHILE (2013).

La Subsubcuenca Estero Chacabuco, entre Estero Margarita y Estero Til Til, limita por el Noreste con la Subsubcuenca del Estero Quilapilún, por el Noroeste con la Subsubcuenca del Estero Til Til, por el Sureste con el Estero Colina y por el Suroeste con la Subsubcuenca del Estero Lampa (Fig. 6).

La zona norte de la cuenca presenta dos embalses: el embalse Rungue que regula las aguas del Estero Til Til y el embalse Huechún ubicado en el estero Chacabuco, cuya hoya hidrográfica es de una extensión de 390 km². Así mismo, se distingue en la zona sur de la cuenca se presenta una depresión natural del terreno de origen tectónico, denominada humedal de Batuco (RUGIERO, 2006).

Los principales cauces naturales superficiales que conforman la red hidrográfica de esta subsubcuenca son los esteros Chacabuco y Peldehue.

1.5.5 Climatología

La comuna Til Til se caracteriza por presentar un clima mediterráneo con una larga estación seca y lluvias concentradas en el periodo invernal. La temperatura media anual es de 14 °C, una temperatura media de 8,1°C para el mes más frío (julio) y de 22°C para el mes más caluroso (enero). Según la clasificación de Köppen, la comuna de Til Til se inscribe totalmente en el tipo climático Csb, Templado cálido con lluvias invernales (MUNICIPALIDAD DE TIL TIL, 2019?)

En cuanto a las precipitaciones, la cantidad total de agua que cae en un año normal alcanza los 280 mm.

Esta comuna presenta características semiáridas. En los últimos años se ha presentado con escasez de lluvias produciéndose una prolongada sequía que fue catalogada como un ciclo de megasequía. Este déficit hídrico aplica tanto a aguas superficiales como subterráneas y ha afectado la disponibilidad del recurso para el consumo humano y para el desarrollo de actividades agropecuarias de subsistencia.

ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS. CASO DE ESTUDIO: ÁREA DE REHABILITACIÓN DEL FUNDO PELÁN, COMUNA TIL TIL, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

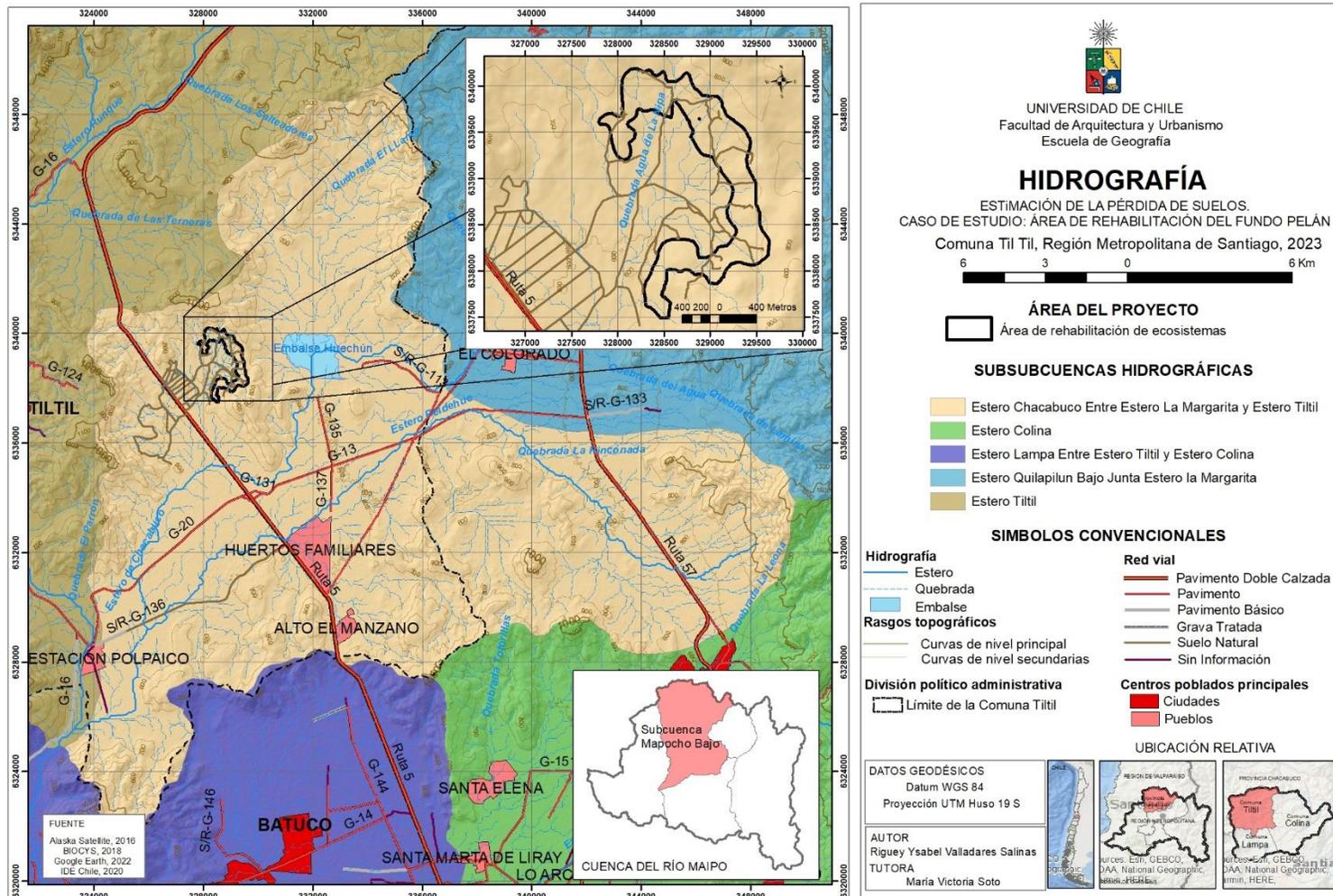


Figura 6. Ubicación geográfica de la subsubcuenca del Estero Chacabuco, entre Estero Margarita y Estero Til Til. Fuente: IDE, 2020

1.5.6 Vegetación

De acuerdo a LUEBERT & PLISCOFF (2017), la unidad de análisis se localiza en el piso vegetacional Bosque Espinoso Mediterráneo Interior de *Acacia caven* y *Prosopis chilensis*. Este ecosistema se distribuye en sectores planos o de pendiente suave entre los 200 a 900 m. Estos espinales están asociados a una fase de degradación del bosque esclerófilo original debido a que se encuentran fuertemente intervenidas por la acción antrópica que amenaza con la desaparición de este ecosistema, lo que ha llevado a una pérdida de cobertura arbórea e incluso la transformación completa de la formación a una pradera. Así mismo, según GAJARDO (1983) el área se asienta sobre Formación Bosque Espinoso Abierto constituido por arbustos altos y árboles espinosos (Mimosaceae), con una estrata herbácea estacional densa con fisionomía de sabana.

Respecto al catastro vegetacional de CONAF (2019), el uso de suelo predominante corresponde a especies vegetacionales nativas asociadas a matorral de espinos, bosque esclerófilo. Especialmente predominan bosques espinosos abiertos y muy abiertos (Fig. 7).

1.5.7 Medio humano

El área de rehabilitación de ecosistemas de este estudio se encuentra a 20 km aproximadamente de la ciudad de Til Til y a 8 Km de Huertos Familiares.

Til Til es una comuna perteneciente a la provincia de Chacabuco de la Región Metropolitana de Santiago. La comuna de Til Til, tiene una superficie de 667 Km²; esto corresponde al 37,1% de la superficie provincial y un 4,2% de la superficie regional. Está ubicada en el punto más al norte del área metropolitana.

Entre los principales centros poblados de la comuna se encuentran Til Til, Polpaico, Montenegro, Rungue, Caleu, Santa Matilde, Huechún y Huertos Familiares. Además, figuran otras pequeñas localidades como Alto El Manzano, Huechún, La Cumbre y Plazuela de Polpaico.

De acuerdo al último Censo de Población y Vivienda del año 2017 del Instituto Nacional de Estadística (INE), la comuna tenía para el momento 19.302 habitantes con una variación intercensal de 15,3% para el periodo 2017-2023 (Tabla 3).

ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS. CASO DE ESTUDIO: ÁREA DE REHABILITACIÓN DEL FUNDO PELÁN, COMUNA TIL TIL, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

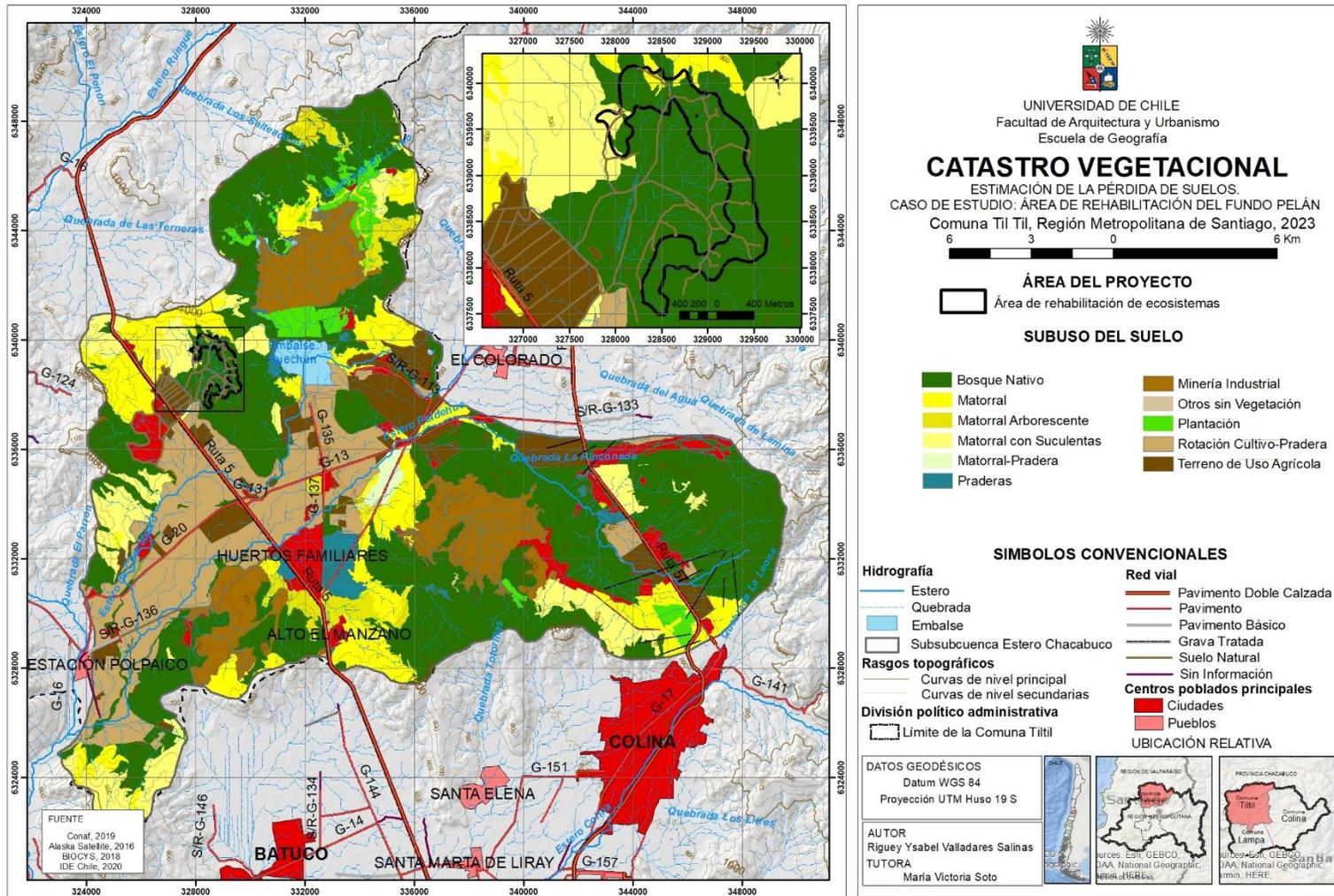


Figura 7. Catastro vegetacional. Fuente: CONAF, 2019 (Inédito)

Tabla 3. Población de la comuna de Til Til, Región Metropolitana y Nacional

Territorio	Censo 2017	Proyección 2023	Variación (%)
Comuna de Til Til	19.312	22.262	15,3
Región Metropolitana de Santiago	7.112.808	8.367.790	17,6
Chile	17.574.003	19.960.889	13,6

Fuente: INE, Censo de población y vivienda 2017. Proyecciones de Población 2023.

Las principales arterias viales que permiten conectividad de la comuna en la parte norte del Gran Santiago están estructuradas, principalmente por la autopista Los Libertadores y la ruta 5 Norte.

Además, la comuna cuenta con un segundo eje de acceso desde Santiago, por medio de un sistema que incluye el camino Lo Ehevers, camino Chicauma (Ruta G-16) y camino de la Cuesta de La Dormida. Esta última ruta, es una ruta alternativa para llegar a la región de Valparaíso desde Santiago. Por otra parte, Til Til está conectado con los principales núcleos urbanos de la provincia de Chacabuco, entre los que se destaca Colina y Lampa.

En la comuna de Til Til existen 19 establecimientos educacionales. La administración de los establecimientos se distribuye en 9 particulares subvencionados y 10 establecimientos municipales.

En cuanto a la oferta de equipamiento de salud, la comuna dispone de una red de Atención Primaria de Salud (APS) y el Hospital Comunitario de Til Til.

Las principales actividades económicas productivas en la comuna están inmersas en el sector industrial, el sector comercial y la actividad agropecuaria.

El sector industrial está representado por las actividades industrias del rubro manufacturero (metálico y no metálico) como CODELCO, POLPAICO, KDM, AGUAS ANDINAS, PROACER, ANGLOAMERICAN y AGRICOM.

El sector comercial está compuesto esencialmente por locatarios y tiendas de venta al detalle, los cuales buscan abastecer de enceres básicos a los habitantes de las distintas localidades que conforman la comuna.

La actividad agropecuaria está representada principalmente por el cultivo de frutas y, en menor escala, la producción artesanal de miel y queso de cabra. El territorio es reconocido por su agricultura (parronales, tunas, aceitunas, hortalizas y ganadería caprina y menor).

1.5.8 Acciones de rehabilitación de ecosistemas implementadas en el Fundo Pelán

El proyecto Fotovoltaico Santiago Solar en su ejecución involucró la intervención directa de 123,5 ha de Bosque Nativo de Preservación, dominado por *Acacia caven*, *Porlieria chilensis* y *Prosopis chilensis*. Por tratarse de un Bosque Nativo de Preservación, con fines de asegurar la continuidad de las especies en el sector y en base al Plan de Manejo de Preservación aprobado, se reforestaron 146,5 ha.

De acuerdo a los compromisos adquiridos mediante la Resolución Exenta N°310/2016 Resolución de Calificación Ambiental (en adelante RCA), literal 8.1.2: Flora y Vegetación, y al Plan de Manejo de Preservación presentado y su Resolución aprobatoria N°123/3 – 20/16 (en adelante PMP), la reforestación del Proyecto Santiago Solar fue iniciada con la implementación de un piloto el año 2017 y finalizada en diciembre del año 2019 en el Fundo Pelán. Durante los años 2019 y 2020 se han realizado actividades de replante durante la época invernal, seguido por distintas actividades silvícolas de mantención que se ejecutan hasta el presente.

El proyecto involucró la reforestación con 600 ejemplares por hectárea de las especies *Acacia caven* (300 ejemplares por hectárea), *Quillaja saponaria* (200 ejemplares por hectárea) y *Lithraea caustica* (100 individuos por hectárea) que corresponden a un total de 90.624 plantas aproximadamente. Las plantas están separadas unas de otras por 3 metros aproximadamente; dispuestas paralelas a las curvas de nivel y sobre obras de conservación de suelos y aguas construidas para la cosecha de aguas de lluvia y el control de erosión para retener nutrientes, humedad y reducir la pérdida de suelos. Adicionalmente, se incorporaron ejemplares en categoría de preservación como el *Prosopis chilensis* y el *Porlieria chilensis* en forma de núcleos.

Además, consideró un plan de monitoreo continuo de la vitalidad de las plantas, control de plagas, control de malezas, fertilización, mantención de cercos perimetrales de exclusión y cortafuegos. Así mismo, implementó técnicas para la rehabilitación del ecosistema basadas en el enfoque de la oasisificación forestal (MARTINEZ DE AZAGRA & LEMUS, 2005), la cual promueve el mejoramiento de las propiedades hidrológicas del suelo mediante la infiltración del agua, la cual permite la recuperación de la microbiota y es capaz así de dar el soporte para el desarrollo de las plantas como mecanismo para revertir la degradación edafológica, hidrológica y forestal.

En el área se construyeron más de 127.300 metros lineales *microterrazas forestales*, *negarim* y 2.800 *bordos semicirculares* de tierra.

Las *microterrazas forestales* son obras de regulación de flujo hídrico en laderas. Constituye un tratamiento apropiado en laderas de pendientes moderadas con erosión del tipo laminar y lineal incipiente. Favorece la infiltración en el suelo reduciendo la escorrentía superficial y la velocidad del flujo, además tienen la capacidad de retener sedimentos y nutrientes. (FRANCKE, 1998) (Fig. 8).



Figura 8. *Microterrazas* forestales en el área de rehabilitación del fundo Pelán

Los *Negarim* son estructuras de captación, cerradas en forma de V, donde la escorrentía es producida dentro de cada área de captación delimitada por los bordos. En cada vértice de una estructura de captación se inician dos estructuras más en V aguas abajo que se visualizan en forma de rombos. En cada área de captación cerrada se construye una perforación de infiltración de agua en el vértice más bajo. La escorrentía se desplaza por el canal de colecta y penetra en la perforación de infiltración, según FAO (2013) e INFOR (2011) (Fig. 9 y 10).

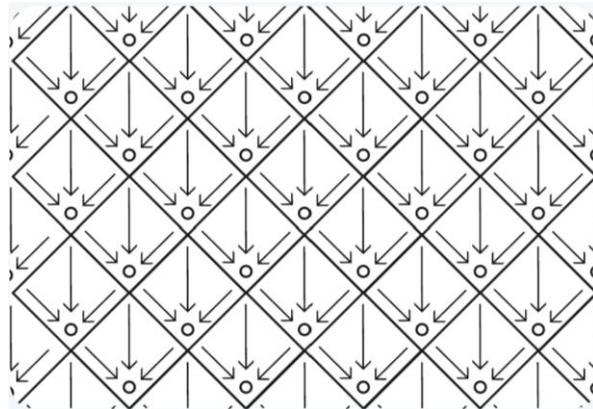


Figura 9. Configuración geométrica de los *negarim*. Fuente: (INFOR, 2011)



Figura 10. Microcuencas *negarim* en el área de rehabilitación del Fundo Pelán

Los *Bordos* semicirculares o en forma de medialuna corresponde a camellones o pequeños diques construidos en la forma de un semicírculo. El área en medialuna recorre la escorrentía que se desplaza entre una y otra medialuna y es retenida en los camellones para infiltrarse y almacenarse en el suelo (FAO, 2013). Estos surcos en medialuna son obras cuyo objetivo consiste en la captación de escorrentía superficial y sedimentos en laderas (INFOR, 2018) (Fig. 11).



Figura 11. *Bordos* semicirculares de tierra en el área de rehabilitación del Fundo Pelán

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Estado del arte

2.1.1 Degradación del suelo

El suelo es un cuerpo natural de vital importancia, entre otras cosas, la mayor parte de la producción alimentaria depende de ellos. Sin embargo, a pesar de lo mencionado, dada la actividad antrópica y a factores naturales, este recurso está siendo degradado a una escala sin precedentes.

La degradación del suelo según OLDEMAN *et al.*, (1991), es un proceso que describe los procesos inducidos por el hombre que disminuyen la capacidad del suelo para soportar la vida humana. En otras palabras, se refiere a la pérdida parcial o total de una o más funciones del suelo.

Estos procesos de degradación son fenómenos dinámicos los cuales generan en el suelo cambios que resultan en la disminución de su calidad. Autores como OLDEMAN & VAN LYNDEN (1998), señalan que la degradación se puede agrupar en dos grandes categorías.

En la primera, existen procesos relacionados con el desplazamiento de material del suelo por la acción del agua o viento que conlleva a la ocurrencia de pérdida de su masa o bien a la deforestación de la tierra, así como a la sedimentación.

El segundo grupo de procesos que determinan el deterioro *in situ* de las cualidades del suelo son fenómenos de naturaleza química (agotamiento de nutrientes, pérdida de materia orgánica, salinización, acidificación), física (sellado y encostramiento de la superficie del suelo, compactación anegamiento) y también biológica, conducente a un desbalance de la actividad biológica.

En síntesis, la degradación varía desde la pérdida de suelo, sus elementos nutritivos, pérdida de materia orgánica, a través de la erosión, hasta la acumulación de material y solutos como la salinización de este recurso (BOARDAMAN & FAVIS, 1998)

Con respecto a los factores que desencadenan estos procesos de degradación, RODRÍGUEZ (2010) señala que se han identificado de manera genérica los siguientes agentes: la deforestación, el sobrepastoreo, el manejo de los cultivos, la sobreexplotación de la vegetación y las actividades bioindustriales, estas últimas tienen una incidencia cualitativamente muy alta pero de extensión localizada.

2.1.2 Procesos de degradación de los suelos

Los procesos de degradación de suelos son fenómenos dinámicos y frecuentemente interactuantes que se manifiestan de diversas maneras. En términos generales de acuerdo con (FAO/PNUMA/UNESCO, 1980), se pueden agrupar en cinco categorías: erosión,

exceso de sales, degradación química, degradación física y degradación biológica, en este trabajo de investigación se hará énfasis solo en el primero.

Tal como se indicó anteriormente, el suelo una vez perdido es muy difícil de recuperarlo en una escala de tiempo humana. La formación del suelo a partir del intemperismo del material parental es un proceso muy lento, medible solamente a escala geológica, toma cientos a miles de años desarrollar un perfil del suelo arable; la pérdida de un cm de perfil, puede ocurrir en pocas horas de duración como consecuencia del efecto erosivo de una sola tormenta (GUEVARA, 2000), de allí que a nivel mundial la erosión del suelo es actualmente uno de los problemas más serios que afectan al planeta.

CIREN (2015) señala que la erosión es el movimiento de arrastre de las partículas del suelo por los agentes naturales: viento, agua, hielo, entre otros, indica los daños que se han producido o pueden producirse en el futuro. Al mismo tiempo indica los cambios que se han operado o se están operando en el suelo.

GRASSI (2002), indica que la erosión del suelo es un fenómeno complejo de degradación, por el cual los horizontes más superficiales son destrozados, desplazándose sus fragmentos hacia cotas inferiores. Es una especie de meteorización que no conduce a la formación de un suelo sino a su destrucción.

Etimológicamente la palabra erosión proviene del latín *erodere* que significa roer, desprender o desgarrar. GEMMA (2007), define la erosión como parte del proceso de denudación de la superficie terrestre que consiste en el arranque y transporte del material de suelo o roca por un agente natural.

El término denudación es usado por geomorfólogos para expresar la erosión como la producción de sedimentos por unidad de área. Desde el punto de vista geomorfológico, la tasa de denudación viene a ser la tasa de transporte de sólidos suspendidos y solutos disueltos medida a la salida de la cuenca y expresada como volumen de material removido por unidad de área en un período determinado, por ejemplo, m^3/km^2 -año (GUEVARA, 2000).

En su sentido más amplio, la erosión es un fenómeno ligado a la evolución fisiográfica de la corteza terrestre, que a través de su acción lenta y efectiva ha contribuido con esculpir el relieve terrestre. Se pueden distinguir dos clases de erosión: la geológica o natural y la acelerada o antrópica. La primera ya se mencionada, básicamente consiste en un desgaste natural de la superficie terrestre sin la intervención del hombre (LÓPEZ, 2000).

Por su parte, la erosión antrópica o acelerada es aquella inducida por la actuación del hombre que interfiere y rompe el equilibrio existente entre los suelos, la vegetación, el agua y el viento, lo cual da lugar a formaciones terrestres erosivas y otras condiciones anormales como cárcavas, suelos descubiertos por erosión laminar, derrumbes que afectan a carreteras, colmatación de lagos y reservorios y obstrucción de los cauces de ríos por sedimentos (CIDIAT, 1988).

Un concepto importante a reseñar es la sedimentación, ya que la masa de suelo removida de un lugar es frecuentemente depositada en otro cuando la energía del agente de transporte disminuye o desaparece.

2.1.3 Fases en el proceso de erosión hídrica

Ellison (1947), hace más de 50 años propuso una división del proceso de erosión hídrica en tres fases básicas: separación, transporte y sedimentación.

La separación consiste en el desprendimiento y disgregación de los agregados del suelo en partículas de tamaños transportables, se expresa en unidades de peso (Mg ha^{-1} , o bien g m^{-2}).

El transporte ocurre cuando las partículas y agregados separados del suelo, se mueven con el agua a través de la pendiente. Se expresa en unidades de peso por unidad de distancia (Mg km^{-1} o bien g m^{-1}).

Finalmente, la sedimentación tal como se indicó, consiste en el depósito de los materiales de suelo transportados que ocurre al disminuir la capacidad de transporte del flujo de agua. La acción es intermitente, pues el suelo depositado es puesto de nuevo en movimiento, al reiniciarse la actividad del agua.

2.1.4 Tipos de erosión

El agua y el viento son las fuerzas activas de la erosión y es de acuerdo al agente erosivo actuante que se distinguen dos formas generales de erosión: la hídrica y eólica.

En el área de estudio predomina la erosión hídrica. La erosión hídrica es un proceso en la cual el agente erosivo es el agua, principalmente la precipitación natural, pero también puede ser generada por la irrigación. Las gotas de lluvia al caer sobre terrenos de vegetación rala, desprenden el suelo no protegido y lo arrastran junto con las aguas de escorrentía siendo depositados los sedimentos en las tierras bajas donde las corrientes se debilitan.

En términos generales, FAO (2013) señala que el agua que se precipita en forma de lluvia puede tomar los siguientes caminos:

- Se queda almacenada temporalmente en la superficie vegetal y se evapora, retornando a la atmósfera sin tocar el suelo.
- Puede entrar en contacto con el suelo e infiltrarse a diferentes dentro del perfil.
- También puede alcanzar la superficie del suelo y escurrir. Generalmente el escurrimiento superficial se produce cuando la intensidad de la precipitación supera la velocidad de infiltración del suelo. En algunas ocasiones, esta escorrentía puede causar erosión hídrica.

