



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ciencias Ambientales
Facultad de Ciencias Sociales
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía
Magister Ciencias Regionales

**Evaluación del impacto de la deforestación en la probabilidad de
deslizamientos en la interfaz urbano-forestal: El caso de la cuenca peri-
urbana de Palomares en el Área Metropolitana de Concepción**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias Regionales

EMILIANO TOMÁS VEGA RUIZ
CONCEPCIÓN-CHILE
2024

Profesora Guía: Edilia del Carmen Jaque Castillo
Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía
Universidad de Concepción

RESUMEN

Chile se enfrenta a amenazas diversas y mixtas debido a su combinación única de características geográficas, geológicas, climáticas y antrópicas. En el Área Metropolitana de Concepción, los deslizamientos gatillados por lluvias son uno de los peligros más recurrentes y destructivos, causando la muerte de al menos 17 personas desde 1980, e incurriendo en altas pérdidas monetarias en bienes materiales e infraestructura. La cuenca de Palomares, ubicada en el límite exterior de Concepción, es una urbanización rodeada de cerros cubiertos de plantaciones, lo que constituye una interfaz urbano-forestal, que combina tanto el riesgo de incendios forestales, como el de deslizamientos, debido a la pérdida de la cubierta vegetal y el consiguiente aumento de la erosión, retratando un nuevo tipo de problema territorial y el objetivo de este estudio: Analizar los efectos de la deforestación y la industria forestal en la generación de deslizamientos dentro de la interfaz urbano-forestal. Esta área fue elegida ya que conforma un escenario común, distintivo y, hasta ahora, poco considerado en la región, la cual posee una combinación distintiva de características naturales: (1) suelos profundos y bien formados procedentes de regolitos de montañas graníticas muy erosionadas, (2) fuertes pendientes, (3) precipitaciones de alta intensidad, y factores sociales: (1) ocupación de áreas marginales relacionadas con las colinas en zonas peligrosas debido a la segregación socioeconómica, (2) planificación territorial insuficiente, (3) aumento antrópico de los factores condicionantes de los deslizamientos relacionados con la deforestación, las cuales en conjunto construyen el riesgo socio-natural frente a deslizamientos en la región. Se propone que la disminución de las propiedades mecánicas del suelo y la pérdida de cohesión de las raíces debido a los ciclos consecutivos de cosecha y los incendios forestales son factores significativos que aumentan la probabilidad de deslizamiento y deben ser considerados en la evaluación y planificación de las zonas urbanas y la interfaz urbano-forestal, donde la combinación de características socio-naturales multifactoriales genera este tipo de riesgo socio-natural de alta exposición. Para evaluar este efecto, se simularon escenarios pre y post deforestación utilizando el software STEP-TRAMM. Los datos de entrada fueron un evento de precipitación de 2019, la profundidad del suelo (m), la elevación (resolución de 0.2m^2 y 12.5^2 de píxel para una sola ladera y toda la cuenca, respectivamente), la clase textural del suelo, el ángulo de fricción ($^\circ$), el inventario de deslizamientos (trabajo de campo y teledetección), la saturación inicial del suelo, la resistencia de las raíces (Pa), la cohesión del suelo (Pa) y la presencia/ausencia de cubierta vegetal (teledetección de escenarios pre y post deforestación). El programa cuantifica la probabilidad espacio-temporal y las dimensiones de deslizamientos considerando la pérdida/ganancia mecánica de cohesión del suelo otorgada por las raíces de los árboles. Posteriormente, los escenarios se validan mediante la comparación con el catastro de deslizamientos, de manera de cuantificar los efectos de la deforestación. Como resultados, se obtiene que la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos aumenta en condiciones de deforestación, con un escenario posterior a la deforestación que muestra hasta 3 y 5 veces más deslizamientos generados y material desplazado (m^3), respectivamente. Las simulaciones a escala de ladera sugirieron que la combinación de cohesión del suelo de 1.0 kPa y niveles de saturación del suelo entre 0.5 y 0.8, son las que mejor se ajustaban a la generación de deslizamientos espaciales, temporales y volumétricos, con un pequeño desfase temporal entre el escenario simulado y el real, con más del 70% de deslizamientos coincidentes con el catastro realizado, mientras que, a nivel de cuenca, una cohesión del suelo de 3.0 kPa y niveles de saturación inicial entre 0.5 y 0.7 entregan el mejor ajuste, con un porcentaje de coincidencia de hasta 70% respecto al catastro. Existe una sobrestimación en la generación de deslizamientos para ambos escenarios, donde los resultados indican mayor proximidad a escenarios reales para datos de entrada más exactos y escalas de trabajo mayores, en este caso, para la ladera en estudio. Se concluye que, bajo un mismo evento de precipitación, y considerando el efecto cohesivo de las raíces, la probabilidad de generación de deslizamientos aumenta, en número y área de efecto, en condiciones de deforestación. La saturación inicial de agua y la cohesión de las raíces son factores importantes en la generación de deslizamientos para este contexto geológico, y deben ser considerados en futuros estudios de susceptibilidad para deslizamientos poco profundos para esta región. Aunque las simplificaciones y limitaciones relacionadas con la falta de datos sobreestiman el número y tamaño de la generación de deslizamientos, es un punto de partida en la evaluación de este problema socio-natural que afecta a Chile Central, ya que proporciona información valiosa y útil, especialmente en zonas de interfaz urbano-silvestre con escasa información, sirviendo como herramienta preventiva y de alerta temprana para futuros escenarios de planificación urbana sostenible. Es fundamental establecer lineamientos correctos para la planificación urbana futura, considerando e integrando la combinación de amenazas inherentes asociadas al contexto geológico de Chile Central, con la construcción social del riesgo relacionada con la expansión urbana, la actividad forestal y su dinámica, las políticas socioeconómicas y políticas entre otras.

*A la Naturaleza, maestra atemporal, y a mi familia, fuentes de infinito amor,
inspiración, motivación y convicción.*

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. HIPÓTESIS	6
3. OBJETIVOS	7
3.1. Objetivo General.....	7
3.2. Objetivos Específicos	7
4. MARCO TEÓRICO	8
4.1. El Riesgo como Construcción Social	8
4.1.1. Peri-urbanización y ocupación de suelos en áreas de alta exposición a amenazas naturales	11
4.1.2. Instrumentos de Ordenamiento Territorial y Normativa de Usos de Suelo: Plan Regulador Metropolitano y Comunal.....	34
4.1.3. Modelo Forestal y Generación de la Interfaz Urbano-Forestal	55
4.2. Procesos de Remoción en Masa	62
4.2.1. Generación de Procesos de Remociones en Masa: Factores Condicionantes.....	69
4.2.2. Generación de Procesos de Remociones en Masa: Factores Desencadenantes.....	98
4.3. Marco Geológico Local	107
4.4. Efectos de la Vegetación en la Estabilidad de Laderas.....	112
4.4.1. Efectos Hidrológicos	116
4.4.2. Efectos Mecánicos	127
4.5. Efectos de la tala rasa en la calidad del suelo y estabilidad de laderas	134
5. METODOLOGÍA	152
5.1. Etapa 1	154
5.1.1. Estudios Preliminares de Gabinete (G I).....	154
5.2. Etapa 2	156
5.2.1. Trabajo de Terreno (T1)	157
5.2.2. Trabajo de Gabinete (G II)	163
5.3. Etapa 3	173

5.3.1.	Software STEP-TRAMM: Establecimientos de parámetros (G III)	174
5.3.2.	Etapa de Terreno (T2)	194
5.3.3.	Validación de simulación	195
6.	RESULTADOS	197
6.1.	Imágenes de Ladera: Información Base	197
6.2.	Cuenca Palomares: Información Base.....	207
6.3.	Análisis textural del suelo	215
6.3.1.	Clasificación Textural del Suelo.....	220
6.3.2.	Erodabilidad	222
6.4.	Información Pluviométrica	222
6.5.	Catastro de Deslizamientos y Zonas con indicios de inestabilidad.....	227
6.6.	Efectos de la deforestación en la ocurrencia de remociones en masa.....	229
6.6.1.	Cuantificación de deslizamientos simulados: Ladera.....	231
6.6.2.	Cuantificación de deslizamientos simulados: Cuenca.....	251
7.	DISCUSIÓN.....	261
7.1.	Comparación entre catastro de deslizamientos y simulaciones	261
7.2.	Sobreestimación y limitaciones de simulaciones	265
8.	CONCLUSIONES	279
9.	REFERENCIAS	282

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Áreas y Zonas normadas por el actual PRMC (datos resumidos de MINVU (2017)).	39
Tabla 2. Zonificación Plan Regulador Comunal de Concepción vigente y su tipología correspondiente (datos recolectados de IMC (2004)).	46
Tabla 3: Clasificación de procesos de remoción en masa más comunes. (Modificado de Varnes (1978)).	63
Tabla 4: Clasificación de procesos de remoción en masa según sus velocidades. (Modificado de Cruden and Varnes (1996)).	64
Tabla 5. Características deseables de la vegetación según las funciones requeridas. (Modificado de Stokes et al. (2008)).	114
Tabla 6: Estudios preliminares de Gabinete (G I).	155
Tabla 7. Trabajos realizados en la fase de terreno 1.	158
Tabla 8. Densidad aparente según la clase textural del suelo (Zeri et al., 2018).	164
Tabla 9: Tipo de estructura de agregados del suelo y su código respectivo (Wischmeier et al., 1971)	166
Tabla 10. Conductividad hidráulica saturada para cada clase textural de suelo (Rawls et al., 1982).	185
Tabla 11. Vegetación arbórea presente en la ladera. Escenario pre y post-deforestación.	204
Tabla 12: Valores específicos de cobertura de suelos.	211
Tabla 13: Valores de presencia y ausencia de vegetación. Escenarios pre y post-deforestación.	215
Tabla 14: Erodabilidad de muestras tomadas en terreno.	223
Tabla 15. Resumen de catastros de deslizamientos a nivel de cuenca y ladera.	229
Tabla 16. Resultados de simulaciones en ladera estudiada, para el escenario de pre-deforestación a distintos niveles de saturación del suelo.	235
Tabla 17: Resultados de simulaciones en ladera estudiada, para el escenario de pre-deforestación a distintos niveles de saturación del suelo.	235
Tabla 18. Resultados de simulaciones en ladera estudiada, para el escenario de pre-deforestación a distintos niveles de saturación del suelo.	244
Tabla 19: Resultados de simulaciones en ladera estudiada, para el escenario de post-deforestación a distintos niveles de saturación del suelo.	245
Tabla 20. Resultados de simulaciones en ladera estudiada, para el escenario de pre-deforestación a distintos niveles de saturación del suelo.	254
Tabla 21: Resultados de simulaciones en ladera estudiada, para el escenario de post-deforestación a distintos niveles de saturación del suelo.	255

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura típica de zona urbana. (Modificado de Bryant et al. (1986)).	12
Figura 2: Concepto de Área peri-urbana y Región Urbana-Rural. (Modificado de Ravetz et al. (2013)).	12
Figura 3: Perfil geológico Talcahuano-Concepción. (Modificado de Mardones and Brito (1978)).	20
Figura 4: Mapa geomorfológico de la ciudad de Concepción. (Modificado de Mardones and Brito (1978)).	22
Figura 5: Expansión urbana de la ciudad de Concepción (años 1754-1980) (IGM, 2001).	27
Figura 6: Expansión Urbana en Cuenca Palomares entre los años 2002-2020. A) Palomares año 2002, B) Palomares año 2020. En amarillo el límite de la cuenca Palomares, en rojo nuevas zonas residenciales (Terrazas de Collao, Valle Noble) y zonas con aumento en el número de edificaciones (Fuente Google Earth).	33
Figura 7: Ubicación de Cuenca Palomares y su zonificación en el PRMC (modificado de MINVU (2017)).	38
Figura 8. Plano Normativo de Zonificación del Plan Regulador Comunal Concepción. (Modificado de IMC (2004)). El polígono de bordes rojo representa el área de estudio.	45
Figura 9. Zonificación Cuenca Palomares según PRC de Concepción. (Modificado de IMC (2004)).	49
Figura 10. Áreas sensibles a riesgos naturales y antrópicos en la cuenca Palomares. (Modificado de IMC (2004)).	50
Figura 11. Procesos reiterativos de tala y reforestación con especies exóticas en ladera colindante a zona urbana, cuenca Palomares. Notar la ubicación de los asentamientos y su expansión al pie de la ladera. A) Ladera recientemente talada y posteriormente reforestada, año 2002. B) Ladera reforestada con vegetación en crecimiento, año 2010. C) Ladera talada, año 2018. D) Ladera reforestada con vegetación en crecimiento, año 2020. Línea blanca representa la escala de 200 metros. (Fuente Google Earth).	52
Figura 12: Zona de pendiente clasificada como Protección de Paisaje recientemente cosechada y reforestada con especies exóticas. Este tipo de paisaje es típico en laderas del territorio estudiado.	54
Figura 13. Superficie anual de plantación por especies (1984- 2007) (INFOR, 2008). Otras especies: Atriplex spp., Pinus ponderosa, Prosopis tamarugo, Pseudotsuga menziesii, otras.	57
Figura 14. Contactos entre límites urbanos y forestales en la cuenca Palomares. (Fuente Google Earth, 2018).	61
Figura 15. Esquemas de los procesos de remoción en masa más típicos. (Modificado de Highland and Bobrowsky (2008)).	65
Figura 16. Zonas de riesgo a deslizamientos y/o inundación producto de los incendios del año 2017 (de la Barrera et al., 2018).	95
Figura 17. Series de tiempo de la pérdida de bosque y generación de deslizamientos posterior a las erupciones de Chaiten (a) y Puyehue (b). En rojo se muestra la pérdida de bosque y en negro la generación de deslizamientos (Korup et al., 2019).	97
Figura 18. Distancia máxima desde los procesos de remoción en masa al epicentro para terremotos de distintas magnitudes. Línea celeste representa deslizamientos y caídas de material no cohesivos, línea roja representa deslizamientos cohesivos, línea negra representa flujos y extensiones laterales. (Modificado de Keefer (1984)).	103
Figura 19. Mapa geológico área de estudio. Modificado de SERNAGEOMIN (2002).	108

Figura 20. Deslizamientos de suelo residual de regolito granítico en distintas zonas de la región. A) y C) corresponden al Cerro Caracol, B) a Penco, y D) a Pedro de Valdivia. Se identifica el deslizamiento de un suelo con mayor presencia de limos y arcilla, sobre un nivel del regolito más competente, generalmente compuesto por suelos con predominancia de texturas tamaño arena, con presencia parcial de relictos de la roca madre. Cortesía de Francisco Castro (PhD (c)).	109
Figura 21: Perfil típico de suelo residual granítico. (Modificado de Hillel (2007)).	110
Figura 22: Algunos efectos de la vegetación en la estabilidad de laderas. (Modificado de Suarez (1998)).	116
Figura 23. Efecto de la vegetación sobre el ciclo hidrológico. (Modificado de Suarez (1998)).	120
Figura 24. Clasificación del tipo de raíces según su morfología. (Modificado de Stokes et al. (2008)).	129
Figura 25. Efecto en conjunto del buttressing y arqueamiento en la estabilidad de taludes (Suarez (1998)).	133
Figura 26. Índice de reserva de la vegetación (IRV) para potasio intercambiable en diferentes suelos con plantación adulta de <i>Pinus radiata</i> en la Región del Bío Bío, Chile. (Modificado de Gerding (2009)).	137
Figura 27. Estabilidad nutritiva de distintos tipos de suelos de Chile Centro-Sur con plantaciones de <i>Pinus radiata</i> para diversos elementos nutritivos. Suelos graníticos corresponden al área de estudio. (Modificado de Gerding (2009)).	137
Figura 28. Mecanismo de generación de deslizamientos en espacios vacíos sin vegetación. En (A), el suelo está seco, y el tamaño crítico del deslizamiento (rectángulo) es mayor que la zona de suelo descubierta. En estas condiciones la zona no puede fallar ya que recibe la contribución de la resistencia de las raíces de los árboles que delimitan la zona descubierta. Al progresar la lluvia (B y C), el nivel freático sube y el tamaño requerido para el fallamiento disminuye al punto que se vuelve menor que la zona descubierta (D), generando el deslizamiento (Casadei et al. (2003)).	143
Figura 29. Metodología del estudio. Elaboración propia.	153
Figura 30. Diagrama de flujo de determinación de textura en terreno. Plasticidad relacionada con cantidad de limo o arcilla (Thien, 1979).	161
Figura 31. Diagrama triangular de clases texturales de suelo según el tamaño de las partículas (Groenendyk et al., 2015).	165
Figura 32. Relación entre clase textural y rango de permeabilidad (modificado de TRAGSA (1994)).	165
Figura 33. Ejemplo de recopilación de registros pluviométricos históricos, deslizamiento Julio 2006. Arriba: Acumulación mensual de precipitación año 2006. Abajo: Precipitación diaria 48 horas antes de la generación del deslizamiento.	168
Figura 34. Evolución temporal de la frecuencia de la ocurrencia de remociones en masa posterior a la deforestación. Las tasas y frecuencias de remociones en masa son comparadas con valores de resistencia de las raíces. Notar que entre 5 y 10 años es donde existe la mayor frecuencia de remociones en masa y la menor resistencia de las raíces (Imaizumi et al. (2008)).	169
Figura 35. Identificación y delimitación de áreas recientemente deforestadas. La acumulación final de éstas es observada en la imagen de título "Acumulado Zonas Deforestadas" la cual incluye terrenos descubiertos por acción antrópica ajena a la industria silvícola.	171
Figura 36. Delimitación de zonas deforestadas sin presencia de vegetación (amarillo) y zonas con presencia de vegetación (celeste). Zona urbana no es considerada.	172

Figura 37. Relación entre el modelo de generación de remociones en masa con las predicciones del alcance de los flujos de detritos y sus rutas. a) Los deslizamientos gatillados por Lluvia son representados por los hexágonos café. b) Las remociones en masa en a) son posteriormente transportadas mediante el modelo de flujos de detritos a lo largo de la superficie topográfica irregular con distintas rutas potenciales de desplazamiento (líneas rojas y amarillas), caracterizadas por la distancia de alcance L y la diferencia de elevación H , definiendo así el ángulo de alcance α (von Ruetze et al., 2016).....	175
Figura 38. Analogía entre el modelo de desencadenamiento de remociones en masa. Para un máximo de 4 partículas por columna, las flechas indican la redistribución de partículas cuando el umbral de 4 partícula es alcanzado. La ladera consiste en columnas de suelo con una sección transversal hexagonal. El agua que en la superficie modifica la carga mecánica (representadas por esferas rojas) y la resistencia. Una perturbación local (indicada por la esfera negra) inicia la reacción en cadena, moviendo las cargas en dirección pendiente abajo. Una falla en la columna depende de las fuerzas estabilizadoras y sus interacciones mecánicas con las columnas vecinas (representadas por el FBM entre columnas adyacentes). Asumiendo que la columna de suelo solo soporta 4 “unidades de carga”, la línea azul marca el perímetro de columnas donde ha ocurrido la redistribución de cargas iniciada por la esfera negra (Lehmann & Or, 2012).	177
Figura 39. Conjunto de fibras tensionadas entre dos placas rígidas (Cohen et al., 2009).....	178
Figura 40. Representación de elementos cohesivos del suelo (izquierda), y abstracción en un conjunto de fibras (derecha). (a) Antes y (b) después de la formación de grietas de tensión a lo largo de la superficie de fallamiento (Cohen et al., 2009).....	179
Figura 41. Unidades básicas del modelo de desencadenamiento de remociones en masa, con columnas de suelos de sección transversal hexagonal. Espesor del suelo H_{sd} , espaciamiento de grilla LG , elevación de superficie Z_{su} , elevación de roca madre Z_{br} . La pendiente de la ladera β activa el peso de la columna W como una fuerza desencadenante que es contrarrestada por la resistencia a la tracción τ_s , esta última que vincula la fricción entre la interfaz suelo-roca madre la cual es obtenida como el producto del esfuerzo normal σ_N y la tangente del ángulo de fricción. Las tasas de precipitación e infiltración, r e i respectivamente, el flujo matricial J_h , La infiltración en la roca madre J_{br} , y el flujo en la interfaz suelo-roca madre J_{sat} , afectan el contenido promedio de agua θ y la carga capilar $h < 0$. Cuando las fuerzas desencadenantes superan las fuerzas resistentes friccionales, la carga es redistribuida a los enlaces tensionales (de tracción) de resistencia τ_T . Cuando todos los enlaces tensionales son rotos, los esfuerzos compresivos (τ_C) son ejercidas en dirección pendiente abajo. El fallo progresivo de las columnas de suelo y la redistribución de cargas a celdas adyacentes es una característica del modelo FBM, expresando la resistencia del suelo como fuerzas capilares, visualizadas como estos enlaces deformables en la imagen circular (Lehmann & Or, 2012).	182
Figura 42. Datos de entrada obligatorios del modelo STEP-TRAMM. 1) Datos de Elevación. 2) Máscara de área específica a estudiar, 3) Eventos de precipitación, 4) Cobertura de suelos, especificando sólo presencia o ausencia de vegetación (bosque o plantación), 5) Valor asignado para la presencia de vegetación (por defecto “1” es para presencia y “0” para ausencia), 6) Resolución de grilla. Datos opcionales: 7) Espesor de suelo desde fuente externa, 8) Mapa externo del tipo de suelo (Lehmann et al., 2019).	183
Figura 43: Propiedades específicas del suelo. Software STEP-TRAMM. Elaboración propia.	184
Figura 44. Mapa de sombras. Elaboración propia.	188
Figura 45. Mapa de espesor de suelo. Elaboración propia.	188

Figura 46. Diagrama de flujo de tasa de producción de suelo y procesos erosivos (Stothoff, 2008).	189
Figura 47. Mapas de patrones de daños. Deslizamientos simulados en negro. Elaboración propia.	190
Figura 48. Mapa de deslizamientos simulados. Elaboración propia.....	191
Figura 49: Zonas de desplazamiento y alcance de flujos de detritos. Elaboración propia.....	191
Figura 50: Gráfico de series de tiempo, con la intensidad de precipitación (eje Y) y el tiempo transcurrido (eje X). Elaboración propia.	193
Figura 51. Mapa comparativo de deslizamientos simulados vs identificados. Elaboración propia.	194
Figura 52. Modelo Digital de Superficie (A-B), Modelo Digital de Terreno (C-D).	198
Figura 53. Área de estudio delimitada en MDT.	198
Figura 54. Pendientes de ladera estudiada (A). Catastro de deslizamientos identificados en terreno (B).	199
Figura 55. Histograma de pendientes de ladera estudiada.	200
Figura 56. Ladera antes (A-B) y después de evento de deforestación (C-D). En rojo polígonos que demarcan zonas sin vegetación arbórea previa al evento de deforestación (A-B), y zonas con vegetación arbórea posterior al evento de deforestación (C-D).	201
Figura 57. Delimitación de zonas con vegetación arbórea (verde) y deforestadas (amarillo). Ladera deforestada post-deforestación (A), zonas con vegetación arbórea post-deforestación (B), zona forestada y deforestada previa a deforestación (C), delimitación de zonas forestadas y deforestadas post deforestación (D).	203
Figura 58. Gráfico escenarios pre y post-deforestación.	204
Figura 59: Perfil transversal de ladera.	205
Figura 60: Perfil longitudinal de ladera.	206
Figura 61: Talud con evidencias de deslizamientos. A la izquierda, evento de deslizamiento previo a escalonamiento de talud, a la derecha talud escalonado.	207
Figura 62: Cuenca Palomares. A la izquierda el área total de la cuenca, a la derecha el área considerada para el análisis de remociones en masa.	208
Figura 63: Elevación cuenca Palomares.	209
Figura 64. Cobertura de suelos de cuenca Palomares.	210
Figura 65: Porcentaje de cobertura de suelos en cuenca Palomares.	211
Figura 66: Cobertura de suelos cuenca Palomares y límite urbano-forestal (línea negra discontinua).	213
Figura 67: Zonas forestadas (verde) y deforestadas (amarillo) en cuenca Palomares. Escenario pre-deforestación (A) y post-deforestación acumulada (B).	213
Figura 68. Presencia y ausencia de vegetación. Escenarios pre y post-deforestación.	214
Figura 69. Muestras de suelos tomadas en ladera.	216
Figura 70. Muestras de suelos tomadas en este estudio.	217
Figura 71. Relación entre clasificación de suelos USCS y USDA (García-Gaines & Frankenstein, 2015).	219
Figura 72: Clasificación de muestras tomadas en terreno, serie de suelos San Esteban de CIREN (1999) y Microzonificación sísmica (Vivallos et al., 2010).	221
Figura 73. Principales precipitaciones gatillantes de remociones en masa en el área de estudio y zonas aledañas.....	224
Figura 74. Serie de tiempo de precipitación, julio del 2006.	226
Figura 75. Serie de tiempo de precipitación, junio del 2019.	226
Figura 76. Ladera. Deslizamientos y/o zonas inestables identificadas en terreno e imágenes satelitales.	227

Figura 77. Cuenca. Deslizamientos y/o zonas inestables identificadas en terreno e imágenes satelitales	228
Figura 78. Variación de tasa entre volumen y área de deslizamientos, con el nivel de saturación, para el escenario de pre-deforestación (verde) y post-deforestación (rojo).	233
Figura 79. Tiempo (línea continua, eje izquierdo) y precipitación (línea discontinua, eje derecho) al momento de generación de primer deslizamiento, para distintos niveles de saturación del suelo de ladera estudiada. Comparación entre escenario pre-deforestación (verde) y post-deforestación (rojo).	234
Figura 80: Razón de área total de deslizamientos entre escenario post y pre deforestación.	236
Figura 81: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de julio 2006, saturación del suelo de 0.5. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.....	237
Figura 82: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de julio 2006, saturación del suelo de 0.55. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.....	237
Figura 83: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de julio 2006, saturación del suelo de 0.6 Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.....	238
Figura 84: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de julio 2006, saturación del suelo de 0.65 Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.....	238
Figura 85: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de julio 2006, saturación del suelo de 0.7. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.....	239
Figura 86: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de julio 2006, saturación del suelo de 0.75. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.....	239
Figura 87: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de julio 2006, saturación del suelo de 0.8. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.....	240
Figura 88: Área acumulada de deslizamientos simulados para distintos niveles de saturación del suelo (curvas de colores), para el evento de precipitación de julio 2006. Escenario pre-deforestación.....	241

Figura 89: Área acumulada de deslizamientos simulados para distintos niveles de saturación del suelo (curvas de colores), para el evento de precipitación de julio 2006. Escenario post-deforestación.....	241
Figura 90. Variación de tasa entre volumen y área de deslizamientos, con el nivel de saturación, para el escenario de pre-deforestación (verde) y post-deforestación (rojo).	243
Figura 91. Tiempo (línea continua, eje izquierdo) y precipitación (línea discontinua, eje derecho) al momento de generación de primer deslizamiento, para distintos niveles de saturación del suelo de ladera estudiada. Comparación entre escenario pre-deforestación (verde) y post-deforestación (rojo).....	243
Figura 92. Razón de área total de deslizamientos entre escenario post y pre deforestación.	246
Figura 93. Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.5. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.....	246
Figura 94. Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.55. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.....	247
Figura 95: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.6. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.....	247
Figura 96: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.65. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.....	248
Figura 97: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.7. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.....	248
Figura 98. Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.75. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.....	249
Figura 99. Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.8. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.....	249
Figura 100. Área acumulada de deslizamientos simulados para distintos niveles de saturación del suelo (curvas de colores), para el evento de precipitación de junio 2019. Escenario pre-deforestación.....	250

Figura 101. Área acumulada de deslizamientos simulados para distintos niveles de saturación del suelo (curvas de colores), para el evento de precipitación de junio 2019. Escenario post-deforestación.....	251
Figura 102. Tiempo (línea continua, eje izquierdo) y precipitación (línea discontinua, eje derecho) al momento de generación de primer deslizamiento, para distintos niveles de saturación del suelo de ladera estudiada. Comparación entre escenario pre-deforestación (verde) y post-deforestación (rojo).....	253
Figura 103. Razón de área total de deslizamientos entre escenario post y pre deforestación.	255
Figura 104. Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.5. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.....	256
Figura 105. Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.55. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.....	256
Figura 106: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.6. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.....	257
Figura 107: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.65. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.....	257
Figura 108: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.7. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.....	258
Figura 109. Área acumulada de deslizamientos simulados para distintos niveles de saturación del suelo (curvas de colores), para el evento de precipitación de junio 2019. Escenario pre-deforestación.....	259
Figura 110: Área acumulada de deslizamientos simulados para distintos niveles de saturación del suelo (curvas de colores), para el evento de precipitación de junio 2019. Escenario post-deforestación.....	260
Figura 111. Primer registro de deslizamientos en ladera estudiada y cluster simulado.....	262
Figura 112. Deslizamientos catastrados y columnas iniciales de deslizamientos simuladas. Nivel de saturación 0.6.....	263
Figura 113. Número (arriba) y porcentaje (abajo) de deslizamientos simulados coincidentes con catastro según el nivel de saturación del suelo a escala de ladera.....	264
Figura 114: Deslizamientos catastrados y columnas iniciales de deslizamientos simuladas. Cohesión del suelo 3.0 kPa, nivel de saturación 0.7.	266

Figura 115. Número (izquierda) y porcentaje (derecha) de deslizamientos simulados coincidentes con catastro según el nivel de saturación del suelo para distintos valores de cohesión del suelo a escala de cuenca.267

Figura 116. Diferencia en registros pluviométricos de distintas estaciones meteorológicas. 270

Figura 117: Efecto de las dinámicas de decaimiento y rebrote raidcular en la ocurrencia de deslizamientos en el tiempo. Gráficos de New Zealand y Oregon presentan reforestación, mientras que en Sumatra y Cambodiana la cobertura de suelo ha sido cambiada a suelos agrícola y/o praderas (Lehmann et al., 2019).274

1. INTRODUCCIÓN

El filósofo francés Jean Jacques Rousseau después del terremoto del 1 de noviembre 1755 en Lisboa donde murieron 100 mil personas, afirmó que “el hombre es responsable del peligro” e indicó “que, si los efectos del terremoto fueron tan terribles, la culpa fue de los habitantes”. A partir de esta opinión comienza lo que en francés se le denominó *cindynique*: la ciencia del peligro según Soutadé (1998). Producto de la proliferación de investigaciones y estudios la Oficina de Naciones Unidas para Coordinar el Socorro y Desastres (*UNDRO11*), en 1979 promueve una reunión de expertos con el fin de proponer una unificación de definiciones, dando origen al informe “*Natural disasters and vulnerability analysis*” (UNDRO, 1980). Se llega a la definición de riesgo, entendida como el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de un desastre, es decir el producto del riesgo específico, y los elementos en riesgo, el cual está compuesto por la vulnerabilidad, es decir, el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso, expresada en una escala desde 0 a 1 o pérdida total, y la amenaza o la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto periodo de tiempo en un área (lugar) dada.

Pese al término "natural", una amenaza natural tiene elementos de participación humana. Un evento físico, como por ejemplo una erupción volcánica que no afecta al ser humano, es un fenómeno natural, y no una amenaza natural. Un fenómeno

natural que ocurre en un área poblada es un evento peligroso. Un evento peligroso que cause fatalidades y/o serios daños más allá de la capacidad de la sociedad a responder, es un desastre natural. En áreas donde no hay intereses humanos, los fenómenos naturales no constituyen amenazas ni tampoco resultan en desastres. Esta definición difiere con la idea tradicional de que los desastres naturales son estragos inevitables causados por las fuerzas incontrolables de la naturaleza. Un desastre no es un proceso puramente natural, sino que es un evento natural que ocurre en lugares donde hay actividades humanas (OEA, 1991).

Las remociones en masa son fenómenos de transporte de material definidos como procesos de movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones y con movimiento descendente (Cruden (1991); Hauser (1993)). Los fenómenos naturales son considerados amenazas o peligros, en el sentido de que son procesos potencialmente catastróficos, que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales, los cuales son analizados como la probabilidad de que suceda un evento en específico durante un periodo de tiempo en un sitio dado (Hauser (1985); Sepúlveda (1998)).

La generación de este proceso está condicionada por diversos factores, tales como la geología y geotecnia de la roca y/o suelo y sus características mecánicas y químicas, rasgos geomorfológicos relacionados con la topografía, hidrología e hidrogeología, vegetación y clima (precipitaciones). El factor antrópico genera

cambios en estos factores, mediante la desestabilización laderas producto de la disminución artificial de la resistencia de material, cambios la topografía, escorrentía superficial producto de los cambios de usos de suelo, urbanización y deforestación, entre otros, lo cual potencia la probabilidad de ocurrencia de remociones en masa. Además, la expansión demográfica actual trae consigo la extensión de asentamientos urbanos hacia zonas montañosas que rodean los valles las que representan las zonas de mayor peligro de remociones en masa.

A nivel mundial se han registrado, desde el año 2004 al 2010, 2620 remociones en masa no sísmicas con consecuencias fatales, con un total de 32322 muertes registradas (Petley, 2012). Chile no se excluye de estas cifras: de 52 eventos declarados desde el año 1928 al 2017, existe un total de 1010 víctimas fatales provocadas por remociones en masa, las que corresponden a 882 fallecidos y 128 desaparecidos (Marín et al., 2018), tales como remociones en masa en Copiapó y Chañaral el año 2015, con 28 fatalidades y 59 desaparecidos, o en las quebradas Macul y San Ramón el año 1993 con 26 fatalidades y 9 desaparecidos (Marín et al., 2021). Por su parte, la región del Bío-Bío, y específicamente la ciudad de Concepción y su área metropolitana, situada en el sector litoral, es una de las áreas urbanas más afectadas por variados tipos de riesgos naturales. La zona litoral es una zona demográficamente densa, la cual tiene características geológicas y geomorfológicas que aumentan la susceptibilidad de generación de remociones en masa (Mardones & Vidal, 2001). En adición, la expansión urbana ha ocupado las unidades físicas marginales, tales como humedales y laderas de cerros con pendientes inestables. Socialmente, la ocupación del espacio se estructura en un

patrón de segregación, que sigue estrictamente los dictámenes del sitio; es decir, los estratos de más bajos ingresos ocupan los sitios más desfavorables, donde la conectividad entre los distintos núcleos urbanos de la intercomuna y de la región, se efectúa a través de caminos que cortan laderas de cerros, a menudo sin estabilizar (Mardones & Rojas, 2012). La combinación de las intensas precipitaciones junto a la generación de sectores vulnerables producto de la expansión urbana crea zonas altamente riesgosas a las remociones en masa. Así, existen numerosos registros de deslizamientos de distintas magnitudes gatillados por precipitaciones, los cuales afectan y generan mayor daño, mayoritariamente, de manera recurrente a sectores específicos de ésta, que corresponden a las zonas más vulnerables. Precipitaciones intensas han facilitado la generación de deslizamientos en sectores, por nombrar algunos, como Agüita de la Perdiz, Palomares y Chiguayante (año 2006, 2010, 2014, 2019), este último con un número de 10 víctimas fatales el año 2006.

En la Región del Bío-Bío, las remociones en masa representan un fenómeno relativamente común que se manifiestan principalmente producto de períodos de intensa lluvia en tiempos acotados y, en menor medida, por eventos sísmicos. Específicamente, las laderas de la cuenca del estero Palomares corresponden a cordones montañosos graníticos de baja altitud que en su mayoría se encuentran cubiertas por plantaciones forestales, donde el factor antrópico condicionante que afecta en el peligro de remociones en masa corresponde a la reciente deforestación de estas laderas, ya que la ausencia de vegetación contribuye a aumentar el efecto erosivo de la lluvia, aumenta la saturación del suelo y desestabilizan la ladera al no existir raíces.

El área de estudio se caracteriza por la presencia de población emplazada en las laderas y en las quebradas, las cuales históricamente han sufrido deslizamientos de distintas magnitudes. Se han identificado dos problemáticas relacionadas con el asentamiento en estas zonas, en primer lugar, en que la utilización de estas áreas con fines residenciales representa un riesgo para las personas que habitan esta área, ya que estas laderas son susceptibles a ceder y además sus taludes han sido modificados por los mismos pobladores para situar sus viviendas, lo cual incrementa la probabilidad de ocurrencia de un evento. Así, los mismos pobladores se han expuesto a este peligro, asentándose en estas topografías y modificándolas a beneficio propio, y como consecuencia han generado el riesgo de remociones en masa. En segundo lugar, no exista una interfaz clara entre las laderas utilizadas para explotación de recursos forestales y las zonas residenciales, donde los límites entre áreas productivas y residenciales no son claros, existiendo viviendas situadas en quebradas y laderas de uso forestal. La deforestación de laderas con plantaciones que han ayudado a cohesionar el suelo genera un aumento no inmediato de la probabilidad de deslizamiento, y al estar muy cercano a las zonas residenciales, aumenta el riesgo de las personas expuestas en el área de estudio.

Se han identificado en el área de estudio numerosos deslizamientos y laderas recientemente deforestadas con grietas que evidencian movimiento de la ladera y potenciales deslizamientos.

2. HIPÓTESIS

Bajo una misma condición de intensidad de precipitación, la probabilidad de ocurrencia de remociones en masa para una ladera aumenta en condiciones de tala rasa, lo que trae consigo el incremento de la condición de riesgo de una población que se encuentra expuesta a estos procesos producto de la combinación de una insuficiente planificación urbana, prácticas forestales invasivas y la inherente susceptibilidad a deslizamientos de las laderas habitadas.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

1. Evaluar los efectos de las dinámicas del modelo forestal y su método de cosecha de tala rasa en la construcción de una mayor amenaza de remociones en masa en el área metropolitana de concepción para procesos de remoción en masa desencadenados por lluvias intensas.

3.2. Objetivos Específicos

1. Simular la probabilidad de ocurrencia de remociones en masa y el volumen de material removido para diferentes intensidades de precipitaciones mediante el software STEPP-TRAMM a escala de cuenca y de laderas específicas.
2. Comparar la generación de remociones en masa y sus características (área, ubicación y extensión espacial) entre laderas recientemente deforestadas y laderas con cubierta forestal.
3. Establecer la importancia del factor de la deforestación (dinámicas de las prácticas forestales) en la generación de remociones en masa, considerando la cohesión de las raíces como factor influyente en la resistencia a la fuerza de tensión.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. El Riesgo como Construcción Social

Dentro del concepto de riesgo, si bien la variable de amenaza (socionatural o antropogénica) constituye sólo uno de los elementos activos en la generación de potenciales desastres, históricamente ha sido el factor más abordado y estudiado. Sin embargo, a nivel internacional, y, específicamente en América Latina, a fines del siglo XX el abordaje de la problemática de la generación de desastres ha ido cambiando en cuanto a su enfoque; desde el estudio del evento del desastre en sí y la posterior respuesta (gestión de desastres), hacia el riesgo que predispone el desastre. Esta mirada implica que el riesgo sea construido socialmente, donde la ocurrencia de cualquier desastre está intrínsecamente ligada a la existencia previa de una situación de riesgo, lo que también define la dimensión del impacto del evento (Gellert-de Pinto, 2012).

Este cambio ha permitido re-direccionar y enfatizar la naturaleza social del problema, posibilitando y resaltando un nuevo paradigma donde la construcción del riesgo es un proceso complejo basado en características y cualidades sociales e históricas particulares de cada territorio expuesto a cualquier tipo de amenaza. Dicho esto, para estudiar los potenciales desastres no basta con analizar los fenómenos físicos detonantes y las consecuencias físicas del evento, sino que hay que considerar también las condiciones previas que generaron el riesgo, visto este último como la

construcción social producto de la interacción de diferentes percepciones, grados de vulnerabilidad y desigualdad para cada territorio (Herzer, 2011).

Lavell (2000) menciona que, el nuevo paradigma del riesgo de desastres tiene como causal los distintos tipos de modelos de desarrollo, por lo que la generación de éste es originada por fallas en la planificación en el ámbito social, económico y político, que conlleva a la acumulación de riesgos y vulnerabilidades derivados del tipo de sociedad y economía que se ha ido desarrollando históricamente, y no por la presencia, presuntamente más frecuente, de amenazas, creando esta falsa impresión de aumento en la ocurrencia de eventos, cuando en realidad ha incrementado la vulnerabilidad frente a éstos (García Acosta (2005); Jaque et al. (2019)).

(Lavell, 2007) complementa esta idea, mencionando que “el riesgo es producto de procesos, decisiones y acciones que derivan de los modelos de crecimiento económico, de los estilos de desarrollo o de transformación de la sociedad. O sea, riesgo y falta de desarrollo están relacionados y, en consecuencia, el tratamiento que se dé al riesgo y su reducción debería ser considerado dentro de los marcos del desarrollo y de su gestión sectorial, social, ambiental y territorial”.

La combinación entre la acción humana, las características de la población y la infraestructura habitacional deficiente, permite y potencia la posibilidad de ocurrencia de desastres, ya que las zonas donde se encuentran los mayores niveles de amenazas coinciden, en su mayoría, con zonas de alta densidad poblacional, de

estratos socio-económicos bajos, donde además la infraestructura habitacional es insuficiente frente a gran parte de las amenazas que deben resistir. Esto evidencia que la generación y aumento del riesgo en el área de estudio es una construcción social, que en este caso proviene de bases jurídicas, políticas, económicas y sociales, donde las políticas y planes de urbanización han ignorado las características propias del territorio en todos sus ámbitos, donde esta urbanización se ha realizado sistemáticamente e históricamente, en este caso específico, en zonas de laderas, principalmente con cobertura de suelos forestal de explotación asociado a un alto riesgo de incendios y de remociones en masa en zonas cosechadas, aun conociendo la existencia de esta amenaza, lo que sumado al bajo presupuesto municipal destinado a la solución de problemas sociales y urbanización, impiden realizar trabajos acabados de corrección y prevención, limitándose prácticamente a acciones reactivas en situaciones de emergencias críticas cercanas o posteriores al desastre (Mardones & Vidal, 2001).

Históricamente, la ciudad de Concepción ha sido afectada por varios tipos de amenazas, tales como inundaciones, terremotos, tsunamis, incendios y remociones en masa, debido a las características climáticas, geográficas y geológicas inherentes del territorio donde está emplazada. Si bien se puede atribuir la susceptibilidad de la generación de estos fenómenos a factores naturales, al hablar de desastres, gran parte de estos, tradicionalmente atribuidos a un origen natural, en realidad son provocados por factores antrópicos relacionados con degeneración y degradación ambiental, el rápido crecimiento demográfico y los procesos de urbanización descontrolados con planificación urbana deficiente, todos los cuales están vinculados

al incremento de desigualdades socio-económicas en todas las escalas territoriales (García Acosta, 2005). Los principales factores que han contribuido a la construcción social del riesgo en el área de estudio serán descritos a continuación.

4.1.1. Peri-urbanización y ocupación de suelos en áreas de alta exposición a amenazas naturales

El crecimiento disperso de las ciudades ha generado transformaciones en la configuración física de las urbanizaciones, como también las condiciones económicas y ambientales, composición social, las relaciones sociales y de poder en las zonas periurbanas (Salazar, 2010). Dicho esto, la peri-urbanización es un concepto complejo de definir y categorizar, ya que está conformado por procesos en constante transformación e interacción.

Diversos autores han definido el concepto de zona peri-urbana según distintos enfoques. Uno de los primeros esquemas propuesto por Bryant et al. (1986) intenta delimitar las distintas zonas urbanas y su área de influencia (Figura 1). Para Ravetz et al. (2013), lo peri-urbano corresponde a la combinación de la franja urbana (zona que bordea las áreas de edificación que comprende un patrón disperso de áreas de asentamiento de baja densidad, concentradas en zonas con espacios abiertos baldíos, bosques urbanos y reservas naturales) y periferia urbana (zona que rodea áreas de edificación principales, con una mejor densidad de población, pero que pertenecen al área urbana funcional, incluyendo asentamientos pequeños, áreas industriales y otros usos de suelo urbano), ambas parte de la región urbana-rural

(Figura 2). Además, puede ser interpretada de distintas maneras según el nivel de desarrollo del territorio.

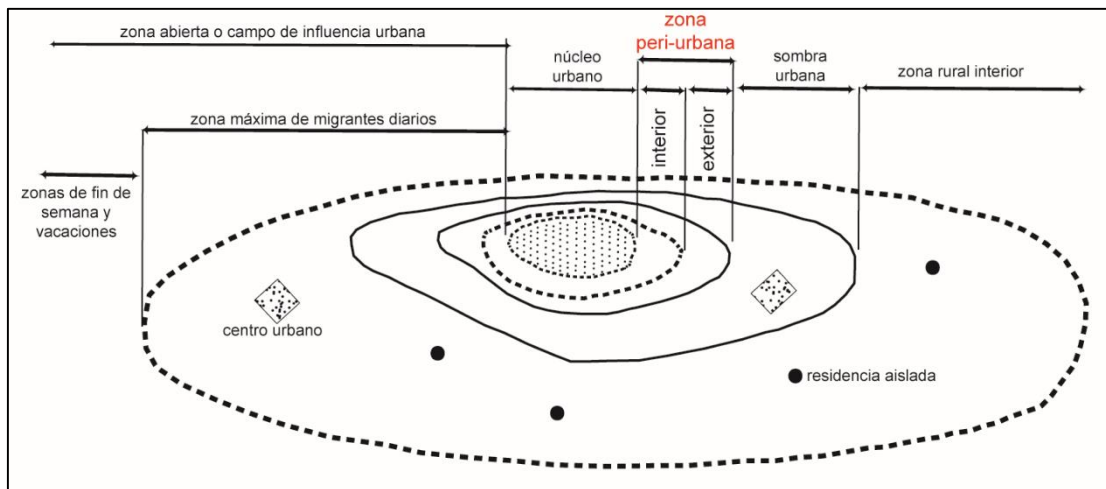


Figura 1: Estructura típica de zona urbana. (Modificado de Bryant et al. (1986)).

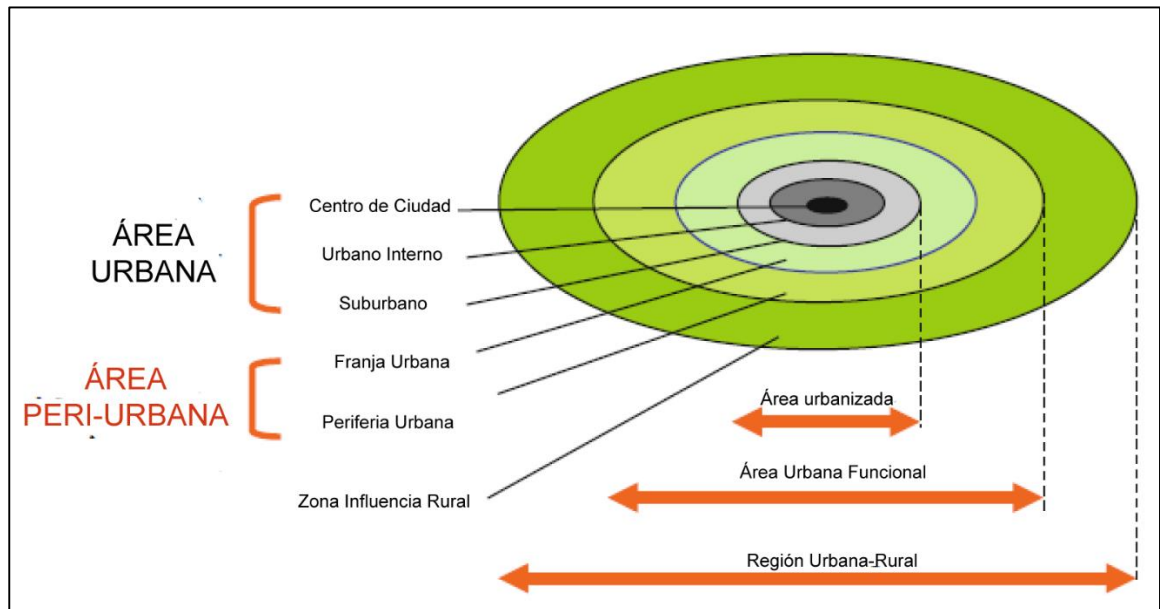


Figura 2: Concepto de Área peri-urbana y Región Urbana-Rural. (Modificado de Ravetz et al. (2013)).

Por un lado, en países con vasta historia industrial, o países post-industriales, se define como una zona de cambio socio-económico y de reestructuración espacial, mientras que, en países recientemente industrializados, y la mayoría de los países en desarrollo del mundo, se considera lo peri-urbano como una zona de urbanización caótica que conduce a la dispersión urbana. Independiente del caso, estipula que lo peri-urbano no puede ser visto sólo como una franja entre lo urbano y lo rural, sino más bien como un nuevo tipo de territorio multi-funcional. También menciona que, aunque las zonas peri-urbanas no puedan ser definidas de forma simple, existen características en común compartidas entre éstas dondequiera que se encuentren, tales como 1) densidad de población relativamente baja para estándares urbanos, 2) asentamientos dispersos, 3) alta dependencia en transporte para los desplazamientos, 4) comunidades fragmentadas y falta de gobernanza.

Salazar (2010) señala algunos enfoques típicos del concepto peri-urbano. 1) El clásico se centra en el carácter morfológico y funcional, específicamente en las características y cambios físicos del peri-urbano, como densidad, morfología, uso de suelo, entre otros, 2) el social, donde se estudia la emersión de nuevas dinámicas residenciales urbano-rurales y sus respectivas clases sociales, como también la influencia urbana en los cambios sociales, y finalmente 3) un enfoque centrado en explicar lo peri-urbano en la dinámica de las interacciones funcionales urbana-rurales a nivel regional, ya que en este ambiente se manifiesta con mayor magnitud los conflictos, vínculos y recomposiciones urbano-rurales.

Hernández (2010) afirma que el concepto de lo peri-urbano se puede entender como un espacio dinámico que cambia y transforma su posición física según la expansión de la ciudad sobre el suelo rural que la rodea, materializando así sobre este territorio los paradigmas del desarrollo urbano, a su vez variables y cambiantes en el tiempo e inseparables de las coyunturas sociales económicas y ambientales vigentes.

La complementación de los distintos enfoques analizados es necesaria para poder comprender el concepto del espacio peri-urbano de manera íntegra, al contemplar así las múltiples características exclusivas de cada territorio, como también la interacción e interconexión de éstas que definen cada territorio como una zona peri-urbana única y singular.

Kapstein (2004) menciona que el contexto mundial actual del crecimiento de las ciudades corresponde a una expansión urbana acelerada y descontrolada, aumentando la demanda de suelos y provocando una carencia de viviendas y condiciones precarias de habitabilidad en las zonas peri-urbanas. Según Ávila (2009), esta expansión ha alcanzado espacios históricamente rurales, donde la globalización, mediante la expresión territorial de las mega-ciudades ha fomentado el proceso de dispersión urbana.

El hecho de que el crecimiento peri-urbano ha sido vigoroso y precipitado, ha disminuido contundentemente e incluso impedido la creación de tejidos mixtos residenciales y mixtos, produciendo en su lugar una base de desarrollo más pobre en servicios y actividad productiva, mediante la dilatación progresiva de las coronas urbanas externas. Se instaura un modelo expansivo de ciudad dispersa

caracterizado por baja densidad de edificación, grandes extensiones de espacios libres, presencia de áreas industriales y uso semi-urbano de vertederos, canteras e invernaderos, creando así mosaicos discontinuos de fragmentos autónomos, separados por terrenos baldíos intersticiales, obteniendo como resultado final una fisionomía urbana que carece de todos los rasgos y características típicas, tales como intensidad, densidad y límites, que definen una ciudad (Hernández, 2010).

Las consecuencias producto de la peri-urbanización afectan a todos los aspectos propios del territorio. Algunas de las repercusiones típicas de este proceso son la exposición a amenazas naturales, ocupación desmesurada de suelo, consumos elevados de agua y energía, dependencia del vehículo privado, mantención de la urbanización y servicios municipales, segregación de grupos sociales, problemas de gobernanza, etc. En la sociedad postindustrial la ciudad se ha convertido en una zona de alto costo para vivir, provocando una dinámica de aumento del precio de los suelos en entornos peri-urbanos producto de la reducción en la disponibilidad de los mismos, donde además han asumido una condición de marginalidad y precariedad urbanística que fomenta la utilización no planificada y caótica de suelos que favorece la degradación ambiental y visual del territorio. Algunos ejemplos comunes de este uso caótico de suelos en zonas peri-urbanas contemplan a los vertederos de residuos informales, chabolismo (vivienda humilde hecha con materiales de desecho o de mala calidad que carece de condiciones de habitabilidad; generalmente está situada en zonas suburbanas sin urbanizar), movimiento de tierras sin control, zonas de aparcamiento improvisadas, etc. Así, se genera una especie de colonización basado en ocupaciones, en ocasiones ilegales, del espacio peri-urbano, que además

suponen un riesgo potencial para las propias personas, al concentrar y modificar sus actividades en espacios consustancialmente propensos a la generación de procesos naturales (fluviales, hidro-meteorológicos, geológicos) que suponen alto riesgo a la población, con efectos y consecuencias que se ven agravados y potenciados por la modificación antrópica del territorio (Hernández, 2010).

Independiente del proceso de urbanización que se haya llevado a cabo para la construcción de la metrópolis, finalmente es la relación entre sociedad y el territorio lo que genera riesgos socio-naturales y antrópicos. Dicho esto, distintos procesos y modalidades de urbanización condicionan la generación de zonas de mayor riesgo para la población. La creación del espacio peri-urbano, al considerarlo como un proceso que articule no sólo aspectos geográficos físicos, sino también factores sociales, económicos, políticos y culturales, deja claro esta relación entre la expansión urbana y la construcción social del riesgo. La presencia o ausencia de instituciones responsables del desarrollo urbano, el tipo de normativa urbana existente, nivel de organización social, tipos de relaciones de gobernabilidad urbana, capital social, densidad poblacional, grado de pobreza y segregación socio-espacial son ejemplos de factores que usualmente tienen un nivel de desarrollo deficiente en zonas peri-urbanas, que además están directamente relacionados con el factor de vulnerabilidad de la población (Hernández, 2010).

En el modelo de expansión urbana, por lo general la generación de factores de riesgo menores se caracteriza por un período largo y acumulativo, donde los efectos de la expansión no controlada, a corto plazo, son de pequeña magnitud, pero que sin

embargo son capaces de producir daños socio-económicos muy costosos al mediano y largo plazo. Por lo mismo, la generación de riesgos en zonas urbanas no es distinguida en su máxima magnitud potencial, es más, estos eventos son considerados triviales y subestimados tanto por la población como por entidades gubernamentales, aceptándolos como parte de lo cotidiano. Factores relacionados con lo peri-urbano como la concentración de la población, una legislación, marco regulador e instituciones responsables del desarrollo de carácter débil, poca organización y participación ciudadana, deterioro ambiental y la fractura entre la ciudad legal y regulada, y las zonas ilegales e informales, son las fuentes de vulnerabilidad urbana y peri-urbana más común que influyen en la construcción social del riesgo (Hernández, 2010).

A nivel nacional, Chile presenta una de las tasas de urbanización más elevadas de Latinoamérica, alcanzando entre 89 y 92% para el año 2020 según proyecciones de las Naciones Unidas, lo que apuntaría a problemas de planificación y gestión en la disponibilidad de terrenos y suelos para el desarrollo urbano, conflicto el cual se ha materializado a la fecha actual. Como consecuencia, existe una escasez de viviendas en las áreas urbanas para gran parte de las familias de niveles socio-económicos bajos, dando lugar al origen de asentamientos precarios, entendidos por Busquets (1999) como una forma de crecimiento que se sustenta en la transformación del suelo rural a urbano, proceso el cual por lo general no cuenta con la previsión de ningún tipo de urbanización.

La transformación del desarrollo urbano nacional hacia uno discontinuo con zonas peri-urbanas, tiene estrecha relación con el rol poco relevante del Estado, tanto en el plano normativo como de inversiones, dándole realce al mercado de suelos urbanos, siendo la referencia principal y más válida del desarrollo. A modo de ejemplo, en la ciudad de Santiago el desarrollo discontinuo surge producto de la especulación en el precio de los suelos en espacios urbanos, lo que obligó al rubro de la construcción a alejarse desde los márgenes urbanos hacia zonas, en un futuro peri-urbanas, para poder concretar los proyectos. Estos últimos a su vez condujeron a especular el valor de los suelos vacantes en zonas periféricas, distorsionando el plan de ordenamiento urbano original, y dificultando cada vez más el poder de adquisición de la población, lo que conllevó a la generación de zonas peri-urbanas a través del asentamiento caótico e informal, como también a una segregación socioeconómica residencial, este último ligado estrechamente con el mercado de suelos, ya que los precios de la tierra definen patrones de localización de distintos estratos sociales, y estos a su vez contribuyen a determinar precios de la tierra (Trivelli, 1981). Finalmente, son los sectores de menores ingresos los que deben acceder a soluciones habitacionales de bajo costo, edificadas en terrenos reducidos y localizadas en la periferia más pobre de la ciudad, donde los suelos son más baratos. Estos suelos por lo general están localizados en zonas periféricas, alejados de los centros de actividad, son de mala calidad y expuestos a amenazas naturales, están ubicados en zonas poco atractivas como basurales, pozos de áridos, canteras, zonas industriales, forestales, etc. Esta problemática ha ocurrido de manera sistemática y recurrente a lo largo del país, donde la formación de estos asentamientos ha contribuido al proceso de peri-

urbanización ya que han estimulado una incesante e incontrolada expansión de zonas periféricas (De Mattos, 1999).

La ciudad de Concepción, siendo el segundo conglomerado urbano en importancia demográfica y económica del país, ha experimentado transformaciones territoriales similares a las ocurridas en el Área Metropolitana de Santiago, que han conllevado a la formación de espacios peri-urbanos. Concepción es descrita como una ciudad fragmentada territorial y socialmente, donde las empresas inmobiliarias en conjunto con proyectos estatales configuran las ciudades a modo de mosaicos de segregación y dispersión. Dentro de esta configuración, las características geológicas y geomorfológicas inherentes e intrínsecas al territorio han jugado un rol principal en la distribución histórica de asentamientos, expansión urbana y peri-urbanización.

El estudio del IGM (2001) indica que Concepción se encuentra emplazada en condiciones geomorfológicas que históricamente han dificultado y complejizado el asentamiento en esta zona. El núcleo urbano Concepción-Talcahuano se encuentra sobre una llanura aluvial de aproximadamente 10 km de ancho, con la presencia de tres unidades estructurales y morfológicas de dirección O-E, que controlan y configuran el relieve actual; un bloque de rocas paleozoicas graníticas y metamórficas altamente meteorizadas en la península de Tumbes y los cerros Teta Norte y Teta Sur hacia el oeste, mientras que al este domina el bloque de la Cordillera de la Costa, de composición granítica, maciza, y de baja y homogénea elevación. Entre ambos bloques se ha formado la llanura fluvio-marina de Concepción; una fosa tectónica donde se han depositado arenas de origen

piroclástico del volcán Antuco, transportadas por el sistema fluvioglacial del río Laja y Bío-Bío (Laugenie, 1968). A su vez, esta llanura se constituye de un nivel de terraza fluvial interior, alta y estrecha, y una extensa llanura deltaica, con presencia de dunas eólicas en el margen occidental. Dentro de esta llanura, emergen cerros islas, conformados por rocas sedimentarias mesozoicas y cenozoicas altamente meteorizadas, las cuales separan y fragmentan a la llanura, obstaculizando el drenaje (Figura 3).

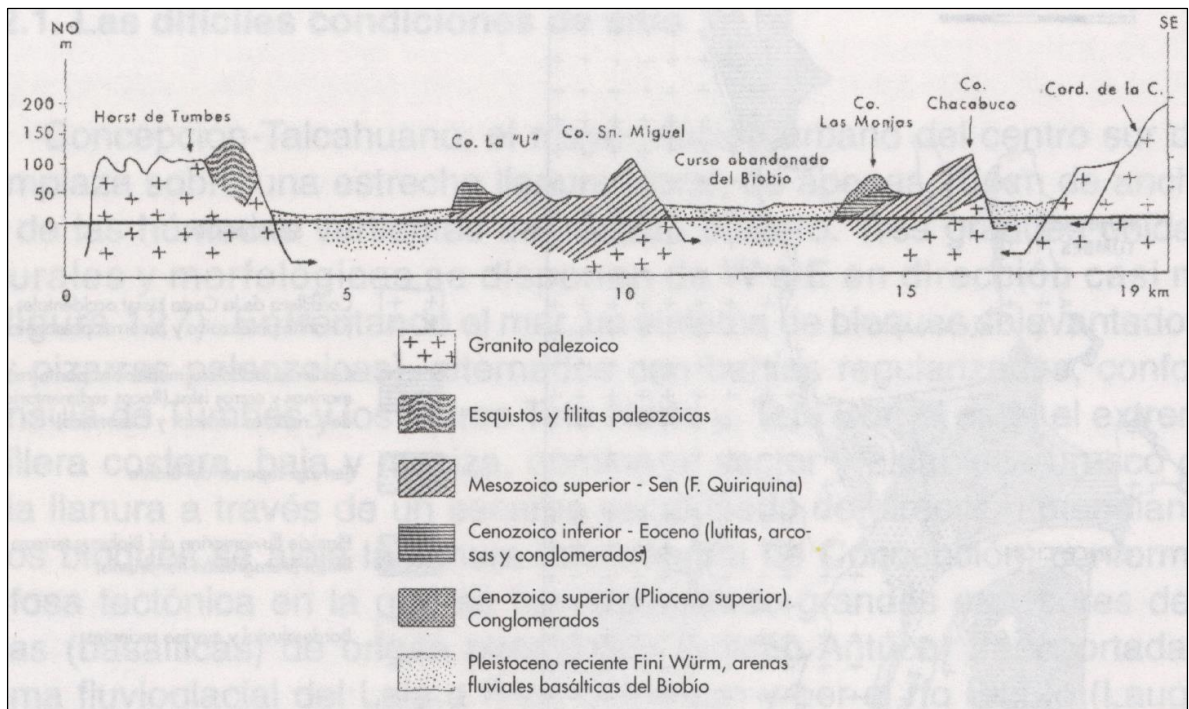


Figura 3: Perfil geológico Talcahuano-Concepción. (Modificado de Mardones and Brito (1978)).

Basado en los estudios de Galli and Lemke (1967), se han establecido, a partir de características como la exposición, pendiente, litología, meteorización,

permeabilidad, posición del nivel freático y resistencia sísmica, las aptitudes de los suelos de fundación de la llanura Concepción-Talcahuano.

Los suelos clasificados como sin inconvenientes, corresponden a 1) relieves rocosos graníticos paleozoicos y de rocas sedimentarias cenozoicas con bajo nivel de meteorización. Sus pendientes son menores a 10° de inclinación, constituyendo excelentes sitios para la fundación urbana, donde la combinación de suelos relativamente impermeables, con napas freáticas débiles y profundas, dificultan la saturación de los sedimentos y suelos residuales, generando una alta estabilidad de las vertientes. Sin embargo, estos terrenos se encuentran restringidos a los restos de las plataformas de erosión que coronan los cerros islas Lo Galindo y Las Mercedes (Figura 4), 2) la alta terraza aluvial y planicie litoral del Bío-Bío (sin dunas), las que conforman la mayor superficie de suelos aptos en Concepción. Están constituidos por arenas medias a gruesas, altamente homogéneas, con intercalaciones de limos y arcillas en horizontes profundos. Se acumulan en grandes espesores (sondajes y estudios gravimétricos indican espesores de arena sobre los 100 m de potencia), donde, en conjunto con su permeabilidad, le otorgan un grado de compactación que aumenta con la profundidad. Lo anterior, sumado a que la napa freática esté permanentemente de forma subterránea, genera un contexto donde no se presenta peligro de licuefacción ante sismos. Sin embargo, cuando las arenas son heterogéneas y contienen lentes de sedimentos arcillo-limosos o coluviales, el peligro de licuefacción aumenta, como es el caso de áreas de contacto entre los relieves montañosos y los lechos abandonados, donde los depósitos tienden a hacerse más impermeables (IGM, 2001).

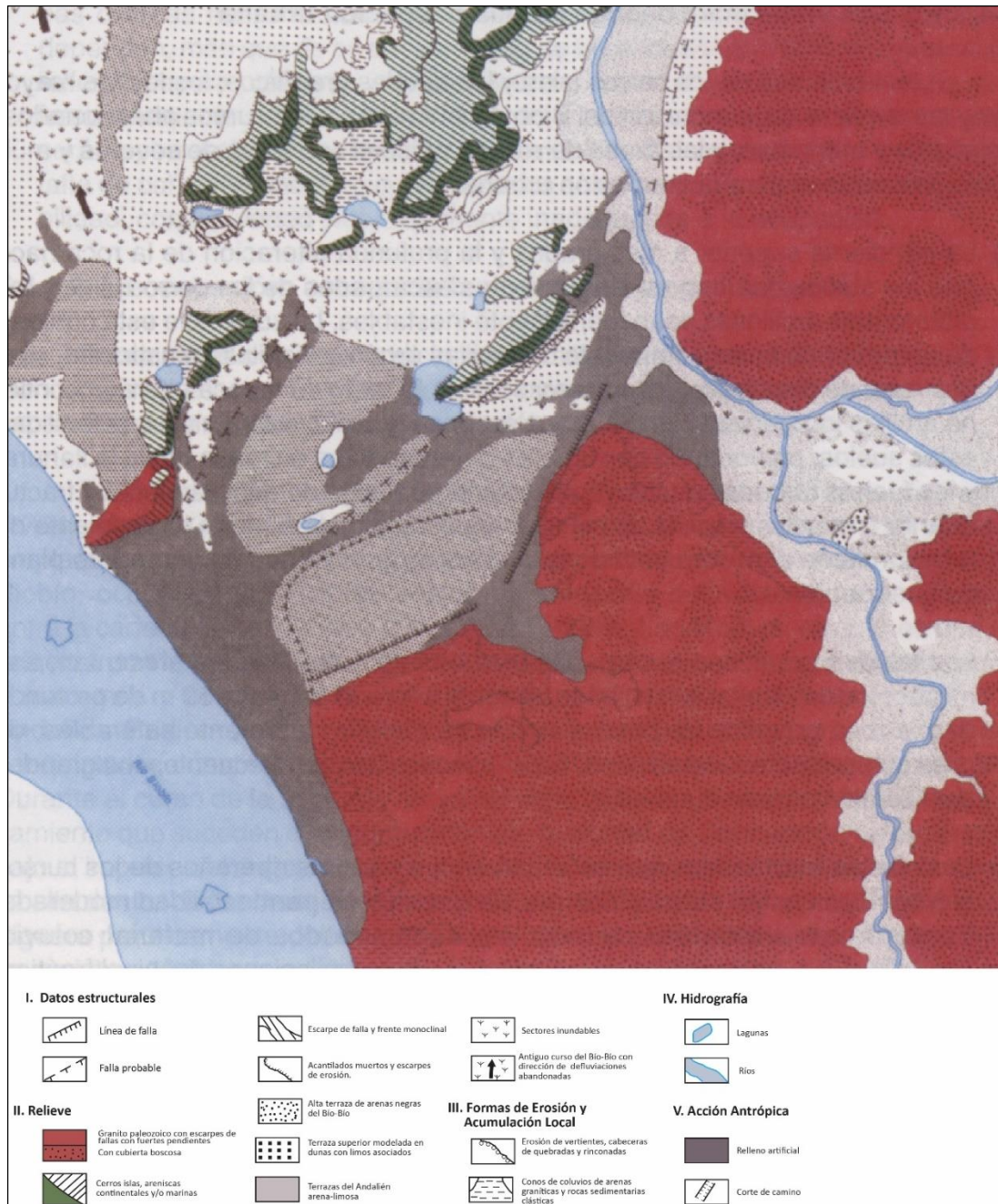


Figura 4: Mapa geomorfológico de la ciudad de Concepción. (Modificado de Mardones and Brito (1978)).

Los suelos clasificados como con inconvenientes corresponden a 1) depósitos coluviales provenientes de rocas sedimentarias o graníticas de bordes de vertientes, los que son inestables desde un punto de vista geotécnico. Específicamente, aquellas arenas de procesos coluviales, provenientes de rocas sedimentarias cenozoicas, debido a su alto contenido de limos y arcillas, presentan grados extremos de plasticidad en condiciones de humedad y saturación, mientras que los bancos arenosos coluviales, provenientes de la erosión del suelo residual granítico, debido a su porosidad, les otorgan a estos suelos una textura que favorece el peligro de licuefacción.

En adición, su localización espacial no es favorable, ya que, al estar situados a los pies de los cerros o en rinconadas con mal drenaje, y rodeados de taludes de alta pendiente, son inestables y susceptibles ante sismos y lluvias, como también a procesos de solifluxión, escurrimiento superficial de sedimento limo-arcilloso y deslizamientos. Se encuentran en sectores como el Barrio Universitario y las llanuras de contacto con los cerros islas (Figura 4). 2) La llanura baja areno-limosa, extendida desde el norte de la terraza alta del Bío-Bío y sobre el borde oriental de Carriel Sur y parte de Hualpencillo. Está constituida por arenas no consolidadas y gravas, otorgándole inestabilidad y permeabilidad a la llanura. Debido a ser un depósito reciente, la falta de una cubierta vegetal que proteja y refuerce a estos suelos se traduce en una morfogénesis activa y suelos móviles, facilitando el transporte de arenas, generando topografías irregulares, donde el nivel freático crea en las depresiones topográficas, áreas de mal drenaje. El asentamiento en estas zonas

conlleva la nivelación y estabilización de las arenas, para así evitar la erosión (IGM, 2001).

Dentro de los sitios más inadecuados para la ocupación urbana, se encuentran las vertientes de los cerros islas y taludes graníticos, los lechos mayores y las terrazas de inundación de los ríos Bío-Bío y Andalién, los cursos abandonados, humedales, pajonales y marismas, y las áreas de relleno artificial, donde se identifican múltiples y estrictas limitaciones para el asentamiento urbano y expansión urbana.

Estas zonas corresponden a 1) laderas con pendientes superiores a 10° y con una muy alta meteorización de la roca, donde los suelos residuales que cubren las vertientes escarpadas de cerros islas y plataformas arcillosas incrementan la inestabilidad. Las superficies de estas morfologías están cubiertas por suelos de alta potencia, compuestos por arcillas orgánicas de alta plasticidad, susceptibles a procesos de remociones en masa, a la saturación y solifluxión.

A mayor profundidad, la roca se encuentra muy alterada, pudiendo identificar en este regolito gran cantidad de arcillas inorgánicas, limo y/o arena arcillosa, las que se saturan con facilidad ante lluvias intensas, gatillando deslizamientos, o bien, drenándolos hacia la llanura. Estos taludes son un riesgo permanente de deslizamientos ante eventos sísmicos. Respecto a las rocas metamórficas, cuando la pendiente del talud coincide con la orientación de la foliación, esta última actúa como plano de deslizamiento, Los taludes graníticos que se encuentran escarpados y muy meteorizados ,presentan entre 8 a 50 m de profundidad de regolito del tipo maicillo,

los que son fácilmente saturables, de gran plasticidad, producto de la alteración de feldspatos a arcillas, siendo altamente inestables, donde, en consecuencia, existe una alta frecuencia en la generación de deslizamientos de magnitudes mayores. 2) Terrazas fluviales situadas en las riberas de cursos hidrográficos, constituidas por sedimentos de permeabilidad moderada. En el caso del río Andalién, la combinación con material coluvial aumenta la inestabilidad de las terrazas. Además, en estos suelos existe una fuerte oscilación del nivel freático, llegando a la superficie en estaciones lluviosas. Debido a su origen y ubicación, están periódicamente amenazados por inundaciones, y presentan características semi-pantanosas de altos niveles de saturación, por lo que deben ser rellenados artificialmente para su ocupación. 3) Los paleocauces abandonados del río Bío-Bío, con presencia de pajonales y marismas, prácticamente imposibilitan su ocupación. Sus suelos están compuestos por arcillas y limos orgánicas, con alto grado de impermeabilidad. En períodos lluviosos, el agua aniega estas zonas, creando ambientes semilagunares, precipitando arcillas, y donde la vegetación que muere es depositada, formando turbas. 4) Los rellenos artificiales, que ocupan amplias superficies con limitaciones, En Concepción, cubren las terrazas ribereñas del río Bío-Bío y Andalién (sector Puchacay), gran parte del paleocauce del Bio-Bío que bordea el cerro Chepe y laguna Redonda, la antigua defluviación Andalién-Bío-Bío, el Barrio Universitario, y lagunas en la terraza superior, como Los Negros, Gavilán y Las Tres Pascualas. En general, los rellenos se encuentran en sectores bajos, subyacidos por sedimentos finos, turbas o áreas mal drenadas. A pesar de ello, su calidad como suelo de fundación dependen, más que su base natural, de la calidad y cantidad del material de relleno; entre más gruesa sea la textura, mayor será la permeabilidad y por

consiguiente la inestabilidad sísmica. Niveles de alta humedad y falta de cohesión aumentan la inestabilidad y compresibilidad de estos suelos (IGM, 2001).

Es sobre estos suelos que la ciudad de Concepción se ha desarrollado, siendo éstas una de las directrices más importantes en la evolución histórica, temporal y espacial de la ciudad, determinando las direcciones de expansión, peri-urbanización y la ocupación social del territorio (IGM, 2001).

Inicialmente, posterior al abandono del emplazamiento fundacional de Penco en el año 1754, la ciudad se limitó a un damero ubicado en la parte más alta de la terraza aluvial de arenas negras, ocupando los mejores suelos de fundación del territorio, el cual se estrecha entre la cadena de cerros islas como el Chepe, La Pólvora, Las Monjas, etc., lagunas y lechos abandonados del río Andalién y Bío-Bío, constituyendo un perfecto emplazamiento defensivo (Figura 5) (IGM, 2001).

En la segunda mitad del siglo XIX, posterior al estancamiento ocurrido en la Independencia, Concepción se desarrolló gracias al auge cerealero, ocupando paulatinamente la totalidad de la terraza alta. Ya entre los años 1900 y 1920, la crisis de exportación de trigo detiene esta expansión urbana, generando un estancamiento en las zonas planas, registrando pequeños y aislados avances urbanos sobre la terraza alta en dirección a Talcahuano, sobre dunas cercanas al Andalién, camino a Penco (Chillancito) y sobre la terraza del Bío-Bío en dirección a Chiguayante (Pedro de Valdivia). Para esta época, la expansión urbana ya había agotado la disponibilidad de sitios aptos para la ocupación (IGM, 2001).

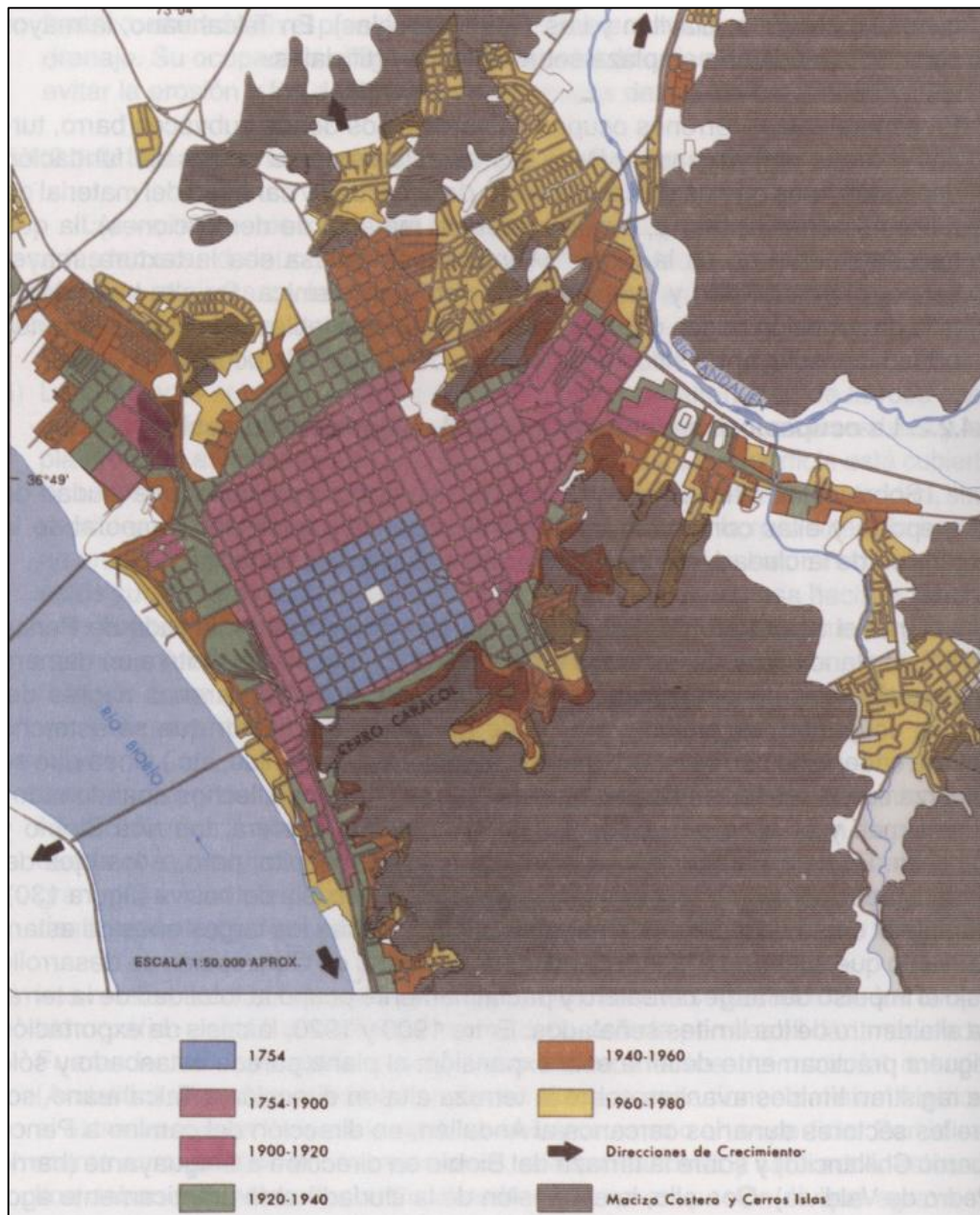


Figura 5: Expansión urbana de la ciudad de Concepción (años 1754-1980) (IGM, 2001).