La erosión hídrica que tienden a degradar uniformemente la superficie del suelo pueden clasificarse en erosión de impacto y erosión laminar y, los que concentran el desprendimiento de partículas de suelo en áreas específicas está representada por la

erosión en riles, erosión en cárcavas, erosión en canales y costas (GARCIA-CHEVESICH, 2009).

La erosión de impacto y la erosión laminar predominan en el área en estudio. La erosión de impacto ocurre cuando las partículas de suelo desnudo son golpeadas directamente por las gotas de lluvia, ocasionando ser desprendidas y arrojadas por los aires, transportándose varios centímetros de distancia desde donde originalmente se encontraban. El impacto de la gota compacta el suelo, disminuye las tasas de infiltración, incrementa la escorrentía superficial conllevando a generar procesos erosivos

La erosión laminar comprende el arrastre más o menos uniforme y poco perceptible de delgadas capas de suelo superficial de los terrenos, por acción del agua. Ocurre cuando el agua que cae es mayor que el agua que se infiltra, dando inicio al escurrimiento superficial.

La erosión en riles o también llamada erosión en surcos, es un tipo de erosión que ocurre pendiente abajo cuando el escurrimiento superficial comienza a canalizarse en pequeños canales de hasta 30 cm de profundidad perpendiculares a las curvas de nivel, reconduciendo el arrastre de partículas de suelo por el agua, siguiendo los pequeños surcos que aparecen sobre la superficie topográfica.

2.1.5 Factores que afectan la erosión hídrica

HUDSON (1981) plantea que el estudio de la erosión del suelo puede ser dividido de acuerdo a cómo ésta es afectada por diferentes tipos de lluvia y como varía bajo diferentes condiciones de suelo. La magnitud de la erosión dependerá entonces de la combinación del poder de la lluvia para causar erosión y de la habilidad del suelo para contrarrestar la acción de la lluvia. Así mismo, MORGAN (2005) y GARCIA-CHEVESICH (2009) indican que la erosión que ocurrirá en un suelo específico va a depender directamente de algunas variables como clima, vegetación, hojarasca, tipo de suelo, topografía, velocidad del flujo y el uso y manejo de la tierra.

Clima:

Los factores que determinan la erosividad del clima sobre el suelo, están dadas por la precipitación, la velocidad del viento, el balance hídrico, la escorrentía y la temperatura.

Dado que el agua es el agente activo del proceso de erosión, es la precipitación el componente climático de mayor importancia al respecto. Sin embargo, la temperatura, la energía solar y el viento cumplen funciones que deben ser consideradas.

En los climas templados, la temperatura es el factor que determina que la precipitación venga en forma de lluvia o nieve y también es la causa de que la nieve se derrita y produzca escorrentía a través de la cual puede manifestarse la erosión en suelos no protegidos. El área de estudio, solo recibe precipitaciones pluviales.

El viento afecta la erosión hídrica, principalmente a través de su influencia sobre el ángulo y velocidad de impacto de las gotas de lluvia, aunque también tiene influencia sobre la

evapotranspiración y en consecuencia sobre el contenido de humedad del suelo (LÓPEZ, 2000).

Sin embargo, la precipitación tiene papel preponderante en el proceso de erosión, dada por la intensidad, la duración y la frecuencia.

La intensidad de la precipitación está definida por la lámina de agua caída por unidad de tiempo. El tamaño de las gotas es muy variable durante una tormenta, las gotas de mayor diámetro tienen mayor masa y alcanzan mayores velocidades terminales y, por tanto, mayor energía cinética. La velocidad que adquieren las gotas dependen de la gravedad y de las fuerzas de roce con la atmósfera (RODRÍGUEZ, 2010).

La duración de las lluvias, conjuntamente con la intensidad, determina la carga cinética total de un evento.

Por otra parte, las tormentas continuas o más frecuentes consiguen un suelo con menor conductividad hidráulica debido a la humedad antecedente, disminuyendo la posibilidad de penetración del agua en el suelo para una intensidad de lluvia dada, aumentando el riesgo de escurrimiento superficial y el riesgo de erosión (LÓPEZ, 2000).

Es así que una lluvia, aun cuando sea prolongada, puede no causar daños mayores por erosión si su intensidad es baja. Lo mismo puede decirse de una lluvia intensa de extremadamente corta duración, que podría no causar mayores pérdidas de suelo, ya que no genera suficiente agua para producir escorrentía. Contrariamente cuando la intensidad y duración del evento pluvial son altos entonces ambos (escorrentía y erosión), se manifiestan como serios problemas lo cual es cierto en zonas sin cobertura vegetal (CIDIAT, 1988).

Suelo:

La erosionabilidad, es una propiedad específica de un suelo que puede ser evaluada cuantitativamente, como la vulnerabilidad de un suelo a la erosión en circunstancias muy precisas (OCHOA Y OVALLOS, 2006). Es una propiedad inherente a este cuerpo natural y es influida por sus características (textura, estructura, permeabilidad, contenido de materia orgánica, contenido de arcilla y de óxidos de Fe y Al).

La erosionabilidad del suelo viene dada por tres propiedades intrínsecas: su separabilidad, su transportabilidad y sus riesgos de escurrimiento (RODRÍGUEZ, 2010).

Topografía:

Existen varias características topográficas que ejercen una marcada influencia sobre la erosión. Entre ellas tenemos el gradiente, la longitud y la forma de la pendiente.

La inclinación de la pendiente influye en la velocidad del agua de escurrimiento, en la infiltración y en la cantidad de suelo desprendido de su sitio de origen y transportado a otro lugar (LÓPEZ, 2000).

La configuración de la pendiente (concavidad, convexidad) y el microrelieve son también de importante consideración. Su efecto está muy ligado a las otras características

topográficas mencionadas, muy particularmente con el grado de la pendiente. Las pendientes uniformes y las complejas arrojan valores intermedios de erosión, mientras que las pendientes de forma cóncava presentan valores más bajos de erosión y las convexas los valores más altos. Esto debido a que en la pendiente cóncava hay una disminución progresiva de la inclinación de la pendiente a lo largo de la ladera, mientras que, por el contrario, en una pendiente convexa la inclinación de la pendiente se incrementa paulatinamente. En el perfil cóncavo la erosión ocurre principalmente en el tercio superior de la ladera, mientras en el convexo entre la mitad y el tercio inferior (LÓPEZ, 2000).

Uso y manejo de la tierra:

Este factor que representa el factor de resistencia en el proceso de erosión, viene dado por la cobertura y las prácticas de manejo o soporte. Particularmente, la vegetación protege al suelo de diferentes maneras (BERGSMA *et al.*, 1996):

- La intercepción disminuye el volumen de precipitación que llega a la superficie del suelo.
- La intercepción disipa el poder erosivo de la precipitación.
- La vegetación rastrera y la hojarasca protegen al suelo contra las fuerzas del salpique y del flujo superficial.
- La descomposición de la hojarasca y restos vegetales incrementan el contenido de humus en el suelo, creando condiciones óptimas para la permeabilidad al agua e incrementa la estabilidad de los agregados.

La efectividad de la vegetación para controlar la erosión de impacto está estrechamente relacionada con la altura y continuidad de la copa de los árboles, así como la densidad de la cobertura superficial (pastos, hierbas y arbustos) (GARCIA-CHEVESICH, 2009).

Las prácticas de soporte se refieren a un conjunto de técnicas adicionales a las prácticas culturales, normalmente realizadas en el manejo de las tierras para cultivo. La mayoría de éstas afectan la erosión, reorientando la dirección de la escorrentía o reduciendo su capacidad de transporte. Entre estas se puede mencionar el cultivo en contorno, las terrazas y canales de desviación, las franjas de pasto, los cultivos en franjas y las barreras vivas o muertas.

2.1.6 Pérdida de suelos

Una de las formas de medir la erosión es a través de la pérdida de suelos. Predecir la erosión es una tarea compleja. Según RANZI *et al.*, (2012) la necesidad de predecir la erosión para generar acciones de prevención y corrección ha llevado al desarrollo de distintos modelos que responde de que se diferencian en términos de complejidad, el procesamiento y los datos requeridos para el uso del modelo y su calibración. En relación a los modelos para medir dicha pérdida, existen modelos cualitativos y cuantitativos, así como de medición directa e indirecta.

Los modelos cualitativos se basan en la aplicación de métodos cartográficos mediante la utilización de sistema de información geográfica. Generalmente se asocian niveles, ordenes o jerarquías entre las variables seleccionadas para su estudio. Estas variables involucradas usualmente son el suelo, la vegetación y la topografía (HONORATO *et al.*, 2009).

Los modelos cuantitativos persiguen estimar la magnitud del daño haciendo referencia a valores numéricos de la erosión, tal como lo señalado por (HONORATO *et al.*, 2009; GARCÍA, 2009 y PIZARRO *et al.*, 2009). Estos modelos pueden ser de evaluación indirecta y directa (Fig. 12).

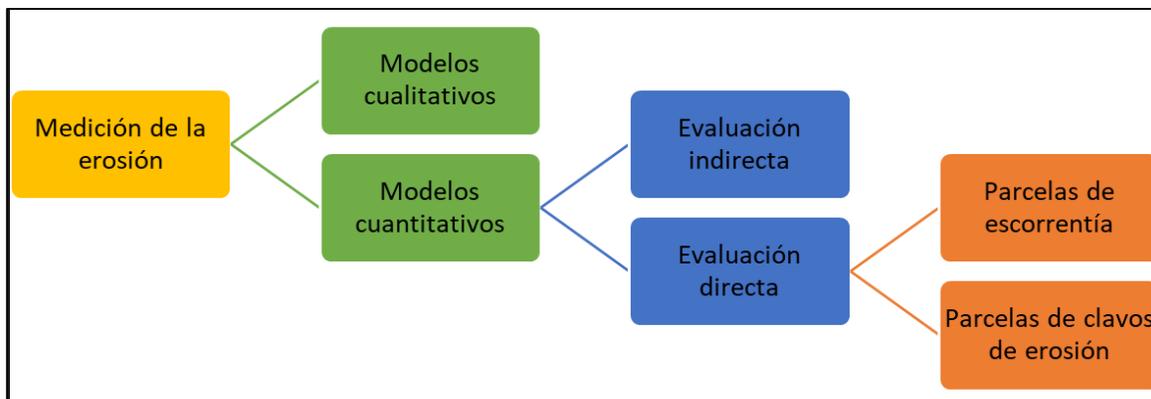


Figura 12. Tipos de modelos de evaluación de erosión hídrica. Fuente: GARCÍA, 2006

Entre los modelos de evaluación directa se encuentran las parcelas de escorrentía y las parcelas de clavos de erosión; se basa parcelas experimentales con la implementación de instrumental para medir la pérdida de suelo. Las parcelas de escorrentía se utilizan para recolectar los sedimentos removidos, involucrando la captación del caudal líquido y sólido en recipientes calibrados que deben ser medidos.

Las parcelas experimentales de clavos de erosión, consiste en parcelas rectangulares a las cuales se les instalan “clavos” que marcan la línea inicial del suelo. Requiere un programa de monitoreo que permita hacer mediciones posteriores a los ciclos de tormenta, con el propósito de evaluar la erosión o sedimentación producida para estimar el balance entre pérdidas y entradas de suelo que permitan tener estimaciones más próximas a la realidad.

Entre los modelos de evaluación indirecta se encuentran los modelos con base física, los modelos conceptuales y los modelos paramétricos (PIZARRO *et al.*, 2009).

Los modelos con base física se fundamentan en bases matemáticas para simular la erosión. Incorpora en sus análisis las leyes de conservación de masa y energía. Entre este tipo de modelos se encuentra el modelo Water Erosion Prediction Project (WEPP) producido por U.S. Department of Agriculture (USDA, 1995) para la predicción cuantitativa de la erosión en laderas y la evaluación de distintas opciones de conservación de suelos.

Los modelos conceptuales poseen los mismos principios que los modelos con base física. En su configuración incorporan la integración de modelos hidrológicos, modelos de erosión y modelos de transporte de sedimentos. Un ejemplo de este modelo lo constituye KINERO,

desarrollado por USDA en el año 2000, el cual permite realizar una representación cinemática del flujo de escorrentía y erosión, basándose en la descripción de los procesos de interceptación, infiltración, escorrentía superficial y erosión.

Los modelos paramétricos, están basados en la lógica inductiva. Se destacan por su amplia utilización y su uso. Según INFOR (2011), CONAF (2017), RANZI et al., (2012) y GÜRTEKIN & GÖKÇE (2021) el modelo paramétrico más conocido y utilizado es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por su sigla en inglés) de WISCHMEIER & SMITH (1978), el cual constituye un método de uso generalizado para la estimación de la erosión hídrica a partir de información referida a seis variables de control. Estima el valor en toneladas métricas por hectárea y año de la cantidad de suelo removida por la erosión hídrica. En otras palabras, la USLE es un método que permite calcular la cantidad de suelo promedio anual que se pierde por concepto de erosión hídrica (INFOR, 2011).

La verdadera fortaleza de la USLE no reside únicamente en el hecho de que pueda proporcionar un valor global de la tasa (A_i : $t/ha^{-1}/año^{-1}$) de las pérdidas de suelo previsibles en una zona, sino en que sirve como herramienta para monitorear el avance de la restauración de los ecosistemas permitiendo:

1. Identificar las zonas en las que se genera mayor cantidad de sedimentos (a través de los valores A_i de áreas homogéneas en R, K, LS, C, y P).
2. Identificar las causas por las que se producen las pérdidas de suelos (a través de los valores de R, K, LS, C y P de cada área homogénea).
3. Implantar las medidas de conservación más adecuadas para reducir las pérdidas de suelo por erosión hídrica laminar y entre-regueros (IBÁÑEZ ASENSIO, *et al.*, s.f.).

2.2 Estudios previos relacionados con la Pérdida de Suelos

El estudio de la pérdida de suelos se ha realizado con distintos propósitos: unos orientados a identificar las causas que le originan, calibrar los métodos de medición; otros a cuantificar los volúmenes de suelo que se pierden, así mismo para priorizar la implementación de acciones preventivas y correctivas, así como compensar daños ambientales asociados a intervenciones que han generado erosión.

Uno de los métodos más utilizados para estimar la pérdida de suelos es justamente la Ecuación de Pérdida de Suelos (USLE) (WISCHMEIER & SMITH, 1978), incluso en Chile CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL (2017); INFOR (2011).

Los cambios en el uso de la tierra, especialmente la disminución de la superficie forestal genera incremento en la pérdida de suelos. (GYSSSELS *et al.*, 2005), realizaron una estimación de pérdida de suelos utilizando la ecuación USLE midiendo los cambios en los tipos de uso de la tierra de 1990 a 2010. Demostraron que la pérdida de suelo aumentó cuando la tierra cobertura disminuida, cuando la superficie forestal en 1990 se convirtió en terreno baldío en 2010. Mientras que la pérdida de suelo disminuyó cuando aumentó la

cobertura del suelo, es decir, cuando la superficie agrícola en 1990 pasó a ser bosque en 2010. En consecuencia, el área con menor cobertura terrestre obviamente mostró un mayor riesgo de erosión del suelo que el área con mayor cobertura terrestre.

En algunos estudios de erosión, los responsables se interesan por zonificar en términos cualitativos la susceptibilidad a la misma, debido a que representa una limitación o restricción para el desarrollo de alguna actividad socioproductiva. En este caso, RUGIERO (2006) realizó una identificación y la caracterización de las unidades susceptibles a la erosión en un sector de la Provincia Chacabuco de la Región Metropolitana de Santiago, a partir de adaptaciones metodológicas a MÄRKER, *et al.*, (1999) y FLUGEL *et al.*, (1999).

Bajo este enfoque metodológico, RUGIERO (2006) definió Unidades de Respuesta a la Erosión a través de la superposición analizando el uso y cobertura del suelo, topografía (exposición y pendiente), agresividad pluvial y características propias del suelo (textura, materia orgánica, estructura, permeabilidad, profundidad efectiva), los cuales fueron valorados a través de análisis multicriterio utilizando el software IDRISI 32 y ARC VIEW 3.2.

En este orden de ideas, utilizando los sistemas de información geográfica, ESCOBAR (2019) realizó una estimación de la erosión hídrica en zona semiárida del norte chileno, mediante la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE): el Caso de Punitaqui (IV Región de Coquimbo) para el periodo 2000-2017 a partir de su combinación a través de un modelo raster de los 05 parámetros, que constituyen la ecuación representando los condicionantes de la erosión hídrica: la erosividad de la precipitaciones (R), la erodabilidad del suelo (K), la topografía (LS), el manejo de cultivos (C) y las prácticas de control de erosión (P).

Por otra parte, en el marco de la elaboración de estudios de impacto ambiental, se presentó la necesidad de generar un diagnóstico de la pérdida de suelos que podría producirse por la construcción de caminos rurales proyectados para realizar la instalación, operación y mantención de proyectos de energía solar. En consecuencia, BIOCYS (2020) estimó la pérdida de suelos actual y futura con la construcción de caminos mediante la aplicación USLE para la adenda complementaria del proyecto “Nueva Línea Transmisión 2x220 KV Nueva Pan de Azúcar-Punta Sierra-Centella” (270 km), con el propósito de exponer los fundamentos técnicos, diseño, localización y magnitud de acciones preventivas a implementar para el control de erosión. Este estudio fue evaluado y aprobado por el Sistema de Evaluación Ambiental

Con el propósito de diseñar acciones correctivas para el control de erosión en caminos construidos para la Línea Transmisión 2x5000kV Cardones-Polpaico en las regiones Valparaíso, Coquimbo y Atacama solicitadas en un Plan de Cumplimiento Ambiental. BIOCYS (2021a) en un área de influencia de 198,28 ha estimó la pérdida de suelos previo a la construcción de caminos y posterior a la construcción de éstos. Se calcularon las diferencias de pérdidas entre la situación final con relación a la situación inicial. Posteriormente, se estimó la efectividad de la obra haciendo las valoraciones respectivas al Factor P correspondiente a la práctica de manejo implementada.

Bajo el mismo enfoque anteriormente señalado, (BIOCYS, 2021b) aplicó nuevamente el modelo estimando la pérdida de suelos en el marco de un estudio solicitado para la Línea

Transmisión 2x5000kV Cardones-Polpaico en 820 caminos que fueron abiertos para la construcción y operación del proyecto en las regiones Metropolitana, Valparaíso, Coquimbo y Atacama, con el propósito de presentar los fundamentos técnicos para erosión presente y riesgo de erosión futura, con la finalidad de poder proponer obras y acciones correctivas para el control de erosión derivada de la construcción de los caminos, así como también para prevenir el agravamiento de los casos o reducir la posibilidad de activar nuevos procesos erosivos.

En este orden de ideas, ACEVEDO (2021) realizó una evaluación de prácticas de *oasificación forestal* en ambientes semiáridos de la región de Valparaíso: donde aplicó con mediciones directas en terreno la Ecuación de Pérdida de Suelos (USLE) en laderas con obras de conservación y sin obras de conservación obteniendo mayores valores de pérdidas en laderas sin tratamiento.

En base a estos antecedentes, el propósito de la investigación estará enfocado en estimar la erosión a través de la Ecuación de Pérdida de Suelos USLE para el periodo 2017-2022, en las áreas de rehabilitación del Fundo Pelán, localizado en la comuna Til Til, Región Metropolitana de Santiago de Chile.

2.4 Marco legal e institucional

El cuidado del medio ambiente es transversal en un conjunto de instituciones que se rigen por el marco normativo constituido por leyes orgánicas, decretos y reglamentos. La conservación, protección de los ecosistemas, especialmente la flora, la fauna, los recursos hídricos y los suelos cuentan con una base jurídica, cuyo objeto se presenta en la Tabla 4:

Tabla 4. Marco regulador relacionados con la conservación, protección, restauración y rehabilitación de ecosistemas en Chile

Norma	Objeto
Constitución Política de Chile	El derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación. Es deber del Estado velar para que este derecho no sea afectado y tutelar la preservación de la naturaleza. La ley podrá establecer restricciones específicas al ejercicio de determinados derechos o libertades para proteger el medio ambiente.
Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Ley 19.300	El derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental se regularán por las disposiciones de esta ley, sin perjuicio de lo que otras normas legales establezcan sobre la materia.
Decreto N° 13, de 2020, del Ministerio del Medio Ambiente	Ente rector de la gestión ambiental. Es el responsable del diseño y aplicación de políticas, planes y programas en materia ambiental, así como de la protección y

Norma	Objeto
	conservación de la diversidad biológica y de los recursos naturales renovables e hídricos, promoviendo el desarrollo sustentable, la integridad de la política ambiental y su regulación normativa.
Ley sobre el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado. Ley N° 18.362	<p>a) Mantener áreas de carácter único o representativas de la diversidad ecológica natural del país o lugar con comunidades animales o vegetales, paisajes o formaciones geológicas naturales, a fin de posibilitar la educación e investigación y de asegurar la continuidad de los procesos evolutivos, las migraciones animales, los patrones de flujo genético y la regulación del medio ambiente;</p> <p>b) Mantener y mejorar recursos de la flora y la fauna silvestres y racionalizar su utilización;</p> <p>c) Mantener la capacidad productiva de los suelos y restaurar aquellos que se encuentren en peligro o en estado de erosión;</p> <p>d) Mantener y mejorar los sistemas hidrológicos naturales, y</p> <p>e) Preservar y mejorar los recursos escénicos naturales y los elementos culturales ligados a un ambiente natural.</p>
Ley N° 19.283. Modifica Ley n° 18.755, sobre Organización y Atribuciones del Servicio Agrícola y Ganadero	<p>El Servicio tendrá por objeto contribuir al desarrollo agropecuario del país, mediante la protección, mantención e incremento de la salud animal y vegetal; la protección y conservación de los recursos naturales renovables que inciden en el ámbito de la producción agropecuaria del país y el control de insumos y productos agropecuarios sujetos a regulación en normas legales y reglamentarias.</p> <p>Promoverá las medidas tendientes a asegurar la conservación de suelos y aguas que eviten la erosión de éstos y mejoren su fertilidad y drenaje. Además, promoverá las iniciativas tendientes a la conservación de las aguas y al mejoramiento de la extracción, conducción y utilización del recurso, con fines agropecuarios. Asimismo, regulará y administrará la provisión de incentivos que faciliten la incorporación de prácticas de conservación en el uso de suelos, aguas y vegetación.</p>
Ley N° 18.348 que crea la Corporación Nacional Forestal	a) Elaborar y ejecutar estudios y programas de investigación, protección y conservación de los recursos naturales renovables;

Norma	Objeto
y de Protección de los Recursos Naturales	b) Ejecutar programas de manejo, conservación o protección de los recursos naturales renovables en terrenos de particulares, fiscales o de organismos del Estado.
Ley de Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal. Ley 20.283	La protección, la recuperación y el mejoramiento de los bosques nativos, con el fin de asegurar la sustentabilidad forestal y la política ambiental.
Código penal	Establecimiento de penas y sanciones por atentados contra el ambiente.
Reglamento General de la Ley sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal. Decreto N° 93, del Ministerio de Agricultura, de 2009	Deberá determinar la forma y condiciones en que la Corporación autorizará las intervenciones excepcionales a que se refieren los artículos 7°, 17 y 19 de la Ley,
Reglamento del Fondo de Conservación, Recuperación y Manejo Sustentable del Bosque Nativo	Contempla los mecanismos que permitan alcanzar condiciones de igualdad en la participación en los concursos del Fondo, debiendo fijar un procedimiento simplificado de postulación para los pequeños propietarios forestales.
Reglamento de los Recursos destinados a la Investigación del Bosque Nativo	Establecer las políticas e instrucciones para la utilización de los recursos de investigación.
Reglamento de Suelos, Agua y Humedales	La protección de suelos, cuerpos y cursos naturales de agua y los criterios que deben contener, así como la normativa para la protección de los humedales declarados sitios prioritarios de conservación.
Reglamento del Consejo Consultivo del Bosque Nativo	Fijar las normas de funcionamiento del Consejo Consultivo del Bosque Nativo, que le permitan constituirse e iniciar sus actividades.

Fuente: Modificado de (CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL, 2022)

CAPITULO 3. MARCO METODOLÓGICO

El tipo de investigación abordada corresponde a una investigación documental basada en un algebra de mapas para obtener datos que permitieron realizar un análisis cuantitativo de los factores que inciden en la pérdida de suelos en un área de rehabilitación del Fundo Pelán. Su desarrollo comprendió tres grandes fases (Fig. 13):

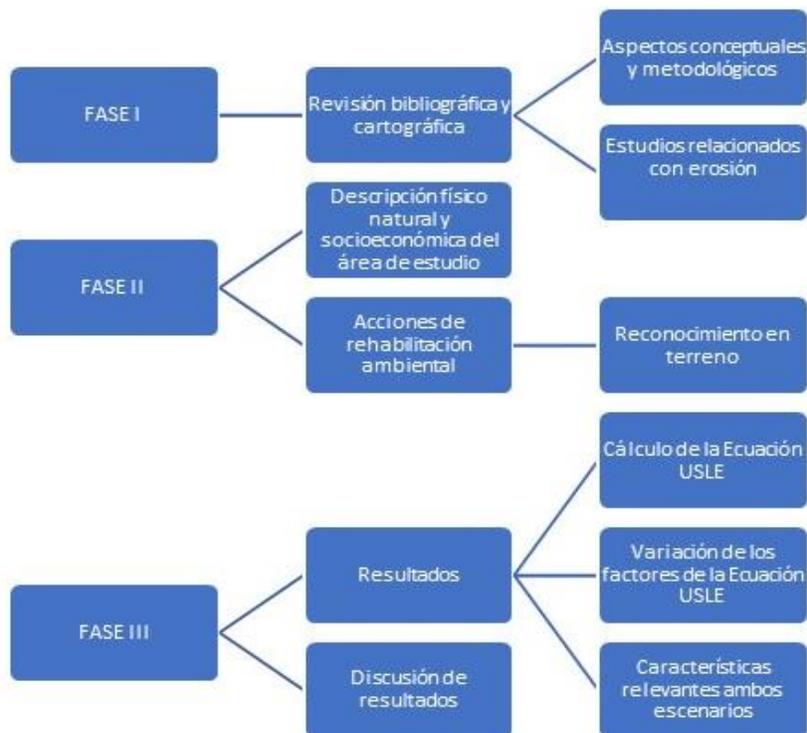


Figura 13. Estructura metodológica para el estudio de la Pérdida de Suelos en el área de rehabilitación de ecosistemas del Fundo Pelán

3.1 Fase I. Revisión bibliográfica y cartográfica

La Fase I se basó en una revisión bibliográfica de los aspectos conceptuales, metodológicos, estudios relacionados con el riesgo de erosión en Chile, los cuales permitieron obtener una visión del estado del arte, las metodologías empleadas, los alcances y las limitaciones.