A partir del año 1940, el modelo industrial sustitutivo tiene un fuerte impacto poblacional, lo que se traduce en una alta expansión espacial urbana de la ciudad.

La actividad industrial atrajo a población rural, la cual se asentó en unidades físicas marginales, ya que eran los únicos sitios disponibles para poder asentarse. Así, se ocuparon territorios sobre el modelado dunario, áreas inundables y arcillosas rellenas por basurales, y sobres cerros con pendientes inestables (Guerrero & Hernández, 1966). Los rellenos artificiales, ya iniciados en el año 1920, se caracterizan en este período por situarse próximos al sitio inicial, donde la expansión más vigorosa es hacia el norte y noroeste, en la llanura fluvio-marina arenosa, estructurando el Barrio Norte y el brazo de urbanización, donde actualmente se unen las ciudades de Concepción y Talcahuano. Entre los años 1960 y 1980, el ritmo de expansión urbana supera a la anterior, incorporando zonas peri-urbanas como el sector de Nonguén y Palomares (IGM, 2001).

Desde una perspectiva social, la ocupación está estructurado en un patrón de segregación que sigue estrictamente las características socio-naturales del territorio. El censo del año 1960 indica que los estratos sociales de más bajos ingresos, principalmente obreros, ocupan los espacios más desfavorables de la ciudad, tales como el sector ribereño bajo del río Bío-Bío y el barrio norte; áreas con relleno próximas al curso actual del río Bío-Bío, y los sectores dunarios cercanos al río Andalién, como también comienzan a asentarse en cerros islas de rocas cenozoicas, como el Chepe y La Pólvora, y rocas graníticas fuertemente meteorizadas de la Cordillera de la Costa, como la Agüita de la Perdiz en el cerro Caracol.

Existe una correlación entre los estratos sociales de más bajos ingresos, los patrones de distribución de fecundidad (más de 5 hijos), mortalidad y ocupación de sitios

inhóspitos y peligrosos, finalmente expresado en una baja expectativa de vida. Por el contrario, sectores más meridionales, como San Martín-Víctor Lamas, y las prolongaciones sobre el borde alto del río Bio-Bío y el Barrio Universitario, presentan la menor cantidad de obreros, bajas tasas de fecundidad y mortalidad. Espacios sobre la terraza alta del río Bío-Bío; los mejores suelos de fundación, han sido ocupados por grupos socioeconómicos de estrato medio a alto, prolongando la ocupación desde los sitios más primitivos de la ciudad hacia sectores modificados y valorizados (como el Barro Universitario), y hacia los sectores con atributos más atractivos (borde alto del río Bío-Bío; Pedro de Valdivia, Lonco y camino a Santa Juana) (IGM, 2001).

De esta manera, respecto a las relaciones entre sitio y condición social, los patrones de distribución de Concepción responden a mecanismo clásicos de segregación espontánea por el valor de los suelos.

Actualmente, las tendencias actuales de expansión indican una dinámica centrífuga, donde el centro de la ciudad muestra una gradual reducción de la población, mientras que sectores próximos tienen un crecimiento moderado, y zonas periféricas crecen con aún más rapidez. El sector de Collao-Nonguén ha crecido con un ritmo moderado (1.3%, Morales (1988)). Esto se explica debido a que, una vez saturados los espacios centrales, la disminución en estos sectores es resultado del cambio de uso del suelo urbano, donde la actividad comercial y de servicios comienzan a desplazar al uso habitacional, transformando sectores residenciales tradicionales a uso mixto, y, en consecuencia, los barrios residenciales y sectores peri-urbanos han

sufrido un fuerte incremento demográfico. La ciudad de Concepción, por tanto, tiende a expandirse según la dirección de los espacios periféricos disponibles, mientras que las direcciones sociales siguen a las condiciones sociales preexistentes y al valor del suelo (Morales (1988); IGM (2001)).

La densidad de ocupación y el valor de los suelos presentan un patrón de reducción, contrario al crecimiento, desde el centro a la periferia. Así, sectores con amplia disponibilidad de terrenos poseen los menores valores del suelo, y, por lo tanto, constituyen el sector más lógico y accesible de expansión para los sectores más modestos y viviendas sociales, como es el caso de Nonguén y Palomares (Morales (1988); IGM (2001)).

Debido a esta saturación de zonas centrales, existe una proliferación de rellenos artificiales en terrenos inundables, en su mayoría en sectores ribereños del río Andalién, donde se han construido proyectos inmobiliarios masivos, como el caso de Valle Noble, como también ocupaciones de lomajes y cerros con loteos para viviendas individuales, como es el caso de la cuenca Palomares. La ocupación de sitios difíciles conlleva riesgos que obligan a las entidades y autoridades tomar precauciones y crear conciencia (Morales (1988); IGM (2001)).

Específicamente, para el sector de Nonguén-Palomares, Salinas and Pérez (2011) mencionan que, desde mediados del año 1950, la industrialización tardía de la zona condujo una migración rural-urbano, iniciando la configuración metropolitana de la ciudad. Esto conllevó al crecimiento significativo del área urbana, y por consiguiente

a procesos de expansión urbana que hasta esa fecha eran incipientes. Desde entonces, esta configuración ha sufrido diversas transformaciones en todos los contextos territoriales, donde destaca la constante expansión urbana y creación de zonas peri-urbanas que ha supuesto plantear y modificar, en un contexto administrativo, planificaciones metropolitanas con el objetivo de proponer soluciones y poder proyectar con antelación los cambios territoriales, como lo son el Plan Intercomunal de Concepción en 1963, el Plan Regulador Metropolitano de Concepción de 1980 y 2004 (actual plan vigente). Si bien el contexto urbano actual de ésta área se ha transformado desde una zona típica peri-urbana a un modelo de carácter intermedio, donde las características propias de la fase expansión y fragmentación urbana han variado a una de crecimiento moderado del suelo urbano que muestra indicios de una conformación de continuidad entre los fragmentos iniciales, a través de la ocupación industrial en conjunto con el aumento de ocupaciones residenciales menos dispersas, las consecuencias de la fase de expansión urbana a zonas peri-urbanas siguen vigentes, especialmente debido a la naturaleza inherentemente riesgosa en el ámbito de fenómenos naturales de los sitios ocupados, comúnmente ubicados en quebradas, bases de cerros y en llanuras de inundación, en contraste con los sitios de alta calidad de edificación del centro urbano consolidado.

La urbanización de la cuenca de Palomares es consecuencia de las transformaciones territoriales históricas de la configuración metropolitana. Su origen es bastante similar a su cuenca vecina de Nonguén, compartiendo parte de sus historias de ocupación y transformación. El sector de Nonguén destacaba en un

principio por su condición rural hasta mediados del año 1950, donde pertenecía a unos cuantos propietarios y los usos de suelo eran principalmente del tipo agrícola. Por el lado de Palomares, en 1949 la cantera Giacaman es comprada e intensifica su producción de áridos como materia prima para la edificación necesitada en la expansión urbana vigente. El desarrollo habitacional toma fuerza en la década de 1960, sobre todo luego del terremoto de mayo del mismo año, como respuesta a la necesidad urgente de expansión y escasez de suelos en la zona urbana de Concepción, en conjunto con el auge de la instalación de complejos industriales que requería una migración rural-urbano para la obtención de mano de obra. Esto funda las bases del fenómeno de peri-urbanización, que actualmente ha tomado un carácter intermedio como es explicado anteriormente, donde tanto Nonguén como Palomares cumplen hoy por hoy una función principalmente residencial de estratos socio-económicos en su mayoría medios y bajos (León et al., 2019). Hasta la actualidad, se ha continuado con la construcción de proyectos habitacionales, como puede observarse en la Figura 6, donde la comparación de imágenes del año 2002 al 2020 muestra el aumento de la densidad habitacional en la cuenca, especialmente con la aparición de barrios residenciales discontinuos como Valle Noble y Terrazas de Collao, que han provocado en su mayor parte el aumento en la población en la cuenca de Palomares, pasando desde 5698 en el año 2002 a 8898 habitantes en el 2017 (INE (2002); INE (2017)), como también, en menor medida, el aumento de edificación en tejidos residenciales discontinuos de baja densidad, donde espacios baldíos entre casas han sido ocupados para la construcción de nuevas.



Figura 6: Expansión Urbana en Cuenca Palomares entre los años 2002-2020. A) Palomares año 2002, B) Palomares año 2020. En amarillo el límite de la cuenca Palomares, en rojo nuevas zonas residenciales (Terrazas de Collao, Valle Noble) y zonas con aumento en el número de edificaciones (Fuente Google Earth).

El hecho de que los suelos de esta cuenca tengan alta exposición a remociones en masa, inundaciones e incendios forestales y que además se sitúen en zonas muy cercanas a áreas industriales, sólo aumenta el riesgo de la población frente a estas amenazas, especialmente al ser una zona originalmente peri-urbana, donde muchas de las edificaciones no han sido planificadas en base a la exposición de estos fenómenos. La Figura 6 ejemplifica este problema, donde es posible observar la presencia de edificaciones en zonas adyacentes a laderas o incluso sobre la ladera misma, las cuales han sido históricamente susceptibles a procesos de remoción en masa.

4.1.2. Instrumentos de Ordenamiento Territorial y Normativa de Usos de Suelo: Plan Regulador Metropolitano y Comunal

En la actualidad, las ciudades latinoamericanas están sufriendo variaciones en dos aspectos bases: la forma y la función. Esta transformación está caracterizada por modificaciones morfológicas de la contigüidad, compacidad y límite del modelo histórico de ciudad, hacia una nueva configuración contemporánea de discontinuidad, fragmentación y difusión de lo urbano, donde el nuevo aspecto funcional de la ciudad apunta a la intensificación de interacciones entre núcleos urbanos cercanos, que por consecuencia ha expandido a la ciudad más allá de los límites administrativos, favoreciendo el desarrollo equilibrado de los sistemas urbanos (Salinas & Pérez, 2011).

Sin embargo, el impacto de las transformaciones morfológicas indica un impacto negativo en el territorio. La ocupación vertiginosa de suelos ha generado la dispersión de la ciudad a zonas periféricas, la aislación de espacios catalogados históricamente como naturales por planes reguladores que a su vez induce a pérdidas en biodiversidad, la impermeabilización de suelos y distorsión en ciclos hídricos y pérdida de aspectos paisajísticos hacia un paisaje antrópico y homogéneo (Salinas & Pérez, 2011).

Los cambios en los usos de suelo en distintos territorios de la ciudad de Concepción, definidos en el último Plan Regulador Comunal del año 2004, han sido producto de la combinación de las diversas actividades humanas realizadas sobre éstos en conjunto con las dinámicas naturales propias de los ecosistemas presentes en los territorios. Las modificaciones históricas de los planos reguladores comunales y metropolitanos han permitido, entre otros, la urbanización progresiva de zonas con alto valor ecológico, como sistemas de humedales y zonas costeras, como también el confinamiento parcial de los ríos Bío-Bío y Andalién, los principales cauces de la ciudad, los cuales atraviesan el Área Metropolitana de Concepción (AMC) por zonas residenciales e industriales (Salinas & Pérez, 2011). Estudios como los de Pauchard et al. (2006), Azócar and Sanhueza (1999) y Smith and Romero (2009) indican que el AMC ha perdido gran parte de la biodiversidad producto de estos procesos de urbanización, los cuales homogenizan el entorno natural, fragmentan los hábitats naturales, un desmejoramiento general de la calidad ambiental, expresado en cambios en el clima urbano, generación de islas de calor, deterioro de cubiertas vegetales (humedales y áreas verdes nativas), entre otros, donde además señalan

como consecuencia el aumento del riesgo de inundaciones, anegamiento y procesos de remoción en masa.

4.1.2.1. Plan Regulador Metropolitano de Concepción

La ciudad de Concepción tiene una morfología urbana característica, donde destaca la ocupación dispersa del territorio debido a un patrón selectivo de ocupación del suelo, el cual ha dado la forma típica de mancha urbana. Esta ocupación de suelo característica es producto en buena parte de la geomorfología diversa y accidentada del territorio, con bordes costeros sinuosos, ríos, canales, lagunas, cordones montañosos y humedales, la cual ha condicionado y determinado el uso de suelo y su forma de ocupación. Al estar condicionados por características geográficas a zonas delimitadas y restringidas, la saturación de éstos constituye una amenaza para la conservación de suelos de mayor sensibilidad ambiental y sería necesario una reevaluación de los suelos normados como aptos para ocupar, ya que, según el Plan Regulador Metropolitano de Concepción, superan en 19 veces la proyección de consumo realizada al año 2018 y pone en riesgo innecesario a los suelos sensibles (Baeriswyl, 2007).

El Plan Regulador Metropolitano de Concepción (PRMC, MINVU (2017)), elaborado por la Secretaría Regional del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, entró en vigencia el año 2003, siendo su última actualización el año 2004. Su función es de un instrumento normativo que tiene como objetivos principales optimizar el uso del suelo urbano, reconocer y proteger el medio ambiente y los recursos naturales, procurar

que el crecimiento en extensión de los centros poblados se oriente hacia aquellos lugares con mejores condiciones de habitabilidad, incorporar una forma de zonificación territorial que sea coherente con el desarrollo previsible que sustenta al sistema urbano intercomunal, con cada una de las características geomorfológicas de su espacio natural y optimizar la accesibilidad física entre las diversas zonas y lugares del sistema urbano intercomunal. Dicho esto, no puede regular las materias propias del Plan Regulador Comunal de las comunas que conforman esta área, ni las actividades primarias como plantaciones forestales, actividades agrícolas, extractivas, mineras, entre otras, dentro de éstas, como tampoco modificaciones en los usos de suelos que estén ubicados al interior del área urbana regulada por su respectivo Plan Regulador Comunal (IMC, 2004). En el territorio normado por el PRMC los distintos usos de suelos son clasificados según diversas zonificaciones, donde el área de estudio se encuentra en la sub-área de Área Urbana (Figura 7), por lo que la regulación de los usos de suelos dentro de la cuenca Palomares está normada por el Plan Regulador Comunal de Concepción.

La totalidad de las zonificaciones normadas por el PRMC son observadas en la Tabla 1.

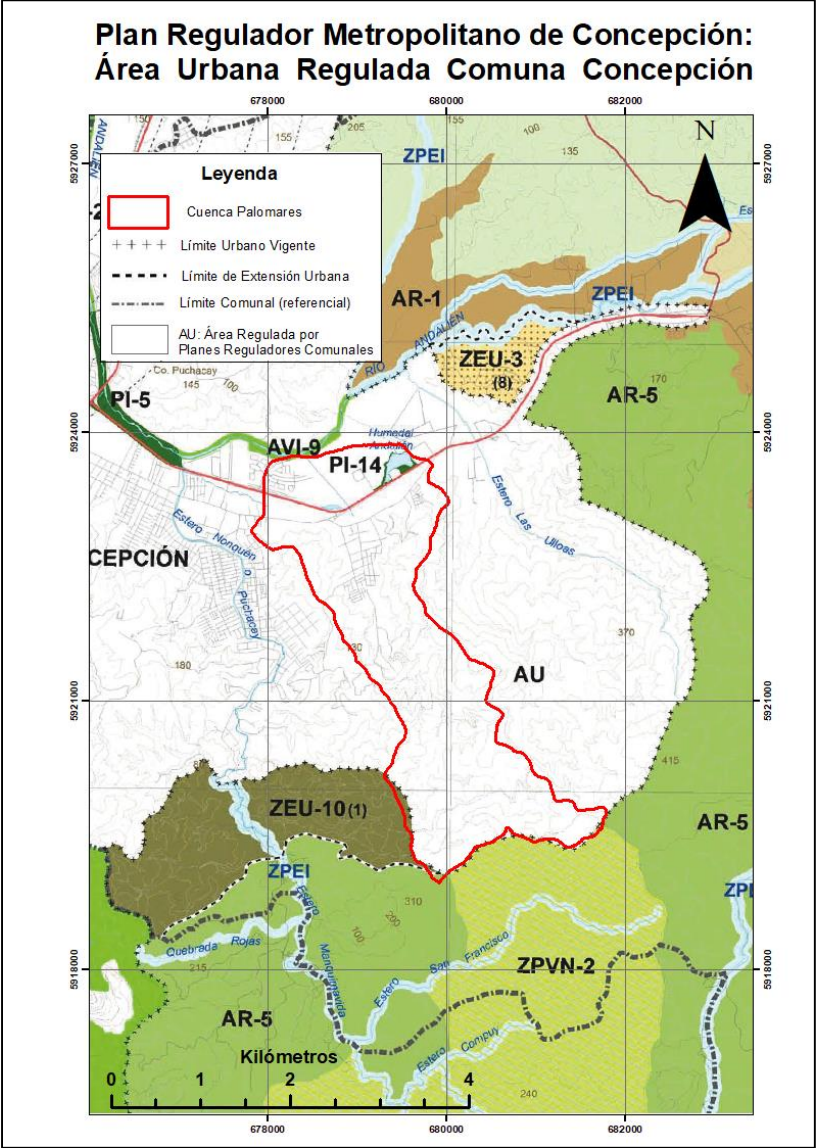


Figura 7: Ubicación de Cuenca Palomares y su zonificación en el PRMC (modificado de MINVU (2017)).

Tabla 1. Áreas y Zonas normadas por el actual PRMC (datos resumidos de MINVU (2017)).

Áreas Principales	Sub-áreas	Sub-zonas
Urbana	Área Urbana	AU, Área Regulada por Planes Reguladores Comunes
	Área de Extensión Urbana	ZEU, Zona de Extensión Urbana.
	Actividades Productivas de Impacto Intercomunal	ZAP, Zona de Actividades Productivas.
	Infraestructura de Impacto Intercomunal	ZIT, Zona de Infraestructura de Transporte. ZIE, Zona de Infraestructura Energética
	Parques y Áreas Verdes Intercomunales	PI, Parques Intercomunales
	Áreas Restringidas al Desarrollo Urbano	AVI, Áreas Verdes Intercomunales Zonas No Edificables
	Rural	Área Rural
Área de Protección de Recursos de Valor Natural		ZPVN, Zona de Protección de Valor Natural. ZPEI, Zona de Protección de Exclusión de Intervención y Manejo Limitado. ZPC, Zona de Protección Costera. ZPIS, Zona de Protección de Interés Silvícola.
Área de Protección de Recursos de Valor Patrimonial Cultural		ZT, Zona Típica. MH, Monumento Histórico.

La zonificación estipulada por el PRMC ha sido examinada y evaluada mediante estudios ambientales, los cuales son exigidos por la Ley 20.417 y tienen como objetivo la incorporación de las consideraciones ambientales de desarrollo sustentable al proceso de formulación políticas y planes de carácter normativo general, de manera que sean integradas en la dictación de las respectivas políticas y planes reguladores, como también en modificaciones sustanciales (MINVU, 2018).

La Evaluación Ambiental Estratégica al PRMC realizada en el año 2018, determina que la principal problemática deriva de la necesidad de adecuar y/o modificar el marco reglamentario del PRMC, ya que el desarrollo y crecimiento del área metropolitana, en conjunto con cambios en la legislación urbana, dificultan la aplicación de las normativas en diversos ámbitos, excediendo en algunos casos sus competencias y en otros generando vacíos normativos, donde dentro de las principales problemáticas que requieren cambios sustanciales se destacan en este estudio aquellas en que los usos de suelos y sus modificaciones tienen relación con actividades silvícolas, áreas naturales y fenómenos naturales asociados.

Así, se identifica como primer problema las fricciones de uso y superposición de actividades en el territorio rural, en la cual se le da énfasis principalmente a la interacción entre actividades silvícolas y el sistema de asentamientos humanos, donde el fuerte desarrollo forestal ha sustituido gran parte del paisaje natural y las áreas de relevancia ecológica reconocidas por el actual PRMC. Como segundo problema, se menciona la inadecuada representación de las Áreas de Valor Natural en el ámbito del PRMC, donde el reconocimiento de áreas de valor natural asociadas a condiciones de protección es inadecuado, ya que las áreas protegidas son solo aquellas que cuentan con protección oficial decretadas por el ordenamiento jurídico vigente, las que de acuerdo a la planificación vigente no están sujetas de normas que garanticen su protección, mientras que, por otro lado, la figura de “Zonas de valor natural” es bastante utilizada en el PRMC en muchas circunstancias, imposibilitando la distinción de su pertinencia e relación al ámbito territorial de aplicación (urbano o rural), o la justificación asociada a su reconocimiento, ya sea si

corresponden a áreas de protección y riesgos, que requieren normas especiales para ser ocupadas, y en casos no se recomienda su ocupación, o a sistemas de áreas verdes o parques intercomunales (MINVU, 2018).

A partir de los objetivos iniciales del PRMC, el Informe Ambiental Complementario formula diversas modificaciones basadas en las problemáticas identificadas en éste. Dentro de éstas se resaltan aquellas que tienen relación más estrecha con la problemática destacada anteriormente. Así se tienen las modificaciones en 1) Área de Valor Natural (Áreas Verdes y Áreas Protegidas), donde se propone reclasificar las zonas de Valor Natural con un sustento jurídico tal que evite la sustitución y/o fragmentación del paisaje y bosque nativo, y establecer un criterio de gradualidad de la ocupación de territorios colindantes con áreas de mayor relevancia ecológica para minimizar los efectos provocados por la transformación e intensificación de los usos de suelo, y 2) Área Rural Normada, donde la propuesta apunta a establecer limitaciones a la ocupación y población de los territorios de mayor interfaz entre las actividades forestales y desarrollo urbano (interfaz urbano-forestal), favoreciendo condiciones de control de riesgos asociados la actividad forestal.

Los riesgos que conllevan la presencia de actividades productivas sobre sectores residenciales guardan relación con los suelos ocupados como asentamientos urbanos que se encuentran adyacentes e incluso confinados en relación a estas actividades. Resalta la presencia de áreas de valor natural en zonas que comparten un mismo espacio con actividades productivas, la cual, junto al proceso de urbanización intensivo, deforestación y/o sustitución de vegetación nativa por

plantaciones exóticas, está provocando un deterioro en sistemas ecológicos. Los efectos de la urbanización colindante a zonas de alto valor ecológico o masas forestales implican un aumento en el riesgo geológico, hidrometeorológico y de incendios.

El tratamiento de estas áreas normado por el PRMC es inadecuado, ya que en muchos casos el marco normativo de protección no tiene sustento en la legislación urbana vigente, y además las áreas protegidas no cuentan con normativas que garanticen su conservación. En el caso del territorio rural, existe un desequilibrio e incompatibilidad en la ocupación de éste. Las resoluciones que incentivaron la reforestación con especies exóticas generaron un impulso exuberante de la actividad forestal, pasando a ser el uso de suelo dominante en el PMRC. Al ser la producción silvícola una de las materias primas más comercializadas como exportación, ha incentivado históricamente el aumento progresivo de usos de suelo destinados a esta actividad, generando importantes efectos en el territorio, como pérdida del bosque nativo, sustituciones a gran escala de usos de suelo (generalmente agrícolas) y escasez de agua. La continuación de estos procesos conllevará a la pérdida de fertilidad de suelos, que junto a la escasez de agua a su vez generarán efectos no deseados en el territorio, donde se destaca la intensificación de riesgos a procesos de remoción en masa, incendios forestales, etc.

Otro punto a resaltar corresponde a la pérdida y fragmentación de estos espacios de valor natural. Estas áreas dotan a la ciudad de identidad, valor paisajístico e importantes servicios ambientales, no obstante, los procesos de transformación

forestal sustitutiva y fuerte urbanización en pendientes afecta negativamente en los sistemas y ciclos hídricos, potenciando los procesos erosivos, especialmente en laderas intervenidas. Aunque el uso de suelo se encuentra bastante restringido en estas zonas, como es mencionado anteriormente, no cuentan con el debido respaldo jurídico en la legislación vigente que garantice su protección, es más, no se encuentran protegidas por otros marcos normativos vigentes y no corresponde a las facultades de la legislación urbana establecer dicha protección. Existe por lo tanto una constante amenaza a estas zonas en términos de la sustitución y/o superposición de usos de suelo desarrollados en sus bordes, que han sido progresivamente antropizados y afectados directa o indirectamente por las actividades silvícolas, producto del fuerte desarrollo urbano en las inmediaciones y los vacíos normativos. Como consecuencia, el 50% de las reconocidas por el PRMC como Zonas de Valor Natural están emplazadas en territorios que corresponden a plantaciones forestales.

El dramático aumento de las plantaciones forestales, se ha generado de manera intensiva al amparo de los marcos jurídicos y reglamentarios del Decreto Ley 701, que permitieron en primera instancia la desforestación y posteriormente las bonificaciones orientadas a su reforestación productiva con especies exóticas. El intenso desarrollo silvícola ha dominado gran parte de los suelos de cordones montañosos de la Cordillera de la Costa, y ha sido acompañado de un patrón de asentamiento disperso de la población en suelos, en su mayoría, de zonas de planicies, llegando en algunos casos a las faldas de lomajes e incluso sobre las pendientes mismas. Este modo de ocupación territorial ha generado una alta

vulnerabilidad de la zona de valor natural ante procesos erosivos, como también del sector poblacional en contacto con la actividad silvícola, a fenómenos naturales relacionados con la actividad forestal (incendios, procesos de remoción en masa). Una de las propuestas formuladas para minimizar los riesgos corresponde a establecer prescripciones normativas que permitan controlar la intensidad de uso y ocupación de suelos de los territorios destinados a plantaciones forestales colindantes con áreas destinadas a extensión urbana, como es el caso de la cuenca Palomares, como también definir zonas intermedias o de amortiguamiento entre áreas donde existe actividad forestal y zonas habitacionales.

Si bien las problemáticas de usos de suelos descritas en este capítulo corresponden a conflictos territoriales a nivel metropolitano, estos mismos existen a distintas escalas dentro de la comuna de Concepción, siendo parte determinante y relevante de la construcción del riesgo de la cuenca Palomares, especialmente en zonas pobladas colindantes a las áreas de valor natural donde domina la industria silvícola de especies exóticas.

4.1.2.2. Plan Regulador Comunal de Concepción

Los usos de suelos permitidos en la Comuna de Concepción están definidos por las zonificaciones normadas por El Plan Regulador Comunal (PRC, IMC (2004)) vigente desde el año 2004 (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Plan Regulador Comunal de Concepción

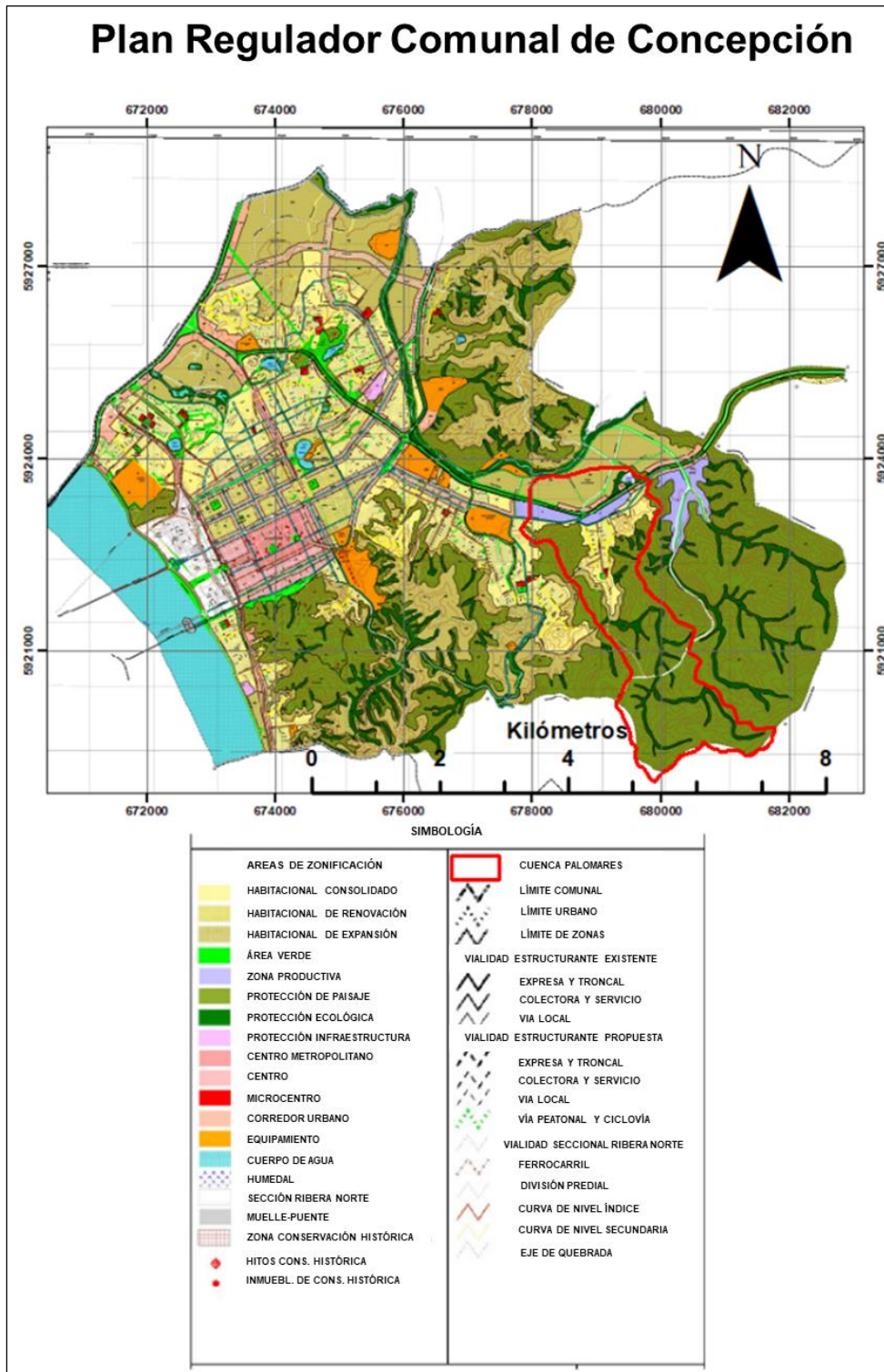


Figura 8. Plano Normativo de Zonificación del Plan Regulador Comunal Concepción. (Modificado de IMC (2004)). El polígono de bordes rojo representa el área de estudio.

Cada zonificación está reglamentada y restringida a usos de suelos específicos, donde las posibles ocupaciones, modificaciones, limitaciones y alternativas de estos usos ha quedado definida para cada territorio donde se emplazan según el Decreto 148: Ordenanza Local Del Plan Regulador Comunal De Concepción. Así, el territorio correspondiente a la comuna de Concepción queda segmentado en diversas zonas como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, estas últimas caracterizadas conforme sus atributos y funciones a cumplir (Tabla 2).

Tabla 2. Zonificación Plan Regulador Comunal de Concepción vigente y su tipología correspondiente (datos recolectados de IMC (2004)).

Zonificación	Tipología
Habitacional Consolidado	H, Zonas que por sus condiciones naturales y antrópicas acoge el crecimiento de la población urbana y sus actividades.
Habitacional de Renovación	HR, Zonas de barrios antiguos ubicados dentro de las ciudades, en los cuales se tiene el interés por recuperar para las familias o simplemente modernizar.
Habitacional de Expansión	HE, Zona que por sus condiciones naturales y antrópicas está destinada a acoger el crecimiento futuro del Área Habitacional Consolidada.
Área Verde	AV, Zonas de plazas, parques y áreas libres destinadas a área verde, sean éstas públicas, fiscales, municipales o de dominio privado.
Zona Productiva	P, Zonas de Parque Industrial y equipamiento, con desarrollo de actividades productivas inofensivas o molestas con impactos mitigados, con edificaciones aisladas, exigencias de antejardín, de área libre y coeficiente de transparencia.
Protección de Paisaje	PP, Zonas que forman parte del patrimonio natural y paisajístico de la ciudad, cuya sensibilidad a riesgos naturales requiere ser protegida, permitiendo un nivel de intervención muy controlado, con equipamiento restringido que contribuya a la mantención, desarrollo y control del entorno natural, con instalaciones aisladas y alta exigencia de área libre forestada.
Protección Ecológica	PE, Zonas propias de las fuentes y cursos de agua, a quebradas y humedales, indicadas en el Plano, en las cuáles se deberá procurar la protección del hábitat natural. Se prohíbe toda intervención que afecte su condición, permitiéndose sólo el desarrollo de áreas verdes, vialidad y obras

Zonificación	Tipología
Protección Ecológica	de arte, debiendo mantener y resguardar la riqueza ecológica y natural existente. Se permitirán instalaciones menores de equipamiento turístico y de esparcimiento, o la construcción de muelles o embarcaderos en zonas de fuentes o cursos de agua, siempre y cuando contribuyan a destacar y rescatar el valor natural y ecológico de ellas.
Protección de Infraestructura	PI, Zonas de protección de instalaciones de infraestructura, cuyo objetivo consiste en proteger dichas instalaciones, permitiendo sólo el desarrollo de actividades complementarias asociadas al funcionamiento de las mismas.
Centro Metropolitano	C1, Zona correspondiente al centro de Concepción Metropolitano. Centro principal de servicios y equipamiento.
Centro	C2, Zona centro en torno al Centro Metropolitano, que complementa la expansión de este último, con localización de servicios, residencia y equipamiento todas las escalas, con una volumetría con continuidad de placa, similar al Centro Metropolitano. C3, Barrio central de equipamiento todas las escalas, servicios y de residencia, que relaciona el centro cívico con el principal Parque Urbano de Concepción, integrando en sus normas de edificación la volumetría del primero con los espacios naturales del último.
Microcentro	MC, Zona de desarrollo de equipamiento de educación, salud, seguridad, culto, cultura, servicios públicos, social y áreas verdes, con condiciones especiales de edificación y de uso de suelo para los predios que los enfrentan.
Corredor Urbano	CU, Corresponde a la faja de predios que enfrentan a las vías de mayor jerarquía, establecida en el Plano, cuya profundidad y condiciones de uso de suelo y de edificación se norman en la presente Ordenanza.
Equipamiento	E, Zonas donde se encuentran instalaciones y espacios vinculados al dominio público o privado, de acceso libre o restringido, cuya función es ofrecer servicios a la comunidad para satisfacer sus necesidades de la vida urbana y apoyar el desarrollo de sus actividades residenciales y productivas.
Zona Conservación Histórica	Zona o sector conformado por uno o más conjuntos de inmuebles de valor urbanístico o cultural de carácter histórico cuya asociación genera condiciones que se quieren preservar.

Según el PRC, las principales zonas en el área estudiada corresponden a: Protección de Paisaje, Protección Ecológica y Zonas Habitacionales. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la distribución espacial de la zonificación para la cuenca Palomares, donde se aprecia que las zonas habitacionales (HE1, H3 y H4) se encuentran rodeadas de lomajes donde domina la Protección del Paisaje, con parches de Protección Ecológica distribuidos de manera fragmentada y cubriendo las quebradas.

La Zona HE1 está definida para sectores de expansión urbana en zócalos de cerro, pie de montes o interface, con uso de suelo exclusivo residencial, equipamiento básico, con edificación aislada de media altura, con exigencias de antejardín y área libre, donde las zonas residenciales se ubican en áreas de pie de monte. Los usos de suelos permitidos en la zona H3 son del tipo residencial y equipamiento mediano, mientras que en H4 los usos son predominantemente residenciales, con equipamiento en todas las escalas y actividades industriales inofensivas. Por otro lado, en las zonas de Protección Ecológica para los usos de suelos están prohibidos toda intervención que afecte su condición, permitiéndose sólo el desarrollo de áreas verdes, vialidad y obras de arte, debiendo mantener y resguardar la riqueza ecológica y natural existente, y para la Protección de Paisaje, al ser áreas sensibles a riesgos naturales requieren ser protegidas, permitiendo un nivel de intervención muy controlado, con equipamiento restringido que contribuya a la mantención, desarrollo y control del entorno natural, con instalaciones aisladas y alta exigencia de área libre forestada. Para ambas zonas de Protección, el PCR decreta que será obligatoria la reforestación preferentemente con especies nativas, para lo cual se

deberá contar con un plan de manejo forestal aprobado por el organismo competente.

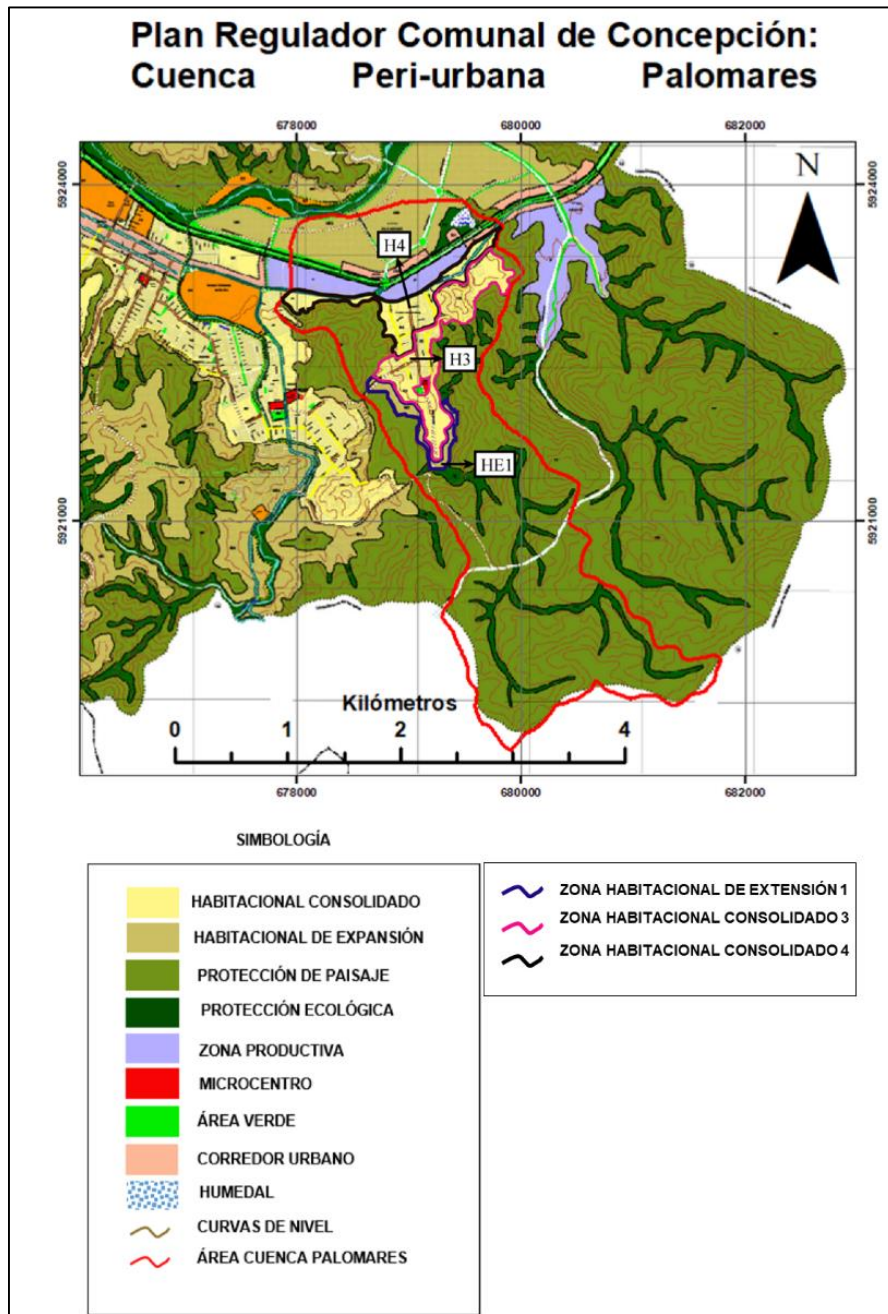


Figura 9. Zonificación Cuenca Palomares según PRC de Concepción. (Modificado de IMC (2004)).

Es importante señalar la proximidad entre los usos de suelos destinados a zonas residenciales y las zonas de protección, ya que es este límite donde existe un mayor riesgo frente a las amenazas naturales. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observan las zonas susceptibles a distintos fenómenos naturales determinadas por el PRC, con predominio de los procesos de remoción en masa típico de los cordones montañosos de la Cordillera de la Costa, que además colindan con los usos de suelos residenciales de zonas urbanas consolidadas y de expansión.

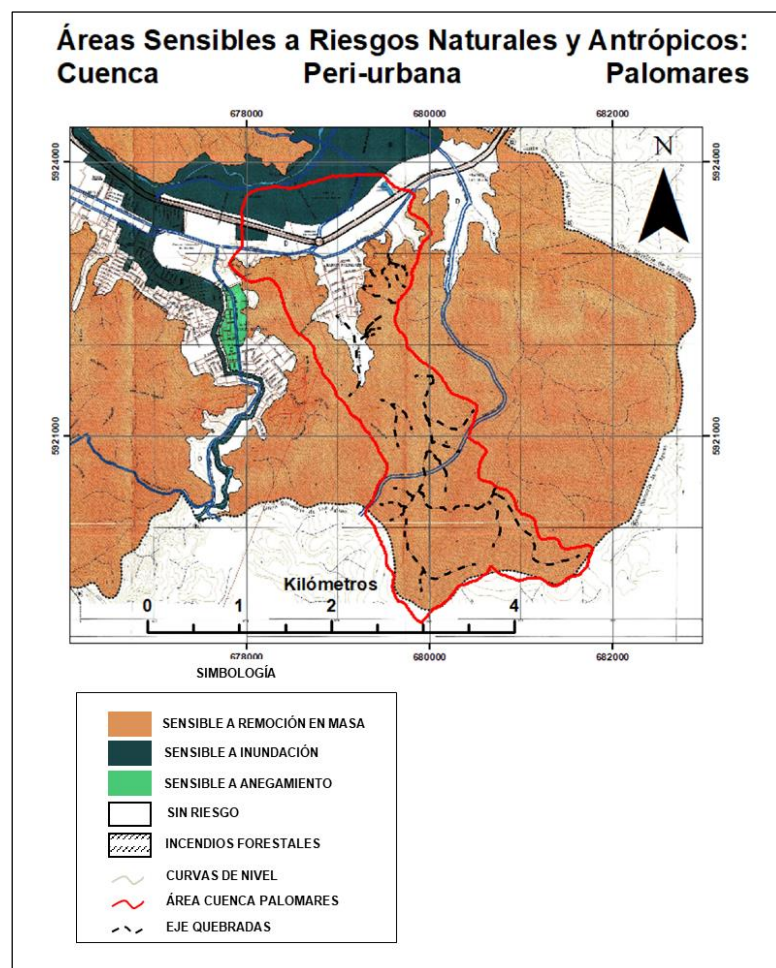


Figura 10. Áreas sensibles a riesgos naturales y antrópicos en la cuenca Palomares. (Modificado de IMC (2004)).

Dicho esto, existe una clara semejanza entre los problemas existentes en el área de estudio con los problemas mencionados para el PRMC, en el ámbito de las interacciones entre los usos y ocupación de suelos, la actividad forestal y sus riesgos asociados, y zonas pobladas expuestas.

Así, el problema principal corresponde a la generación del riesgo frente a fenómenos asociados con la actividad forestal, en este caso procesos de remoción en masa, producto de la superposición de las actividades forestales en territorio urbano, especialmente en la interfaz urbano-forestal, donde existe una interacción directa entre las actividades silvícolas y asentamientos (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). A su vez, este problema es producto de la representación inadecuada de las áreas de protección natural y sus normativas, provocada por las diversas inconsistencias e irregularidades existentes entre las distintas percepciones, legislaciones y normativas de cada una de las entidades que las gestionan, ocasionando las discrepancias normativas que se describirán a continuación.

El Decreto Ley Número 701 ha fomentado históricamente la forestación en suelos degradados susceptibles a sufrir erosión como manera de prevención de la degradación, protección y recuperación de los suelos del territorio nacional, los que en el área de estudio corresponden al regolito originado de las rocas graníticas que conforman gran parte de los cordones montañosos de la Cordillera de la Costa. De esta manera, los terrenos calificados de aptitud preferentemente forestal y los bosques naturales y artificiales quedan sujetos a los planes de manejo aprobados por la Corporación Nacional Forestal (CONAF). Por lo tanto, es CONAF el que en

última instancia regula y controla los terrenos calificados como forestales, por lo que el PRC elaborado por la Municipalidad de Concepción no tiene el poder legal de interferir en estos más que lo estipulado en la ordenanza y excepciones dictadas por CONAF.

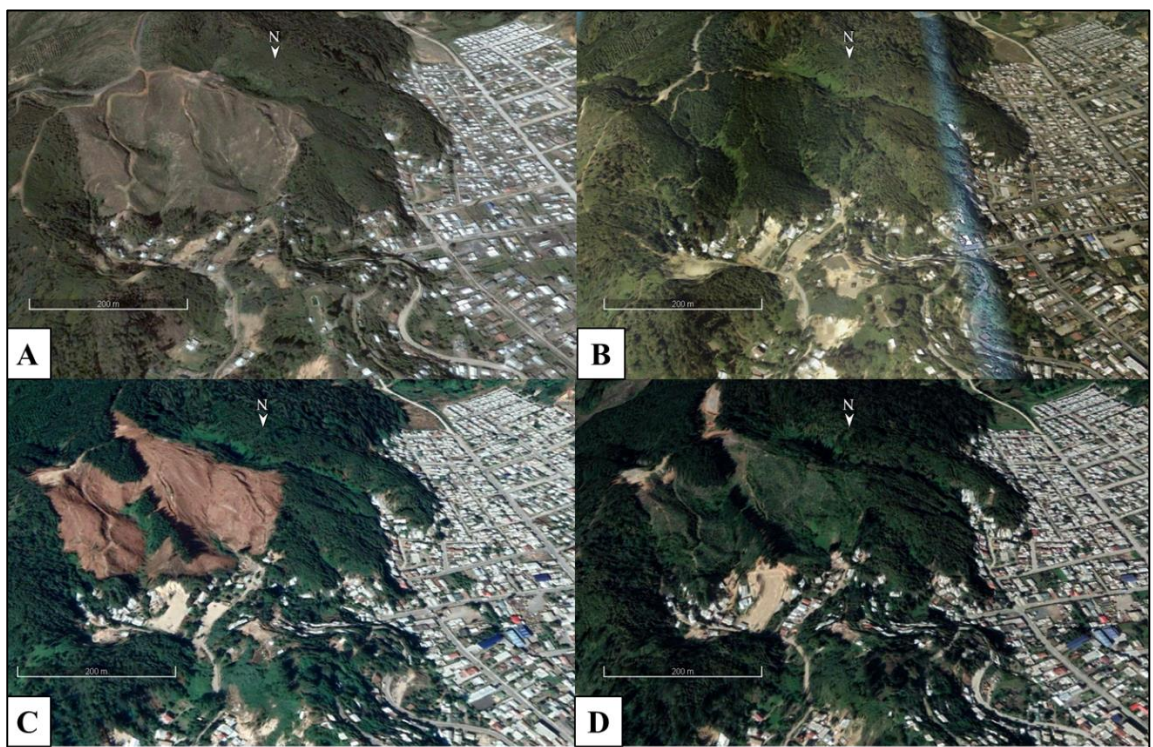


Figura 11. Procesos reiterativos de tala y reforestación con especies exóticas en ladera colindante a zona urbana, cuenca Palomares. Notar la ubicación de los asentamientos y su expansión al pie de la ladera. A) Ladera recientemente talada y posteriormente reforestada, año 2002. B) Ladera reforestada con vegetación en crecimiento, año 2010. C) Ladera talada, año 2018. D) Ladera reforestada con vegetación en crecimiento, año 2020. Línea blanca representa la escala de 200 metros. (Fuente Google Earth).

En consecuencia, se genera una inconsistencia a la hora de caracterizar los terrenos, ya que los aquellos definidos como forestales por CONAF corresponden a terrenos definidos por el PRC como áreas de Protección de Paisaje y Ecológica, provocando

irregularidades respecto a las condiciones de protección de áreas de valor natural, ya que actualmente en la cuenca Palomares laderas zonificadas como Protección de Paisaje corresponden a plantaciones forestales de explotación de la industria silvícola (Figuras **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), las que han sido cosechadas y reforestadas con especies exóticas, en contraposición con lo que estipula el PRC, donde para todas las áreas de Protección Ecológica y de Protección de Paisaje, será obligatoria la reforestación preferentemente con especies nativas a través de un plan de manejo elaborado por la entidad pertinente.

Además, al ser estas zonas sensibles a riesgos naturales, requieren de un nivel de intervención mínimo y muy controlado, tal que contribuya a la mantención, desarrollo y control del entorno natural, lo que se contradice en cierto grado con procesos extractivos forestales que generan focos de riesgos de remoción en masa al eliminar la cobertura vegetal que protege el suelo, donde adicionalmente se exponen los usos de suelos habitacionales y a la población que los ocupa, los cuales colindan con las zonas forestales de explotación (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

A modo de recapitulación, Astorga (2019) describen la problemática general de los instrumentos de planificación territorial actuales. El principal conflicto o desafío radica en ordenar el territorio de manera tal que permita la restauración de ecosistemas, cuencas hídricas, producir bienes y crear un ambiente de bienestar para todos. Un instrumento de ordenamiento territorial integral (para este caso planes reguladores)

permite organizar el uso, aprovechamiento y ocupación del territorio basado en su potencial y limitaciones, teniendo en cuenta las necesidades de la población y recomendaciones de otros instrumentos planificadores y de gestión. Sin embargo, este concepto como tal no existe legalmente en Chile, en cambio se tiene instrumentos de planificación territorial deficientes con funciones públicas con el objetivo de responder a una ordenación racional del espacio, donde las falencias radican en que se basan primordialmente en una visión urbana.



Figura 12: Zona de pendiente clasificada como Protección de Paisaje recientemente cosechada y reforestada con especies exóticas. Este tipo de paisaje es típico en laderas del territorio estudiado.

Los distintos niveles de planificación se han centrado principalmente en consideraciones ambientales (evaluaciones ambientales), para poder cumplir los aspectos y requerimientos legales de forma que no entren en conflicto con las normas ambientales vigentes. Por consiguiente, no se considera el elemento holístico del medio ambiente ni la condición de las personas según sus derechos constitucionales. Es más, se reconocen inconsistencias entre la concepción del

ordenamiento territorial como tal; para el Ministerio de Vivienda y Urbanismo es una planificación urbana y de áreas de influencia de centros poblados, mientras que para el Servicio Agrícola y Ganadero es una acción destinada a evitar el avance urbano sobre suelos agrícolas (Astorga & Burschel, 2019). Así, los vacíos legales impiden su aplicación condicionada por las funciones ambientales y ecosistémicas de los territorios a nivel de paisaje, tal como es descrito para los distintos planes reguladores en este capítulo.

4.1.3. Modelo Forestal y Generación de la Interfaz Urbano-Forestal

Los inicios del Modelo Forestal actual comienzan con el Decreto Ley 4363 en el año 1931, llamada “Ley de Bosques”, la cual norma el uso de fuego y proporciona incentivos a la reforestación con el objetivo de evitar el déficit proyectado en la disponibilidad futura de materia prima. Desde la segunda mitad del siglo XX, se fomentan los procesos de reforestación en áreas abiertas y degradadas mediante la creación de empresas forestales estatales promovidas por CORFO. En 1974 se dicta el Decreto Ley 701 sobre Fomento Forestal, donde sus directrices van dirigidas a la protección, incremento, manejo racional y fomento de las actividades forestales en Chile, focalizado en la regulación del manejo y usos de bosques, dando incentivos para la forestación y recuperación de suelos agrícolas y degradados propensos a la erosión, cambiando los usos de suelos que se ven amenazados hacia un uso forestal, manejado por CONAF. La consecuencia directa de esta Ley fue el abandono de la actividad productiva en bosques nativos y la fuerte expansión de la industria forestal basada en especies exóticas, conllevando al aumento de explotación de pinos y disminución de maderas nativas (Frêne & Núñez, 2010).

En este mismo período se privatizan grandes empresas estatales, donde del total de plantaciones bonificadas por el Estado al año 1997 casi el 95% correspondió a medianos y grandes propietarios. Producto de esto en el año 1998 se modifica el DL 701 mediante la Ley 19561, fomentando las plantaciones forestales en terreno de pequeños propietarios, como también las prácticas de recuperación de suelos y forestación en terrenos de suelos degradados. Aun así, al 2004 sólo el 38% de los terrenos forestados pertenecían a pequeños propietarios en el ámbito de recuperación de suelos degradados. Si bien la ley bonifica las plantaciones exóticas y nativas, desde su creación utilizado principalmente para forestar con especies exóticas de rápido crecimiento, como indica la Figura 13 (Frêne & Núñez, 2010).

En síntesis, el DL 701 ha incentivado y subsidiado extensas plantaciones, especialmente pinos y eucaliptos, las que junto con generar riquezas a nivel país, han provocado efectos negativos ambientales y sociales, con nulo crecimiento de las economías locales. Su objetivo buscó maximizar el aprovechamiento del suelo bajo una lógica de alta rentabilidad para los controladores financieros, no así a contribuir al desarrollo local integral. De esta manera, la tasa de plantaciones de rápido crecimiento se elevó vigorosamente para sustentar la industria de la celulosa iniciada en la década del 60 por CORFO, aumentando de unas 400000 hectáreas en el año 1973 a casi 3 millones en el 2019 (Astorga, 2019).

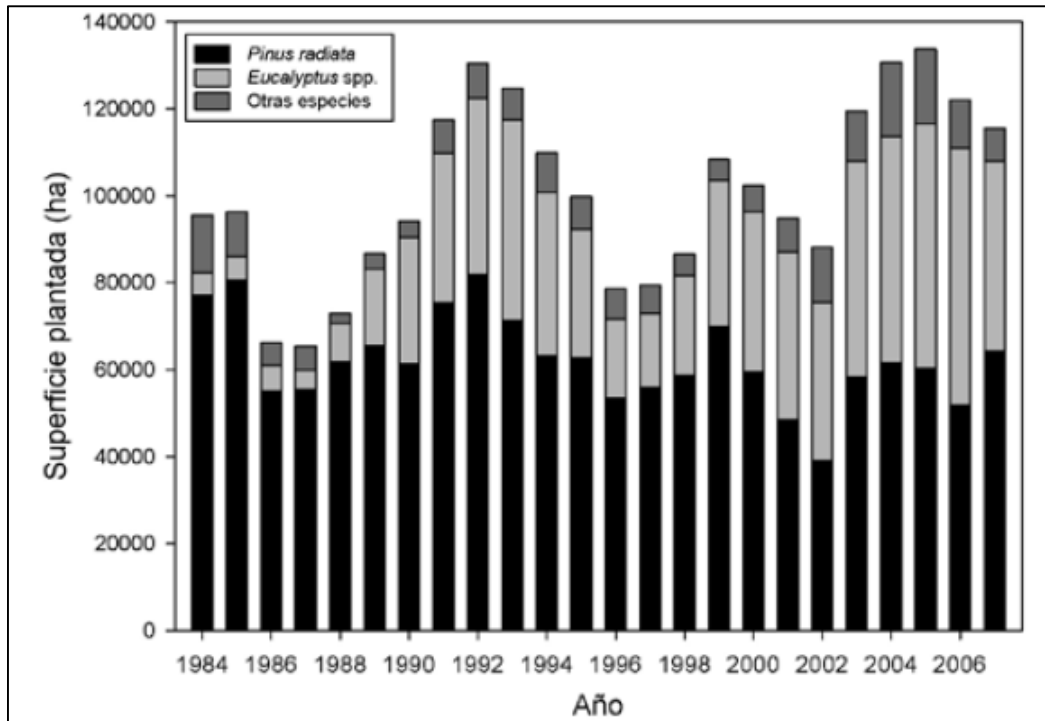


Figura 13. Superficie anual de plantación por especies (1984- 2007) (INFOR, 2008). Otras especies: *Atriplex* spp., *Pinus ponderosa*, *Prosopis tamarugo*, *Pseudotsuga menziesii*, otras.

Este modelo, si bien trajo un impacto en la economía chilena a través de inversiones y exportaciones, llegando a casi 6 mil millones de dólares en el año 2017, arrastró consigo efectos negativos sobre el territorio forestal, identificables a partir de los años 80. Dentro de los más distintivos se tienen 1) la disminución de la superficie y degradación de los bosques nativos, 2) denuncias de pueblos rurales y comunidades campesinas e indígenas sobre problemas de disponibilidad de agua, biodiversidad, aplicación de químicos, mortandad de abejas, paisajes negativos con talas rasas, emigración hacia pueblos, degradación de suelos, entre otros, 3) las cifras de Índice de Desarrollo Humano en zonas con grandes plantaciones paradójicamente son las más bajas del país, a pesar de la riqueza económica generada, 4) conflictos en

territorios mapuche entre las grandes empresas forestales y el pueblo, 5) ordenamiento del uso de territorios en zonas forestales es nulo o incipiente, como reflejan los incendios forestales que han consumido pueblos enteros, 6) monopolio forestal que han arruinado la pequeña y mediana industria forestal (Astorga, 2019).

Por esto es que, para poder resguardar el territorio de manera íntegra junto a sus habitantes y ecosistemas, es crucial disponer de una herramienta de planificación a nivel territorial que regule a lo menos los paisajes dominados por plantaciones forestales y la interfaz urbano-forestal. No obstante, en Chile actualmente no existe una ordenación territorial ni planificación para esta interfaz, que además representa la zona vulnerable para los habitantes en términos de amenazas relacionadas a la actividad forestal, principalmente incendios y procesos de remoción en masa, como tampoco existe la aplicación del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) en la distribución de las plantaciones, y por consiguiente no se dispone de la evaluación en el impacto ambiental del paisaje (Astorga, 2019).

Con respecto a la definición del concepto interfaz urbano-forestal, diversos estudios han analizado su generación, desarrollo y efectos desde que fue caracterizado como tal. La primera mención del término es realizada por Butler (1976) para caracterizar un territorio en riesgo de un tipo de incendio específico y de características particulares que cada vez era más frecuente en el estado de California, Estados Unidos, denominándolo como *“the urban/wildland fire interface”*, en español la interface zona urbana/incendios forestales (Galiana, 2012). Vince et al. (2004) lo definen como la zona en la que el terreno forestal entra en contacto e interactúa con

zonas urbanas, mientras que Alavalapati et al. (2005) detallan este concepto, incluyendo los límites de grandes ciudades y pequeñas comunidades, áreas donde los suelos residenciales y otras estructuras están entremezcladas con bosques (edificaciones y vegetación mezcladas en el territorio sin una continuidad definida, en inglés llamado *intermix*), plantaciones y otros usos de suelos, donde la interfaz está particularmente caracterizada por áreas de dispersión urbana donde las presiones del desarrollo urbano entran en contacto con zonas forestales públicas y privadas. En efecto, las continuas transiciones y modificaciones de usos de suelos, principalmente desde la agricultura y forestales a usos urbanos, generan en la interfaz innumerables conflictos ambientales y socioeconómicos.

El concepto de interfaz se utiliza preferentemente desde una perspectiva de los incendios forestales, designando el escenario territorial del fenómeno de fuego urbano-forestal, que trae consigo problemas específicos sustancialmente distintos a incendios puramente forestales o urbanos. De esta forma, el territorio de interfaz es susceptible a los incendios forestales, y al mismo tiempo una fuente de peligro para los residentes que lo habitan (Galiana, 2012).

Respecto a sus límites y espacio, la interfaz no se establece como un límite invariable en el tiempo, sino que evolucionan, desplazan y sus funciones de intercambio se transforman. Las variaciones están relacionadas a la realidad de todos los sistemas que la integran, principalmente al choque entre el crecimiento y expansión urbana y a las dinámicas experimentadas por los suelos forestales (Alcántara, 2019).

En Alcántara (2019) se menciona que, las últimas décadas se ha experimentado un desarrollo vertiginosamente acelerado en lo tecnológico, económico, social y demográfico, el que en conjunto con los constantes cambios políticos, modifican la dinámica territorial y aumentan la complejidad de la relación entre los asentamientos humanos y las zonas forestales, incrementando la recurrencia de incendios forestales como también las causas de sus orígenes, como también el impacto que tienen sobre zonas urbanas consolidadas y zonas de expansión (Caballero (2004); Galiana (2012); Herrero-Corral et al. (2012)). Asimismo, estas problemáticas están en constante crecimiento ya que existe una constante expansión urbana hacia las laderas producto de la poca disponibilidad de usos de suelos habitables de buena calidad, como también el avance espontáneo de vegetación forestal hacia cascos urbanos, tanto de forma normada para proteger los suelos más erosionables, como también de forma no controlada por la expansión natural de la vegetación (del Corral and Shaw (2019)).

Como puede observarse en la Figura 14, los límites urbanos dentro de la cuenca Palomares que colindan con los cordones montañosos, están en contacto estrecho y en casos entremezclados con las áreas forestales, incluyendo aquellas calificadas como de explotación. Los factores explicados a lo largo de este capítulo han conllevado a la saturación de sitios de alta calidad de edificación, y, por consiguiente, a una expansión forzada de la urbanización de forma poco controlada, organizada y planificada a zonas periurbanas, que, a diferencia de las zonas urbanas centrales localizadas en relieves planos de fácil edificación, están ubicadas en valles,

quebradas y bases de cerros, los cuales son más susceptibles a la ocurrencia de fenómenos naturales. Esto provoca que las zonas periurbanas se encuentren en contacto estrecho con los terrenos de la industria forestal, dando lugar a la interfaz urbano-forestal (IUF).

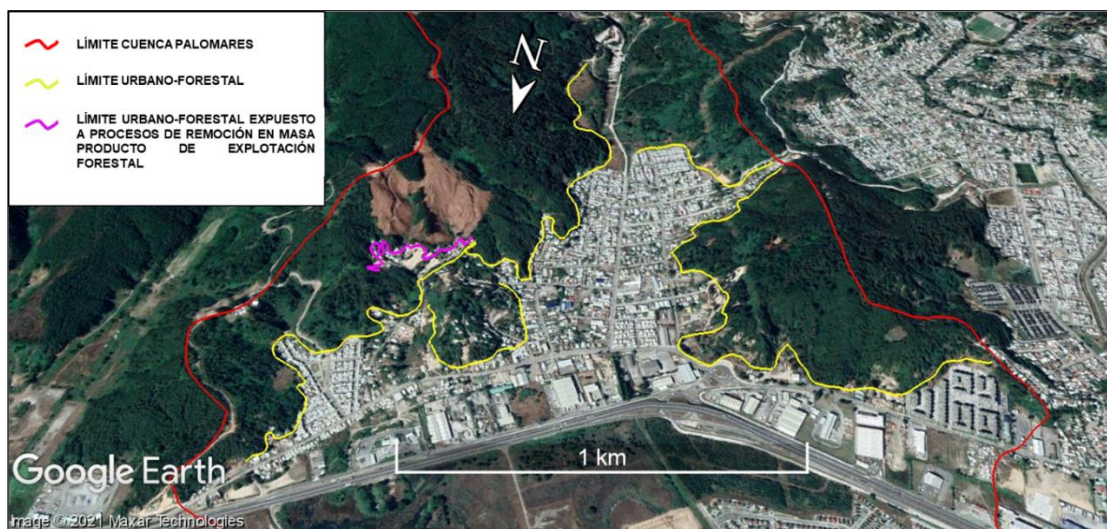


Figura 14. Contactos entre límites urbanos y forestales en la cuenca Palomares. (Fuente Google Earth, 2018).

Si bien este término se utiliza principalmente para analizar el riesgo de incendios forestales, para este estudio es mencionado para caracterizar el territorio que está expuesto, directa o indirectamente, a los procesos de remoción en masa que se ven potenciados por la deforestación a tala rasa de plantaciones exóticas colindantes a las zonas urbanas de la cuenca Palomares con las cuales están en contacto (Figura 14), como también por la eliminación de la vegetación y cambios fisicoquímicos que

condicionan éstas áreas a deslizamientos de suelo al momento de ocurrir incendios forestales.

4.2. Procesos de Remoción en Masa

El criterio de clasificación para las remociones en masa contempla tanto el material removido como el tipo de movimiento. En cuanto a los tipos de materiales involucrados, estos corresponden a roca, detritos y suelo. mientras que los tipos de movimientos son clasificados en caídas o desprendimientos (*fall*), flujos (*flows*), deslizamientos (*slides*), extensiones laterales (*spreads*) y volcamientos (*topples*) (Cruden & Varnes, 1993). Dicho esto, la combinación de estos conceptos definirá el tipo de proceso de remoción en masa (Tabla 3), pudiendo existir eventos combinados con más de un tipo de proceso que añadan complejidad al comportamiento del fenómeno como a su clasificación (Lara, 2007).

El *United States Geological Service* (USGS) se refiere al término “deslizamiento” como una amplia variedad de procesos que resultan en el movimiento hacia abajo y el exterior de los materiales que conforman la pendiente, incluyendo roca, suelo, relleno artificial o una combinación de éstos. Otros sistemas de clasificaciones incorporan variables adicionales, tales como tasas de movimientos, agua y aire. Un ejemplo de esto es la clasificación según distintas tasas de velocidad (Tabla 4) yendo desde desplazamientos extremadamente veloces a extremadamente lentos, realizada por (Cruden & Varnes, 1996).

Tabla 3: Clasificación de procesos de remoción en masa más comunes. (Modificado de Varnes (1978)).

Tipos de Movimientos			Tipos de Materiales		
			Lecho de Roca	Suelos	
				Predominantemente grueso	Predominantemente fino
Caídas			Caída de roca	Caída de detritos	Caída de suelo
Volcamientos			Volcamiento de roca	Volcamiento de detritos	Volcamiento de suelo
Deslizamientos	Rotacional	Pocas unidades	Deslizamiento masivo de roca	Deslizamiento masivo de detritos	Deslizamiento masivo de tierra
	Traslacional		Deslizamiento en bloque de roca	Deslizamiento en bloque de detritos	Deslizamiento en bloque de tierra
			Muchas unidades	Deslizamiento de roca	Deslizamiento de detritos
Extensiones laterales			Extensión lateral de roca	Extensión lateral de detritos	Extensión lateral de tierra
Flujos			Flujo de roca	Flujo de detritos	Flujo de tierra
			Reptación profunda	Reptación de suelo	
Complejos			Combinación de dos o más tipos de movimientos principales		

Tabla 4: Clasificación de procesos de remoción en masa según sus velocidades. (Modificado de Cruden and Varnes (1996)).

Clase	Descripción	Límite velocidad	mm/s
7	Extremadamente rápido	5 m/s	5×10^3
6	Muy rápido	3 m/min	50
5	Rápido	1.8 m/hr	0.5
4	Moderado	13 m/mes	5×10^{-3}
3	Lento	1.6 m/año	50×10^{-6}
2	Muy lento	1.6 mm/año	0.5×10^{-6}
1	Extremadamente lento		

Highland and Bobrowsky (2008) describen resumidamente los principales tipos de remoción en masa, los cuales serán descritos a continuación.

a) Deslizamientos: Si bien muchos movimientos en masa son incluidos en la terminología general de “deslizamiento” el uso más restringido del término se refiere solo a aquellos movimientos donde existe una zona distintiva de debilidad que separa el material deslizado del material estable subyacente. Así, se reconocen dos tipos principales de deslizamientos: (1) Deslizamiento Rotacional, donde la superficie de ruptura es curvada cóncavamente hacia arriba y el deslizamiento es aproximadamente rotacional respecto al eje paralelo a la superficie del suelo y transversal a lo largo del deslizamiento (Figura 15 A).

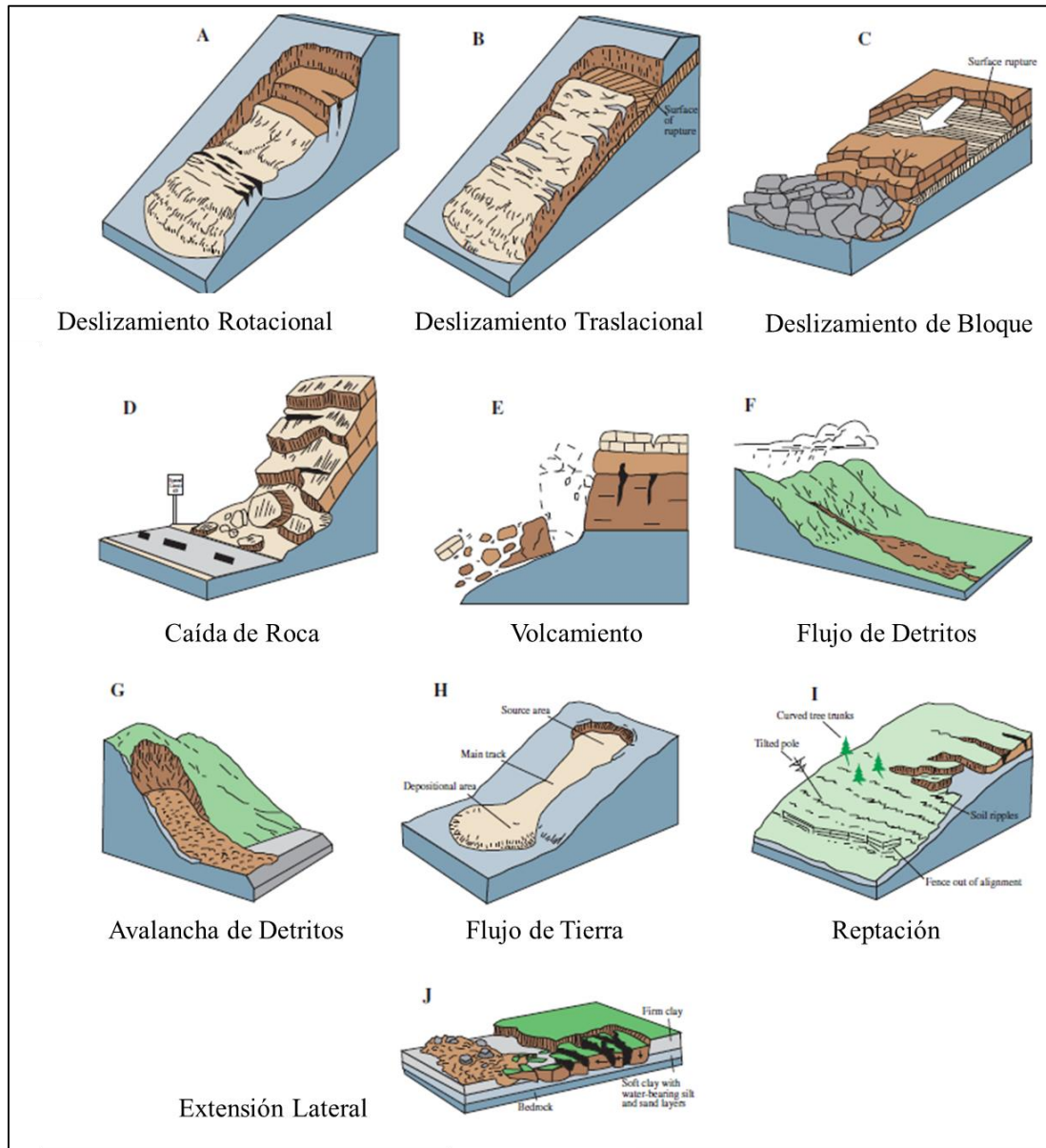


Figura 15. Esquemas de los procesos de remoción en masa más típicos. (Modificado de Highland and Bobrowsky (2008)).

(2) Deslizamiento Traslacional, donde el movimiento de material se genera al o largo de una superficie aproximadamente planar con una pequeña rotación o inclinación hacia atrás (Figura 15 B) y 3) Deslizamiento de Bloque, un tipo de

deslizamiento traslacional donde el material consiste de una única o pocas unidades estrechamente relacionadas que se desplazan pendiente abajo como una masa relativamente coherente (Figura 15 C).

b) Caídas: Movimientos abruptos de materiales geológicos, como rocas y peñascos, que se desprenden de pendientes empinadas o acantilados (Figura 15 D). La separación ocurre a lo largo de discontinuidades (condicionantes geotécnicas estructurales) como fracturas, diaclasas y planos de estratificación, y el movimiento ocurre por caída libre, rebote y rodados. Las caídas están fuertemente influenciadas por la gravedad, meteorización mecánica y presencia de agua intersticial.

c) Volcamientos: Se distinguen por la rotación hacia delante de una unidad o unidades sobre el mismo punto pivote debajo de la unidad, bajo las acciones de la gravedad y fuerzas ejercidas por unidades adyacentes o por fluidos dentro de las grietas (Figura 15 E).

d) Flujos: Hay cinco tipos básicos de categorías de flujos que se diferencian por características fundamentales:

(1) Flujos de Detritos, forma de remoción en masa muy rápida donde la combinación de suelo suelto, roca, materia orgánica, aire y agua se movilizan en forma de un compuesto acuoso que fluye pendiente abajo (Figura 15 F). Los flujos de detritos poseen menos del 50% de material fino. Comúnmente son causados por flujos superficiales de agua muy intensos, debido a fuertes precipitación o un rápido

derretimiento de nieves, que erosionan y movilizan suelo suelto y rocas en pendientes abruptas. También se desplazan comúnmente desde otros tipos de deslizamientos que ocurren en estas pendientes, son casi saturados, y consisten de una gran proporción de material tamaño limo y arena. Las fuentes de los flujos de detritos se asocian típicamente a quebradas abruptas, mientras que los depósitos son identificados por la presencia de abanicos de detritos en la base de las quebradas. Los incendios que denudan las pendientes de vegetación intensifican la susceptibilidad de éstas a la generación de flujos.

(2) **Avalancha de Detritos:** Es una variedad de flujos de detritos muy rápidos a extremadamente rápidos (Figura 15 G).

(3) **Flujo de Tierra:** Tienen una típica forma de reloj de arena (Figura 15 H). El material removido se licúa y fluye, formando una depresión en la zona superior del flujo. El flujo en sí es elongado y usualmente ocurre en materiales de grano fino o rocas de composición arcillosa, en pendientes moderadas y en condiciones de saturación. Sin embargo, flujos secos de material granulado también son posibles.

(4) **Flujo de Barro:** Es un flujo de tierra consistente de material que está lo suficientemente saturado para fluir rápidamente y contiene por lo menos un 50% de arena, limo y arcilla. En algunas instancias, los flujos de barro y de detritos son calificados como deslizamientos de barro.

(5) Reptación: Es un movimiento imperceptiblemente lento del material, ya sea suelo o roca, que conforma la pendiente. El movimiento es causado por el esfuerzo de corte el cual es suficiente para producir deformación permanente, pero muy bajo para producir fallamiento en el corte. Se reconocen tres tipos de reptación, (1) estacional, donde el movimiento ocurre dentro del rango de profundidad del suelo afectado por cambios estacionales en la humedad y temperatura del suelo, (2) continuo, donde el esfuerzo de corte continuamente excede la resistencia del material, y (3) progresivo, donde las pendientes están alcanzando poco a poco el punto de fallamiento, reflejado en otros tipos de remociones. La reptación es identificada por troncos de árboles curvados, cercos doblados, murallas inclinadas y pequeñas grietas en el suelo (Figura 15 I).

e) Extensiones Laterales: Se distinguen porque usualmente ocurren en pendientes poco inclinadas o terrenos planos (Figura 15 J). El modo de movimiento dominante es la extensión lateral acompañada de fracturas de cizallamiento y de tensión. El fallamiento es causado por licuefacción, proceso en el cual sedimentos sueltos, saturados y sin cohesión (usualmente arenas y limos), son transformados desde un estado sólido a líquido. Se gatilla por movimientos rápidos de tierra, tales como terremotos, pero también pueden ser inducidos. Cuando material coherente, ya sea lecho de roca o suelo, sobreyace a materiales que se licúan, las unidades superiores poder sufrir fracturas, extensión, subsidencia, traslación, rotación, desintegración licuefacción y fluir. En material de grano fino o pendientes poco profundas usualmente este movimiento es progresivo. El fallamiento comienza repentinamente

en un area pequeña y se propaga rápidamente. Comúnmente la falla inicial es una depresión, pero en algunos materiales el movimiento ocurre sin razón aparente.

La combinación de dos o más de estos procesos es conocida como un proceso de remoción en masa complejo. Dicho esto, es común que en una misma ladera puedan generarse diversos tipos de procesos de remoción en masa, donde existirán predominancias en cuanto a la magnitud y recurrencia de un tipo sobre otro según la combinación de los factores condicionantes y desencadenantes que los provoquen en un momento dado. En otras palabras, las laderas experimentan múltiples procesos de remociones en masa a distintas escalas los cuales no son necesariamente excluyentes entre sí, sino más bien pueden producirse de manera simultánea como también en distintos periodos según las características de los factores relacionadas con la generación de estos movimientos.

4.2.1. Generación de Procesos de Remociones en Masa: Factores Condicionantes

En un contexto geomecánico, un talud consiste en un sistema donde el esfuerzo de corte (como parte de la fuerza de gravedad) y la resistencia al corte (condicionado por factores físicos e hidrológicos del terreno) continuamente se enfrentan entre sí (Carson & Kirby, 1972). Las causas de los movimientos en taludes pueden ser divididos en factores que contribuyen tanto al aumento del esfuerzo de corte como a factores que contribuyen a disminuir y reducir la resistencia al corte (Varnes (1978); Cruden and Varnes (1996)). Como definición general, Terzaghi (1950) divide las

causas de los procesos de remociones en masa en causas externas resultantes del incremento del esfuerzo de corte, tales como cambios geométricos, descarga del pie del talud, sobrecarga de la cresta del talud, vibraciones y ondas, y cambios en el régimen de agua, y causas internas resultantes en la disminución de la resistencia al corte, como fallamiento progresivo, meteorización, erosión por filtración, entre otros.

En otras palabras, los factores condicionantes son aquellos que generan una situación potencialmente inestable (Lara, 2007). Estos factores han sido analizados, estudiados y descritos por diversos autores, donde se han identificado factores condicionantes en común independiente del área estudiada, estableciendo una especie de norma preestablecida en cuanto a la susceptibilidad de una zona a generar procesos de remociones en masa, pudiendo variar el peso de cada factor como también la adición de factores singulares dependiendo de las características particulares de cada área estudiada. Por ejemplo, Zêzere et al. (1999) establecen que los principales factores condicionantes en el área de estudio de Lisboa (Portugal) corresponden a litología, preexistencia de deslizamientos antiguos, ángulo del talud, vegetación y usos de suelos, Mardones and Rojas (2012) indican que las pendientes topográficas, manejo de taludes, suelos con sobrecarga vegetal o sin cobertura alguna, grado de saturación del suelo, características litológicas, tectónicas, geomorfológicas y geotécnicas del suelo y roca, intervención antrópica de taludes y relleno artificial entre otras corresponden a los principales condicionantes de procesos de remoción en masa para zonas costeras de Concepción. Popescu (1994) y Sepúlveda (1998) señalan que los principales factores que controlan la susceptibilidad de una zona a procesos de remoción en masa corresponden a la

geología, geotecnia, geomorfología y vegetación, Highland and Bobrowsky (2008) y reúnen múltiples condicionantes y las agrupa en condicionantes geológicas, morfológicas y factores antrópicos.

A continuación, se presentarán factores más relevantes considerados en este estudio que condicionan la generación de eventos de remoción en masa, basado principalmente en la recopilación de Lara (2007). Cabe destacar que se hará un énfasis en detalle al factor de vegetación y de cambios de usos de suelos en capítulos siguientes, ya que el presente estudio se enfoca en el análisis de los efectos de la deforestación a tala rasa en laderas cuyos usos de suelos están destinados a ser explotados por la industria forestal.

4.2.1.1. Geología y Geotecnia

Estos factores engloban aquellas características relacionadas con la litología, suelos y sus propiedades composicionales, como también estructurales y reológicas. Entre los factores que conforman esta categoría se consideran el tipo de depósito y el material composicional, densidad, plasticidad, humedad, permeabilidad, litología de las rocas, estructuras, alteración y meteorización.

El tipo de depósito es un condicionante en ciertas características del comportamiento de las remociones en masa. Material suelto, depósitos volcanoclásticos, abanicos aluviales, coluviales y antiguos depósitos de flujos son susceptibles a ser removilizados debido a su permeabilidad, donde el agua se infiltra fácilmente,

superando la capacidad de infiltración y saturado el material. Para materiales menos permeables, de grano fino, densos, arcillosos y rocosos con pocas fracturas, el escurrimiento de agua superficial es más rápido producto de la poca capacidad de infiltración.

Respecto a la composición y granulometría del material, es determinante al estar relacionada con las propiedades de resistencia del depósito y su estabilidad en laderas. Así, rocas con composición más resistente a la meteorización química y física son menos susceptibles bajo un mismo escenario a aquellas con fuerte alteración. En cuanto a la granulometría, según el tamaño de las partículas de rocas y suelos presente en las laderas, esto tendrá un rol en la influencia en la permeabilidad/impermeabilidad de la ladera, el cual, combinado con los factores restantes, influirán en la estabilidad de ésta. Por ejemplo, la presencia de niveles de poco espesor de suelos finos arcillosos de alta cohesión podría generar superficies de deslizamiento para el material sobreyacente, mientras que los suelos arenosos varían su cohesión según el grado de humedad que tengan, variando su resistencia según los distintos niveles de humedad.

La densidad del suelo tiene relación con la resistencia al cizalle, donde suelos densos son más resistentes al esfuerzo máximo aplicado que los sueltos.

La permeabilidad tiene directa relación con el flujo de aguas subterráneas y superficiales y condiciona la saturación del suelo y roca, siendo esta última inversamente proporcional a la susceptibilidad de deslizamientos y flujos.

El factor litológico tiene relación con la composición de la roca, definiendo así su resistencia a la meteorización y alteración. Rocas con minerales secundarios como zeolitas y arcillas, como también rocas fuertemente alteradas producto de la presencia de minerales poco resistentes, influyen en factores como pérdida de resistencia, porosidad, expansividad, entre otros.

Las características estructurales de las rocas están relacionadas con la generación de material detrítico y el tamaño de éstos. Así, la roca parcialmente fragmentada producto de las estructuras presentes aumenta la susceptibilidad a ser potencialmente removida. Las estructuras comprenden planos de estratificación, diaclasas, grietas y fallas. Según la orientación de los distintos grupos de estructuras, el entrecruzamiento de estos genera zonas de debilidad y zonas de cuñas, delimitando planos de posibles deslizamientos.

También es importante las características de cada estructura, tales como relleno, orientación, condición, rugosidad, etc. Por ejemplo, las orientaciones de estructuras en favor de la pendiente generan condiciones inestables, y la estratificación en orientación opuesta a la pendiente puede conducir a la generación de volcamientos.

4.2.1.2. Geomorfología

Esta categoría abarca las características topográficas, pendientes de laderas, rugosidad y forma de la superficie, cambios abruptos de las pendientes, como también la extensión y altura de las laderas. Estos factores inciden en la

determinación de la velocidad, energía y volumen de los procesos de remoción en masa originados. Además, cualquier modificación de estos factores puede transformar una ladera estable en inestable y hacerla más susceptible a la generación de remociones.

La pendiente tiene relación directa con la fuerza de gravedad; a mayor pendiente mayor es la fuerza ejercida sobre el material y los esfuerzos de corte iniciales ejercidos sobre la pendiente son mayores, pudiendo llegar al punto de superar a los esfuerzos resistentes que mantienen el material inmóvil al incorporarse otros factores. Es el primer factor geomorfológico a considerar, ya se considera de alto peso para la generación de remociones del tipo flujo, deslizamiento y derrumbes.

En cuanto a la altura, las pendientes de laderas y cauces aumentan su capacidad de transporte y por consiguiente la energía del flujo conforme se incrementa el tamaño de éstas.

La orientación de las laderas y su exposición frente al sol influye en cuanto a la presencia de vegetación, niveles de humedad y exposición frente a las lluvias.

En el caso de los suelos, la estabilidad depende en gran parte si el ángulo del talud supera el ángulo de fricción interna del material. Es importante identificar depósitos antiguos de deslizamientos o flujos, especialmente si no son depósitos completamente consolidados, ya que su condición de equilibrio límite los hace susceptibles a generar procesos de remociones.

Finalmente, la geometría de la ladera, en conjunto con la forma y superficie de ésta, es uno de los factores más importantes a la hora de evaluar la generación de procesos de remoción en masa, ya que determinará las orientaciones de las fuerzas resistentes y las cortantes.

4.2.1.3. Hidrología e Hidrogeología

Se consideran aquellos factores que estén relacionados con la incorporación de aguas en los suelos o macizos rocosos, tales como red de drenajes, el nivel freático y sus variaciones, caudales, coeficientes de escorrentía y de infiltración.

Suelos saturados tendrán distintos rangos de cohesión según su granulometría. Cualquiera sea el caso, el ingreso de agua a la estructura del suelo genera una disminución en la resistencia del material, al reducir la tensión efectiva debido al esfuerzo por presión de poros.

En macizos rocosos el agua ayuda a la pérdida de resistencia al infiltrarse entre las discontinuidades presentes en la roca, ejerciendo una tensión en las estructuras que es opuesta a los esfuerzos que mantienen estable al macizo.

Para los flujos, la mayoría de estos son provocados por saturación del material, aumentando la presión de poros y disminuyendo los esfuerzos resistivos efectivos, por lo que identificar zonas húmedas o saturadas es importante para detectar zonas críticas de generación.

La posición del nivel freático es de alta importancia en modificar el grado de saturación de suelos y rocas. De encontrarse a poca profundidad, el ingreso de agua por lluvia o fusión de nieves puede generar un rápido ascenso del nivel, llegando a generar la saturación a nivel superficial. El ascenso del nivel freático también puede generarse por movimientos sísmicos, especialmente en suelos arenosos, donde al saturarse sufren el proceso de licuefacción. Además, la topografía y meteorización en el caso de la roca son factores a considerar al momento de evaluar la distribución del agua subterránea.

Los flujos de detritos generados por saturación del suelo pueden ir incorporando líquido en el trayecto, provocando cambios en la proporción entre material y líquido, afectando en el comportamiento en cuanto a la velocidad y energía del flujo.

4.2.1.4. Vegetación

La estabilidad dada por la vegetación está fuertemente condicionada por el efecto del clima y la topografía. En zonas climáticas tropicales o extremadamente lluviosas, la vegetación no logra disminuir la erosión en las laderas, y la evapotranspiración no alcanza a compensar la alta infiltración, por lo que el nivel freático asciende independiente de la presencia de vegetación.

En general, contribuye a la disminución de la erosión de las laderas generada por factores climáticos, topográficos y propiedades del suelo. Un ejemplo de esto es el cambio en usos de suelos normado por el DL 701, el cual permite clasificar zonas de

alta erosión como áreas destinadas a la forestación para poder combatir la degradación y erosión de las laderas.

La vegetación arbórea en laderas permite la absorción de agua por parte de éstos, disminuyendo el grado de saturación del suelo. Las raíces ayudan a la estabilización de laderas al actuar como anclas de reforzamiento según la profundidad de las raíces, pudiendo ser sólo superficial. Así, la vegetación ideal para mantener la estabilidad de laderas correspondería a bosques con suelos cubiertos de pasto o hierba, optimizando los efectos de la vegetación sobre los taludes, tales como intercepción de agua caída, disminución de la erosión provocada por el agua, aumento de la resistencia del suelo, porosidad (este efecto puede afectar negativamente), aumento de la evapotranspiración y por lo tanto disminución del grado de saturación, y compactación del suelo más profundo (Greenwood et al. (2006)).

En contraparte, el escaso desarrollo de vegetación contribuye a restar estabilidad a las laderas, en el sentido de que las deja desprotegidas frente a fenómenos hidrometeorológicos, demostrando así una alta sensibilidad hídrica.

4.2.1.5. Clima

Factores como la temperatura, viento, radiación solar y precipitaciones son controladas por el clima. De éstas la última es considerada un factor desencadenante (*triggering*) procesos de remoción en masa, donde además condiciona la estabilidad

del suelo y macizos rocoso al incorporar agua al sistema. Los eventos de lluvias pueden tener efecto condicionante cuando las precipitaciones de días anteriores al evento de flujo pre condicionan la estabilidad del talud.

La temperatura regula el estado de precipitación, lo cual toma importancia en áreas cordilleranas. En zonas donde cae nieve, los procesos de deshielo condicionan las estructuras del macizo al afectar en el fracturamiento a través del crioclastismo.

El viento tiene efecto sobre el ángulo de incidencia de las gotas de lluvia. Se relaciona con la orientación de las laderas, donde para el área de estudio la mayoría de los frentes de precipitaciones provienen desde una orientación N-NO-ONO. Además, puede afectar negativamente en zonas con vegetación, donde desestabiliza las laderas producto del efecto palanca producido por las raíces de los árboles al ser empujados por el viento.

La radiación solar influye en la humedad del material, disminuyendo la resistencia de laderas mientras mayor sea el grado de humedad. A su vez, la mayor presencia de vegetación se encuentra en zonas protegidas de la radiación solar.

4.2.1.6. Actividad Antrópica

El factor humano muchas veces es un factor fundamental en la generación de eventos de remoción en masa, al influir negativamente en la estabilidad de la ladera. Highland and Bobrowsky (2008) describen actividades condicionantes tales como

excavaciones en la ladera o en su base, sobrecarga de la ladera o de su cresta, reducción en el nivel de acuíferos reservorios, deforestación, irrigación, minería, vibración artificial, filtración de aguas, etc. Otras actividades que influyen son los rellenos, construcción de estructuras, urbanización, cambios en los usos y coberturas de suelos, especialmente en zonas forestadas, extracción de áridos y acumulación de escombros. Un efecto a nivel global es el cambio climático, donde las actividades antrópicas han inducido variaciones en las temperaturas, tipo e intensidad de precipitaciones y su distribución.

4.2.1.7. Cambios en Usos de Suelos

Los cambios en los usos de suelos inducidos por la acción humana han provocado la fragmentación de ecosistemas a nivel mundial. Como factor principal se tiene la deforestación de vegetación nativa, con la finalidad de aprovechar estos suelos para usos agrícolas, urbanos y silvícolas, este último con la incorporación de vegetación exótica destinada a la explotación por parte de la industria forestal. Como consecuencia, la biodiversidad de flora y fauna, los procesos y servicios ecosistémicos se han visto fuertemente afectados, lo que tiene un impacto negativo sobre todos los ambientes, territorios y habitantes que están vinculados a la modificación del ecosistema (Rodríguez-Echeverry et al., 2018).

Algunas de las consecuencias ambientales del cambio indiscriminado de usos de suelos pueden observarse en el incremento en el aporte de sedimentos a los afluentes producto del aumento de la erosión en suelos intervenidos (Glade (2003);

Rodríguez-Echeverry et al. (2018)), aumento en la intensidad de procesos geomorfológicos, tales como transporte eólico, inundaciones, aceleración en la erosión laminar, generación de cárcavas y posterior expansión de éstas, y aumento en la susceptibilidad de laderas a sufrir procesos de remoción en masa (Glade, 2003). En el caso de estos últimos, diversos estudios han analizado la relación entre el cambio de usos de suelo y la generación de procesos de remoción en masa en distintas zonas alrededor del mundo.

Glade (2003) estudia la ocurrencia de deslizamientos como respuesta a cambios de usos de suelo en Nueva Zelanda. De manera histórica, en los últimos tiempos del Holoceno, el ser humano ha convertido grandes áreas de bosque nativo a suelos de agricultura, incrementando la actividad de los procesos geomorfológicos y erosivos mencionados anteriormente. Sin embargo, al intentar estudiar la respuesta de remociones a los cambios de usos de suelos pasados, existen problemas en las áreas agrícolas respecto a la eliminación de evidencia de movimiento producto del intenso cultivo sobre estos suelos, por lo que sólo algunos remanentes de antiguos deslizamientos pueden ser reconocidos, y cuando son identificados, la datación es muchas veces imprecisa (Matthews, 1997).

Tanto en Nueva Zelanda como muchas partes del mundo, incluida Chile, grandes extensiones de suelos fueron cambiadas en poco tiempo, lo que ha influenciado fuertemente en los factores ambientales, los cuales últimamente controlan la estabilidad del paisaje. Aun así, no existe una relación simplificada entre la cobertura vegetal y los procesos de erosión. Incluso en zonas forestales nativas, los

deslizamientos pueden ser los procesos de erosión dominantes, sin embargo, procesos de disminución de vegetación nativa tienden a ser seguidos por un incremento en procesos de erosión.

En este estudio, los efectos de la deforestación pueden ser fácilmente distinguidos de los impactos naturales mediante el análisis de polen dentro de cuerpos sedimentarios, evidenciando la introducción de especies arbóreas, hierbas exóticas y pastoreo. Esto permite constatar el aumento de la erosión resultante de la ocupación humana.

El estudio compara las tasas de sedimentación en distintas áreas de Nueva Zelanda previas y posteriores al inicio de las actividades agrícolas. En el lago Titura, los depósitos de deslizamientos previos a los cambios de usos de suelo evidencian bajas concentraciones de minerales magnéticos, mientras que, para los depósitos posteriores a las actividades agrícolas, cada evento de alta precipitación ha producido depósitos con minerales magnéticos debido a procesos de erosión que movilizan el regolito (el cual no fue erosionado previo al inicio de actividades agrícolas), evidenciando el aumento de la erosión posterior a la deforestación.

La transición de la sensibilidad del paisaje de condiciones estables a potencialmente inestables posterior al cambio de usos de suelo de bosque nativo a agrícola se refleja de buena manera en un deslizamiento ocurrido en 1988, donde se determinó que, si la cobertura vegetal nativa no hubiese sido removida, los efectos en el paisaje hubiesen sido de menor magnitud, sugiriendo que los cambios en los usos de suelos,

al menos para esta región, es uno de los factores principales en la generación de deslizamientos.

En cuanto a las zonas costeras, fueron influenciadas en primera instancia por los primeros habitantes polinésicos, con un impacto en los procesos geomorfológicos a escala local. Posteriormente, la cobertura vegetal nativa fue quemada y modificada a suelos de cubierta de pasto por colonos europeos, donde se generaron colapsos de los bancos de ríos, erosión por cárcavas y deslizamientos producto de la deforestación, contribuyendo al aumento de sedimentación en estuarios, lo que conllevó a la expansión de manglares y deterioración en la calidad y cantidad de fauna marina.

Los depósitos marinos y muestras de polen analizadas indican aumentos en la tasa de sedimentación de un orden de magnitud posterior al cambio de usos de suelos de la vegetación nativa a suelos de pastoreo. Considerando otras zonas costeras, las tasas de sedimentación Holocena son casi cinco veces menores que la tasa posterior a la deforestación.

La generación de sedimentos por procesos geomorfológicos también tiene relación con la frecuencia y magnitud de las lluvias. Precipitaciones frecuentes y débiles activan la erosión de cárcavas, mientras que las lluvias intensas y poco comunes desencadenan deslizamientos. Además, las cicatrices de deslizamientos siguen generando sedimento tiempo después del evento inmediato.

Los estudios en distintas áreas de Nueva Zelanda indican que tanto la erosión en cárcavas y por remociones en masa han acelerado posterior a la deforestación antrópica de zonas de captación de aguas y que, bajo un uso de suelo de bosque nativo, los deslizamientos no eran tan comunes producto de la protección que otorgaba la densa cobertura vegetal, incluyendo el reforzamiento a través de los sistemas de raíces.

Mugagga et al. (2012) analizan los cambios de usos de suelos en laderas del Monte Egon y sus implicancias en la ocurrencia de deslizamientos. Señalan que la degradación de los suelos amenaza muchas de las comunidades agrícolas en África. La expansión de los cultivos en las laderas de diversos montes ha impactado en la existencia de bosques. Estudios de deslizamientos en Kenia, Uganda, Tanzania y Ruanda apuntan al factor antropogénico, especialmente a la presión ejercida por el crecimiento de la población en conjunto con la perturbación de las laderas, irrigación no controlada y deforestación, como factores generadores de las zonas montañosas de África del Este.

La combinación de cultivos en zonas de alta pendiente junto a las inadecuadas medidas de conservación de suelos conlleva a aumentar la erosión de éstos. La expansión de la población ha forzado la deforestación de vegetación nativa para usos agrícolas en laderas inherentemente susceptibles a deslizamientos. Así, la frecuencia y tamaño de deslizamientos ha aumentado con la intervención en laderas de alta pendiente para usos agrícolas, lo que es evidenciado por el hecho de la mayoría de los deslizamientos han ocurrido en laderas recientemente deforestadas.

Las condiciones hidrológicas del suelo en pendientes cóncavas son intensamente alteradas a través de la deforestación y la masificación de cultivos, potenciando la saturación de los suelos y el desencadenamiento de flujos de detritos. Se concluye que, en laderas susceptibles a procesos de remoción en masa, los cambios de usos de suelos de vegetación nativa a cultivos agrícolas mediante procesos de deforestación disminuyen drásticamente el límite de estabilidad de las laderas, las cuales a su vez están densamente pobladas y por lo tanto expuestas a esta amenaza. Se recomienda restaurar la cobertura vegetal nativa, y restringir la generación de nuevas zonas de cultivo en laderas críticas.

Reichenbach et al. (2014) estudian la influencia del cambio de usos de suelos en la susceptibilidad en la generación de deslizamientos para el área de captación de Briga, Mesina. Estudios recientes en cambios de usos de suelo y su impacto en la estabilidad de laderas han mostrado que, en regiones pobladas, el impacto antrópico sobre el ambiente contribuye significativamente a la iniciación y reactivación de deslizamientos. Distintos tipos de usos de suelo influyen de diferente manera en la estabilidad de las laderas, donde en particular, la estabilidad de laderas se potencia por la presencia de vegetación en términos de características mecánicas e hidrológicas.

La evaluación se realizó mediante la comparación de usos de suelos a partir de imágenes del año 1954 y 2009. Durante estos años, aumentaron los suelos

descubiertos en desmedro de áreas forestadas. Las zonas forestales disminuyeron, mientras que las zonas agrícolas, descubiertas y urbanas aumentaron su extensión.

Para verificar el efecto del cambio de usos de suelos en la generación de deslizamientos, se construyeron diferentes escenarios, asumiendo un aumento en áreas forestadas y un escenario de reducción de estas mediante incendios, incorporando solamente datos topográficos y calculando posteriormente los valores probabilísticos, para así enfocar el estudio netamente en los cambios de usos. Los resultados indican que hay una disminución en la inestabilidad de laderas previo al cambio en los usos de suelos, explicado por la menor cantidad y extensión de suelos descubiertos respecto a las áreas forestadas. En particular, la configuración local, especies de plantas y sus características debiesen ser consideradas en estudios ya que juegan un rol mayor en el reforzamiento del suelo y la estabilidad de la ladera.

Wasowski et al. (2010) analizaron la influencia del cambio de usos de suelos y los patrones de precipitación en la actividad de deslizamientos en los Apeninos (Daunia), Italia. Los cambios en usos de suelos ya sean antrópicos o naturales, influyen en la estabilidad de las laderas. Por ejemplo, las propiedades mecánicas de materiales de la ladera pueden ser alteradas producto de las actividades agrícolas, incluyendo el labrado y otras modificaciones en la cobertura existente, tales como deforestación y campos de cultivos. Las transformaciones ambientales también afectan el balance hídrico del suelo y por lo tanto los niveles freáticos y fuerzas efectivas del material.

En el área de Daunía, los deslizamientos han incrementado en el último tiempo, culpando al cambio climático como factor de causa principal. No obstante, los patrones de clima en los últimos cincuenta años muestran una disminución en la precipitación. Es más, aproximadamente desde el año 1970, el promedio de lluvias invernales ha disminuido significativamente. Según estos patrones, la estabilidad de las laderas en Daunía debió haber aumentado, lo que es contradictorio a la alta incidencia de deslizamientos ocurrido el último tiempo. Dicho esto, los efectos de las modificaciones humanas en el ambiente podrían haber conllevado a una mayor susceptibilidad a la generación de deslizamientos, donde particularmente la deforestación se reconoce históricamente como uno de los factores principales que han contribuido a los procesos de remoción. Tras esta deforestación, las áreas rurales han dedicado su actividad cada vez más a la agricultura, mediante trabajos a mano y mecanizados. Estos últimos, especialmente el arado profundo, corresponde a otro de los cambios de usos de suelos considerados, ya que disminuye la resistencia de suelos en laderas cultivadas.

El estudio compara recopilaciones de deslizamientos y usos de suelos del año 1976 y 2006, los que se analizan según las características de precipitación. Los resultados indican que los deslizamientos ocurren en suelos de cultivación de cereal en estaciones humedad de otoño e invierno. A pesar de ciertas diferencias en los patrones de lluvia, los análisis de temperatura y precipitación muestran condiciones climáticas favorables para la generación de deslizamientos en ambos períodos. Los resultados obtenidos al comparar los inventarios de deslizamientos indican que la frecuencia calculada para el 2006 era 160% mayor a 1976. Este aumento coincide

con importantes cambios de usos de suelos, donde la extensión de campos de cereal creció casi un 25% entre los períodos. Esto demuestra que los cambios en los usos que ocurrieron en durante este tiempo, particularmente el aumento de campos de cultivo, han tenido una influencia negativa en la estabilidad de laderas en el área estudiada. Además, la mayor frecuencia de deslizamientos para suelos destinados al cultivo posterior a 1976 es reconocida en zonas de alta pendiente, corroborando que la extensión de los cultivos en estas zonas ha tenido un rol importante en la generación de deslizamientos en el 2006. Así, el aumento significativo en la actividad de los deslizamientos no es simplemente el resultado de condiciones de precipitaciones adversas. La labranza de suelos, la cual reduce la resistencia de suelos poco profundos, y diferencias en comportamiento hidrológico entre campos cultivados y no cultivados, surge como principal factor en la disminución de la resistencia en suelos.

Existen diversos estudios que han estudiado la relación entre cambios en los usos de suelos y la generación de deslizamientos. La influencia de la distribución espacial de distintos usos de suelo en la estabilidad de laderas ha sido evaluada usando distintas técnicas. Estudios en China indican que la acción humana y las áreas de cultivo (suelos secos, campos de arroz y terrazas) juegan un rol importante en la aceleración de la meteorización de la pendiente y en procesos de inestabilidad (Liu et al., 2021). Karsli et al. (2009) determinaron que los cambios en usos de suelos forestales a campos de té produjeron un aumento en la ocurrencia de deslizamientos, generando daños severos a la propiedad y fatalidades. Vanacker et al. (2003) propusieron una metodología para estudiar el efecto de los usos de suelos

en la susceptibilidad de deslizamientos donde incorporaron parámetros hidrológicos, donde los resultados confirmaron la alta dependencia entre la susceptibilidad de deslizamientos y los cambios recientes en los usos de suelos, particularmente, la conversión de bosques a pastizales y suelos agrícolas.

En el caso de Chile, los cambios en los usos de suelos dentro del país son producto de la implementación de distintas leyes a lo largo del siglo XX, las que han fomentado, en primera instancia, la deforestación de vegetación nativa para usos agrícolas, y posteriormente la reforestación de estos suelos degradados para así proteger las laderas de la erosión y degradación. Desde la promulgación del Decreto Ley 701 en 1974, el cual fomentó la plantación de especies comerciales en el país con el fin de resguardar los suelos de antiguo uso agrícola expuestos a la erosión y degradación, los suelos antiguamente cubiertos por vegetación nativa fueron reforestados por especies exóticas, lo que se ha reflejado en una conversión creciente hasta el día de hoy de hábitats forestales nativos a plantaciones comerciales en diversas áreas del país (Rodríguez-Echeverry et al., 2018).

En los últimos años, se ha reportado que varios impactos derivados de la industria forestal han llevado a una significativa pérdida en la biodiversidad y un aumento en la generación de sedimentos. Así, la discusión actual se ha centrado entre las entidades ambientales gubernamentales, las compañías forestales y la comunidad, donde se ha destacado la necesidad de implementar estrategias de conservación efectivas. En las regiones donde la industria forestal es una de las principales actividades económicas, las tasas de deforestación han aumentado principalmente

por la plantación de especies exóticas (*Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus*). Al mismo tiempo, han aumentado la densidad y número de parches de bosque nativo debido a la fuerte fragmentación del ecosistema debido al uso indiscriminado de suelos, el cual no ha contemplado ninguna planificación en cuanto a la apreciación ni conservación del bosque nativo como ecosistema. La falta de alternativas económicas y de conciencia de las comunidades sobre el ambiente, sus procesos y ciclos, ha tenido consecuencias ambientales que amenazan tanto la preservación de los ecosistemas nativos remanentes como también la modificación de procesos y servicios ecosistémicos que entregan los ecosistemas a la comunidad (Rodríguez-Echeverry et al., 2018).

Estos cambios en los ecosistemas producto del uso indiscriminado de suelos ha provocado daños en la conservación de la biodiversidad, la cual es clave en mejorar la gestión sostenible en áreas metropolitanas, ya que asegura el acceso que tienen los habitantes a los servicios y beneficios que otorga el ecosistema. En países como Chile, la expansión urbana tiende a concentrarse en ciudades pequeñas y medianas. Debido a que cada vez más zonas urbanas y habitantes tendrán más contacto directo con la naturaleza, los servicios ecosistémicos de esta tendrán aun mayor importancia (Miller, 2008). La regulación en la calidad del aire y agua, clima local, control sobre amenazas naturales como inundaciones y procesos de remoción en masa son algunos de los beneficios que otorgan los sistemas ecosistémicos, los cuales están y serán afectados por los efectos de las urbanizaciones adyacentes y cambios en los usos de suelos. Dicho esto, se necesita replantear las normativas que regulan esta interacción entre las áreas metropolitanas y sistemas naturales

mediante la combinación de una la planificación urbana que enfatice la calidad de vida humana con una planificación conservacionista que se concentre en la conservación de los ecosistemas y su biodiversidad (Forman & de Valicourt, 2004).

Los cambios en el paisaje son considerados uno de los principales factores de pérdida de biodiversidad, afectando en la fragmentación de hábitat y pérdida de conectividad. Además, se le ha dado muy poca atención a la evaluación temporal y espacial de los factores que han cambiado el paisaje a pesar de que ha sido exigida por planificadores para la evaluación estratégica de planes y programas de conservación (Rojas et al., 2013). Petit et al. (2001) mencionan algunos de los factores derivados del cambio de usos de suelos que tienen efectos relevantes en la biodiversidad, tales como intensificación agrícola, abandono de suelos, forestación, deforestación, drenaje y urbanización.

Muchas ciudades en Chile han sufrido procesos de urbanización de rápida ocupación de suelos para residencias, industrias y caminos, afectando los paisajes agroforestales tradicionales de alto valor ecológico (Rojas et al., 2013). En el caso de Concepción, la asociación de factores como forestación y urbanización se ha concentrado en zonas internas de la región alejadas de la costa y en zonas urbanas ya existentes, lo que ha evidenciado la existencia de un patrón de dispersión urbana en zonas interiores, como también la generación de zonas de contacto entre nuevas áreas urbanas y zonas forestadas. Es más, la estrecha asociación entre los suelos utilizados para expansión agrícola, forestación y deforestación en áreas de alta pendiente en conjunto con el contacto con zonas urbanas, aumenta el riesgo frente a

deslizamientos en la región, el cual ha sido reconocido como una de las principales amenazas (Rojas et al., 2013).

Si bien la mayoría de los cambios en usos de suelos son generados por la acción humana de manera intencionada, con modificaciones principalmente para usos de plantaciones forestales exóticas y expansión de asentamientos con fines económicos y urbanos, existen casos en que la cobertura de estos suelos es abruptamente modificada sin alguna planificación previa en el cambio del uso de éstos. Estas excepciones son provocadas por desastres socio-naturales, donde fenómenos como terremotos, tsunamis, deslizamientos, inundaciones, erupciones volcánicas e incendios forestales dañan e incluso destruyen en su totalidad la cobertura de suelo actual, obligando a las herramientas de ordenamiento territorial a tomar medidas drásticas en la planificación y designación de los usos de suelos de las zonas afectadas, como por ejemplo la restricción de usos residenciales en zonas costeras antiguamente habitadas que fueron afectadas por el tsunami del 27 de Febrero del 2010, provocando la muerte de cientos de personas.

Dentro de los fenómenos mencionados los incendios forestales son identificados como los más frecuentes, con períodos de recurrencia anuales relacionados a las estaciones más secas del año, abarcando extensas áreas a niveles regionales. Según CONAF, la definición de incendio forestal corresponde a un fuego que, sin importar su origen, se propaga sin control a través de vegetación leñosa, arbustiva o herbácea, viva o muerta. Si bien la propagación a través de la vegetación es un

proceso natural, el 99.7% de los incendios son iniciados por la acción humana, ya sean intencionales o por negligencia.

Dicho esto, existe una relación entre la deforestación provocada por los incendios forestales y la generación de procesos de remoción en masa. Los efectos primarios del fuego sobre los suelos incluyen la eliminación del manto vegetal y residuos forestales, deposición de partículas de ceniza, la creación de niveles de suelos impermeables (hidrofóbicos), y degradación del material rocoso y/o edáfico producto de las temperaturas extremas (Parise & Cannon, 2012). Los efectos a largo plazo incluyen cambios en los procesos geomorfológicos con impactos en el desarrollo de paisajes e implicancias en la relación entre lo social y ecosistémico (De Graff et al., 2007).

Existe un aumento en la susceptibilidad de las áreas afectadas y colindantes a sufrir inundaciones, altas tasas de sedimentación y flujos de detritos, los cuales amenazan las vidas, hogares y bienes económicos de la población que habita cerca del área quemada. La mayoría de estas amenazas son particularmente peligrosas durante la primera estación lluviosa posterior al incendio forestal, pudiendo generarse en eventos de precipitación posteriores. Los flujos de detritos están dentro de las consecuencias más peligrosas provocadas por las precipitaciones en laderas recientemente quemadas, y representan una amenaza distinta respecto a otros flujos cargados con sedimentos debido a su alto poder destructivo (Jakob et al. (2005), Cannon et al. (2010)).

de la Barrera et al. (2018) estudiaron los impactos ambientales en los ecosistemas quemados por el mega-incendio ocurrido en Chile el año 2017. En primer lugar, resaltan el valor ambiental de los ecosistemas densamente vegetados al proveer sistemas ecosistémicos relacionados a la regulación de flujos hidrológicos, previniendo la generación de deslizamientos e inundaciones. En consecuencia, al ser destruidos en incendios, los suelos quedan expuestos a sufrir procesos erosivos, especialmente en períodos de intensa precipitación (Moody et al., 2008).

El incendio del 2017 destaca por ser el más grande en la historia de Chile, alcanzando registros históricos de liberación de energía a nivel mundial, llegando al punto de agregar un nuevo nivel a la clasificación de incendios forestales. Las intensas transformaciones de paisajes naturales, matorrales y pastizales a masivas plantaciones de especies exóticas pirrófitas (*Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus*) tuvo efectos en la magnitud del incendio, ya que afectó en su mayoría a estas plantaciones. Si bien se conocen los efectos directos de los incendios forestales en el ambiente y población, las consecuencias secundarias en cuanto a la posterior generación de nuevas amenazas, especialmente deslizamientos e inundaciones que pudieran poner en peligro a zonas pobladas colindantes, no son del todo conocidas (de la Barrera et al., 2018). Los asentamientos humanos expuestos a deslizamientos y/o inundaciones producto del incendio fueron identificados mediante un enfoque multicriterio. Los criterios considerados fueron la identificación de asentamientos humanos cercanos a zonas quemadas junto a la selección de solo aquellos que se ubicaran topográficamente debajo de áreas quemadas de la misma cuenca y que

tuvieran cursos de aguas cerca del área afectada, es decir, zonas expuestas a flujos en masa provenientes de áreas sin cobertura vegetal.

Los resultados indican que existen 37 nuevas zonas pobladas expuestas a deslizamientos y/o inundaciones, de las cuales 11 se encuentran en alto riesgo, incluyendo Concepción (Figura 16). En general, los niveles de riesgo a deslizamientos dependerán de la severidad del daño producido por el incendio (cuanta vegetación sobrevivió), regeneración vegetal, intensidad de las precipitaciones y características topográficas (Rengers et al. (2016); Moody et al. (2008)).

Existen casos excepcionales de destrucción de suelos forestales debido a la actividad volcánica. El estudio de Korup et al. (2019) analiza el aumento en la generación de deslizamientos en laderas con cobertura forestal nativa posterior a dos eventos volcánicos (Chaitén en el 2008 y Puyehue en el 2011) en el Sur de Chile. Las erupciones volcánicas pueden afectar de gran manera los paisajes y ecosistemas a través de la deposición sobre laderas de grandes cargas de tefra la cual asfixia y envenena a la vegetación, impermeabiliza y esteriliza los suelos, daña los hábitats y altera las tasas de filtración y la escorrentía superficial. Los lahares y la escorrentía que actúan sobre esta cubierta de tefra inducen una de las cargas de sedimentos más altas conocidas en los ríos, lo que modifica sustancialmente la morfología de los cursos y permite el recubrimiento de planicies de inundación.

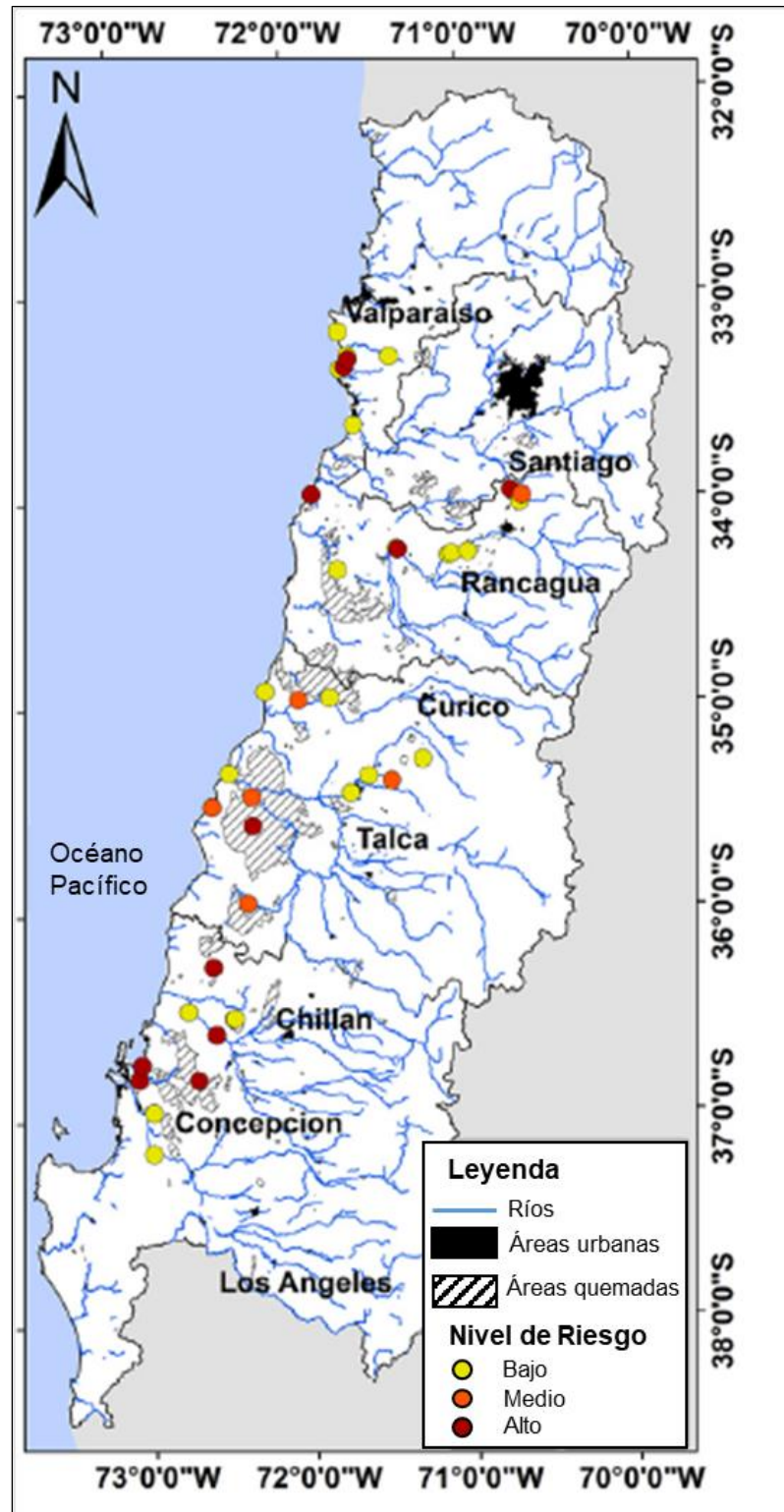


Figura 16. Zonas de riesgo a deslizamientos y/o inundación producto de los incendios del año 2017 (de la Barrera et al., 2018).

Imágenes satelitales indican amplias pérdidas post-eruptivas de densos bosques alrededor de los volcanes Chaitén y Puyehue, revelando una disminución en el valor del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*NDVI*) donde los depósitos piroclásticos habían cubierto la vegetación nativa. Los valores de pérdida de cobertura forestal eran despreciables antes de las erupciones, luego aumentaron durante los períodos de erupción y disminuyeron posterior a éstos. De la misma manera, las tasas de actividad de deslizamientos fueron de un orden de magnitud menor en los años anteriores a las erupciones (Figura 17).

La actividad de los deslizamientos aumentó marcadamente posterior a las erupciones, sin haber existidos cambios notables en las condiciones de precipitación, afectando más áreas que aquellos generados en el terremoto de Valdivia de 1960 de magnitud 9.5. Además, casi la totalidad de los deslizamientos ocurrieron en laderas bosques densos. Se determinó que para el volcán Chaitén el 90% de los deslizamientos ocurrió en bosques muertos por la erupción hace más de dos años (en su mayoría cuatro) atrás, mientras que la erupción del Puyehue generó menos deslizamientos ya que es más reciente.

Así, casi el 90% de los deslizamientos post eruptivos ocurrió cuatro años después de la muerte de los bosques, preferentemente en zonas con altos espesores de tefras. Los deslizamientos en su mayoría fueron de carácter somero, donde el suelo se desprendió del contacto con la roca madre dentro de áreas de árboles maduros muertos en posición de crecimiento, despojando en su mayoría suelo y vegetación, conllevando al traslado de grandes cantidades de biomasa a redes de drenajes. La

muerte de la cobertura forestal producto de la caída de tefra conlleva a la alteración de las tasas de escorrentía y disminución de la interceptación de lluvias. Además, impide el intercambio gaseoso de oxígeno en el suelo y afectando a las raíces de los árboles, como también acidifica los suelos debido a su alto contenido en elementos tóxicos (Korup et al., 2019).

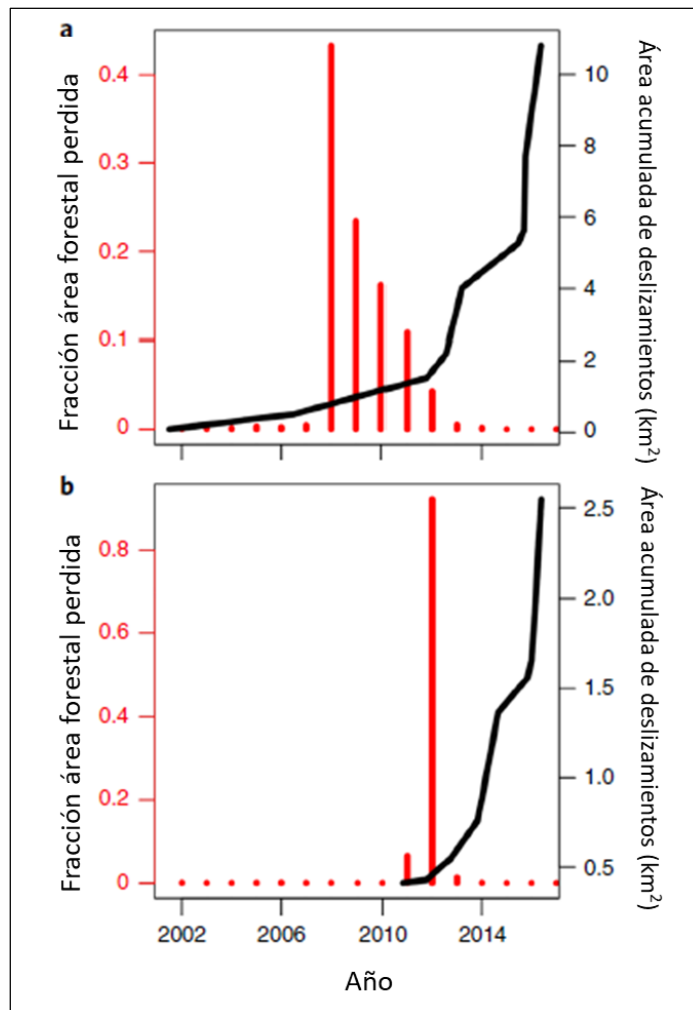


Figura 17. Series de tiempo de la pérdida de bosque y generación de deslizamientos posterior a las erupciones de Chaiten (a) y Puyehue (b). En rojo se muestra la pérdida de bosque y en negro la generación de deslizamientos (Korup et al., 2019).

Independiente del mecanismo que haya provocado el cambio en el uso y cobertura de suelo, se evidencia el alto impacto que produce en los ecosistemas, especialmente en áreas forestadas que entregan una gran variedad de servicios ecosistémicos para la comunidad, entre los cuales potenciar la estabilidad de laderas es fundamental ya que protege a las zonas naturales y urbanas cercanas de los procesos erosivos destructivos, sobre todo en laderas susceptibles a la generación de procesos de remoción en masa, las que sin la cobertura vegetal adecuada constituyen un elemento de alto riesgo.

4.2.2. Generación de Procesos de Remociones en Masa: Factores

Desencadenantes

También conocidos como factores gatillantes, por definición son estímulos externos tales como precipitaciones intensas, movimientos sísmicos, erupciones volcánicas, olas de tormenta, derretimiento de nieves, cambios en nivel freático, actividad humana (cortes de carretera, irrigación) o rápida erosión fluvial, que causan una respuesta inmediata en la generación de procesos de remoción en masa al incrementar rápidamente los esfuerzos sobre el material o bien reduciendo los esfuerzos resistentes de éste. Existen casos donde pueden ocurrir sin un factor desencadenante aparente debido a la combinación de distintas causales condicionantes que gradualmente debilitan el talud hasta llegar al punto de falla (Wieczorek, 1996).

Dentro del área de estudio, los principales desencadenantes identificados históricamente han sido las intensas precipitaciones, seguidos de movimientos telúricos.

4.2.2.1. Precipitaciones

Eventos climáticos que producen precipitaciones intensas en periodos cortos, inclusive horas, o de intensidad media con duración de varios días, han desencadenado abundantes deslizamientos. Dicho esto, existe una relación estrecha entre la intensidad de las precipitaciones y la activación de procesos de remoción en masa. Deslizamientos poco profundos en suelos y roca meteorizada son generalmente producidos en pendientes inclinadas durante las partes más intensas del evento de precipitación, pudiendo ser necesario la combinación de umbrales de intensidad y duración para que sean desencadenados. A su vez, estos umbrales tienen características regionales, dependiendo de las condiciones locales de geología, geomorfología, climáticas y las condiciones de la cobertura de suelo (Wieczorek (1996); Mardones and Vidal (2001)).

La rápida infiltración del agua proveniente de las lluvias es el principal mecanismo que provoca la saturación del suelo y temporalmente incrementa la presión de poros, disminuyendo la resistencia del material y gatillando los deslizamientos. Además, las precipitaciones intensas aumentan la escorrentía superficial, incrementando la erosión del material, generando cárcavas y la degradación de la ladera. El material más susceptible a ser movilizado corresponde a suelos débiles y/o sueltos. Un tipo

de suelo muy propenso corresponde al generado por los incendios forestales, donde una capa de suelo repelente (hidrofóbica) es formada bajo y paralela a la superficie quemada lo que, en conjunto con la pérdida de vegetación, promueve la movilización de granos y fragmentos en la superficie por lo que, al incrementar el flujo total de agua en esta superficie, conlleva a la generación de pequeños flujos de detritos (Wieczorek (1996); Lara (2007)). Estos procesos se ven potenciados por la ocurrencia de fenómenos climáticos como El Niño generan periodos de excesivas lluvias (inviernos con mayores días de precipitaciones de mayores intensidades) y escorrentías, incrementando el desarrollo de procesos como flujos de barro y detritos (Sepúlveda et al., 2006).

Cornforth (2005) indica que la relación entre lluvia intensa y deslizamientos es bastante clara, especialmente en pendientes de material arcilloso donde los niveles de agua crecen dentro de éstas en invierno, llegando a su máximo en eventos climáticos de alta precipitación. En Hong-Kong, las áreas pobladas se encuentran sobre altas pendientes de cerros compuestos de rocas volcánicas riolíticas y graníticas, las cuales presentan un manto de suelo residual que recubre la roca. Esto produce una fase de transición desde roca a suelo, la cual se caracteriza por la generación de deslizamientos de poca profundidad, especialmente en pendientes que han sido cortadas. El *Geotechnical Control Office* de Hong-Kong ha estudiado las dataciones de 20 años de lluvias, teniendo como conclusión que los deslizamientos generados en estaciones lluviosas están relacionados a eventos de alta intensidad en periodos de corto tiempo, más que la acumulación total de lluvia.

Un caso similar es el de Oregon, donde también existen suelos residuales arcillosos sobre rocas ahora basálticas, y la mayoría de los deslizamientos han ocurrido por eventos de alta intensidad de lluvia y corta duración (Cornforth, 2005). Para el caso de Japón, donde se ha establecido que el número de deslizamientos aumenta cuando existen tres días consecutivos de lluvias que exceden los 150 mm acumulados, con intensidades de más de 20 a 30 mm por hora (Flageollet, 1989). En el caso del Área Metropolitana de Concepción, los procesos de remoción en masa se intensifican al existir más de 100 mm de lluvia acumulada en 3 días, donde la capacidad de retención de agua de los suelos residuales de rocas graníticas, que presentan alto contenido de arcillas hidrófilas, llega al punto de saturación y provoca la desestabilización de los taludes (Mardones & Vidal, 2001). El estudio de Bravo Muñoz (2018) determina el umbral de precipitación en la provincia de Concepción mediante el análisis de 99 eventos de remoción en masa ocurridos entre los años 1960 y 2015, identificando que las precipitaciones acumuladas mayores a 100 mm en un período de 10 días gatillan eventos de remoción en masa, y aquellos que ocurren con precipitaciones acumuladas menores a este umbral tienen en común altas intensidades de lluvia en periodos acotados. Como ejemplo se tiene el estudio de Mardones et al. (1994) que identifica un umbral de precipitación sobre 100 mm en 3 días en la localidad de Talcahuano, López Filun (2015) estima un valor de aproximadamente 85 mm en 24 horas para la misma zona, y Peña et al. (1993) calculan un umbral de 80 mm en 24 horas.

En el Área Metropolitana de Concepción, dentro del registro histórico de procesos de remoción en masa resaltan los flujos de barro y detritos generados el 26 y 27 de junio

de 2005, donde cayeron aproximadamente 160 mm en 48 horas, ocasionando la muerte de 5 personas, y los ocurridos en Julio de 2006 luego de que cayeran 140 mm en 24 horas, provocando el fallecimiento de 12 personas (SERNAGEOMIN, 2017).

4.2.2.2. Sismos

Las intensas vibraciones en suelo y roca producidos durante eventos telúricos han desencadenado diversos tipos de remociones en masa, tales como caídas de roca, deslizamientos de suelo, deslizamientos de roca en pendientes abrupta, entre otros, en distintos contextos topográficos y geológicos alrededor del mundo (Wieczorek, 1996). Las aceleraciones sísmicas provocadas por estos terremotos generan un cambio temporal en el régimen de esfuerzos normales y de corte presente en la ladera, pudiendo llegar al punto de inestabilidad de ésta (Lara, 2007). Meunier et al. (2007) se refieren a estos fenómenos como procesos de remoción en masa cosísmicos, los cuales producto del aumento del esfuerzo de corte, disminución de la resistencia por aumento de la presión de poros, y deformación del suelo asociado a la propagación de la onda sísmica generan como consecuencia una aceleración gravitacional y sísmica que supera los esfuerzos combinados de cohesión y fricción, provocando el fallamiento y desestabilización de las laderas.

Mediante un estudio realizado a los 40 procesos de remociones en masa de mayor magnitud gatillados por eventos sísmicos a nivel mundial, Keefer (1984) identifica que para pendientes empinadas, las caídas de rocas, deslizamientos de suelos y de roca, usualmente en niveles superficiales de suelos disgregados o roca, son los

procesos más comunes desencadenados por terremotos, y en menor medida, extensiones laterales de tierra, deslizamientos de bloques de tierra y avalanchas de tierra para pendientes más suaves. En cuanto a la magnitud mínima del evento sísmico capaz de generar un proceso de remoción en masa, Keefer (1984) determina un valor de aproximadamente $M=4$, como también la relación entre la distancia máxima desde el epicentro al área posible de deslizamiento en función de la magnitud del terremoto, para tres tipos generales de procesos de remoción en masa (Figura 18).

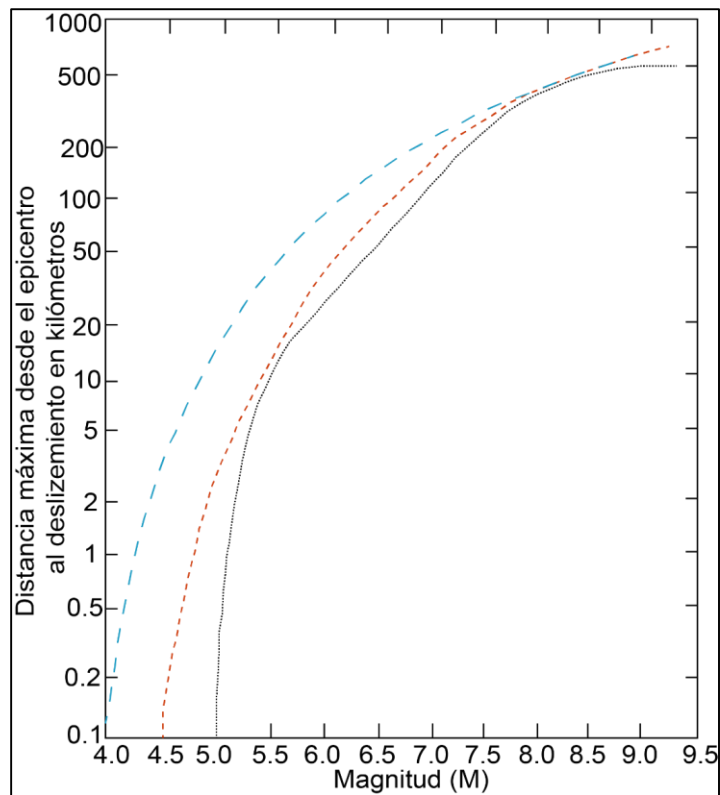


Figura 18. Distancia máxima desde los procesos de remoción en masa al epicentro para terremotos de distintas magnitudes. Línea celeste representa deslizamientos y caídas de material no cohesivos, línea roja representa deslizamientos cohesivos, línea negra representa flujos y extensiones laterales. (Modificado de Keefer (1984).

Los deslizamientos que comprenden suelos sueltos, saturados y sin cohesión en pendientes bajas y medias, comúnmente ocurren como resultado de la licuefacción inducida por movimientos sísmicos, donde las vibraciones generadas por estos sismos aumentan temporalmente la presión de poros y, por lo tanto, reducen la resistencia del suelo. El ambiente sedimentario, la edad de sedimentación, historia geológica, profundidad del nivel freático, distribución del tamaño de grano, densidad y profundidad determinan si un depósito sufrirá licuefacción durante un terremoto. Por lo general, aquellos sedimentos sin cohesión de edad Holoceno y más jóvenes bajo el nivel freático son más susceptibles a sufrir este proceso (Youd & Perkins, 1978).

Cornforth (2005) propone que, excluyendo las laderas rocosas, los deslizamientos inducidos por terremotos pueden ser agrupados en tres grupos:

(1) Deslizamientos en Suelos Marginalmente Estables: Ejemplos como deslizamientos antiguos, acantilados costeros, bancos de ríos activamente erosivos, cortes artificiales y rellenos en terrenos de alta pendiente, superficies rocosas meteorizadas, depósitos estratificados volcánicos en pendientes, entre otros, al ser sujetos a las fuerzas horizontales provocadas por terremotos pueden sufrir desestabilización. Por lo general este fallamiento es de carácter local y pequeño, aunque existe evidencia de deslizamientos de mayor área. Específicamente, para deslizamientos en pendientes con suelos sin cohesión con estabilidad marginal, Seed and Goodman (1964) y Goodman and Seed (1966) indican que estas

pendientes se ubican sobre el nivel freático y que no sufren licuefacción durante eventos sísmicos.

(2) Deslizamientos Translacionales en Pendientes de Arcilla: Estos deslizamientos ocurren en pendientes arcillosas que poseen una estabilidad adecuada bajo condiciones estáticas normales, pero que al ser sujetas a fuerzas horizontales de eventos sísmicos de alta magnitud se vuelven inestables. Estos fallamientos son más probables de ocurrir donde existan planos de debilidad de dirección sub-horizontal.

(3) Deslizamientos Inducidos por Licuefacción: Provocados por la licuefacción temporal de arenas durante fuertes movimientos sísmicos. Los suelos arenosos, y otros tipos de suelos sin cohesión, tales como grava y limo de grano grueso, tienen un contacto punto a punto entre sus granos. Cuando la estructura del suelo es perturbada por sismos, estos granos pueden comportarse temporalmente como estado líquido, dependiendo de la compactación, peso de la carga superior, duración y magnitud del sismo, etc. En el momento de la licuefacción, el suelo pierde la mayoría de su resistencia a los esfuerzos de corte. Para que ocurra licuefacción, los depósitos deben estar relativamente sueltos y bajo el nivel freático.

En Chile existen múltiples registros de procesos de remociones en masa cosísmicos. El terremoto de Valdivia de M: 9.5 en el año 1960 generó numerosos deslizamientos en la zona centro-sur del país, con un catastro de más de 60 derrumbes incluyendo el desplome de la ladera de un cerro en Tranquil, que cubrió aproximadamente 2 km de valle y dejó 90 personas fallecidas (Mardones & Rojas, 2012). El 21 de abril de

2007, un terremoto superficial cortical de M: 6.2 en la falla geológica de Liquiñe-Ofqui provocó múltiples remociones en masa, las cuales a su vez generaron un maremoto en la región de Aysén y el fallecimiento de 10 personas (SERNAGEOMIN, 2017). El 27 de febrero de 2010, un terremoto de subducción de M: 8.8 detonó numerosas remociones en masa, principalmente deslizamientos y caídas de roca en las regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins, Maule, Bío-Bío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos.

Para este último terremoto, Bray and Frost (2010) reconocieron visualmente una gran cantidad de remociones en masa de tamaño pequeño a mediano y de carácter superficial, en laderas de quebradas, bordes de terrazas marinas y cortes de caminos y cerros. En adición, Mardones and Rojas (2012) identificaron 22 procesos de remociones en masa para el área costera de la Región del Bío-Bío, de los cuales 15 corresponden a caída de roca y/o suelo, 3 deslizamientos de rocas, 1 caída de suelo (arena fluvial no consolidada), y el resto una combinación de procesos de remociones en masa mixtos y extensiones laterales. La relativamente baja densidad y el reducido tamaño de las diferentes remociones en masa identificadas por Mardones and Rojas (2012) pueden ser explicadas por las condiciones topográficas del relieve (baja altitud) y por la baja humedad presente en el suelo, ya que el terremoto ocurrió en la estación más seca del año, por lo que el nivel freático estaba a mayor profundidad y, por lo tanto, los suelos y roca presentaban bajos niveles de saturación.

4.3. Marco Geológico Local

Geomorfológicamente, el área de estudio se sitúa en la Cordillera de la Costa, la cual está conformada por rocas metamórficas del Basamento Metamórfico en la zona occidental (González-Bonorino & Aguirre, 1970) y rocas intrusivas que forman parte del Batolito Costero del Sur en la zona oriental (Hervé et al., 1988), compuesta por granitoides calcoalcalinos, donde ambas franjas son de edad Carbonífero superior a Pérmico (Hervé et al., 1988), registrándose de manera restringida pulsos magmáticos mesozoicos como el Monzogranito Hualpén (Figura 19). Al observar la Figura 19, se aprecia que la cuenca Palomares se sitúa específicamente en la zona del Batolito Costero del Sur, donde estas rocas intrusivas dominan los cerros de la Cordillera de la Costa en esta área, mientras que las planicies en los bajos niveles topográficos están conformadas por depósitos cuaternarios provenientes de la depositación de los ríos Biobío y Andalién. Creixell (2001) identifica, en las inmediaciones de la ciudad de Concepción, un conjunto de granitoides de composición altamente diferenciada que agrupa en una subunidad denominada Granitoides de Concepción, la cual corresponde al margen occidental del Batolito Costero del Sur y a las rocas intrusivas del área de estudio, con presencia de Monzogranito de biotita y Tonalita de biotita y mica blanca.

Una característica de las rocas intrusivas que afloran en la región es su alto nivel de meteorización, donde los feldespatos se encuentran descompuestos parcial o totalmente a arcillas. Los granitoides del batolito paleozoico en estado fresco se presentan como una roca dura, competente y tenaz, pero normalmente está cubierta

por un manto muy meteorizado de gran espesor, dependiendo del grado de erosión. Como resultado se obtiene un material poco cohesivo y muy sensible a la acción erosiva de las aguas lluvias, conocido como maicillo, el cual representa el regolito (suelo residual) de las rocas graníticas del batolito costero sur (Poblete & Dobry, 1968).

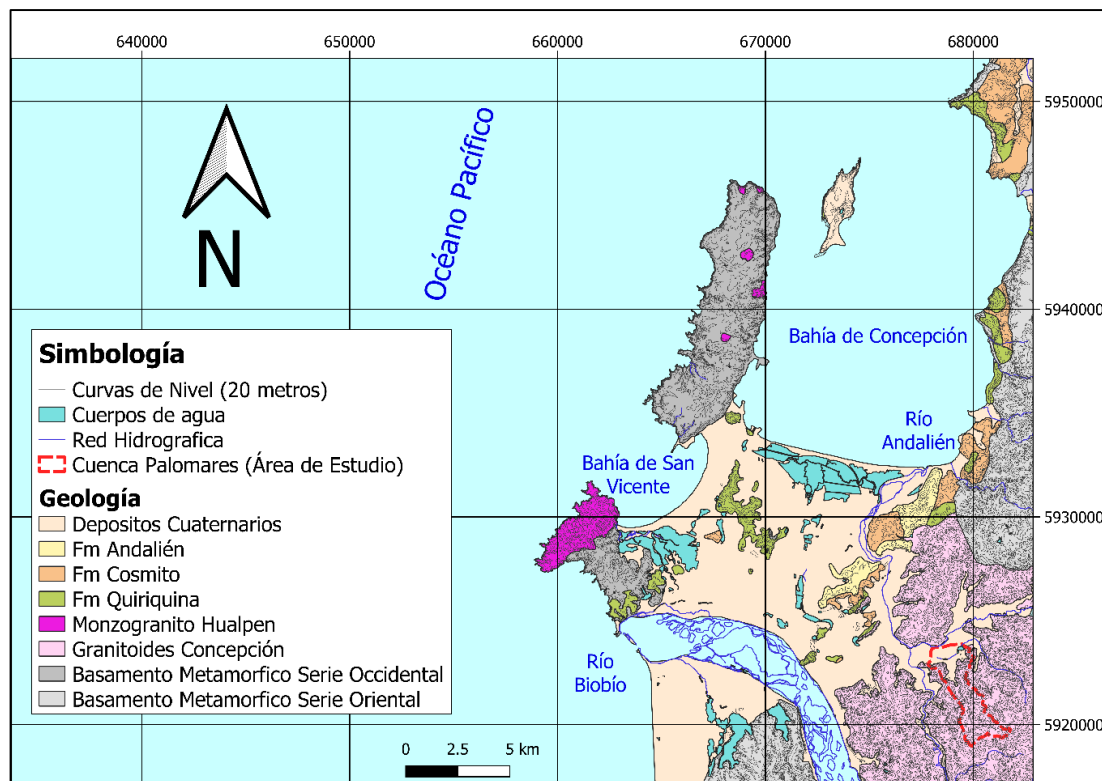


Figura 19. Mapa geológico área de estudio. Modificado de SERNAGEOMIN (2002).

Vivallos et al. (2010) mencionan que este regolito, puede llegar a tener 20 metros de potencia, siendo susceptible a la generación de cárcavas por erosión hídrica y remociones en masa. Es este suelo residual el material más susceptible a desplazarse sobre un nivel de suelo más competente, cohesivo y resistente a la

erosión, cuando se generan deslizamientos rotacionales o traslacionales detonados por precipitaciones en la región (Figura 20).

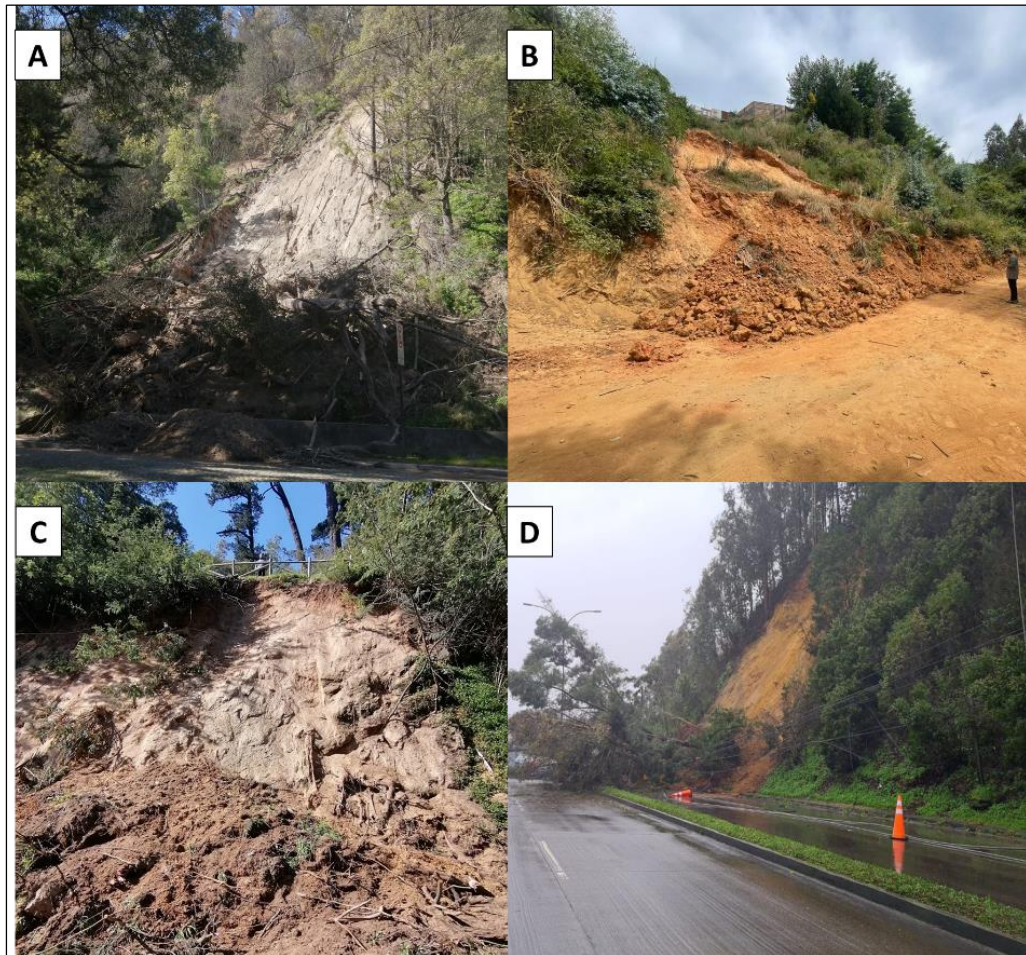


Figura 20. Deslizamientos de suelo residual de regolito granítico en distintas zonas de la región. A) y C) corresponden al Cerro Caracol, B) a Penco, y D) a Pedro de Valdivia. Se identifica el deslizamiento de un suelo con mayor presencia de limos y arcilla, sobre un nivel del regolito más competente, generalmente compuesto por suelos con predominancia de texturas tamaño arena, con presencia parcial de relictos de la roca madre. Cortesía de Francisco Castro (PhD (c)).

Este regolito ha sido formado a partir de la combinación de factores exógenos como las condiciones climáticas (temperatura, humedad), la evolución geomorfológica, condiciones hidrogeológicas y el tiempo sobre la roca madre. Estos procesos

exógenos determinan la intensidad de la meteorización y la preservación del regolito (Li et al., 2017).

Si se analiza en un perfil vertical los perfiles de rocas intrusivas meteorizadas, la profundidad de éstos varía significativamente dependiendo de la litología de la roca madre y las condiciones exógenas locales. Aun así, las características composicionales, texturales y visuales que permiten diferenciar los horizontes de suelo en regolitos provenientes de granitoides, independiente del espesor de cada horizonte, presentan una estructura muy similar entre los distintos suelos graníticos de la región (CIREN, 1999), donde es posible identificar tres horizontes principales, como se observa en la Figura 21 (Hillel, 2007).

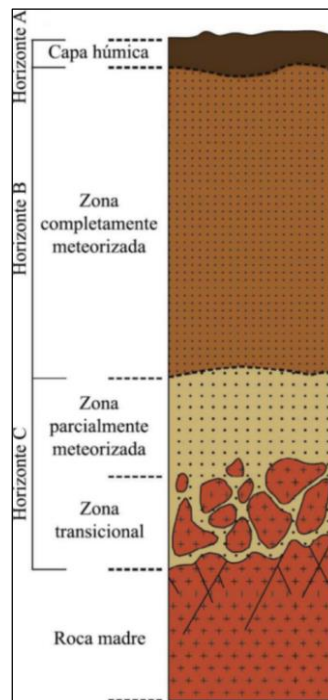


Figura 21: Perfil típico de suelo residual granítico. (Modificado de Hillel (2007)).

De manera general, se describen a continuación los principales horizontes identificados en el regolito granítico de la región:

- a) Horizonte A: Zona de suelo más superficial. Generalmente contiene una gran cantidad de materia orgánica, lo que le otorga un color marrón oscuro. Los análisis texturales de CIREN (1999) indican presencia de granulometría moderadamente gruesa del tipo arena francosa, al igual que las muestras tomadas en este estudio.

- b) Horizonte B: Zona completamente meteorizada. La textura de la roca madre ha sido obliterada y el material está totalmente disgregado. Las plagioclasas han sido descompuestas y transformadas a minerales del grupo de las arcillas como caolinita, mientras que los minerales ferromagnesianos como el anfíbol o la biotita se alteran a limonita o hematita. En este nivel se acumulan los minerales del grupo de las arcillas producto del proceso de hidrólisis, donde el agua percola desde la superficie, lixiviando el suelo superior, generando la acumulación de arcillas y elementos químicos en este horizonte. También es posible identificar fragmentos minerales tamaño arcilla, como cuarzo. Estos niveles son más arcillosos que el horizonte A, donde la fracción gruesa está compuesta por cuarzos que no han sido lo suficientemente fragmentados. Su color varía según la presencia de distintos minerales del grupo de las arcillas, donde son típicos las coloraciones rojizas por la acumulación de hierro, como también colores amarillentos y de tonalidades más claras por la presencia de caolinita. CIREN (1999) lo clasifica como suelos franco arcillo arenosos, y es el

segundo tipo textural de suelo utilizado en las modelaciones, ya que se ha identificado en diversas zonas de la región que los deslizamientos de suelos residuales están altamente condicionados por este nivel más arcilloso del regolito (Mardones and Rojas (2012); Naranjo et al. (2006)).

- c) Horizonte C: Zona parcialmente meteorizada. Corresponde a la zona de transición entre el suelo alterado y la roca madre fresca. Se presenta como una gradación desde un nivel parcialmente meteorizado a una zona de transición con presencia de fragmentos de roca fresca, para llegar finalmente a la roca madre fresca inalterada. Es común que conserve parcialmente estructuras de la roca original, pudiendo observar bolones de roca madre dentro de la matriz fina del regolito. En términos geomecánicos, corresponde al suelo del tipo saprolito, el cual es más consistente y competente, ya que los minerales están mejor conservados, con alteración parcial de las plagioclasas a caolinita, dándole una apariencia moteada al regolito, a diferencia de los horizontes anteriores donde la alteración es total y oblitera la estructura original de la roca madre. CIREN (1999) indica que estos niveles presentan una coloración amarillenta oscura, con una textura más gruesa que los horizontes anteriores, con dominancia de la fracción arena, variando entre suelos franco arenosos y areno francosos,

4.4. Efectos de la Vegetación en la Estabilidad de Laderas

La vegetación puede actuar como una barrera de protección entre el suelo y los elementos naturales que estimulan la erosión y los procesos de remoción en masa.

Dicho esto, los diferentes tipos de plantas exhiben distintas morfologías y estructuras, pero la mayoría presentan elementos en común que son útiles en soluciones eco-tecnológicas, tales como: 1) Raíces, las cuales permiten el anclaje y absorción de agua y nutrientes del suelo, 2) Hojas, que interceptan la precipitación e inician la evapotranspiración, conllevando a una disminución en los niveles de humedad del suelo, y 3) Troncos y tallos, que sustentan las partes sobre el nivel del suelo y capturan el suelo erosionado. Así, ciertos tipos de plantas son intrínsecamente más adecuadas que otros en términos de la estabilización de laderas. De esta manera, cada especie generará un distinto patrón de enraizamiento y de cantidad de biomasa, según las condiciones específicas geográficas y climáticas. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** entrega las características ideales de la vegetación según la función requerida (Stokes et al., 2008).

La presencia de vegetación sobre los taludes tiene efectos mayoritariamente positivos en la estabilidad de ésta, ya que evita y/o disminuye los problemas de erosión y reptación. Así, los árboles y arbustos de raíz profunda aportan una resistencia cohesiva significativa a los mantos de suelo más superficiales, y, al mismo tiempo, facilitan el drenaje subterráneo, reduciendo en esta forma la probabilidad de deslizamientos poco profundos, aunque su efecto no es el mismo en deslizamientos profundos. El tipo de vegetación y su estructura en la distribución, tanto en la ladera como en el área arriba de ésta, es un parámetro importante para su estabilidad que debe ser considerado.

Tabla 5. Características deseables de la vegetación según las funciones requeridas. (Modificado de Stokes et al. (2008)).

Función	Características ideales de la vegetación
Captación y Contención	Troncos y/o tallos fuertes, múltiples y flexibles; rápido crecimiento de troncos; habilidad de rebrotar después de recibir daño; propagación desde esquejes y brotes de raíces.
Cobertura y Protección	Copas de árboles bajas, apretadas y extensas; superficie de crecimiento densa y en esparcimiento, manto superficial de raíces fibroso.
Refuerzo y Soporte	Raíces profundas, fuertes y múltiples; rápido desarrollo de raíces; alta tasa de biomasa raíz/brote; alto potencial de transpiración vegetal.
Mejora del Hábitat	Sombra y cobertura para moderar temperaturas y mejoras la retención de humedad; desarrollo de humus de desechos vegetales; potencial de fijación de nitrógeno.