3.2. Fase II. Descripción físico natural y socioeconómica del área de estudio

En la Fase II se realizó una revisión de los antecedentes para contextualizar los aspectos físico-naturales y socioeconómicos del área de estudio. Adicionalmente se preparó la

cartografía base para los mapas temáticos, utilizando como fuente de información descritas en la Tabla 5.

Tabla 5. Fuentes de información documental y cartográfica

Variable	Institución	Autor/Información
Geología	Servicio Nacional de Geología y Minería	GANNA <i>et al.</i> , (1999). Cartografía geológica
Geomorfología	Universidad de Chile, Escuela de Geografía	SOTO <i>et al.</i> , (2007). Carta geomorfológica
Clima	Dirección de General de Aguas, Municipalidad de Til Til	Datos de estaciones climáticas Características del clima Plan de Desarrollo Comunal
Hidrografía	Dirección General de Aguas. Alaska Satellite Facility	Divisoria de aguas en cuencas, subcuencas, subsubcuencas, red de drenaje. DEM Alos Palsar. Resolución 12,5 m
Pendiente	Alaska Satellite Facility Biocys Corporación Nacional Forestal	DEM Alos Palsar. Resolución 12,5 m DEM Alta resolución. 0,4 m. 2017 DEM Alta resolución. 0,311 m. 2022
Suelos	Centro de Información de Recursos Naturales Biocys	CIREN (2005). Estudio Agrológico CIREN (2012). Estado actual de los suelos de la Región Metropolitana. Uso y Degradación Parámetros físicos de los suelos
Vegetación	Corporación Nacional Forestal Biocys	Catastro vegetacional. 2019. (Inédito) Imagen Drone. Resolución 0,4 m 2017 Imagen Drone. Resolución 0,311 m 2022
Medio humano	Municipalidad de Til Til	Plan de Desarrollo Comunal
Acciones de rehabilitación	Biocys	Informes técnicos del Proyecto de Restauración Santiago Solar

3.3 Fase III. Resultados

Durante la Fase III, se estimó la pérdida de suelos mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE). Se compararon las variaciones entre los factores que inciden en la pérdida de suelos para ambos escenarios y se expusieron las características de cada categoría resultante. Adicionalmente, se incorporó una discusión de los resultados obtenidos.

3.3.1 Estimación de la pérdida de suelos

La estimación de la pérdida de suelos se realizó a través de la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) (WISCHMEIER & SMITH, 1978) para dos escenarios en una superficie de 145,63 ha.

El Escenario I (Año 2017) está constituido por el área de rehabilitación antes de la construcción de las obras de conservación de suelos y aguas y la reforestación con especies nativas.

El Escenario II (Año 2022) comprende la situación actual con la construcción y de suelos y agua y la reforestación de especies nativas con una densidad de 600 ejemplares por hectárea de *Quillaja saponaria* (Quillay), *Lithraea caustica* (Litre) y *Acacia caven* (Espino) fundamentalmente.

Para la obtención del modelo USLE, se utilizaron los SIG como herramienta clave para el análisis espacial y representación de la erosión en el área de influencia del proyecto, orientados por el procedimiento metodológico señalados en las guías de GEASIG (2019a) y BELASRI & LAUHOULL (2016) para el análisis de riesgo de erosión con el programa Arc Gis.

El modelo USLE contiene una ecuación representada por 5 parámetros condicionantes de la erosión hídrica: la erosividad de las precipitaciones (R), la erodabilidad del suelo (K), la topografía (LS), la cobertura vegetal (C) y las prácticas de control de erosión (P) (Fig. 14).

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Donde:

A = Pérdida media de suelos por hectárea ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$)

R = Factor de erosividad de la lluvia ($MJ \cdot mm / ha^{-1} \cdot h^{-1}$)

K = Factor de erosionabilidad del suelo ($t \cdot h \cdot MJ / cm$)

L = Longitud de la pendiente (metros)

S = Factor de pendiente (adimensional)

C = Factor de manejo de vegetación (adimensional)

P = Factor de prácticas de conservación (adimensional)

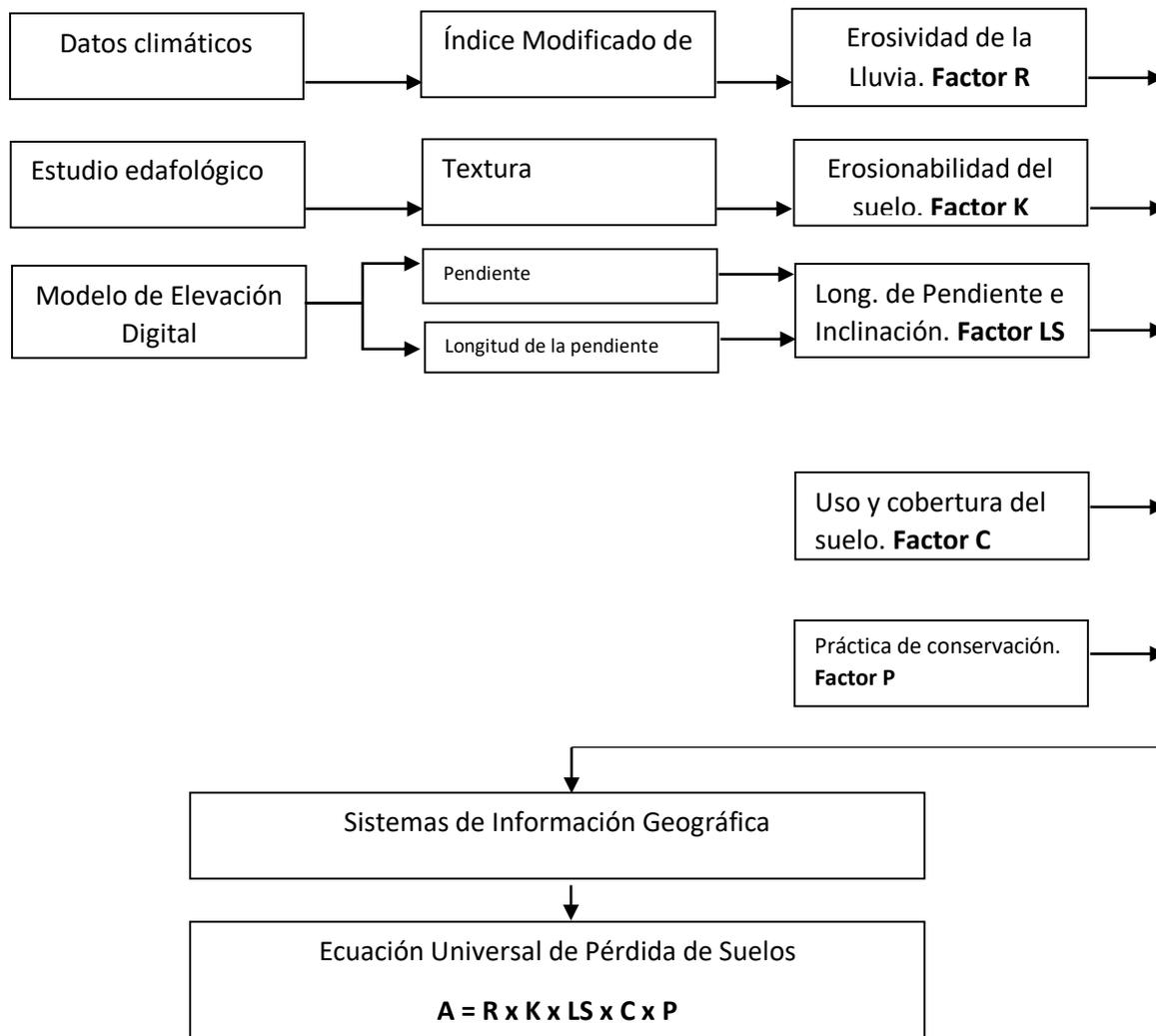


Figura 14. Modelo metodológico para estimar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE). Fuente: Modificado de BELASRI & LAUHOULL (2016)

3.3.1.1 Factor R

El **Factor R** esta referido a la erosividad de la lluvia, se obtuvo aplicando el método propuesto por ICONA (1988) En: RODRIGUEZ *et al.*, (2004) mediante la siguiente ecuación:

$$R = 2,56 * IMF^{1,065}; IMF \text{ (Índice Modificado de Fournier)}$$

En este estudio se calculó el Índice Modificado de Fournier (IMF) a partir de los datos de precipitación de 12 estaciones meteorológicas, obtenidos de los anuarios publicados por la Dirección General de Aguas de Chile (DGA) considerando los registros disponibles, los cuales oscilan entre 26 y 57 años. El cálculo del IMF por ARNOLDUS (1978) señala que el

índice está dado por la relación entre la suma del cuadrado de las precipitaciones mensuales para un año, respecto a la precipitación media anual (mm)

$$IFM_j = \frac{\sum_{i=1}^{12} (p_{ij})^2}{P_m}$$

Donde:

- IFM_j = Índice Modificado de Fournier, para el año j.
- p_{ij} = Precipitación mensual del mes i del año j (mm).
- P_m = Precipitación media anual (mm).

La obtención cartográfica del IMF, se realizó mediante la interpolación en formato raster para cada mes. El método de interpolación utilizado fue la **Ponderación de Distancia Inversa (IDW)** (GEASIG, 2019b).

3.3.1.2 Factor K

El **Factor K**, representa la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica. El valor asignado se realizó en base a la clasificación de STEWART *et al.*, (1975) En: ESCOBAR (2019), la cual establece el valor K según la clase textural del suelo dependiendo del contenido o porcentaje de materia orgánica asociado al mismo (Tabla 6).

Tabla 6. Factor K de erodabilidad del suelo según la textura

Clase textural	Materia orgánica (%)			Promedio K
	0,5	2	4	
Arena	0,05	0,03	0,02	0,03
Arena fina	0,16	0,14	0,1	0,13
Arena muy fina	0,42	0,36	0,28	0,35
Areno franco	0,12	0,10	0,08	0,10
Areno franco fino	0,24	0,2	0,16	0,20
Areno franco muy fino	0,44	0,38	0,3	0,37
Franco arenoso	0,27	0,24	0,19	0,23
Franco arenoso fino	0,35	0,3	0,24	0,30
Franco arenoso muy fino	0,47	0,41	0,33	0,40
Franco	0,38	0,34	0,29	0,34
Franco limoso	0,48	0,42	0,33	0,41
Limo	0,6	0,52	0,42	0,51
Franco arcillo arenoso	0,27	0,25	0,21	0,24
Franco arcilloso	0,26	0,25	0,21	0,25
Franco arcilloso limoso	0,37	0,32	0,26	0,32
Arcillo arenoso	0,14	0,13	0,12	0,13
Arcillo limoso	0,25	0,23	0,19	0,22

Fuente: STEWART *et al.*, (1975) En: ESCOBAR (2019)

3.3.1.3 Factor LS

El factor longitud y grado de pendiente denominado factor L y factor S están relacionados con el índice topográfico en un solo factor conocido como LS. En el modelo, la longitud de pendiente está definida como la distancia desde el punto de origen del flujo superficial o de escorrentía hasta el punto en que la pendiente disminuye lo suficiente para depositar los sedimentos. Para calcular el **Factor LS** se utilizó la fórmula de MOORE & BURCH (1986) En: GEASIG (2019a):

$$LS = (Flow\ accumulation * cell\ size / 22,13)^{0,4} * (sin\ slope / 0,0896)^{1,3}$$

Donde *Flow Accumulation* es el número de celdas que contribuyen al flujo en una celda dada, *cell size* es la longitud del tamaño de un lado de las celdas y *sin slope* es el seno de la pendiente en radianes.

El modelo generado con el Escenario I utilizó una imagen dron del año 2017 a una resolución especial de 0,4 metros. Mientras que el modelo desarrollado para el Escenario II se empleó una imagen dron del año 2022 con resolución 0,3; levantada y facilitada para esta investigación por la Corporación Nacional Forestal. Ambas imágenes son consideradas de alta resolución espacial, adecuadas a la escala de trabajo a detalle y a nivel predial.

3.3.1.4 Factor C

El Factor C está representado por el grado de protección de un determinado tipo de cubierta vegetal al suelo. El factor C se determinó a partir de las tabulaciones ofrecidas por WISCHMEIER & SMITH (1978), con correcciones por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos - Servicio de Investigación Agrícola USDA-ARS, según la Tabla 7.

Para el análisis de coberturas en el Escenario I, se utilizó la información en shapefile proporcionada del Catastro Vegetacional (inédito) de la CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL (2019), realizada a partir de imágenes Sentinel 2, Google Earth y Landsat 8 y una imagen dron del año 2017 con resolución de 0,4 m, tomada previo a la ejecución del proyecto.

Para el Escenario II se tomó en consideración la cobertura de una imagen dron tomada en el año 2022 por la Corporación Nacional Forestal, con una resolución de 0,311 metros y observaciones de campo.

De acuerdo a los escenarios de estudio y las valoraciones sugeridas por la Tabla 7, el Factor C quedó valorado según las especificaciones de la Tabla 8.

Tabla 7. Factor C para praderas permanentes, terrenos baldíos y bosques pastoreados

Cobertura aérea Tipo y altura	% Cobertura aérea	Cubierta superficial en contacto con el terreno % de suelo cubierto						
		Tipo	0	20	40	60	80	95+
No apreciable		G	0,45	0,20	0,10	0,042	0,012	0,003
		W	0,45	0,24	0,15	0,091	0,043	0,011
Herbáceas, pastos largos o matorral con altura media	25	G	0,36	0,17	0,09	0,038	0,013	0,003
		W	0,36	0,20	0,13	0,083	0,041	0,011
de caída de gotas menor a 0,90 metros	50	G	0,26	0,13	0,07	0,035	0,012	0,003
		W	0,26	0,16	0,11	0,076	0,039	0,011
	75	G	0,17	0,10	0,06	0,032	0,011	0,003
		W	0,17	0,12	0,09	0,068	0,038	0,011
Arbustos o matorrales con altura media de caída de gotas de 1,95 metros	25	G	0,40	0,18	0,09	0,04	0,013	0,003
		W	0,40	0,22	0,14	0,087	0,042	0,011
	50	G	0,34	0,16	0,08	0,038	0,012	0,003
		W	0,34	0,19	0,13	0,082	0,041	0,011
	75	G	0,28	0,14	0,08	0,036	0,012	0,003
		W	0,28	0,17	0,12	0,078	0,04	0,011
Árboles pero sin apreciable cubierta arbustiva o de matorral. Altura media de caída de gotas de 4 metros.	25	G	0,42	0,19	0,10	0,041	0,013	0,003
		W	0,42	0,23	0,14	0,089	0,042	0,011
	50	G	0,39	0,18	0,09	0,040	0,013	0,003
		W	0,39	0,21	0,14	0,087	0,042	0,011
	75	G	0,36	0,17	0,09	0,039	0,013	0,003
		W	0,36	0,20	0,13	0,089	0,042	0,011

G = Cubierta superficial está compuesta por pasto o material en descomposición; W= La cubierta superficial está compuesta de herbáceas con poca cobertura radicular o residuos no descompuestos.

Fuente: WISCHMEIER Y SMITH (1978) con correcciones por USDA-ARS

Tabla 8. Valoraciones del Factor C en el área de rehabilitación del Fundo Pelán

Escenario	Uso	% Cobertura copa	%Suelo cubierto	Factor C
I. Antes de la intervención (2017)	Bosque nativo renoval abierto	30 - 40	0	0,39
I. Antes de la intervención (2017)	Bosque nativo renoval muy abierto	20 - 30	0	0,42
I. Antes de la intervención (2017)	Matorral con suculentas abierto	30 - 40	40	0,40
I. Antes de la intervención (2017)	Matorral con suculentas semidenso	60 -90	60	0,038
I. Antes de la intervención (2017)	Rotación cultivo pradera	<20	0	0,36
I. Antes de la intervención (2017)	Terreno de uso agrícola	<20	0	0,36
II. Situación actual (2022)	Bosque nativo renoval abierto	30 - 40	20	0,19

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.5 Factor P

El **Factor P**, corresponde a un valor asignado de acuerdo a las prácticas de manejo conservacionistas implementadas. En este caso, se asignó valor 1 al Escenario I, por cuanto se carecían de prácticas manejo. Mientras que para el Escenario II fueron asignados valores considerando las referencias presentadas en Tabla 9 y consultas realizadas a especialistas, las obras construidas en el Fundo Pelán adoptaron las valoraciones señaladas en la Tabla 10.

Tabla 9. Factor P para Prácticas de Conservación

Prácticas de conservación	Factor P
Labranza en sentido de la pendiente	1,00
Siembra en contorno	0,60
Cultivo en fajas de 30 m de ancho	0,50
Cultivo en fajas de 15 m de ancho	0,40
Barreras vivas de pasto denso	0,50
Barreras vivas dobles de pasto denso	0,40
Barreras vivas de musáceas	0,45
Barreras vivas de piña o fique	0,45
Fajinas de material vegetal (ramas)	0,40
Barreras muertas	0,35
Hileras de piedras	0,35
Muros de piedras	0,20
Terrazas de base ancha	0,35
Terrazas de base angosta	0,25
Terrazas de banco	0,10
Terrazas individuales	0,30
Acequias de ladera	0,20
Canales de desviación	0,30
Zanjas de absorción	0,20
Zanjas de trinchera	0,25

Fuente: (Márquez, 2021)

Considerando la similitud de las obras y su función, se plantea en la Tabla 10 los valores asumidos para el Factor P para el Escenario II en el Fundo Pelán.

Tabla 10. Valoraciones del Factor P en el área de rehabilitación del Fundo Pelán

Práctica conservacionista	Factor "P"
Microterrazza (terrazza angosta)	0,25
Microcuencas negarim (canales de desviación)	0,30
Bordos semicirculares (terrazas individuales)	0,30

Fuente: Modificado de (MÁRQUEZ, 2021)

Luego del álgebra de mapa, los valores resultantes fueron agrupados en 7 clases, según la Tabla 11; de acuerdo a los rangos establecidos por el GOBIERNO VASCO (2005).

Tabla 11. Pérdida de suelos

Pérdida de suelos (A) t.ha⁻¹.año⁻¹	Marca de clase (Promedio) t.ha⁻¹.año⁻¹	Valoración
0 - 5	2,5	Muy baja
5 - 10	7,5	Baja
10 - 25	17,5	Moderada
25 - 50	37,5	Media-Alta/Grave
50 -100	75	Alta/Muy grave
100 - 200	150	Muy alta/Extremadamente Grave
>200	200	Muy alta/Extremadamente Grave

Fuente: Modificado de GOBIERNO VASCO (2005).

3.3.2 Variación de los factores de la ecuación y la pérdida de suelos de ambos escenarios en el fundo.

Para la comparación de los Escenarios I y II se realizó una comparación de la superficie en hectáreas ocupada por cada factor valorado con respecto a la pérdida de suelos, para observar los valores que predominan en cada categoría de pérdida de suelos. Además, se calcularon las diferencias mediante una resta de superficies entre el Escenario II respecto al Escenario I. De ésta manera se evidenció la disminución o incremento de la superficie por categoría de pérdida de suelos.

3.3.3 Características relevantes de la pérdida de suelos para los Escenarios I y II

Se realizó una descripción de cada categoría de pérdida de suelos resultante para ambos escenarios. Se presentó en cada descripción las toneladas por hectárea por año t.ha⁻¹.año⁻¹, que se pierden; la superficie que ocupa en hectáreas y su relación porcentual respecto al área total del estudio. Se indicó el tipo de suelos que predominan haciendo referencia al Factor K; la cobertura vegetal con su Factor C; la pendiente y el Factor LS representativo y el Factor P correspondiente.

Finalmente, se construyó un cuadro resumen de las características predominantes por categoría de pérdida de suelos para el Escenario I y el Escenario II.

CAPITULO 4. RESULTADOS

4.1 Estimación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos

La Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo USLE de WISCHMEIER & SMITH (1978) es un modelo utilizado para la predicción a largo plazo de la pérdida de suelos. En las valoraciones empleadas en el Sistema Internacional, estas oscilan entre 0 y 1; cuando el factor se acerca 0 es menos propenso a pérdida de suelos, cuando se acerca a 1, el factor se presenta favorable a la pérdida de suelos.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los factores que fueron valorados para estimar la pérdida de suelos para dos escenarios en el área de rehabilitación del Fundo Pelán.

El Escenario I, corresponde a la situación inicial que existía previo a la introducción de las medidas de rehabilitación de ecosistemas, específicamente en el año 2017.

El Escenario II, comprende la situación actual, es decir, posterior a la implementación de medidas de rehabilitación realizada con imágenes dron del año 2022.

4.1.1 Factor R

La erosividad de las lluvias constituye un factor relevante como detonante de procesos erosivos y movimientos en masa. El Factor R entre las regiones Atacama hasta la Metropolitana de Santiago varía entre 11,07 MJ.mm/ha.h y 372,71 MJ.mm/ha.h; éstos valores se consideran bajos en relación a regiones ubicadas al sur del país BIOCYS (2021b)(Fig. 15).

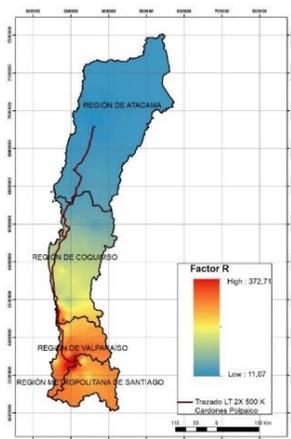


Figura 15. Factor R estimado para las regiones Atacama, Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana. Fuente: BIOCYS (2021)

Específicamente, en la Región Metropolitana de Santiago donde se ubica el proyecto, el Factor R varía entre 137,84 MJ.mm/ha.h y 170,78 MJ.mm/ha.h; propia de ambientes semiáridos con régimen de lluvias concentrado en pocos días durante el invierno (Fig. 16).

ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS. CASO DE ESTUDIO: ÁREA DE REHABILITACIÓN DEL FUNDO PELÁN, COMUNA TIL TIL, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

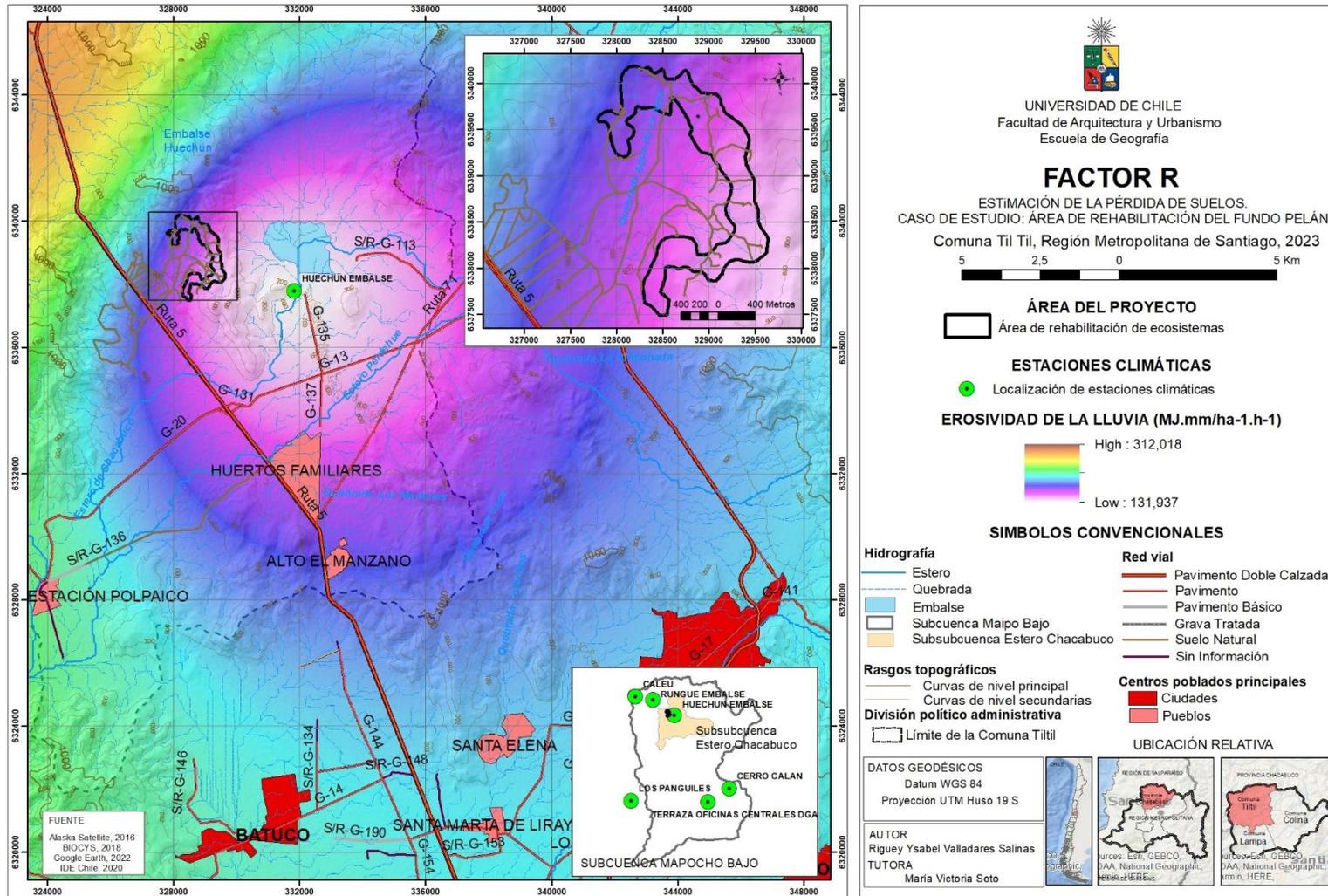


Figura 16. Factor R estimado para el área de rehabilitación del Fundo Pelán

4.1.2 Factor K

El Factor K representa la erodabilidad o capacidad de los suelos a erosionarse. Constituye la respuesta del suelo a una determinada fuerza o mecanismo erosivo; esfuerzo cortante e impacto directo de la gota de lluvia (CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL, 2017). La erodabilidad del suelo es una medida de la susceptibilidad de éste a la disgregación o separación de las partículas y al transporte de éstas por agentes erosivos (LAL & ELLIOT, 1994).