La susceptibilidad de una ladera a generar un deslizamiento está controlada principalmente por factores geomorfológicos, topográficos, geológicos (litológicos y estructurales) e hidrológicos (Sidle & Ochiai, 2006). Dentro de estos factores la presencia de vegetación contempla diversos elementos que generan un efecto en la estabilidad del talud, los cuales Stokes et al. (2008) agrupan en dos clases principales: 1) efectos hidrológicos (por ejemplo, influenciando el balance hídrico del suelo a través de la modificación de humedad del suelo y presión de poros) y 2) efectos mecánicos (tales como reforzamiento del suelo mediante la cohesión de las raíces de las plantas). También existen casos donde la presencia de vegetación influye negativamente en la estabilidad de la ladera, o bien no genera la fuerza resistiva suficiente para evitar que se generen deslizamientos.

Por un lado, los efectos hidrológicos tienen relación con la reducción de la presión de poros a través de la captación de agua de las raíces, que conlleva a una reducción en la conductividad hidráulica del suelo y al mismo tiempo un aumento en la resistencia al corte de éste. Por otro lado, los efectos mecánicos se refieren al incremento de la resistencia al corte del suelo atribuido al reforzamiento mecánico de las raíces, considerándolo como una fuerza cohesiva del suelo adicional, conocida como cohesión de raíz aparente (Feng et al., 2020).

El rol de la vegetación en los deslizamientos (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) influye en diversos procesos hidrológicos como evapotranspiración y agua subterránea, como también en procesos mecánicos de resistencia de las raíces, condición del suelo y la sobrecarga del peso de la vegetación sobre la ladera (Gorsevski et al., 2006).

Chirico et al. (2013) estudiaron el rol de la vegetación en la estabilidad de laderas bajo condiciones no saturadas transitorias, donde determinaron que para las estaciones lluviosas, el efecto del estado de succión de suelo (diferencia entre presión de aire de poros y presión de agua de poros) en la estabilidad es menor que el reforzamiento mecánico proveído por las raíces, mientras que en estaciones secas, el estado de succión de suelo se hace mucho más relevante que el efecto mecánico de las raíces. En adición, para zonas con climas mediterráneos, como es el caso de este estudio, las cuales presentan intensas lluvias en cortos períodos de

tiempo, la captación de agua a través de las raíces toma un rol fundamental en establecer previamente un estado del suelo favorable para la estabilidad de la ladera.

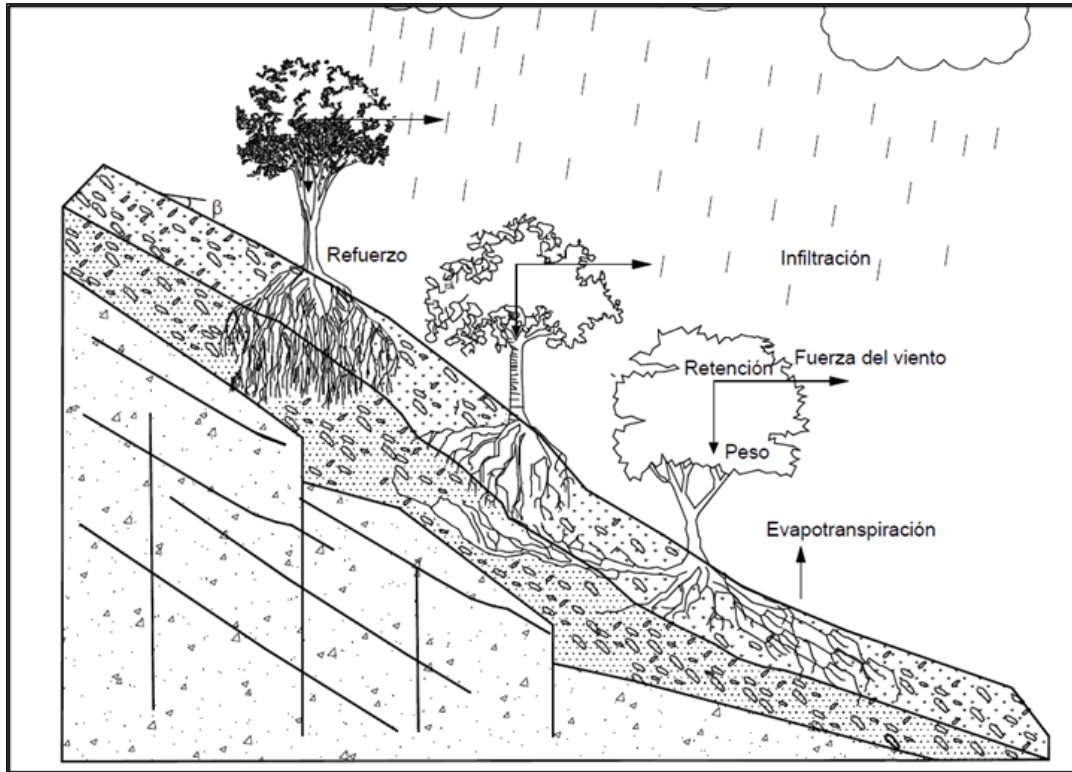


Figura 22: Algunos efectos de la vegetación en la estabilidad de laderas. (Modificado de Suarez (1998)).

A continuación, serán presentados los principales efectos de la vegetación en la estabilidad de taludes.

4.4.1. Efectos Hidrológicos

El ciclo hidrológico de agua dulce es un sistema de balance hídrico controlado por la energía solar. A escala de cuenca e incluso de ladera, el balance hídrico está determinado por:

$$P = Q + ET + \Delta S$$

(1)

Donde P es la precipitación, Q es la descarga, ET es la evapotranspiración y ΔS es el efecto de la vegetación, ya sea por intercepción, transpiración del suelo, captación de agua por sistemas de raíces, etc. (Stokes et al., 2008).

La precipitación incluye nieve, granizo, aguanieve y lluvia. Para el caso de la lluvia, diversos procesos hidrológicos como la intercepción, infiltración y almacenamiento superficial impiden que el total de lluvia caída sea descargada. Dicho esto, la precipitación efectiva corresponde al total de la lluvia menos la pérdida por intercepción, mientras que el exceso de lluvia corresponde al agua disponible directamente a la esorrentía, y es igual al total de la lluvia menos la intercepción, disminución del almacenamiento y absorción (Stokes et al., 2008).

Los efectos hidrológicos de la vegetación resultan de la interacción de distintos mecanismos producidos en la interfase suelo-planta-atmósfera. Estos procesos pueden ser agrupados, en términos amplios, en humidificación y deshidratación. La humedad es potenciada por las lluvias, donde la vegetación regula el importe de agua que logra llegar al suelo. Las partes aéreas de la vegetación interceptan parte

de la precipitación y atenúan la cantidad de lluvia disponible capaz de infiltrar el suelo, aunque el agua que logra escurrir por el tronco o tallo puede generar efectos negativos en la estabilidad al infiltrarse por las zonas de mayor porosidad provocadas por las mismas raíces. Los mecanismos de deshidratación reducen el grado de saturación del suelo luego de la lluvia, donde la captación de agua por las raíces y posterior evapotranspiración es el proceso principal que controla la saturación. Estos procesos influyen en la presión de poros del suelo, modificando la resistencia al corte del suelo (Gonzalez-Ollauri & Mickovski, 2017).

Arnone et al. (2016) indican que el rol de la vegetación en la estabilidad de laderas consiste, en términos simples, en reducir la cantidad de agua en el suelo (y en consecuencia la presión de poros), y por tanto el incremento del efecto de succión matricial del suelo (diferencia entre presión de aire de poros y presión de agua de poros), el cual es particularmente estabilizante en suelos finos. La disminución de agua se obtiene a través de la reducción de la cantidad de agua disponible para la infiltración, y por la captación de agua a través de las raíces.

Según Stokes et al. (2008), la vegetación tiene una importante influencia en la hidrología de la ladera y viceversa, por lo que últimamente afecta en la tasa de erosión y estabilidad de laderas. La interacción entre ambos agentes está caracterizada por diversos procesos interrelacionados: las copas de los árboles reducen la cantidad e intensidad de la lluvia que alcanza el nivel del suelo por intercepción, disminuye el almacenamiento de agua del suelo a través de la evapotranspiración, la cubierta y desechos vegetales protegen la superficie del suelo

y previenen la formación de grietas de desecación manteniendo así la capacidad de infiltración y mejorando la evaporación en la capa de desechos, mejoramiento de la estructura del suelo por el enraizamiento y producción de desechos vegetales y promueve la actividad biológica del suelo, lo que resulta en la formación de meso y macro poros que aumentan la capacidad de infiltración.

4.4.1.1. Intercepción

La intercepción disminuye el agua de lluvia disponible para la infiltración. Así, cualquier agua que haya sido retenida físicamente por la planta puede evaporarse y por lo tanto no podrá infiltrarse. Las pérdidas por intercepción dependen principalmente en la habilidad de las plantas de detener la lluvia de manera que una fracción de la lluvia interceptada es captada, hasta que la capacidad de almacenamiento de la vegetación (hojas y troncos) es excedida, permitiendo que alcance finalmente el suelo por goteo y/o flujo desde las hojas y/o troncos (follaje en general) (Stokes et al. (2008); Suarez (1998); Llorens and Domingo (2007)). Otro efecto de la intercepción de la lluvia producida por el dosel arbóreo (*canopy*) corresponde a la reducción de la erosión del suelo, ya que la misma intercepción desvían y esparcen las gotas de lluvia, actuando como una protección física del suelo al disminuir la energía de impacto de la gota que logra llegar al suelo, como también el efecto de salpicadura al momento del impacto que también realza la infiltración (Gyssels et al. (2005); Duan et al. (2016)). En resumen, la intercepción dentro ciclo hidrológico considera múltiples procesos, tales como retención, acumulación, flujo del follaje (tronco y/o tallo, hojas) y evaporación (**¡Error! No se**

encuentra el origen de la referencia.), las cuales en conjunto modifican las tasas de infiltración, ya que disminuyen la cantidad de agua que logra llegar al suelo en comparación con el total de agua caída en el período de lluvia, aminorando las tasas de escorrentía y el poder erosivo (Suarez, 1998).

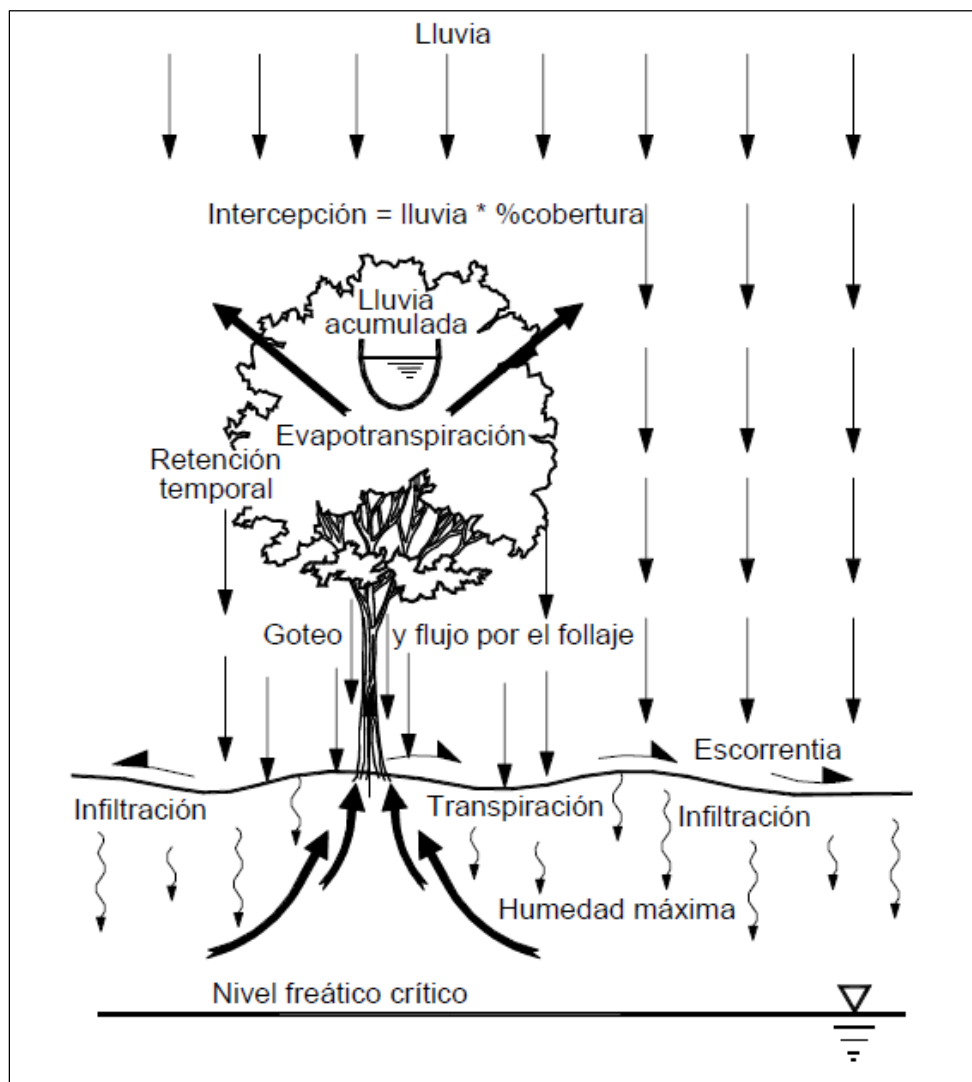


Figura 23. Efecto de la vegetación sobre el ciclo hidrológico. (Modificado de Suarez (1998)).

4.4.1.2. Infiltración y Escorrentía

La tasa en la cual el agua puede infiltrarse en el suelo está compuesta por una capacidad de infiltración constante relacionada intrínsecamente a las propiedades del suelo y a una contribución variable relacionada con la succión matricial. Además, la intercepción de la precipitación depende del tipo de vegetación. Por ejemplo, pastos altos y gruesos se aplanan por la lluvia intensa y forman una barrera semi-permeable (Wilkinson et al., 2002). En el comienzo del evento de lluvia, la succión matricial controla y domina la infiltración, pero a medida que más agua ingresa al suelo la influencia de esta succión disminuye a tasas asintóticas según la tasa constante de la capacidad de infiltración (aquella controlada por gravedad) (Stokes et al., 2008).

Cuando la precipitación máxima capaz de almacenar el suelo excede la tasa de infiltración, el agua no es capaz de infiltrarse, iniciando el proceso de escorrentía, lo cual conlleva a flujos superficiales hortonianos de agua que pueden volver a infiltrarse y también causar erosión del suelo, tal que cualquier exceso de lluvia y sedimento arrastrado que no estén almacenados a lo largo de la ladera serán descargados al canal más próximo (Stokes et al., 2008).

Para que ocurran flujos superficiales hortonianos se necesitan altas tasas de precipitación muy intensas, lo cual se ve potenciado por suelos con bajas capacidades de infiltración, ya sea por la impermeabilización natural o artificial de la superficie. Dicho esto, en suelos muy permeables estos flujos son poco probables de

ocurrir. En cambio, la escorrentía en estos suelos ocurre cuando la capacidad de almacenaje del suelo es excedida, lo cual puede producirse localmente por la saturación del flujo continuo lateral (flujo de retorno). Este flujo lateral requiere que el drenaje vertical sea obstruido, por lo que el agua es transportada pendiente abajo a través del suelo sobreyacente más permeable. Estos flujos han sido observados en los suelos superiores permeables de laderas forestadas, especialmente en regiones templadas. En adición, la rápida redistribución de la humedad en la pendiente es extremadamente importante para la generación de presión de poros positiva en planos de posibles deslizamientos. A medida que la cantidad de lluvia incrementa, se desarrollarán zonas saturadas en el suelo, el cual acumulará agua y permitirá que la saturación avance pendiente arriba. Esto explica la ocurrencia de deslizamientos en las zonas más bajas de las laderas (Stokes et al., 2008).

4.4.1.3. Flujo Matricial y Flujo Preferencial

El transporte de agua en zonas no saturadas es descrito como un dominio de flujo continuo a través de los espacios poros matriciales según la ecuación de Darcy-Buckingham:

$$q = k(h)\nabla H$$

(2)

Donde $k(h)$ es la conductividad hidráulica no saturada en función del potencial matricial h . Al aumentar h (disminución de la humedad), el $k(h)$ disminuye. ∇H es el gradiente del potencial total en la dirección x, y y z . Según este concepto, el agua

nueva que ingresa al sistema “empuja” hacia abajo al agua ya almacenada (flujo pistón) (Stokes et al., 2008).

En la realidad, muchos suelos tienen espacios de poros heterogéneos y, por lo tanto, los conceptos de flujos matriciales han sido extendidas por flujos de macroporos (áreas dentro del suelo donde existe presión atmosférica). Algunos ejemplos de macro poros son grietas de tension, fisuras, grietas de desecación, hoyos producidos por raíces, cuevas animales, tubos naturales, etc. En las zonas de macroporos los flujos de agua se comportan como flujos de canales abiertos, mientras que en los espacios porosos matriciales rigen los flujos de la ecuación de Darcy-Buckingham (Stokes et al., 2008).

En la actualidad, el flujo de pistón ha sido reemplazado por el flujo preferencial, el cual más que hacer referencia a los macroporos o flujos en fisuras, especifica al flujo preferente como consecuencia de la heterogeneidad y anisotropía del suelo. Como consecuencia de este flujo, las corrientes de agua y nutrientes no viajan homogéneamente, sino que son concentradas a lo largo de varias trayectorias del flujo a velocidades relativamente altas, lo que resulta en un transporte más rápido que los asumidos para los otros flujos ya mencionados. En el caso de los deslizamientos, la principal consecuencia es que el agua infiltrada puede alcanzar la superficie de deslizamiento mucho más rápido que la esperada en condiciones de flujos Darcianos (Cammeraat et al. (2007); Stokes et al. (2008)).

4.4.1.4. Evapotranspiración y Condiciones de Humedad del Suelo

El proceso de evapotranspiración es producido a medida que la superficie del suelo es calentada hasta el punto de vaporizar la humedad que contiene. Esta humedad es perdida como evaporización desde la superficie del suelo y como transpiración a través de la vegetación. La tasa de evapotranspiración depende de la turbulencia, distribución del viento y rugosidad del suelo, que permiten en conjunto que el vapor de agua sea capaz de disiparse en el aire. Dicho esto, la evapotranspiración (y por tanto las tasas de evaporación y transpiración) no es una constante en el tiempo, sino que varía fuertemente con las condiciones limitantes atmosféricas, el estado de la superficie del suelo y el tipo de vegetación (Stokes et al., 2008).

La transpiración vegetal es un proceso fuertemente marcado según las estaciones del año en climas templados (Wever et al., 2002), como también la orientación del sol respecto a la vegetación, ya que la sombra producida por la cubierta vegetal disminuye la evaporación directa desde el suelo (Raz-Yaseef et al., 2010). El efecto de la evapotranspiración permite la disminución de la humedad del suelo o, en otras palabras, la generación de un flujo de agua que escapa del suelo (Suarez (1998); Laio (2006)). Como consecuencia, el grado de saturación del suelo es reducido, como también la presión de poros y, por tanto, se obtiene también un aumento de la succión matricial, lo que en conjunto incrementa la resistencia al corte del suelo (Gonzalez-Ollauri & Mickovski, 2017).

Cada tipo de vegetación en un determinado tipo de suelo posee una cantidad máxima de agua que puede ser evaporada bajo las condiciones atmosféricas desde un suelo uniforme o de una superficie de agua cuando el suministro de agua no es un factor limitante. Este potencial máximo de agua a evaporar se denomina evapotranspiración potencial (Doorenbos and Pruitt (1977); Brutsaert (1982); Suarez (1998)). Un valor aproximado o referencial de la evapotranspiración potencial puede ser calculado a través de la temperatura y radiación, o deducido desde cálculos de balances hídricos bajo condiciones controladas (Stokes et al., 2008).

Una de las influencias que tiene la vegetación en la evapotranspiración es el cambio en la rugosidad del suelo. Especialmente en casos de árboles aislados, el incremento en la turbulencia lleva a mayores tasas de evapotranspiración. En adición, cuando el suministro de agua es limitado, la evapotranspiración es capaz de reducir la humedad disponible en el suelo. Las plantas tratarán de retener la humedad cerrando los estomas y hojas, ya que incrementa la resistencia contra la transpiración y por tanto, la evapotranspiración total será menor que el potencial de evapotranspiración estimado (Stokes et al., 2008). Si se determina la humedad máxima y el nivel freático crítico para un talud específico, teniendo en cuenta el efecto de la vegetación, se puede realizar un balance de la infiltración y la evapotranspiración produce una determinada humedad, la cual debe compararse con la humedad requerida para saturación (Suarez, 1998).

4.4.1.5. Variaciones Volumétricas del Suelo

Aquellos suelos con alto contenido de arcilla son sensibles a un aumento de su tamaño al hidratarse y encogimiento al deshidratarse. Además, ciertos minerales pertenecientes al grupo de las arcillas son más propensos a estas variaciones volumétricas, especialmente la montmorillonita y en menor grado illita, mientras que la kaolinita es menos sensible. La sensibilidad de un suelo a las variaciones volumétricas puede traducirse directamente al comportamiento de dispersión del suelo (separación de partículas), el cual es un factor importante en la formación de costras y erodabilidad del suelo (Stokes et al., 2008).

Los cambios volumétricos del suelo pueden conducir a la formación de superficies irregulares producto de los reiterativos procesos de hidratación y deshidratación, causando problemas de estabilidad, tanto en laderas como construcciones. Cuando el suelo está deshidratado, este presentará grietas verticales de hasta 1 metro de profundidad. Estas son formadas como reacción a la disminución de la humedad del suelo por la evaporación física y transpiración vegetal. Estas grietas por lo general son recurrentes y reaparecen en la misma ubicación, ya que están rellenas de sedimento suelto (Cammeraat et al., 2007).

Estas grietas funcionan como trayectos preferentes de flujos de agua. Las estaciones húmedas pueden provocar que el agua sea transmitida a través de las grietas hacia zonas más profundas del suelo, sin saturar el suelo en su totalidad. De esta manera, el agua es acumulada en zonas más profundas del perfil, en los límites entre el suelo

y el regolito o la roca no meteorizada. Otras condiciones como las propiedades mecánicas y gradiente de la pendiente también favorecen este proceso, y para el caso específico de la disminución de agua producto del efecto de la vegetación, la generación de grietas de encogimiento profundas puede afectar negativamente la estabilidad de la ladera (Stokes et al., 2008).

4.4.2. Efectos Mecánicos

Las propiedades mecánicas de la vegetación en relación con la estabilidad de las laderas pueden tener efectos beneficiosos o adversos en la fijación del suelo y la erosión de éste (Stokes et al., 2008). El rol de la vegetación en el reforzamiento y anclaje del suelo contribuye a la estabilidad de éste, pero es dependiente de factores tales como la morfología del sistema de raíces, la fuerza de éstas, su distribución y la interacción entre el suelo y las raíces (Reubens et al., 2007).

Desde un aspecto mecánico, el reforzamiento del suelo es el resultado de la fuerza de tensión y propiedades friccionales o adhesivas que entregan las raíces (Ekanayake and Phillips (1999); Reubens et al. (2007)). Las raíces que se extienden perpendicularmente a la superficie del suelo lo refuerzan al incrementar la resistencia al corte de la masa de suelo enraizada, mientras que aquellas que crecen paralelas a la superficie del suelo lo refuerzan al aumentar la fuerza de tensión dentro del plano de la zona de suelo enraizada (Zhou et al., 1998).

El total del efecto mecánico de las raíces puede ser considerado no solo en términos de su fuerza sino también en cuanto a su distribución dentro del suelo (Nilaweera & Nutalaya, 1999). Para las raíces gruesas el efecto del anclaje depende fuertemente de su profundidad y densidad espacial. En muchos tipos de vegetación, las raíces no se extienden lo suficientemente profundo para prevenir procesos de remociones en masa, y si la densidad espacial no es suficiente, el suelo podría removerse fácilmente alrededor de las raíces, donde en este caso no ocurre el efecto de reforzamiento. La importancia en la estabilización mecánica de la ladera por medio de las raíces radica principalmente en la profundidad de las superficies propensas a deslizar, el tipo de fallamiento más probable y la inclinación de la ladera (Nilaweera and Nutalaya (1999); Cammeraat et al. (2007); Reubens et al. (2007)).

4.4.2.1. Morfología del Sistema de Raíces

La morfología del sistema de raíces es compleja, variando según la especie, tipo de suelo y las condiciones intrínsecas del área donde se sitúan. La disponibilidad de nutrientes y aire en el suelo, el contenido de humedad y permeabilidad del suelo, ubicación y variación del nivel freático, extensión del suelo compactado, entre otros, son algunas de las condiciones que modifican este sistema (Stokes et al., 2008).

Según los tipos de sistemas de raíces (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), los árboles son clasificados en tres tipos: 1) *plate*; de grandes raíces laterales y raíces de anclaje verticales, como es el caso del *Pinus radiata* para el caso de estudio, 2) *heart*; con múltiples raíces oblicuas, verticales y horizontales, y 3)

tap; con una raíz grande central y pequeñas raíces laterales. De éstas, los sistemas de raíces *heart heart* y *tap* corresponden a las más resistentes a procesos de desenraizamiento, mientras que los tipos *plate* son considerados los menos resistentes (Stokes et al., 2008).

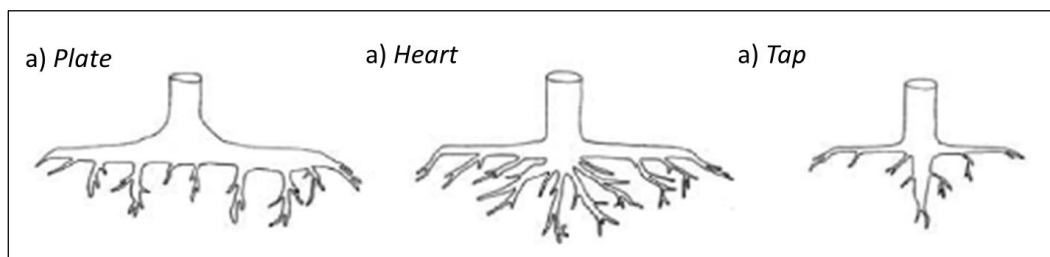


Figura 24. Clasificación del tipo de raíces según su morfología. (Modificado de Stokes et al. (2008)).

Coutts (1983) indica que la arquitectura de las raíces es una consideración importante en términos de cómo las fuerzas de la estructura del árbol son transferidas al suelo. Así, la morfología del sistema de raíces determina el patrón de distribución de estas fuerzas (dinámicas o estáticas). En adición, la estabilidad y capacidad de sostén del suelo de los árboles en zonas planas y en pendientes está fuertemente influenciada por la simetría del sistema estructural de las raíces, pudiendo reconocer distintos tipos de asimetrías del sistema de raíces, según el tamaño regular/irregular de las raíces y su distribución homogénea/heterogénea. Nicoll et al. (2006) mencionan que la estabilidad de los árboles usualmente es potenciada en sistemas simétricos, sin embargo, en pendientes los sistemas normalmente son asimétricos.

4.4.2.2. Reforzamiento de Resistencia del Suelo por Raíces (Cohesión)

Las raíces leñosas anclan el manto de suelo en niveles de sustrato más estables. Aquellas raíces lo suficientemente resistentes se unen y enredan a lo largo de planos de debilidad y superficies de deslizamiento potenciales, anclando el suelo, mientras que las raíces pequeñas proveen una membrana de reforzamiento al manto de suelo, aumentando la resistencia al corte de éste. Este mecanismo de reforzamiento de suelo ha sido identificado como la principal contribución de los bosques a la estabilidad de laderas, pudiendo actuar en el plano de falla basal de un deslizamiento o en el fallamiento lateral (grietas de tensión). De este modo, la pérdida del reforzamiento (función protectora) es una de las causas principales de deslizamientos ocurridos en periodos posteriores a la cosecha, con una ventana de susceptibilidad que comienza cuando las raíces muertas de los árboles talados empiezan a descomponerse, hasta que la vegetación leñosa es reestablecida y una densidad y tamaño de raíces suficiente haya sido alcanzada (Stokes et al., 2008).

Estudios dirigidos por Willatt and Sulistyaningsih (1990) en suelos francos mostraron un aumento tanto en la capacidad de carga como la resistencia al corte no drenado ante la presencia de sistemas de raíces. Las raíces entrelazadas tienden a unir y juntar el suelo en una masa uniforme y contribuyen al reforzamiento de la resistencia de éste al entregar una cohesión aparente adicional. En adición, como resultado de la orientación aleatoria de las raíces, éstas tienen una influencia despreciable en el componente friccional de la resistencia del suelo. Por esto, en suelos permeados por

raíces, el criterio de fallamiento Mohr-Coulomb es modificado para incluir la cohesión de raíces efectiva, según la siguiente ecuación:

$$s = c' + c'_R + (\sigma - u) \tan \phi'$$

Donde s es la resistencia al corte del compuesto suelo-raíces, c' es la cohesión efectiva, c'_R es la cohesión de raíces efectiva, σ es el esfuerzo normal, u es la presión de poros y ϕ' es el ángulo de fricción interno efectivo. La magnitud de la cohesión de raíces varía con la distribución de las raíces en el suelo y con la resistencia a la tensión de cada una de las raíces (Stokes et al., 2008).

4.4.2.3. Control de la Erosión

El efecto más importante de la vegetación, universalmente aceptado, es la protección contra la erosión en todos los casos y con todo tipo de vegetación. La vegetación con mayor densidad de follaje amortigua más eficientemente el golpe de la lluvia y disminuye la erosión. En hierbas y pastos la densidad y volumen del follaje actúan como un colchón protector contra los efectos erosivos del agua de escorrentía (Suarez, 1998).

Respecto a la erosión generada por el agua, es importante determinar el tipo de erosión que afecta al suelo. Para salpicaduras y erosión entre los surcos, la cubierta de vegetación por encima del nivel del suelo (plantas herbáceas) es el parámetro más importante al momento de reducir la erosión. Sin embargo, para la erosión en

surcos y cárcavas, las raíces de las plantas son tan importantes como la cobertura vegetal misma. En general, los sistemas de raíces laterales de carácter denso son los que entregan una mayor fijación del suelo frente a la erosión en surcos y cárcavas (Stokes et al., 2008)

Los árboles con tronco y sistemas de raíces de suficiente perímetro pueden literalmente bloquear el movimiento del suelo simplemente producto de su presencia, en un fenómeno conocido como *buttressing* (en español puede entenderse como apuntalamiento, apoyo y refuerzo). En este proceso, el cilindro de suelo por encima del sistema de raíces de cada árbol es estabilizado y ejerce una fuerza estática en el tronco. Esta fuerza incrementa con el tiempo, ya que cada vez más material por encima de las raíces es apuntalado (Stokes et al., 2008).

A su vez, con cierto espaciamiento entre troncos vecinos, puede desarrollarse un arqueamiento como consecuencia del *buttressing*. Este arqueamiento es una condición donde el suelo es estabilizado entre los dos cilindros de estabilidad anteriormente desarrollados. Así, la combinación de fuerzas ejercidas en los troncos de los árboles y en los sistemas de raíces son consideradas fuerzas estáticas que actúan como estabilizadores frente a la componente pendiente debajo del peso del suelo. La cantidad de suelo localizado en las áreas detrás de los árboles es dependiente tanto de los procesos erosivos como también del movimiento de suelo en una zona de cizalle. Como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en un escenario donde se desarrolle arqueamiento, los árboles

que crezcan en la pendiente actúan como verdaderos pilares anclados en el sustrato (Gray and Megahan (1981); Stokes et al. (2008)).

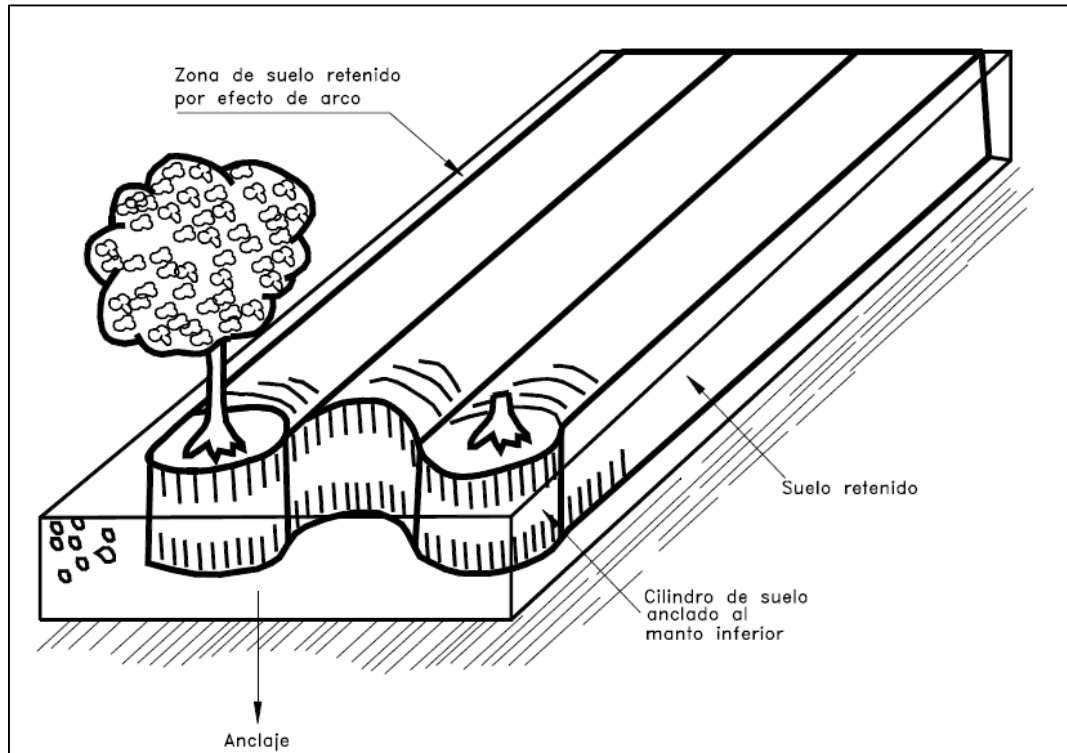


Figura 25. Efecto en conjunto del buttressing y arqueamiento en la estabilidad de taludes (Suarez (1998)).

4.2.2.4. Sobrecarga y Fuerzas Eólicas

La sobrecarga se define como la carga ejercida sobre el talud del peso combinado de toda la vegetación presente. Si bien depende de la especie, diámetro y altura de cada unidad, un bosque completo representa una sobrecarga relativamente pequeña en comparación al manto de suelo. La sobrecarga no representa una influencia significativa en la estabilidad de laderas (Suarez (1998), Stokes et al. (2008)).

La fuerza eólica puede generar el desenraizado de árboles. Las tormentas con vientos veloces corresponden al principal mecanismo de desenraizado y volcamiento de árboles. Estos mecanismos son similares cuando la fuerza eólica es aplicada a lo largo de todo el tronco (tormentas, avalanchas) o en un punto único del tronco (caída de rocas). En otras palabras, el comportamiento de los árboles frente los mecanismos de desenraizado y volcamiento producto de fuerzas eólicas puede ser aplicado a otros procesos como avalanchas y caídas de roca.

El fallamiento al momento del desenraizado depende mucho de la morfología de la morfología del sistema de raíces-suelo y el tipo de suelo. En un principio, el peso del sistema de raíces-suelo entregan una resistencia inicial. Si la fuerza ejercida en el tronco es mayor a la resistencia del sistema, el árbol desenraizará y el suelo alrededor y bajo del sistema raíces-suelo es fracturado. La resistencia a la tracción de las raíces en el barlovento entrega una alta resistencia, mientras que las raíces y suelo del sotavento entregan baja resistencia. Cada uno de estos componentes de resistencia y anclaje difieren dependiendo de la profundidad y ancho de cada sistema de raíces-suelo. Por ejemplo, especies con sistemas de poca profundidad desenraizan con baja carga de vientos (Stokes et al., 2008).

4.5. Efectos de la tala rasa en la calidad del suelo y estabilidad de laderas

Los efectos de los ciclos de plantaciones forestales en las condiciones físicas y químicas del suelo son diversos, los cuales se van exacerbando a medida que son periódicamente utilizados para la explotación forestal, disminuyendo la calidad de

éstos en variados ámbitos. El efecto negativo de la degradación del suelo puede observarse en el largo plazo (Gonçalves et al., 2008). A continuación, se describirán algunos estudios que aportan información valiosa en cuanto a los efectos de calidad del suelo y la estabilidad de laderas.

Gonçalves et al. (2008) indican que la productividad de las plantaciones de *Eucalyptus* en Brasil está restringida principalmente por el déficit de agua, seguida de la deficiencia de nutrientes en el suelo y su profundidad y resistencia. En el largo plazo se presentan riesgos en cuanto a la sustentabilidad, ya que los suelos, comúnmente del tipo franco o franco arcillosos, pierden las reservas de minerales primarios que aportan a la fertilidad de éstos. Usualmente, la disminución de la calidad del suelo es causada por un manejo que no conserva el suelo y sus recursos minerales, que daña las características físicas y químicas de éste, y uso insuficiente o desbalanceado de fertilizantes. Estos problemas se agravan cuando las especies están genéticamente modificadas para un crecimiento acelerado, ya que demandan una mayor cantidad de nutrientes en un mismo tiempo.

Gerding (2009) indica que la tala rasa puede alterar el suelo en su composición y funciones provocando pérdida de productividad en la rotación siguiente, teniendo efectos primarios, inherentes a la tala rasa misma, las cuales afectan principalmente al régimen de elementos nutritivos del suelo debido a la exportación de biomasa y bioelementos, y a los regímenes de aire y de agua del suelo a través de modificaciones del balance hídrico provocadas por la extracción del bosque, y efectos secundarios que no son exclusivos de la tala rasa sino que se presentan

debido a interacciones múltiples de métodos de corta y regeneración del bosque, operaciones forestales, topografía, suelo, clima y bosque; entre los más frecuentes está la compactación del suelo, la que altera la estructura, la función hídrica y la resistencia del suelo. Así, dentro de los efectos primarios se tienen:

1) Exportación de biomasa y de elementos nutritivos del sitio. Para el caso del elemento potasio en las plantaciones de *Pinus radiata* en Chile, a través del índice de reserva de la vegetación (IRV = elemento en la biomasa y mantillo/elemento en el suelo); se puede observar que los suelos más estables nutritivamente corresponden al granítico y el rojo arcilloso y los más inestables al sedimento marino y el arenal (Figura 26), lo que últimamente se expresa en que suelos graníticos tienen menos pérdida de potasio en comparación a los otros tras la cosecha (Gerding, 2009). De la evaluación de las plantaciones de *Pinus radiata* en Chile se pueden distinguir situaciones críticas según el elemento nutritivo, donde se identifica que la tala rasa tendrá mayores efectos negativos en la productividad de largo plazo de sitios con suelos graníticos como es el caso del área de estudio para elementos como el calcio, nitrógeno y potasio, como es el caso del área de estudio (Figura 27).

2) Incremento temporal de la disponibilidad de nutrientes. Luego de la tala rasa se produce una mineralización acelerada de la materia orgánica acumulada en el mantillo y los desechos de la cosecha, compuesta principalmente por tejidos ricos en elementos nutritivos. Posteriormente, en un plazo de uno a dos años después de la tala rasa se produce una liberación masiva de elementos nutritivos cuyo destino

dependerá de la existencia y tipo de cubierta vegetal que pueda aprovechar y retener en el sitio tales elementos mineralizados.

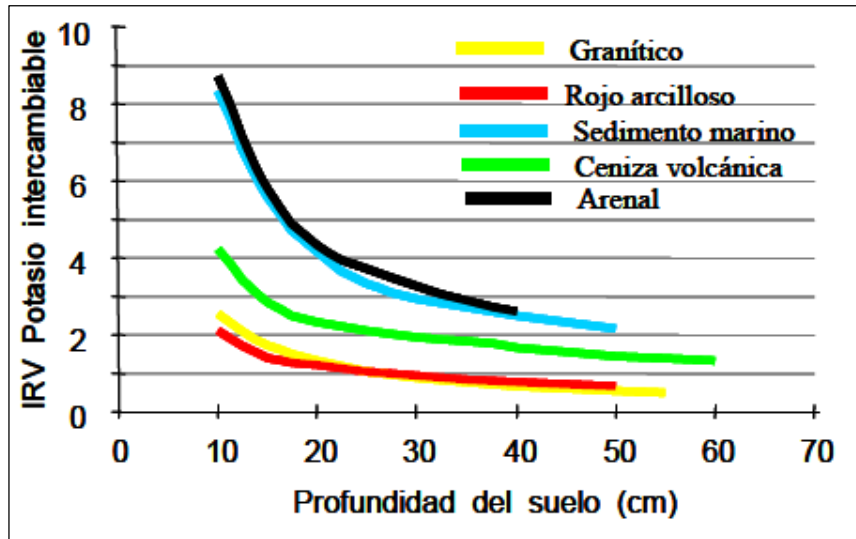


Figura 26. Índice de reserva de la vegetación (IRV) para potasio intercambiable en diferentes suelos con plantación adulta de *Pinus radiata* en la Región del Bío Bío, Chile. (Modificado de Gerding (2009)).

Grupo de suelos	C	N	P	K	Ca	Mg
Dunas litorales	xxxxx	xxxxx	oxxxx	xxxxx	oxxxx	ooxxx
Arenales	xxxxx	xxxxx	oxxxx	xxxxx	oxxxx	xxxxx
Graníticos, norte	oxxxx	oxxxx	ooxxx	oxxxx	ooxxx	ooxxx
Graníticos, sur	oxxxx	oxxxx	ooxxx	oxxxx	ooxxx	ooxxx
Metamórficos, norte	oxxxx	oxxxx	ooxxx	oxxxx	ooxxx	ooxxx
Metamórficos, sur	oxxxx	oxxxx	oxxxx	xxxxx	oxxxx	oxxxx
Rojo arcillosos, norte	ooxxx	ooxxx	oxxxx	oxxxx	ooxxx	ooxxx
Rojo arcillosos, sur	ooxxx	ooxxx	xxxxx	oxxxx	ooxxx	oxxxx
Cenizas volcánicas	ooxxx	ooxxx	oxxxx	xxxxx	oxxxx	xxxxx
Sedimentos marinos	oxxxx	oxxxx	oxxxx	oxxxx	ooxxx	ooxxx

A mayor número de x mayor es la inestabilidad del suelo.

Figura 27. Estabilidad nutritiva de distintos tipos de suelos de Chile Centro-Sur con plantaciones de *Pinus radiata* para diversos elementos nutritivos. Suelos graníticos corresponden al área de estudio. (Modificado de Gerding (2009)).

Ello puede significar importantes pérdidas de elementos nutritivos dependiendo de la vegetación acompañante, el tipo de suelo y el clima. Así, las pérdidas de estos elementos liberados serán mayores si no hay vegetación que los absorba (control de malezas, falta de regeneración, impedimentos para revegetar rápidamente el área talada), si el suelo tiene baja capacidad de intercambio catiónico (textura gruesa, pobre en materia orgánica) o si el clima es muy lluvioso (aumento de lixiviación).

3) Pérdidas por lixiviación. La no presencia de bosque disminuye la absorción de nutrientes, por lo que existe una sobreoferta de éstos que el suelo es incapaz de retener. Los suelos más afectados por lo general son aquellos que presentan características como textura gruesa, baja capacidad de intercambio catiónico, bajos niveles de materia orgánica, poca profundidad o poca evolución. Además, estas condiciones son exacerbadas con el aumento de las precipitaciones. Algunos estudios indican que la pérdida de elementos nutritivos después de 3 años de la tala rasa, en comparación a un área no talada, corresponden a 9 veces en calcio, 20 veces en potasio y 160 veces en nitrógeno.

4) Desnitrificación. Las tasas de desnitrificación aumentan en años posteriores a la tala rasa en comparación a la tasa normal de un bosque, lo cual puede estar inducido por el aumento de la saturación del suelo con agua al no existir vegetación.

5) Alteraciones en los regímenes de agua y aire del suelo. La tala rasa afecta en los procesos químicos del suelo modificando su dinámica natural en función de la topografía, clima y tipo de suelo. En zonas de alta pluviometría la tala rasa puede

inducir o acelerar procesos de solubilización y reubicación de elementos como el hierro y manganeso, producto del excedente de agua. La alteración de regímenes de agua y aire generan procesos de óxido-reducción que cambian la fertilidad del suelo, pudiendo llegar a niveles en que se modifique drásticamente la composición de la regeneración del bosque, disminuir el crecimiento del bosque remanente y el de una nueva plantación. Las nuevas condiciones edáficas posteriores a la tala rasa están caracterizadas por un mayor contenido hídrico, induciendo cambios morfológicos en el perfil del suelo y limitando el flujo de gases como el CO₂. Además, los altos niveles de materia orgánica pueden producir una contracción volumétrica y subsidencia cuando los suelos se secan.

En cuanto a los efectos secundarios, son comunes los procesos de alteración física como compactación del suelo producto del tránsito de máquinas de cosecha. En general, los efectos secundarios de la tala rasa aumentan a medida que se deteriora la estructura del suelo en la superficie cosechada. La erosión del suelo superficial es uno de los principales efectos secundarios, la cual depende principalmente de la pendiente del terreno y las tasas de precipitación. Por ejemplo, se ha medido que la pérdida de suelo por erosión posterior a la tala rasa y quema de desechos es más de 10 veces la pérdida de material en comparación al mismo suelo cubierto por vegetación a un año de la tala rasa. También se ha identificado que, producto de la tala rasa, los caudales de las cuencas en veranos al menos se duplicaron en comparación a los caudales previos a la cosecha. Esto se explica principalmente por movimientos subsuperficiales del agua y no escorrentía superficial, ya que los suelos permitieron mayor infiltración y percolación del agua.

Así, se identifican algunos indicadores relevantes para describir el estado del suelo en áreas recién cosechadas, con efectos dentro y fuera del área talada. 1) Pérdida de productividad por construcción de accesos, donde el cambio de uso de suelo altera la función hidrológica, contribuyendo a la inestabilidad de laderas e induciendo a la erosión, 2) Superficies afectadas o potencialmente afectadas por remociones en masa, erosión y/o alteraciones de drenaje, donde es importante estimar el daño potencial, ya que pequeños disturbios generan grandes impactos (como la erosión o deslizamientos después de tormentas) y 3) Riesgo de disturbio al suelo, dispersión de los disturbios, desorden de los disturbios, donde principalmente la compactación y remoción del suelo afecta la productividad y función hidrológica.

Grigal (2000) estudia los efectos del extenso manejo forestal en la productividad del suelo. Como base, plantea un axioma en el que las actividades de manejo forestales alteran las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo. Como consecuencia de los cambios físicos se pueden identificar la disminución de la productividad debido a las altas tasas de erosión, remociones en masa y compactación del suelo.

Adams and Sidle (1987) indican que la deforestación en bosques situados en laderas del sureste de Alaska acelera significativamente la generación de procesos de remociones en masa, los cuales retrasan considerablemente la regeneración de los bosques al remover el manto de suelo que cubre a la roca madre, para luego depositarlos pendiente abajo.

Barik et al. (2017) estudian suelos forestales de Washington, identificando dos factores principales que reducen la resistencia del suelo en zonas forestales que

incrementan la susceptibilidad de generación de remociones en masa; la cosecha tipo tala rasa, producto de la disminución de la cohesión que entregan las raíces, y el grado de saturación del suelo. Al añadir el factor del cambio climático, con una proyección que incluye el aumento de la intensidad de las precipitaciones, advierten sobre el aumento de esta susceptibilidad, especialmente en zonas montañosas.

En cuanto a la tala rasa, indican que este proceso puede aumentar tanto la frecuencia de ocurrencia como el volumen de deslizamientos en comparación a bosques no intervenidos. Por ejemplo, la reducción de la intercepción de la precipitación por falta de árboles resulta en un aumento de la humedad del suelo y presión de poros por la disminución de la evapotranspiración de estas plantas. Además, el intervalo de recurrencia y el tipo de práctica de cosecha (frecuencia de cosecha, patrón de cosecha y densidad de vegetación remanente) juegan los principales roles en la disminución de la actividad de deslizamientos y erosión del suelo.

Al considerar el efecto del cambio climático anteriormente mencionado, concluyen que es necesario preservar más tierras de la explotación maderera, ya que hay nuevas zonas susceptibles de sufrir remociones en masa debido a los cambios climáticos previstos, y que algunas áreas actualmente consideradas adecuadas para la tala rasa estarán susceptibles a estos procesos en el futuro.

Casadei et al. (2003) estudiaron la generación de remociones en masa detonadas por precipitaciones en Oregon, Estados Unidos, determinando que la resistencia de

las raíces en los límites del suelo a remover es un control primario en el tamaño y ubicación de los deslizamientos en el manto de suelo de las laderas, actuando como un delimitador de perímetro del deslizamiento. Proponen que las zonas de inestabilidad son generadas por irregularidades locales en la resistencia de las raíces y la saturación del suelo. A su vez, estas irregularidades corresponden a heterogeneidades espaciales en cuanto a las propiedades del material del suelo, las cuales en conjunto con la evolución de la presión de poros controlan el tamaño del deslizamiento. Así, el espesor del suelo, ángulo de fricción interno, densidad total y la resistencia de las raíces varían en una misma ladera, creando distintas zonas irregulares con distintas resistencias y, por lo tanto, variando el grado de saturación del suelo necesitado para generar el deslizamiento en cada zona irregular. Dicho esto, las áreas con mayor susceptibilidad de generación de deslizamientos serán aquellos con suelos de alto espesor y una baja concentración de vegetación, como es observado en la Figura 28, donde los intervalos o espacios vacíos dentro del bosque son generados principalmente por incendios y tala rasa. En un escenario sin lluvias (Figura 28 A), el tamaño de la zona inestable determinada para la zona de baja resistencia de raíces es mayor que el tamaño de la zona de suelo descubierta, por lo que no se generan deslizamientos, ya que la resistencia de las raíces es mucho mayor fuera de la zona descubierta, previendo escenarios inestables. resistencia otorgada por las raíces. Sin embargo, en el escenario con lluvia (Figura 28 A-B-C) la presión de poros aumenta, y el tamaño de la zona inestable comienza a delimitarse hasta que concuerda con el perímetro limitado por la zona de baja resistencia de las raíces (Figura 28 D).

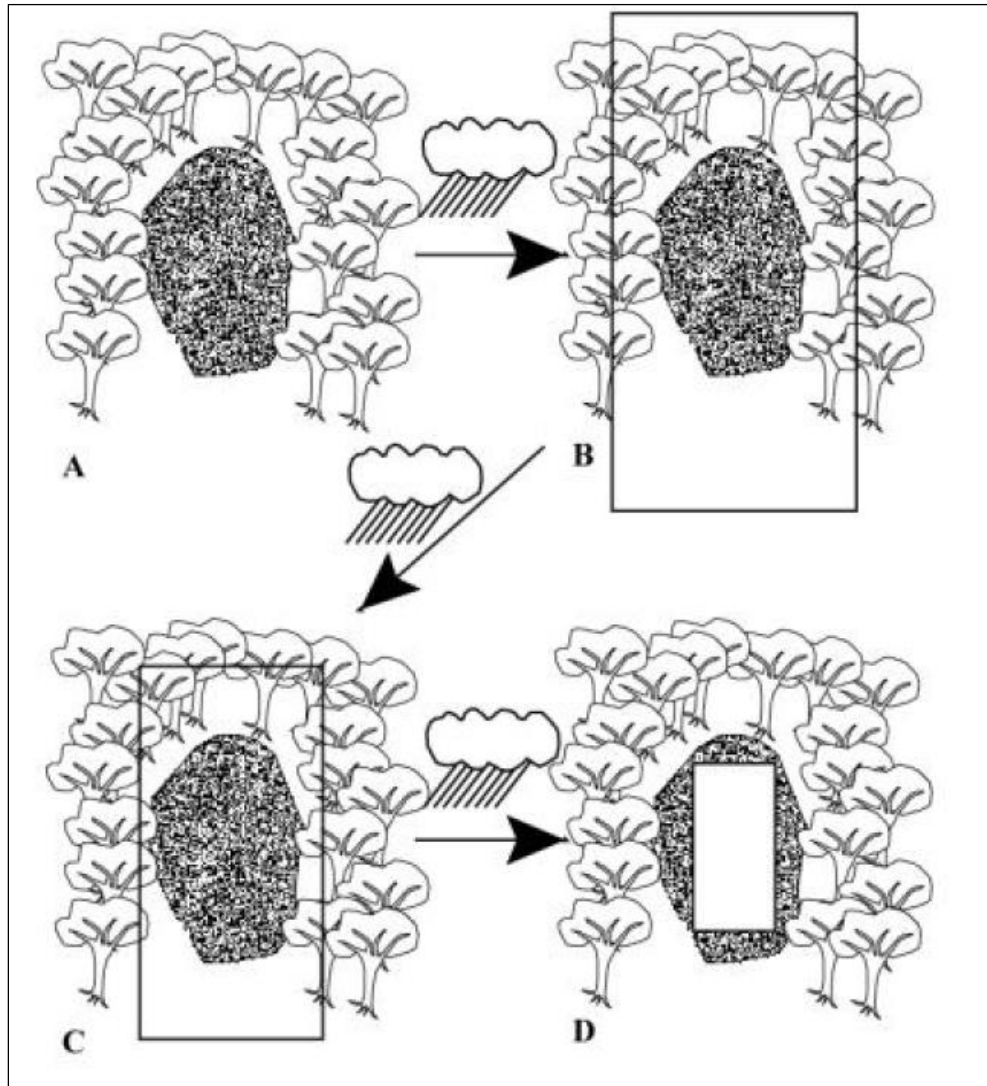


Figura 28. Mecanismo de generación de deslizamientos en espacios vacíos sin vegetación. En (A), el suelo está seco, y el tamaño crítico del deslizamiento (rectángulo) es mayor que la zona de suelo descubierta. En estas condiciones la zona no puede fallar ya que recibe la contribución de la resistencia de las raíces de los árboles que delimitan la zona descubierta. Al progresar la lluvia (B y C), el nivel freático sube y el tamaño requerido para el fallamiento disminuye al punto que se vuelve menor que la zona descubierta (D), generando el deslizamiento (Casadei et al. (2003)).

Derose et al. (1993) estudiaron la pérdida de suelos posterior a la deforestación en laderas en Taranaki, Nueva Zelanda, donde identificaron que la principal forma de erosión corresponde a los procesos de remoción en masa. Mediante el estudio y

comparación de las profundidades e inclinación de laderas de los regolitos de distintas cuencas donde la cobertura vegetal ha sido removida en distintos períodos de tiempo (10 a 85 años), determinaron que la disminución del regolito posterior a la deforestación, en laderas superiores a 32° de pendiente, es aproximadamente entre 2 a 4 veces en comparación a las tasas de erosión natural, mientras que para aquellas entre 28 y 32°, las tasas pueden ser aún mayor. Además, analizaron el efecto de las tormentas de alta intensidad (Ciclón Hilda), concluyendo que un solo evento de alta intensidad y muy baja recurrencia puede tener el mismo efecto geomorfológico que la sumatoria de muchas tormentas pequeñas y frecuentes, y que proporcionalmente más deslizamientos ocurrieron en zonas deforestadas hace 10 años en comparación a las de 85 años, ya que estas últimas habían sufrido múltiples eventos previos de erosión que removió gran parte del regolito más profundo.

Dhakal and Sidle (2003) modelaron los efectos a largo plazo para distintas prácticas de manejo forestal en la generación de procesos de remoción en masa en Columbia Británica, Canadá, determinando que los deslizamientos modelados se concentraban en un período de tiempo entre 5 a 17 años posterior a la cosecha. En cuanto a la tala rasa, este método de cosecha estaría relacionado con un mayor número de deslizamientos en comparación a otros métodos, generando las condiciones más inestables producto del decaimiento de la resistencia de las raíces luego de la cosecha. Los efectos acumulativos de ciclos de cosecha repetitivos progresivamente disminuyen la estabilidad de las laderas cuando los períodos de rotación son acortados, ya que el veloz decaimiento de la resistencia de las raíces junto al lento crecimiento de vegetación disminuye la resistencia neta del enraizamiento a lo largo

de varias rotaciones siempre que el tiempo entre cosechas sea más corto que el tiempo necesario para que el rebrote de las raíces logre el nivel de estabilidad. Además, un mismo número de deslizamientos fueron modelados en escenarios distintos, tanto para el 100% de la vegetación cosechada como sólo el 20% cosechada sucesivamente en intervalos de sólo 10 años, indicando la importancia de combinar el incremento del tiempo antes de la rotación de cultivos y distintas prácticas de manejo a la tala rasa para minimizar la ocurrencia de deslizamientos.

En el reporte del seminario sobre los efectos del uso de suelo forestal en la erosión y estabilidad de taludes de Sidle et al. (1985) se mencionan diversos estudios respecto a los efectos de la tala rasa, por mencionar los resultados de algunos: a) mediante la aplicación de un modelo de pendiente infinita en cuatro tipos distintos de pendientes, determinaron que la presencia o ausencia de un subsuelo discreto y la distribución de las raíces de los árboles son los principales determinantes en cuanto si los suelos de pendientes recientemente deforestadas son propensos a fallar, b) los suelos graníticos con un subsuelo discretamente impermeable son los más susceptibles a fallar, y que la resistencia lateral que otorgan las raíces pareciera ser mayor que la influencia en la estabilidad de raíces verticales, y c) si bien la importancia de las raíces de los árboles es menos importante que la presencia de agua para la estabilidad de taludes, los resultados indican que deslizamientos ocurridos en zonas de tala rasa se desplazan en mayores distancias y causan mayores daños que aquellos generados en bosques intactos.

Forbes et al. (2013) estudian el rol de los árboles y bosques en la prevención de deslizamientos y la rehabilitación de áreas afectadas por éstos en Asia. Indican que, de los distintos tipos de vegetación, los árboles y bosques en general tienen el mayor efecto beneficioso en la mitigación y prevención de deslizamientos detonados por precipitaciones, al reforzar el manto de suelo y mejorar la capacidad de drenaje de éste. Es por esto por lo que los cambios en los usos de suelo provocado por la actividad antrópica generan efectos negativos, ya que, al deforestar las laderas, procesos como la deshumidificación del suelo a través de la evapotranspiración de los árboles la cual disminuye considerablemente las tasas de reptación en las estaciones lluviosas, disminuyen considerablemente sus efectos en dar estabilidad a las laderas. Además, los árboles juegan un rol importante en el bloqueo y ralentización de los bloques de los flujos de detritos y caídas de roca, al formar una barrera física que es capaz de detenerlos. Respecto a la eliminación de la cobertura vegetal en laderas, los autores indican que la susceptibilidad de generación de deslizamientos aumenta a la vez que disminuye la resistencia otorgada por las raíces en periodos de hasta 20 años. El decaimiento de las raíces comienza alrededor de los 3 años posterior a la tala rasa, manteniendo una alta susceptibilidad hasta que las raíces están lo suficientemente maduras.

Furbish and Rice (1983) estudian la zona forestal en las montañas al noroeste de California, Estados Unidos, determinando que, producto de la pérdida de la resistencia del suelo o regolito como resultado del decaimiento de las raíces, la generación de deslizamientos y flujos de detrito son frecuentes posterior a la tala rasa de estas colinas, y que estas remociones en masa son más probables de ocurrir

cerca de cursos de agua activamente erosivos, justo debajo cambios bruscos de pendientes.

Imaizumi et al. (2008) analizan los efectos de la cosecha forestal en la ocurrencia de deslizamientos y flujos de detritos en zonas de alta pendiente en la zona central de Japón para un período entre los años 1964 y 2003. Determinaron que las tendencias de deslizamientos y flujos de detritos identificadas en el área corresponden a cambios en la estabilidad de la ladera explicados por el decaimiento y posterior recuperación de la resistencia otorgada por las raíces, donde el impacto directo de la tala rasa en la ocurrencia de deslizamientos fue mayor en suelos donde la tala rasa fue realizada desde 1 a 10 años atrás, con impactos menos significativos hasta 25 años posterior a la cosecha. Es importante mencionar que las tasas de suministro de sedimentos de aquellos deslizamientos generados en suelos con tala rasa menores a 10 años son alrededor de 10 veces mayor que en zonas no deforestadas.

Jakob (2000) estudia el impacto de la tala rasa en la actividad de los deslizamientos en Columbia Británica, Canadá. Se estudiaron un total de 1004 deslizamientos, determinando que la frecuencia de deslizamientos en terrenos que han sufrido tala rasa es 9 veces mayor que en áreas no intervenidas, y que el área afectada por deslizamientos es 8 veces mayor en áreas con tala rasa. En cuanto a la generación de los procesos de remoción en masa, el autor menciona que el fallamiento del terreno en zonas con tala rasa ocurre en rangos de pendientes entre 30 y 40°, en comparación al fallamiento en terrenos no intervenidos donde la inestabilidad

comienza al superar los 35° (más del 50% de los deslizamientos en los terrenos no intervenidos ocurren en pendientes mayores a 40°).

Marden and Rowan (1993) analizan el valor de la protección de 6 tipos de vegetación en terrenos del Terciario antes y después del Ciclón Bola, en Nueva Zelanda. Así, determinan que los árboles nativos y plantaciones de pinos exóticos mayores a 8 años entregaron la mejor protección frente a la formación de deslizamientos detonados por lluvias., siendo 4 veces menos susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos en comparación a los pinos entre 6 y 8 años de edad, y 16 veces menos susceptible que las zonas deforestadas para pastoreo y pinos jóvenes (menores a 6 años) Aquella vegetación entre 6 y 8 años entrega un valor intermedio de protección, mientras que el mayor daño ocurre en zonas de pastoreo (zonas deforestadas) y con pinos menores a 6 años, donde el desarrollo de las raíces es limitado.

Rab (2004) estudia la recuperación de las propiedades físicas del suelo de la compactación y disturbios en el perfil del suelo en la cosecha de bosque nativo en Australia, demostrando que esta recuperación es muy lenta. Después de 10 años a la cosecha, la densidad del suelo es considerablemente mayor y el contenido de materia orgánica y macroporosidad considerablemente menor en comparación a suelos no intervenidos. El hecho de que disminuya la macroporosidad lleva consigo modificaciones en la conductividad hidráulica, disminuyendo los niveles límites para la saturación y favoreciendo la generación de escorrentía a menores cantidades de precipitación y, por lo tanto, de posibles deslizamientos.

Reid and Keppeler (2012) investigan la generación de remociones en masa posteriores a la tala rasa en California. Al comparar las zonas cosechadas con zonas forestadas, determinaron que la zona de incidencia (desplazamiento del deslizamiento medido como m^3/km^2) de deslizamientos generados en terrenos cosechados con tala rasa está a uno y dos órdenes de magnitud mayor que en zonas no intervenidas. Es más, la tasa de volumen de deslizamiento en carreteras en zonas cosechadas es más de 3 veces que aquellas zonas forestadas. En cuanto al tiempo posterior a la cosecha, los deslizamientos más grandes ocurrieron 9 a 14 años después de la tala, cuando la cohesión otorgada por las raíces alcanza valores mínimos.

Saito et al. (2017) estudian el efecto de la tala rasa en la ocurrencia de deslizamientos, analizando los umbrales de precipitación necesarios para detonar estos procesos, en el monte Ichifusa, Japón, conformado por rocas y suelos graníticos. Mediante la interpretación de imágenes aéreas desde el año 1960 en conjunto con los eventos de precipitación en este mismo rango, determinaron que una gran cantidad de deslizamientos ocurrieron luego de la tala rasa, en pendientes abruptas y suaves, y solo unos pocos fueron identificados en áreas forestadas. En cuanto a los umbrales de intensidad y duración de las precipitaciones, en áreas con tala rasa este umbral disminuyó a la mitad de aquellas forestadas. Como consecuencia, los períodos de retorno de estos umbrales también disminuyeron en 1 año para eventos menores a 12 horas de duración, y hasta 3 años para eventos de 72 horas de duración en zonas con tala rasa.

Schmidt et al. (2001) analizan la variabilidad en la cohesión de las raíces como influencia en la susceptibilidad de deslizamientos detonados por lluvia en Oregon, Estados Unidos. Al estimar el reforzamiento cohesivo del suelo entregado por las raíces mediante la determinación de la resistencia a la tracción, especies, profundidad, orientación, salud, y densidad de las raíces, encontraron que la cohesión lateral otorgada por las raíces para suelos forestales puede ser hasta casi 5 veces menor que aquella en suelos con bosques nativos. En cuanto a la tala rasa, los valores de esta cohesión obtenidos muestran que todos son menores a 10kPa. Es importante mencionar que bosques forestales de alrededor de 100 años, producto de la combinación de distintas especies nativas y exóticas, los valores de cohesión más parecidos a zonas forestales posteriores a 10 años de tala rasa que a bosques nativos.

Swanson and Dyrness (1975) estudian el impacto de la tala rasa y construcción de carreteras en la erosión del suelo mediante remociones en masa para la zona de Oregon, Estados Unidos. Un total de 139 deslizamientos han sido identificados en el área de estudio, donde la ocurrencia en zonas de tala rasa es 2.8 veces de aquella en zonas forestadas. En cuanto a las carreteras, la erosión por deslizamiento ha sido 30 veces mayor en zonas de tala rasa que en zonas forestadas, aun cuando solo un 8% del total de la zona deforestada está junto a la carretera.

Teramoto and Shimokawa (2011) analizan como la reforestación en laderas forestales abandonadas, las cuales han sido cosechadas por tala rasa y que son propensas a sufrir deslizamientos, afecta en la recuperación de la estabilidad de

éstas, en Kumamoto, Japón. Determinaron que, cuando las laderas sean inmediatamente reforestadas después de la tala rasa, la función preventiva aumenta con el tiempo y es totalmente restaurada después de 20 a 30 años, mientras que, en laderas abandonadas posterior a la tala rasa, esta función preventiva es restaurada después de 50 a 60 años producto de los lentos procesos de sucesión vegetal.

Estudios del CIREN (2010) indican que cerca del 32% de la superficie Región del Bío-Bío presenta algún grado de erosión, con una parte significativa de ésta degradada por la influencia antrópica. Los niveles de erosión severa y muy severa representan sólo el 10% del total de erosión de la región, lo que es explicado por el aumento de la cobertura boscosa, la cual cumple el rol de proteger el suelo contra la erosión pluvial. Si bien la cobertura vegetal protege al suelo de los agentes erosivos, la mayoría corresponde a plantaciones silvícolas las cuales serán cosechadas en algún momento, exponiendo a estos suelos directamente a procesos erosivos de alto impacto. También existen superficies categorizadas como erosión no aparente, donde existe una cobertura vegetal que cubre sobre el 75% de la zona, las cuales, si bien presentan algún proceso de erosión, estos están siendo frenados y/o mitigados mediante la aplicación de un programa de recuperación de suelos. En cuanto a los agentes aceleradores de erosión hídrica (lo que incluye procesos de remoción en masa) se identifica la deforestación mediante la tala de bosques para su cosecha, cambios de usos de suelo a agrícola, quema e incendios forestales.

5. METODOLOGÍA

Para la realización de este estudio, la metodología utilizada para la obtención de datos y levantamiento de información está compuesta por la combinación y complementación de: 1) estudio preliminar de gabinete correspondiente al área de estudio, 2) levantamiento de información en terreno: análisis in-situ y toma de muestras de suelos, catastro de remociones en masa y zonas con evidencia de inestabilidad y erosión, recopilación de información geológica y registros históricos de precipitaciones, 3) fotointerpretación y procesos de teledetección de imágenes satelitales e imágenes obtenidas por vehículo aéreo no tripulado, y 4) simulación de remociones en masa detonadas por lluvias mediante el software STEP-TRAMM, el cual requiere como información de entrada la elevación, patrón de vegetación (cobertura forestal), clase de textura del suelo y lluvia previamente obtenida, con posterior validación en terreno y fotointerpretación.

El diagrama de flujo de la metodología se muestra en la Figura 29, la cual se divide en 3 etapas: la primera corresponde al estudio preliminar de gabinete, principalmente mediante análisis bibliográfico, para establecer el área de estudio, sus características y la metodología de trabajo para lograr los objetivos propuestos, la segunda a la combinación de la etapa de terreno, recopilación de información geológica y pluvial y el posterior análisis de fotointerpretación y teledetección de la zona estudiada, para finalmente, en la tercera etapa, generar las simulaciones de las remociones en masa según la información y datos recopilados y la posterior validación, tanto en terreno como mediante fotointerpretación.

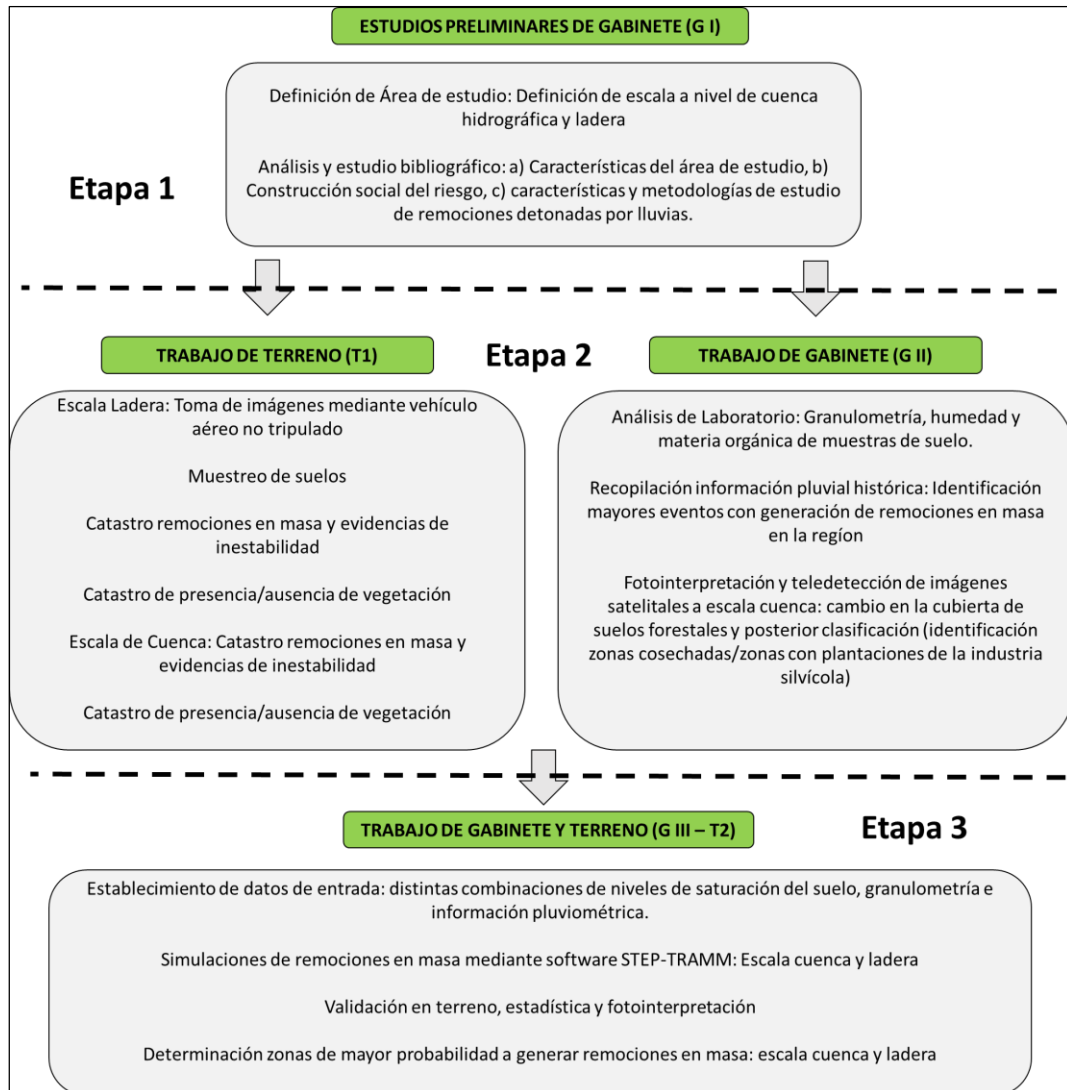


Figura 29. Metodología del estudio. Elaboración propia.

A continuación, se describirán las etapas definidas en este estudio.

5.1. Etapa 1

5.1.1. Estudios Preliminares de Gabinete (G I)

La recopilación de antecedentes, estudios previos y bibliográfico es la primera etapa realizarse al inicio de un proyecto. En esta primera etapa, se delimita el área de estudio con los puntos de interés preliminares, se recopila la información, antecedentes y estudios previos que comprendan el área de estudio mediante la revisión bibliográfica, prensa, fotografías aéreas y satelitales, mapas y cartografías geológicas.

En la Tabla 6 se presenta la información recopilada en esta etapa y las principales herramientas a utilizar para lograr este objetivo. Es importante mencionar que, la información recopilada en esta etapa será posteriormente complementada y corroborada en las etapas posteriores a realizar.

Como puntos importantes a considerar, en esta etapa se define la escala de trabajo, el software a utilizar para las modelaciones de remociones en masa que más se adapte a las condiciones y características de la zona, recopilación de antecedentes de remociones en masa pasadas, como también un estudio y análisis de la construcción social del riesgo de la población que habita en el área delimitada, considerando factores como la evolución histórica del área urbana expuesta, las leyes de la industria silvícola y sus actividades en el área, las delimitaciones de los planes reguladores comunales y metropolitanos, y el análisis de la zona denominada como interfaz urbano-forestal, obtenida como resultado de la combinación de los

factores anteriores mencionados y su relación con la generación de procesos de remociones en masa.

Tabla 6: Estudios preliminares de Gabinete (G I).

Factor de estudio	Especificaciones	Herramientas y Materiales
Delimitación geográfica del área y escala de estudio: cuenca hidrográfica y ladera.	Delimitación geográfica de cuenca hidrográfica Definición escala: cuenca hidrográfica y ladera específica a estudiar.	Modelo de Elevación Digital, MINVU, 2013, resolución 5 m. Modelo de Elevación Digital, Alos Palsar, resolución 12.5 m. Imágenes Satelitales: Google Earth, Landsat-8.
Recopilación de antecedentes históricos de remociones en masa	Catastro de eventos de remociones en masa anteriores gatillados por precipitaciones intensas históricas: escala metropolitana y escala de cuenca hidrográfica. Distribución espacial de eventos anteriores.	Revisión bibliográfica: publicaciones, artículos, memorias de título, reportes técnicos. Revisión de artículos de prensa: noticias, columnas, registro audiovisual.
Características del área de estudio: Principales Factores Condicionantes de generación de procesos de remoción en masa en el área estudiada.	Geología: Litología, alteración, meteorización y estructuras geológicas. Geotecnia: Datos de granulometría de suelos, permeabilidad y cohesión. Vegetación: Tipos de vegetación, edad (para las plantaciones de <i>Pinus radiata</i>), y distribución espacial a escala de cuenca hidrográfica y de ladera. Determinación de fechas de rotaciones forestales, para identificar áreas que hayan sido cosechadas mediante tala rasa.	Cartas geológicas y geambiental. Revisión bibliográfica: artículos, publicaciones, memorias de título, reportes técnicos. Carta de Series de Suelo VIII Región, carta geoambiental, Concepción, Región del Bío-Bío. Fotografías aéreas: MINVU 2013. Imágenes Satelitales: Google Earth y Landsat-8. Revisión bibliográfica.

Factor de estudio	Especificaciones	Herramientas y Materiales
Características del área de estudio: Factores que contribuyen a la construcción del riesgo	<p>Procesos de Peri-urbanización: ocupación progresiva de suelos para urbanización en áreas de alta exposición a amenazas naturales.</p> <p>Análisis de los Instrumentos de Ordenamiento Territorial y Normativa de Usos de Suelo: modificaciones del límite histórico delimitado hacia nuevas configuraciones de núcleos urbanos fragmentados, ubicados en zonas de riesgo a fenómenos naturales, y las plantaciones de la industria silvícola en zonas de protección natural.</p> <p>Modelo Forestal y Generación de la Interfaz Urbano-Forestal: impacto de la aplicación del Decreto 701 en la generación de la Interfaz Urbano-Forestal (zona en la que el terreno forestal entra en contacto e interactúa con zonas urbanas) y sus consecuencias en la exposición a procesos de remociones en masa.</p>	<p>Revisión bibliográfica</p> <p>Imágenes Satelitales: Google Earth y Landsat-8.</p> <p>Revisión bibliográfica</p> <p>Plan Regulador Comunal Concepción (PRCC)</p> <p>Plan Regulador Metropolitano de Concepción (PRMC)</p> <p>Informes de Evaluación Ambiental (PRCC Y PRMC)</p> <p>Revisión Bibliográfica DL 701</p>
Metodologías de estudio de generación de procesos de remoción en masa	Estudio de metodologías y selección de aquella que permitiera abordar de manera correcta la hipótesis planteada, y que integrara de mejor manera los principales factores condicionantes previamente identificados	Revisión Bibliográfica Reportes, memorias de título.