El Factor K, relaciona la textura y el contenido de materia orgánica de los suelos. En el estudio predominan suelos arcillosos en el 88,11% de la superficie, en consecuencia, éste varía para entre 0,22 a 0,34 (Tabla 12, Fig. 17).

Tabla 12. Factor K en el área de estudio

Textura	Arcillosa		Franco Arcillosa		Franca		Total	%
	Factor K	%	Factor K	%	Factor K	%		
Superficie (ha)	128,32	88,11	11,35	7,79	5,98	4	145,64	100

4.1.3 Factor LS

El Factor LS, relaciona la longitud del área de escurrimiento superficial o ladera en cuestión con la pendiente. Mientras mayor sea el Factor LS, mayor será la velocidad del escurrimiento superficial, por ende, existirá una mayor propensión a generar erosión.

En el caso analizado, el Escenario I, presentó en 93,87 ha (equivalente a 64,45% de la superficie total) un Factor LS menor a 1,44 y 21,28 ha con valores entre 1,44 a 11,85 (Tabla 13, Fig. 18).

En el Escenario II, 105,88 ha (equivalentes a 72,7% de la superficie total) mostró un Factor LS menor a 1,44 denotando un incremento respecto a la situación inicial con una disminución en la longitud de la pendiente con las acciones de rehabilitación implementadas, lo cual influye en la disminución de la velocidad del agua ante un evento de precipitación (Tabla 13, Fig. 19).

Tabla 13. Factor LS para los Escenarios I y II.

Factor LS	Factor LS, Superficie (ha)						Total
	0 - 0,30	0,3 - 1,44	1,44 - 2,6	2,6 - 4,4	4,4 - 5,4	5,4 - 11,85	
Escenario I	45,3	48,57	30,49	14,84	4,38	2,06	145,64
%	31,1	33,35	20,94	10,19	3,01	1,41	100
Escenario II	34,12	71,76	29,71	8,54	1,24	0,28	145,64
%	23,43	49,27	20,4	5,86	0,85	0,19	100
Diferencia	-11,18	23,19	-0,78	-6,3	-3,14	-1,78	
%	-7,67	15,92	-0,54	-4,33	-2,16	-1,22	

ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS. CASO DE ESTUDIO: ÁREA DE REHABILITACIÓN DEL FUNDO PELÁN, COMUNA TIL TIL, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

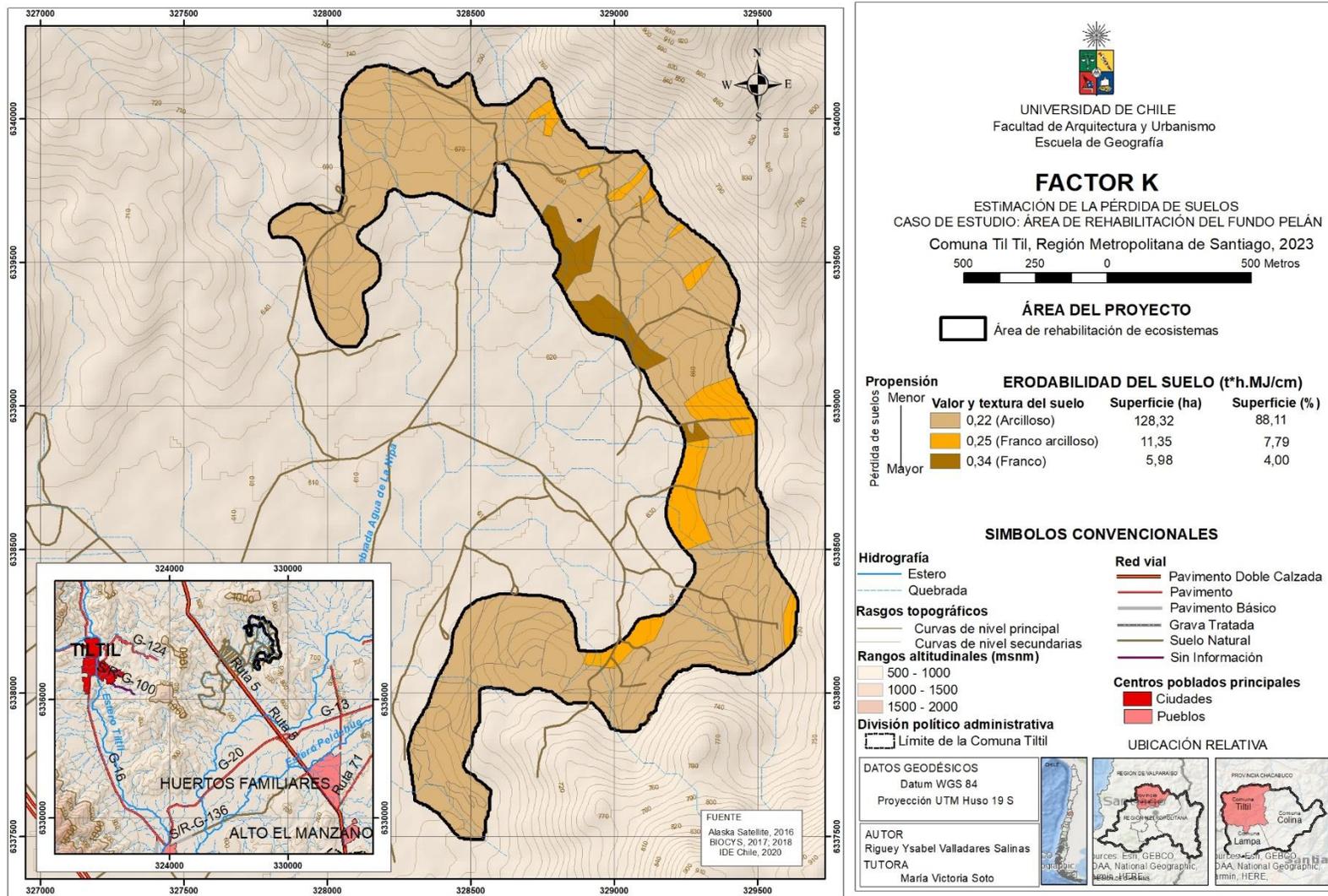


Figura 17. Factor K del área de rehabilitación del Fundo Pelán

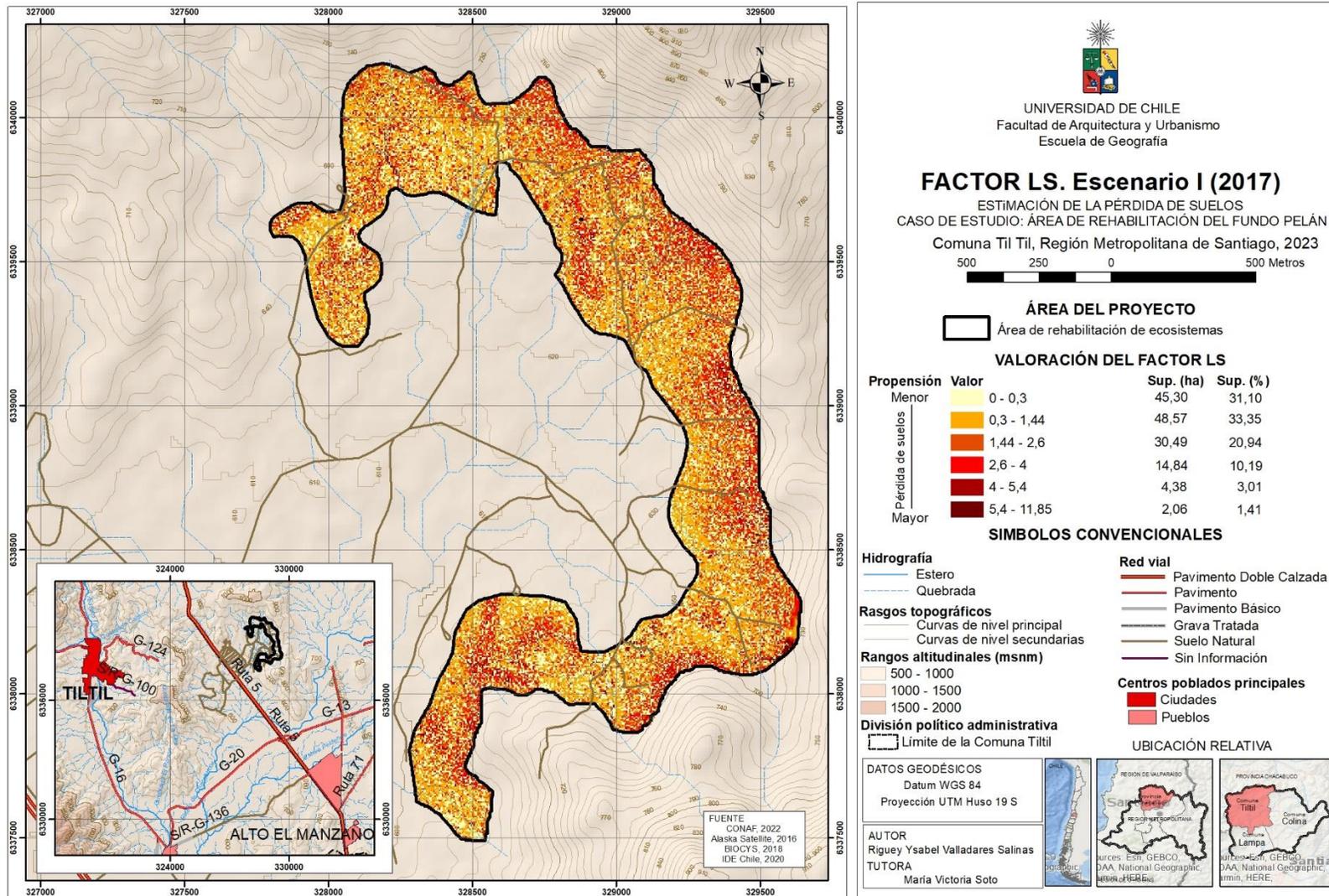


Figura 18. Factor LS del área de rehabilitación del Fundo Pelán (Escenario I)

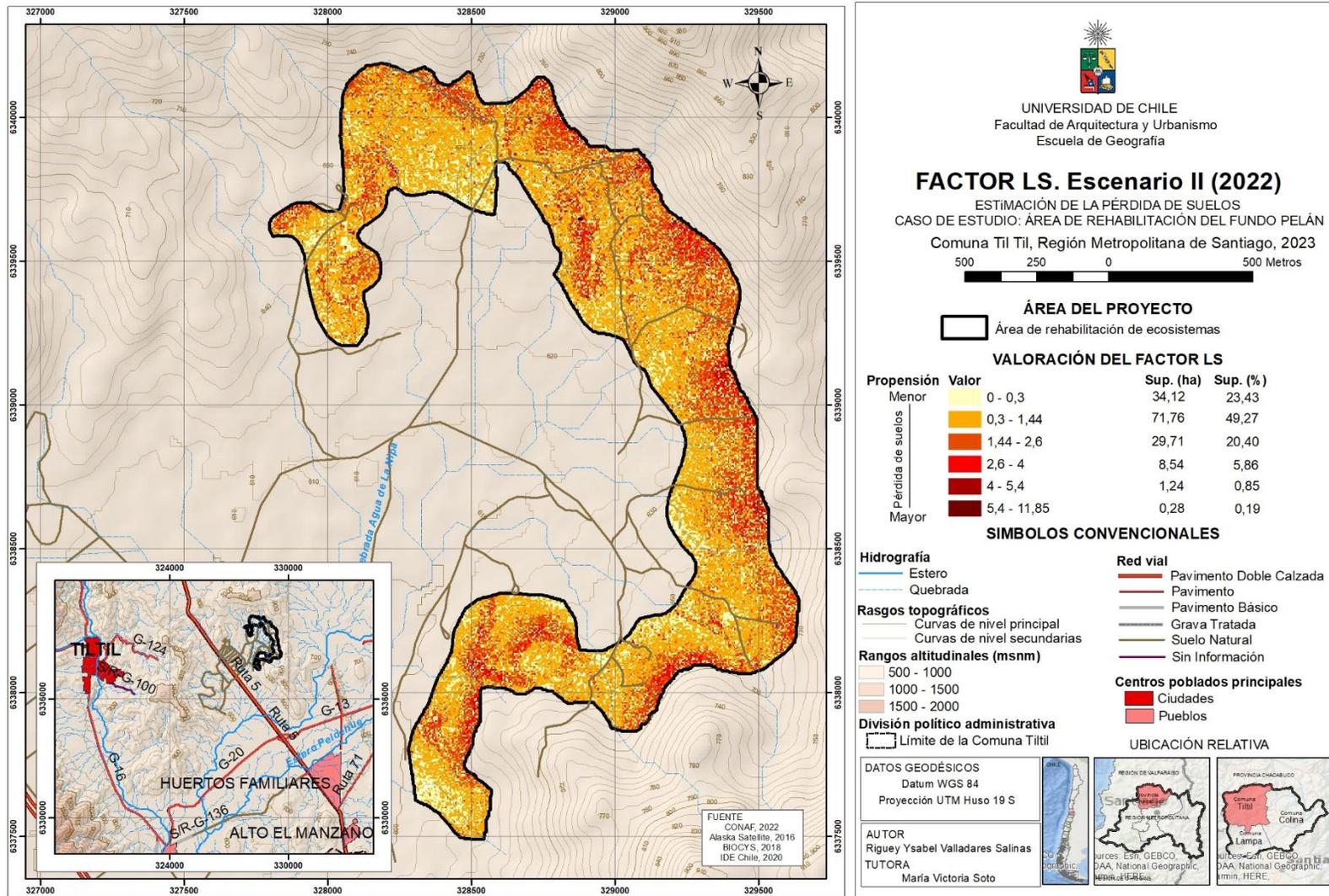


Figura 19. Factor LS del área de rehabilitación del Fundo Pelán (Escenario II)

La pendiente en el Escenario I variaba entre 0% a 15% y 15% a 45% en 124,25 ha, ésta situación se incrementó en el Escenario II al pasar estos rangos de pendiente a 137,47 ha, generándose una diferencia positiva de 9,08 puntos porcentuales (Tabla 14. Fig. 20 y 21).

Tabla 14. Distribución de rangos de pendientes en el área de rehabilitación del Fundo Pelán, por escenarios.

Escenarios	Rangos de pendiente (%)	0 - 15	15 - 45	45 - 75	>75	Total
I	Superficie (ha)	27,67	96,58	16	5,4	145,64
I	Superficie (%)	19	66,31	10,99	3,71	100
II	Superficie (ha)	34,75	102,72	6,94	1,23	145,64
II	Superficie (%)	23,86	70,53	4,77	0,84	100
II-I	Diferencia (ha)	7,08	6,14	-9,06	-4,17	
II-I	Diferencia (%)	4,86	4,22	-6,22	-2,87	

La pendiente promedio en el año 2017 era 38,082% disminuyendo a 31,728% en el año 2022, produciéndose una diferencia promedio de -6,354 puntos porcentuales con una desviación estándar de 28,10 (Tabla 15).

Mediante el análisis de la diferencia entre las pendientes promedio del año 2022 respecto a la pendiente promedio que existía para el año 2017 con una distribución no paramétrica, a través del método de Wilcoxon con un 95% de nivel de confianza; se demostró que presentan diferencias significativas y que tendió a disminuir entre -6,354 puntos porcentuales.

Tabla 15. Estadígrafos de la pendiente promedio y sus diferencias para los Escenarios I y II.

Medidas	Antes (2017)	Después (2022)	Diferencia
Media de la Pendiente (%) =	38,082	31,728	-6,354
Desviación estándar	23,91	20,55	28,10

ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS. CASO DE ESTUDIO: ÁREA DE REHABILITACIÓN DEL FUNDO PELÁN, COMUNA TIL TIL, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

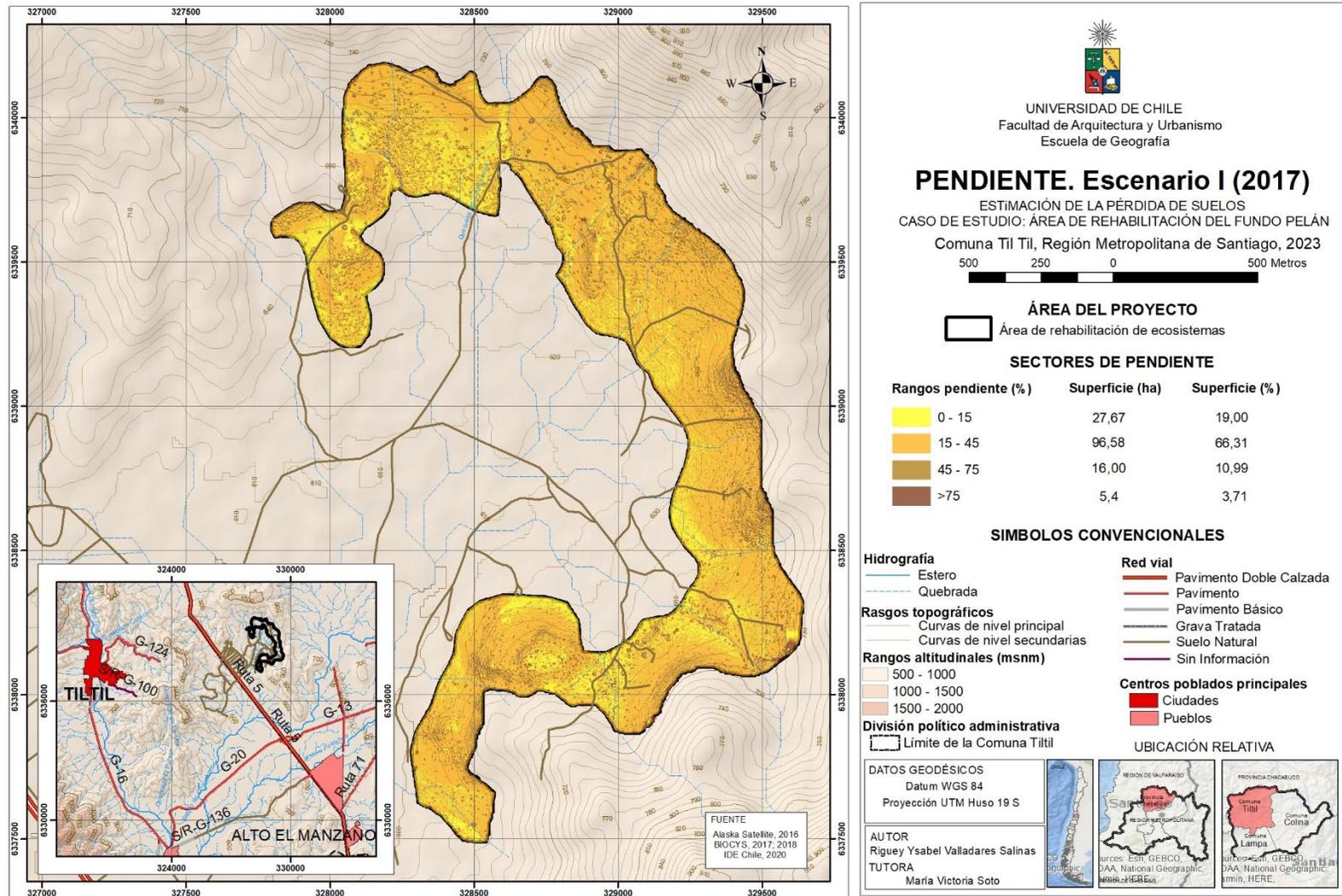


Figura 20. Pendiente en área de rehabilitación del Fundo Pelán (Escenario I).

ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS. CASO DE ESTUDIO: ÁREA DE REHABILITACIÓN DEL FUNDO PELÁN, COMUNA TIL TIL, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

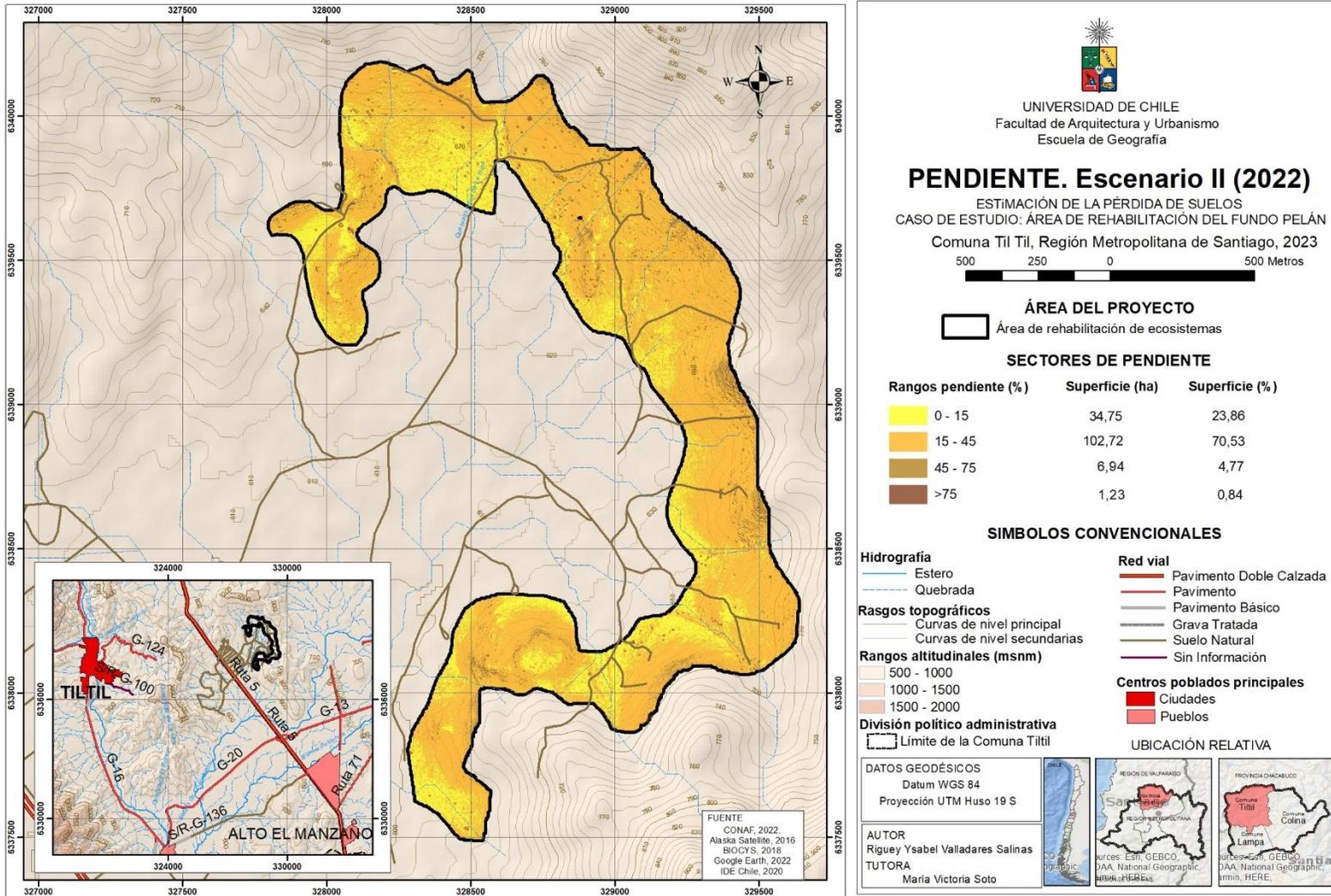


Figura 21. Pendiente en área de rehabilitación del Fundo Pelán (Escenario II).

4.1.4 Factor C

Para el año 2017, la cobertura presente eran bosques renovales abiertos y muy abiertos con coberturas de copas entre 20% al 40% y poca o nula cobertura del suelo, matorral con suculentas abiertos y semidensos con coberturas de copa entre 30% al 40% y mediana cobertura del suelo, generalmente adoptando factores C desde 0,39 a 0,42 (Tabla 16, Fig. 22).

Con el establecimiento de las forestaciones a 600 ejemplares por hectáreas (90.624 ejemplares aproximadamente) y las obras de conservación de suelos, en el año 2022 se presentan coberturas de bosque nativo renoval abierto con 30% a 40% de cobertura de copa y un 20% de cobertura de suelo. En este segundo escenario, se produce un mayor cubrimiento del suelo por vegetación herbácea y fijación de suelo por las raíces debido a la recuperación progresiva de las propiedades hidrológicas del suelo mediante la incorporación de medidas dirigidas a la cosecha agua, la retención de sedimentos y nutrientes; en consecuencia, los factores C del asumen valores entre 0,038 al 0,19 (Tabla 16, Fig. 23).