5.2. Etapa 2

Esta etapa tiene como fin la confección de una base de datos para las escalas de trabajo definidas, que integren la revisión previa de antecedentes junto a la

complementación y actualización de éstos mediante la información recopilada en terreno, los análisis de laboratorio y registros pluviométricos históricos, los cuales serán posteriormente utilizados en la etapa 3, como también establecer, mediante las herramientas de teledetección y fotointerpretación, el cambio en distintos años de las coberturas de suelo en el área, que evidencian las deforestaciones producto de la cosecha de especies exóticas, las cuales fueron preliminarmente identificadas a través de la fotointerpretación en distintos períodos de tiempo en la etapa 1.

5.2.1. Trabajo de Terreno (T1)

El trabajo de terreno está enfocado en dos escalas: a) a escala de cuenca hidrográfica, donde se realizó un catastro de remociones en masa en la zona y de las coberturas de suelos actuales, el cual es posteriormente complementado por fotointerpretación y teledetección mediante el uso de imágenes satelitales, y b) a escala de ladera, donde fue escogida en específico aquella que tuviese un uso de suelo de plantaciones forestales con deforestación reciente y cercana a zonas pobladas.

Los trabajos de terreno realizados para las dos escalas previamente definidas son indicados en la Tabla 7. A continuación, se describirán en detalle el trabajo realizado en ambas escalas:

Tabla 7. Trabajos realizados en la fase de terreno 1.

Escala de trabajo definida	Trabajos realizados en terreno
Cuenca hidrográfica – Ladera recientemente deforestada	<p>Mapeo geológico básico: descripción de roca, distribución espacial, grado de meteorización, alteración, descripción visual de suelos (identificación de suelo residual), identificación de tipos de remociones en masa</p> <p>Catastro de procesos de remociones en masa y zonas con evidencias de inestabilidad (complementado posteriormente con fotointerpretación) cada 3 meses, por 1 año.</p> <p>Identificación de coberturas de suelo: zonas con presencia de vegetación y zonas deforestadas (complementado posteriormente con fotointerpretación y teledetección).</p> <p>Caracterización de usos de suelos forestales con plantaciones exóticas para su cosecha o ya cosechadas: zonas deforestadas, con plantaciones juveniles (recientemente deforestadas y reforestadas) y adultas (complementado posteriormente con fotointerpretación y teledetección).</p>
Sólo para ladera seleccionada recientemente deforestada	<p>Demarcación y Levantamiento de Puntos de Control con equipo GNSS RTK y posterior Vuelo Fotogramétrico con vehículo aéreo no tripulado, precisión centimétrica, cada 3 meses, por 1 año.</p> <p>Caracterización de suelos en terreno y toma de muestras para posterior análisis.</p> <p>Caracterización de vegetación presente.</p> <p>Identificación de depósitos antrópicos.</p>

a) Escala de cuenca hidrográfica

- Mapeo geológico básico: Se realiza una descripción básica de las rocas presentes, su distribución espacial, el grado de meteorización y alteración, como también una descripción visual de los suelos, y la identificación de éstos. También se clasifican, según su tipo, las remociones en masa identificadas.

- Catastro de remociones en masa: Se identifican todas las remociones en masa observadas en terreno, como también cualquier indicio o evidencia de inestabilidad o movimiento reciente. Elementos como escarpes, zonas descubiertas de vegetación con claro indicio de movimiento reciente, grietas, reptación, son algunas evidencias de movimiento e inestabilidad.
- Identificación de coberturas de suelo: Debido a que las zonas dentro del área de estudio que son más susceptibles a sufrir procesos de remociones en masa corresponden en su mayoría a los cerros que rodean la zona urbana, los cuales están cubiertos en gran medida por plantaciones forestales de la industria silvícola, la identificación se enfoca en caracterizar la cobertura de suelo actual según la presencia o ausencia de vegetación, así como en diferenciar la vegetación nativa de la exótica. Posteriormente esta identificación es complementada con procesos de fotointerpretación y teledetección.
- Caracterización de usos de suelos forestales: Las coberturas de suelos con usos asignados a la industria silvícola para plantaciones exóticas, las cuales hayan sido cosechadas recientemente (deforestación notoria), reforestadas (vegetación juvenil) y en su fase adulta son caracterizadas según la información requerida para aplicar las modelaciones según la metodología a seguir. Para efectos de este estudio, aquellos suelos que presenten deforestación reciente o que hayan sido replantados en un período menor a 10 años son caracterizados como usos de suelo forestal con ausencia cobertura forestal, mientras que aquellas con

plantaciones de edad mayor a 10 años son caracterizados como usos de suelo forestal con presencia de cobertura forestal.

b) Escala de ladera seleccionada (trabajos realizados en cuenca hidrográfica también son realizados a escala de ladera)

- Levantamiento fotogramétrico con vehículo aéreo no tripulado: De manera de analizar y estudiar manera detallada una ladera recientemente deforestada, es que se realiza un levantamiento fotogramétrico de alta precisión, aproximadamente de 5 cm. Para esto, primero se debe realizar una demarcación y levantamiento de puntos de control con un equipo GPS geodésico de uso topográfico tipo GNSS RTK, donde estos puntos, los cuales están distribuidos a lo largo del área de interés, son medidos mediante este equipo, obteniendo así un modelo digital final de alta calidad, preciso y representativo de la realidad. El resultado final de este procedimiento consiste en diversos productos, siendo los principales a utilizar la Ortofoto, Modelo Digital de Terreno y Modelo Digital de Superficie. Este trabajo de terreno es repetido 4 veces, con un rango de tiempo de cada 3 meses, durante un total de 1 año, de manera de poder detectar variaciones estacionales en la dinámica de la ladera.
- Caracterización de suelos y toma de muestras: Se realiza una caracterización de los suelos desde el punto superior de la ladera hasta su base. Si bien en este estudio, todos los suelos presentes corresponden a suelos residuales de rocas graníticas, la caracterización en distintos puntos permite analizar e identificar las

diferencias granulométricas de éstos. Las propiedades geotécnicas determinadas en terreno corresponden a la clasificación USCS, donde se ve la plasticidad, densidad, compacidad, permeabilidad y humedad. Corresponden a estimaciones obtenidas mediante la observación y descripción visual, y son clasificados, excepto por la granulometría, en alto medio o bajo (Figura 30).

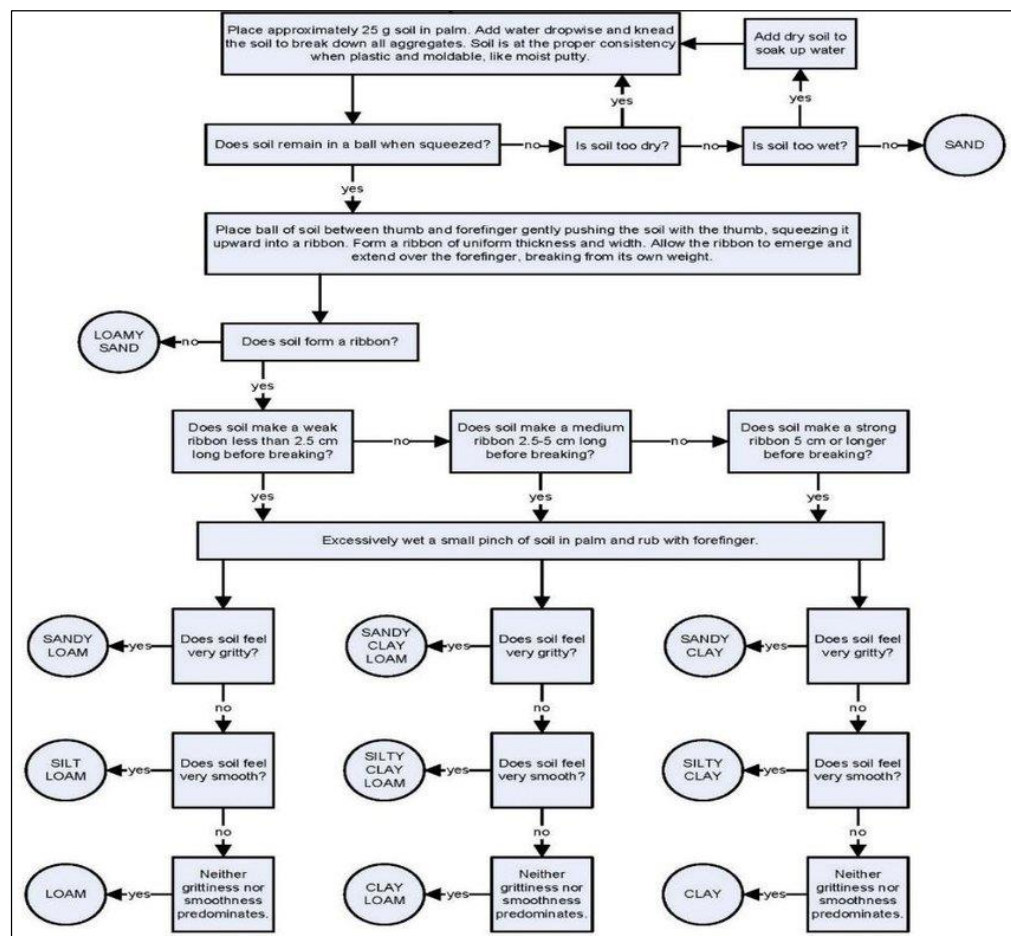


Figura 30. Diagrama de flujo de determinación de textura en terreno. Plasticidad relacionada con cantidad de limo o arcilla (Thien, 1979).

La distribución granulométrica corresponde a la distribución en tamaño de las partículas que componen el suelo. Para las estimaciones de plasticidad se realizan ensayos en terreno que permiten caracterizar a suelos limosos, de baja plasticidad, y arcillosos, de alta plasticidad. Derivado de estos ensayos, la permeabilidad se asocia a la mayor o menos proporción de finos en el suelo donde, a menor cantidad de finos, más permeable es.

Esta caracterización en terreno es complementada por la toma de muestras de suelo, donde se analiza en detalle la distribución granulométrica, pudiendo obtener como resultados derivados información sobre permeabilidad, plasticidad, humedad y densidad.

- Caracterización de vegetación: Se identifican las zonas en la ladera con presencia y ausencia de vegetación. También se evalúa visualmente la separación entre los árboles existentes y/o de troncos de árboles talados, de manera de realizar una primera aproximación de qué zonas pudieran presentar mayor o menor reforzamiento de la cohesión del suelo por efecto de las raíces entrelazadas. Esto permite tener un primer acercamiento a la dinámica existente entre el factor cohesivo de las raíces y la generación de procesos de remociones en masa, lo cual ayuda a identificar, en primera instancia, zonas en el área de estudio que sean más propensas a sufrir procesos de remociones en masa, lo cual es posteriormente observado en las modelaciones generadas, y a su vez, sirviendo de verificación de éstas.

- **Identificación de depósitos antrópicos:** Debido a que esta ladera posee un uso y cobertura de suelo de la industria silvícola, se realiza una identificación de depósitos originados de la actividad forestal, como botaderos de suelos con alta cantidad de desechos orgánicos, como ramas y troncos, los cuales pueden presentar indicios de inestabilidad, zonas erosionadas y degradadas por máquinas y vehículos de transporte de material, las cuales también son muy susceptibles a sufrir procesos de remociones en masa. Al igual que el punto anterior, si las modelaciones generadas arrojan estas zonas como áreas de generación de remociones en masa, identificarlas en terreno permite la verificación de estas modelaciones.

5.2.2. Trabajo de Gabinete (G II)

Esta etapa es desarrollada luego de haber realizado el primer trabajo de terreno. Como puntos principales, se tiene el análisis de laboratorio de las muestras de suelo tomadas en terreno, la recopilación de información pluvial histórica en la región, y la fotointerpretación y teledetección de imágenes satelitales de distintos años a escala de cuenca hidrográfica, de manera de identificar la evolución histórica de las zonas cosechadas y reforestadas. El objetivo de estos trabajos es generar la base de datos final que será utilizada en la etapa 3, mediante la actualización, análisis en detalle y complementación de los datos obtenidos en la etapa 1 y el trabajo de terreno. A continuación, se describirán en detalle cada una de las actividades realizadas:

- **Análisis de Laboratorio:** Las muestras de suelo residual más superficial recolectadas en terreno son llevadas a un laboratorio edafológico, calculando su

peso húmedo, peso en seco y cantidad de materia orgánica. Una vez obtenida la muestra seca, se determina la distribución granulométrica de cada muestra mediante tamizaje, midiendo el porcentaje en peso de cada tamiz, para luego clasificar los suelos según la clasificación de la USDA (*United States Department of Agriculture*). La determinación de clase textural del suelo (Figura 31) permite obtener valores aparentes de su densidad (Tabla 8) y permeabilidad (Figura 32), esta última asociada con la conductividad hidráulica, la cual es utilizada en el modelamiento de la etapa 3. Estos datos permiten calcular empíricamente el índice de erodabilidad (K) basado en la metodología de RUSLE (Panagos et al., 2014) con la finalidad de determinar qué tan vulnerable o susceptible es el suelo a ser erosionado, o, en otras palabras, que tan fácil es que sea transportado ante la presencia de fluidos.

Tabla 8. Densidad aparente según la clase textural del suelo (Zeri et al., 2018).

Texture Class	Bulk Density (g cm⁻³)
Sand	1.65
Loamy sand	1.6
Sandy loam	1.55
Loam	1.5
Sandy clay loam	1.5
Silty clay loam	1.5
Silty loam	1.5
Clay loam	1.45
Silty clay	1.45
Sandy clay	1.4
Clay	1.35

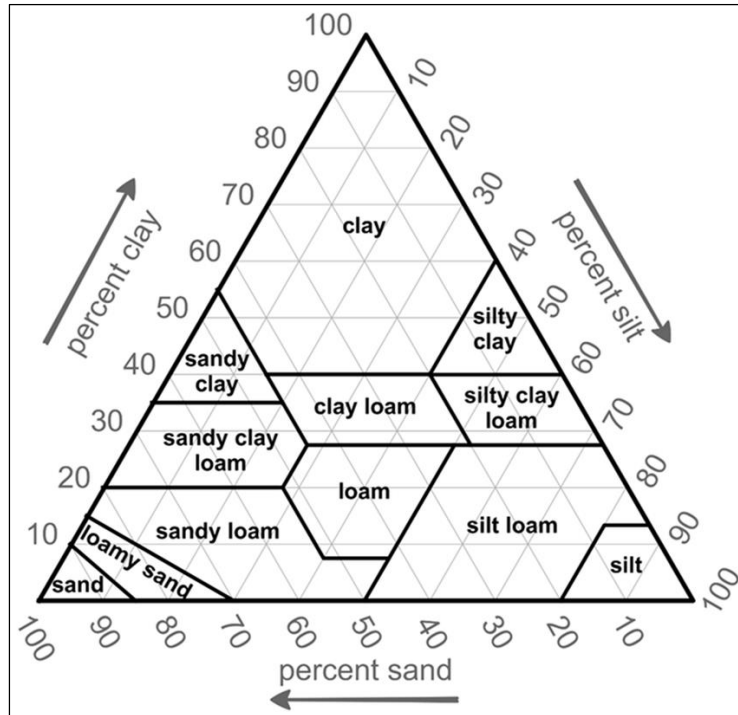


Figura 31. Diagrama triangular de clases texturales de suelo según el tamaño de las partículas (Groenendyk et al., 2015).

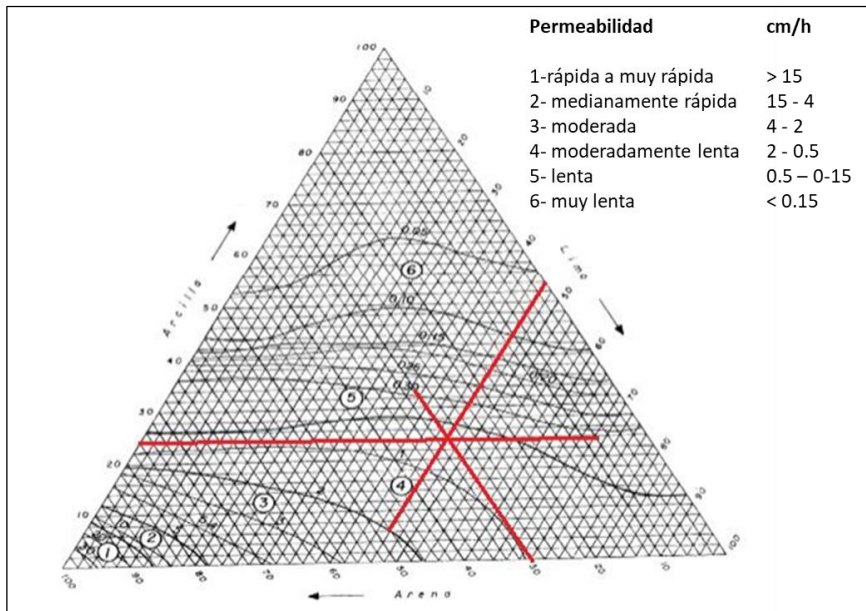


Figura 32. Relación entre clase textural y rango de permeabilidad (modificado de TRAGSA (1994)).

La ecuación empírica para determinar la erodabilidad está dada por:

$$K = [(2.1 \times 10^{-4} M^{1.14} (12 - OM) + 3.25(s - 2) + 2.5(p - 3)) / 100] * 0.1317$$

Donde M es el factor textural = (%limo + %arena muy fina)*(100-%arcilla), OM es la materia orgánica, la cual varía de 0 a 4 (suelos de deforestación poseen valores entre 1-2%), s es el código que representa la estructura de los agregados del suelo como se observa en la Tabla 9, y p es el código de permeabilidad según la clase textural de suelo (Figura 32). Así, los valores de K menor a 0.25 se consideran de baja erodabilidad, entre 0.25 y 0.4 moderada, y mayor a 0.4 de alta erodabilidad.

Tabla 9: Tipo de estructura de agregados del suelo y su código respectivo (Wischmeier et al., 1971)

Structure class (s)
1 (very fine granular: 1–2 mm)
2 (fine granular: 2–5 mm)
3 (medium or coarse granular: 5–10 mm)
4 (blocky, platy or massive: > 10 mm)

- **Recopilación de información pluvial histórica:** Se registran las fechas de ocurrencia de los eventos históricos de remociones en masa detonados por lluvias dentro del área de estudio y en las cercanías de ésta, previamente recopilados mediante reportes oficiales, informes y prensa local en etapas anteriores. Una vez identificada la fecha exacta de cada evento, el siguiente paso consiste en adquirir la información de los reportes meteorológicos en la base de datos de la Dirección General de Aguas. Primero, se analizan las precipitaciones mensuales a lo largo del año donde ocurrió el evento, para luego seleccionar el o los meses donde se generaron las remociones en masa en la zona, para ahora analizar las precipitaciones diarias durante estos meses (Figura 33). Este procedimiento se repite para todos los registros de precipitaciones que hayan generado procesos de remoción en masa, concentrándose en un período de acumulación máxima de 72 horas previas a los eventos identificados.
- **Fotointerpretación y teledetección temporal de imágenes satelitales a escala de cuenca:** En las etapas anteriores se había realizado la identificación y caracterización de coberturas de suelo según la presencia o ausencia de vegetación, y la caracterización de los usos de suelos forestales según el tiempo desde la última cosecha y reforestación. Tomando en cuenta estos registros, se realiza una fotointerpretación de las imágenes satelitales disponibles que abarcan la cuenca estudiada, siendo el período de análisis preliminar desde el año 2002 al 2021.

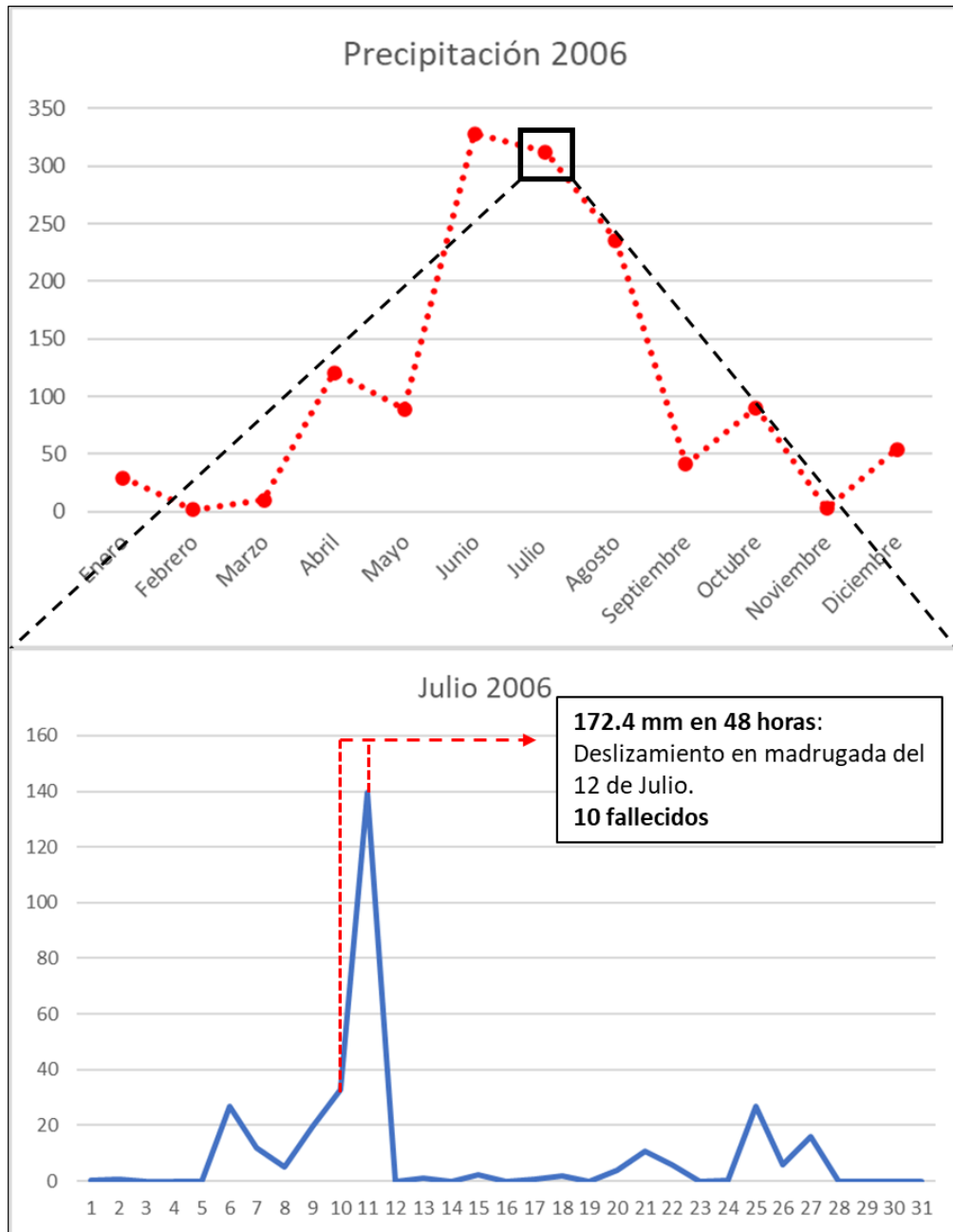


Figura 33. Ejemplo de recopilación de registros pluviométricos históricos, deslizamiento Julio 2006. Arriba: Acumulación mensual de precipitación año 2006. Abajo: Precipitación diaria 48 horas antes de la generación del deslizamiento.

Basado en diversos estudios, como el de Ekanayake and Phillips (1999) donde calculan que el factor de seguridad de laderas forestadas con *Pinus radiata* sufre un aumento considerable después de pasar 8 años desde su plantación, Forbes et al. (2013), e Imaizumi et al. (2008) que indican que la descomposición de las raíces que quedan de la tala rasa reduce considerablemente la resistencia que las raíces (cohesión) entregan al suelo en más de un 50% en los primeros 10 años, con efectos menos significativos hasta los 25 años, y Lehmann et al. (2019), donde establecen que la mayor cantidad de remociones en masa se producen en los primeros 1– 10 años después de la deforestación, con efectos menores posterior a los 10 años. Se establece un período de 20 años desde el proceso de deforestación y posterior reforestación, siendo los diez primeros años la ventana de mayor susceptibilidad de generación de remociones en masa, asumiendo como ausente la presencia de vegetación, ya que el efecto aumento de la resistencia por la cohesión de las raíces en el suelo es significativo después de este período (Figura 34).

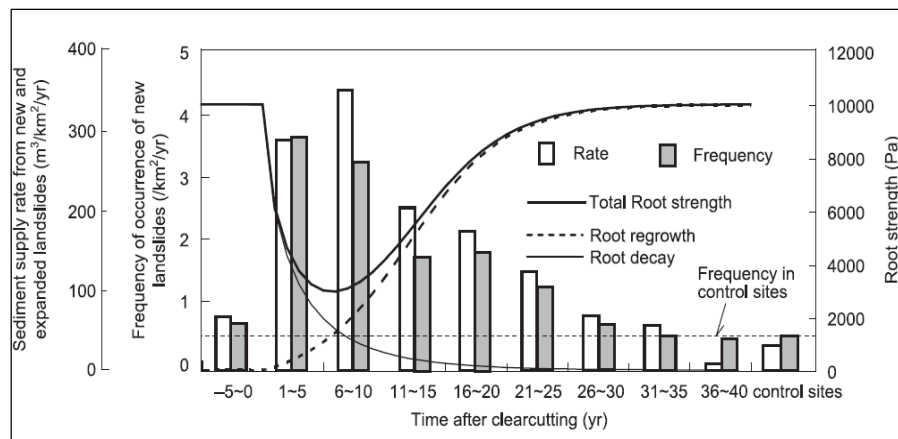


Figura 34. Evolución temporal de la frecuencia de la ocurrencia de remociones en masa posterior a la deforestación. Las tasas y frecuencias de remociones en masa son comparadas con valores de resistencia de las raíces. Notar que entre 5 y 10 años es donde existe la mayor frecuencia de remociones en masa y la menor resistencia de las raíces (Imaizumi et al. (2008)).

Debido a que el análisis por fotointerpretación de las imágenes satelitales disponibles muestra que en el 2002 ya existían laderas reforestadas, y que la primera de las cosechas ejecutadas dentro del período 2002-2022 es realizada recién en el 2016 (al menos 14 años de crecimiento de la vegetación), se decide realizar el estudio desde el año 2016 al 2022, ya que las laderas reforestadas en el 2002 ya han recuperado gran parte de la resistencia del suelo mediante la cohesión de raíces adultas (Figura 35).

Una vez identificadas todas las laderas deforestadas desde el 2016 al 2022, se obtienen las imágenes satelitales Landsat-8 de cada fecha de la deforestación. Estas imágenes están compuestas de 11 bandas de distintas longitudes de ondas, las cuales pueden ser combinadas de distintas formas para resaltar ciertas características que en el color real de la imagen no son posibles de observar. En este caso, se utiliza la combinación de bandas para identificar coberturas de suelo y masas de agua, donde las bandas 5, 6 y 4 se sitúan en el R (Rojo), G (Verde) y B (Azul). Esta técnica de teledetección permite realizar una clasificación del tipo supervisada, es decir, una clasificación que parte de un conocimiento previo del terreno estudiado, a partir del cual se seleccionan muestras representativas de cada categoría, realizando así una delimitación de las distintas coberturas de suelo.

De esta manera, se seleccionan las muestras para cada una de las categorías que permiten la delimitación de las zonas recientemente deforestadas, que posteriormente son agrupadas en una sola capa y caracterizadas como zonas sin vegetación. De la misma forma, las capas con presencia de vegetación son

delimitadas, ahora restando las zonas deforestadas del área de estudio, y excluyendo, para ambas capas, las zonas delimitadas en la clasificación supervisada como urbanas, ya que no son consideradas en el estudio como zonas susceptibles a los procesos de remoción en masa debido a su topografía plana (Figura 36).

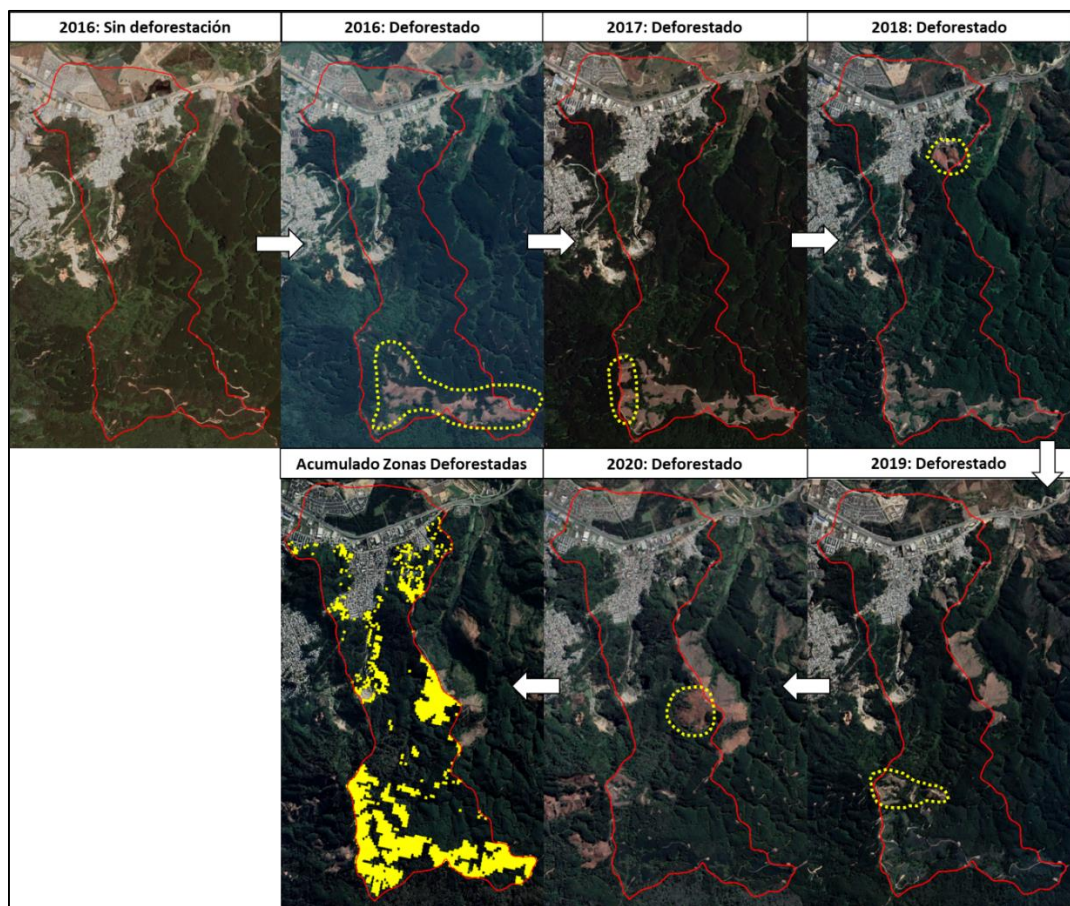


Figura 35. Identificación y delimitación de áreas recientemente deforestadas. La acumulación final de éstas es observada en la imagen de título "Acumulado Zonas Deforestadas" la cual incluye terrenos descubiertos por acción antrópica ajena a la industria silvícola.

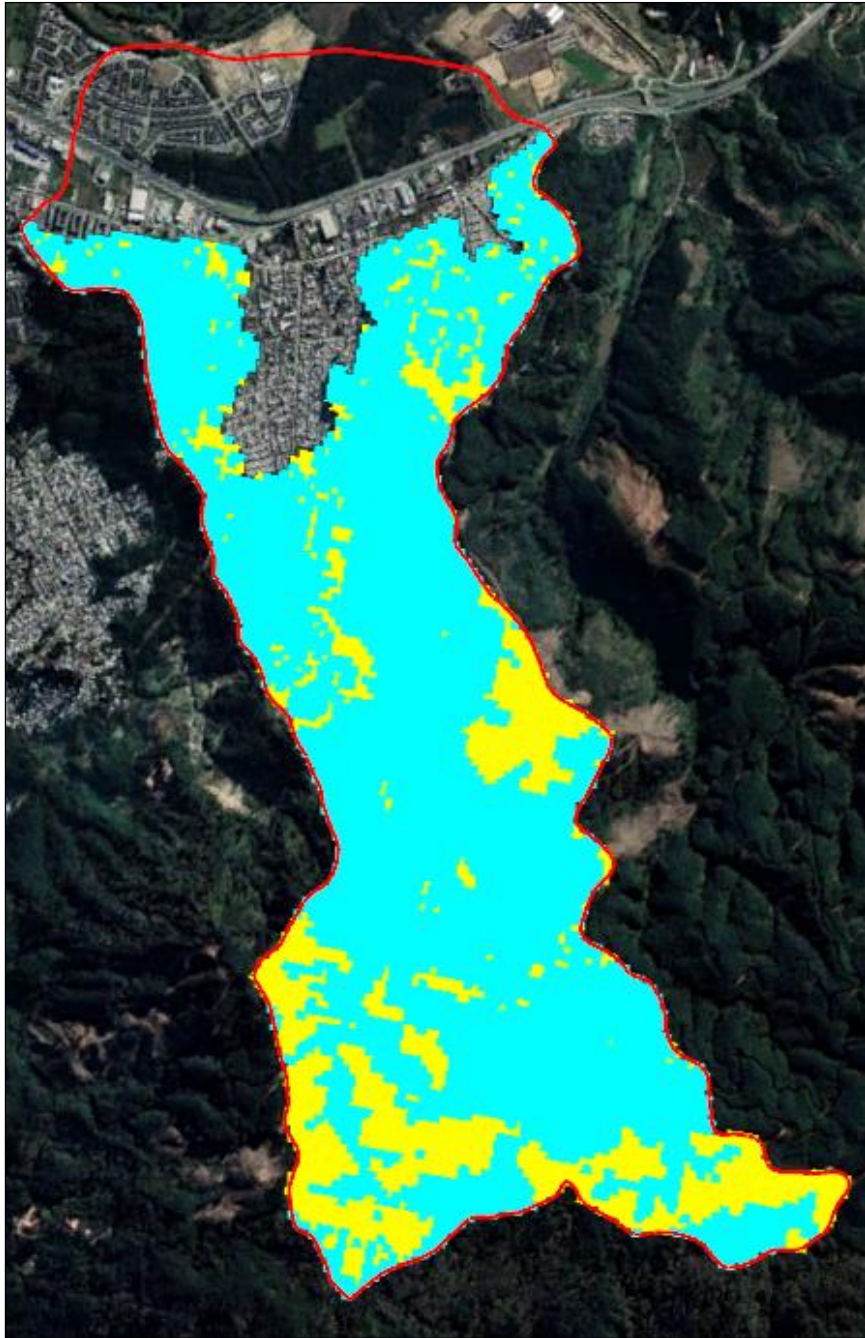


Figura 36. Delimitación de zonas deforestadas sin presencia de vegetación (amarillo) y zonas con presencia de vegetación (celeste). Zona urbana no es considerada.

5.3. Etapa 3

La etapa 3 corresponde a la última etapa de este trabajo, y está compuesta por una fase de trabajo de gabinete (G III) y una posterior fase de terreno (T2). Como objetivo se tiene el establecimiento final de los datos de entrada requeridos por el software STEP-TRAMM para la generación de las simulaciones, tanto para la escala de cuenca como de la ladera en específica estudiada. Como producto de estas simulaciones se obtienen las zonas de mayor probabilidad de generar remociones en masa gatillados por lluvias, posibles zonas de flujos de detritos y su alcance, gráficos temporales, donde se observa la generación de remociones en masa a medida que la precipitación es acumulada en un período de 72 horas, el volumen de la masa de suelo posiblemente desplazada.

Respecto a la fase de terreno T2, esta consistió en la identificación de depósitos de remociones en masa y/o evidencias de inestabilidad en terreno que se hayan generado posterior a la deforestación en distintos sectores de la cuenca, de forma de validar las simulaciones generadas. Esta validación es complementada con estudios estadísticos y, para zonas no accesibles, con fotointerpretación, cuando sea posible, de remociones en masa.

A continuación, se describirán las fases realizadas en esta etapa, incluida la descripción específica del software STEP-TRAMM.

5.3.1. Software STEP-TRAMM: Establecimientos de parámetros (G III)

El modelo STEP-TRAMM fue desarrollado para simular predictivamente la generación de remociones en masa gatilladas por lluvias intensas. La principal diferencia con otros modelos es que incorpora la progresión de fallas locales en una reacción en cadena, culminando en una remoción en masa posiblemente peligrosa. Como resultados del modelo, se calculan series temporales de remociones en masa y se proporcionan mapas de las zonas de generación y zonas dañadas. El modelo calcula las remociones en masa localizadas, las que pueden vincularse también a las predicciones de flujos de detritos y su zona de alcance (Figura 37), como también calcula la respuesta hidromecánica de una zona de captura (preferentemente de unos cuantos kilómetros cuadrados) frente evento de lluvia intensa (de varias horas o días).

von Ruetze et al., 2013 indican que el presente modelo está enfocado en aquellas remociones en masa detonadas por precipitaciones, las cuales pueden ocurrir sin precursores identificados, y podría abarcar una amplia área de masa de suelo liberada durante un evento desencadenante. Para poder simular estas remociones en masa, las superficies analizadas son representadas como un conjunto de columnas de suelos interconectadas mecánica e hidrológicamente. El fallo de cada columna está determinado por el modelo hidro-mecánico de desencadenamiento de remociones en masa a escala de cuenca (CHLT de Catchment-scale Hydromechanical Landslide-Triggering model), donde cada fallamiento está definido por umbrales de resistencia local para los enlaces mecánicos que unen el suelo con

la roca madre y columnas adyacentes, por lo que el fallo de un solo enlace puede iniciar una reacción en cadena de fallamientos subsecuentes, culminando en una remoción en masa local.

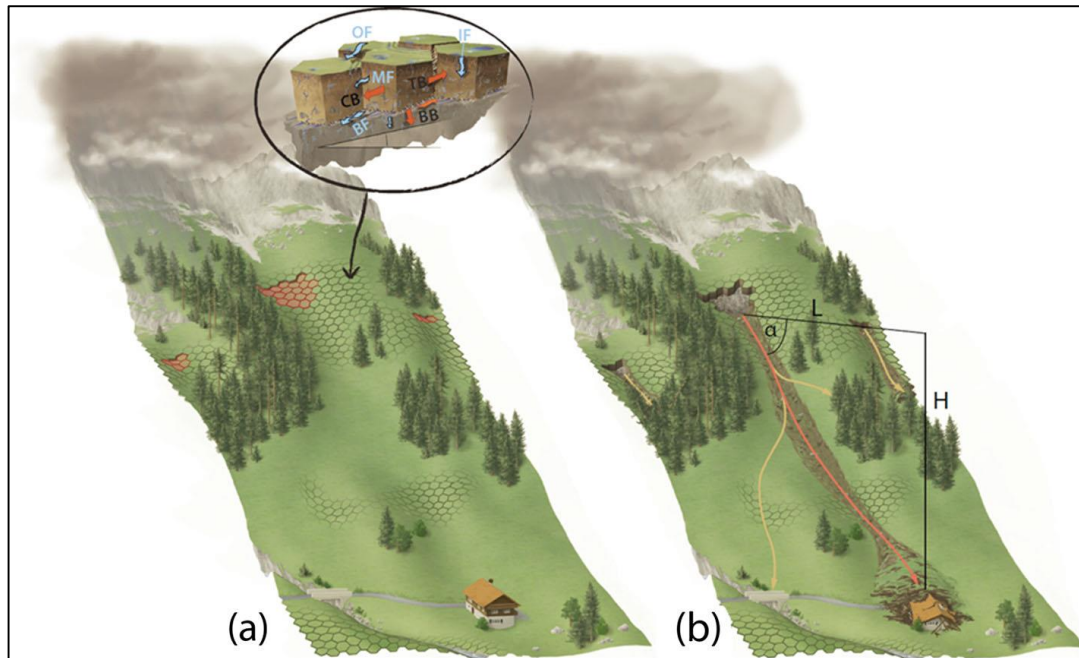


Figura 37. Relación entre el modelo de generación de remociones en masa con las predicciones del alcance de los flujos de detritos y sus rutas. a) Los deslizamientos gatillados por Lluvia son representados por los hexágonos café. b) Las remociones en masa en a) son posteriormente transportadas mediante el modelo de flujos de detritos a lo largo de la superficie topográfica irregular con distintas rutas potenciales de desplazamiento (líneas rojas y amarillas), caracterizadas por la distancia de alcance L y la diferencia de elevación H , definiendo así el ángulo de alcance α (von Ruetze et al., 2016).

El modelo CHLT permite la evaluación sistemática de los efectos del tipo de suelo, refuerzo mecánico (cohesión del suelo y resistencia de las raíces laterales) y contenido inicial de agua en el suelo (grado de saturación) en las características de las remociones en masa, proporcionando así un medio para identificar zonas locales

en posible alerta a la generación de estos procesos, ofreciendo además una visión dinámica de los riesgos de remociones en masa generadas en zonas montañosas.

5.3.1. Características Hidro-mecánicas

La infiltración del agua durante eventos de lluvias intensas debilita gradualmente la masa de suelo saturada, induciendo fallamientos localizadas que pueden iniciar una cascada de redistribuciones de carga y fallamientos sucesivos que se propagan a lo largo de la ladera. El presente modelo permite vincular los procesos hidrológicos claves con las interacciones mecánicas basadas en los umbrales de fallamiento (Lehmann & Or, 2012).

La ladera es representada por ensamblaje de columnas de suelo interconectadas por enlaces mecánicos friccionales y tensionales como un paquete virtual de fibras, conocido como *Fiber Bundle Model (FBM)*. De esta manera, el aumento de la carga de agua aplicada sobre los enlaces mecánicos causa un fallamiento gradual de estas fibras, hasta que las fuerzas restrictivas son excedidas. Seguido a este fallamiento en la interfaz suelo-roca, la carga de las columnas es redistribuida a sus vecinos a través de los enlaces mecánicos intactos (principalmente tensionales) que, a su vez, también pueden fallar y transmitir la carga ladera abajo como esfuerzos compresivos. Cuando la resistencia a la compresión interna del suelo es superada, una columna cargada puede sufrir licuefacción e iniciar una remoción en masa la cual puede propagarse ladera abajo o retrogresivamente ladera arriba (Figura 38).

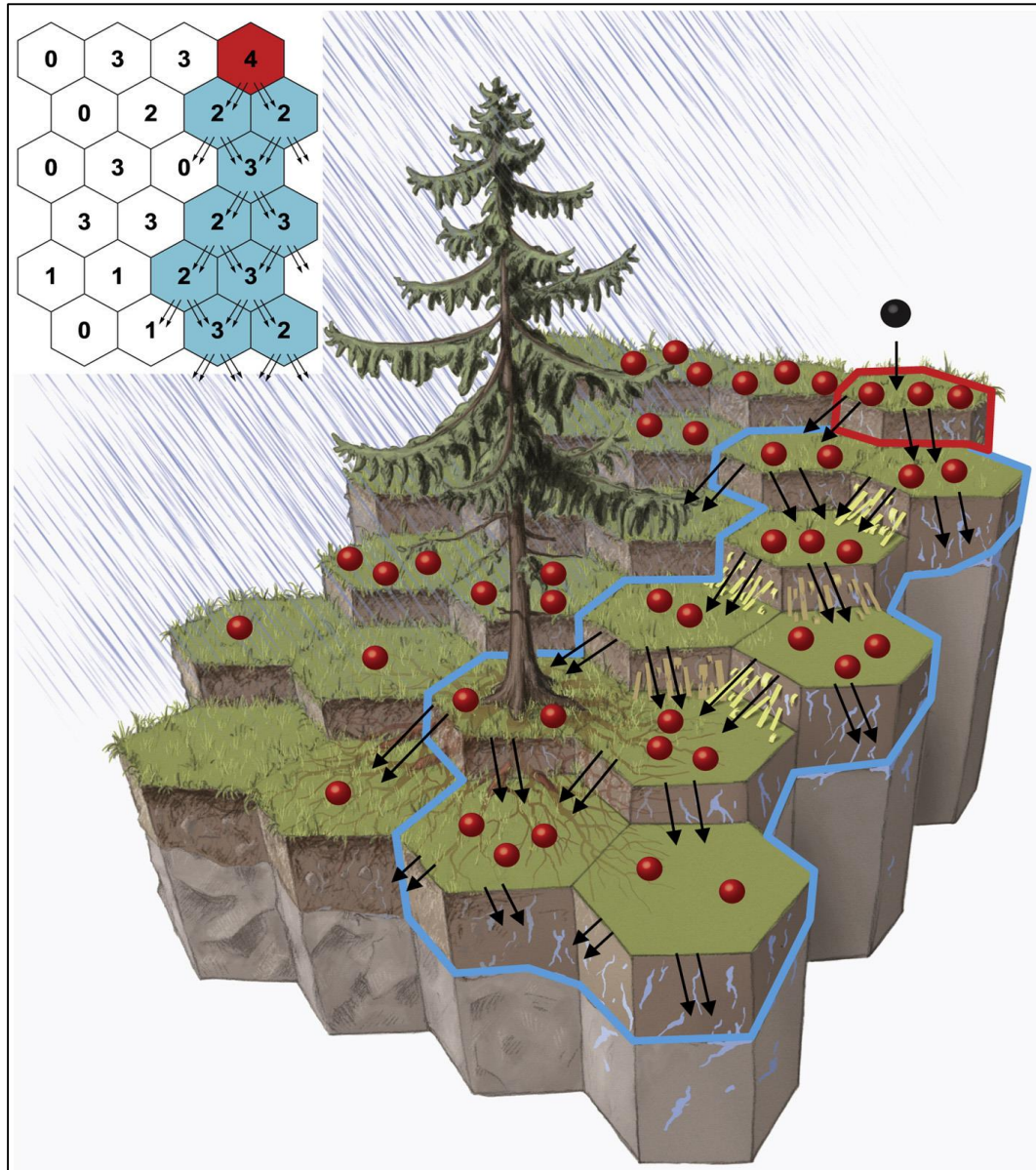


Figura 38. Analogía entre el modelo de desencadenamiento de remociones en masa. Para un máximo de 4 partículas por columna, las flechas indican la redistribución de partículas cuando el umbral de 4 partículas es alcanzado. La ladera consiste en columnas de suelo con una sección transversal hexagonal. El agua que en la superficie modifica la carga mecánica (representadas por esferas rojas) y la resistencia. Una perturbación local (indicada por la esfera negra) inicia la reacción en cadena, moviendo las cargas en dirección pendiente abajo. Una falla en la columna depende de las fuerzas estabilizadoras y sus interacciones mecánicas con las columnas vecinas (representadas por el FBM entre columnas adyacentes). Asumiendo que la columna de suelo solo soporta 4 "unidades de carga", la línea azul marca el perímetro de columnas donde ha ocurrido la redistribución de cargas iniciada por la esfera negra (Lehmann & Or, 2012).

5.3.2. *Fiber Bundle Model (FBM)*

Una característica clave del enfoque de este modelo es la implementación de la mecánica de umbrales, donde las interacciones mecánicas están representadas por estos enlaces (fibras) mecánicos virtuales y conceptuales (interconectando columnas de suelo vecinas y la interfaz suelo-roca), los cuales poseen umbrales de resistencia bien definidos. cada enlace o vínculo mecánico es representado por un modelo de paquetes de fibras (*FBM*), el cual se rompe al superar un umbral de resistencia predefinido, pero que incluye además fallamientos locales que ocurren antes de que todos los vínculos mecánicos fallen. El FBM es utilizado para representar varios elementos del suelo, incluyendo cementos, agua capilar del suelo (granos interconectados por la unión de agua retenida por las fuerzas capilares), contactos friccionales y elementos cohesivos biológicos como raíces (Figura 40).

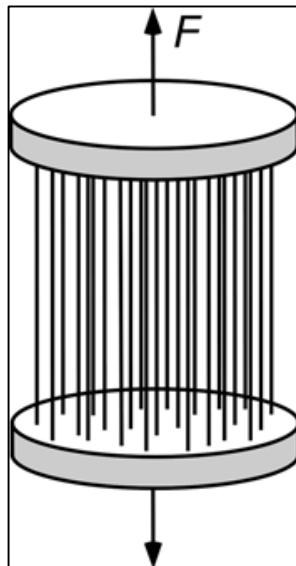


Figura 39. Conjunto de fibras tensionadas entre dos placas rígidas (Cohen et al., 2009).

Un *FBM* consta de numerosos elementos mecánicos (denominados fibras) considerados (conceptualmente) como la unión de dos placas rígidas en una disposición paralela (Figura 40). Las resistencias individuales de las fibras se extraen de una distribución de resistencia predefinida, que representa el desorden de los materiales heterogéneos. Durante la carga de las dos placas extremas, las fibras débiles se rompen y sus cargas se redistribuyen a las fibras intactas que posteriormente también pueden romperse, desencadenando así una reacción en cadena de rotura de fibras dentro de un paquete.

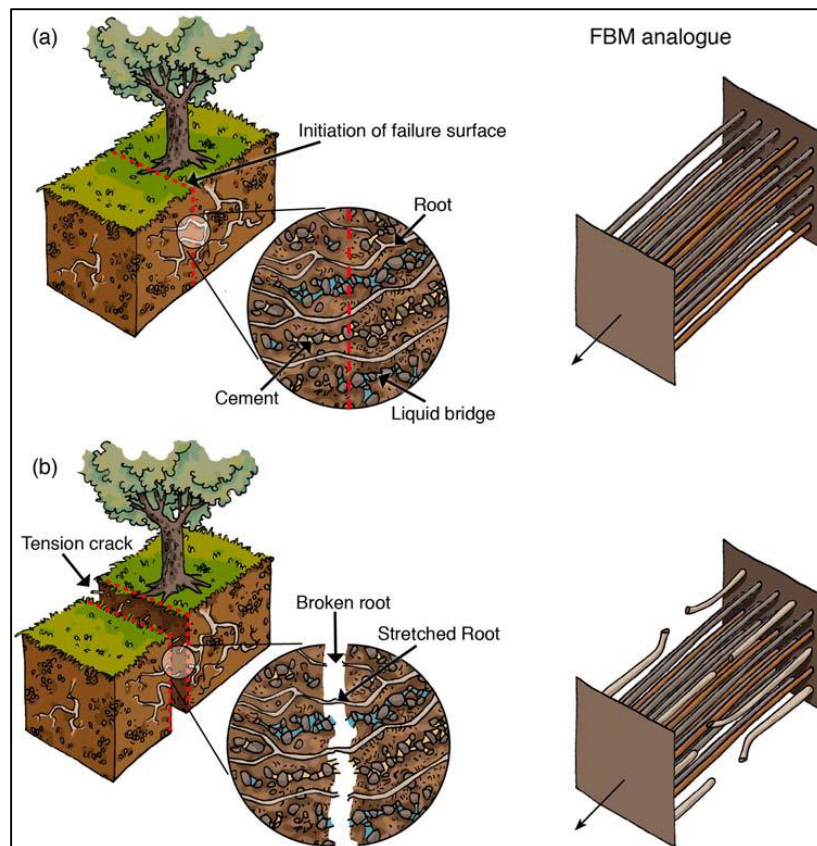


Figura 40. Representación de elementos cohesivos del suelo (izquierda), y abstracción en un conjunto de fibras (derecha). (a) Antes y (b) después de la formación de grietas de tensión a lo largo de la superficie de fallamiento (Cohen et al., 2009).

5.3.3. Desencadenamiento de remociones en masa

El modelo de desencadenamiento de remociones en masa simula, para cada intervalo de tiempo, el contenido de agua promedio en cada columna de suelo mediante la partición del agua caída por las precipitaciones en infiltración, escorrentía superficial, flujo matricial y flujo a lo largo de la interfaz suelo-roca madre. El contenido de agua, a su vez, afecta la resistencia mecánica del suelo (y a la masa de suelo húmedo) y en consecuencia el balance de fuerzas para cada columna de suelo. Asumiendo que la columna de suelo se comporta como un bloque rígido y el potencial plano de deslizamiento está ubicado en la interfaz suelo-roca madre, la fuerza desencadenante para cada columna es calculada como la suma de los componentes pendiente abajo del peso de la columna de suelo y las fuerzas ejercidas por las columnas vecinas. Las fuerzas resistivas incluyen la fricción y cohesión en la interfaz suelo-roca madre. Cuando las fuerzas desencadenantes en la base de la columna exceden las fuerzas resistivas, la columna de suelo falla en su base (reduciendo la resistencia del suelo en la base a un valor residual). El exceso de carga (la diferencia entre las fuerzas desencadenantes y la resistencia residual del suelo), es asignado a las columnas vecinas a través de los enlaces mecánicos de interconexión con una resistencia a la tracción del suelo τ_t (reforzada por la cohesión otorgada por las raíces c_{root} en áreas forestadas). La resistencia a la tracción es definida por la siguiente ecuación, basada en el criterio de falla de Mohr-Coulomb (Fan et al., 2015):

$$\tau_t = \frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \rho_w g h \chi + \frac{2 c_{soil} \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} + c_{root}$$

Donde φ es el ángulo de fricción interna, ρ_w es la densidad del agua, g es la aceleración gravitacional, h es la presión capilar y c_{soil} es la cohesión del suelo. El coeficiente χ define la razón entre la fuerza y la presión capilares, aproximada por el grado de saturación efectiva según el modelo de Lu et al. (2010).

Así, una carga redistribuida que exceda la resistencia de los enlaces resulta en una falla de los enlaces laterales. Cuando colapsan todos los enlaces laterales que conectan a la columna con sus vecinos superiores, el exceso de carga es transferido a las columnas por debajo como una carga compresiva (Fan et al., 2015).

A su vez, cuando la carga compresiva ejercida en la columna por debajo excede su resistencia intrínseca a la compresión τ_c , la columna de suelo que sufre la carga falla y se desplaza como una remoción en masa (típicamente como una reacción en cadena que genera fallamiento en columnas de suelos vecinas). Goodman (1980) define la resistencia a la compresión como (Fan et al., 2015):

$$\tau_c = \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \rho_w g h \chi + \frac{2 c_{soil} \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

Un resumen de las principales fuerzas que actúan sobre las columnas de suelo utilizadas en este modelo es mostrado en la Figura 41. Las fuerzas resistentes son resumidas como resistencia a la tracción τ_s y tienen en cuenta el esfuerzo normal efectivo, incluidos los efectos de debilitamiento o reforzamiento del agua del suelo y cohesión del suelo c_{soil} (el reforzamiento de las raíces solo es considerado en direcciones laterales, pero no en la base). La resistencia interna del suelo se ve

modificada por el contenido de agua debido al aumento de la presión de poros y a la reducción del esfuerzo efectivo.

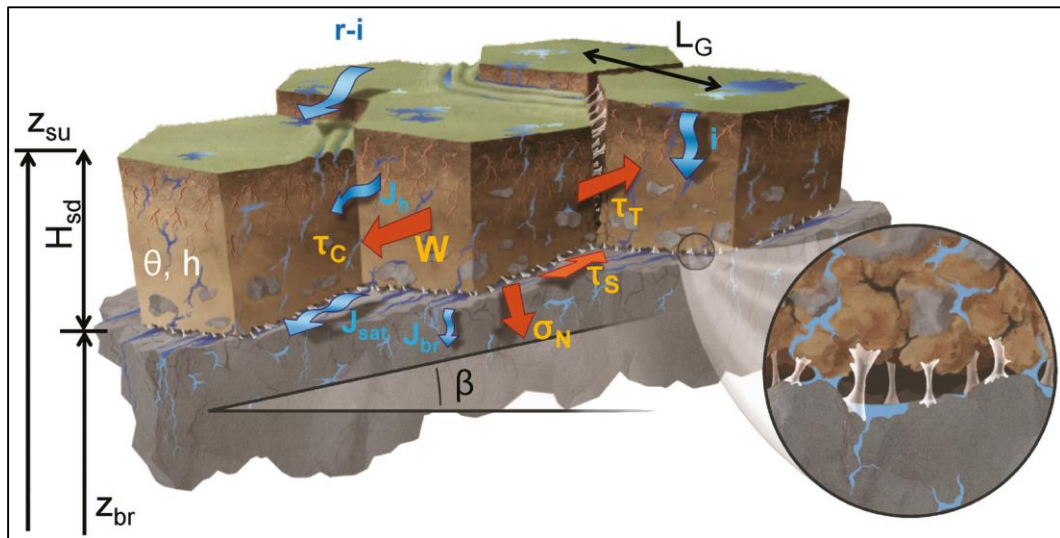


Figura 41. Unidades básicas del modelo de desencadenamiento de remociones en masa, con columnas de suelos de sección transversal hexagonal. Espesor del suelo H_{sd} , espaciamiento de grilla L_G , elevación de superficie Z_{su} , elevación de roca madre Z_{br} . La pendiente de la ladera β activa el peso de la columna W como una fuerza desencadenante que es contrarrestada por la resistencia a la tracción τ_S , esta última que vincula la fricción entre la interfaz suelo-roca madre la cual es obtenida como el producto del esfuerzo normal σ_N y la tangente del ángulo de fricción. Las tasas de precipitación e infiltración, r e i respectivamente, el flujo matricial J_h , La infiltración en la roca madre J_{br} , y el flujo en la interfaz suelo-roca madre J_{sat} , afectan el contenido promedio de agua θ y la carga capilar $h < 0$. Cuando las fuerzas desencadenantes superan las fuerzas resistentes friccionales, la carga es redistribuida a los enlaces tensionales (de tracción) de resistencia τ_T . Cuando todos los enlaces tensionales son rotos, los esfuerzos compresivos (τ_C) son ejercidas en dirección pendiente abajo. El fallo progresivo de las columnas de suelo y la redistribución de cargas a celdas adyacentes es una característica del modelo FBM, expresando la resistencia del suelo como fuerzas capilares, visualizadas como estos enlaces deformables en la imagen circular (Lehmann & Or, 2012).

5.3.4. Datos de entrada

El modelo STEP-TRAMM requiere como información de entrada, de manera obligatoria, un mapa de elevación del área estudiada, como también la información de la cobertura de suelos de ésta, clasificada en presencia o ausencia de vegetación, el evento de precipitación y las propiedades del suelo, para poder calcular el espesor del suelo, la descarga de agua a la red hidrográfica, el desencadenamiento de las remociones en masa y el alcance de éstas. El detalle de cada componente de entrada se observa en la Figura 42.

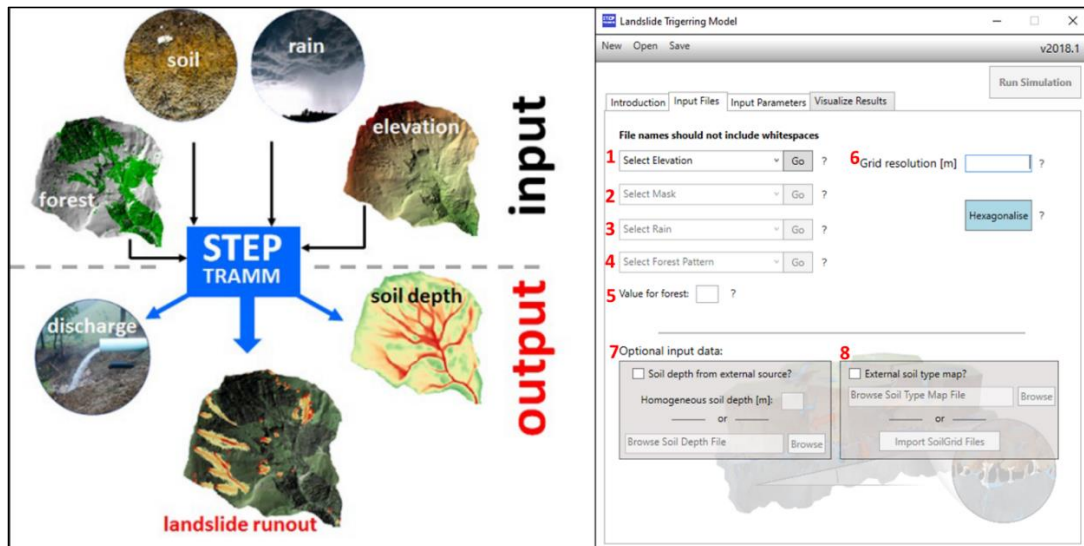


Figura 42. Datos de entrada obligatorios del modelo STEP-TRAMM. 1) Datos de Elevación. 2) Máscara de área específica a estudiar, 3) Eventos de precipitación, 4) Cobertura de suelos, especificando sólo presencia o ausencia de vegetación (bosque o plantación), 5) Valor asignado para la presencia de vegetación (por defecto “1” es para presencia y “0” para ausencia), 6) Resolución de grilla. Datos opcionales: 7) Espesor de suelo desde fuente externa, 8) Mapa externo del tipo de suelo (Lehmann et al., 2019).

En cuanto a los parámetros específicos de entrada, estos se muestran en la Figura 43. Respecto a las propiedades hidromecánicas del suelo no saturado, estas son

determinadas según la clase textural del suelo, la cual a su vez está definida según la clasificación *USDA (United States Department of Agriculture)*. Así, para cada clase textural de suelo, se utilizan los parámetros hidráulicos porosidad residual (o contenido de agua residual) θ_{res} , porosidad total (o contenido de agua en máxima saturación) θ_{sat} , valor de entrada de aire h_b y conductividad saturada, reportados en Rawls et al. (1982) (Tabla 10).

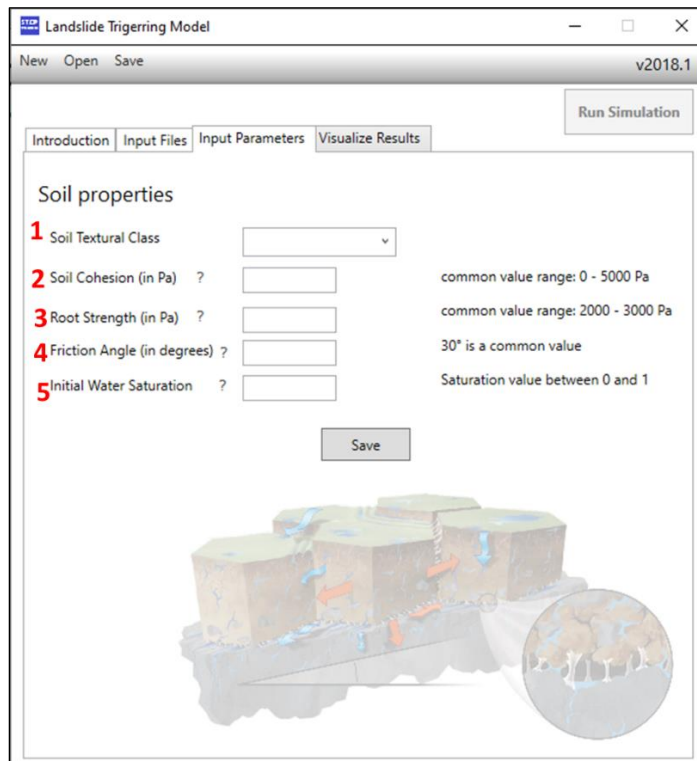


Figura 43: Propiedades específicas del suelo. Software STEP-TRAMM. Elaboración propia.

Tabla 10. Conductividad hidráulica saturada para cada clase textural de suelo (Rawls et al., 1982).

Texture class	Sample size	Total porosity (θ_t), cm ³ /cm ³	Residual saturation (θ_r), cm ³ /cm ³	Effective porosity (θ_e), cm ³ /cm ³	Bubbling pressure (ψ_b)		Pore size distribution (λ)		Water retained at -0.33 bar tension, cm ³ /cm ³	Water retained at -15 bar tension, cm ³ /cm ³	Saturated Hydraulic Conductivity [‡] (K _s) cm/h
					Arithmetic, cm	Geometric, † cm	Arithmetic	Geometric†			
Sand	762	0.437 (0.374-0.500)	0.020 (0.001-0.039)	0.417 (0.354-0.480)	15.98 (0.24-31.72)	7.26 (1.36-38.74)	0.694 (0.298-1.090)	0.592 (0.334-1.051)	0.091 (0.018-0.164)	0.033 (0.007-0.059)	21.00
Loamy sand	338	0.437 (0.368-0.506)	0.035 (0.003-0.067)	0.401 (0.329-0.473)	20.58 (0.0-45.20)	8.69 (1.80-41.85)	0.553 (0.234-0.872)	0.474 (0.271-0.827)	0.125 (0.060-0.190)	0.055 (0.019-0.091)	6.11
Sandy loam	666	0.453 (0.351-0.555)	0.041 (0.0-0.106)	0.412 (0.283-0.541)	30.20 (0.0-64.01)	14.66 (3.45-62.24)	0.378 (0.140-0.616)	0.322 (0.186-0.558)	0.207 (0.126-0.288)	0.095 (0.031-0.159)	2.59
Loam	383	0.463 (0.375-0.551)	0.027 (0.0-0.074)	0.434 (0.334-0.534)	40.12 (0.0-100.3)	11.15 (1.63-76.40)	0.252 (0.086-0.418)	0.220 (0.137-0.355)	0.270 (0.195-0.345)	0.117 (0.069-0.165)	1.32
Silt loam	1206	0.501 (0.420-0.582)	0.015 (0.0-0.058)	0.486 (0.394-0.578)	50.87 (0.0-109.4)	20.76 (3.58-120.4)	0.234 (0.105-0.363)	0.211 (0.136-0.326)	0.330 (0.258-0.402)	0.133 (0.078-0.188)	0.68
Sandy clay loam	498	0.398 (0.332-0.464)	0.068 (0.0-0.137)	0.330 (0.235-0.425)	59.41 (0.0-123.4)	28.08 (5.57-141.5)	0.319 (0.079-0.559)	0.250 (0.125-0.502)	0.255 (0.186-0.324)	0.148 (0.085-0.211)	0.43
Clay loam	366	0.464 (0.409-0.519)	0.075 (0.0-0.174)	0.390 (0.279-0.501)	56.43 (0.0-124.3)	25.89 (5.80-115.7)	0.242 (0.070-0.414)	0.194 (0.100-0.377)	0.318 (0.250-0.386)	0.197 (0.115-0.279)	0.23
Silty clay loam	689	0.471 (0.418-0.524)	0.040 (0.0-0.118)	0.432 (0.347-0.517)	70.33 (0.0-143.9)	32.56 (6.68-158.7)	0.177 (0.039-0.315)	0.151 (0.090-0.253)	0.366 (0.304-0.428)	0.208 (0.138-0.278)	0.15
Sandy clay	45	0.430 (0.370-0.490)	0.109 (0.0-0.205)	0.321 (0.207-0.435)	79.48 (0.0-179.1)	29.17 (4.96-171.6)	0.223 (0.048-0.398)	0.168 (0.078-0.364)	0.339 (0.245-0.433)	0.239 (0.162-0.316)	0.12
Silty clay	127	0.479 (0.425-0.533)	0.056 (0.0-0.136)	0.423 (0.334-0.512)	76.54 (0.0-159.6)	34.19 (7.04-166.2)	0.150 (0.040-0.260)	0.127 (0.074-0.219)	0.387 (0.332-0.442)	0.250 (0.193-0.307)	0.09
Clay	291	0.475 (0.427-0.523)	0.090 (0.0-0.195)	0.385 (0.269-0.501)	85.60 (0.0-176.1)	37.30 (7.43-187.2)	0.165 (0.037-0.293)	0.131 (0.068-0.253)	0.396 (0.326-0.466)	0.272 (0.208-0.336)	0.06

* First line is the mean value
 Second line is + one standard deviation about the mean
 † Antilog of the log mean
 ‡ Obtained from Fig. 2.

Para este estudio, se utilizaron dos tipos de suelos, basado en la toma de muestras realizada a nivel superficial y en el estudio agronómico de suelos realizado por el CIREN para la Región del Bío-Bío (CIREN, 1999).

Para el caso de la ladera estudiada, se consideró el suelo tipo franco arcillo arenoso (*Sandy Clay Loam*), que representa el tipo de suelo de fracción fina que comúnmente es encontrado en estos suelos residuales en niveles más profundos (Vivallos et al. (2010), CIREN (1999)) lo cual se ve reforzado por el hecho de que, estudios de microzonificación sísmica en el área de estudio, indican que los suelos residuales de las rocas graníticas, conocido también como maicillo, corresponden a suelos inicialmente franco arenosos (con más de 12% de proporción de granos finos), los que comúnmente presentan estos finos parcialmente reemplazados por partículas

tamaño arcilla, permitiendo clasificarlos en suelos franco arcillo arenosos (Vivallos et al., 2010).

Para el caso de la cuenca, debido a la extensión del área de estudio e inexistencia de toma de muestras que cubriesen la totalidad de la cuenca, se consideró solamente el suelo de tipo franco arcillo arenoso, basado en los estudios anteriormente en mencionados que han analizado estos suelos residuales a escala regional, donde se ha identificado la presencia de granulometrías finas en cantidades no despreciables.

Los parámetros mecánicos restantes fueron establecidos con valores típicos. El ángulo de fricción interno fue establecido en 30°, basado en el estudio de Lu y otros (2010) donde determinan un valor de ángulo de fricción interno promedio de 30° para distintas texturas de suelo.

El valor de la resistencia de las raíces establecido es de 3 kPa, según el promedio de los valores obtenidos en cálculos realizados anteriormente en escenarios posteriores al fallamiento (1 a 4.3 kPa) reportados en Sidle and Ochiai (2006), y de 3 a 6.5 kPa medidos en pruebas de extracción (Schwarz et al., 2011).

Los únicos parámetros que fueron progresivamente ajustados son: 1) Saturación inicial del suelo (antes del evento de precipitación), definida como $(\theta_0 - \theta_{res}) / (\theta_{sat} - \theta_{res})$, con θ_0 siendo el contenido inicial de agua, fue variada progresivamente de 0.1 a 0.9, en aumentos de 0.5, poniendo especial énfasis en el rango entre 0.5 y 0.7,

basado en la capacidad de campo de la mayoría de los suelos según el estudio de Assouline and Or (2014) y 2) Cohesión del suelo, ajustando los valores entre 1.0 y 3.0 kPa, en aumentos de 0.5 kPa.

Estos valores específicos son utilizados de manera que pueda verificarse que: (1) el terreno no es demasiado inestable para empezar y, por lo tanto, que no existe una detonación de remociones en masa inmediatamente después del inicio de las lluvias (remociones en masa gatilladas por lluvias en su mayoría son generadas horas e incluso días después del inicio del evento de precipitación intensa), (2) que para eventos de intensas lluvias algunas remociones en masa fueron detonadas en etapas posteriores en la simulación (como es el caso real de las remociones en masa gatilladas por precipitaciones). Así, los valores de saturación y cohesión que en conjunto cumplieran estos criterios son aplicados para comparar los resultados antes y después de la deforestación en el área de estudio (Lehmann et al., 2019).

5.3.5. Datos de salida

- Mapa de sombras (*Hillshade*): Mapa de sombras del archivo de elevación ingresado. La calidad de este mapa tiene directa relación con el tamaño de píxel del archivo de elevación y de la resolución de grilla ingresada (Figura 44).
- Espesor del suelo (*Soil Depth*): Mapa de espesor de suelo (Figura 45), el cual puede ser ingresado manualmente, y en caso contrario el modelo calcula un espesor, basado en la aproximación realizada por Stothoff (2008) donde se asume

un estado estable entre la tasa de producción del suelo y procesos erosivos (Figura 46).

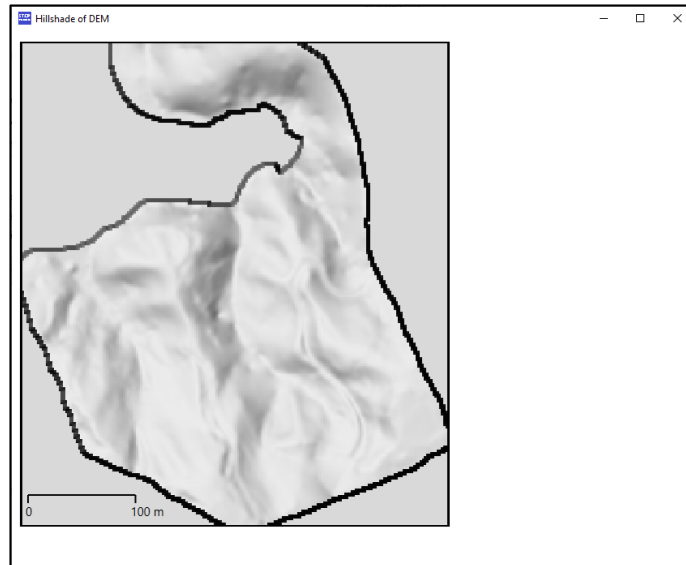


Figura 44. Mapa de sombras. Elaboración propia.

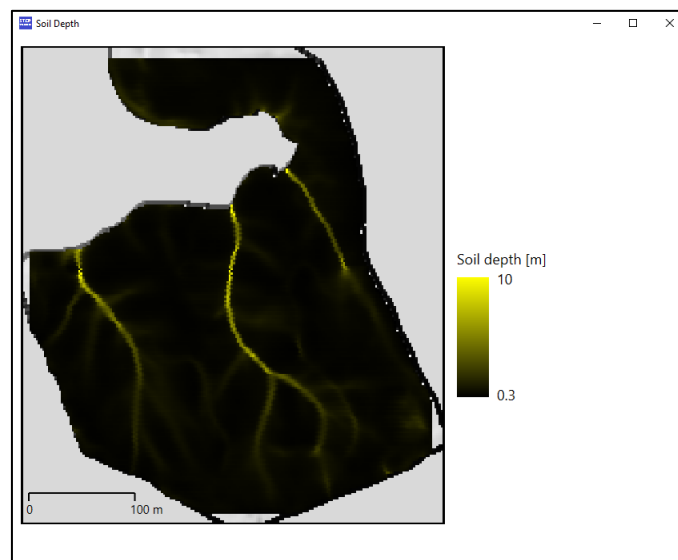


Figura 45. Mapa de espesor de suelo. Elaboración propia.

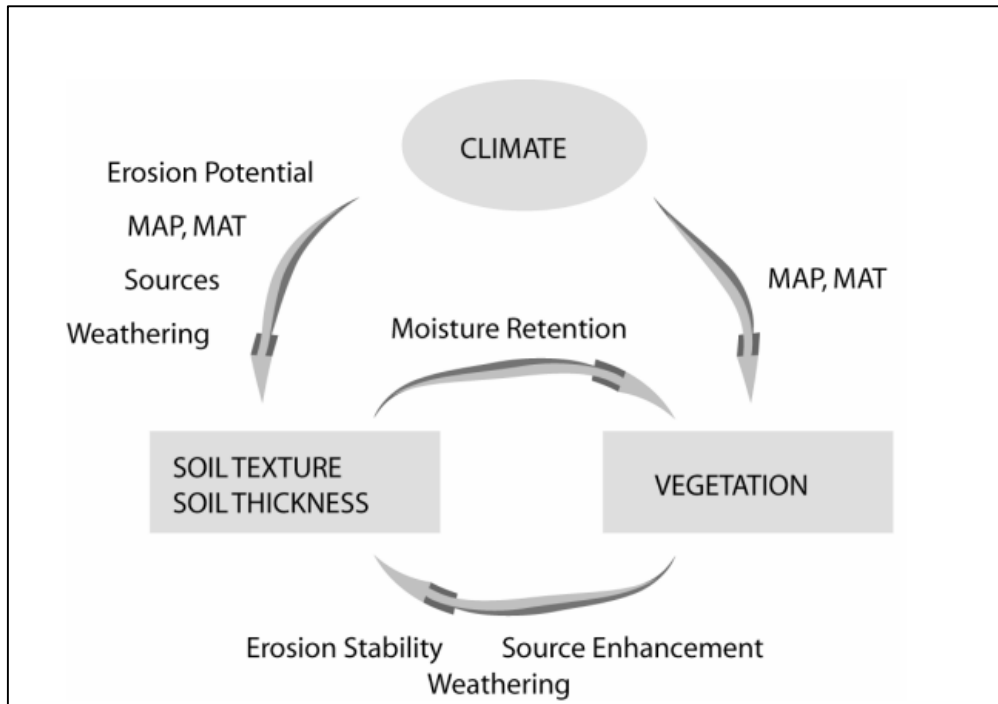


Figura 46. Diagrama de flujo de tasa de producción de suelo y procesos erosivos (Stothoff, 2008).