Tabla 16. Factor C para los Escenarios I y II

Uso	Bosque nativo renoval abierto		Matorral con suculentas semidenso	Bosque nativo renoval abierto	Matorral con suculentas abierto	Bosque nativo renoval muy abierto
% Cobertura copa	30-40		60 -90	30 - 40	30 - 40	20 – 30
%Suelo cubierto	80	20	60	0	40	0
Factor C	0,013	0,19	0,038	0,39	0,4	0,42
Superficie (ha) I - 2017	0	0	6,13	128,84	4,78	5,89
%	0	0	4,21	88,46	3,28	4,04
Superficie (ha) II - 2022	6,15	139,49	0	0	0	0
%	4,22	95,78	0	0	0	0

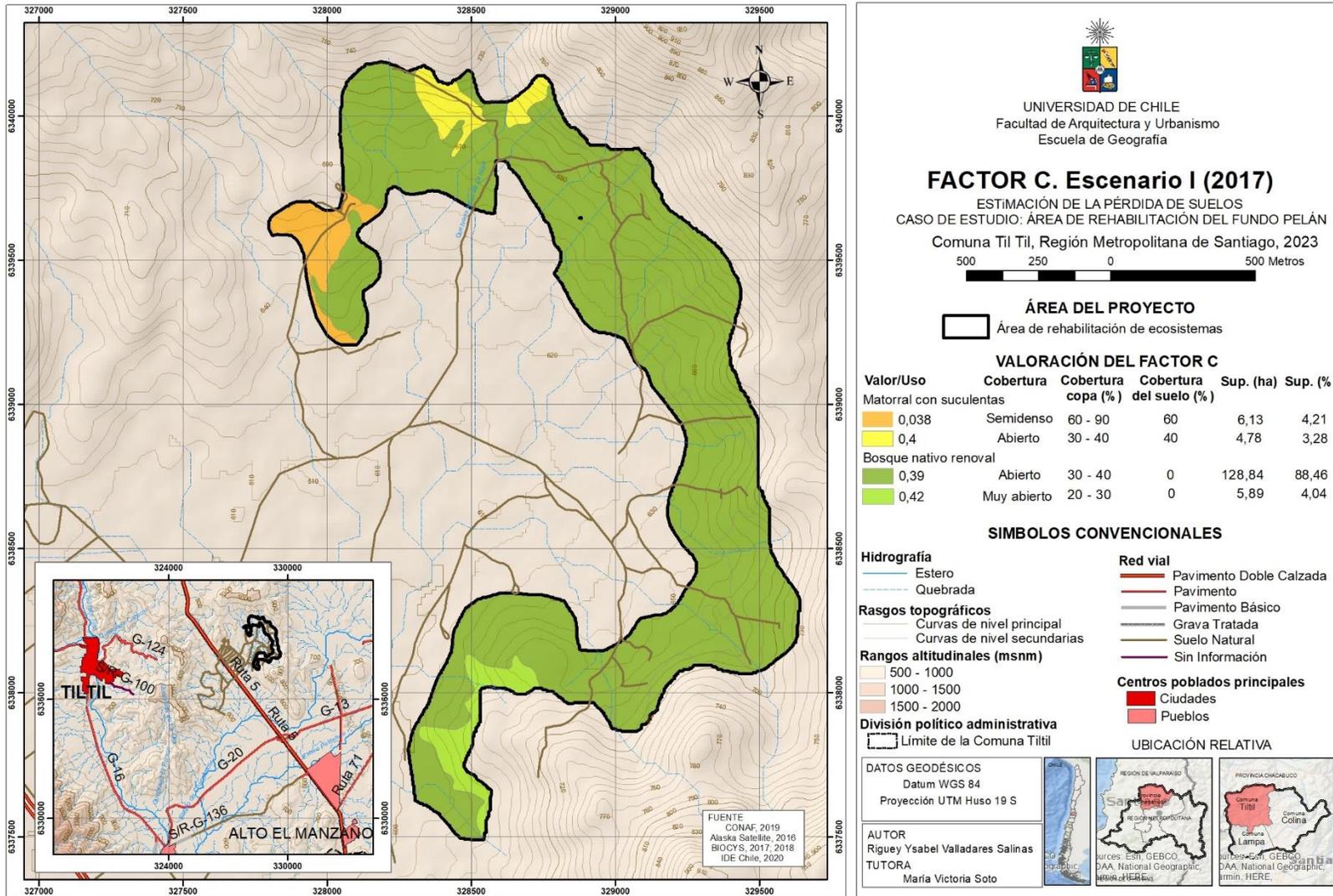


Figura 22. Factor C en área de rehabilitación del Fundo Pelán (Escenario I).

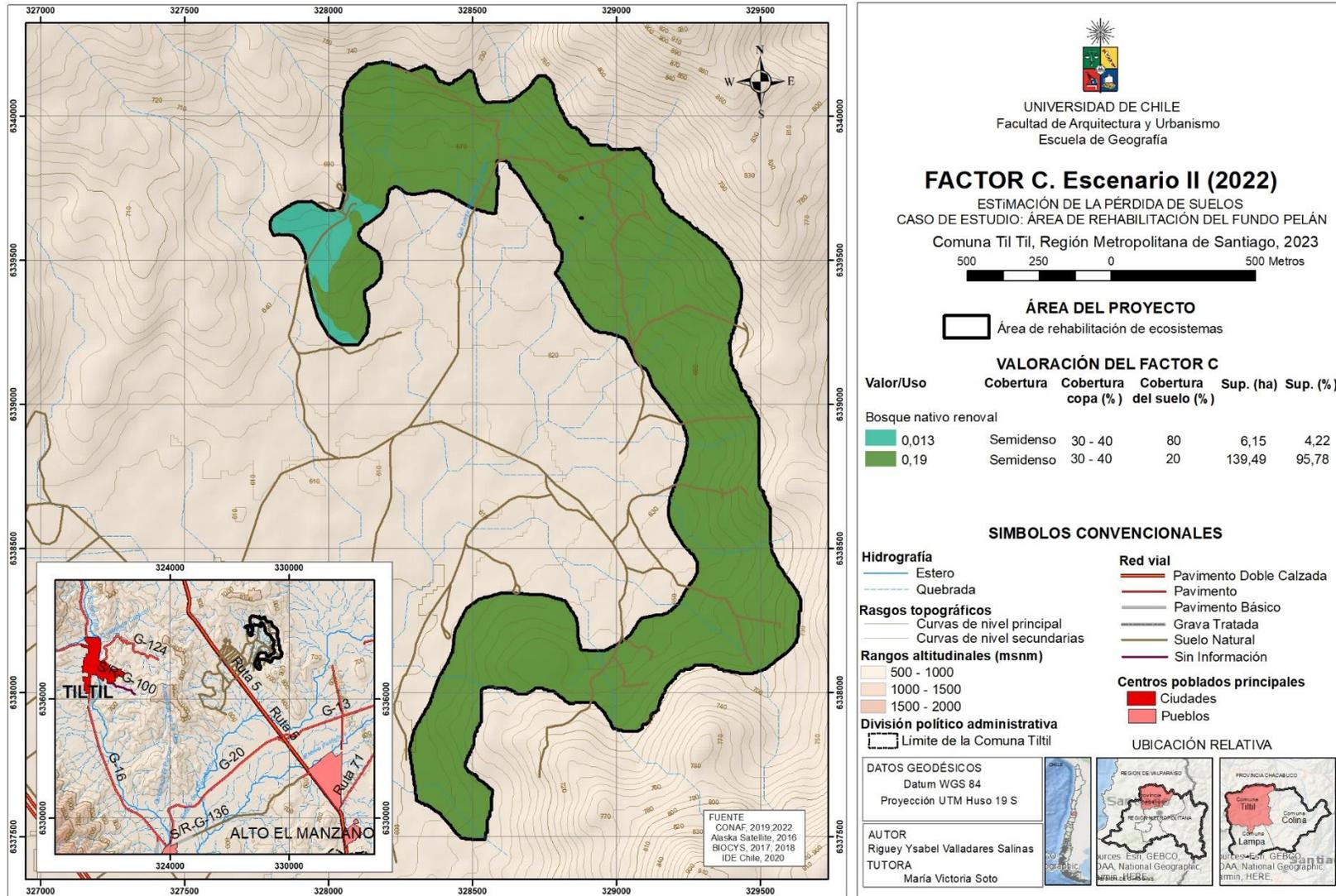


Figura 23. Factor C en área de rehabilitación del Fundo Pelán (Escenario II).

4.1.5 Factor P

En el área de rehabilitación, se implementaron plantaciones forestales con especies nativas. Adicionalmente, se ejecutaron obras de conservación de tipo bordos semicirculares, microterrazas forestales y microcuencas negarim.

En el Escenario I, al Factor P se le asignó el valor 1 por ser el escenario previo a la construcción de las obras (Tabla 17).

En el Escenario II, se destacan factores P entre 0,25 y 0,3 en las superficies ocupadas por las obras. En este caso, la mayor parte de la superficie está cubierta por microterrazas en 133,73 ha, seguido por bordos semicirculares en 6,73 ha y finalmente, microcuencas negarim en 5,18 ha (Tabla 17, Fig. 24).

Tabla 17. Factor P para los Escenario I y II

Tipo de obra de conservación	Bordos semicirculares	Microterrazza forestal	Negarim	Sin obras de conservación	Superficie total (ha)
Factor P	0,3	0,25	0,3	1	
Superficie (ha) Escenario I - 2017	0	0		145,64	145,64
%	0	0	0	100	100
Superficie (ha) Escenario II - 2022	6,73	133,73	5,18	0	145,64
%	4,62	91,82	3,56	0	100

4.1.6 Pérdida de suelos (A)

Para calcular la pérdida de suelos siguiendo la metodología de (WISCHMEIER & SMITH, 1978) se multiplicaron los factores R, K, LS, C y P obteniéndose seis clases.

En el Escenario I predominan pérdidas de suelos menores a $25 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ en el 76% de la superficie total, mientras que en el Escenario II debido a las intervenciones cambia esta tendencia, siendo las pérdidas de suelo menores a $5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ en el 97,34% de la superficie, lo que generó una mejora significativa en el control de erosión en 89,59 ha equivalente al 61,65% del área de rehabilitación (Tabla 18, Fig. 25, 26, 27 y 28).

Tabla 18. Pérdida de suelos mediante la implementación de la Ecuación USLE para los Escenarios I y II.

Pérdida de suelos (A) t.ha ⁻¹ .año ⁻¹	Escenario I - 2017		Escenario II - 2022		Diferencias	
	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%
0 – 5	51,98	35,69	141,57	97,34	89,59	61,65
5 – 10	15,09	10,36	3,73	2,56	-11,36	-7,8
10 – 25	43,62	29,95	0,34	0,1	-43,28	-29,85
25 – 50	27,37	18,79	0	0	-27,37	-18,79
50 – 100	7,18	4,93	0	0	-7,18	-4,93
100 – 200	0,4	0,27	0	0	-0,4	-0,27
Total	145,64	100	145,64	100		

ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS. CASO DE ESTUDIO: ÁREA DE REHABILITACIÓN DEL FUNDO PELÁN, COMUNA TIL TIL, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

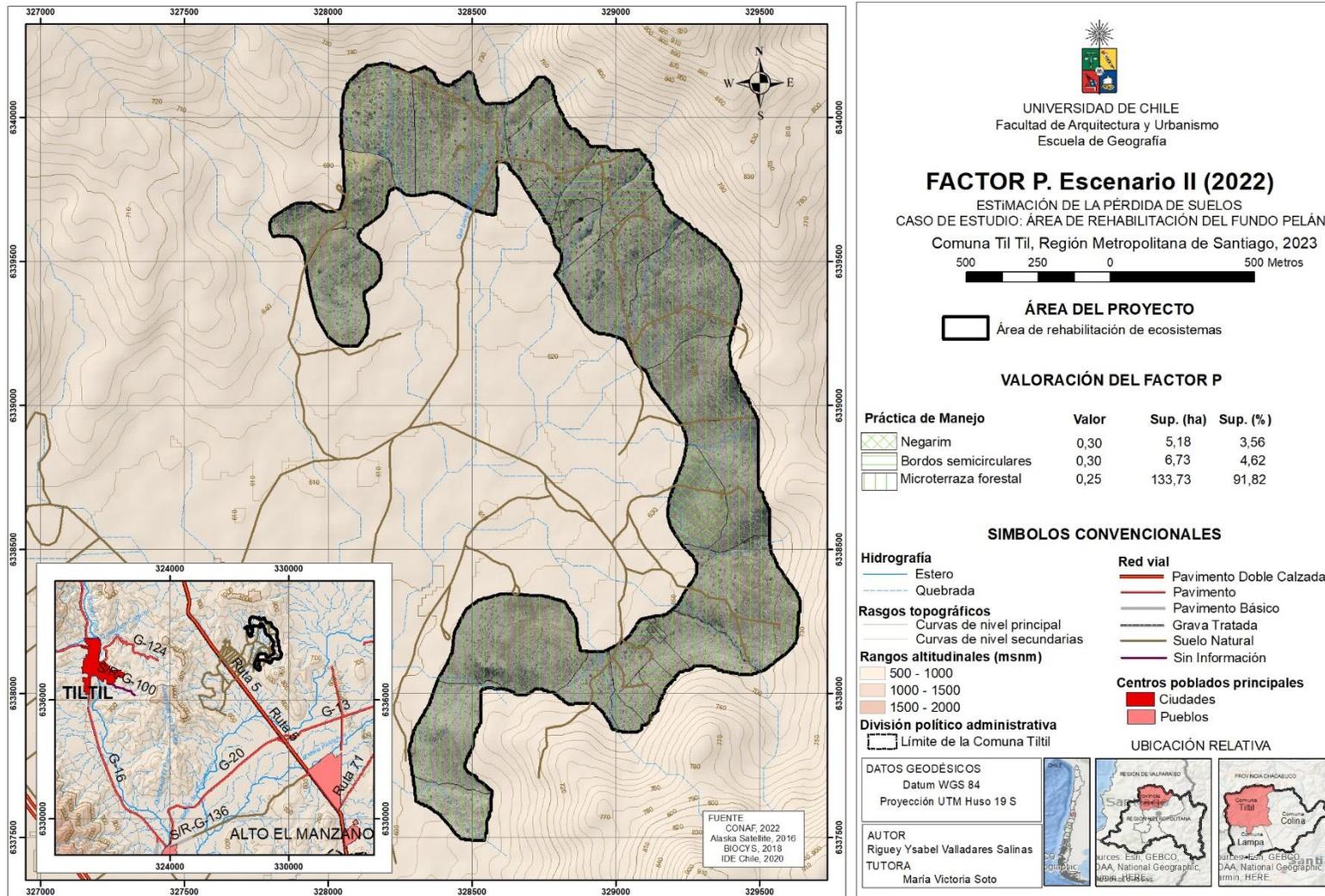


Figura 24. Factor P en área de rehabilitación del Fundo Pelán (Escenario II).

ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS. CASO DE ESTUDIO: ÁREA DE REHABILITACIÓN DEL FUNDO PELÁN, COMUNA TIL TIL, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

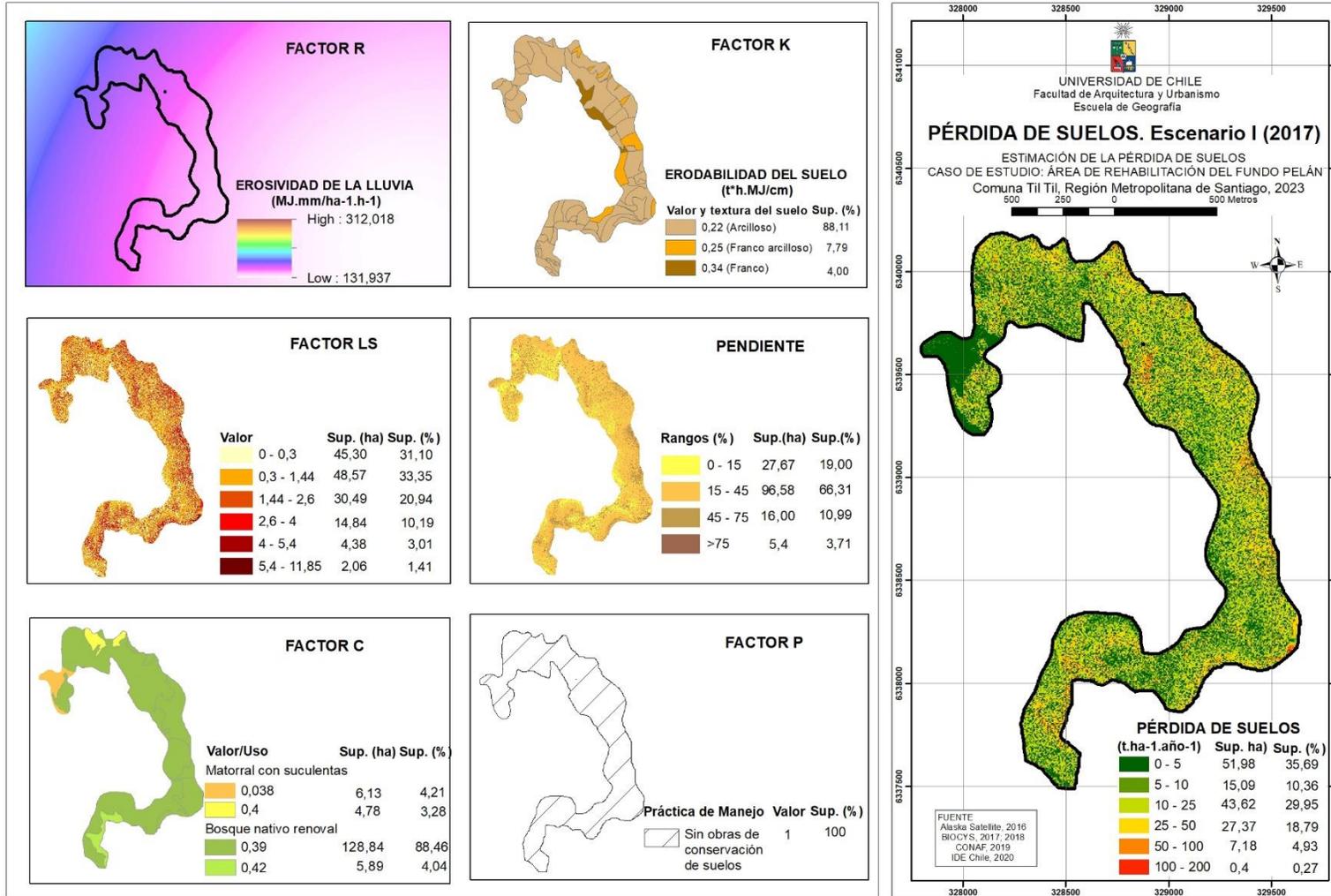


Figura 25. Factores que influyeron en la Estimación de la pérdida de suelos mediante la Ecuación USLE, Escenario I (2017)

ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS. CASO DE ESTUDIO: ÁREA DE REHABILITACIÓN DEL FUNDO PELÁN, COMUNA TIL TIL, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

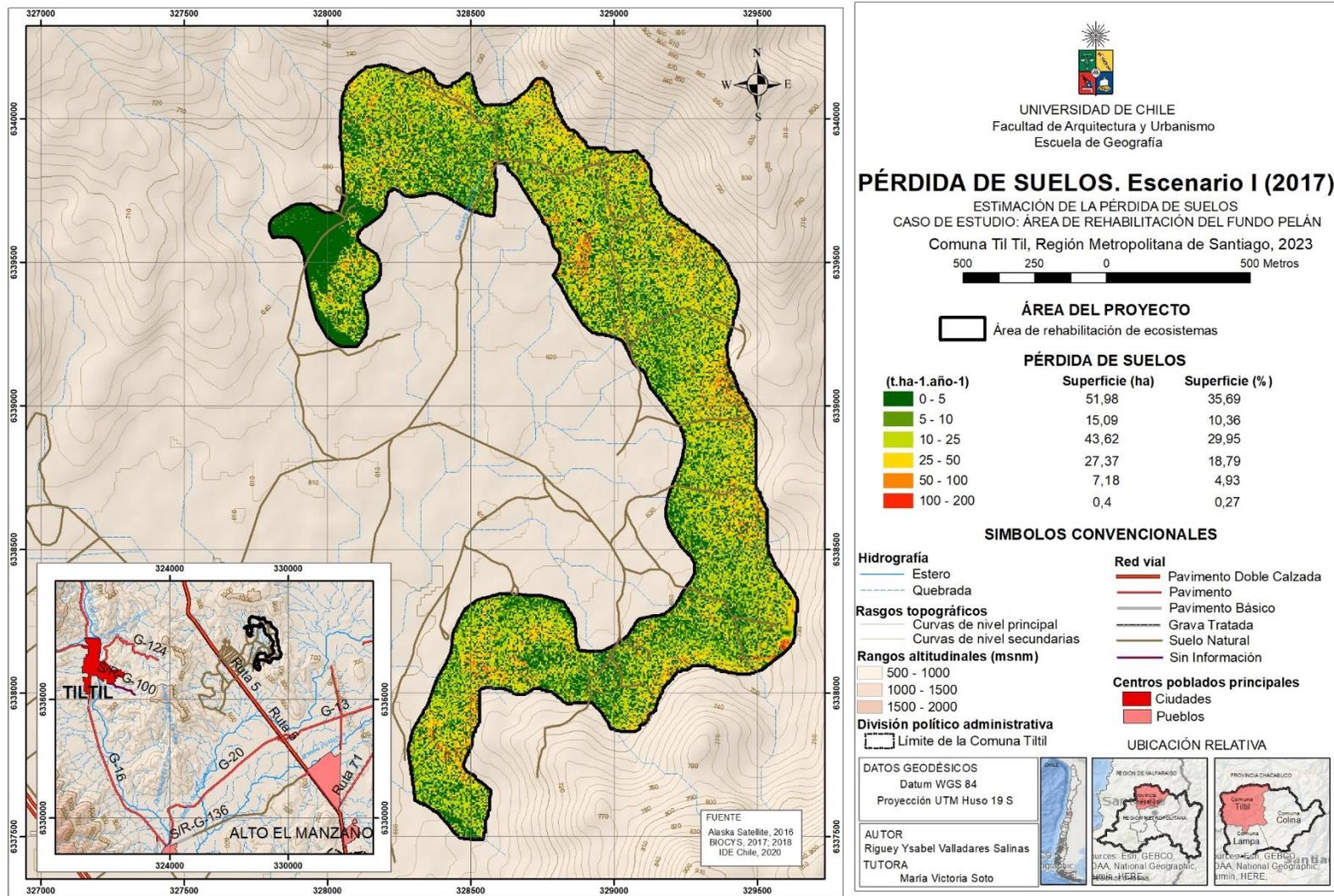


Figura 26. Estimación de la pérdida de suelos mediante la Ecuación USLE, Escenario I (2017)

ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS. CASO DE ESTUDIO: ÁREA DE REHABILITACIÓN DEL FUNDO PELÁN, COMUNA TIL TIL, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

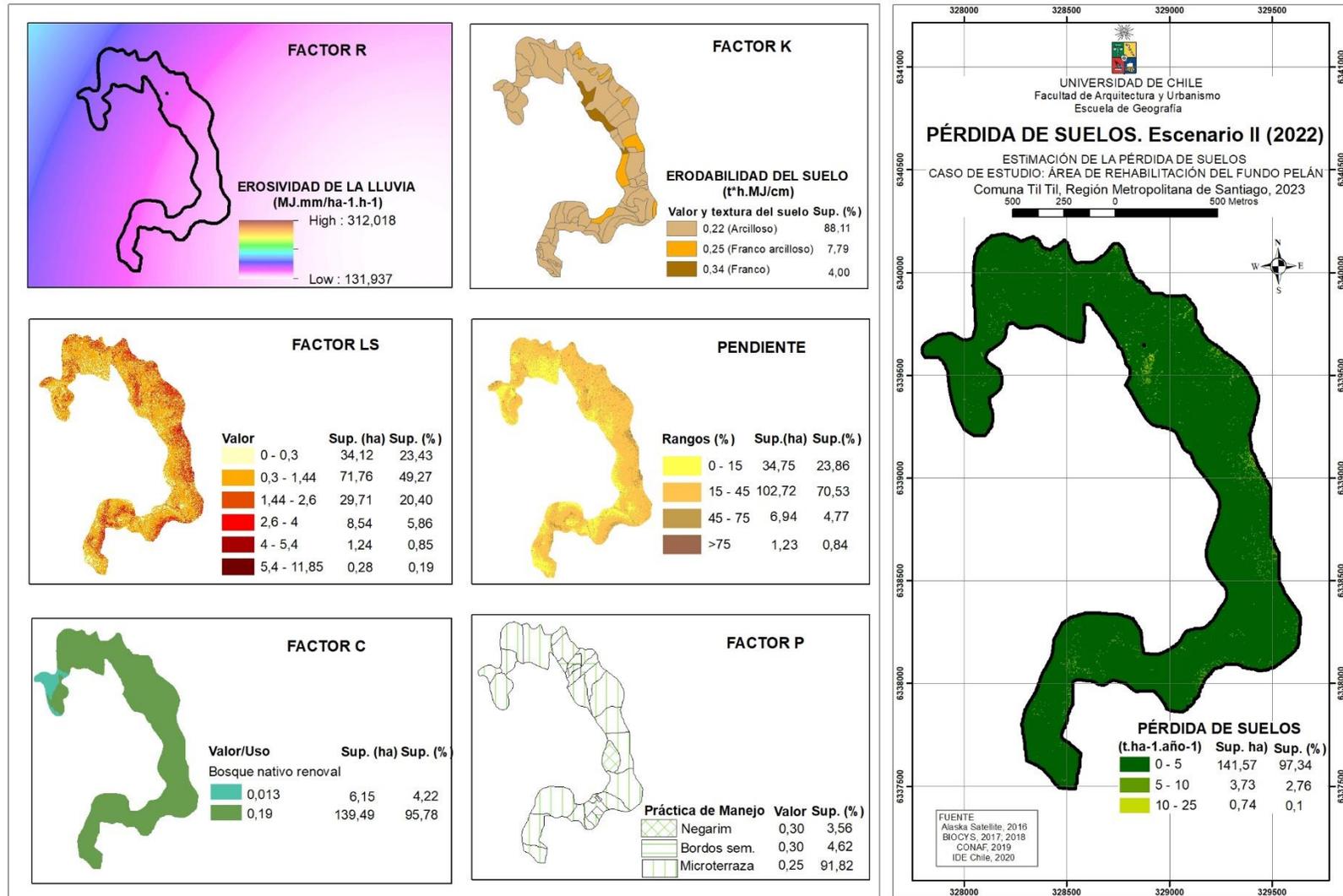


Figura 27. Factores que influyeron en la Estimación de la pérdida de suelos mediante la Ecuación USLE, Escenario II (2022)

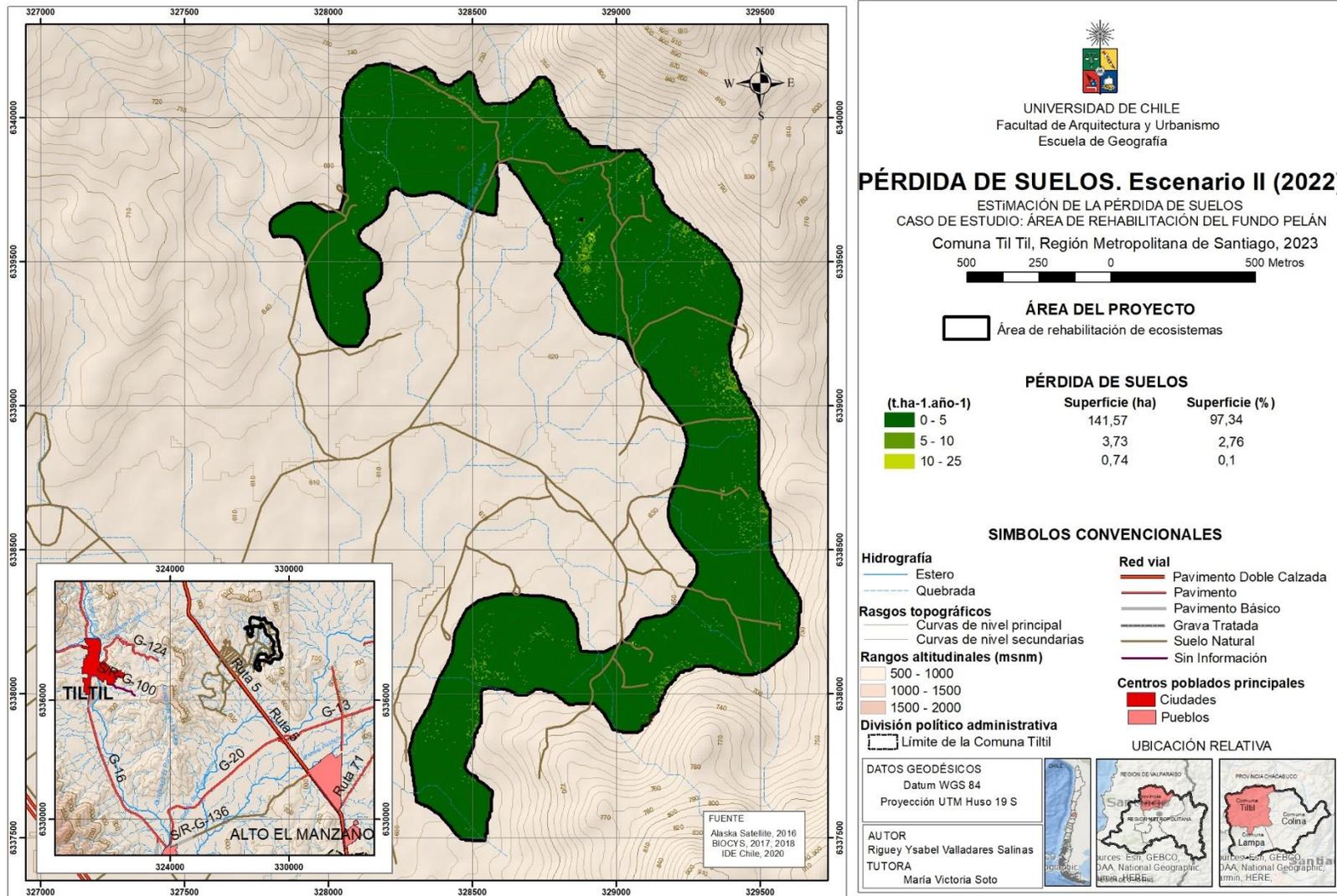


Figura 28. Estimación de la pérdida de suelos mediante la Ecuación USLE, Escenario II (2022)

4.2 Variación de los factores de la ecuación y la pérdida de suelos de ambos escenarios en el fundo.

En la estimación de la pérdida de suelos intervienen distintos factores que inciden en diferente medida en el resultado final. A continuación, se compara la superficie en hectáreas ocupada por cada factor valorado con respecto a la pérdida de suelo. De esta manera se observará que valores que se acercan a cero tendrán menos incidencia en la degradación del recurso suelo que los valores que tienden a alejarse.