- Patrones de daño (*Damage patterns*): Mapas que muestran el cálculo de daño como la fracción de fibras rotas (las fibras representan los elementos mecánicos que conectan las columnas de suelo y la roca) del FBM en cada columna. El daño incrementa desde verde a rojo, siendo las zonas negras las zonas de generación de remociones en masa (Figura 47).

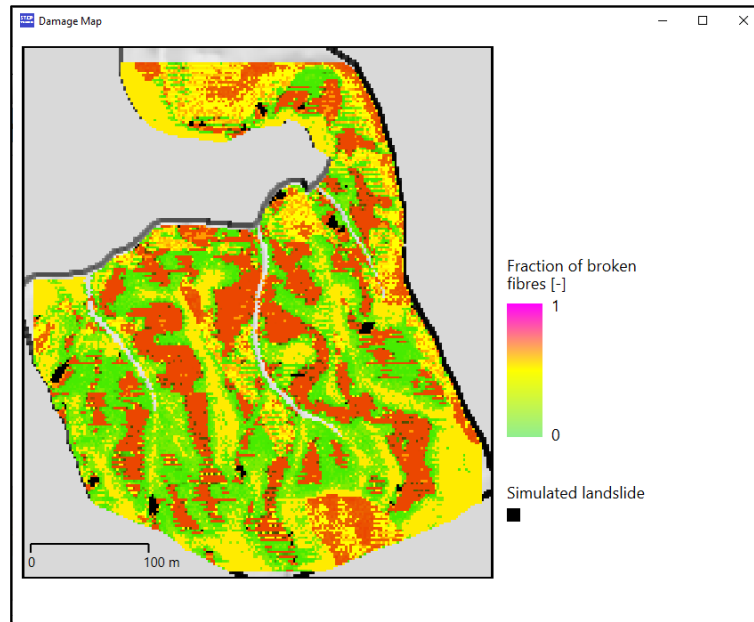


Figura 47. Mapas de patrones de daños. Deslizamientos simulados en negro. Elaboración propia.

- Posición y tamaño del deslizamiento (*Landslide position and size*): Mapas que muestran la posición espacial de las remociones en masa generadas. Para cada remoción, el modelo entrega los valores específicos del área, volumen, elevación y fracción de cubierta forestal involucrada (Figura 48).
- Zonas de desplazamiento y alcance de flujos de detritos (*Debris flow runout path*): Mediante una aproximación empírica, se ilustran en un mapa las zonas de desplazamiento y alcance de los flujos de detritos. Los flujos de detritos están dentro de los peligros naturales más destructivos en zonas montañosas. La predicción de su trayectoria y área de alcance depende del conocimiento de la

localización de la zona de generación, y del tamaño y constitución del material removido (Figura 49).

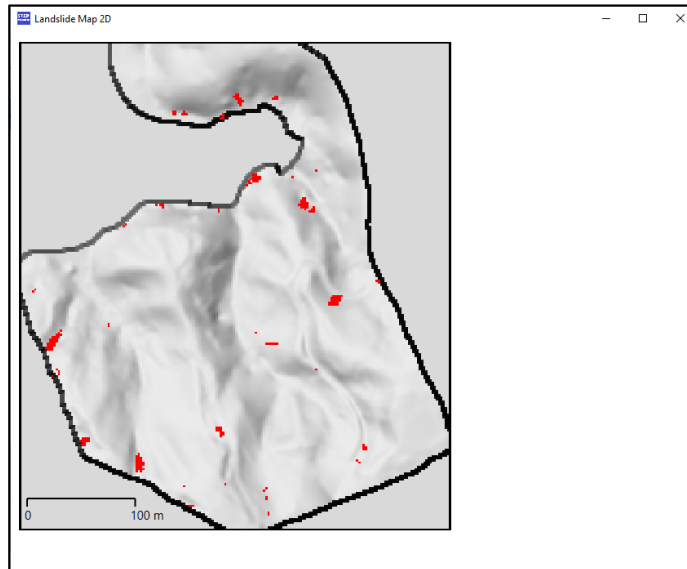


Figura 48. Mapa de deslizamientos simulados. Elaboración propia.

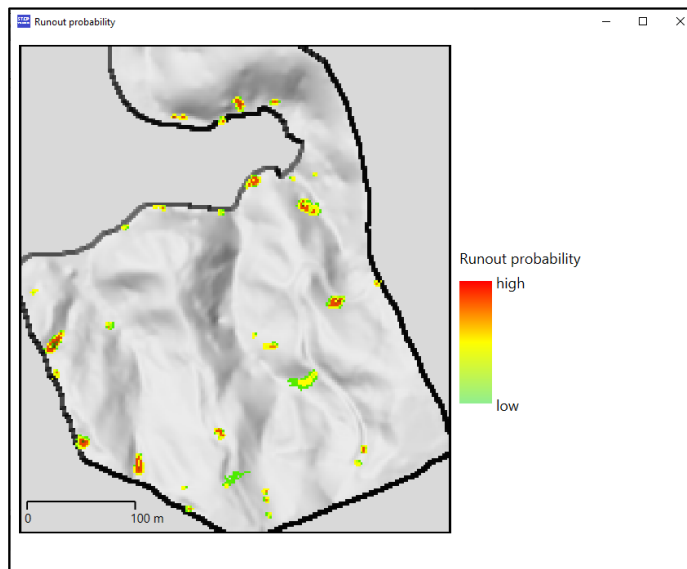


Figura 49: Zonas de desplazamiento y alcance de flujos de detritos. Elaboración propia.

Para poder vincular de mejor manera la generación de las remociones en masa con las trayectorias de los flujos de detritos y la distancia recorrida de éstos, el modelo relaciona de manera simple las estimaciones de la distancia alcanzada por los flujos de detritos y sus trayectorias. Las localizaciones de cada remoción en masa y los volúmenes proporcionados por el modelo son utilizados como datos de entrada para simular las distancias de alcance de los flujos de detritos basado en modelos empíricos. Los resultados preliminares demuestran el valor adicional de vincular los modelos de desencadenamiento de remociones en masa gatilladas por lluvias con predicciones de trayectorias de desplazamiento de flujos de detritos para un rango de tipos de suelos y eventos de desencadenamiento, proporcionando así una evaluación de amenazas más completa en cuanto a la exposición de flujos de detritos (von Ruetten et al., 2016).

De manera de proveer estimaciones simples de la distancia de alcance de los flujos de detritos dentro del marco de estudio del modelo, éste implementa una relación empírica propuesta por Rickenmann (1999), el cual relaciona el volumen de la remoción en masa (V), la diferencia de elevación (H) entre la zona de remoción y depositación, y la distancia de desplazamiento del flujo (L) según la siguiente ecuación:

$$L = 1.9V^{0.16}H^{0.83}$$

Mediante la vinculación del modelo y las relaciones empíricas simples entre el volumen de material removido y la distancia de alcance de los flujos de detrito, es

posible comparar las estadísticas de las remociones en masa y flujos de detritos medidos con las remociones en masas y las distancias de alcance modeladas.

- Dinámicas temporales (*Temporal Dyamics*): Gráficos de series de tiempo, el cual incluye las precipitaciones en un período de tiempo determinado, la descarga de agua a la red hídrica (escorrentía superficial), la localización temporal de la generación de remociones en masa y su volumen (Figura 50).

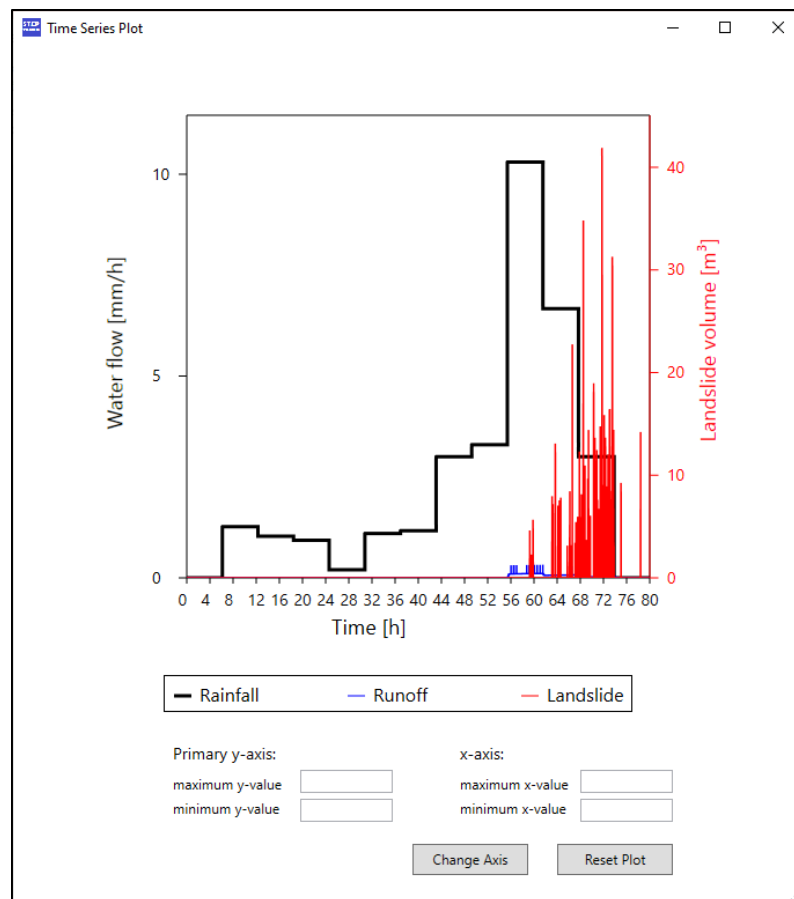


Figura 50: Gráfico de series de tiempo, con la intensidad de precipitación (eje Y) y el tiempo transcurrido (eje X). Elaboración propia.

- Mapa comparativo de remociones en masa simuladas vs identificadas: Mapa que compara espacialmente la ubicación de los eventos simulados y los catastrados en terreno (Figura 51).

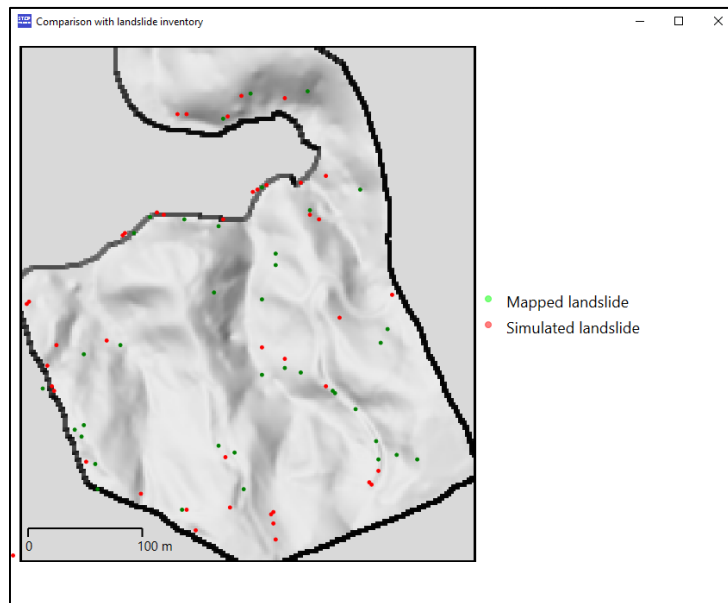


Figura 51. Mapa comparativo de deslizamientos simulados vs identificados. Elaboración propia.

5.3.2. Etapa de Terreno (T2)

La segunda campaña de terreno fue realizada posterior a las modelaciones, tanto para la ladera específica analizada como para la cuenca, teniendo como objetivo principal actualizar el catastro de remociones en masa e indicios de inestabilidad identificadas en terreno, y aquellas identificadas mediante fotointerpretación, las que fueron catastradas en la etapa de Terreno T1. Al igual que la etapa de Terreno T1,

esta etapa fue complementada con fotointerpretación para aquellas zonas donde no fue posible acceder.

5.3.3. Validación de simulación

Posteriormente, el catastro de remociones en masa identificadas es comparado con las remociones en masa simuladas, de manera de validar los resultados obtenidos en las simulaciones.

Debido a las variaciones en la precisión en la toma de datos mediante GPS fotointerpretación, se optó por realizar áreas de influencias (*buffers*) de distintas extensiones según la escala del estudio, en torno a los puntos catastrados en terreno, de manera de analizar y validar estadísticamente la densidad espacial de las remociones en masa simuladas, es decir, la concentración de zonas (representadas por puntos) de generación simuladas alrededor de zonas catastradas. Respecto al tamaño del área de influencia, la distancia radial es definida según la precisión de la herramienta utilizada al realizar la identificación en terreno.

Para el caso de la ladera específica estudiada, esta fue catastrada casi en su totalidad mediante un GPS Garmin de mano, el cual tiene una precisión que varía hasta un rango de entre 10.5 a 18.42 m para zonas forestadas, como fue el caso del catastro de deslizamientos realizado., por lo que el radio máximo de precisión aceptado fue de 10 m (Wing et al. (2005); Weih Jr et al. (2009)). En cuanto al catastro realizado por fotointerpretación en *Google Earth*, Potere (2008) indica que la

precisión varía de 44.4 metros en países latinoamericanos en vías de desarrollo, hasta 24.1 metros en países desarrollados. Carlevaro et al. (2015) indica que, para Uruguay, el GPS de mano resulta ser hasta 3 veces más preciso que *Google Earth*, llegando aproximadamente a 30 metros de precisión. Debido a que el tamaño de píxel utilizado para el estudio de la cuenca es de 30 metros, el radio máximo aceptado para la fotointerpretación es de 30 metros.

5.3.4. Determinación zonas de mayor probabilidad de generación de remociones en masa

Los resultados obtenidos de las simulaciones, una vez validados, entregarán la zonificación de las áreas con mayor probabilidad de generar remociones en masa frente a los distintos eventos de precipitación utilizados, como también valores de temporalidad en la ocurrencia de estos eventos, volumen, área y alcance de los posibles flujos de detritos generados.

6. RESULTADOS

6.1. Imágenes de Ladera: Información Base

Un total de cuatro imágenes fueron tomadas en la ladera en intervalos de 3 meses, de manera de analizar las modificaciones temporales de la ladera. De éstas, fue seleccionada la imagen tomada posterior a los meses de mayor frecuencia e intensidad de eventos de lluvia del período invernal, correspondiente al mes de agosto, con el objetivo de identificar posibles nuevas remociones en masa o indicios de inestabilidad ocurridos en el período invernal. Las imágenes obtenidas, tienen una resolución de 15 centímetros, lo que permite un análisis en detalle de la ladera. Como resultados se tiene el Modelo Digital de Superficie (MDS, Figura 52 A y B), el cual representa la superficie real del área estudiada, incluyendo objetos como casas y árboles y el Modelo Digital de Terreno (MDT, Figura 52 C y D.), donde los objetos que cubren la superficie son filtrados.

Posteriormente, el área fue delimitada para eliminar las zonas de baja pendiente y planas en la base de la ladera (en su mayoría zonas habitadas) que no tienen incidencia en la generación de remociones en masa y, al mismo tiempo, seleccionar el área que ha sido deforestada, zonas de interés que fueron previamente identificadas en terreno y facilitar la delimitación de la clasificación de cobertura vegetal, la cual es necesaria como dato de entrada para el modelo (Figura 53).

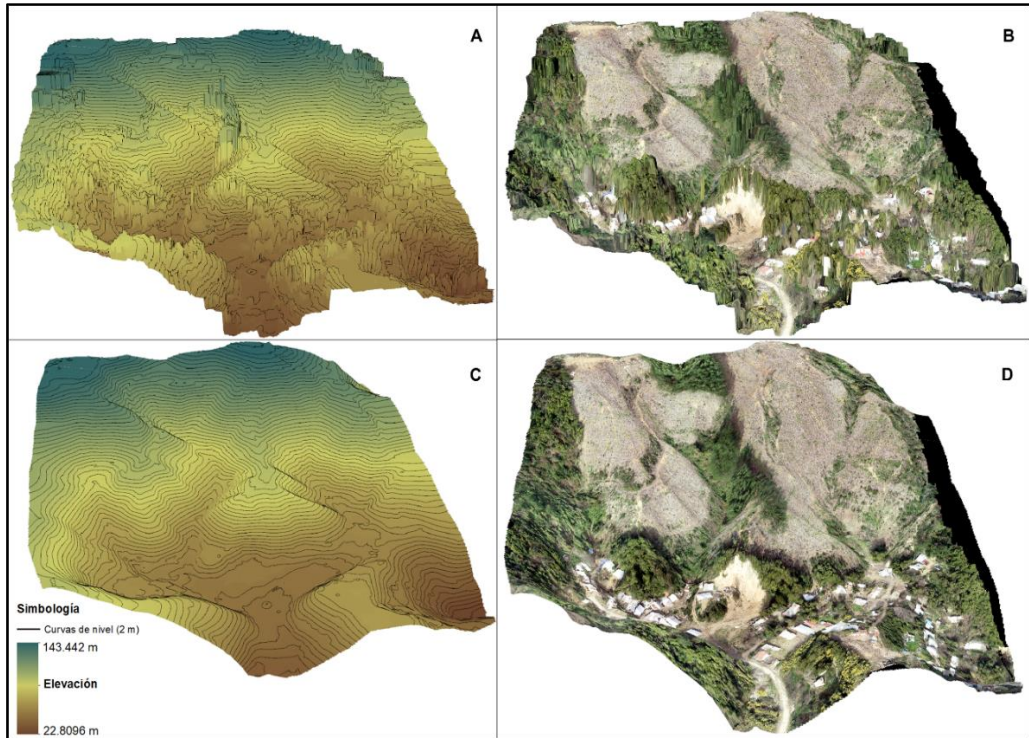


Figura 52. Modelo Digital de Superficie (A-B), Modelo Digital de Terreno (C-D).

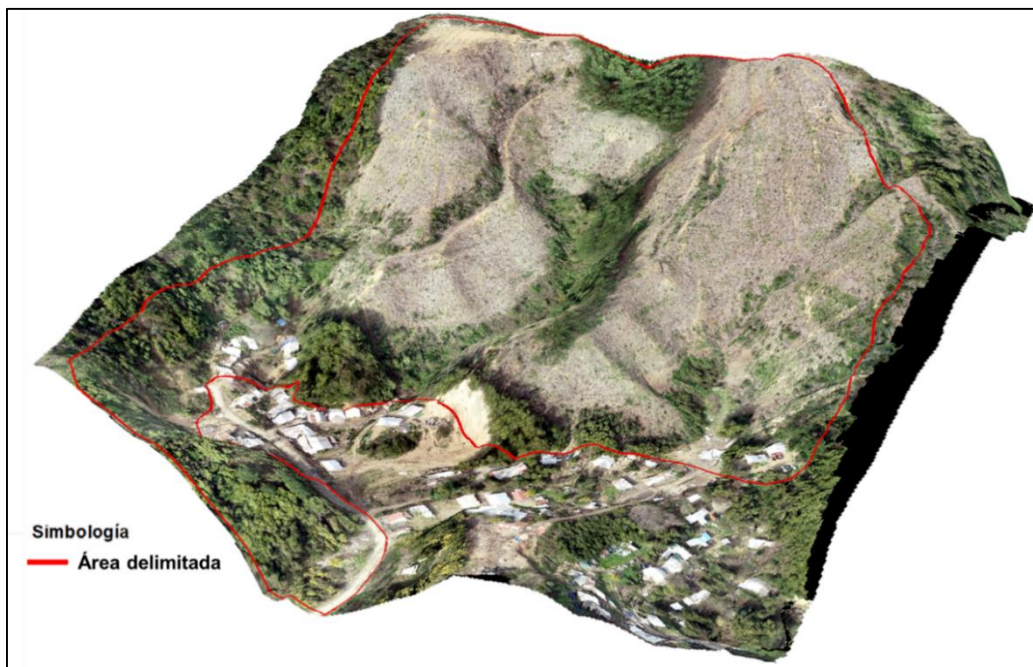


Figura 53. Área de estudio delimitada en MDT.

Además, como subproductos se tienen las curvas de nivel extraídas del MDT, como también el modelo de pendientes obtenido de estas últimas (Figura 54 A). Es importante mencionar que, al analizar el catastro de remociones en masa y zonas con evidencias de inestabilidad realizado en terreno, estas coinciden en su mayoría con las zonas de pendiente mayor a 20°, como se muestra en la Figura 54 B.

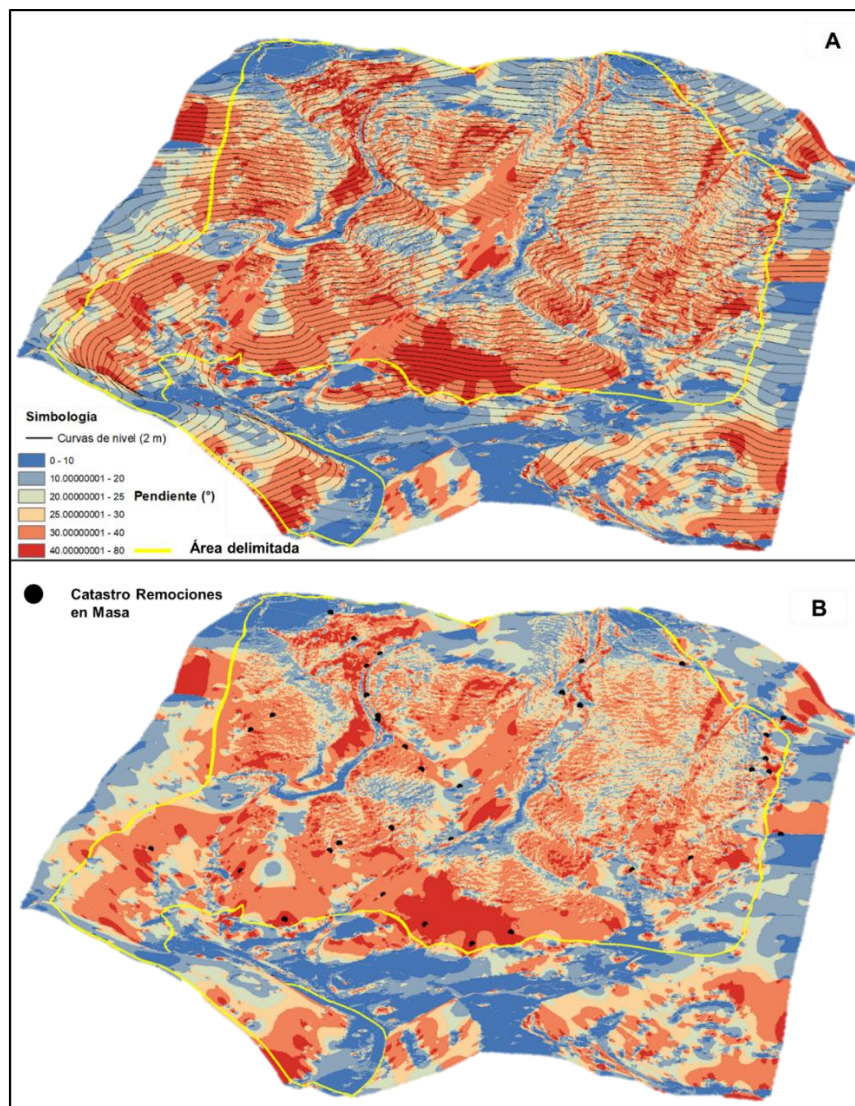


Figura 54. Pendientes de ladera estudiada (A). Catastro de deslizamientos identificados en terreno (B).

Respecto a la distribución de las pendientes en la ladera estudiada, el histograma muestra que las magnitudes de las pendientes están concentradas en mayor frecuencia aproximadamente entre los 20 y 40°, valores relacionados en el área de estudio a zonas de mayor susceptibilidad a la generación de remociones en masa (Figura 55).

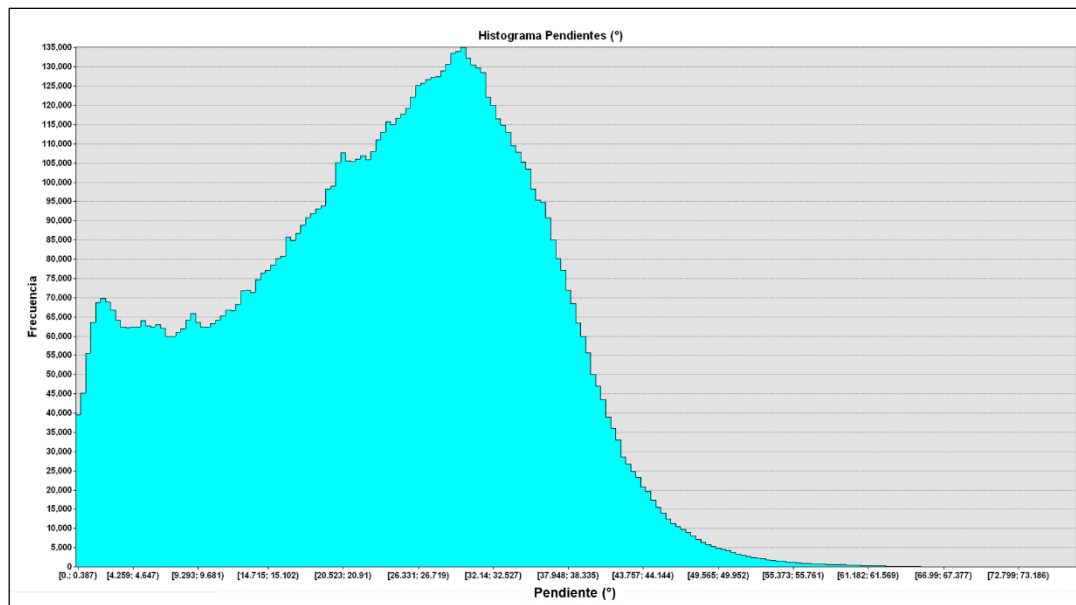


Figura 55. Histograma de pendientes de ladera estudiada.

Finalmente, la cobertura de suelo fue clasificada según la presencia o ausencia de vegetación arbórea. La Figura 56 muestra la misma ladera previa a la cosecha y días después de la deforestación, para las Figura 56 A y B, los polígonos rojos indican las áreas deforestadas previas a la cosecha, mientras que los polígonos rojos en las Figura 56 C y D abarcan la vegetación arbórea restante posterior a la cosecha.

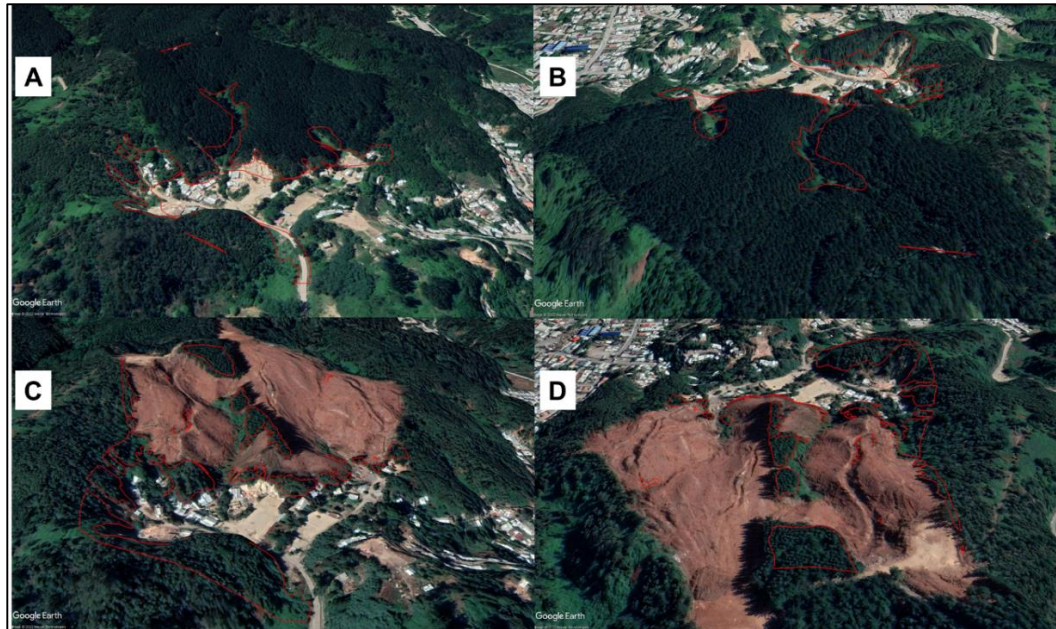


Figura 56. Ladera antes (A-B) y después de evento de deforestación (C-D). En rojo polígonos que demarcan zonas sin vegetación arbórea previa al evento de deforestación (A-B), y zonas con vegetación arbórea posterior al evento de deforestación (C-D).

Por un lado, la clasificación de presencia y ausencia de vegetación arbórea previa a la cosecha fue realizada en primera instancia mediante la fotointerpretación en *Google Earth Pro*, pudiendo también identificar las quebradas, las cuales fueron delimitadas posteriormente en terreno para poder definir con mayor exactitud y precisión aquellas zonas deforestadas previas a la cosecha. Por otro lado, la alta resolución de las imágenes tomadas por el vehículo aéreo no tripulado permitió la clasificación en detalle de la vegetación arbórea restante posterior a la cosecha, como también diferenciar la vegetación de baja altura, como prados y arbustos, los cuales no son considerados como vegetación presente para este estudio, debido a que el reforzamiento de la cohesión al suelo producto de sus raíces es despreciable.

La Figura 57 muestra el flujo de trabajo realizado para delimitar las áreas finales de presencia y ausencia de vegetación arbórea. En primer lugar, la imagen inicial de la ladera recientemente deforestada, representada por la Figura 57 A es analizada en detalle para delimitar aquellas zonas con presencia de vegetación arbórea posterior a la cosecha, representado por polígonos verdes (Figura 57 B). La combinación de la información levantada en *Google Earth Pro* y su verificación, complementación y aumento de precisión y exactitud en terreno permite realizar una regresión temporal, pudiendo delimitar el área cubierta por la plantación forestal (polígonos verdes) y las zonas ausentes, representadas por los polígonos amarillos, de vegetación arbórea previas a la deforestación (Figura 57 C). Finalmente, la zona ahora ya deforestada, es analizada y demarcada en detalle, pudiendo separar aquellas áreas que mantuvieron la vegetación arbórea (polígonos verdes) de las que fueron cosechadas (polígonos amarillos), como se observa en la Figura 57 D.

La zona delimitada en las imágenes para realizar el estudio abarca un área total de 10.35 Ha. Respecto al escenario pre deforestación, el área con presencia de vegetación arbórea cubre 8.58 Ha (82.9% del total), siendo en su mayoría plantaciones exóticas de la industria silvícola, donde las 1.77 Ha restantes (17.1% del total) corresponden zonas sin vegetación arbórea, relacionado con geomorfologías de alta pendiente como quebradas (donde sólo se identifica vegetación arbustiva) y depósitos de remociones en masa recientes. En contraste, en el escenario post deforestación el área con presencia de vegetación arbórea se reduce a 2.25 Ha (21.74% del total), mientras que las zonas sin vegetación arbórea

aumentan a 8.10 Ha (78.26% del total). La Tabla 11 resume esta información, la que puede observarse gráficamente en la Figura 58.

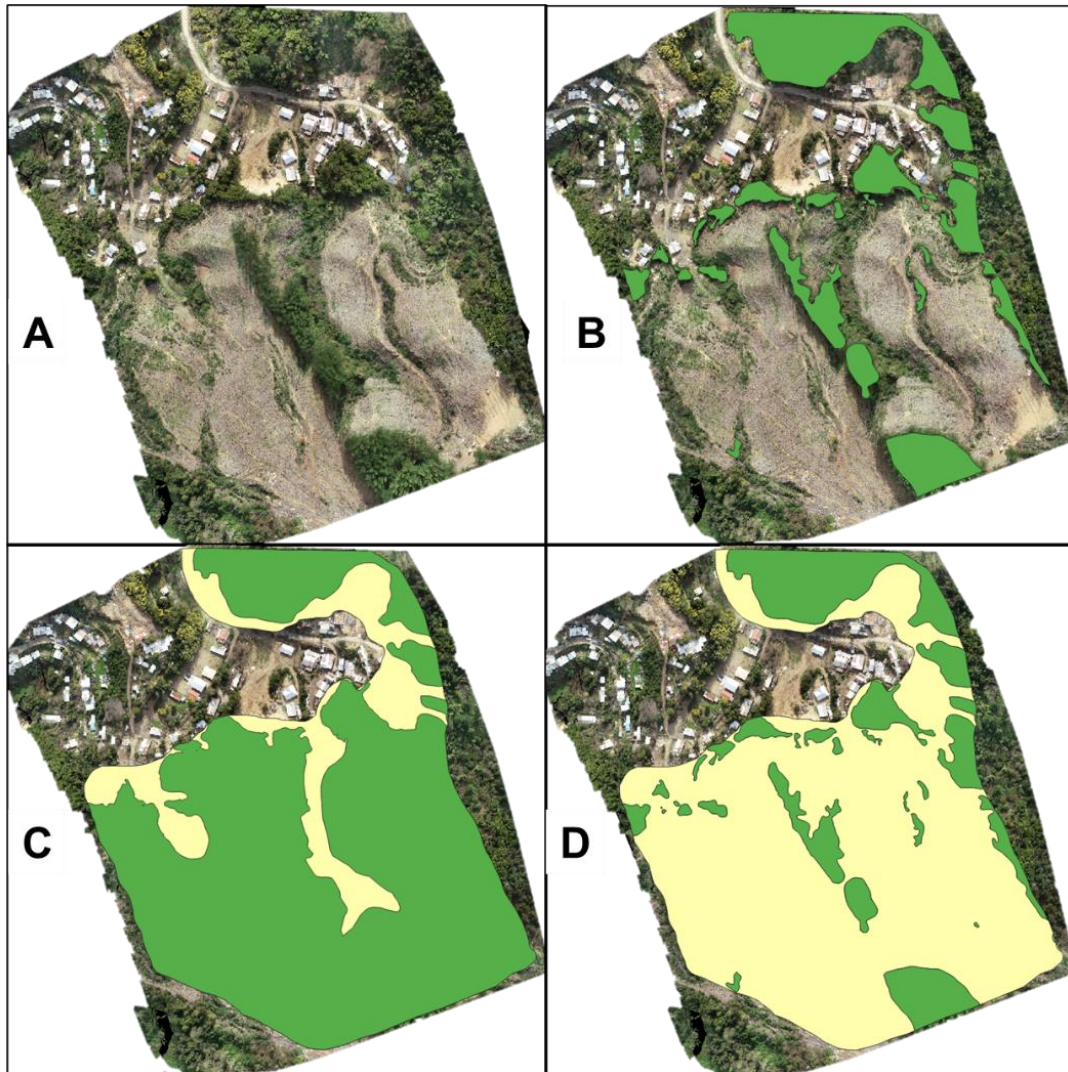


Figura 57. Delimitación de zonas con vegetación arbórea (verde) y deforestadas (amarillo). Ladera deforestada post-deforestación (A), zonas con vegetación arbórea post-deforestación (B), zona forestada y deforestada previa a deforestación (C), delimitación de zonas forestadas y deforestadas post deforestación (D).

Tabla 11. Vegetación arbórea presente en la ladera. Escenario pre y post-deforestación.

De un total de 10.35 Ha de la zona de estudio delimitada en la Ladera:	Escenario	
	Pre deforestación	Post deforestación
Área con presencia de vegetación arbórea	8.58 Ha (82.9%)	2.25 Ha (21.74%)
Área con ausencia de vegetación arbórea	1.77 Ha (17.1%)	8.10 Ha (78.26%)
Total	10.35 Ha	10.35 Ha

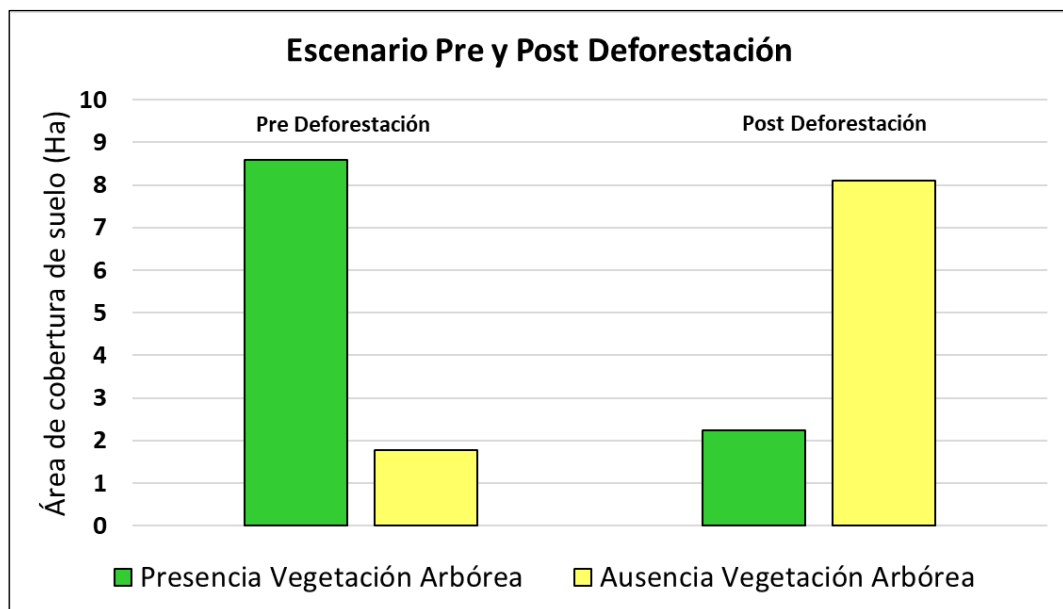


Figura 58. Gráfico escenarios pre y post-deforestación.

Por un lado, al analizar en un perfil transversal, se puede observar claramente dos zonas donde la elevación disminuye abruptamente, donde la topografía adopta una forma canalizada correspondiente a las quebradas que cortan longitudinalmente la ladera, donde se han identificado la formación de cárcavas, deslizamientos traslacionales y flujos de detritos en sus bordes. El alcance de estas quebradas llega

hasta la zona habitada y, por lo tanto, representan potenciales zonas de peligros al ser unidades geomorfológicas capaces de canalizar flujos de detritos y escombros provenientes de zonas superiores de la ladera (Figura 59).

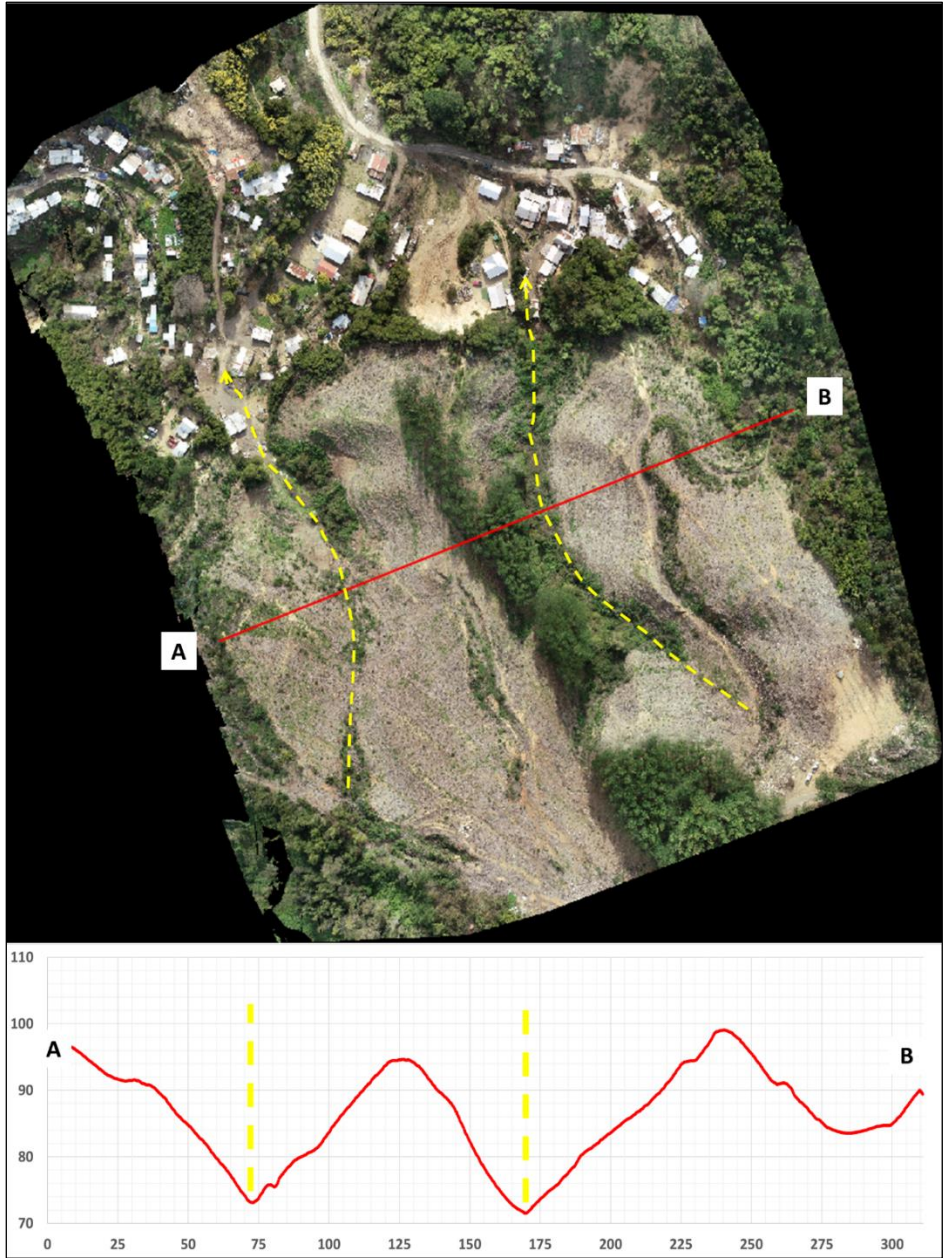


Figura 59: Perfil transversal de ladera.

Por otro lado, al analizar en perfil longitudinal (Figura 60) trazado desde la parte superior de la ladera hasta el área urbanizada, es posible identificar un cambio abrupto en la pendiente.

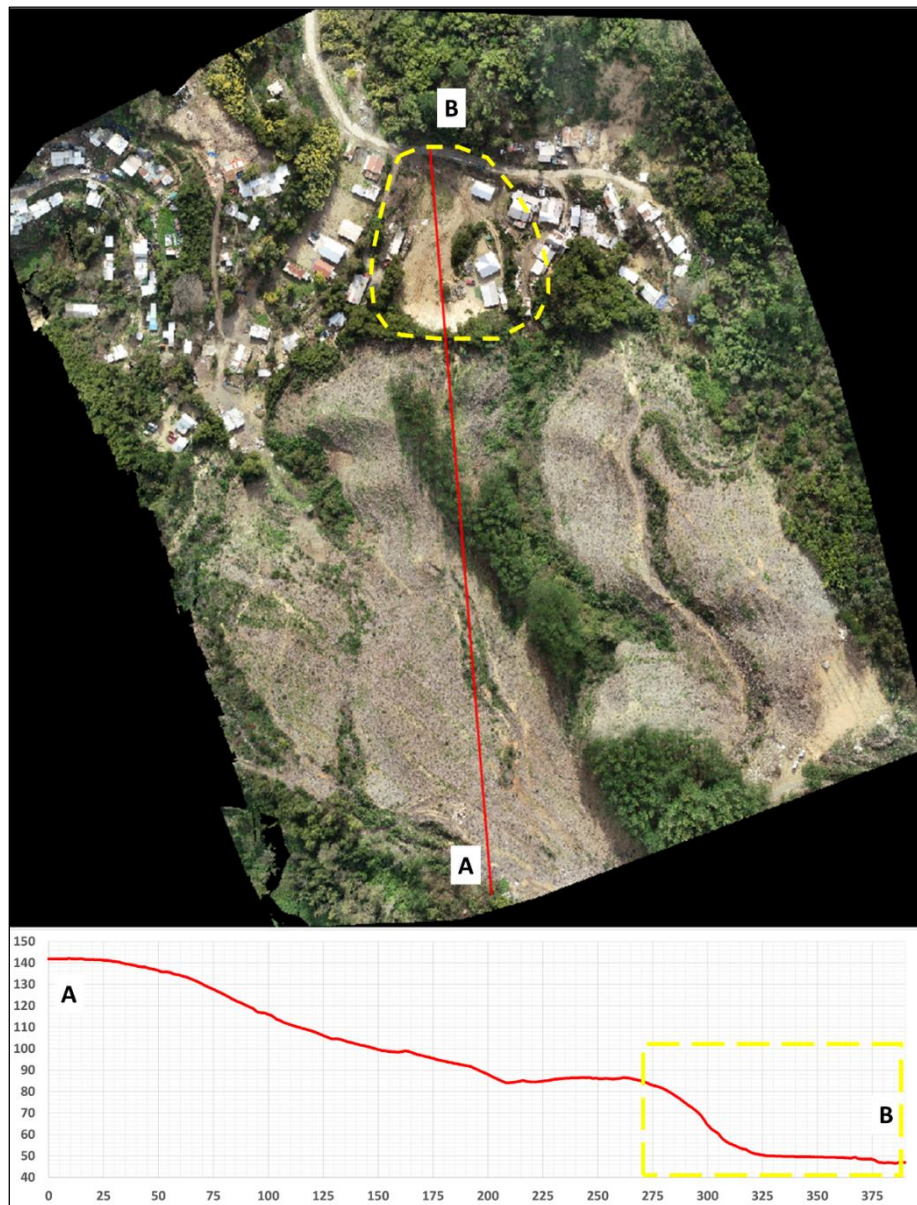


Figura 60: Perfil longitudinal de ladera.

Este talud corresponde a la zona que ha presentado más eventos registrados históricamente, siendo el área más susceptible a la generación de remociones en masa identificada, presentando una pendiente de aproximadamente 60° y, actualmente, ha sido escalonado en 4 terrazas para aumentar su estabilidad (Figura 61).

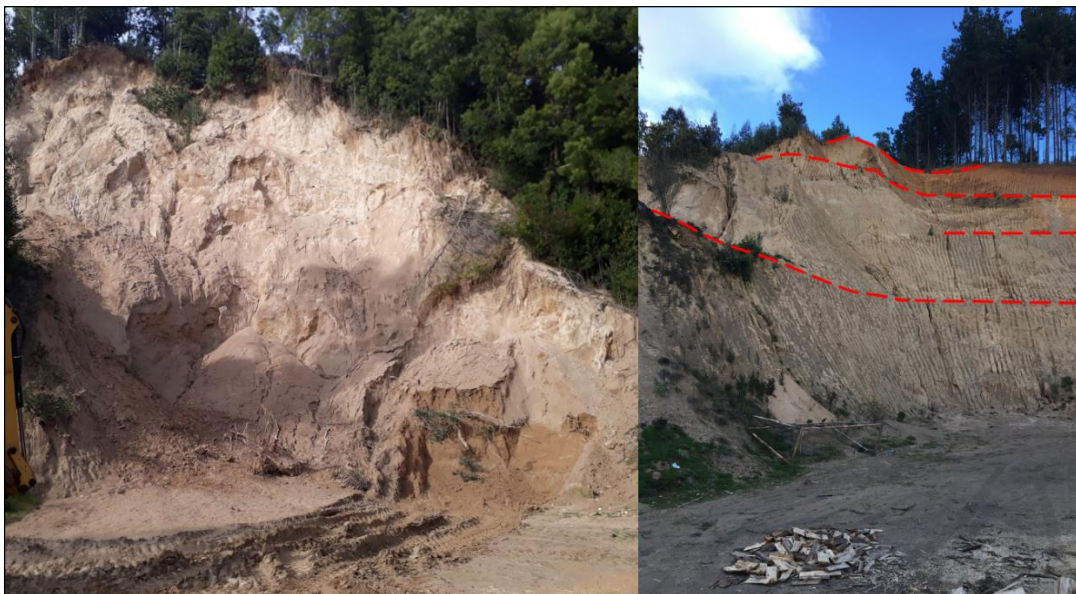


Figura 61: Talud con evidencias de deslizamientos. A la izquierda, evento de deslizamiento previo a escalonamiento de talud, a la derecha talud escalonado.

6.2. Cuenca Palomares: Información Base

La delimitación de la cuenca Palomares fue realizada mediante el MDT proporcionado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), del año 2013, a través el software *ArcGIS*. Al igual que en la ladera estudiada, la cuenca es nuevamente delimitada siguiendo el mismo objetivo de eliminar zonas, en este caso

urbanas, de baja pendiente y planas que no influyen en la generación de remociones en masa. Así, la delimitación inicial de la totalidad de la cuenca Palomares tiene una extensión de 685.49 Ha, mientras que el área subdividida considerada para la modelación es de 518.31 Ha (Figura 62).

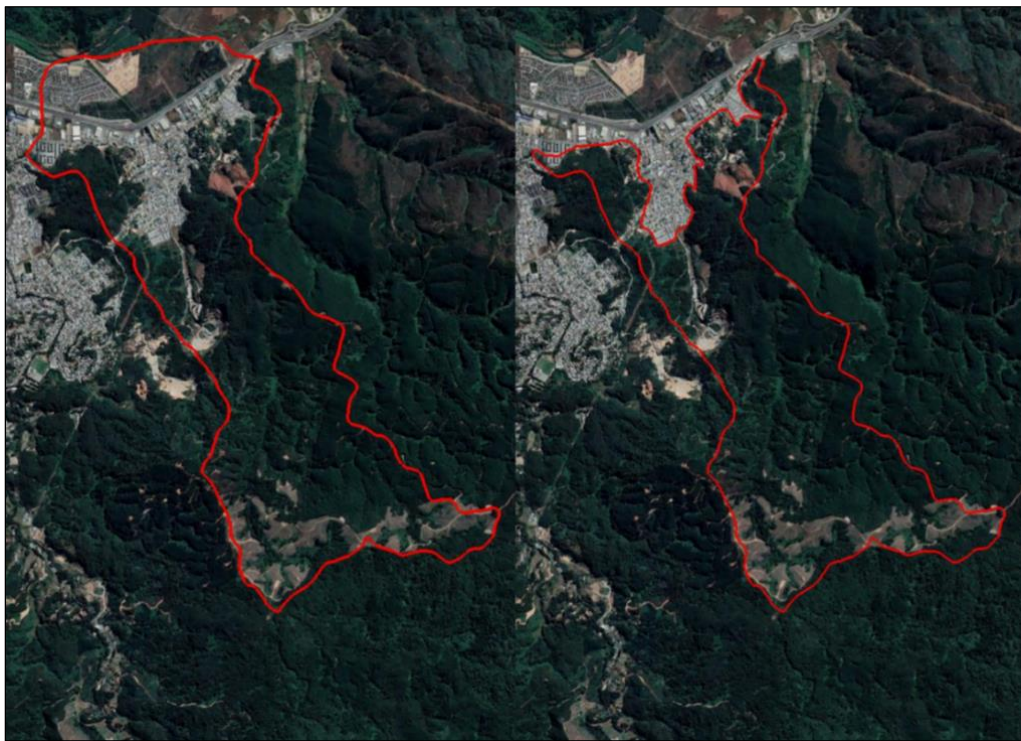


Figura 62: Cuenca Palomares. A la izquierda el área total de la cuenca, a la derecha el área considerada para el análisis de remociones en masa.

Respecto a la elevación, la altura máxima de la topografía en la cuenca es de 384 metros, con una altura mínima de 4 metros, donde las mayores elevaciones se encuentran alejadas de la zona urbana, mientras que esta última, ubicada en las

zonas más planas y de menor altura de la cuenca, está rodeada de cerros de alturas menores que llegan a los 130 metros (Figura 63).

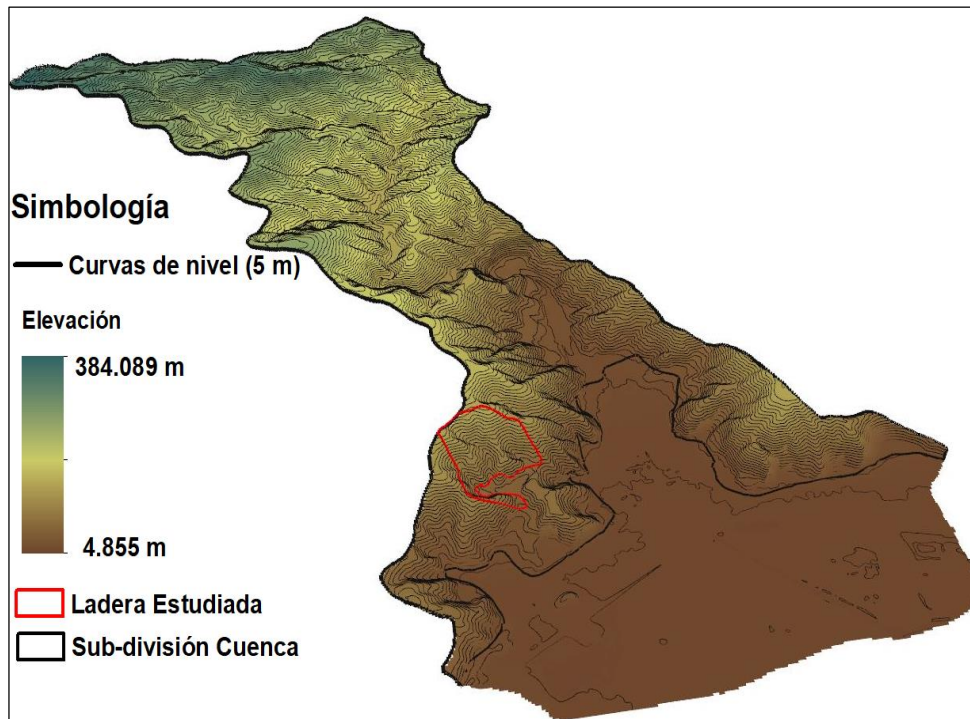


Figura 63: Elevación cuenca Palomares.

Mediante la combinación de bandas 5, 6 y 4 de las imágenes satelitales Landsat-8 desde el período 2016-2022 se realizó la clasificación supervisada de la cobertura de suelos de la cuenca, acumulando aquellas zonas que fueron deforestadas progresivamente en este período de tiempo, clasificándolas en cobertura de suelo del tipo urbano y forestal-silvícola, está última a su vez subdividida en coberturas de suelo de vegetación nativa, matorrales, plantaciones forestales, plantaciones taladas (cosechadas y al descubierto), y plantaciones taladas y que han sido recientemente reforestadas con especies exóticas (cobertura joven) (Figura 64).

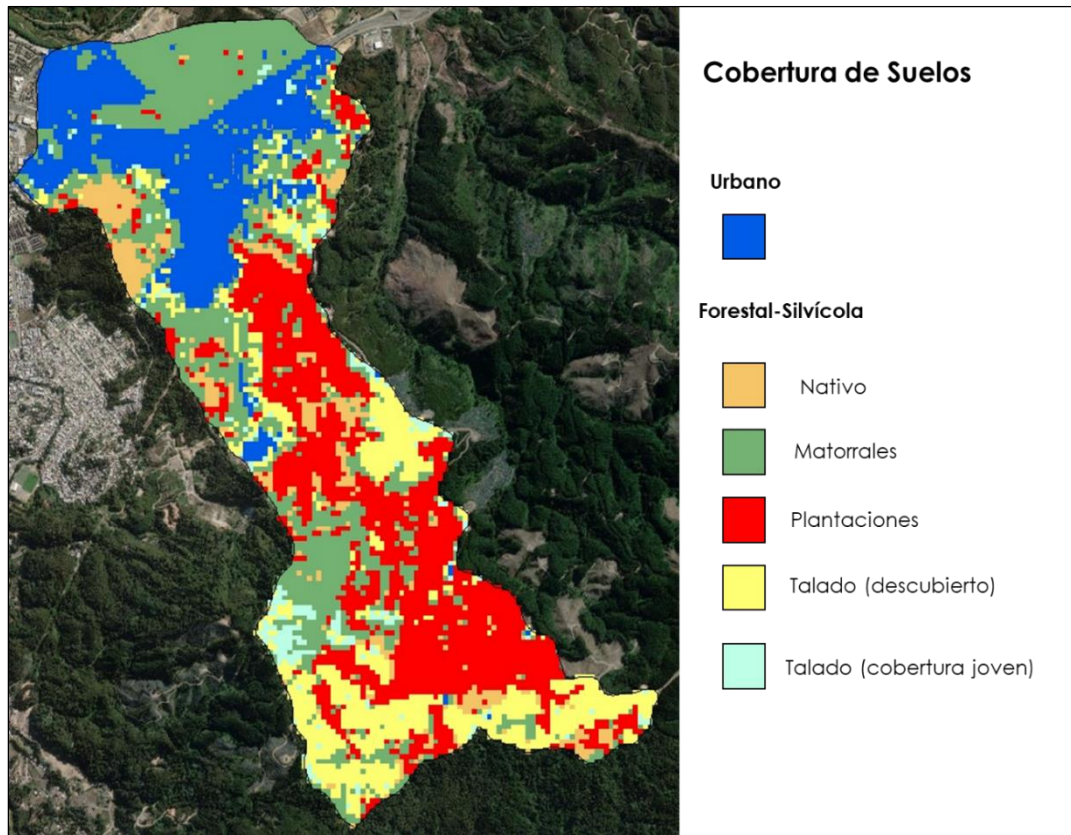


Figura 64. Cobertura de suelos de cuenca Palomares.

La Tabla 13 y la Figura 65 muestran los valores específicos de cada cobertura de suelo clasificada para la cuenca Palomares. Los resultados indican que casi el 50% de los suelos de la totalidad de la cuenca son utilizados para la industria silvícola, específicamente para la plantación y cosecha de la especie exótica *Pinus radiata*. A su vez, para fines del año 2020 un 16.22% de esta área se encuentra descubierta, con un 12.62% totalmente descubierta y un 3.6% con presencia de *Pinus radiata* recientemente plantado.

Tabla 12: Valores específicos de cobertura de suelos.

Cobertura de Suelos Cuenca Palomares	Extensión Total	Clasificación	Extensión Específica	Porcentaje Específico (%)	Porcentaje Total (%)
Urbano	120 Ha	Urbano (residencial e industrial)	120 Ha	18.72	18.72
Vegetación Nativa	222 Ha	Matorrales	174 Ha	27.15	34.64
		Vegetación arbórea nativa	48 Ha	7.49	
Suelos de uso Silvícola	298.9 Ha	Plantaciones forestales exóticas	195 Ha	30.42	46.64
		Plantación talada y/o descubierto	80.9 Ha	12.62	
		Plantación talada y reforestada	23 Ha	3.60	
Total	640.9 Ha		640.9 Ha	100	100

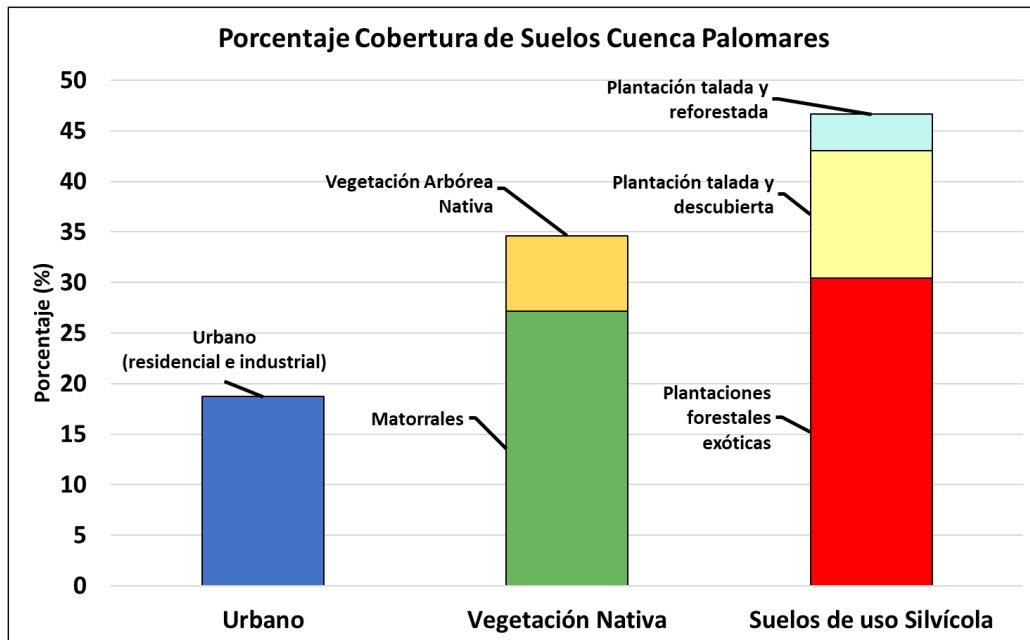


Figura 65: Porcentaje de cobertura de suelos en cuenca Palomares.

Respecto a la vegetación nativa, de un total de 34.64% sólo un 7.49% corresponde a vegetación arbórea en comparación al 27.15% de vegetación del tipo matorral, las cuales están distribuidas principalmente en la zona norte de la cuenca, como también identificada como parches entre las plantaciones forestales y en zonas de protección en zonas de quebradas donde está prohibido la deforestación. Finalmente, la zona urbana e industrial representa el 18.72% del área total de la cuenca, ubicada en la zona baja de ésta.

Los límites de la zona urbanizada están en contacto directo con zonas forestales, ya sea del tipo nativo o silvícola. Respecto a esta última, es importante señalar que el límite este de la zona urbana (línea negra intermitente en Figura 66) corresponde al área de mayor exposición a peligros socio-naturales del tipo remociones en masa e incendios forestales, ya que los usos de suelo en este límite son exclusivamente de la industria silvícola, exponiendo a la población a las amenazas relacionadas con las actividades y dinámicas vigentes de esta actividad económica (Figura 66).

Según la metodología utilizada en este estudio, las distintas coberturas de suelos son reagrupadas según la presencia o ausencia de vegetación. Así, las zonas plantaciones de *Pinus radiata*, vegetación arbórea nativa, matorrales y urbanas son reclasificadas como zonas con presencia de vegetación, mientras que la acumulación progresiva de zonas zonas taladas y/o descubiertas en conjunto con zonas cosechadas con reforestación reciente son reclasificadas como zonas con ausencia de vegetación. Esto es realizado para el escenario pre-deforestación, identificado como año límite el 2015 (Figura 67 A), y para el escenario post-

deforestación dentro del período del año 2016 al 2022 (Figura 67 B), las cuales serán utilizadas en la posterior modelación donde ambos escenarios son comparados.

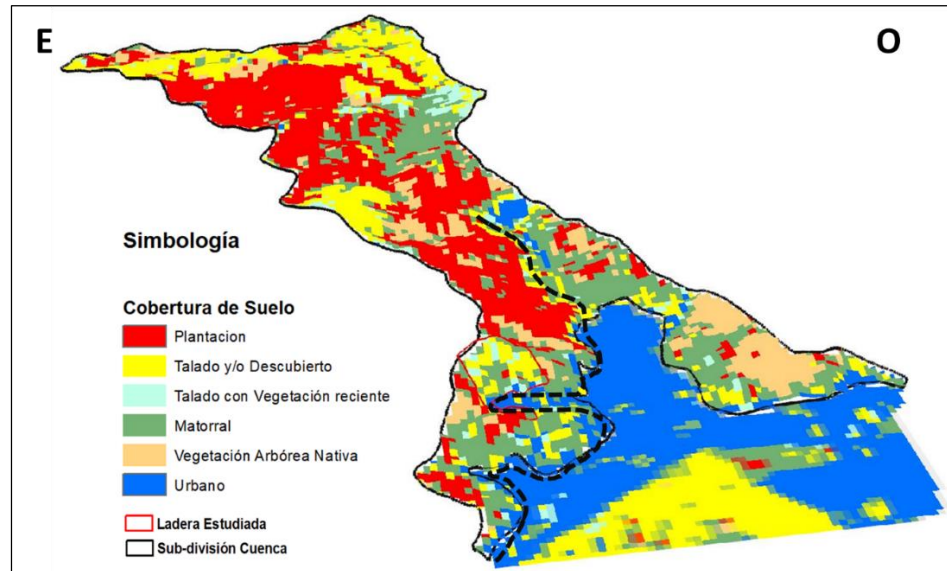


Figura 66: Cobertura de suelos cuenca Palomares y límite urbano-forestal (línea negra discontinua).

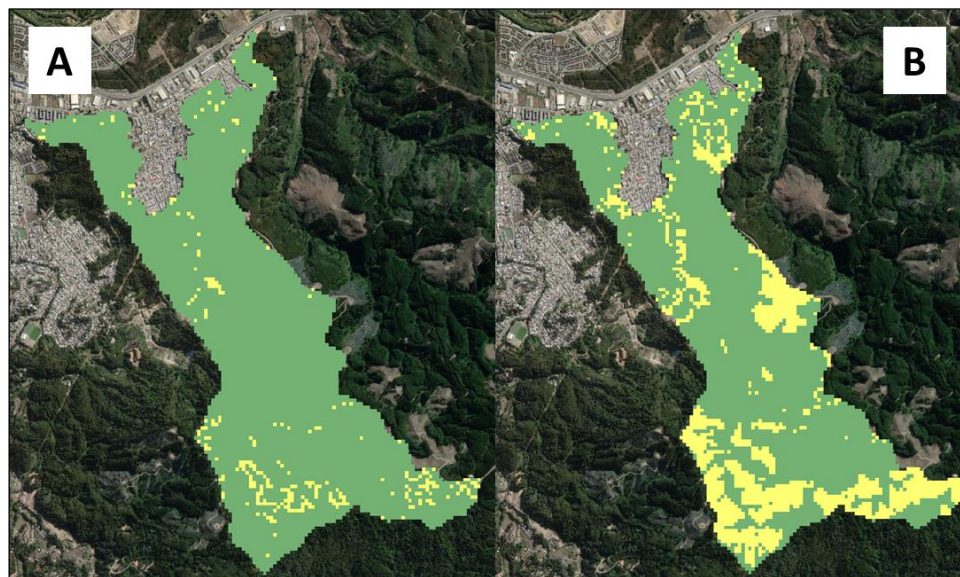


Figura 67: Zonas forestadas (verde) y deforestadas (amarillo) en cuenca Palomares. Escenario pre-deforestación (A) y post-deforestación acumulada (B).

La Figura 68 muestra los valores de presencia y ausencia de vegetación para los dos escenarios propuestos para el sector de la cuenca Palomares utilizada para la modelación.

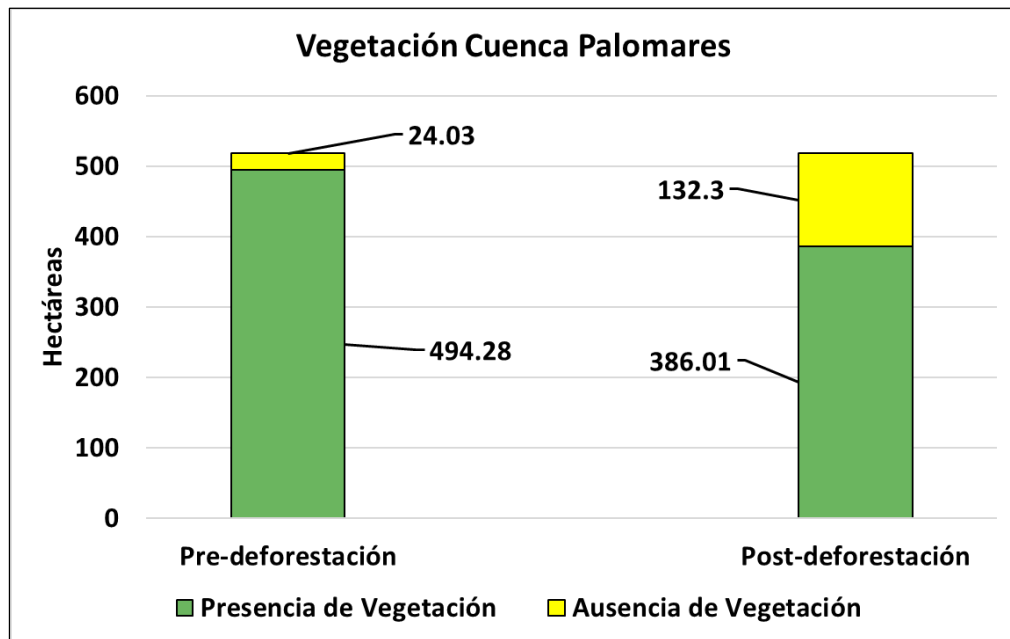


Figura 68. Presencia y ausencia de vegetación. Escenarios pre y post-deforestación.

En el escenario previo a la deforestación (hasta el año 2015), el 95.37% de la cuenca está cubierta por vegetación y solo el 4.63% restante corresponde a zonas descubiertas. Ahora, en el escenario posterior a las diversas deforestaciones realizadas entre el año 2016 y 2022, la cobertura vegetal ha disminuido a un 74.47% del total de la cuenca, mientras que las áreas consideradas como descubiertas por deforestación (incluyendo áreas cosechadas y recientemente reforestadas) ha aumentado a un 25.53% del total de la cuenca (Tabla 13).

Tabla 13: Valores de presencia y ausencia de vegetación. Escenarios pre y post-deforestación.

Escenario	Presencia de Vegetación (Ha)	Ausencia de Vegetación (Ha)
Pre-deforestación	494.28 (95.37%)	24.03 (4.63%)
Post -deforestación	386.01 (74.47%)	132.3 (25.53%)

6.3. Análisis textural del suelo

Un total de 7 muestras de suelo fueron tomadas en la ladera estudiada, a una profundidad superficial entre 50 y 100 cm de espesor. Los puntos fueron elegidos tal que fueran cubiertas y representaran tanto las zonas superiores e inferiores, como también las zonas laterales de la ladera (Figura 69).

La toma de muestras se restringió en la zona inferior de ésta debido a las altas pendientes y ausencia de vegetación, las cuales correspondían a áreas de alto peligro de caída para los participantes del estudio. Además, debido a que los terrenos forestales pertenecen a empresas privadas, las restricciones de tomas de muestras fueron acotadas solamente a un muestro del nivel más superficial del suelo, no pudiendo realizar calicatas. No obstante, los resultados obtenidos del análisis de las muestras fueron complementado con estudios previos de alto detalle realizados en el área estudiada.

Como descripción general, la zona de estudio se trata de una ladera convexa con fuerte inclinación y orientación solana. El suelo desarrollado en superficie corresponde a Luvisol según la WRB, es decir, suelos que poseen una mayor

cantidad de arcillas en capas inferiores que en niveles superiores como resultado de procesos edafogénicos, principalmente migraciones de arcilla, resultando en un horizonte árgico (rico en arcilla), con arcillas minerales de alta actividad en éste y una alta saturación base (porcentaje de capacidad de intercambio catiónico) a una profundidad de 50-100 centímetros y, por lo tanto, haciéndolos suelos de buena calidad para la actividad silvícola (FAO, 2015).

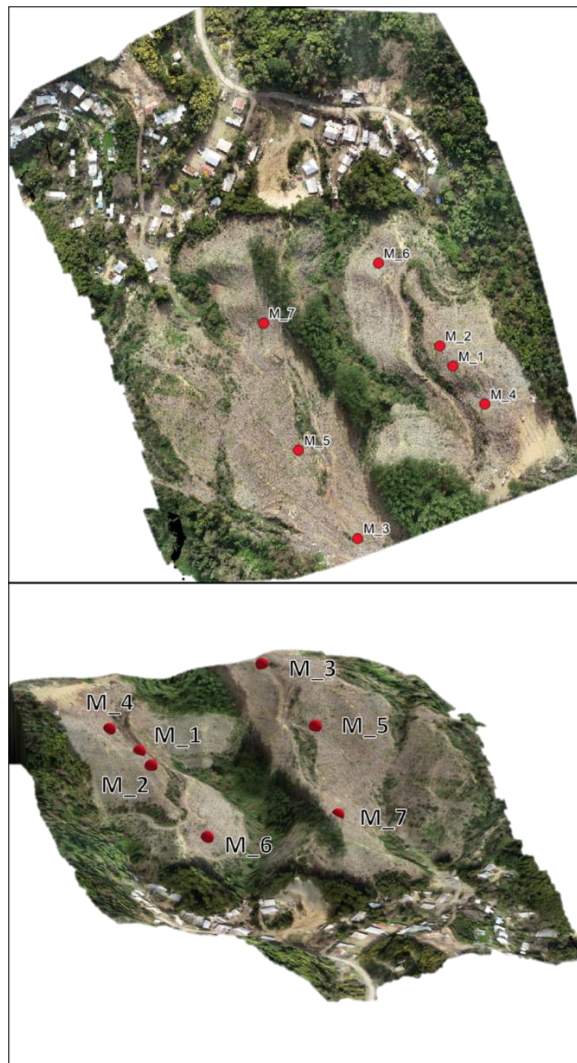


Figura 69. Muestras de suelos tomadas en ladera.

Estos suelos suelen formarse en climas con estaciones secas y húmedas bien diferenciadas, y la acumulación de arcillas va acompañada de un enrojecimiento como consecuencia de la acumulación de óxidos de hierro (Figura 70). En este caso, el Luvisol es desarrollado en rocas graníticas correspondientes al Batolito Costero Sur (Hervé et al., 1988), donde Creixell (2001) distingue un conjunto de granitoides que agrupa en una subunidad denominada Granitoides de Concepción, de edad Carbonífero-Pérmico, comprendiendo tonalitas, granodioritas y granitos subordinados, los cuales están intensamente meteorizados y con feldespatos fuertemente alterados a arcillas.



Figura 70. Muestras de suelos tomadas en este estudio.

CIREN (1999) clasifica estos suelos en la Serie San Esteban, describiéndolos como suelos evolucionados in-situ a partir de materiales graníticos ricos en cuarzo, moderadamente profundos a profundos, bien drenados, que ocupan una posición de cerros y loes altos dominando el paisaje. Las pendientes son complejas y dominan las superiores a 10%, las caídas son muy fuertes hacia esteros, quebradas o simplemente cauces secos la mayor parte del año, con pendientes de 50% y más. La textura superficial es franco-arcillo arenosa, de color pardo en el matiz 7.5 YR; de textura arcillosa y color pardo rojizo en el matiz 5YR en profundidad. Bien estructurados y de arraigamiento deficiente por debajo del metro; suelos con horizonte B bien desarrollado. El drenaje del suelo es bueno, la permeabilidad es lenta, especialmente cuando los suelos están erosionados y el escurrimiento superficial es rápido.

Vivallos et al. (2010) indican que los suelos residuales de los granitoides de Concepción corresponden a suelos SM (arena con más de 12% de proporción de granos finos según la clasificación USCS). En adición, el estudio de García-Gaines and Frankenstein (2015) indica que los suelos clasificados según la USCS como SM pueden ser relacionados con los clasificados en la USDA como suelos franco arenosos, en los que, en el área de estudio, la fracción fina comúnmente está reemplazada por partículas tamaño arcilla, permitiendo clasificarlos en suelos franco arcillo arenosos al ir aumentando la proporción de las partículas tamaño arcilla, como indican los estudios anteriormente mencionados (Figura 71). Los niveles de suelos pueden tener hasta 20 m de potencia, donde taludes menores a 10° de inclinación el suelo es muy denso y resiste fuerte presiones verticales, mientras que en pendientes

fueres es fácilmente arrastrado por la escorrentía y susceptible a la generación de cárcavas por erosión hídrica, junto a fenómenos de remoción en masa del tipo flujo de barro y deslizamientos.