4.2.1 Relaciones entre Pérdida de Suelos y el Factor LS

En el Escenario I, el Factor LS que predomina en 47,24 ha equivalente al 70% de los sitios con pérdidas menores a $10 \text{ t.ha}^{-1}\text{.año}^{-1}$ es menor a 1,44 mientras que en lugares con pérdidas entre $10 \text{ t.ha}^{-1}\text{.año}^{-1}$ y $50 \text{ t.ha}^{-1}\text{.año}^{-1}$, se presentan superficies con Factor LS entre 1,44 a 4 en 24,89 ha equivalente al 35% de la superficie de la clase. Así mismo, se observó que en lugares con pérdidas entre $50 \text{ t.ha}^{-1}\text{.año}^{-1}$ y $200 \text{ t.ha}^{-1}\text{.año}^{-1}$, específicamente en 2,51 ha equivalente al 33% de la clase, se presentaron valores entre 2,6 a 11,85 (Tabla 19)

Tabla 19. Comparación entre la Pérdida de Suelos y el Factor LS para el Escenario I

Pérdida de suelos (A) $\text{t.ha}^{-1}\text{.año}^{-1}$	Factor LS. Escenario I - 2017, Superficie (ha)						Total
	0 - 0,3	0,3 - 1,44	1,44 - 2,6	2,6 - 4	4 - 5,4	5,4 - 11,85	
0 - 5	16,98	18,38	9,9	4,64	1,4	0,68	51,98
5 - 10	4,98	6,9	2,32	0,61	0,19	0,1	15,09
10 - 25	13,1	16,01	9,73	3,6	0,84	0,34	43,62
25 - 50	7,89	6,12	6,97	4,59	1,29	0,5	27,37
50 - 100	2,21	1,11	1,51	1,35	0,62	0,38	7,18
100 - 200	0,13	0,04	0,06	0,06	0,04	0,06	0,4
Total	45,3	48,57	30,49	14,84	4,38	2,06	145,64

En el Escenario II, se observó que 141,57 ha equivalente al 97% del área de rehabilitación pasó a presentar un Factor LS menor a 2,6 con pérdidas de suelos menores a $5 \text{ t.ha}^{-1}\text{.año}^{-1}$ (Tabla 20).

Tabla 20. Comparación entre la Pérdida de suelos y el Factor LS para el Escenario II

Pérdida de suelos (A) $\text{t.ha}^{-1}\text{.año}^{-1}$	Factor LS. Escenario II - 2022, Superficie (ha)						Total general
	0 - 0,3	0,3 - 1,44	1,44 - 2,6	2,6 - 4	4 - 5,4	5,4 - 10,57	
0 - 5	33,38	71,09	28,5	7,48	0,93	0,2	141,57
5 - 10	0,68	0,62	1,14	0,99	0,26	0,04	3,73
10 - 25	0,06	0,05	0,07	0,07	0,05	0,04	0,34
Total	34,12	71,76	29,71	8,54	1,24	0,28	145,64

A partir de las diferencias calculadas del Escenario II respecto al Escenario I, se logró constatar que la mayor parte de la superficie ocupada por Factor LS con pérdidas de suelos superiores a 5 t.ha⁻¹.año⁻¹ disminuyen, de esta manera se incrementa la superficie para factores LS entre 0 a 4 con pérdidas de suelo menores a 5 t.ha⁻¹.año⁻¹ en 89,6 hectáreas (Tabla 21).

Tabla 21. Comparación de las diferencias del Factor LS para los Escenarios I y II por pérdida de suelos

Pérdida de suelos (A) t.ha ⁻¹ .año ⁻¹	Diferencias Factor LS (Escenario II 2022 - Escenario I 2017), Superficie (ha)						Total
	0 - 0,3	0,3 - 1,44	1,44 - 2,6	2,6 - 4	4 - 5,4	5,4 - 11,85	
0 - 5	16,4	52,71	18,6	2,84	-0,47	-0,48	89,6
5 - 10	-4,3	-6,28	-1,18	0,38	0,07	-0,06	-11,37
10 - 25	-13,04	-15,96	-9,66	-3,53	-0,79	-0,3	-43,28
25 - 50	-7,89	-6,12	-6,97	-4,59	-1,29	-0,5	-27,36
50 - 100	-2,21	-1,11	-1,51	-1,35	-0,62	-0,38	-7,18
100 - 200	-0,13	-0,04	-0,06	-0,06	-0,04	-0,06	-0,39

4.2.2 Relaciones entre Pérdida de Suelos y la Pendiente

En el Escenario I, se observa que las pendientes son menores al 45% en 58,86 ha equivalente al 70% de las unidades donde predominan pérdidas menores a 10 t.ha⁻¹.año⁻¹. Mientras que en lugares con pérdidas entre 10 t.ha⁻¹.año⁻¹ a 50 t.ha⁻¹.año⁻¹ son frecuentes las pendientes entre 15% a 45%.

En los lugares con pérdidas superiores a 50 t.ha⁻¹.año⁻¹, las pendientes son mayores al 45% en el 44% de la superficie de la unidad (7,58 ha)(Tabla 22).

Tabla 22. Comparación entre la Pérdida de suelos y la Pendiente para el Escenario I

Pérdida de suelos (A) t.ha ⁻¹ .año ⁻¹	Pendiente (%)/Superficie (ha). Escenario I - 2017				Total
	0 - 15	15 - 45	45 - 75	>75	
0 - 5	12,88	31,86	5,28	1,96	51,98
5 - 10	5,32	8,8	0,72	0,26	15,09
10 - 25	7,12	32,4	3,22	0,88	43,62
25 - 50	1,86	19,76	4,51	1,24	27,37
50 - 100	0,47	3,61	2,16	0,94	7,18
100 - 200	0,02	0,15	0,11	0,12	0,4
Total	27,67	96,58	16	5,4	145,64

En el Escenario II, en los lugares con pérdidas de suelos menores a 10 t.ha⁻¹.año⁻¹ predominan pendientes menores a 45% (Tabla 23).

Tabla 23. Comparación entre la Pérdida de suelos y la Pendiente para el Escenario II

Pérdida de suelos (A) t.ha ⁻¹ .año ⁻¹	Pendiente (%)/Superficie (ha). Escenario II - 2022				
	0 - 15	15 - 45	45 - 75	>75	Total
0 - 5	34,66	100,38	5,69	0,84	141,57
5 - 10	0,09	2,22	1,14	0,29	3,73
10 - 25	0	0,12	0,12	0,1	0,34
Total	34,75	102,72	6,95	1,23	145,64

Al compararse los cambios de pendiente, se observa que se produjo un descenso de las pendientes mayores a 45% y se incrementaron las menores a 45%. Específicamente, el rango de pendiente de 0 a 15% se incrementó en 21,78 ha y el rango 15% a 45% en 68,52 hectáreas con pérdidas de suelos menores a 5 t.ha⁻¹.año⁻¹ (Tabla 24).

Tabla 24. Comparación de las diferencias de la Pendiente para los Escenarios I y II por pérdida de suelos

Pérdida de suelos (A) t.ha ⁻¹ .año ⁻¹	Diferencias Pendiente (%)/Superficie (ha). Escenario II - I				
	0 - 15	15 - 45	45 - 75	>75	Total
0 - 5	21,78	68,52	0,41	-1,12	89,59
5 - 10	-5,23	-6,58	0,42	0,03	-11,36
10 - 25	-7,12	-32,28	-3,1	-0,78	-43,28
25 - 50	-1,86	-19,76	-4,51	-1,24	-27,37
50 - 100	-0,47	-3,61	-2,16	-0,94	-7,18
100 - 200	-0,02	-0,15	-0,11	-0,12	-0,4

4.2.3 Relaciones entre Pérdida de Suelos y el Factor C

En el Escenario I, la mayor parte de la superficie estuvo repartida en las distintas categorías de pérdidas de suelo por predominar una cobertura de bosque nativo renoval abierto con un Factor C de 0,39 en 128,84 ha equivalente al 88,46% del área de rehabilitación (Tabla 25).

Tabla 25. Comparación entre la Pérdida de suelos y el Factor C para el Escenario I

Pérdida de suelos (A) t.ha ⁻¹ .año ⁻¹	Factor C/Superficie (Ha). Escenario I - 2017						
	0,013	0,19	0,038	0,39	0,4	0,42	Total
0 - 5	0	0	5,92	42,91	1,31	1,84	51,98
5 - 10	0	0	0,19	14,44	0,24	0,22	15,09
10 - 25	0	0	0,02	40,93	1,47	1,2	43,62
25 - 50	0	0	0	24,13	1,45	1,79	27,37
50 - 100	0	0	0	6,13	0,3	0,75	7,18
100 - 200	0	0	0	0,3	0,01	0,09	0,4
Total			6,13	128,84	4,78	5,89	145,64

En el Escenario II, considerando la incorporación de las plantaciones forestales con especies nativas, se asumió la existencia actual de un bosque nativo renoval abierto que generó un cambio significativo en la cobertura de copa y del suelo asumiendo un Factor C de 0,19 en 135,41 ha con pérdidas de suelos menores a 5 t.ha⁻¹.año⁻¹ (Tabla 26)

Tabla 26. Comparación entre la Pérdida de suelos y el Factor C para el Escenario II

Pérdida de suelos (A) t.ha ⁻¹ .año ⁻¹	Factor C/Superficie (Ha). Escenario I - 2022						
	0,013	0,19	0,038	0,39	0,4	0,42	Total
0 - 5	6,15	135,41	0	0	0	0	141,57
5 - 10	0	3,73	0	0	0	0	3,73
10 - 25	0	0,34	0	0	0	0	0,34
Total	6,15	139,48					145,64

Luego de la implementación de acciones de rehabilitación, los factores C superiores a 0,39 redujeron su superficie y se incrementó la superficie de los factores C menores a 0,19 (Tabla 27).

Tabla 27. Comparación de las diferencias del Factor C para los Escenarios I y II por pérdida de suelos

Pérdida de suelos (A) t.ha ⁻¹ .año ⁻¹	Diferencias Factor C/Superficie (Ha). Escenario 2022-Escenario 2017						
	0,013	0,19	0,038	0,39	0,4	0,42	Total
0 - 5	6,15	135,41	-5,92	-42,91	-1,31	-1,84	89,59
5 - 10	0	3,73	-0,19	-14,44	-0,24	-0,22	-11,36
10 - 25	0	0,34	-0,02	-40,93	-1,47	-1,2	-43,28
25 - 50	0	0	0	-24,13	-1,45	-1,79	-27,37
50 - 100	0	0	0	-6,13	-0,3	-0,75	-7,18
100 - 200	0	0	0	-0,3	-0,01	-0,09	-0,4

4.2.4 Relaciones entre Pérdida de Suelos y el Factor P

Previo a la construcción de las obras de control de erosión, el Factor P adoptó el valor 1, en consecuencia, en el Escenario I, los lugares con pérdidas mayores a 10 t.ha⁻¹.año⁻¹ constituían 78,57 ha que representaban el 53,95% de la superficie (Tabla 28).

En el Escenario II, los valores del Factor P asignados a bordos semicirculares, microterrazas forestales y negarim estuvieron oscilaron entre 0,25 a 0,3. Por la acción de éstas obras, las pérdidas de suelos mayores a 10 t.ha⁻¹.año⁻¹ ocuparon 0,34 ha equivalentes al 0,23% de la superficie total (Tabla 29).

Tabla 28. Comparación entre la Pérdida de suelos y el Factor P para el Escenario I

Pérdida de suelos (A)	Factor P/Superficie (ha). Escenario I - 2017					
	t.ha ⁻¹ .año ⁻¹	Bordos semicirculares	Microterrazza forestal	Negarim	Sin obras	Total
Factor P		0,3	0,25	0,3	1	
0 - 5					51,98	51,98
5 - 10					15,09	15,09
10 - 25					43,62	43,62
25 - 50					27,37	27,37
50 - 100					7,18	7,18
100 - 200					0,4	0,4
Total					145,64	145,64

Tabla 29. Comparación entre la Pérdida de suelos y el Factor P para el Escenario II

Pérdida de suelos (A)	Factor P/Superficie (ha). Escenario II - 2022					
	t.ha ⁻¹ .año ⁻¹	Bordos semicirculares	Microterrazza forestal	Negarim	Sin obras	Total
Factor P		0,3	0,25	0,3	1	
0 - 5		6,37	130,03	5,16	0	141,57
5 - 10		0,32	3,39	0,02	0	3,73
10 - 25		0,03	0,31	0	0	0,34
Total		6,73	133,73	5,18	0	145,64

Al analizar las diferencias, se incrementó la superficie con pérdidas menores a 5 t.ha⁻¹.año⁻¹ en 89,58 ha con factores P entre 0,25 a 0,3 (Tabla 30).

Tabla 30. Comparación de las diferencias del Factor P para el Escenario I y II por pérdida de suelos

Pérdida de suelos (A)	Diferencias Factor P/Superficie (ha). Escenario II - 2022 - Escenario I 2017					
	t.ha ⁻¹ .año ⁻¹	Bordos semicirculares	Microterrazza forestal	Negarim	Sin obras	Total
Factor P		0,3	0,25	0,3	1	
0 - 5		6,37	130,03	5,16	-51,98	89,58
5 - 10		0,32	3,39	0,02	-15,09	-11,36
10 - 25		0,03	0,31	0	-43,62	-43,28
25 - 50		0	0	0	-27,37	-27,37
50 - 100		0	0	0	-7,18	-7,18
100 - 200		0	0	0	-0,4	-0,4

4.3 Características relevantes de la pérdida de suelos para los Escenarios I y II

4.3.1 Escenario I

En la Tabla 31, se presenta una síntesis de las características presentes en los factores que influyeron en la pérdida de suelos con la Ecuación USLE estimada para el Escenario I, cuyas categorías se describen a continuación.

4.3.1.1 Pérdidas de suelos 0 – 5 t.ha⁻¹.año⁻¹:

Los suelos con pérdidas entre 0 – 5 t.ha⁻¹.año⁻¹ cubrían una superficie de 51,98 ha equivalentes al 35,69% de la superficie total de rehabilitación. Presentan suelos arcillosos (Factor K: 0,22) con bosques nativos renoval abiertos (Factor C: 0,39), una pendiente de 15% a 45% en el 61,29% de la superficie de la clase, seguida por sectores con inclinaciones entre 0% a 15% en el 24,78%. Su factor LS representativo es menor a 1,44 en el 68,03% del área y sin tratamientos de manejo del ecosistema (Factor P:1).

4.3.1.2 Pérdidas de suelos 5 – 10 t.ha⁻¹.año⁻¹.

Los sectores que presentaron pérdidas entre 5 – 10 t.ha⁻¹.año⁻¹ cubrían un área de 15,09 ha equivalentes al 10,36% de la superficie total de trabajo. Presentan suelos arcillosos (Factor K: 0,22) con bosques nativos renoval abiertos (Factor C: 0,39), una pendiente de 15% a 45% en el 58,32% de la superficie de la clase, seguida por sectores con inclinaciones entre 0% a 15% en el 35,26%. Su Factor LS representativo es menor a 1,44 en el 78,73% del área y sin tratamientos de manejo del ecosistema (Factor P:1).

4.3.1.3 Pérdidas de suelos 10 – 25 t.ha⁻¹.año⁻¹

Los ambientes que presentaron pérdidas entre 10 – 25 t.ha⁻¹.año⁻¹ abarcaron de 43,62 ha equivalentes al 29,95% del área en estudio. Prevalen suelos arcillosos (Factor K: 0,22) con bosques nativos renoval abiertos (Factor C: 0,39), una pendiente de 15% a 45% en el 74,28% de la superficie de la clase, seguida por sectores con inclinaciones entre 0% a 15% en el 16,32%. Su Factor LS representativo es menor a 1,44 en el 66,7% del área, sin embargo, en el 31% de la superficie este factor oscila entre 1,44 a 4. Este escenario no presenta tratamientos de manejo del ecosistema (Factor P:1).

4.3.1.4 Pérdidas de suelos 25 – 50 t.ha⁻¹.año⁻¹

Los sitios que presentaron pérdidas entre 25 – 50 t.ha⁻¹.año⁻¹ cubrieron 27,37 ha equivalentes al 18,79% del área total. Predominan suelos arcillosos (Factor K: 0,22) con bosques nativos renoval abiertos (Factor C: 0,39), una pendiente de 15% a 45% en el 72,2% de la superficie de la clase, seguida por sectores con inclinaciones entre 45% a 75% en el 16,48% del área. Su Factor LS representativo es menor a 1,44 en el 51,19% del área, sin embargo, en el 42,24% de la superficie este factor oscila entre 1,44 a 4. Este escenario no presenta tratamientos de manejo del ecosistema (Factor P:1).

4.3.1.5 Pérdidas de suelos 50 – 100 t.ha⁻¹·año⁻¹

Los lugares con pérdidas entre 50 – 100 t.ha⁻¹·año⁻¹ se localizaron en 7,18 ha equivalentes al 4,93% del área total. Se emplazan fundamentalmente sobre suelos arcillosos (Factor K: 0,22) con bosques nativos renoval abiertos (Factor C: 0,39). Las pendientes más inclinadas se incrementan en relación a los ecosistemas a las categorías anteriormente descritas; pues, la pendiente de 15% a 45% en el 50,28% de la superficie de la clase, mientras que los sectores con inclinaciones mayores al 45% pasan a representar el 43,17% del área. Así mismo, se observa cambios significativos en el Factor LS. El Factor LS menor a 1,44 representa el 46,24% del área, así mismo, en el 53,76% de la superficie este factor oscila entre 1,44 a 11,85. Este escenario no presenta prácticas de manejo conservacionista del ecosistema (Factor P:1).

4.3.1.6 Pérdidas de suelos 100 – 200 t.ha⁻¹·año⁻¹

Los ecosistemas que presentaron pérdidas entre 100 – 200 t.ha⁻¹·año⁻¹ se ubicaron en 0,4 ha equivalentes al 0,27% del área total. Están constituidos principalmente por suelos arcillosos (Factor K: 0,22) con bosques nativos renoval abiertos (Factor C: 0,39). Las pendientes mayores a 45% representan el 57,5% del área; mientras que las pendientes entre 15% a 45% pasaron a representar el 37,5%. El Factor LS entre 1,44 a 11,85 paso a representar el 56,41% de la superficie de la clase. Esta clase no presenta implementación de prácticas de manejo conservacionista del ecosistema (Factor P:1).

Tabla 31. Resumen de las características predominantes por categoría de pérdida de suelos para el Escenario I.

Pérdida de suelos (A) t.ha ⁻¹ .año ⁻¹	K	LS	P(%)	C	P	Sup (ha)	Sup (%)
0 - 5	0,22. Suelos Arcillosos	(0 – 1,44) en 68,03% de la superficie de la clase	(15-45) en 61,29% de la superficie de la clase (0-15) en 24,78% de la superficie de la clase	0,39. Bosque nativo renoval abierto con poca o nula cobertura de suelo (0%)	1.Sin obras	51,98	35,69
5 - 10	0,22. Suelos Arcillosos	(0 – 1,44) en 78,73% de la superficie de la clase	(15-45) en 58,32% de la superficie de la clase (0-15) en 35,26% de la superficie de la clase	0,39. Bosque nativo renoval abierto con poca o nula cobertura de suelo (0%)	1.Sin obras	15,09	10,36
10 - 25	0,22. Suelos Arcillosos	(0 – 1,44) en 66,7% de la superficie de la clase (1,44 – 4) en 31% de la superficie de la clase	(15-45) en 74,28%% de la superficie de la clase (0-15) en 16,32% de la superficie de la clase	0,39 Bosque nativo renoval abierto con poca o nula cobertura de suelo (0%)	1.Sin obras	43,62	29,95
25 - 50	0,22. Suelos Arcillosos	(0 – 1,44) en 51,19% de la superficie de la clase (1,44 – 4) - en 42,24% de la superficie de la clase	(15-45) en 72,2%% de la superficie de la clase (45 – 75) en 16,48% de la superficie de la clase	0,39 Bosque nativo renoval abierto con poca o nula cobertura de suelo (0%)	1.Sin obras	27,37	18,79

ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS. CASO DE ESTUDIO: ÁREA DE REHABILITACIÓN DEL FUNDO PELÁN, COMUNA TIL TIL, REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO

50 - 100	0,22. Suelos Arcillosos	(0 – 1,44) en 46,24% de la superficie de la clase (1,44 – 11,85) en 53,76% de la superficie de la clase	(15-45) en 50,28% de la superficie de la clase (>45) en 43,17% de la superficie de la clase	0,39 con poca o nula cobertura de suelo (0%) Bosque nativo renoval abierto	1.Sin obras	7,18	4,93
100 - 200	0,22. Suelos Arcillosos	(0 – 1,44) en 43,59% de la superficie de la clase (1,44 – 11,85) en 56,41% de la superficie de la clase	(15-45) en 37,5% de la superficie de la clase (>45) en 57,5% de la superficie de la clase	0,39 Bosque nativo renoval abierto con poca o nula cobertura de suelo (0%)	1.Sin obras	0,4	0,27
						145,64	100

4.3.2 Escenario II

En la Tabla 32, se presenta una síntesis de las características presentes en los factores que influyeron en la pérdida de suelos con la Ecuación USLE estimada para el Escenario I, cuyas categorías se describen a continuación.

4.3.2.1 Pérdidas de suelos 0 – 5 t.ha⁻¹·año⁻¹

Los sectores que presentaron pérdidas entre 5 – 10 t.ha⁻¹·año⁻¹ abarcan un área de 141,57 ha equivalentes al 97,34% de la superficie total de trabajo. Presentan suelos arcillosos (Factor K: 0,22) con bosques nativos renoval abierto con una cobertura del suelo del 20% aproximadamente (Factor C: 0,19), una pendiente de 15% a 45% en el 70,9% de la superficie de la clase, seguida por sectores con inclinaciones entre 0% a 15% en el 24,48%. Su Factor LS representativo es menor a 1,44 en el 73,8% del área y tratamientos de manejo del ecosistema con la implementación de microterrazas (Factor P: 0,25) en 91,85%, bordos (Factor P: 0,30) en 4,5% y negarim (Factor P:0,30) en 3,64% del área total de la categoría.

4.3.2.2 Pérdidas de suelos 5 – 10 t.ha⁻¹·año⁻¹

Los sectores que presentaron pérdidas entre 5 – 10 t.ha⁻¹·año⁻¹ cubren un área de 3,73 ha equivalentes al 2,56% de la superficie total de trabajo. Presentan suelos arcillosos (Factor K: 0,22) con bosques nativos renoval abierto con un suelo cubierto del 20% aproximadamente (Factor C: 0,19), una pendiente de 15% a 45% en el 59,52% de la superficie de la clase, seguida por sectores con inclinaciones mayores al 45% en el 34,85%. Su Factor LS representativo entre 1,44 a 2,6 en 57,1% del área, seguido de Factor LS menor a 1,44 en 34,85% de la superficie. Posee tratamientos de manejo del ecosistema con la implementación de microterrazas (Factor P: 0,25) en 90,88%, bordos (Factor P: 0,30) en 8,58% y negarim (Factor P:0,30) en 0,54% del área total de la categoría.