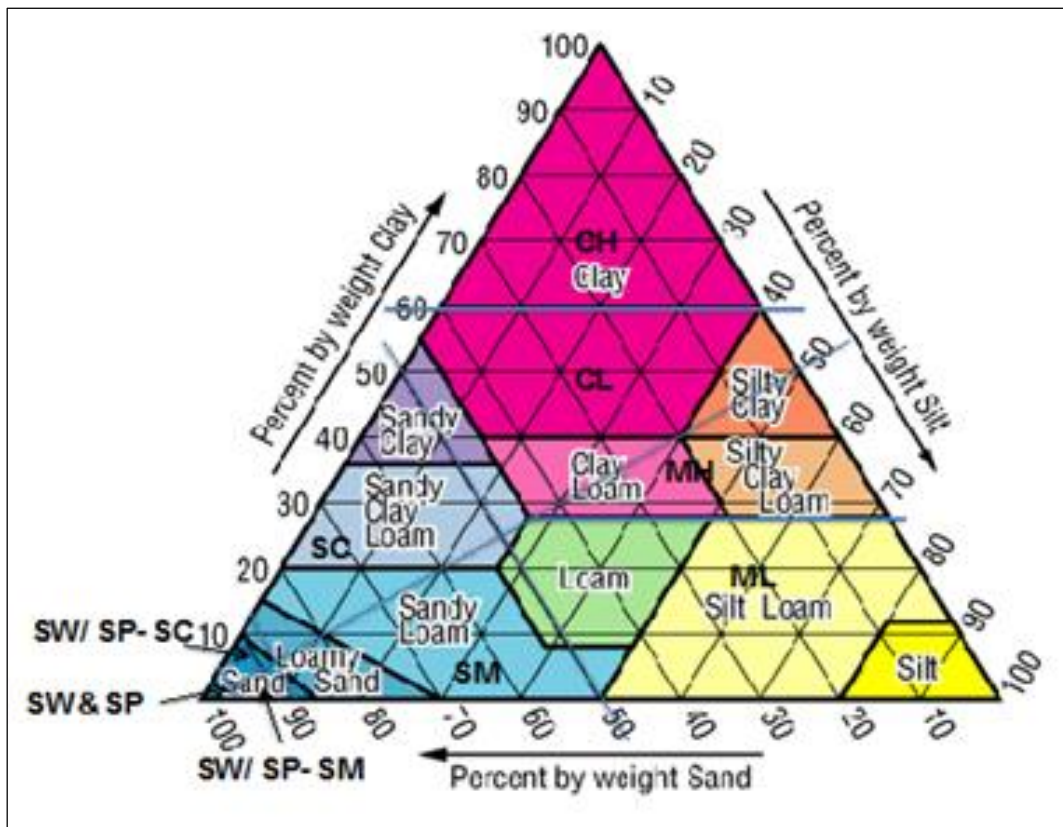


Figura 71. Relación entre clasificación de suelos USCS y USDA (García-Gaines & Frankenstein, 2015).

Respecto a los niveles superficiales de suelo, la parte superior de la ladera, representado por las muestras M3 y M4, corresponden a suelos de textura arenosa, mientras que la zona media e inferior (M1, M2, M5, M6 y M7) presentan una mayor cantidad de finos, representado por suelos de textura arenosa franca. El epipedon es

escaso en arcilla, pues ha migrado por lixiviación al horizonte B (probable horizonte árgico). El tamaño de las partículas lo hacen muy permeable, con macroporos que facilitan la infiltración y una buena aireación, no obstante, el horizonte árgico retiene mayor humedad. La ladera carece de cubierta arbórea, puesto que es una zona de extracción de pinus radiata alfombrada con abundantes restos de poda y matorrales dispersos. Sin embargo, a medida que se desciende en la ladera, el denso mantillo vegetal que cubre el suelo incrementa su espesor pasando de 2,5 cm en las muestras M3 y M4, a 7 cm en las muestras M1, M2, M5, M6 y M7.

6.3.1. Clasificación Textural del Suelo

La Figura 72 muestra los resultados del análisis textural de las muestras tomadas en terreno, junto a la clasificación entregada por el CIREN (1999) y Vivallos et al. (2010) para la Serie San Esteban, inicialmente clasificada según la USCS, reclasificada a la USDA.

Si bien el suelo tipo arena francosa (loamy sand) es el tipo de suelo más común en los niveles más superficiales determinados en terreno, este sólo se encuentra en los primeros centímetros del suelo, mientras que el suelo tipo franco arcillo arenoso (Sandy clay loam), el cual es el que define el CIREN (1999) para la Serie San Esteban, especialmente para niveles sub-superficiales y más profundos, concuerda además con Vivallos et al. (2010) para los suelos graníticos residuales con feldespatos alterados a arcilla (Creixell, 2001) y por la presencia de material arcilloso encontrado en perfiles verticales de las quebradas dentro de la ladera, las que

permitieron analizar, de manera parcial, la variación textural del suelo, por lo que es utilizado este tipo de clasificación textural para las simulaciones.

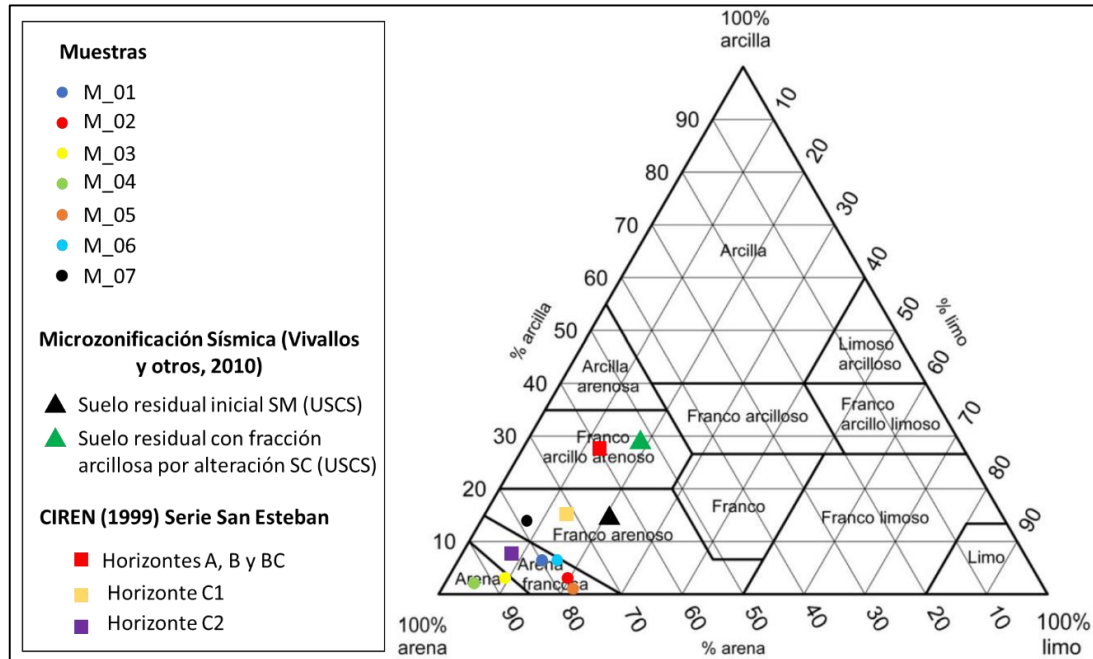


Figura 72: Clasificación de muestras tomadas en terreno, serie de suelos San Esteban de CIREN (1999) y Microzonificación sísmica (Vivallos et al., 2010).

Como menciona CIREN (1999), este tipo textural de suelo con más fracción arcillosa es el más común en regolitos graníticos del área de estudio, especialmente bajo la capa más gruesa de fracción arena identificada en este estudio como en CIREN (1999).

Para el caso de la totalidad de la cuenca, debido a la gran extensión en comparación al área de toma de muestras, se utiliza el suelo del tipo franco arcillo arenoso definido por CIREN (1999).

6.3.2. Erodabilidad

Parámetro que mide la susceptibilidad del suelo a la erosión por el agua o el viento, para el cual es necesario conocer, entre otros, el contenido de materia orgánica, que a su vez es importante en suelos forestales y especialmente en sectores silvícolas, debido al aporte de materia orgánica de la vegetación arbórea. En este caso, el valor de materia orgánica oscila entre 1.02 y 2.05 %, los que contribuyen a que las tasas de erodabilidad obtenidas, con promedio de 0.35 ton ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ cm⁻¹ (erodabilidad moderada), no sean aún más elevadas (Tabla 14).

6.4. Información Pluviométrica

Las principales fechas de ocurrencia de eventos históricos de remociones en masa detonados por lluvias intensas, tanto dentro como en las cercanías del área de estudio, son identificadas mediante la previa recopilación de información de reportes oficiales de SERNAGEOMIN y prensa local. Posteriormente, la información específica de las precipitaciones de cada fecha es adquirida de las estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas. Así, se analizaron los registros de precipitaciones con un periodo de acumulación de hasta 72 horas previas a la generación de remociones en masa. Este rango de tiempo es elegido ya que, según Mardones and Vidal (2001) debido a las características geológicas y geomorfológicas

propias del área metropolitana de Concepción, la acumulación de 100 milímetros de lluvias en un rango de 72 horas es considerada, en forma general, como un escenario ideal para la generación de remociones en masa en esta zona.

Tabla 14: Erodabilidad de muestras tomadas en terreno.

Muestra	Textura	Permeabilidad	Código Permeabilidad	Código Estructura	Materia Orgánica	Color	Erodabilidad (K) (t ha h ha ⁻¹ MJ ⁻¹ mm ⁻¹)
M_01	Arenosa franca	Elevada (4-15 cm/hr)	2	1	1.16	7.5 YR 2.5/3 (Café)	0.35. Moderada
M_02	Arenosa franca	Elevada (4-15 cm/hr)	2	2	1.44	7.5 YR 5/4 (Café)	0.39. Moderada
M_03	Arenosa	Muy rápida (> 15 cm/hr)	1	2	1.81	5 YR 5/8 (Café)	0.43. Alta
M_04	Arenosa	Muy rápida (> 15 cm/hr)	1	3	2.03	7.5 YR 2.5/3 (Café)	0.2. Baja
M_05	Arenosa franca	Elevada (4-15 cm/hr)	2	3	1.02	7.5 YR 4/3 (Café)	0.3. Moderada
M_06	Arenosa franca	Elevada (4-15 cm/hr)	2	3	2.05	5 YR 5/6 (Café)	0.42. Alta
M_07	Arenosa franca	Elevada (4-15 cm/hr)	2	3	1.79	7.5 YR 3/2	0.32. Moderada

Las principales precipitaciones que han gatillado remociones en masa se muestran en la Figura 73, donde se observa en la curva azul el máximo de precipitación

acumulado en 72 horas previo a los eventos de remociones en masa y en rojo el máximo de precipitación en 24 horas, mientras que la línea negra representa el umbral de 100 milímetros determinado por Mardones and Vidal (2001). Se observa que la mayoría de los eventos presentan una acumulación de precipitación de 72 horas superior a los 100 milímetros, y en aquellas que están cercanas a este límite, los registros históricos indican una acumulación de precipitación progresiva de fechas anteriores al máximo acumulado en 72 horas, lo que aumenta los niveles de saturación previa de los suelos y, por tanto, permiten generar estas condiciones de inestabilidad con acumulaciones menores a los 100 milímetros.

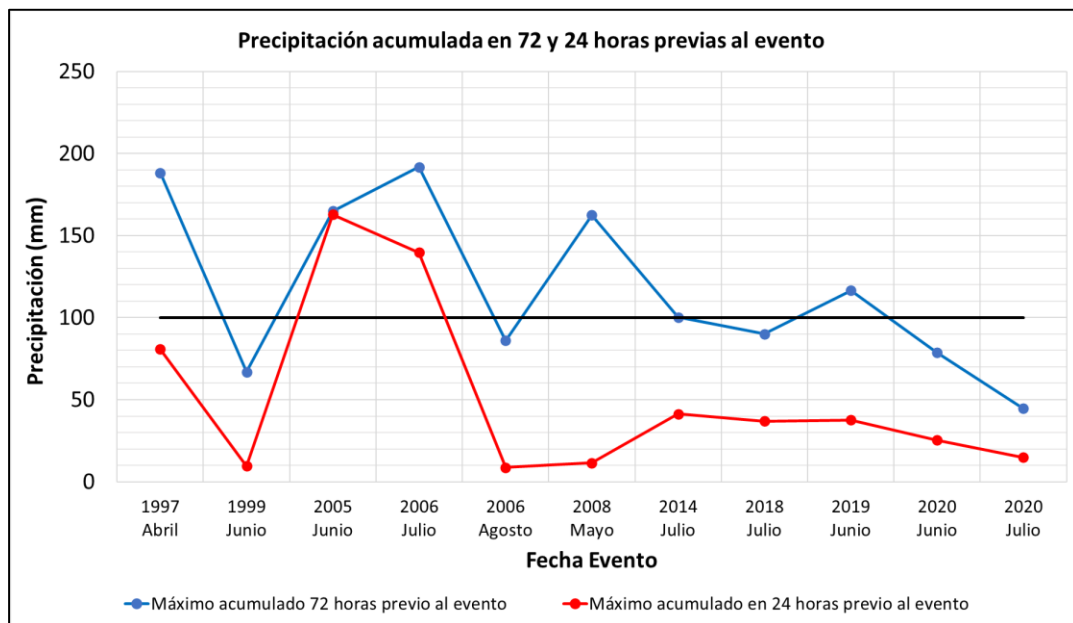


Figura 73. Principales precipitaciones gatillantes de remociones en masa en el área de estudio y zonas aledañas.

De estos eventos, fueron seleccionados el escenario de julio del 2006, donde cayeron aproximadamente 150 milímetros de lluvia en menos de 24 horas, lo cual gatilló la generación de remociones en masa cercanas al sector Palomares, en regolitos graníticos de la misma unidad geológica que los suelos del área de estudio, las cuales causaron la muerte de 12 personas, y el escenario de junio de 2019, el cual gatilló remociones en masa en distintas zonas de Concepción metropolitana, como también en la cuenca estudiada, con la mayor cantidad de daños en sectores pertenecientes a la ladera analizada en este trabajo.

Tanto el escenario de precipitación de julio del 2006 y junio del 2019 fueron simulados utilizando un registro total de 78 horas de precipitación, de manera de representar las horas previas y posteriores a las precipitaciones. La entrada de datos de precipitaciones en el modelo STEP-TRAMM se realiza en intervalos de 1 hora, durante 78 horas. Debido a que los datos meteorológicos obtenidos de las estaciones de la DGA para el caso de las precipitaciones de julio del 2006 entregan la información de precipitación diaria en intervalos de 6 horas, cada intervalo es dividido en 6 para obtener la precipitación por hora (Figura 74). Para el caso de las precipitaciones de junio de 2019, la estación meteorológica disponible entrega registros pluviométricos cada 30 minutos, por lo que los datos obtenidos son más precisos al trabajarlos en intervalos de 1 hora (Figura 75). lo que explica las diferencias en la continuidad de las curvas de intensidad de precipitación por hora y la precipitación acumulada entre ambos escenarios.

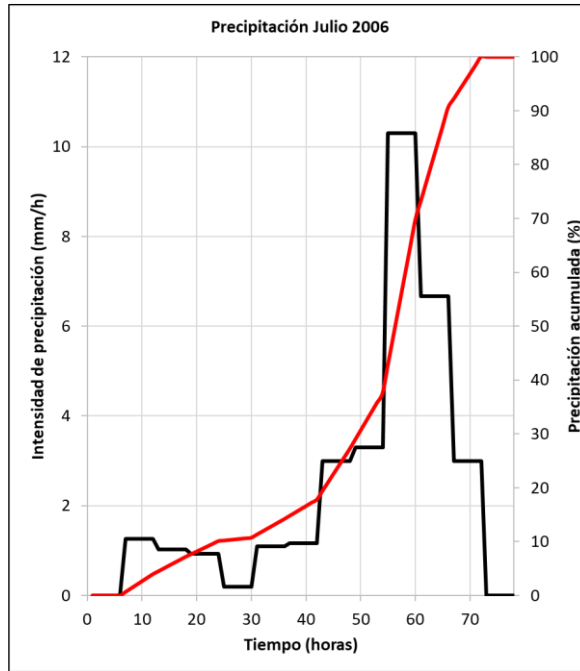


Figura 74. Serie de tiempo de precipitación, julio del 2006.

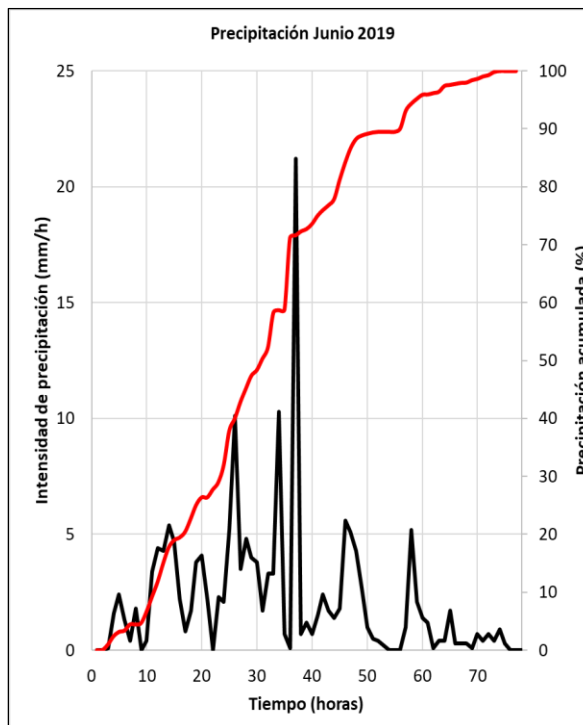


Figura 75. Serie de tiempo de precipitación, junio del 2019.

6.5. Catastro de Deslizamientos y Zonas con indicios de inestabilidad

Para el estudio de la ladera deforestada, fueron identificadas un total de 36 deslizamientos y/o indicios de inestabilidad. El estudio en terreno permitió identificar remociones en masa y zonas inestables ocurridas en un rango posterior al evento de precipitación de junio del año 2019 hasta junio del año 2021, mientras que mediante el análisis de imágenes satelitales permitió reconocer deslizamientos, zonas potencialmente inestables y modificaciones en la topografía en un rango desde el año 2002 al 2022 (Figura 76).

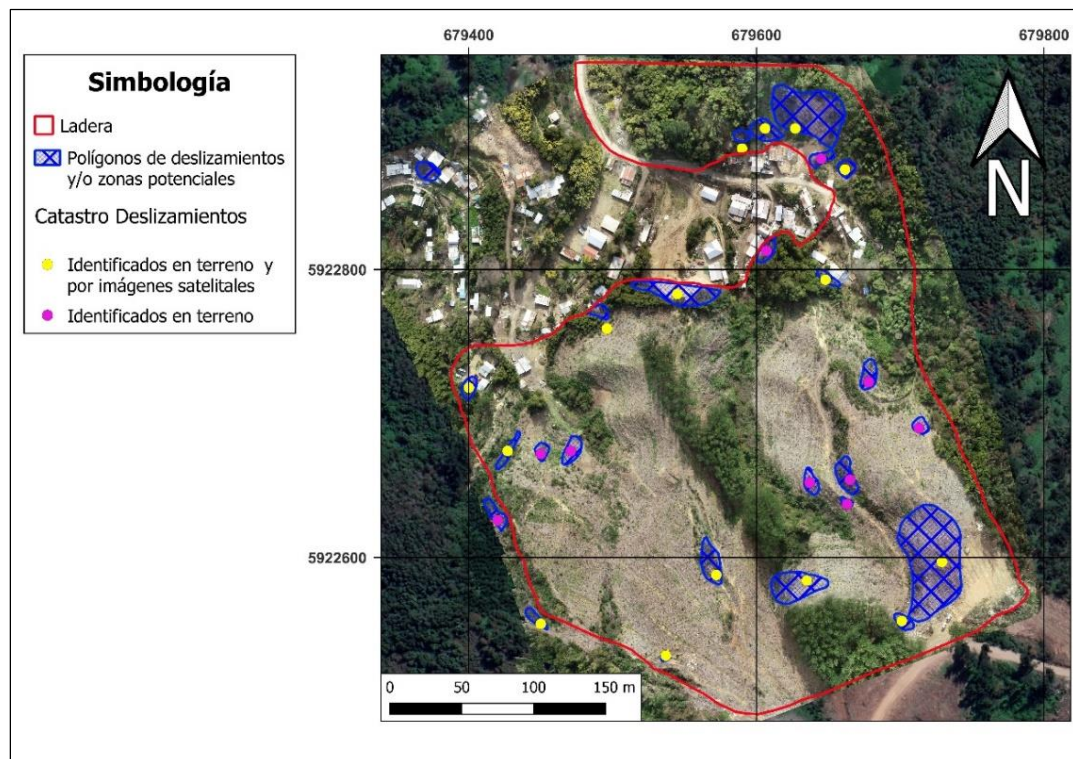


Figura 76. Ladera. Deslizamientos y/o zonas inestables identificadas en terreno e imágenes satelitales.

Para el caso de la cuenca Palomares, el catastro fue realizado en terreno para las zonas urbanas, mientras que, para áreas de acceso restringido, tales como las zonas forestales y la cantera, el estudio fue llevado a cabo mediante el análisis de imágenes satelitales, el cual permitió identificar la ocurrencia de deslizamientos en la zona urbana, cantera y distritos terrenos forestales posterior al evento de precipitación de junio del 2019, como también en rangos desde el año 2002 al 2022. Así, un total de 55 deslizamientos y/o indicios de inestabilidad fueron identificados, de los cuales 15 de éstos fueron observados en la ladera específica estudiada, tanto en imágenes satelitales como en terreno (Figura 77).

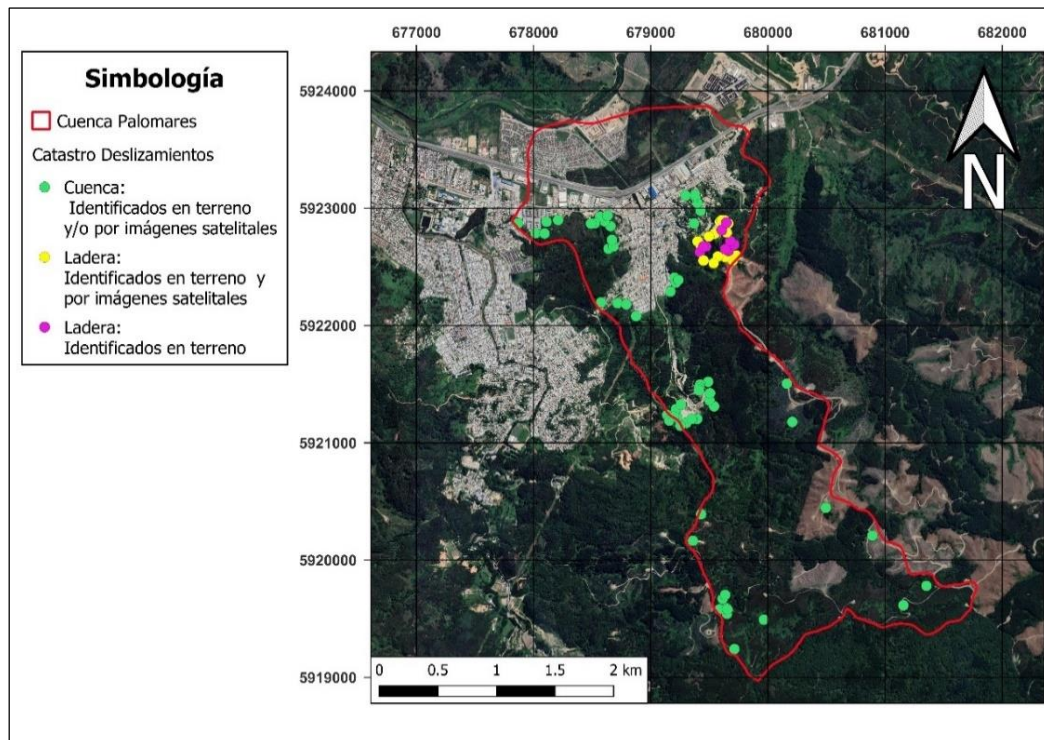


Figura 77. Cuenca. Deslizamientos y/o zonas inestables identificadas en terreno e imágenes satelitales

La Tabla 15 resume la información de los catastros realizados en el área de estudio, a nivel de cuenca y de la ladera deforestada analizada.

Tabla 15. Resumen de catastros de deslizamientos a nivel de cuenca y ladera.

Observaciones de terreno y fotointerpretación	Ladera	Cuenca
Área (Ha)	10.35	518.31
Área deforestada 2002-2022 (Ha)	8.1	132.3
Año(s) de evento de deforestación principal	2019	2004-2015-2020-2022
Área deforestada previa al evento principal (%)	17.1	4.63
Área deforestada posterior al evento principal (%)	78.26	25.53
Deslizamientos en zona deforestada (%)	95.65	90.62
Área máxima de deslizamiento (m ²)	2530.81	9775.526
Área total de deslizamiento (m ²)	7585.2	80211.26
Número de deslizamientos mayores a 3.46 m ² (ladera) y 86.6 m ² (cuenca)	36	55
Promedio de pendiente de deslizamientos (°)	31	29.11

6.6. Efectos de la deforestación en la ocurrencia de remociones en masa

El estudio de los efectos de la deforestación en la generación de remociones en masa se realiza asumiendo una pérdida total de la resistencia de las raíces después del proceso de deforestación (Lehmann et al., 2019). La cuantificación de los efectos

de la deforestación en la ocurrencia de remociones en masa simuladas es realizada usando el mismo evento de precipitación, en este caso julio del 2006 y junio del 2019, para el caso de la ladera, y sólo de junio del 2019 para la totalidad de la cuenca, en distintos mapas de cobertura vegetal; el primer mapa siendo el escenario forestado y el segundo posterior a la deforestación. Del mismo modo, todos los demás parámetros, como tipo textural del suelo, valores de cohesión de las raíces y del suelo, ángulo de fricción y el nivel de saturación inicial fueron utilizados de manera idéntica para las simulaciones en ambos escenarios, variándolos en conjunto para cada iteración.

Los parámetros mecánicos fueron establecidos con valores típicos. El ángulo de fricción interno fue establecido en 30° (Lu y otros, 2010), el valor de la resistencia de las raíces en 3 kPa (Sidle & Ochiai, 2006). La saturación inicial fue variada progresivamente de 0.5 a 0.7, en aumentos de 0.5, basado en la capacidad de campo de la mayoría de los suelos según el estudio de Assouline and Or (2014), pero también considerando los valores restantes entre 0 y 1, y la cohesión del suelo, ajustando los valores entre 1.0 y 3.0 kPa, en aumentos de 0.5 kPa, de manera de que no exista una detonación de remociones en masa inmediatamente después del inicio de las lluvias (el terreno no es demasiado inestable para empezar: remociones en masa gatilladas por lluvias en su mayoría son generadas horas e incluso días después del inicio del evento de precipitación intensa), y que para eventos de intensas lluvias algunas remociones en masa fueron detonadas en etapas posteriores en la simulación. Aquellos valores de saturación y cohesión que en

conjunto cumplieran estos criterios son aplicados para comparar los resultados antes y después de la deforestación en el área de estudio (Lehmann et al., 2019).

De manera general, al asumir idénticos parámetros mecánicos e hidrológicos, tanto para la ladera como para la totalidad de la cuenca, las simulaciones posteriores a la deforestación mostraron un incremento en el área de deslizamientos al compararlas con el escenario previo a la deforestación.

6.6.1. Cuantificación de deslizamientos simulados: Ladera

Las simulaciones de deslizamientos para la ladera estudiada fueron realizadas utilizando un espaciamiento de grilla de 2 m e intervalos de tiempo de 1 minuto. Esta alta resolución es sugerida ya que beneficia considerablemente el modelamiento de la división y partición de la dinámica del agua de lluvia a procesos de infiltración, escorrentía y simulación de las dinámicas de escorrentía. La resolución espacial de la grilla de espaciamiento de 2 m (ΔL) implica un área de deslizamiento mínima de 3.46 m², ya que el área seccional de una celda hexagonal equivale a $(\sqrt{3} \times \Delta L^2)/2$. Respecto a los parámetros mecánicos e hidrológicos, tanto para el evento de precipitación de julio de 2006 como junio de 2019, los valores que satisficieron los requerimientos de simulación corresponden a una cohesión del suelo de 1 kPa, mientras que los valores de saturación del suelo fueron variados de 0.1 a 0.9, donde los valores entre 0.5 a 0.8 representan el rango que cumple de mejor manera los criterios de simulación para ambos eventos, donde el límite inferior está marcado por la generación de deslizamientos en zonas donde previamente se han identificado

remociones en masa, mientras que el límite superior lo delimita la ocurrencia de deslizamientos al inicio del evento de precipitación, o bien escenarios de poca precipitación donde históricamente no se tienen registros de deslizamientos ocurridos en el área de estudio con aquella caída de lluvia en el tiempo determinado, además de considerar los rangos típicos de capacidad de campo de la mayoría de los suelos determinados por Assouline and Or (2014) que varían entre 0.5 y 0.7.

6.6.1.1. Precipitación junio de 2006

Para el escenario pre-deforestación, cerca del 90% de las remociones simuladas son generadas en zonas sin presencia de vegetación, mientras que en el escenario post-deforestación el porcentaje de deslizamientos generados en zonas deforestada aumenta a un 95%. En ambos escenarios los deslizamientos simulados ocurren en pendientes de aproximadamente 30°. La Figura 78 muestra la tasa entre el volumen y el área de los deslizamientos simulados a distintos niveles de saturación para los dos escenarios, donde los valores obtenidos varían entre 0.7 y 1, aumentando gradualmente a medida que se incrementa el nivel de saturación del suelo, donde el escenario post-deforestación presenta valores levemente superiores a la pre-deforestación.

Las curvas de generación del primer deslizamiento según la cantidad de tiempo y precipitación representan de buena manera los límites donde se encuentran los rangos de saturación considerados que mejor se ajustan a las características del área de estudio. Al comparar los escenarios pre y post-deforestación, se observa una

disminución tanto en la cantidad de tiempo como en la precipitación necesaria para la generación del primer deslizamiento bajo un mismo nivel de saturación del suelo (Figura 79).

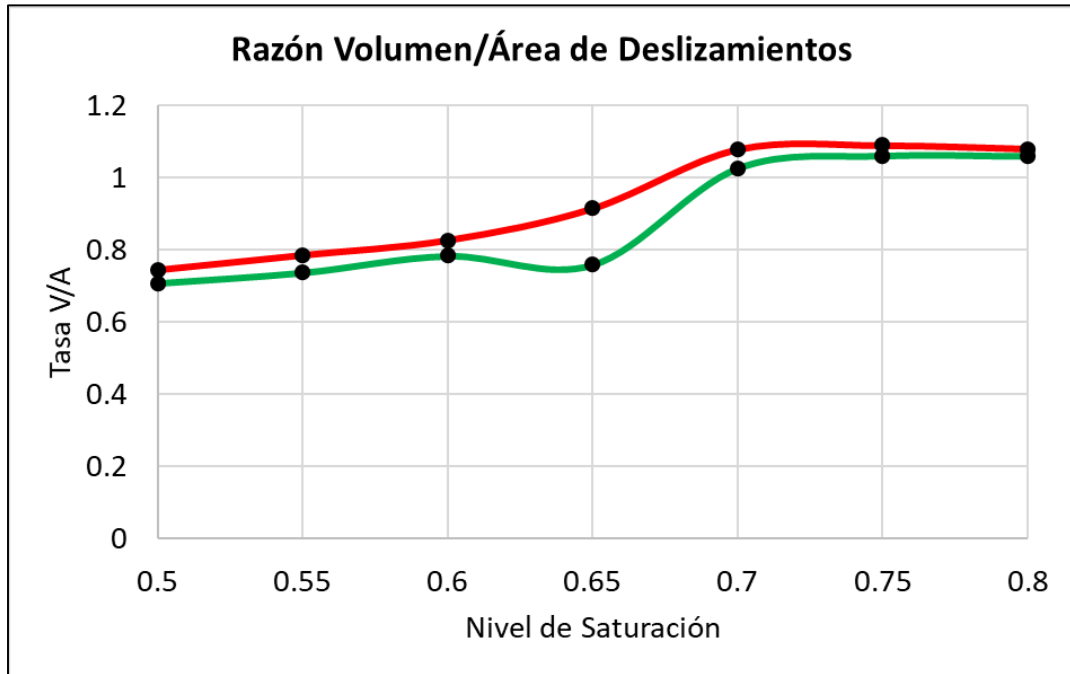


Figura 78. Variación de tasa entre volumen y área de deslizamientos, con el nivel de saturación, para el escenario de pre-deforestación (verde) y post-deforestación (rojo).

Así, para el escenario pre-deforestación, una saturación de 0.5 implica la generación de deslizamientos desde las 56 horas y con una acumulación de 147.3 mm, los cuales disminuyen considerablemente hasta las 36 horas y 36 mm de acumulación para un nivel de saturación de 0.8, mientras que, para la post-deforestación, el primer deslizamiento se genera a las 52 horas y 113.5 mm de lluvia, hasta 33 horas y 30.7 mm, para los niveles de saturación de 0.5 y 0.8, respectivamente.

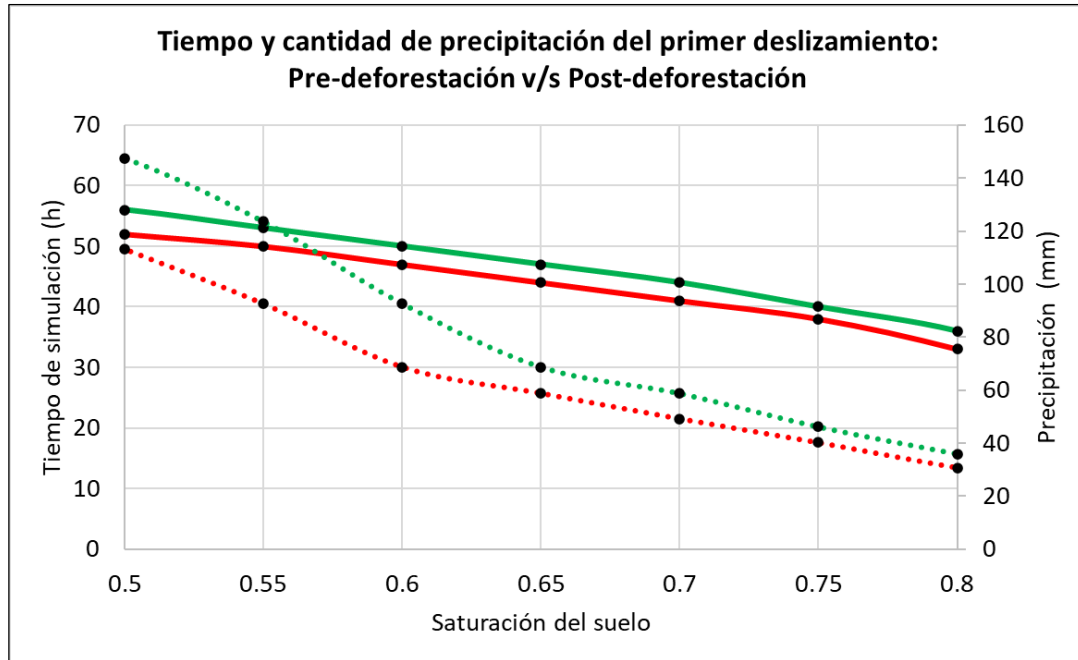


Figura 79. Tiempo (línea continua, eje izquierdo) y precipitación (línea discontinua, eje derecho) al momento de generación de primer deslizamiento, para distintos niveles de saturación del suelo de ladera estudiada. Comparación entre escenario pre-deforestación (verde) y post-deforestación (rojo).

Un resumen de los datos obtenidos para el escenario pre-deforestación y post-deforestación son dispuestos en las Tabla 16 y Tabla 17, respectivamente. Al compararlas, resalta principalmente el aumento en el número de deslizamientos simulados posterior a la deforestación, llegando a triplicar el número en el escenario previo a la cosecha, como también las áreas máximas y totales de deslizamientos simulados.

Al analizar la proporción entre el área de total de deslizamientos simulados post y pre-deforestación: $\frac{\text{Área total de deslizamiento Post-deforestación (m}^2\text{)}}{\text{Área total de deslizamiento Pre-deforestación (m}^2\text{)}}$, los valores obtenidos varían entre aproximadamente 2.5 y 4.

Tabla 16. Resultados de simulaciones en ladera estudiada, para el escenario de pre-deforestación a distintos niveles de saturación del suelo.

Resultados de Simulación	Nivel de Saturación del Suelo						
	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8
Pre-deforestación							
Deslizamientos en zona deforestada (%)	89.2	92.04	91.68	91.5	91.3	92.38	89.72
Área máxima de deslizamiento (m ²)	65.82	65.82	96.99	96.99	103.92	128.17	128.17
Área total de deslizamiento (m ²)	304.82	391.42	481.47	474.55	620.04	668.54	678.92
Número de deslizamientos mayores a 3.46 m ²	20	23	22	22	23	26	29
Promedio de pendiente de deslizamientos (°)	32.46	31.61	34.1	32.2	33.55	33.04	34.39
Hora de generación (h) y precipitación acumulada (mm) de primer deslizamiento	56- 147.3	53- 123.5	50- 92.6	47- 68.7	44- 58.8	40- 46.2	36- 36

Tabla 17: Resultados de simulaciones en ladera estudiada, para el escenario de pre-deforestación a distintos niveles de saturación del suelo.

Resultados de Simulación	Nivel de Saturación del Suelo						
	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8
Post-deforestación							
Deslizamientos en zona deforestada (%)	94.88	96.42	97.1	96.91	96.87	95.16	95.94
Área máxima de deslizamiento (m ²)	107.39	155.88	155.88	166.28	387.98	245.95	336.02
Área total de deslizamiento (m ²)	789.75	1087.66	1499.86	1787.89	2445.56	2656.86	2629.09
Número de deslizamientos mayores a 3.46 m ²	43	52	64	72	71	77	85
Promedio de pendiente de deslizamientos (°)	30.93	30.28	31.04	29.91	30.22	30.01	30.69
Hora de generación (h) y precipitación acumulada (mm) de primer deslizamiento	52- 113.5	50- 92.6	47- 68.7	44- 58.8	41- 49.2	38- 40.2	33- 30.7

Estos valores relativamente bajos indican que una fracción no despreciable de los deslizamientos simulados ocurren en ciertas zonas que ya estaban previamente ausentes de vegetación antes del evento de deforestación principal estudiado, por lo

que, para una misma zona que cumpla con esta característica, en ambos escenarios se simularán deslizamientos, ya que ha mantenido su estado de deforestación antes y después de la cosecha forestal analizada. Esta razón aumenta junto al nivel de saturación del suelo, indicando un aumento progresivo de deslizamientos simulados en el área de cosecha, la cual estaba previamente forestada y sin deslizamientos simulados (Figura 80).

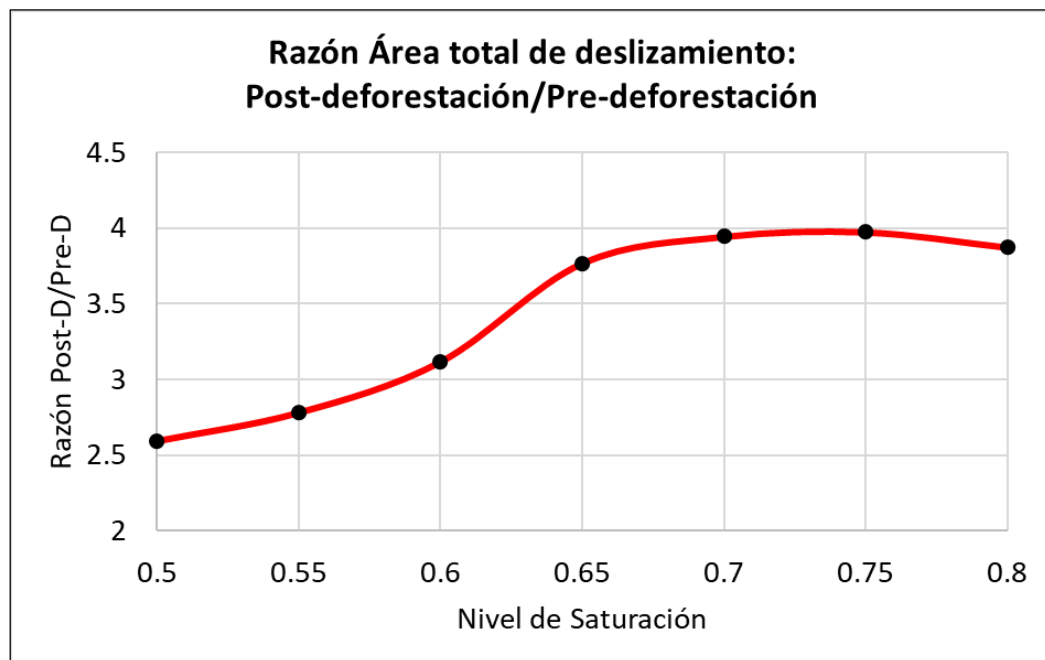


Figura 80: Razón de área total de deslizamientos entre escenario post y pre deforestación.

En las siguientes Figuras (Figura 81, Figura 82, Figura 83, Figura 84, Figura 85, Figura 86, y Figura 87) se observan los gráficos de precipitación junto a las áreas acumuladas de deslizamientos simulados para el escenario pre y post-deforestación, junto al modelo de deslizamientos generados para cada escenario, entre los rangos de nivel de saturación del suelo entre 0.5 y 0.8.

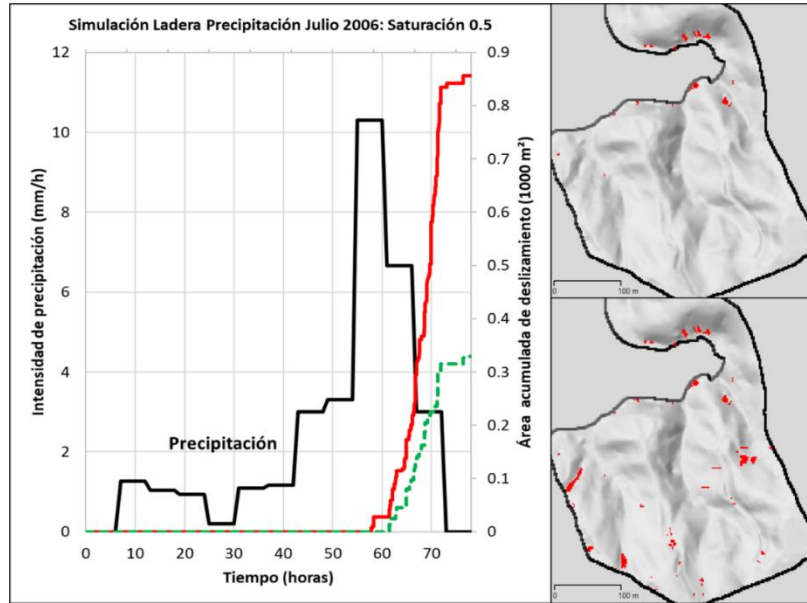


Figura 81: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de julio 2006, saturación del suelo de 0.5. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.

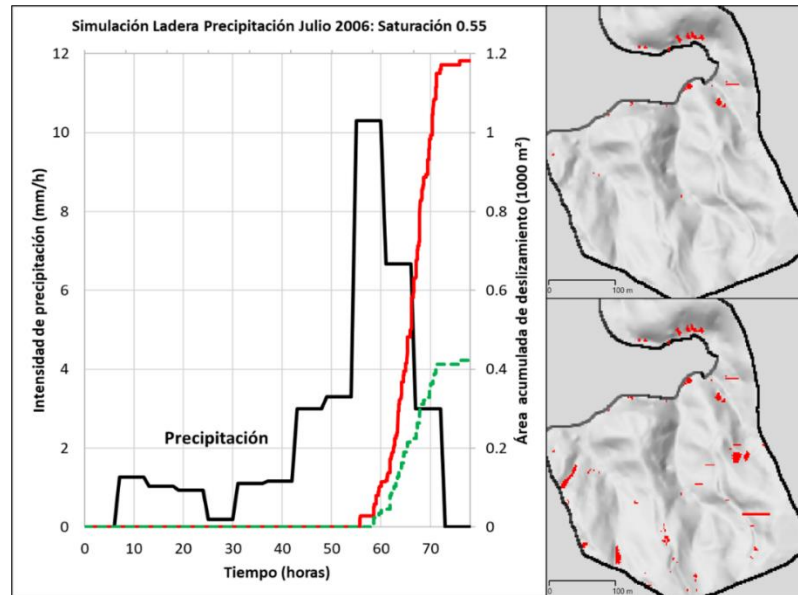


Figura 82: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de julio 2006, saturación del suelo de 0.55. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.

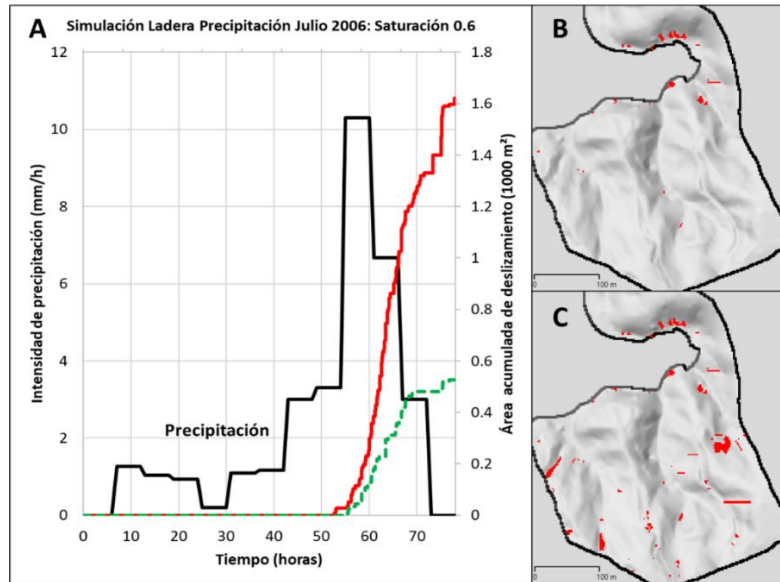


Figura 83: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de julio 2006, saturación del suelo de 0.6 Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.

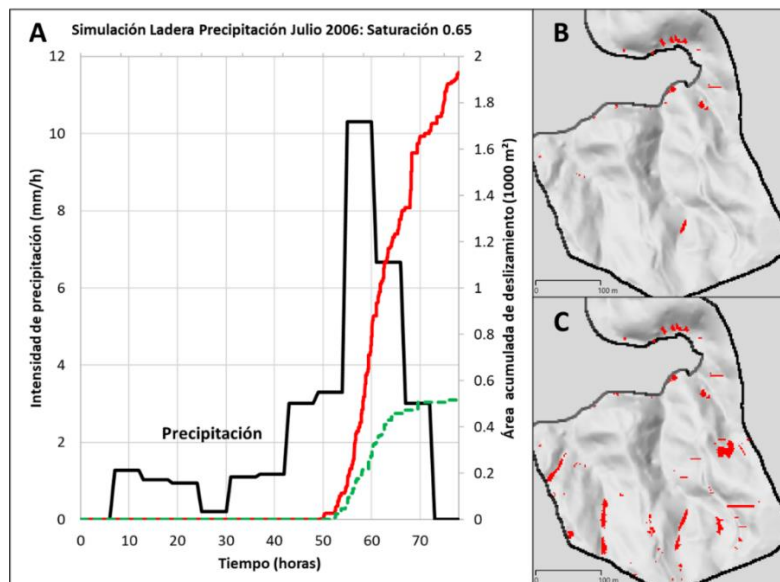


Figura 84: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de julio 2006, saturación del suelo de 0.65 Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.

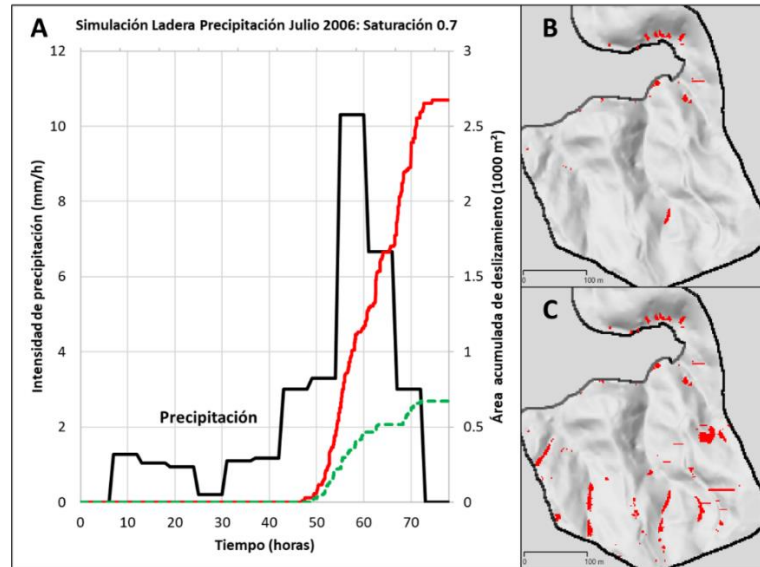


Figura 85: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de julio 2006, saturación del suelo de 0.7. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.

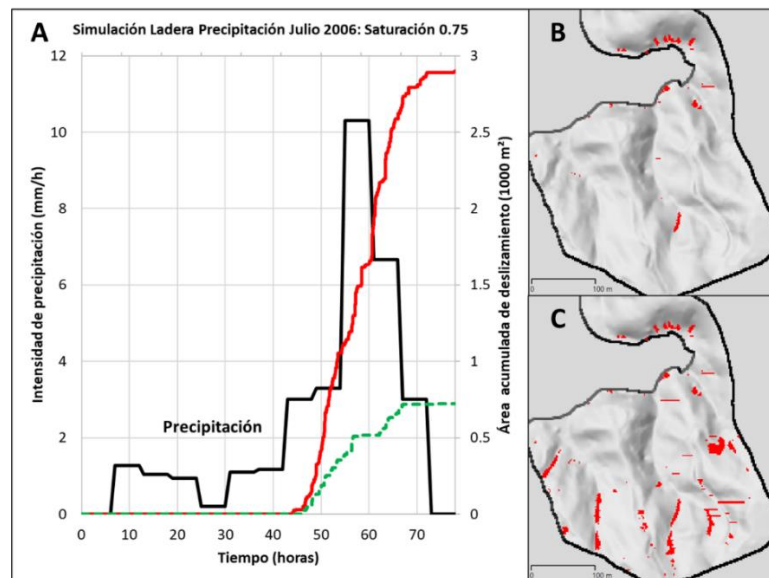


Figura 86: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de julio 2006, saturación del suelo de 0.75. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.

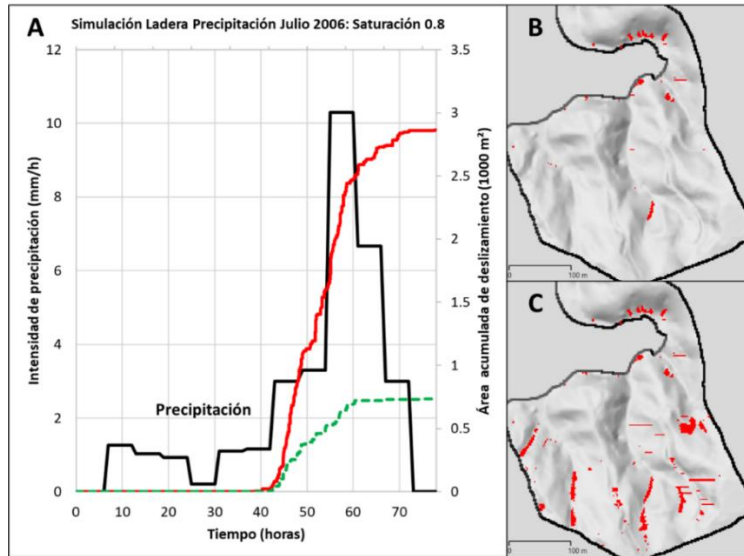


Figura 87: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de julio 2006, saturación del suelo de 0.8. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.

A medida que aumenta la saturación del suelo, también aumenta el área acumulada de deslizamientos simulados para ambos escenarios, mientras que el tiempo transcurrido desde el inicio de las principales remociones en masa disminuye progresivamente, tanto para el escenario pre-deforestación (Figura 88) y post-deforestación (Figura 89). A su vez, aumenta el número de deslizamientos simulados, especialmente en el escenario post-deforestación.

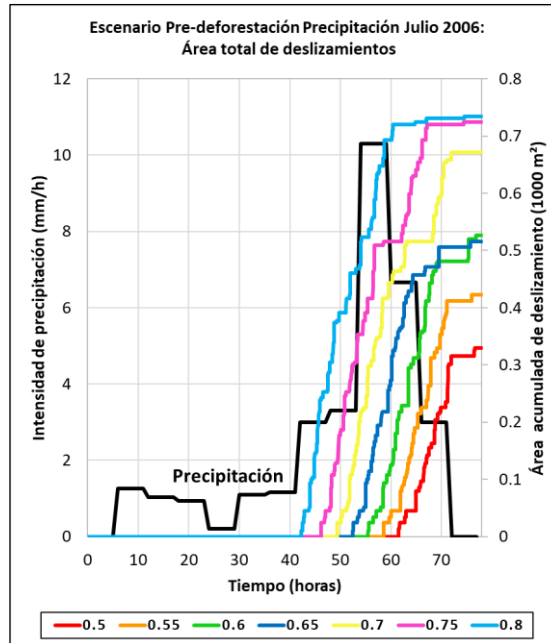


Figura 88: Área acumulada de deslizamientos simulados para distintos niveles de saturación del suelo (curvas de colores), para el evento de precipitación de julio 2006. Escenario pre-deforestación.

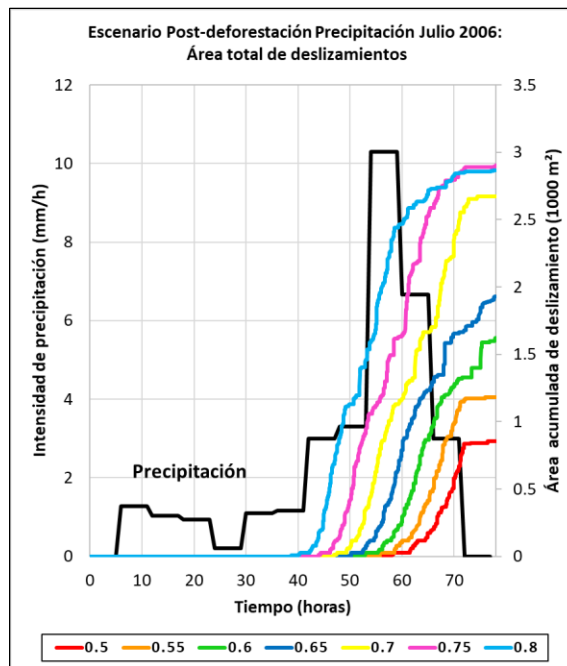


Figura 89: Área acumulada de deslizamientos simulados para distintos niveles de saturación del suelo (curvas de colores), para el evento de precipitación de julio 2006. Escenario post-deforestación.

6.6.1.2. Precipitación julio de 2019

Para el escenario pre-deforestación, cerca del 90% de las remociones simuladas son generadas en zonas sin presencia de vegetación, mientras que en el escenario post-deforestación el porcentaje de deslizamientos generados en zonas deforestada aumenta sobre el 95%.

En el escenario pre-deforestación, los deslizamientos simulados ocurren en pendientes ligeramente sobre 30° (máxima de 32.94°), mientras que en el post-deforestación, las pendientes son de aproximadamente 30°, pero con valores levemente menores (29.61°) en comparación con el escenario pre-deforestación. La Figura 90 muestra la tasa entre el volumen y el área de los deslizamientos simulados a distintos niveles de saturación para los dos escenarios, donde los valores obtenidos varían entre 0.7 y 1, aumentando gradualmente a medida que se incrementa el nivel de saturación del suelo, donde el escenario post-deforestación presenta valores levemente superiores a la pre-deforestación.

El tiempo transcurrido y la precipitación caída para la generación del primer deslizamiento simulado para los escenarios pre y post-deforestación observados en la Figura 91 muestran una disminución tanto en la cantidad de tiempo como en la precipitación necesaria para la generación del primer deslizamiento bajo un mismo nivel de saturación del suelo.

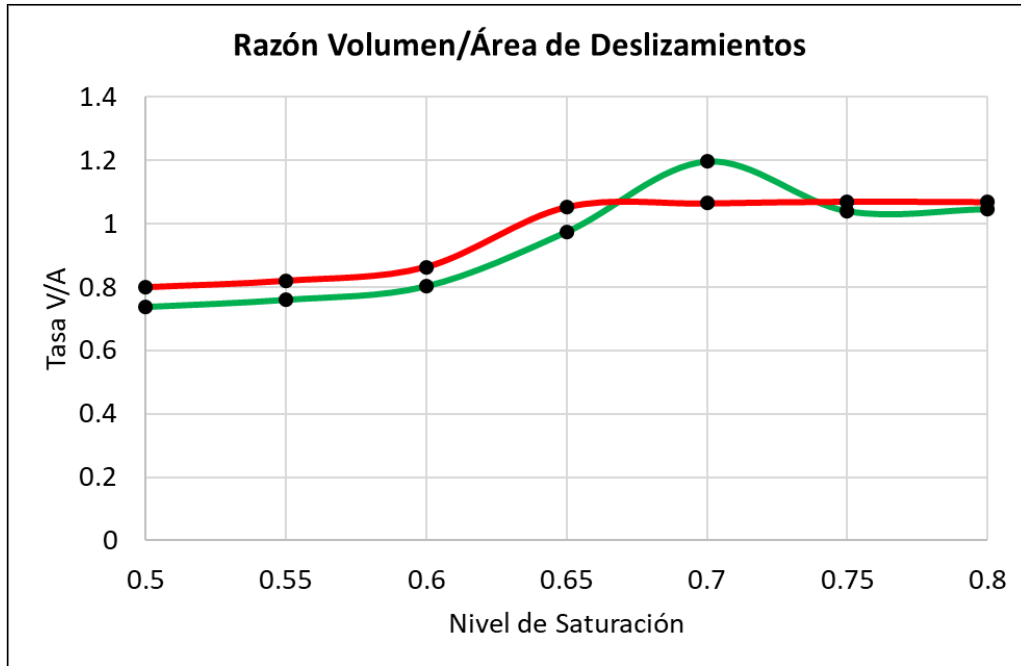


Figura 90. Variación de tasa entre volumen y área de deslizamientos, con el nivel de saturación, para el escenario de pre-deforestación (verde) y post-deforestación (rojo).

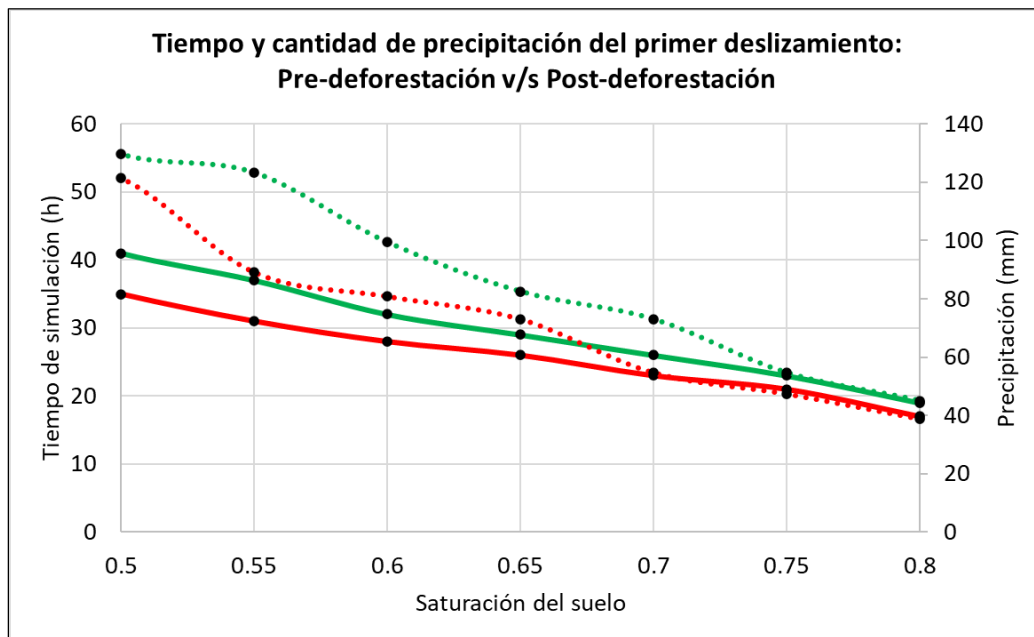


Figura 91. Tiempo (línea continua, eje izquierdo) y precipitación (línea discontinua, eje derecho) al momento de generación de primer deslizamiento, para distintos niveles de saturación del suelo de ladera estudiada. Comparación entre escenario pre-deforestación (verde) y post-deforestación (rojo).

Así, para el escenario pre-deforestación, una saturación de 0.5 implica la generación de deslizamientos desde las 41 horas y con una acumulación de 129.6 mm, los cuales disminuyen considerablemente hasta las 19 horas y 45 mm de acumulación para un nivel de saturación de 0.8, mientras que, para la post-deforestación, el primer deslizamiento se genera a las 35 horas y 121.4 mm de lluvia, hasta 17 horas y 38.7 mm, para los niveles de saturación de 0.5 y 0.8, respectivamente.

El total de los datos obtenidos para el escenario pre-deforestación y post-deforestación se muestran en las Tabla 18 y Tabla 19, respectivamente, indicando un aumento en el número de deslizamientos simulados posterior a la deforestación, llegando a triplicar el número en el escenario previo a la cosecha, como también las áreas máximas y totales de deslizamientos simulados.

Tabla 18. Resultados de simulaciones en ladera estudiada, para el escenario de pre-deforestación a distintos niveles de saturación del suelo.

Resultados de Simulación	Nivel de Saturación del Suelo						
	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8
Pre-deforestación							
Deslizamientos en zona deforestada (%)	92.37	91.86	87.3	91.54	92.3	89.72	86.06
Área máxima de deslizamiento (m ²)	65.82	96.99	96.99	96.99	103.92	128.17	128.17
Área total de deslizamiento (m ²)	388	478.02	498.8	564.61	547.74	713.56	713.57
Número de deslizamientos mayores a 3.46 m ²	24	23	26	24	26	29	29
Promedio de pendiente de deslizamientos (°)	31.2	31.89	31.3	32.11	32.94	32.18	32.63
Hora de generación (h) y precipitación acumulada (mm) de primer deslizamiento	41- 129.6	37- 123.3	32- 99.4	29- 82.5	26- 73	23- 54.6	19- 45

Tabla 19: Resultados de simulaciones en ladera estudiada, para el escenario de post-deforestación a distintos niveles de saturación del suelo

Resultados de Simulación	Nivel de Saturación del Suelo						
	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8
Post-deforestación							
Deslizamientos en zona deforestada (%)	96.74	96.95	96.78	97.11	96.89	96.04	95.6
Área máxima de deslizamiento (m ²)	176.67	185.68	356.8	363.73	387.98	391.44	391.44
Área total de deslizamiento (m ²)	789.75	1087.66	1499.86	1787.89	2445.56	2656.86	2629.09
Número de deslizamientos mayores a 3.46 m ²	58	62	69	77	79	83	86
Promedio de pendiente de deslizamientos (°)	29.79	30.47	30.4	29.61	30.57	30.24	30.95
Hora de generación (h) y precipitación acumulada (mm) de primer deslizamiento	35-	31-	28-	26-	23-	21-	17-
	121.4	89.1	80.8	73	54.6	47.3	38.7

La proporción entre el área de total de deslizamientos simulados post y pre-deforestación: varían entre aproximadamente 3 y 5. indicando que una fracción no despreciable de los deslizamientos simulados ocurren en ciertas zonas que ya estaban previamente ausentes de vegetación antes del evento de deforestación principal estudiado (Figura 92).

En las siguientes Figuras (Figura 93, Figura 94, Figura 95, Figura 96, Figura 97, Figura 98, y Figura 99) se observan los gráficos de precipitación junto a las áreas acumuladas de deslizamientos simulados para el escenario pre y post-deforestación, junto al modelo de deslizamientos generados para cada escenario, entre los rangos de nivel de saturación del suelo entre 0.5 y 0.8.

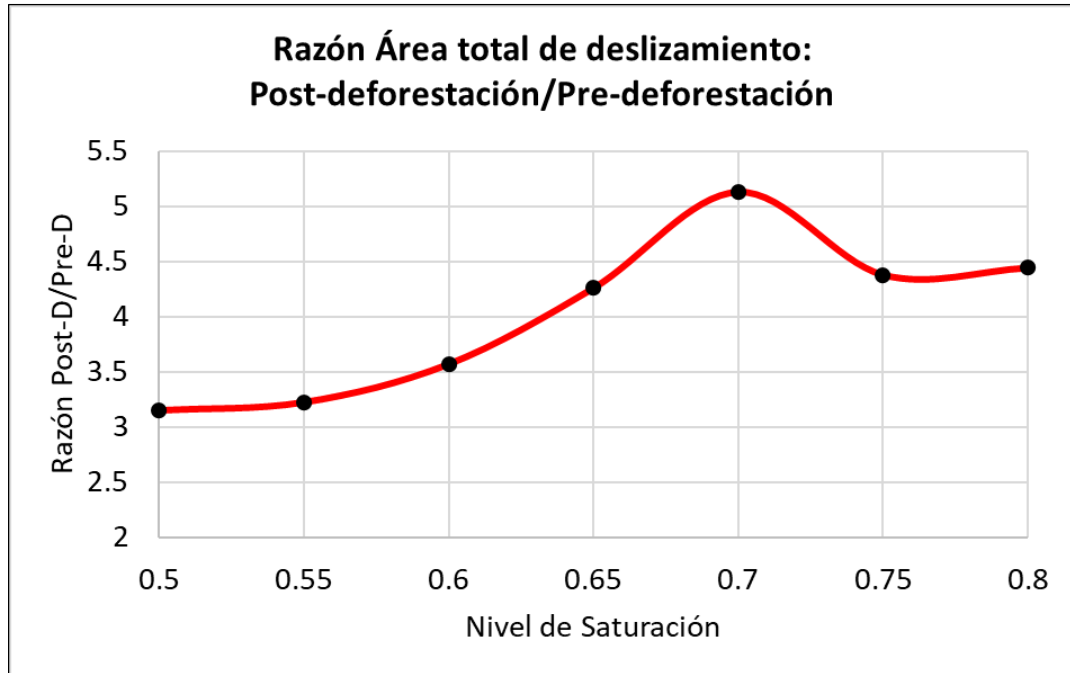


Figura 92. Razón de área total de deslizamientos entre escenario post y pre deforestación.

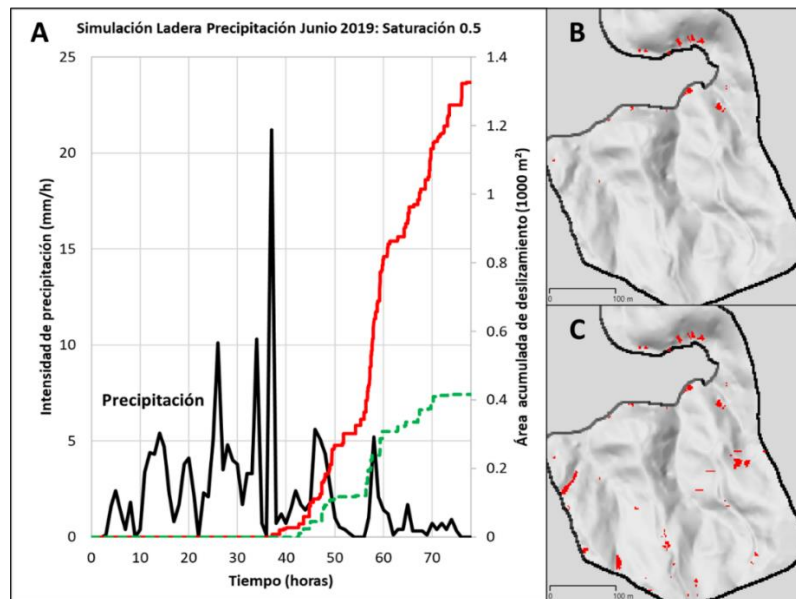


Figura 93. Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.5. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.

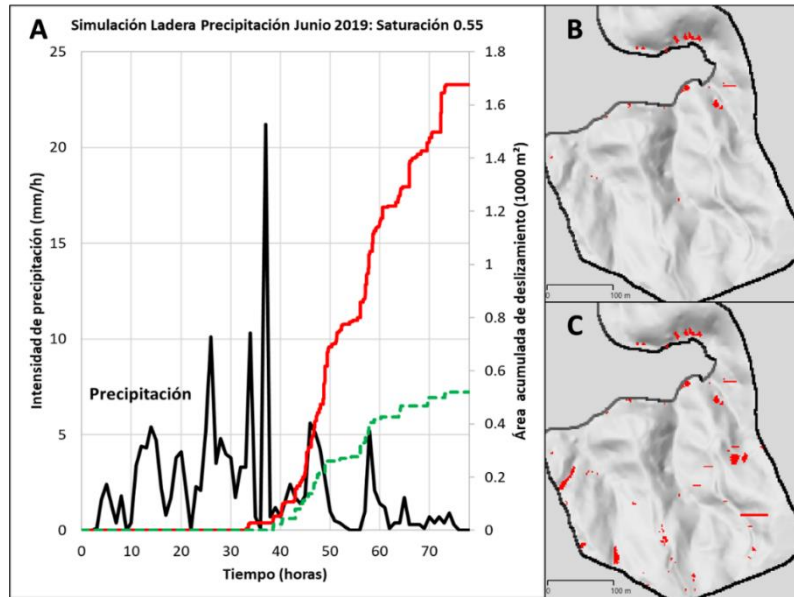


Figura 94. Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.55. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.

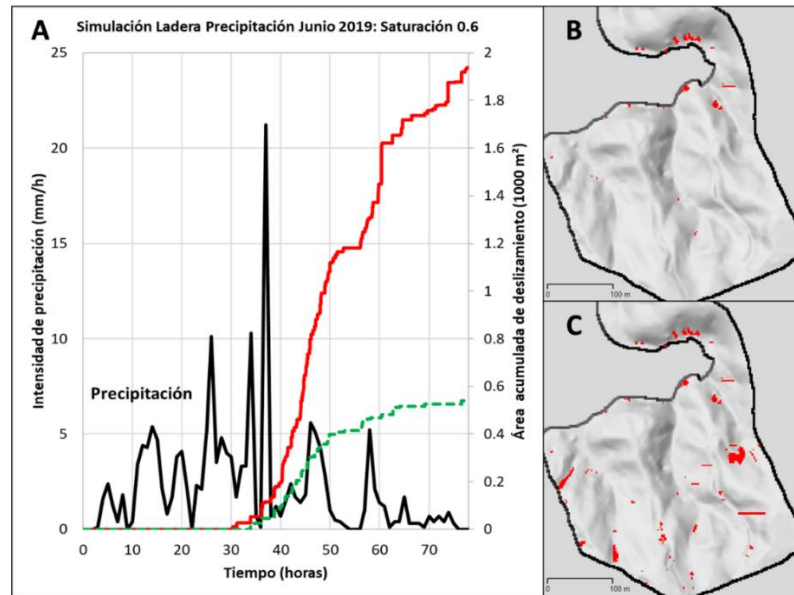


Figura 95. Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.6. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.

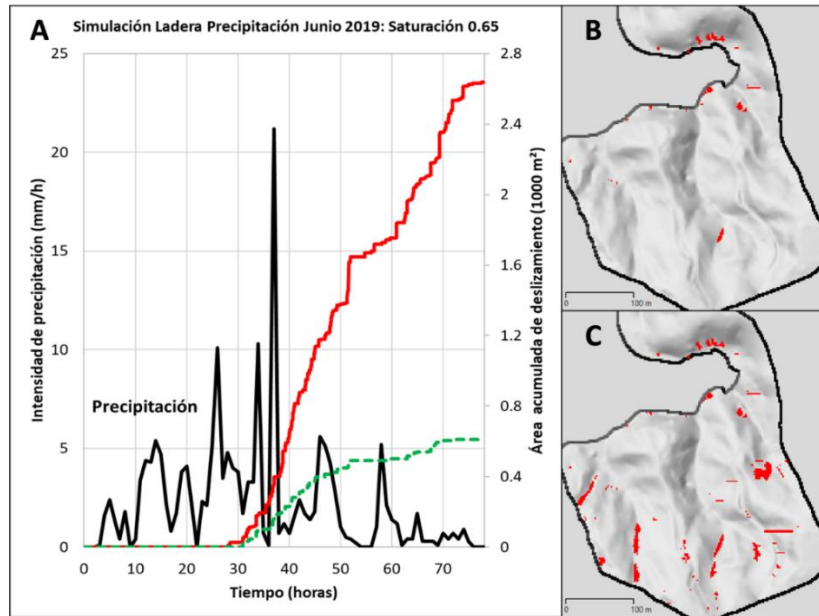


Figura 96: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.65. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.

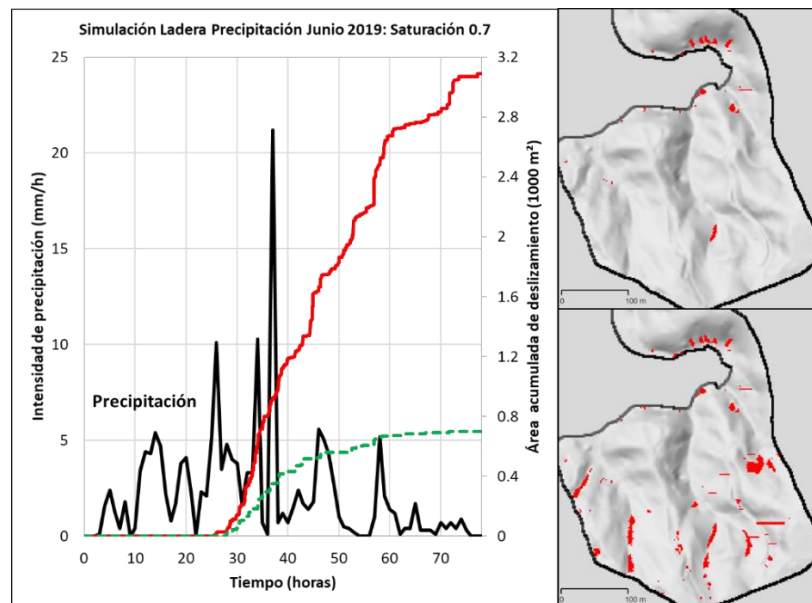


Figura 97: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.7. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.

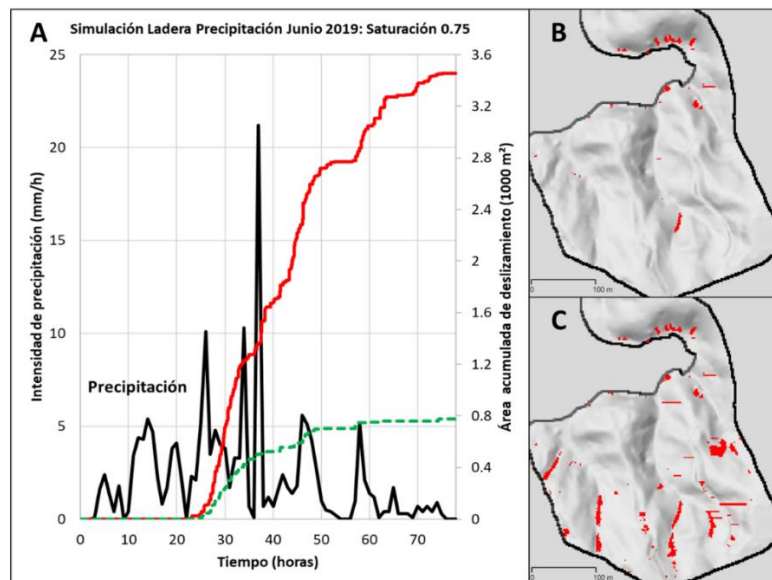


Figura 98. Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.75. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.

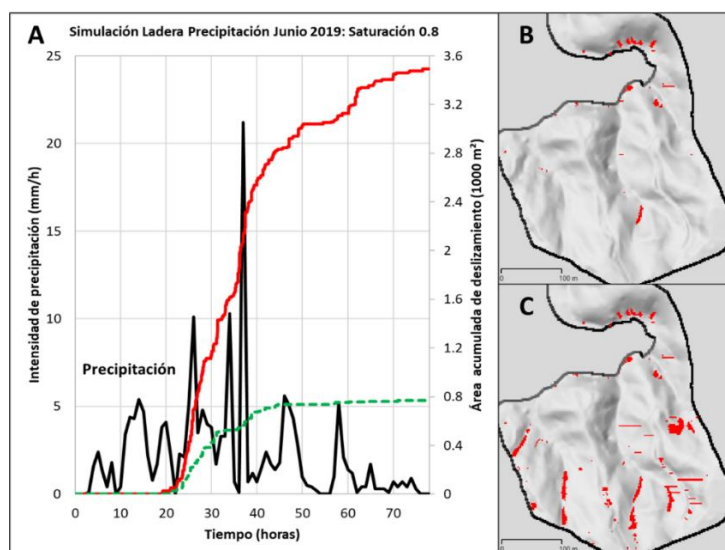


Figura 99. Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.8. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.