4.3.2.3 Pérdidas de suelos 10 – 25 t.ha⁻¹·año⁻¹

Los ambientes que presentaron pérdidas entre 10 – 25 t.ha⁻¹·año⁻¹ abarcaron de 0,34 ha equivalentes al 0,1% del área en estudio. Prevalcen suelos arcillosos (Factor K: 0,22) con bosques nativos renoval abierto con un suelo cubierto del 20% aproximadamente (Factor C: 0,19), una pendiente de mayor a 45% en el 64,7% de la superficie de la clase, seguida por sectores con inclinaciones entre 15% a 45% en el 35,29%. Su Factor LS representativo varía entre 1,44 a 10,57 en el 67,65% del área, sin embargo, en el 32,36% de la superficie este factor es menor a 1,44. Este escenario presenta tratamientos de manejo del ecosistema a través de la construcción de microterrazas (Factor P: 0,25) en 91,18% y bordos (Factor P: 0,30) en 8,82% del área total de la categoría.

Tabla 32. Resumen de las características predominantes por categoría de pérdida de suelos para el Escenario II

Pérdida de suelos (A) t.ha ⁻¹ .año ⁻¹	K	LS	P(%)	C	P	Sup (ha)	Sup (%)
0 - 5	0,22. Suelos Arcillosos	(0 – 1,44) en 73,8% de la superficie de la clase	(15-45) en 70,9% de la superficie de la clase (0-15) en 24,48% de la superficie de la clase	0,19. Bosque nativo renoval abierto. 20% de suelo cubierto.	0,25. Microterrazza (91,85%) 0,3- Bordos (4,5%) 0,3. Negarim (3,64%) de la superficie de la clase	141,57	97,34
5 - 10	0,22. Suelos Arcillosos	(1,44– 2,6) en 57,1% de la superficie de la clase (0 – 1,44) en 34,85% de la superficie de la clase	(15-45) en 59,52% de la superficie de la clase (>45) en 38,33% de la superficie de la clase	0,19. Bosque nativo renoval abierto. 20% de suelo cubierto.	0,25. Microterrazza (90,88%) 0,3. Bordos (8,58%) 0,3. Negarim de la superficie de la clase (0,54%)	3,73	2,56
10 - 25	0,22. Suelos Arcillosos	(1,44– 10,57) en 67,65% de la superficie de la clase (0 – 1,44) en 32,36% de la superficie de la clase	(>45) en 64,7% de la superficie de la clase (15-45) en 35,29% de la superficie de la clase	0,19. Bosque nativo renoval abierto. 20% de suelo cubierto.	Microterrazza (91,18%) Bordos (8,82%) de la superficie de la clase	0,34	0,1
Total						145,64	100

CAPITULO 5. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Discusión de resultados

La pérdida de cobertura vegetal es un problema creciente, especialmente la cobertura de bosque. Para el periodo 1995-2000 ocurrió una pérdida de 480 ha de bosque nativo a nivel nacional con una tasa anual estimada de 96 ha/año mientras que para el periodo 2001-2013 se perdieron 15.196 ha a razón de 1.266 ha/año debido principalmente a la conversión de bosque a otros usos de la tierra que ameritaron deforestación (CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL, 2021).

El bosque esclerófilo, característico de zonas semiáridas, ocupa una superficie de 1.643.340 ha equivalentes al 11,2% de los bosques nativos (14.737.485 ha). Este tipo de bosque presentan alto nivel de endemismos de flora y fauna (CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL, 2021). En la Región Metropolitana este tipo forestal abarca 350.436,8 ha. En el área de rehabilitación, se localiza un bosque tipo esclerófilo renoval abierto a muy abierto que ha sido densificado en cobertura y diversidad mediante la incorporación de ejemplares arbóreos de especies nativas durante el periodo 2017-2019.

La Comuna de Til Til se encuentra en una zona semiárida y en los últimos 10 años presentó un escenario crítico debido a que las precipitaciones habían disminuido significativamente en relación al promedio anual (280 mm a menores de 160 mm, según estación del Fundo Pelán al año 2022), trayendo como consecuencia un déficit hídrico que afectaron las actividades económicas en el área, especialmente la agricultura, lo cual conllevó al Estado a declararlo en alerta por megasequía junto a otras comunas.

VIDAL (2021) describe la anomalía pluviométrica de Chile central (30°-38°LS) para el periodo 1950-2020. Señala los cambios que se han producido para los periodos 1991-2020 y 1981-2010 con respecto a las precipitaciones, temperaturas máximas y temperaturas mínimas. A partir de este análisis, destaca la reducción de los valores normales de las precipitaciones, según nuevas normales y aumentos en las temperaturas máximas. Estos argumentos evidencian la necesidad de maximizar la eficiencia del uso del agua y trabajar en revertir la desertificación de las tierras (Fig. 29).

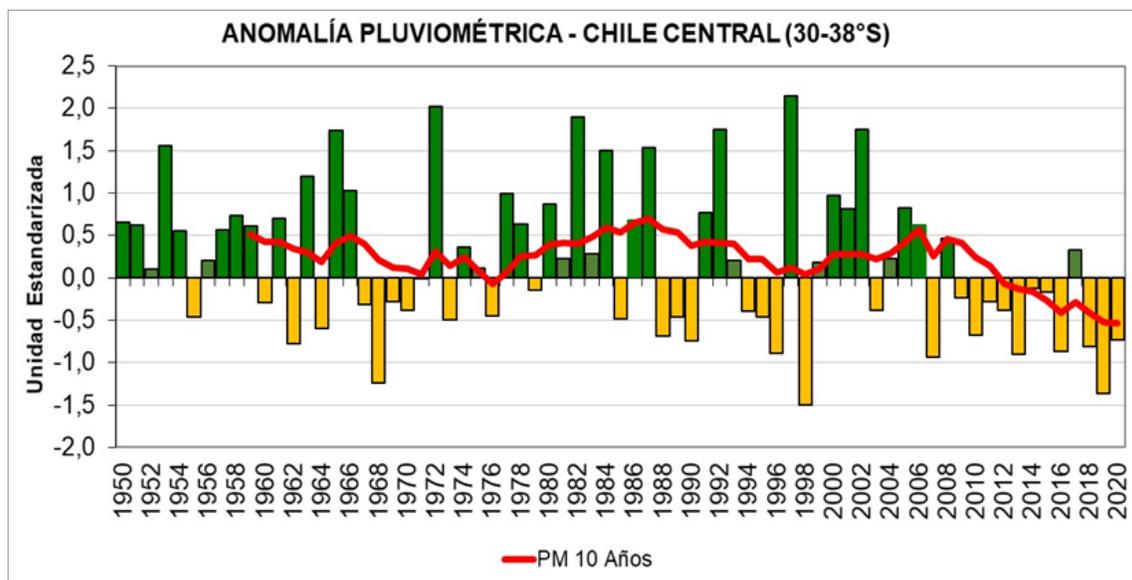


Figura 29. Anomalía pluviométrica - Chile Central. Fuente: (VIDAL, 2021)

El área en estudio, se localiza geológicamente sobre un material parental que da origen a suelos arcillosos de poca permeabilidad, lo cual favorece el escurrimiento superficial. Bajo esta perspectiva, RUGIERO (2006) en su estudio zonificó áreas con susceptibilidad moderada a la erosión en parte del Cordón de Chacabuco, en vertientes moderadamente activas con pendientes del orden de los 20°.

La convergencia de periodos lluviosos concentrados, en pocos días del año en la estación de invierno, adicionalmente con alto poder erosivo sobre suelos arcillosos, sobre terrenos con pendientes superiores al 8% y baja cobertura vegetal (bosques abiertos y muy abiertos), genera en la zona una mayor escorrentía superficial y menor infiltración que favorece la erosión hídrica.

Adicionalmente, estos suelos poseen severas limitaciones para su uso, pues son clasificadas como Clase VI y Clase VIII, de allí que poseen suelos pocos profundos y, en algunos casos es inexistente.

En estos casos en zonas semiáridas, (FAO, 2013) recomienda implementar una estrategia de manejo del agua que conlleve a mejorar la infiltración del agua en el suelo durante los meses lluviosos, controlar la escorrentía, así como incorporar técnicas que reduzcan la evaporación del agua del suelo y aumente su almacenaje mediante obras para la captación y conservación de suelos y aguas.

Los proyectos de restauración y rehabilitación deben ser monitoreados en el tiempo para proporcionar una idea de las tendencias de cambios del proceso (HERRICK *et al.*, 2006; WWF, 2021). El monitoreo es una práctica poco común, sin embargo, ha cobrado importancia en los últimos años en Chile, dada la necesidad de incorporar indicadores de cumplimiento y efectividad de las medidas ambientales en el marco de compromisos establecidos en las Resoluciones de Calificación Ambiental y Planes de Cumplimiento, entre otros instrumentos.

La compensación del Proyecto Fotovoltaico Santiago Solar, sólo tenía la obligación de plantar el número de árboles comprometidos. Sin embargo, implementó una estrategia de *oasificación forestal* como mecanismo de adaptación al calentamiento global y a las condiciones de degradación del ecosistema encontrado en el año 2017. Es menester destacar que el monitoreo de este tipo de proyectos debe implicar además de la sobrevivencia de las plantas, el seguimiento de otro conjunto de variables e indicadores en el corto, mediano y largo plazo que den cuenta de los efectos positivos y negativos que se estén produciendo (WWF, 2021).

Pocos proyectos realizan monitoreo de la variable suelos. En el caso del presente estudio, el interés será disminuir la erosión del suelo y cosechar aguas de lluvias mediante prácticas sostenibles que contribuyan a garantizar altos índices de sobrevivencia de la forestación e incrementar a diversidad de hábitat para la vida silvestre. En este sentido, los efectos de estos tratamientos se pueden detectar en los cambios en la cobertura del suelo, especialmente en la cobertura del dosel de arbustos y a nivel basal de hierba y cambios en la pendiente que sirvan de evidencia de la reducción de la pérdida de suelos y nutrientes, entre otros aspectos.

Para medir la efectividad de las medidas para el control de erosión se recurre a la cuantificación de las pérdidas de suelos. Existen distintos modelos que intentan aproximarse a la realidad a través de la combinación y valoración de diferentes variables. Es difícil lograr un valor certero del fenómeno, pues estas mediciones constituyen estimaciones debido a la complejidad que resulta de relacionar los datos con un suelo virgen. Generalmente, estas estimaciones se fundamentan en la remoción efectiva del suelo o de parte de él; en las pérdidas de fertilidad del suelo; cambios de color; afloramiento de materiales parentales; pérdida de vegetación; colores del suelo más claro que lo habitual; presencia de pedestal; surcos o cárcavas, entre otros aspectos (CIREN, 2015)

En este estudio, se decidió utilizar la Ecuación de Pérdida de Suelos WISCHMEIER & SMITH (1978) por ser un método que a pesar de sus limitaciones ha sido ampliamente utilizado en diferentes partes del mundo y reconocido por las autoridades chilenas (INFOR, 2011; CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL, 2017).

WISCHMEIER & SMITH (1978) plantean un modelo paramétrico de uso generalizado para estimar la erosión hídrica, sin embargo, ha sido cuestionado por su uso en situaciones no adaptadas a sus parámetros de diseño. En este sentido, HUDSON (1997) critica su denominación de “universal” señalando que sólo debería implementarse para lugares donde ha sido calibrado. Por otro lado, HONORATO *et al.*, (2009) señalan que el modelo USLE, presenta una alta fidelidad y que éste posee una relativa aplicabilidad universal, basándose en la gran cantidad de trabajos realizados a nivel mundial con fines científicos.

En este orden de ideas, HONORATO *et al.*, (2001) utilizando el modelo USLE, realizaron la estimación de la erosión en seis localidades entre la IV y la IX Regiones de Chile. Los autores indican que sus resultados demostraron un buen comportamiento predictivo del modelo en localidades con prácticas de manejo que favorecieron el proceso erosivo. Sin

embargo, en localidades donde existieron prácticas de manejo protectoras del suelo, tal como una mínima labranza, el modelo no proporcionó buenas estimaciones de erosión.

Asimismo, OYARZÚN ORTEGA (1993) realizó una comparación de las pérdidas de suelos mediante parcelas experimentales y la ecuación USLE. Señala que la erosión medida mediante parcelas con la erosión predicha por el modelo U.S.L.E. indicó que la ecuación sobrestimó las pérdidas de suelo en un 22% si se consideran los datos anuales y un 41 % los mensuales.

Por otra parte, STOCKING & MURNAGHAN (2000) citado por (ABARZUA, 2017), al comparar el método USLE y las mediciones de la pérdida en campo, señalan que las tasas de erosión USLE y USLE modificadas, se basan en información recopilada de características propias de los lugares de estudio ajustadas a diferentes tabulaciones considerándolo como una manera de ponderar cada factor respecto a su efecto en la erosión.

Los autores anteriormente citados, sostienen que los métodos USLE y USLE Modificada son métodos de estimación más cercanos a la realidad que las derivadas del análisis de erosión en base a la pauta de campo. Indican que las pautas de campo suelen ser ambiguas o subjetiva al tener el investigador la tarea de estimar la tasa de erosión general, con base a la selección de una situación representativa, que no siempre cumple con todas las características y condiciones del lugar. Por otra parte, señalan que la baja correlación existente entre dichos métodos con el método de campo puede estar relacionado con problemas asociados a la precisión, escala, extrapolación y fiabilidad de la información recopilada.

Por otra parte, se requiere seguir investigando y calibrando estos modelos, pero sigue siendo complejo debido a que no existen parcelas de muestra suficientes. Así la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos se convierte en una metodología viable para responder a una demanda de información (FAO-PNUMA-UNESCO, 1980). Otra manera de hacerlo consiste en combinar este método con observaciones de terreno y/o interpretaciones de imágenes donde que permitirían observar la presencia de surcos y cárcavas, siendo la erosión laminar la más difícil de detectar.

La erosión es una de las causas de la desertificación de las tierras. La pérdida de suelos tolerable, no sólo va a depender del volumen de pérdidas anuales, sino también del espesor del suelo, lo cual está estrechamente relacionado con su productividad. Los suelos profundos presentan menos gravedad a la erosión (mayor a 1 metro) que los suelos menos profundos (menor a 1 metro) (FAO-PNUMA-UNESCO, 1980).

En la Tabla 33, se observa que la erosión hídrica se presenta muy grave cuando más del 50% del subsuelo se encuentra al descubierto, los espesores de suelos son menores a 10 cm, la velocidad de la pérdida de suelo es mayor a 5 t/ha/año y el riesgo inherente asociado al grado de pérdida potencial es mayor a 25 t/ha/año.

Tabla 33. Criterios para evaluar la erosión hídrica

Aspecto de la desertización	Factor de evaluación	Ligera	Moderada	Grave	Muy grave
Estado	Subsuelo al descubierto (%) del área	<10	10-25	25-50	>50
	Espesor suelo (cm)	>90	90 - 50	50 – 10	<10
Velocidad	Pérdida de suelo (t/ha/año)	<2	2 – 3,5	3,5 – 5	>5
Riesgo inherente	Grado de la pérdida potencial al año (t/ha/año)	<5	5 - 15	15 – 25	>25

Fuente: Adaptaciones de (FAO-PNUMA-UNESCO, 1980)

GAYOSO & ALARCÓN (1999) señalan que el valor de tolerancia considerado para las alteraciones de suelos es de 2 ton/ha/año, el cual corresponde al valor teórico de compensación por procesos naturales de meteorización del suelo.

Los autores indican que las alteraciones provocadas por cosecha mediante tala rasa, ante una situación promedio de madereo con skidder, con posterior quema de los residuos, pueden provocar una pérdida de suelo al año posterior de la cosecha entre 1,89 a 3,12 ton/ha en sitios con pendiente de 8 a 18%. En algunos casos, éstos valores pueden oscilar entre 55 a 120 ton/ha de suelo perdido al año siguiente de la cosecha, especialmente en laderas de extensión mayor a 120 m de largo y pendientes entre 25 y 30% con suelos de muy alta fragilidad. Estos valores que se condicen con las pérdidas encontradas en el área estudiada.

En el área en estudio, los suelos son poco profundos o inexistentes. En el Escenario I (2017), la pérdida de suelos estimada varía entre 0 a 200 t.ha⁻¹.año⁻¹; las áreas con menores pérdidas (0 – 5 t.ha⁻¹.año⁻¹) representaban el 35,69% de la superficie total, mientras que las superficies con pérdidas mayores a 5 t.ha⁻¹.año⁻¹ representaron el 64,3% de ésta. Mientras que en el Escenario II (2022), la pérdida de suelos estimada varía entre 0 a 25 t.ha⁻¹.año⁻¹; las áreas con menores pérdidas (0 – 5 t.ha⁻¹.año⁻¹) representaban el 97,34% de la superficie total mientras que las superficies con pérdidas mayores a 5 t.ha⁻¹.año⁻¹ representaron el 2,66% de ésta; por lo tanto, este último escenario se encuentra cerca de un valor tolerable dadas las características físico-naturales del área.

De acuerdo a la clasificación de pérdidas de suelos del GOBIERNO VASCO (2005), las pérdidas de suelos menores a 5 t.ha⁻¹.año⁻¹ son consideradas muy bajas, pero si se relacionan éstas con la profundidad del suelo presente, considerando la clasificación de FAO-PNUMA-UNESCO (1980) con relación a la velocidad de pérdida de suelos, podría

considerarse esta muy grave. Sin embargo, se observa en la evolución de las mediciones paramétricas un descenso significativo en relación a la situación inicial encontrada antes de la introducción de medidas previas a la rehabilitación.

A manera de ejemplo, INFOR (2011) señala que de producirse una tormenta que genere la disminución de 1 mm de profundidad del perfil de suelo, con densidad aparente de $1,6 \text{ g/cm}^3$ se produciría una pérdida de suelo de 16 t/ha (Fig. 30). En el caso del área de rehabilitación que se está analizando, las densidades aparentes varían entre $1,2 \text{ g/cm}^3$ para suelos arcillosos, $1,33 \text{ g/cm}^3$ para suelos franco arcillosos y $1,51 \text{ g/cm}^3$ en suelos francos. De ocurrir este mismo fenómeno en la situación sin obras de conservación, pudieron haberse producido pérdidas de 12 t/ha, 13,3 t/ha y 15,1 t/ha respectivamente. Si en promedio ocurrieran 5 eventos similares durante un año, entonces estas pérdidas serían equivalentes a 60 t/ha/año, 66,5 t/ha/año y 75,5 t/ha/año.

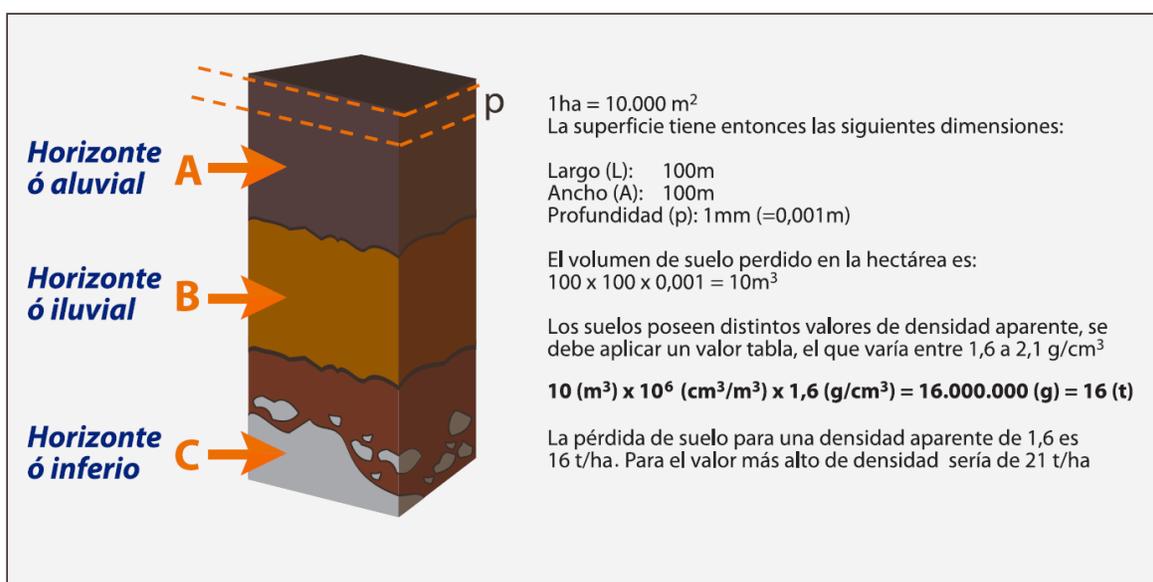


Figura 30. Perfil ilustrativo de Pérdida de suelos. Fuente: INFOR (2011)

ABARZUA (2017) indica que en la zona centro (Región de Valparaíso y Región Metropolitana) con un clima mediterráneo, encontró que el 50% de las tasas de erosión se acerca a 18 Mgha-1año-1.

De acuerdo a BLEU (2003) En: GÜRTEKIN & GÖKÇE (2021), se espera que la cantidad promedio de pérdida de suelo en condiciones naturales de erosión oscilen entre $0,1$ a $1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$; la cantidad de pérdida de suelo causada por la erosión causada por factores antropogénicos es de 10 a 1000 veces mayor que este valor.

Según los valores encontrados por (NAVARRO, 2002) en España, en zonas de praderas y pastos, las pérdidas de suelos en terrenos desnudos, podrían encontrarse en un rango

entre 10 – 200 t.ha⁻¹.año⁻¹; en pastos y praderas oscilan entre 0,05 a 5 t.ha⁻¹.año⁻¹; mientras que en bosques naturales y repoblaciones forestales maduras, podrían llegar a ser 0,05 - 1 t.ha⁻¹.año⁻¹ (Fig. 31).



Figura 31. Graduación (termómetro) del problema erosivo atendiendo a su magnitud. Fuente: NAVARRO (2002)

La pérdida de la capa superficial del suelo trae consigo la degradación. ROFIKHA *et al.*, (2021) señalan que para revertir esta situación se debe incidir en la introducción de prácticas que contribuyan a controlar la erosión mediante la disminución de la fuerza del agua o del viento y proteger el suelo de ellos. Al incrementar la cobertura superficial, acortar la longitud de la pendiente, disminuir el volumen de agua que escurre o la velocidad del escurrimiento merma la fuerza o potencia del agua. También se puede proteger el suelo cubriéndolo para reducir la fuerza del agua y del viento que ocasionan el desprendimiento y transporte de sedimentos.

Las obras de conservación suelos y aguas inciden en el escurrimiento superficial y la infiltración de agua en las laderas, por ende, se tiende a recuperar las propiedades hidrológicas de los suelos. En laderas sin tratamientos ocurre mayor evaporación, menor infiltración y mayor escurrimiento superficial mientras que en las laderas con prácticas de manejo más forestación se produce menor evaporación, mayor Infiltración y menor escurrimiento superficial, según INFOR (2018); SILVA *et al.*, (2003)

Las pérdidas de suelo encontradas en la situación con obras en el área de rehabilitación del Fundo Pelán, son similares a las calculadas con mediciones directas en terreno de los

factores por ACEVEDO (2021) en un proyecto de rehabilitación ejecutado en el año 2020 en la Comuna Casablanca de la Región de Valparaíso. El autor seleccionó dos laderas testigos (sin obras) y 4 laderas con obras de conservación; ambas con exposición Noreste-Noroeste. Los resultados indicaron que se generó una disminución de la pérdida de suelos en las laderas con tratamiento. Las laderas testigos reportaron un promedio de pérdida de 16,01 t.ha⁻¹.año⁻¹ con una desviación estándar de 0,60 t.ha⁻¹.año⁻¹ mientras que en los sitios con tratamientos el promedio de pérdida encontrados fue 5,52 t.ha⁻¹.año⁻¹ con una desviación estándar de 3,47 t.ha⁻¹.año⁻¹ (Tabla 34).

Tabla 34. Pérdidas de suelos estimadas con el Modelo USLE para cada ladera, según tratamiento.

Ladera	Tratamiento	Pérdida de suelos (t.ha ⁻¹ .año ⁻¹)
1	Testigo (Sin obras)	15,58
2	Testigo (Sin Obras)	16,44
3	Con obras de conservación	2,59
4	Con obras de conservación	10,49
5	Con obras de conservación	3,87
6	Con obras de conservación	5,09

Fuente: ACEVEDO (2021)

Específicamente, con relación a los factores que intervienen en el modelo, el Factor R y el Factor K permanecen constantes para los modelos simulados para ambos escenarios.

En investigaciones realizadas en Chile, HONORATO *et al.*, (2001) indica imprecisión de las pérdidas estimadas, que la asocian a que los valores obtenidos del Factor R estimado mediante la aproximación de Arnoulds, no proporcionó la exactitud suficiente para estimar la erosividad de las lluvias; ello corresponde al mismo método utilizado en este estudio.

Los suelos en el área se corresponden con el tipo arcilloso. De acuerdo a (FAO, 2013), los suelos arcillosos presentan alta cohesión, generalmente son poco permeables y pueden ser utilizados para captar aguas de lluvia en zonas semiáridas.

Los suelos en la unidad de análisis, generalmente tienen poco o inexistente contenido de materia orgánica que puede incrementarse y requiere ser medido para que se ajuste en el tiempo ésta condición en el suelo, para futuros escenarios que se modelen.

De acuerdo a la densidad aparente encontrada y observaciones de terreno en la situación inicial (Escenario I), los suelos presentaban un alto grado de compactación debido al sobrepastoreo y el tránsito de vehículos. Es de hacer notar que la compactación afecta al suelo superficial, reduciendo su porosidad donde se desarrolla el sistema radicular de las plantas. Además, se produce una disminución de la permeabilidad al disminuir los macroporos que, en consecuencia, disminuye la disponibilidad de agua en el suelo y un mayor escurrimiento superficial, traduciéndose en una mayor tendencia a producirse la erosión.

En la medida que se incremente la cobertura aérea de las copas de las especies arbóreas que se plantaron, se regenere la vegetación arbustiva y las herbáceas tiendan a cubrir el suelo se producirán cambios en el Factor C, protegiéndose del impacto directo de las gotas de lluvia y se producirán impedancia para que la velocidad del escurrimiento superficial disminuya.

OYARZÚN ORTEGA (1993) encontraron efectos significativos de la reducción de pérdidas de suelos vinculado a la regeneración de la vegetación herbácea que aumentó el cubrimiento de los suelos. Así mismo, GAYOSO & ALARCÓN (1999) en su investigación indican que el volumen de perdido de suelos se incrementa significativamente al primer año luego de la cosecha en plantaciones forestales. Sin embargo, observa que disminuyen considerablemente durante los años siguientes, cuando el terreno se recubre del suelo con vegetación herbácea y a medida que se consolida la nueva plantación establecida.

Para el Escenario II, luego de haber transcurrido entre 4 a 6 años de los periodos de reforestación, las coberturas de copa aérea aún siguen siendo muy bajas (menor a 1 metro), por el lento crecimiento de la especie en condiciones de riego acotado basado en poca frecuencia de riego, para incidir que las profundicen el desarrollo de sus raíces que también le otorgan estabilidad al suelo y sean capaces de sobrevivir con el agua encontrada en las capas más profundas del suelo. A pesar de ello, debido al avance del proceso de rehabilitación con la construcción de obras que han retenido suelos y nutrientes, además han cosechado el agua en periodo invernal y se ha observado un desarrollo de herbazales mayor en relación a los primeros años.

Establecer vegetación contribuye a estabilizar el suelo, por cuanto las raíces contribuyen a fijar el suelo; así mismo, las hojas y la hojarasca reducen el escurrimiento superficial favoreciendo ambos procesos a mejorar la infiltración y percolación, según FRANCKE (1998).

Al incrementarse la cubierta de pastos y herbazales naturales producto del mejoramiento de las propiedades hídricas del suelo, se controla la erosión por salpicadura causada por pérdida de suelo por impacto de gotas de lluvia sobre un suelo desnudo.

Aunque la cobertura de copa de los árboles plantados no sea tan grande en este momento para interceptar el agua de lluvia significativamente, el sistema radicular desarrollado juega un papel importante en la retención de los suelos (GYSSELS *et al.*, 2005; WIJITKOSUM, 2012), pues éste influye en la unión de partículas del suelo y las raíces haciéndolo más fuerte físicamente resistiendo a ser movilizado, contribuye a la estabilidad de los agregados del suelo y la capacidad de infiltración.

Con la construcción de obras de conservación de suelos y aguas, se modificó considerablemente la longitud de la pendiente; por ende, ocurrieron variaciones significativas en el Factor LS en el Escenario II respecto al Escenario I.

En este sentido, HOFFMAN *et al.* (2013) En: ABARZUA (2017), concluye que el factor topográfico LS, es uno de los parámetros más sensibles en la estimación de pérdida de suelo. Indica que un error de 10% en el cálculo de la pendiente, genera un error de 20% en

los resultados de tasas de erosión. En el caso de estudio, se utiliza un DEM de alta resolución (0,4 m y 0,3 m) para ambos escenarios por lo cual se afirma que existe un acercamiento a la realidad de estas variaciones del terreno; en consecuencia, no se estaría sobreestimando la pérdida de suelos debido a que los parámetros topográficos son confiables.

Otra característica importante de las laderas está representada por la exposición. Esta variable no la simula USLE, pero es un indicador de la incidencia solar. A grandes rasgos, los terrenos que reciben radiación solar directa e intensa en horas de la tarde son más calientes y tienen mayor evapotranspiración y demanda hídrica que aquellos que la reciben de manera oblicua o por la mañana. Igualmente, en los terrenos más expuestos al viento, la evapotranspiración tiende a ser mayor que en lugares más protegidos FAO (2013).

En cuanto al Factor P, no es fácil obtener en la bibliografía valores referenciales a adoptar en virtud a las obras que se estén aplicando para la rehabilitación de áreas forestales, son datos escasos; sólo se consiguen datos para la coexistencia de éstas con prácticas agrícolas. Generalmente, la mayor parte de los artículos consultados le conceden a P el valor de 1. Indudablemente, la implementación de éstas obras incidió significativamente en la disminución de la pérdida de suelos estimadas.

La implementación de medidas efectivas es esencial para el control de erosión, la conservación de los recursos del suelo y los procesos de restauración ecológica (Gao y Wang, 2019 En: Guo *et al.*, (2021).

En el área de estudio se realizó una intervención vegetativa combinada con obras de conservación de suelos y aguas. ROFIKHA *et al.*, (2021) sostienen que La técnica de prevención de la erosión más eficiente justamente están dadas por prácticas que combinan medios vegetativos y mecánicos. El método vegetativo incluye actividades de prevención de la erosión mediante la plantación de vegetación. Mientras que mecánico está orientado a la construcción de obras para prevenir o control la erosión a través de la restauración, la rehabilitación de la tierra y la conservación, que conlleven a:

- Aumentar la estabilidad de la superficie del suelo y la resistencia a la erosión, reduciendo el movimiento de los volúmenes de suelo.
- Reducir la fuerza del flujo de erosión por medio de la reducción de la velocidad del flujo y la descarga.
- Incrementar la capacidad de infiltración del suelo

A grandes rasgos, estas obras construidas en este proyecto, permiten cosechar aguas lluvias, agua que se acumula en el suelo e infiltra hacia las napas subterráneas, constituyéndose en un aporte hídrico para la vegetación y también para la sociedad, así como también *controlar la erosión de suelos*, lo que contribuye a combatir su degradación y el deterioro de los ecosistemas. Es por éstas razones que las OCAS ayudan a la adaptación al cambio climático y a la lucha contra la desertificación (INFOR, 2018)

RODRIGUEZ & GASPARI (2015) realizaron un estudio de zonificación mediante USLE en la cuenca de arroyo Napaleofú donde encontró valores de pérdidas de suelos cuyos los valores extremos obtenidos fluctuaron entre $0,50 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ y $267,4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. Introduce el factor P con diferentes valores en función del tipo de práctica conservacionista; predominando entre éstas el cultivo en curvas de nivel. Concluye que la erosión hídrica superficial es leve (pérdidas menores a $10 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) en el 81 % de la cuenca, favorecido por el empleo de prácticas conservacionistas en áreas con pendientes suaves. Mientras que el 19 % de la cuenca se encuentra bajo erosión hídrica moderada o alta debido a la pendiente y la escasa cobertura vegetal del suelo. Estas áreas demandan una intervención con medidas de manejo de suelo y utilización de coberturas vegetales adecuadas para el control de erosión.

Finalmente, se demuestra que mediante la aplicación de distintos tratamientos es posible disminuir la pérdida de suelos. De acuerdo a la experiencia de LETA et al. (2023) quienes realizaron una simulación de pérdida de suelo con la aplicación del modelo SWAT con y sin prácticas de manejo en la cuenca Nashe identificando áreas de alta y muy alta erosión demostraron que éstas pérdidas se minimizaron entre 34% y 58% con la implementación de buenas prácticas de manejo, disminuyendo la producción de sedimentos. Los diques de suelo/piedra (57,98%) tuvo la mayor eficiencia para la reducción de la producción de sedimentos, seguido por el escenario de terrazas (54,77%).

5.2 Conclusiones

El área de rehabilitación de ecosistemas del Fundo Pelán, comuna Til Til, se localiza en relieves monoclinales, conformados por secuencias de rocas volcánicas y sedimentarias, en cuyas laderas, con pendientes entre 15% y 45%, se han desarrollado procesos de erosión del suelo en ambiente semiáridos.

En el sitio predomina una cobertura de bosque nativo de renoval abierto; sin embargo, presenta evidencias de densificación como producto de las reforestaciones ejecutadas, junto con las prácticas de manejo implementadas entre el año 2017 al 2019, tales como obras de conservación de suelos y aguas, de tipo microterrazas forestal, negarim y bordos semicirculares dispuestas en el sentido de las curvas de nivel.

Mediante este estudio, se estimó la pérdida de suelos en el área de rehabilitación de ecosistemas del área de estudio para el periodo 2017-2022. Este proceso involucró hallar los factores que influyen en el cálculo de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelos, entre los cuales se encuentra el factor de la erosividad de las lluvias (Factor R), erodabilidad del suelo (Factor K), valoración de las coberturas (Factor C), longitud de la pendiente y la topografía (Factor LS) y las prácticas conservacionistas (Factor P).

A través de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelos, USLE, se logró la zonificar y cuantificar la erosión en el caso en estudio. Con el apoyo de los SIG y de la captura de imágenes- levantamiento topográfico con alta resolución, a través de un drone-, se logró una alta precisión para estimar la pérdida de suelos en relación a la variación del microrelieve y las coberturas y, comparar las mismas, bajo dos escenarios (bosque nativo renoval abierto sin intervención y bosque nativo renoval abierto con reforestación y medidas de conservación de suelos).

Al comparar la variación de los factores de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelos de ambos escenarios, se comprueba que los Factores R y K se mantuvieron constantes. El Factor C varió debido a la introducción de plantas nativas con densidades de 600 ejemplares/ha, aumentó la cobertura del suelo ligeramente, pero la cobertura aérea continúa manteniéndose abierta debido a que los ejemplares se encuentran en fase inicial de crecimiento. Mientras que los Factores LS y P experimentaron los mayores cambios debido a las modificaciones de la topografía, disminución de la longitud de la pendiente y la valoración intrínseca de las prácticas de manejo incorporadas en correspondencia con los objetivos de las obras de conservación de suelos y aguas ejecutadas.

A través de la aplicación del mismo método para dos años distintos, antes y después de la intervención, se comprueba que las acciones de rehabilitación de ecosistemas implementadas mediante la reforestación y construcción de obras de conservación de suelos y aguas para favorecer la biodiversidad, incrementar el número de ejemplares arbóreos por hectárea, el control de erosión y la cosecha de aguas de lluvias generan cambios que reducen pérdidas estimadas mediante la Ecuación de Pérdida de Suelos (USLE).

5.3 Recomendaciones

En las siguientes recomendaciones se presenta un conjunto de estrategias y acciones sugeridas basadas en los hallazgos de esta investigación. Estas propuestas se elaboraron con el objetivo de optimizar los resultados obtenidos, así como propiciar nuevas investigaciones para profundizar los conocimientos en el tema.

Las recomendaciones abarcan diversos aspectos, desde ajustes a la metodología para la obtención y valoración de cada factor, hasta sugerencias de implementación del método para la aplicación de los resultados en contextos relevantes.

En este orden de ideas, se recomienda:

- Estimar la erosividad de las lluvias a través de distintos métodos y medir su incidencia en el cálculo de las pérdidas de suelos, así como determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre ambos métodos.
- Realizar estudios de contenido de materia orgánica para ajustar el valor asignado al Factor K.
- Monitorear la densidad aparente del suelo para estimar su pérdida por superficie.
- Realizar parcelas forestales para precisar el tipo de vegetación, la cobertura de copa y la cobertura del suelo.
- Realizar mediciones en terreno y compararlo con los resultados obtenidos mediante el método cartográfico.
- Realizar ensayos para calibrar los valores de P atendiendo al tipo de obra y a las condiciones locales.
- Compilar factores para distintas prácticas conservacionistas aplicadas a la restauración y rehabilitación de bosque.
- Aplicar y comparar para el área de restauración otros métodos cuantitativos para medir la pérdida de suelos.
- Implementar la medición de pérdida de suelos mediante el método de parcelas experimentales y calibrar los resultados obtenidos en el mismo lugar que los métodos cartográficos.
- Estimar los volúmenes de suelos retenidos con las obras de conservación de suelos implementadas.
- Realizar mediciones directamente en campo de la cantidad de suelo movilizado durante los episodios de lluvia.

BIBLIOGRAFÍA

ABARZUA, A. (2017). Evaluación de la erodabilidad de algunos suelos de Chile de uso actual forestal mediante índices basados en propiedades del suelo de fácil medición. Santiago: Universidad de Chile.

ARNOLDUS, H. M. (1978). An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. De Boodst, M. y Gabriels, D. (Eds.). Assessment of erosion. John Wiley y Sons, Inc. Chichester – Gran Bretaña. pp:127 – 132.

ACEVEDO, K. (2021). Evaluación de prácticas de oasisificación en ambientes semiáridos de la región de Valparaíso: Experiencia en la empresa Biocys. Santiago: Universidad de Chile.

ARAYA-VERGARA, J. (1985). Análisis de la carta geomorfológica de la cuenca del Mapocho. Información Geográfica Chile, 32, 31-44.

ALANIZ AJ, PEREZ-QUEZADA JF, GALLEGUILLOS M, VÁSQUEZ AE, KEITH DA. Operationalizing the IUCN Red List of Ecosystems in public policy. *Conservation Letters*. 2019; 12:e12665. <https://doi.org/10.1111/conl.12665>

BELASRI, A., & LAUHOULL, A. (2016). Estimation of Soil Erosion Risk using the Universal Soil Loss Equation (USLE) and Geo-Information Technology in Oued El Magazine Watershed, Morocco. *Journal Geographic Information System*, 98-107.

BERGSMA, E., CHARMAN, P., GIBBONS, H., HURNI, H., MOLDENHAUER, W., Y PANICHAPONG, S. (1996). *Terminology for Soil Erosion And Conservation*. ISS-International Society of Soil Science, ITC-International Institute for Aerospace Survey and Earth Science and ISRIC-International Soil Reference and Information Center. 313 p.

BIOCYS (2019). Análisis físico de los suelos del Fundo Pelán.

BIOCYS (2020). Acciones preventivas para el control de erosión. Adenda complementaria del proyecto “Nueva Línea Transmisión 2x220 KV Nueva Pan de Azúcar-Punta Sierra-Centella”. Santiago

BIOCYS (2021a). Acciones correctivas para el control de erosión en caminos construidos para la Línea Transmisión 2x5000kV Cardones- Polpaico en las regiones Valparaíso, Coquimbo y Atacama solicitadas en un Plan de Cumplimiento Ambiental.

BIOCYS (2021b). Acciones correctivas para el control de erosión. Línea Transmisión 2x5000kV Cardones- Polpaico. Santiago.

CIDIAT (1988). *Conservación de suelos agrícolas*. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT). Departamento de Desarrollo Regional de la Organización de Los Estados Americanos (O.E.A.). Mérida, Venezuela.

CIREN. (2010). Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile. Región Metropolitana. Santiago.

CIREN. (2015). Estudio Agrológico Región Metropolitana de Santiago . Santiago: Publicación CIREN N° 195.

CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL. CONAF (2017). Guía de elaboración del índice de fragilidad de suelos forestales. Santiago.

CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL. CONAF (2019). Catastro vegetacional Región Metropolitana 2019. Inédito. Santiago: CONAF.

CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL. (2021). Catastro de los recursos vegetacionales de Chile. Actualizaciones al año 2020. Santiago.

CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL. (06 de Noviembre de 2022). CONAF. Obtenido de <https://www.conaf.cl/>

ELLISON, W.D. (1947). *Soil erosion studies*. Agricultural Engineering. 28: 145-146.

ESCOBAR, D. (2019). Estimación de la erosión hídrica en zona semiárida el norte chileno mediante la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE). El caso de Punitaqui. Memoria de título. Santiago: Universidad de Chile.

FAO. (2013). Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Santiago de Chile.

FAO/PNUMA/UNESCO (1980). Metodología provisional para la evaluación de degradación de suelos. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo de la Agricultura y la Alimentación (FAO), programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura (UNESCO). Roma, Italia. 86 p.

FRANCKE, S. (1998). Guía Aplicación de técnicas de rehabilitación de suelos y cuencas hidrográficas postincendios. Santiago: CONAF.

GAJARDO, R. (1983). Sistema de clasificación de la vegetación nativa chilena. Santiago: Ministerio de Agricultura, Corporación Nacional Forestal/Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.

GANNA, P., SELLES, D., & WALL, R. (1999). Mapa Geológico del área de Til Til. Escala 1:100.000. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.

GARCÍA, J. (2006). *La Erosión: Aspectos conceptuales y modelos*. In Hidrología de superficie y conservación de suelos. Material de clase 2007. (en línea). España. Consultado 12 abr. 2009. Disponible en <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/hidrologia-de-superficies-y-conservacion-de-suelos/material-de-clase/>

GARCÍA, J. (2009). La erosión: Aspectos conceptuales y modelos. En Hidrología de superficie y conservación de suelos. Material Docente. Obtenido de Disponible en <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/hidrologia-de-superficies-y-conservacion->

GARCIA-CHEVESICH, P. (2009). Erosion Processes and control. Arizona: The University of Arizona.

GAYOSO, J., & ALARCÓN, D. (1999). Guía de conservación de suelos forestales. Valdivia: Universidad Austral de Chile.

GEASIG. (2019a). Análisis del riesgo de erosión con Arcgis.

GEASIG. (2019b). Índice de Erosividad de la lluvia con ArcGis.

GEMMA (2007). *Movimientos en masa en la Región Andina. Una guía para la evaluación de amenazas*. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. Servicio Nacional de Geología y Minería. Publicación Geológica Multinacional N° 4.

GYSSSELS, G., POESSEN, J., BOCHET, E., & LI, Y. (2005). Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water. *Physical Geography*, 29, 189-

GOBIERNO VASCO. (2005). Mapa de erosión de suelos de la Comuna Autónoma de Euskadi. 217.

GRASSI, C. (2002). *Desarrollo físico de tierras agrícolas*. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

GÜRTEKIN, E., & GÖKÇE, O. (2021). Estimation of erosion risk of Harebakayış sub-watershed, Elazığ, Turkey, using GIS based RUSLE model. *Environmental Challenges*, 5, Article 100315. <https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2021.100315>

GUEVARA, E. (2000). *Sistema de conservación y rehabilitación de cuencas*. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo. Venezuela.

GUO, L., LIU, R., MEN, C., WANG, Q., MIAO, Y., SHOAI, M., WANG, Y., JIAO, L., ZHANG, Y. (2021). Multiscale spatiotemporal characteristics of landscape patterns, hotspots, and influencing factors for soil erosion. *Science of The Total Environment*, 779, Article 146474. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146474>

HERRICK, J., SHUMAN, J., & RANGO, A. (2006). Monitoring ecological processes for restoration projects. *Journal of Nature Conservation*, 14, 161-171.

HONORATO, R.; BARRALES, L.; PEÑA, I.; BARRERA, F. (2001). *Evaluación del modelo USLE en la Estimación de la Erosión en Seis Localidades entre la IV y IX Región de Chile*. (en línea). *Ciencia e Investigación Agraria* 28 (1): 7-14. Consultado 08 nov. 2023. Disponible en <http://www.rcia.puc.cl/Espanol/pdf/28-1/7-14.pdf>

HUDSON, N. (1981). *Soil Conservation*. 2nd Edition Cornell University Press. Itahaca, New York, USA.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA. INE, Censo de población y vivienda 2017. Proyecciones de Población 2023

IBÁÑEZ ASENSIO, S., MORENO, H., & GISBERT, J. (s.f.). *Ecuación de Pérdida de Suelos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

INFOR. (2011). *Técnicas de cosechas de agua de lluvia y oasisificación para el Norte Chileno*. Santiago.

INFOR. (2018). *Manual para la implementación de obras de conservación de suelos y cosechas de aguas de lluvias en Alhué*. Santiago.

Intergovernmental Panel on Climate Change. "Climate Change 2007: Synthesis Report." IPCC, 2007. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SR_2007_Full_Report.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 2022: Cambio climático 2022: impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático [H.-O. Pörtner, DC Roberts, M. Tignor, ES Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lössche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Prensa de la Universidad de Cambridge. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EE. UU., 3056 págs., doi:10.1017/9781009325844.

LAL, R., & ELLIOT, W. (1994). Erodibility and Erosivity. Soil Erosion, Research Methods.

LETA, M. K., WASEEM, M., REHMAN, K., & TRÄNCKNER, J. (2023). Sediment yield estimation and evaluating the best management practices in Nashe watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6), Article 716. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11337-z>

LÓPEZ, R. (2000). Degradación del suelo. Causas, procesos evaluación e investigación. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

LUEBERT, F., & PLISCOFF, P. (2017). Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Santiago: Editorial Universitaria.

MÁRQUEZ, K. (2021). Curso Internacional en Manejo de Cuencas Hidrográficas. Mérida, Venezuela: Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. Universidad de Los Andes.

MARTINEZ DE AZAGRA, A., & LEMUS, M. (2005). Oasificación: Solución forestal para la desertificación. *Chile Forestal*(325), 26-29.

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS. (2014). Inventario de Cuencas, Subcuencas, y Subsubcuencas de Chile. Santiago.

MORALES, C., ACEVEDO, J., ARANIBAR, Z., & DASCAL, G. (2016). Chile: Los costos de inacción de la desertificación y degradación de las tierras. Santiago: UNIÓN EUROPEA, PNUD, CEPAL.

MORGAN, R. (2005) Soil Erosion and Conservation. 3rd Edition, Blackwell Publishing Ltd., Carlton.

MUNICIPALIDAD DE TIL TIL. (2008). Plan de Desarrollo Comunal de Til Til 2015-2019. Etapa 1 Caracterización Comunal. Til Til. Obtenido de https://www.tiltil.cl/transparencia/Plan_Comunal.htm

MUNICIPALIDAD DE TIL TIL. (2019?). Plan de Desarrollo Comunal. Til Til 2022-2030. Til Til.

NAVARRO, J, H, (2002), *Control de la erosión en desmontes originados por obras de infraestructura viaria: aplicación al entorno de Palencia Capital*, Madrid.

OCHOA, G. & OBALLOS, J. (2006). Diccionario de Suelos. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCHT). Universidad De Los Andes. Mérida, Venezuela.

OLDEMAN, L.R., R.T.A. HAKKELING & W.G. SOMBROEK (1991). *World map of the status of human induced soil degradation: An explanatory note, Segunda edición revisada*. ISRIC, Wageningen y Pnuma, Nairobi, 35 p.

OLDEMAN, L.R., & G.W.J. VAN LYNDEN. (1998). *Revisiting the Glasod Methodology*. Pp. 423-440. In: R. Lal et al. (eds). *Methods for Assessment of soil Degradation. Advances in soil science*. CRC Press Boca Raton, Florida, USA.

ORTEGA S., M. E. (2007). Análisis de la estructura del paisaje en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Facultad de Ciencias Forestales. Valdivia: Universidad Austral de Chile.

OYARZÚN ORTEGA, C. (1993). Evaluación del modelo U.S.L.E. para predecir pérdidas de suelos en áreas forestadas de la cuenca del río Bío Bio. *Bosque*, 14(1), 45-54. <https://doi.org/10.4206/bosque.1993.v14n1-06>

PÁEZ, M. (1986). *Erodabilidad Relativa de Suelos Agrícolas de Venezuela e Índices de erodabilidad*. Tesis de Doctorado en Ciencia del Suelo. UCV-Facultad de Agronomía. Maracay, Venezuela.

PIZARRO, R., MORALES, C., VEGA, L. O., VALDEZ, R., & BALOCCHI, F. (2009). Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la región de Coquimbo, Chile. Talca: UNESCO.

RANZI, R., LE, T. H., & RULLI, M. C. (2012). A RUSLE approach to model suspended sediment load in the Lo river (Vietnam): Effects of reservoirs and land use changes. *Journal of Hydrology*, 422–423, 17–29. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2011.12.009>

RODRÍGUEZ, O. (2010). *Conservación de suelos y aguas*. Una premisa del desarrollo sustentable. Universidad Central de Venezuela. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Caracas.

RODRIGUEZ, A., & GASPARI, F. (2015). Estimación de la admisibilidad de pérdidas de suelo por erosión hídrica en la cuenca del arroyo Napaleofú, provincia de Buenos Aires-Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*, 56(1), 105-119.

RODRIGUEZ, M., FLORENTINO, A., GALLARDO, J., & GARCÍA, R. (2004). Sistemas de Información Geográfica en la Evaluación de la Erosión Hídrica de Bajadoz-España aplicando la metodología USLE. *Agronomía*, 391-410.

ROFIKHA, A. A., SAPUTRA, Y., & ISLAMI, F. A. (2021). Best management practices for erosion and sedimentation control of The Sermo Watershed. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 930(1), Article 012068. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/930/1/012068>

ROMERO ARAVENA, H., MOLINA, M., MOSCOSO CAMPUSANO, C., SARRICOLEA ESPINOZA, P., & SMITH, P. (2006). Caracterización de los cambios de usos y coberturas

de suelos causados por la expansión urbana de Santiago, análisis estadístico de sus factores explicativos e inferencias ambientales. Santiago: Repositorio UChile.

RUGIERO, V. (2006). Suelos potencialmente aptos para revegetación o uso agrícola a partir de la utilización de biosólidos provenientes de las aguas de tratamiento de aguas servidas Provincia de Chacabuco, Región Metropolitana. Memoria de título, Universidad de Chile, Santiago. Recuperado el 03 de 11 de 2023, de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/100905>

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA. (2003). Peligros de remociones en masa e inundaciones de la cuenca de Santiago. 2003: SERNAGEOMIN.

SILVA, T. P., BRESSIANI, D., EBLING, É. D., & REICHERT, J. M. (2023). Best management practices to reduce soil erosion and change water balance components in watersheds under grain and dairy production. *International Soil and Water Conservation Research*. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.06.003>

SOTO, M. V., CASTRO, C., RODOLFI, J., MARKER, M., FERNÁNDEZ, R., PADILLA, M., & RUGIERO, V. (2007). Carta geomorfológica de la sección central y occidental de la Región Metropolitana. *Investigaciones Geográficas*, 39, 91-99.

SUBSECRETARÍA DE DESARROLLO REGIONAL Y ADMINISTRATIVO DEL GOBIERNO DE CHILE (2013). Guía análisis y zonificación de cuencas hidrográficas para el ordenamiento territorial. Primera edición.

VIDAL, C. (2021). Situación actual y perspectiva para Mayo-Julio 2021. ¿SEQUÍA O ARIDIZACIÓN? (págs. 15-25). Santiago: MINAGRI.

WIJITKOSUM, S. (2012). Impacts of Land Use Changes on Soil Erosion in Pa Deng Sub-district, Adjacent Area of Kaengranchan National Park. *Soil&Water Res*, 10-17.

WISCHMEIER, W., & SMITH, D. (1978). Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning. Department of Agriculture US.

WWF (2021). Guía de Monitoreo de la Restauración de Bosques a Escala de Sitio. Santiago.