A medida que aumenta la saturación del suelo, también aumenta el área acumulada de deslizamientos simulados para ambos escenarios, mientras que el tiempo transcurrido desde el inicio de las principales remociones en masa disminuye progresivamente, tanto para el escenario pre-deforestación (Figura 100) y post-deforestación (Figura 101). A su vez, aumenta el número de deslizamientos simulados, especialmente en el escenario post-deforestación.

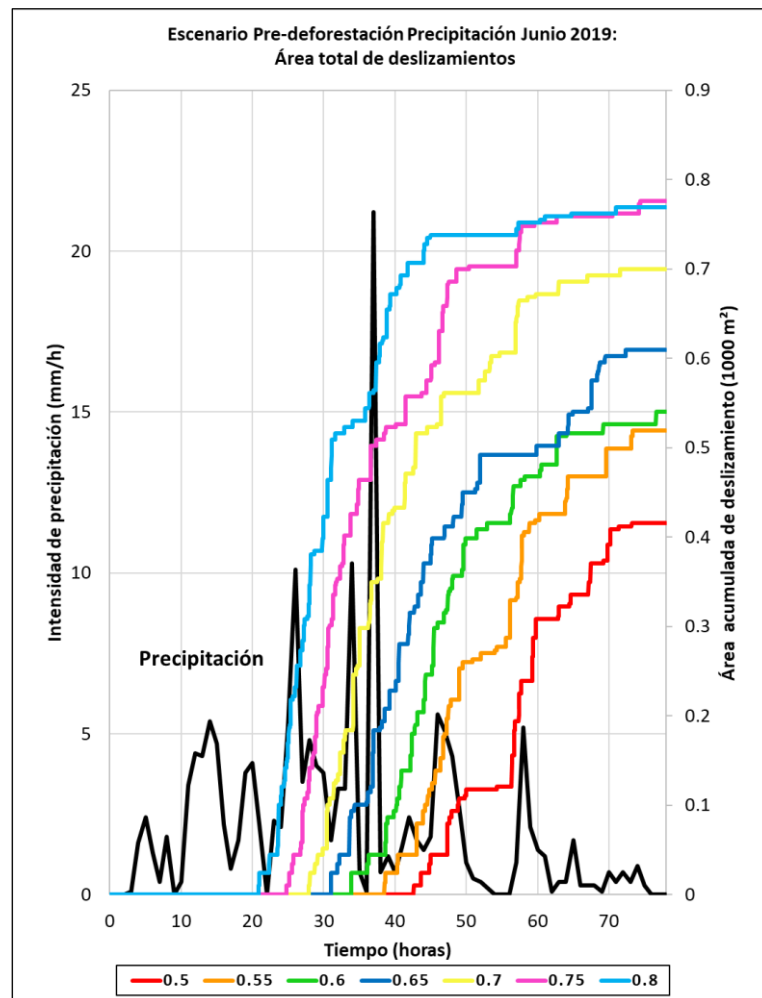


Figura 100. Área acumulada de deslizamientos simulados para distintos niveles de saturación del suelo (curvas de colores), para el evento de precipitación de junio 2019. Escenario pre-deforestación.

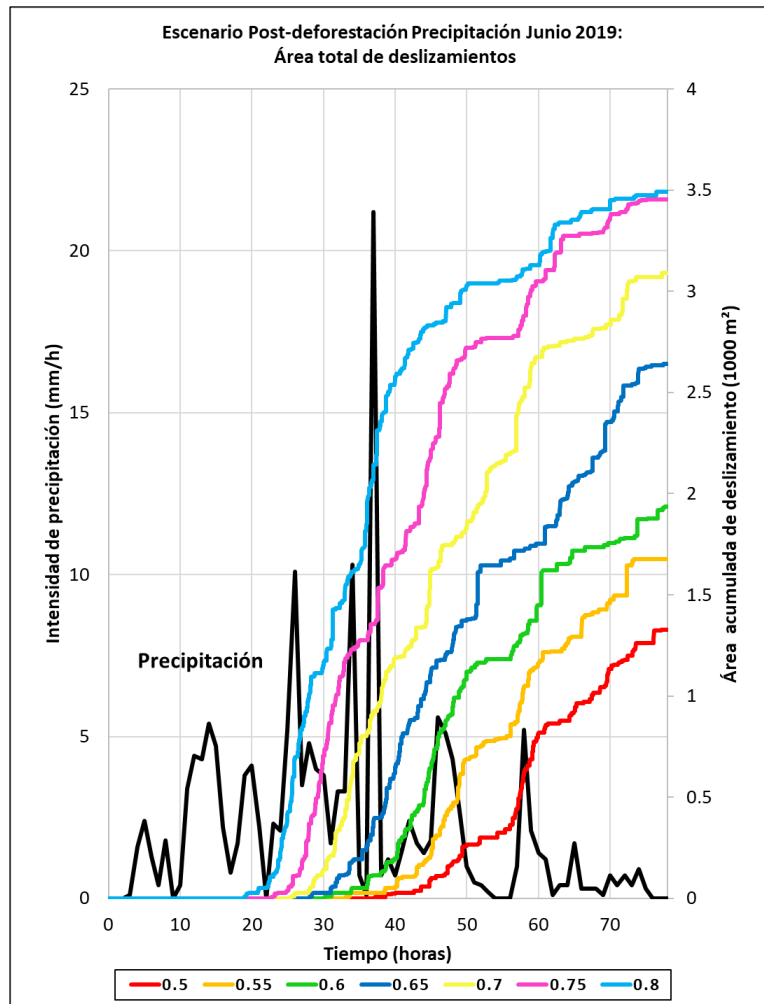


Figura 101. Área acumulada de deslizamientos simulados para distintos niveles de saturación del suelo (curvas de colores), para el evento de precipitación de junio 2019. Escenario post-deforestación.

6.6.2. Cuantificación de deslizamientos simulados: Cuenca

Las simulaciones de deslizamientos para la ladera estudiada fueron realizadas utilizando un espaciamiento de grilla de 10 m e intervalos de tiempo de 1 minuto. La resolución espacial de la grilla de espaciamiento de 10 m (ΔL) implica un área de

deslizamiento mínima de 86.6 m². Respecto a los parámetros mecánicos e hidrológicos, los valores que satisficieron los requerimientos de simulación corresponden a una cohesión del suelo de 3.0 kPa, mientras que los valores de saturación del suelo fueron variados de 0.1 a 0.9, donde los valores entre 0.5 a 0.7 representan el rango que cumple de mejor manera los criterios de simulación para ambos eventos, donde el límite inferior está marcado por la generación de deslizamientos en zonas donde previamente se han identificado remociones en masa, mientras que el límite superior lo delimita la ocurrencia de deslizamientos al inicio del evento de precipitación, o bien escenarios de poca precipitación donde históricamente no se tienen registros de deslizamientos ocurridos en el área de estudio con aquella caída de lluvia en el tiempo determinado, además de considerar los rangos típicos de capacidad de campo de la mayoría de los suelos determinados por Assouline y Or (2014), que varían entre 0.5 y 0.7.

Para el escenario pre-deforestación, cerca del 90% (entre 82.7 y 88.6%) de las remociones simuladas son generadas en zonas sin presencia de vegetación, mientras que en el escenario post-deforestación el porcentaje de deslizamientos generados en zonas deforestada aumenta hasta un 93.93%. En el escenario pre-deforestación, los deslizamientos simulados ocurren en pendientes cercanas a los 30° (máxima de 31.34°), mientras que en el post-deforestación las pendientes disminuyen hasta un promedio de 24.37°.

El tiempo transcurrido y la precipitación caída para la generación del primer deslizamiento simulado para los escenarios pre y post-deforestación observados en

la Figura 102, muestran una disminución tanto en la cantidad de tiempo como en la precipitación necesaria para la generación del primer deslizamiento bajo un mismo nivel de saturación del suelo.

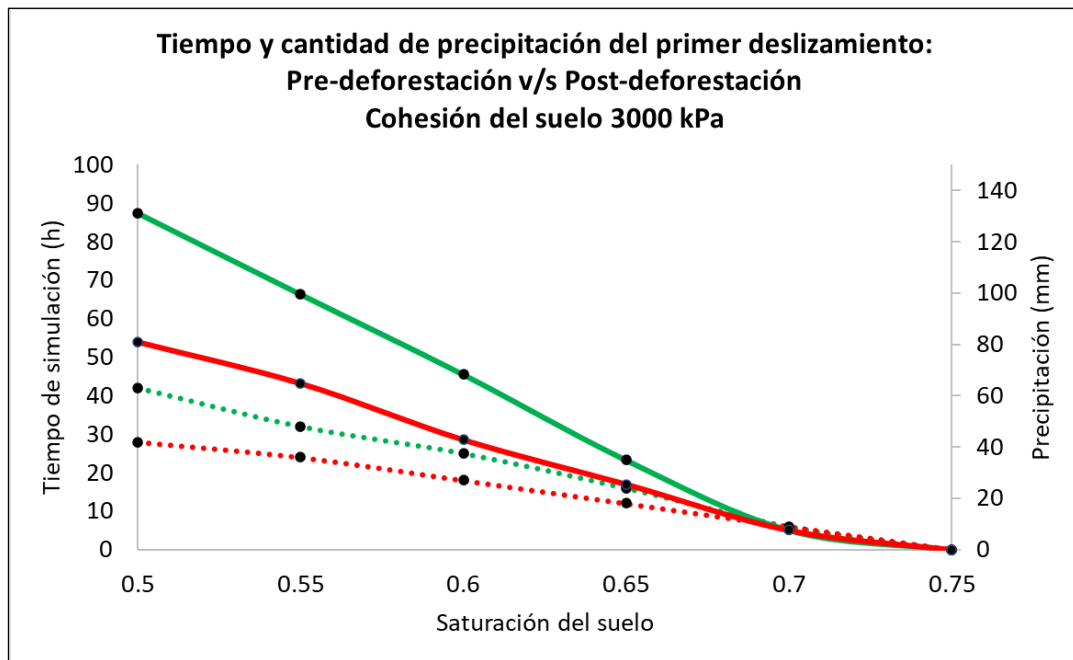


Figura 102. Tiempo (línea continua, eje izquierdo) y precipitación (línea discontinua, eje derecho) al momento de generación de primer deslizamiento, para distintos niveles de saturación del suelo de ladera estudiada. Comparación entre escenario pre-deforestación (verde) y post-deforestación (rojo).

Así, para el escenario pre-deforestación, una saturación de 0.5 implica la generación de deslizamientos desde las 42 horas y con una acumulación de 131 mm, los cuales disminuyen considerablemente hasta las 6 horas y 7.6 mm de acumulación para un nivel de saturación de 0.7, mientras que, para la post-deforestación, el primer deslizamiento se genera a las 28 horas y 80.8 mm de lluvia, hasta 6 horas y 7.6 mm, para los niveles de saturación de 0.5 y 0.7, respectivamente.

El total de los datos obtenidos para el escenario pre-deforestación y post-deforestación se muestran en las Tabla 20 y Tabla 21, respectivamente, indicando un aumento en el número de deslizamientos simulados posterior a la deforestación, llegando a triplicar el número en el escenario previo a la cosecha, como también las áreas máximas y totales de deslizamientos simulados.

Tabla 20. Resultados de simulaciones en ladera estudiada, para el escenario de pre-deforestación a distintos niveles de saturación del suelo.

Resultados de Simulación	Nivel de Saturación del Suelo				
	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7
Pre-deforestación					
Deslizamientos en zona deforestada (%)	88.6	84.3	82.7	86.84	61
Área máxima de deslizamiento (m ²)	1212.44	1212.44	1732.05	2165.06	2511.47
Área total de deslizamiento (m ²)	2165.08	3637.33	5455.97	9872.7	14539.2
Número de deslizamientos mayores a 3.46 m ²	5	10	9	13	25
Promedio de pendiente de deslizamientos (°)	29.1	30.791	31.34	28.59	28.71
Hora de generación (h) y precipitación acumulada (mm) de primer deslizamiento	42-131	32-99.4	25-68.2	16-34.9	6-7.6

La proporción entre el área de total de deslizamientos simulados post y pre-deforestación: varían entre aproximadamente 9 y 11. indicando que gran parte de los deslizamientos simulados en el escenario post deforestación ocurren en zonas que previamente estaban cubiertas por vegetación (Figura 103).

Tabla 21: Resultados de simulaciones en ladera estudiada, para el escenario de post-deforestación a distintos niveles de saturación del suelo

Resultados de Simulación	Nivel de Saturación del Suelo				
	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7
Deslizamientos en zona deforestada (%)	93.93	93.93	93.93	92.34	78.42
Área máxima de deslizamiento (m ²)	2511.47	11604.74	27886.02	43561.08	63219.85
Área total de deslizamiento (m ²)	20091.8	42435.34	59149.56	109638.85	166450.09
Número de deslizamientos mayores a 3.46 m ²	29	33	34	41	61
Promedio de pendiente de deslizamientos (°)	26	27.44	27.81	24.37	25.45
Hora de generación (h) y precipitación acumulada (mm) de primer deslizamiento	28-80.8	24-64.7	18-42.8	12-25.5	6-7.6

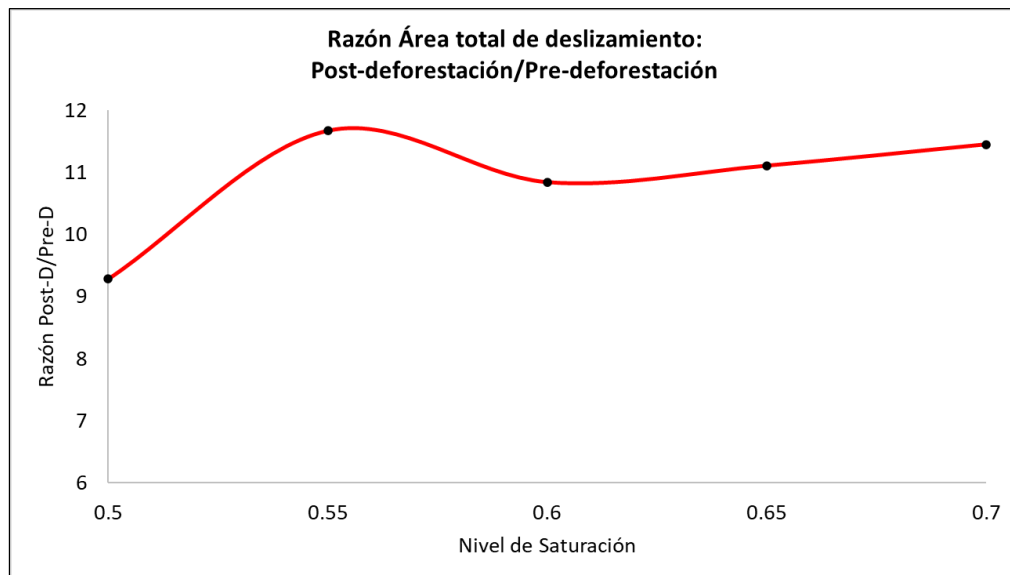


Figura 103. Razón de área total de deslizamientos entre escenario post y pre deforestación.

En las siguientes Figuras (Figura 104, Figura 105, Figura 106, Figura 107, Figura 108, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, y Figura 110) se observan los gráficos de precipitación junto a las áreas acumuladas de deslizamientos simulados para el escenario pre y post-deforestación, junto al modelo de

deslizamientos generado, entre los rangos de nivel de saturación del suelo entre 0.5 y 0.7.

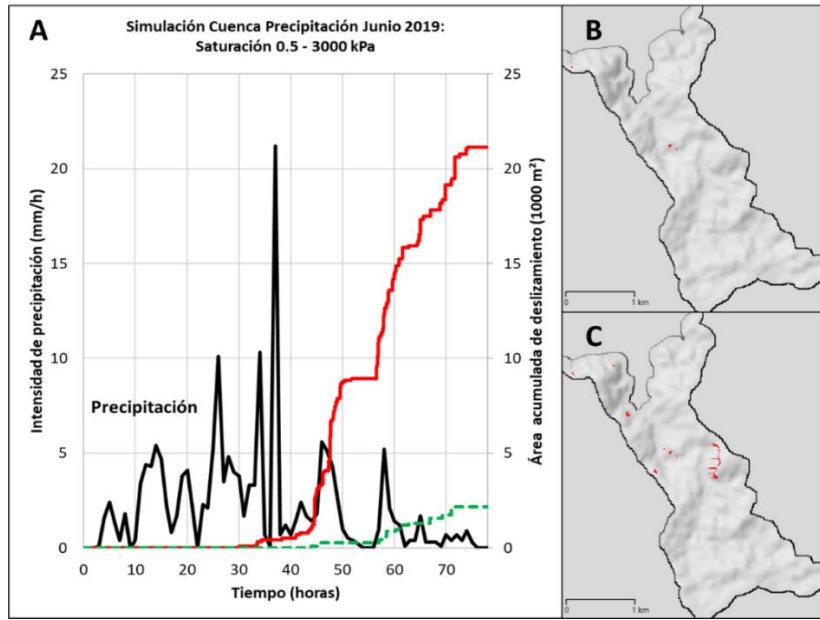


Figura 104. Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.5. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.

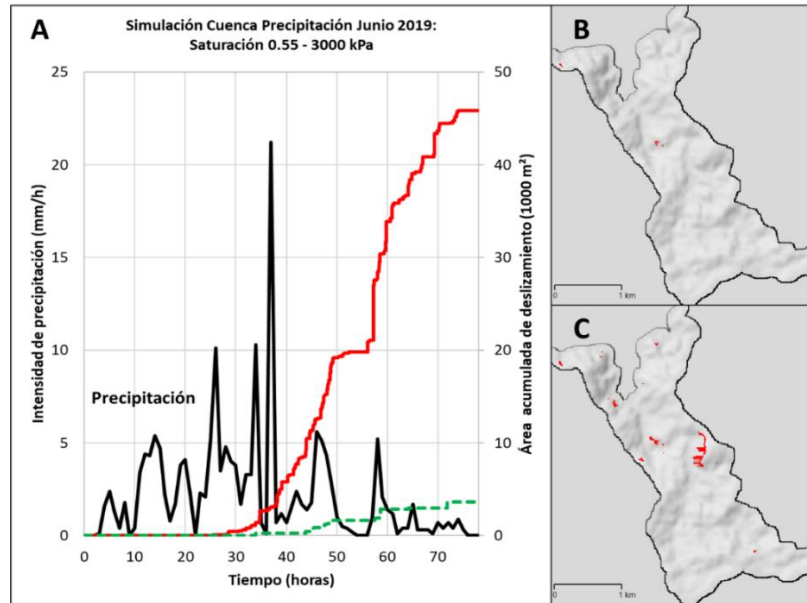


Figura 105. Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.55. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.

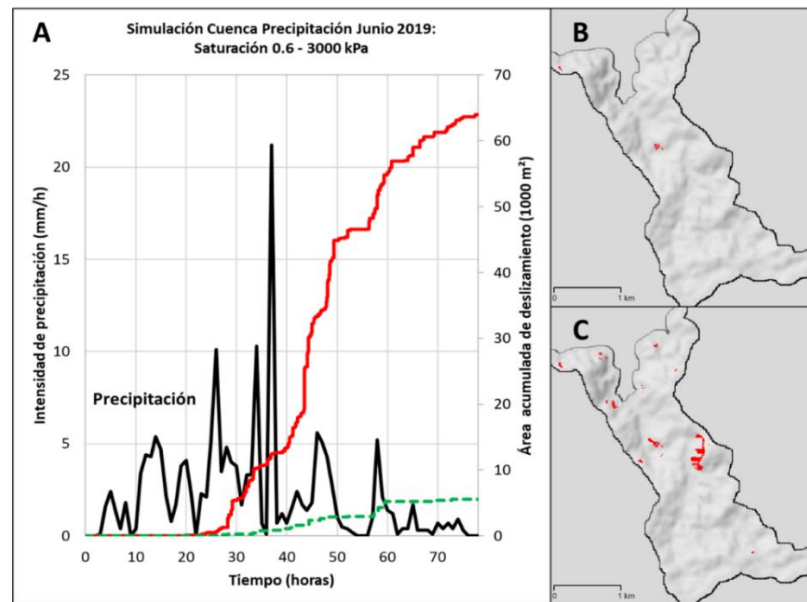


Figura 106. Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.6. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.

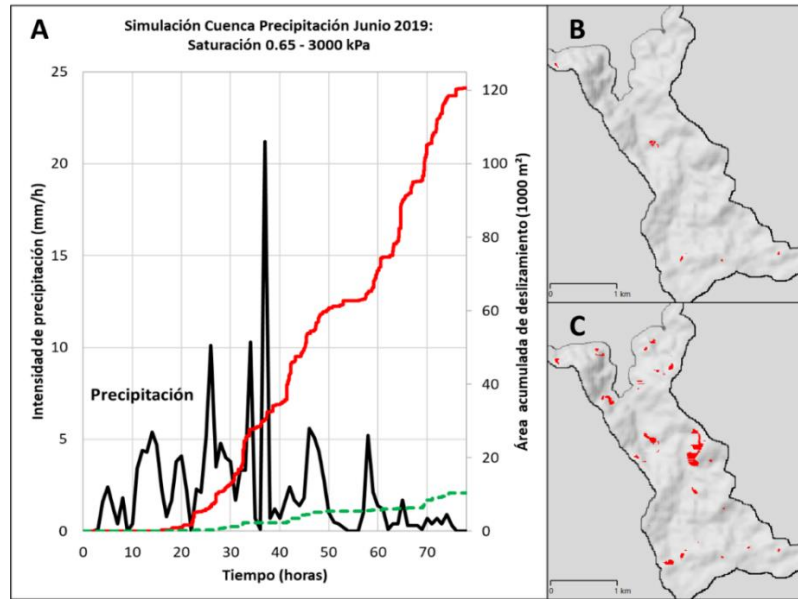


Figura 107: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.65. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.

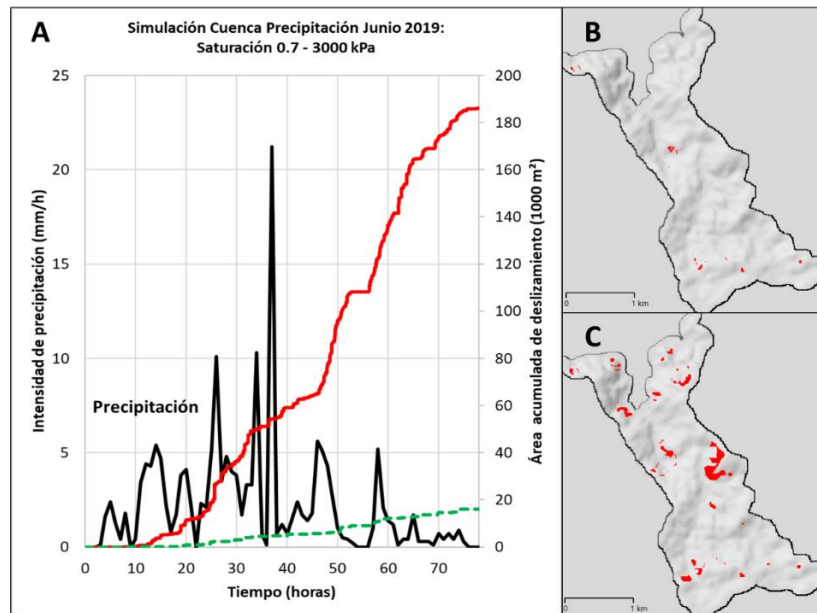


Figura 108: Izquierda: Área acumulada de deslizamientos simulados para el escenario pre-deforestación (curva verde discontinua) y post-deforestación (curva roja), para el evento de precipitación de junio 2019, saturación del suelo de 0.7. Derecha superior: Deslizamientos simulados (en rojo) para el escenario pre-deforestación. Derecha inferior: Deslizamientos simulados para el escenario post-deforestación.

A medida que aumenta la saturación del suelo, también aumenta el área acumulada de deslizamientos simulados para ambos escenarios, mientras que el tiempo transcurrido desde el inicio de las principales remociones en masa disminuye progresivamente, tanto para el escenario pre-deforestación (Figura 109) y post-deforestación (Figura 110). A su vez, aumenta el número de deslizamientos simulados, especialmente en el escenario post-deforestación.

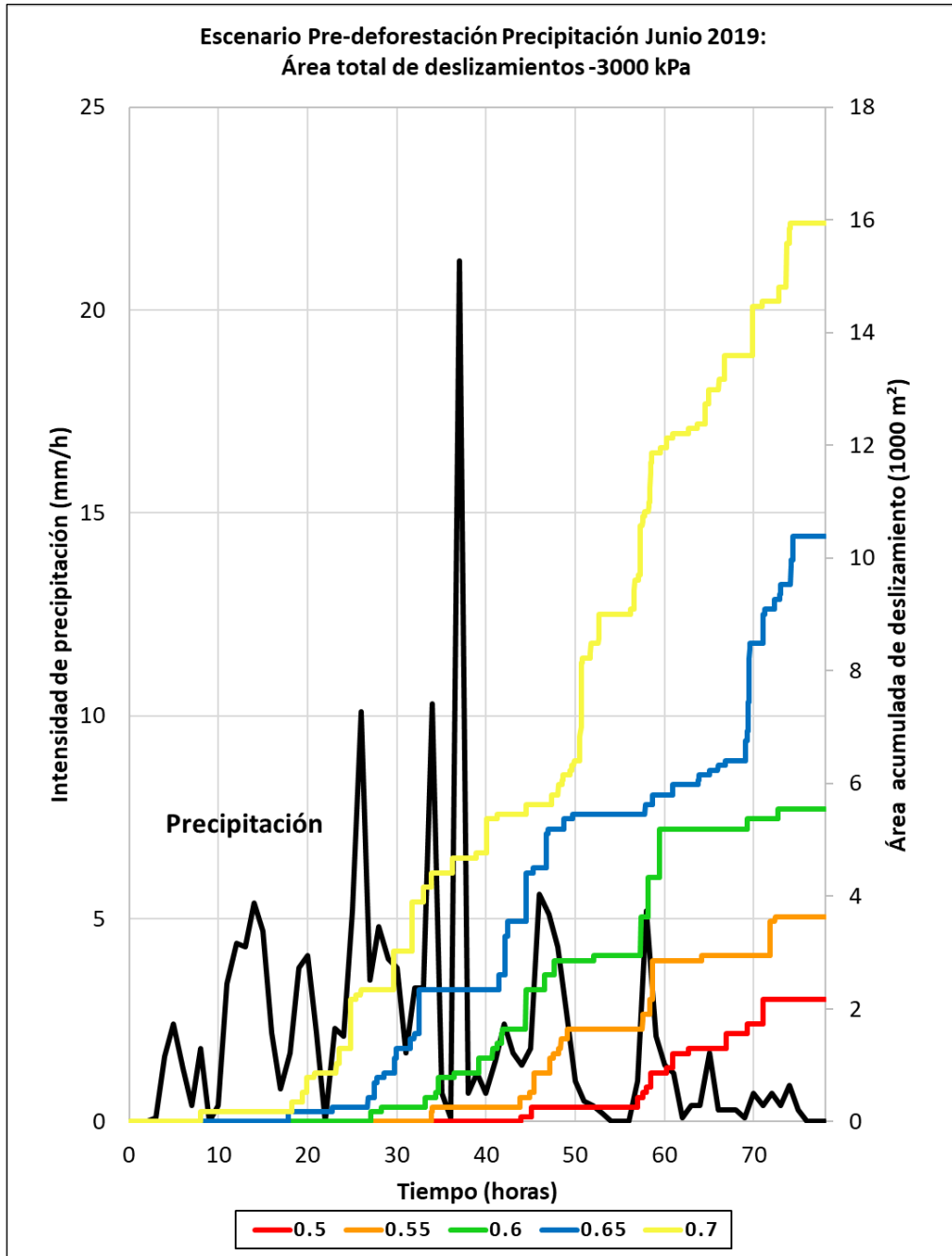


Figura 109. Área acumulada de deslizamientos simulados para distintos niveles de saturación del suelo (curvas de colores), para el evento de precipitación de junio 2019. Escenario pre-deforestación.

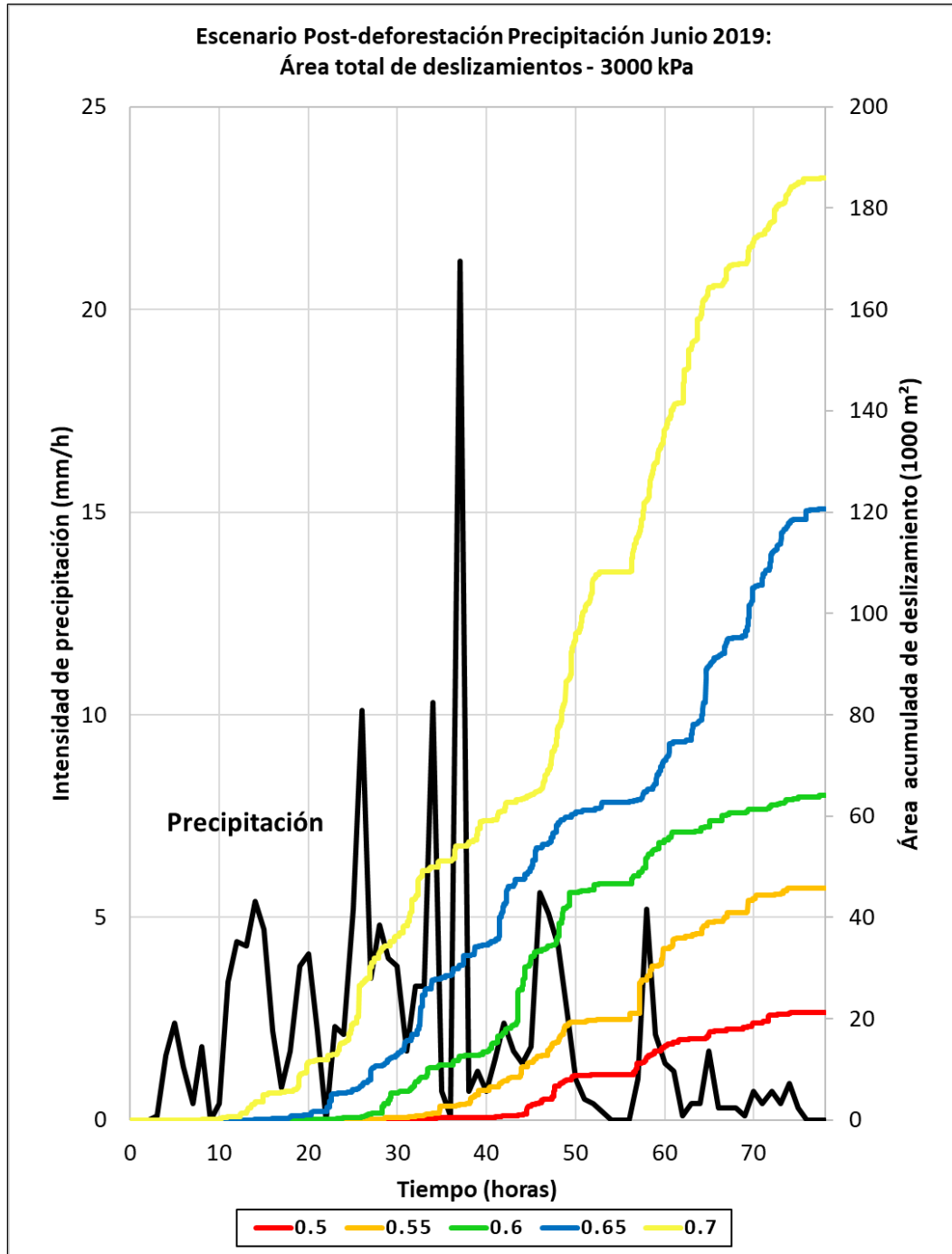


Figura 110: Área acumulada de deslizamientos simulados para distintos niveles de saturación del suelo (curvas de colores), para el evento de precipitación de junio 2019. Escenario post-deforestación.

7. DISCUSIÓN

7.1. Comparación entre catastro de deslizamientos y simulaciones

Los deslizamientos catastrados a partir de la identificación en terreno y fotointerpretación en distintos eventos de deforestación, donde más del 90% de los deslizamientos, tanto para la ladera como para la cuenca, ocurrieron en zonas previamente deforestadas. Esta comparación es realizada solamente para el evento de precipitación de junio de 2019, ya que corresponde a la información pluviométrica con intervalos de tiempo de medida más detallados. Esto concuerda con las simulaciones realizadas en este estudio, donde, para el caso de la ladera analizada, tanto el catastro como la simulación muestran valores cercanos al 95% de deslizamientos ocurridos en zonas deforestadas, mientras que, para el caso de la cuenca Palomares, el catastro de deslizamientos históricos realizado desde el año 2002 al 2022 es compatible con las simulaciones, con valores cercanos al 90% de deslizamientos en zonas que han sido deforestadas para ambos escenarios.

Hay una sobreestimación en el número y tamaño de los deslizamientos simulados en comparación a los catastrados, relacionado con las limitaciones y suposiciones de datos de entrada. Para la ladera estudiada, simulaciones realizadas con cohesión del suelo de 1.0 kPa y rangos entre 0.5 a 0.8 de saturación de agua en el suelo entregan los resultados con mejor ajuste según el estudio de Lehmann et al. (2019). Existen registros en esta ladera, de deslizamientos gatillados por este evento pluviométrico, los cuales concuerdan temporalmente con el primer *cluster* de deslizamientos

simulados a distintos niveles de saturación del suelo, siendo el tiempo de generación de estos menor a medida que aumenta la saturación (Figura 111).

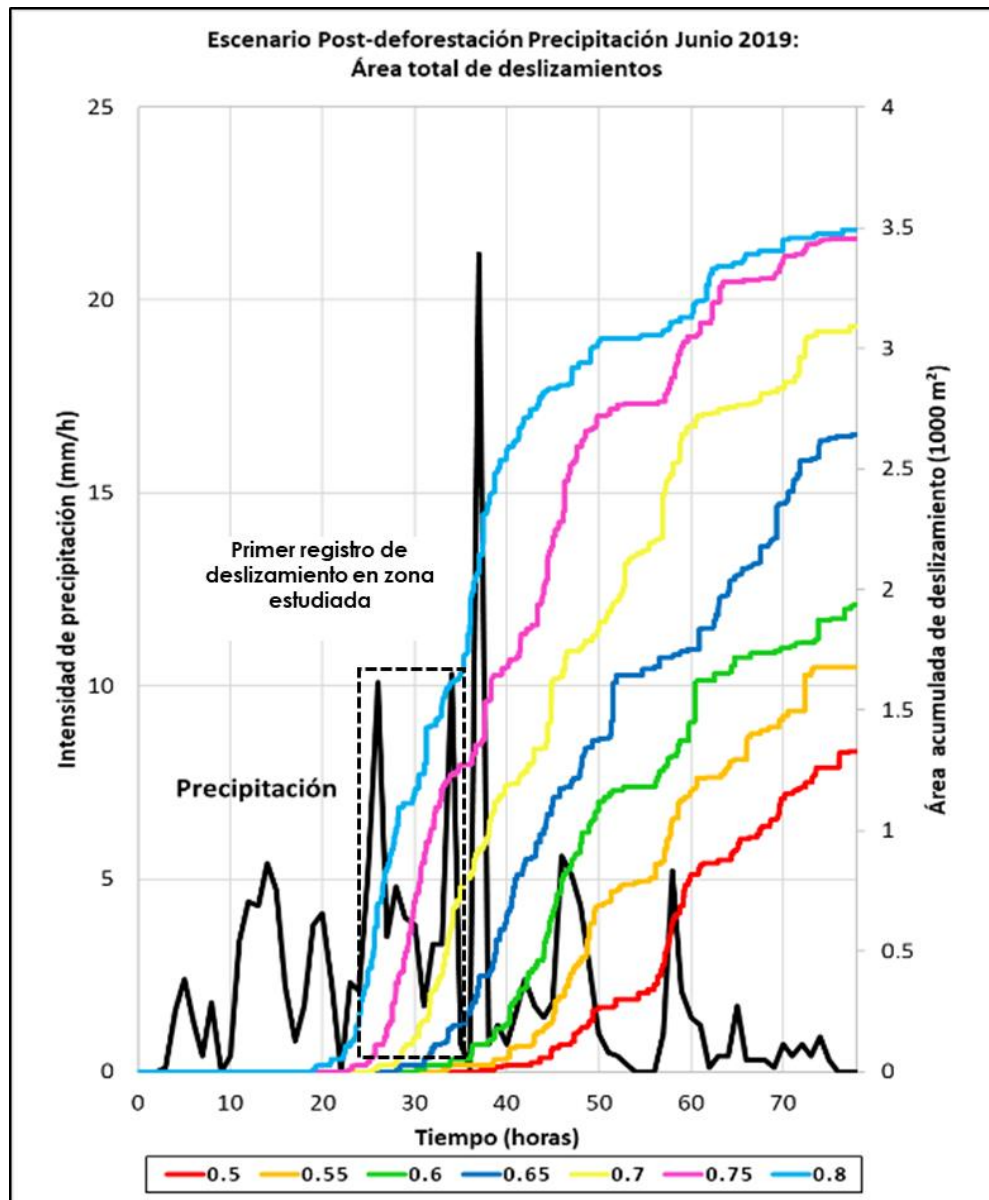


Figura 111. Primer registro de deslizamientos en ladera estudiada y cluster simulado.

A medida que aumenta la saturación del suelo, las columnas de suelo de deslizamientos simuladas comienzan a generar una reacción en cadena, donde el fallo progresivo de las columnas de suelo genera una redistribución de cargas a celdas adyacentes, generando *clusters* de deslizamientos, típicos del modelo FBM (Figura 112).

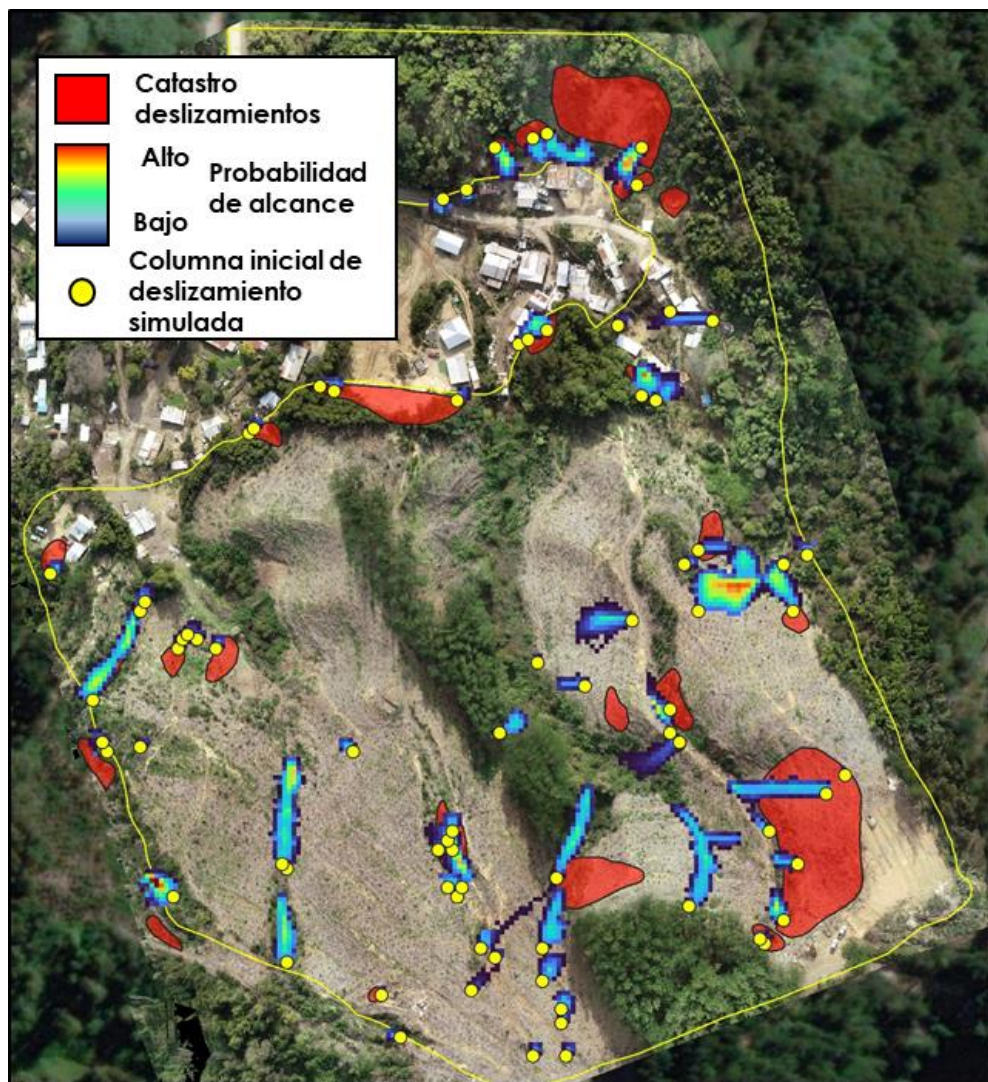


Figura 112. Deslizamientos catastrados y columnas iniciales de deslizamientos simuladas. Nivel de saturación 0.6.

Así, un total de 36 deslizamientos fueron catastrados, donde el número de deslizamientos simulados aumenta directamente proporcional al nivel de saturación, llegando a un máximo de 85 deslizamientos (Figura 113).

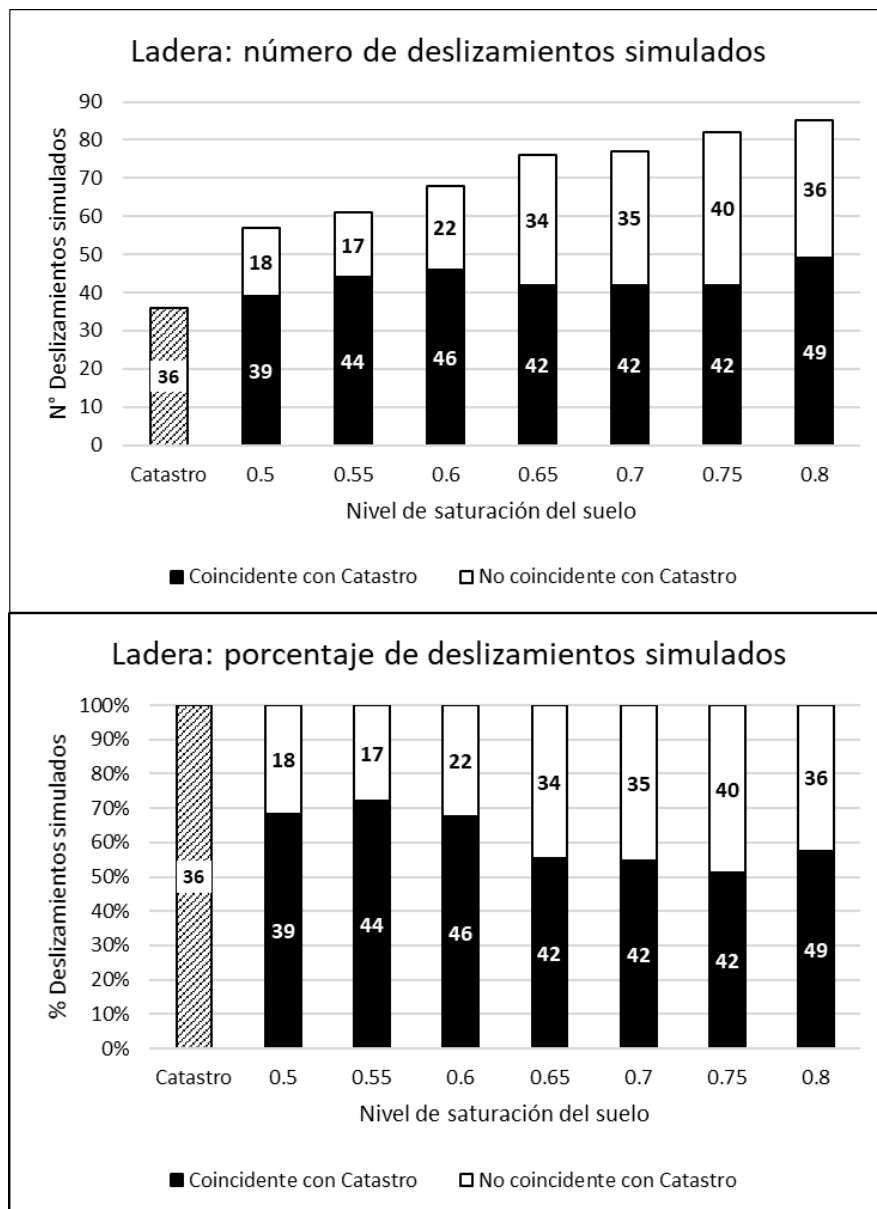


Figura 113. Número (arriba) y porcentaje (abajo) de deslizamientos simulados coincidentes con catastro según el nivel de saturación del suelo a escala de ladera.

El porcentaje de deslizamientos simulados que coinciden en su distribución espacial con el catastro superan el 50% en todos los niveles de saturación, llegando a valores cercanos al 70% (Figura 113).

A nivel de cuenca, las simulaciones realizadas con una cohesión del suelo de 3.0 kPa y niveles de saturación entre 0.5 y 0.7 entregaron los resultados con mejor ajuste. Los valores de cohesión más bajos generan altos niveles de sobreestimación en el número de deslizamientos simulados, los cuales disminuyen a medida que aumenta la cohesión, disminuyendo desde un máximo de 190 deslizamientos para valores de 1.5 kPa, hasta 61 deslizamientos, en 3.0 kPa de cohesión.

Para un total de 55 deslizamientos catastrados (Figura 114), el porcentaje y número de deslizamientos simulados que coinciden en su distribución espacial con el catastro corresponde al 45% y 28, respectivamente para valores de 0.7 de saturación del suelo, y al 64% y 22, para una saturación del suelo de 0.6 (Figura 115).

7.2. Sobreestimación y limitaciones de simulaciones

Las simulaciones obtenidas en este estudio poseen limitaciones relacionadas con los datos utilizados para las modelaciones y las dinámicas de generación de deslizamientos simulados, las cuales pueden llegar a sobrestimar o subestimar tanto el número de deslizamientos como su tamaño respecto al catastro observado. Esto se ve influenciado por diversos factores, relacionados con la calidad de los datos de entrada para la generación de las simulaciones (MDT, registro de precipitaciones,

simplificaciones de datos y escenarios que reducen la heterogeneidad del área de estudio, y limitantes en la realización del catastro en terreno y mediante fotointerpretación, asociadas a las características y dinámicas sociales, económicas, políticas y naturales inherentes al territorio, entre otros.

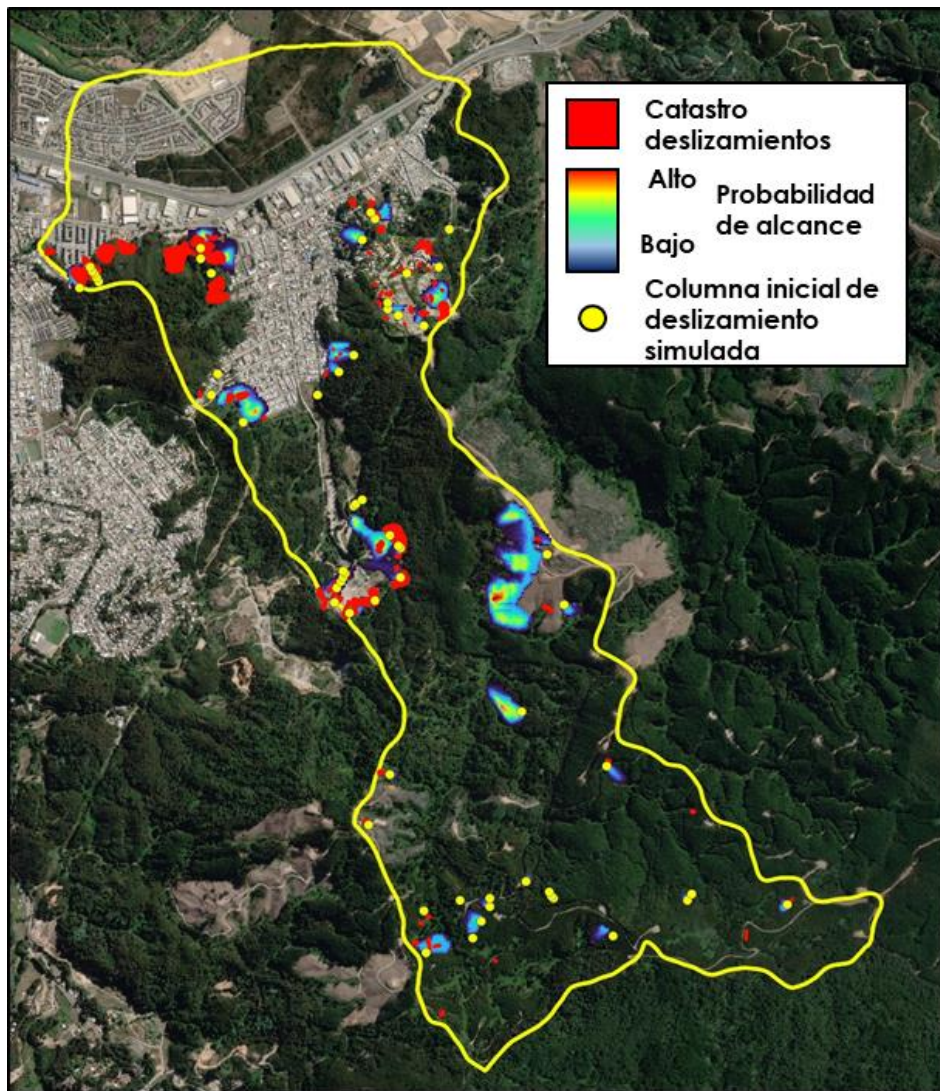


Figura 114: Deslizamientos catastrados y columnas iniciales de deslizamientos simulados. Cohesión del suelo 3.0 kPa, nivel de saturación 0.7.

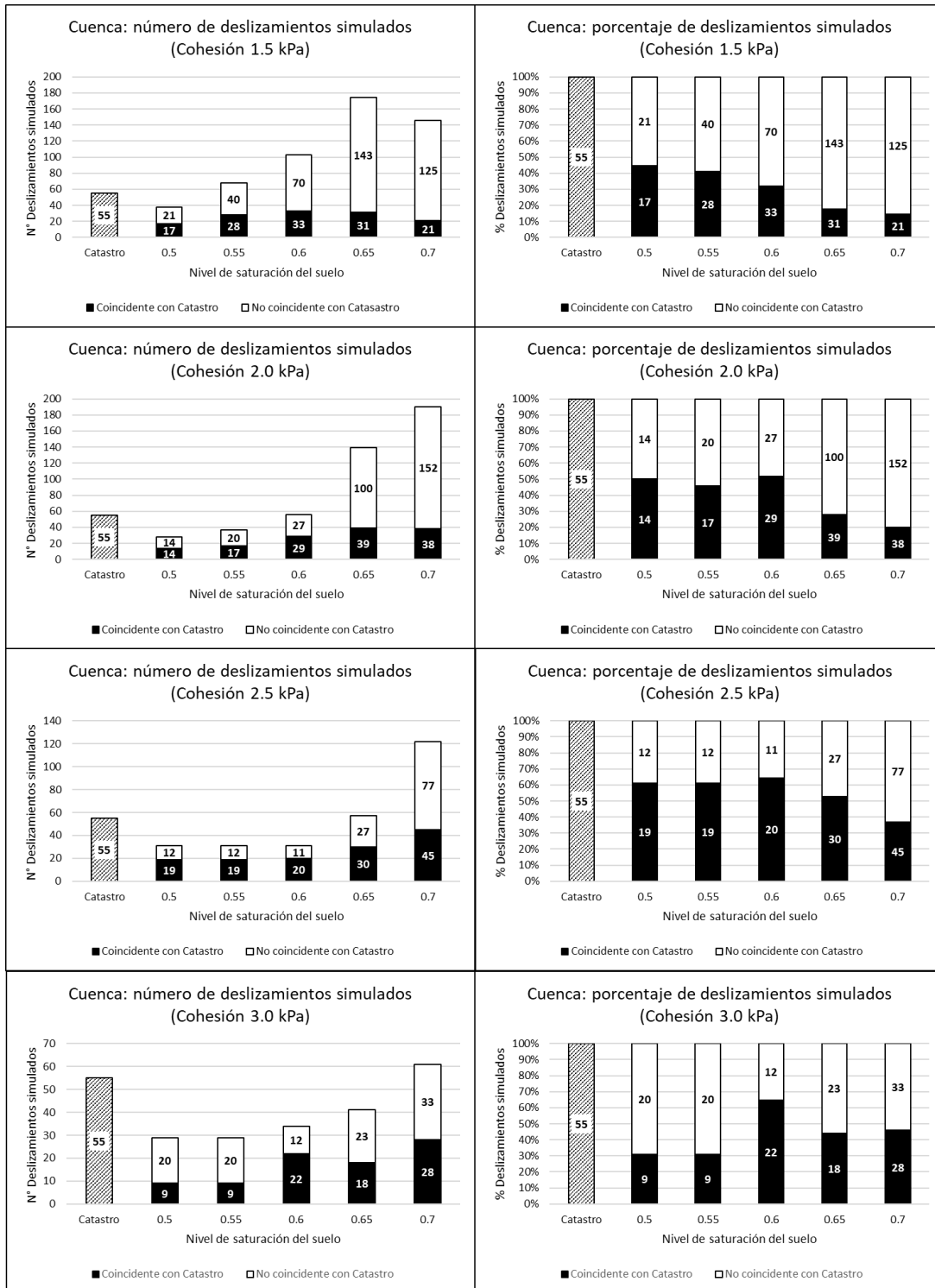


Figura 115. Número (izquierda) y porcentaje (derecha) de deslizamientos simulados coincidentes con catastro según el nivel de saturación del suelo para distintos valores de cohesión del suelo a escala de cuenca.

La resolución del MDT tiene un efecto en el área y número de los deslizamientos simulados. El tamaño de píxel del MDT y la grilla final utilizada en la modelación influye en el tamaño mínimo de los deslizamientos simulados, lo que se refleja en una discrepancia entre el área de los deslizamientos evidenciados en terreno y aquellos predichos, aumentando la extensión de éstos, especialmente para el análisis a escala de cuenca. Así, para el caso de estudio de la ladera, la utilización de un MDT de 0.5 m de tamaño de píxel, con un espaciamiento final de grilla de 2 m, permite obtener un área mínima de deslizamiento de 3.46 m², razonablemente concordante con la escala mínima de los deslizamientos catastrados a esta escala. Sin embargo, para la cuenca, el MDT utilizado, de 5 m de tamaño de píxel, con un espaciamiento final de grilla de 10 m, conlleva a un área mínima de deslizamiento de 86.6 m², sobrepasando en extensión a los deslizamientos catastrados. A su vez, debido al mecanismo de fallamiento que utiliza el *software*, donde la unidad mínima de la grilla (que representa una columna de suelo) que inicia el deslizamiento traspasa progresivamente la carga a columnas en un efecto en cadena, las magnitudes de las áreas de los deslizamientos simulados estarán restringidas a valores correspondientes a la suma total de las áreas de cada columna involucrada en el deslizamiento, no siendo posible simular deslizamientos con valores de áreas situados en rangos intermedios entre esta sumatoria, por lo que, al utilizar un MDT y grilla de alta resolución, esta diferencia disminuye. El espaciamiento de grilla utilizado está condicionado por la resolución del MDT, siendo idealmente de un tamaño igual a la resolución del MDT, o bien valores mayores, permitiendo la interpolación de los datos de elevación.

El registro pluviométrico incide en el tiempo transcurrido hasta el desencadenamiento de los deslizamientos, lo que a su vez influye en el número de éstos. La información de precipitación utilizada, que consiste en intensidad de agua caída (volumen de agua en mm/tiempo transcurrido), es registrada por estaciones meteorológicas, las cuales presentan distintos intervalos de tiempos de medición, según la fecha de la toma de datos y ubicación de ésta. Al ingresar este registro a las simulaciones, se eligen intervalos de tiempo específicos en el modelamiento, los cuales definen el número de etapas en las cuales serán subdivididos estos registros, generando una simulación en tiempo real, donde cada una de las etapas representa un cierto período de tiempo transcurrido. Para este estudio, se eligió un registro de 78 horas, dividido en intervalos de tiempo de 1 minuto, lo que da lugar a 4680 etapas dentro de cada simulación. Los registros pluviométricos utilizados presentan variaciones en los intervalos de tiempo de medición, donde las precipitaciones de junio del 2006 son registradas cada 6 horas, mientras que las de junio 2019 cada 30 minutos (Figura 116). Esta diferencia en el nivel de detalle conlleva a que, al momento de subdividir los registros en intervalos de 1 minuto, los eventos de precipitaciones incorporados en la modelación variarán en la precisión de la intensidad de precipitación respecto al intervalo real. De esta manera, los intervalos de intensidad de 6 horas del evento de julio 2006 son subdivididos en 360 intervalos de 1 minuto de idéntica intensidad, mientras que los intervalos de 30 minutos del evento de junio 2019 son subdivididos en 30 intervalos de 1 minuto. Esta discrepancia en la precisión de los intervalos se ve reflejada en la Figura 116, donde las curvas de intensidad de precipitación y precipitación acumulada se asemejan más a un escenario real de precipitación en el tiempo para el caso de junio de 2019. A su

vez, el modelo considera las siguientes variables hidráulicas temporales: la conductividad hidráulica saturada, correspondiente a la masa de agua que pasa a través de una unidad de superficie en un tiempo específico (m^3/m^2s) en un tipo suelo saturado (Blok et al., 2008), y la escorrentía superficial, la cual ocurre cuando el acceso a agua de la superficie del suelo es superior a la capacidad de infiltración de éste (Ramke, 2018).

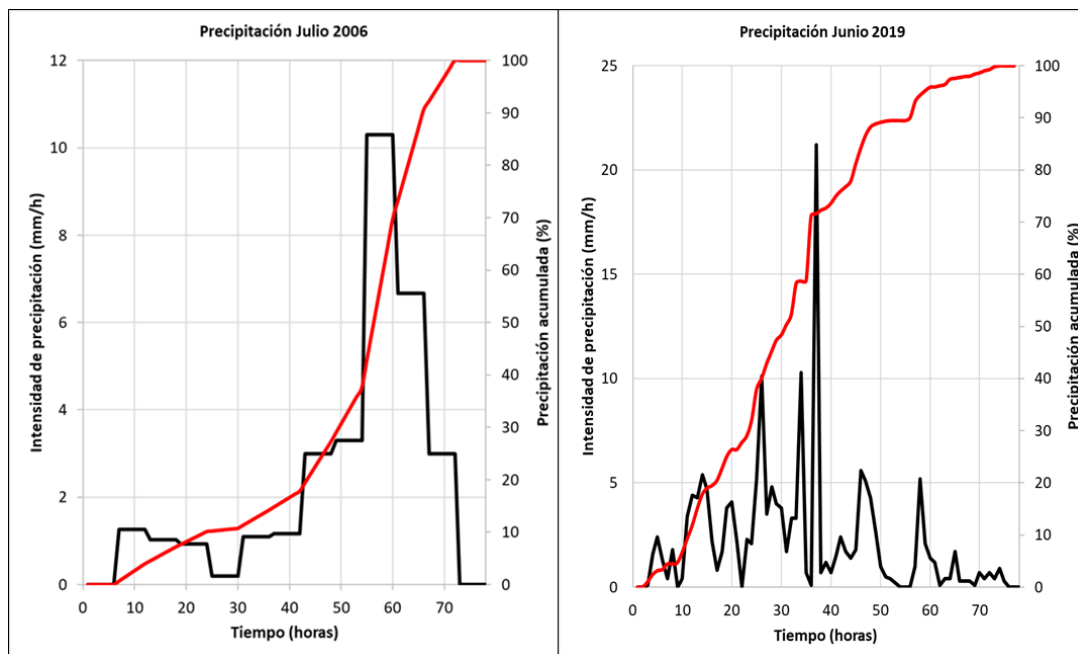


Figura 116. Diferencia en registros pluviométricos de distintas estaciones meteorológicas.

La combinación del registro pluviométrico dividido en intervalos, la conductividad hidráulica saturada para el tipo de suelo específico de este estudio, y el nivel de saturación inicial del suelo, condicionarán, por lo tanto, el tiempo de iniciación de la escorrentía superficial, relacionado directamente con altos niveles de saturación del suelo, y, en consecuencia, con condiciones de mayor probabilidad de generación de

deslizamientos. De esta manera, entre mayor sea el tiempo transcurrido entre cada medición del registro de la estación pluviométrica, especialmente de aquellas ventanas de altas precipitaciones, los intervalos de precipitación utilizados respecto a un escenario real de lluvias son menos representativos, pudiendo generar un mayor ingreso de lluvia a la modelación para un tiempo dado dentro de la simulación, y, con esto, un mayor número de deslizamientos desencadenados en comparación al escenario real.

La **clasificación textural del suelo** tiene directa relación con las propiedades hidráulicas de éste, las que a su vez determinan los niveles de saturación del suelo en tiempo real, así como también sus variaciones a lo largo del transcurso del evento pluviométrico modelado, lo que en última instancia provoca la generación de deslizamientos. El modelo utilizado relaciona cada tipo de clasificación textural del suelo con valores calculados empíricamente para las distintas propiedades hidráulicas (Tabla 10). Específicamente, las propiedades hidráulicas consideradas para las simulaciones son: la porosidad del suelo; fracción del total del volumen del suelo ocupada por los espacios vacíos (Nimmo, 2004), porosidad residual; la parte del sistema poroso constituida por poros cerrados, sin comunicación con el resto de los espacios porosos y el exterior, la cual mantiene la saturación residual del suelo (Issaadi et al., 2018), el valor de entrada del aire o *bubbling pressure*; valor de succión a partir del cual el aire entra en los poros más grandes del suelo (Eyo et al., 2022), y la conductividad hidráulica saturada del suelo, definida anteriormente. Al asumir una misma clase textural para la totalidad del área estudiada, se suprime el rol de la heterogeneidad del suelo, y, por tanto, su efecto en el desencadenamiento

de deslizamientos; la variabilidad espacial de distintos tipos de suelo induce más deslizamientos en comparación a un suelo homogéneo (Fan et al. (2016); Oguz et al. (2022)). Es más, la distribución heterogénea del tipo de suelo, especialmente con suelos de textura gruesa, con menores valores absolutos de presión capilar y de resistencia del suelo no saturado en comparación con suelos finos, generan puntos débiles que pueden servir como focos o núcleos de concentración de esfuerzos tensionales, promoviendo el desencadenamiento temprano de deslizamientos, en comparación a un escenario de suelo homogéneo (Fan et al., 2016). Los efectos de esta simplificación no son significativos en el caso de la ladera estudiada, donde la toma de muestras de suelos en combinación con los registros de series de suelos del CIREN (1999) han permitido clasificar de manera más exacta el tipo textural de suelo en el área estudiada, y a su vez, disminuir el área donde el tipo de suelo ha sido extrapolado, mientras que, para el caso de la cuenca Palomares, la extrapolación ha sido realizada para la totalidad de la cuenca en base a las muestras tomadas en la ladera y a la base de datos de CIREN, aumentando el efecto de la eliminación de la heterogeneidad de los suelos en el desencadenamiento de deslizamientos, y, por consiguiente, en los resultados obtenidos en las simulaciones a esta escala.

El ***nivel de saturación inicial de agua***, afecta directamente a la generación de deslizamientos simulados. Específicamente, la suposición de una distribución espacialmente homogénea, no considera antecedentes localizados de procesos hidrológicos, que pueden afectar localmente ciertas áreas de la ladera (Lehmann et al., 2019). Elementos geológicos como fallas o fracturas, e hidrogeológicos, como

manantiales, pueden generar aumentos en la saturación del suelo en zonas cercanas a éstas, en comparación a otros sectores de la ladera, ante un mismo evento de precipitación intensa.

La ***suposición de pérdida total de la cohesión de las raíces post-deforestación*** tiene como consecuencia la sobreestimación en el número y tamaño de los deslizamientos simulados. El modelo utilizado asume que la cohesión otorgada por las raíces se pierde en su totalidad inmediatamente seguido el proceso de deforestación. Sin embargo, su función de reforzamiento en la resistencia del suelo ante esfuerzos tensionales no desaparece inmediatamente, si no que corresponde a un proceso de decaimiento gradual, al mismo tiempo que aumenta progresivamente la resistencia de las raíces al ir creciendo la vegetación que ha sido reforestada. Estudios como los de Sidle (1991), Sidle (1992) y Imaizumi et al. (2008), han evidenciado esta propiedad de las raíces en procesos de deforestación. Lehmann et al. (2019) demostraron que las dinámicas de decaimiento y rebrote radicular tienen un efecto importante en la susceptibilidad de laderas deforestadas ante la ocurrencia de deslizamientos, donde la conversión total de suelo forestal a suelos agrícolas y/o praderas, en los que eventualmente se pierde la totalidad de las propiedades de resistencia de las raíces, tiene un impacto mayor y de larga duración en la susceptibilidad de deslizamientos, en comparación de la tala rasa, seguida del decaimiento y rebrote radicular (Figura 117). Así, laderas donde la tala rasa ha sido seguida de reforestación, presentan una ventana temporal de mayor ocurrencia de deslizamientos más acotada, de aproximadamente 10 años, con principal énfasis en los primeros 3-5 años, acorde con la mínima resistencia de las raíces post-

deforestación calculada por Imaizumi et al. (2008) (Figura 34), y con los estudios de Phillips et al. (2018), que indican similares ocurrencias de deslizamientos entre zonas con plantaciones jóvenes sin reforzamiento de raíces significativo (< 6 años) y laderas de pastoreo, en comparación a laderas donde la cobertura de suelo ha sido cambiada a suelos agrícolas y/o praderas, desprovistas de este reforzamiento radicular.

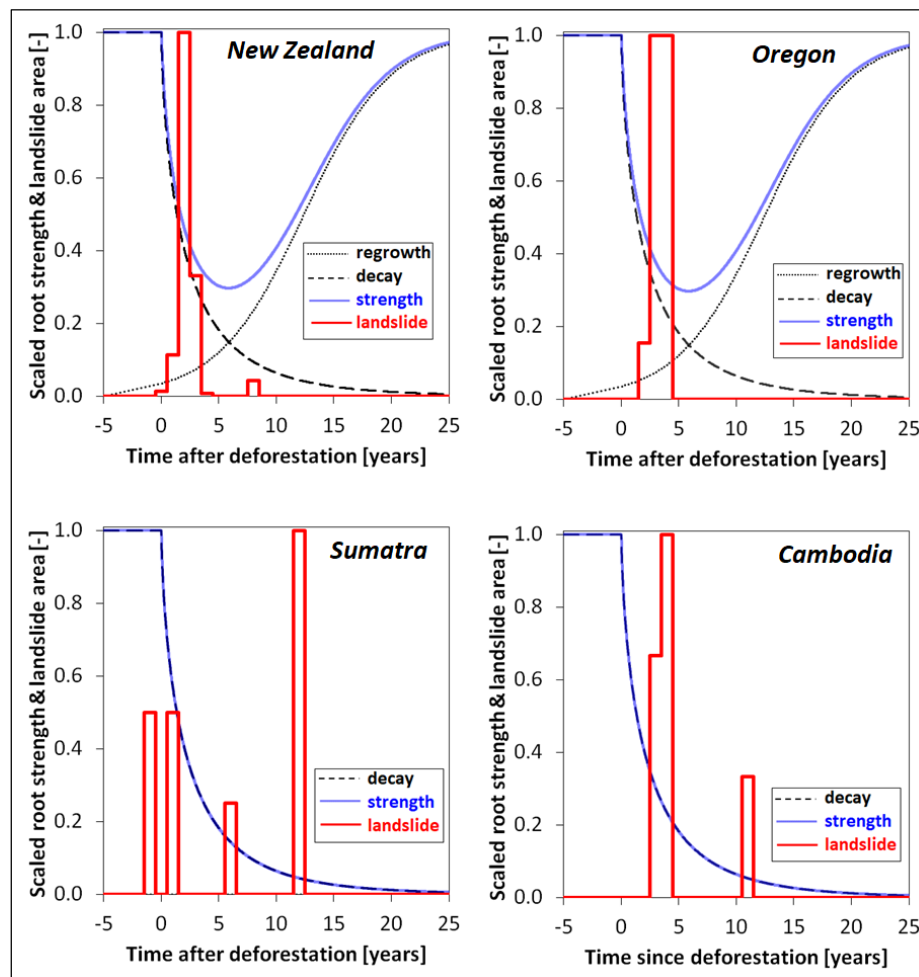


Figura 117: Efecto de las dinámicas de decaimiento y rebrote radicular en la ocurrencia de deslizamientos en el tiempo. Gráficos de New Zealand y Oregon presentan reforestación, mientras que en Sumatra y Cambodiana cobertura de suelo ha sido cambiada a suelos agrícola y/o praderas (Lehmann et al., 2019).

Lehmann et al. (2019) obtuvieron que, el incorporar un rebrote radicular y decaimiento en el tiempo ejerce una fuerte efecto estabilizador en las laderas, resultando en áreas acumuladas de deslizamientos simulados 5 veces menor a simulaciones donde se asume nula resistencia de las raíces posterior a la deforestación.

Además, determinaron que resistencia de las raíces (*root strength*) no descendió del 29% de la resistencia máxima (Figura 117), la cual fue suficiente para disminuir la ocurrencia de deslizamientos en laderas deforestadas, concluyendo que los deslizamientos simulados ocurrieron principalmente en áreas donde la deforestación ocurrió 5 años antes del deslizamiento, y las dinámicas esperadas de la resistencia de las raíces estaba más cercano a su valor mínimo.

La **escala de identificación de cobertura forestal** clasifica aquellos sectores con presencia o ausencia de vegetación, y, por lo tanto, con las propiedades de cohesión y resistencia de las raíces en el suelo. A escala de cuenca, la alta resolución de imágenes, con un tamaño de píxel de 50x50 cm permite la clasificación de zonas vegetadas y deforestadas con elevada exactitud y precisión, pudiendo diferenciar el tipo de vegetación, zonas de praderas y zonas deforestadas. Por otro lado, a nivel de cuenca, la identificación ha sido realizada a través de la metodología de clasificación supervisada a través de la combinación de las bandas 5, 6 y 4 de las imágenes satelitales Landsat-8, con un tamaño de píxel de 30x30 m, lo que inherentemente disminuye la exactitud de la identificación de zonas forestadas y deforestadas, conllevando a asumir áreas con total ausencia de vegetación, y por tanto, a la

eliminación de la resistencia de las raíces, pudiendo corresponder en realidad a parches entremezclados de zonas forestadas y deforestadas.

El **espesor del suelo** tiene un efecto en las dinámicas de generación de los deslizamientos simulados. El modelo permite ingresar datos específicos de espesor del suelo, simulando la variabilidad de este horizonte en la totalidad de la extensión de la ladera estudiada. Existe evidencia de que el espesor de suelo residual granítico en el área de estudio y zonas aledañas puede llegar a los 20 m de potencia (Vivallos et al., 2010), con deslizamientos identificados donde niveles de suelos más superficiales se deslizan sobre suelos más profundos, sin evidenciar, en muchos casos, horizontes de roca meteorizada del tipo saprolito. Esta variabilidad en la potencia de los horizontes de suelo residual puede ser determinada con exactitud a través de metodologías geofísicas como el *Ground Penetrating Radar* (GPR), como también con la realización de calicatas o sondajes, lo cual es recomendado para futuros estudios. Sin embargo, debido a limitaciones y restricciones inherentes al área de estudio de diversas índoles, se ha optado por asumir una profundidad calculada empíricamente, tanto para la ladera en específico como a nivel de cuenca, a partir de las aproximaciones de Stothoff (2008), donde se asume un estado estable entre la tasa de producción del suelo y procesos erosivos.

Los **valores de resistencia de las raíces y cohesión del suelo** juegan un rol importante en la resistencia total del suelo ante las fuerzas tensionales generadas por las lluvias intensas, las cuales gatillan los deslizamientos simulados. En este estudio, se ha optado por utilizar el valor de la resistencia de las raíces de 3 kPa, en

base a los estudios de Lehmann et al. (2019), donde indican que este valor corresponde al promedio de cálculos previos posterior al fallamiento, entre 1 y 4.3 kPa, determinados por Sidle and Ochiai (2006), y entre 3 a 6.5 kPa, medidos en ensayos de tracción (Schwarz et al., 2011). El modelo utilizado no considera los patrones y dinámica complejas de las raíces según las especies de árboles, ni sus variaciones en la distribución de éstas con la profundidad. Para futuros estudios se recomienda realizar mediciones de esta resistencia en las raíces de las especies de árboles que eventualmente serán talados. En el caso de la cohesión del suelo, Lehmann et al. (2019) indican que los valores deben ser variados en un rango de 1 a 3kPa, con pasos de 0.5 kPa, de manera de verificar que las laderas no son demasiado inestables al inicio de las simulaciones, de manera que no se desencadenen deslizamientos inmediatamente al inicio del evento de precipitación, y que para estos eventos algunos deslizamientos sean desencadenados en tiempos posteriores en la simulación. Estos valores de cohesión varían según la escala del estudio, siendo de 1.0 kPa para la escala de ladera, y de 3.0 kPa a escala de cuenca.

El ***catastro de remociones en masa*** fue realizado mediante la combinación de trabajo de campo con fotointerpretación. Existen diversos factores que no han permitido la realización de un catastro completo; acceso no permitido a terrenos privados, dificultad de acceso y transporte a zonas forestales, donde las condiciones de los caminos no permiten el ingreso, prohibición de ingreso a gran parte de las laderas que han sido deforestadas, la modificación antrópica de la geomorfología de las laderas posterior a la deforestación, donde existe removilización y compactación

de suelos, como también la eliminación de deslizamientos y evidencia de éstos, la densa cobertura vegetal, especialmente en laderas destinadas a la actividad silvícola, la cual dificulta tanto la fotointerpretación como la identificación en el campo, debido al rápido crecimiento de los árboles en zonas reforestadas, los que dificultan la movilización dentro de estas laderas, entre otros.

8. CONCLUSIONES

Bajo un mismo evento de precipitación, considerando el efecto cohesivo de las raíces, la probabilidad de generación de deslizamientos aumenta, en número y área de efecto, en condiciones de deforestación.

La saturación inicial de agua, la cohesión de las raíces y cohesión del suelo son los principales factores en la generación de deslizamientos para este contexto geológico, y deben ser considerados en futuros estudios de susceptibilidad para deslizamientos poco profundos para esta región.

Tanto a escala de cuenca como de ladera, la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos aumenta en condiciones de deforestación, con un escenario posterior a la deforestación que muestra hasta 3 y 5 veces más deslizamientos generados y material desplazado (m^3), respectivamente. A escala de cuenca, el total de deslizamientos son hasta 10 veces más grandes en área, y a escala de ladera, hasta 5 veces.

Más del 90% de los deslizamientos simulados a nivel de cuenca y ladera se generaron en zonas deforestadas, con una relación de superficie pre/post LS de 9 a 11 a escala de cuenca, lo que demuestra que la mayoría de los deslizamientos se generaron en zonas que anteriormente estaban forestadas, mientras que, a escala de ladera, la razón pre/post LS es de 3 a 5, lo que demuestra que algunos

deslizamientos se generaron en zonas que ya estaban deforestadas antes del evento principal de deforestación.

El mejor ajuste para la generación de deslizamientos fue de una saturación inicial del suelo de 0.5 a 0.7 y cohesión del suelo de 3.0 kPa, conllevando a una generación de deslizamientos de 58 a 10 horas desde el inicio del evento de precipitación a escala de cuenca, mientras que, a escala de ladera, el mejor ajuste fue de una saturación inicial del suelo de 0.5 a 0.8 y cohesión del suelo de 1.0 kPa, conllevando a una generación de deslizamientos de 45 a 20 horas desde el inicio del evento de lluvia, lo cual concuerda con los primeros registros de deslizamientos en esta área para este evento. Para ambos casos, las simulaciones de deslizamientos concuerdan hasta en un 70% con el catastro realizado.

Aunque las simplificaciones y limitaciones relacionadas con la falta de datos resultan en una sobreestimación del número y tamaño de la generación de deslizamientos, es un punto de partida en la evaluación de este problema socio-natural que afecta a Chile Central, ya que proporciona información valiosa y útil, especialmente en zonas de interfaz urbano-silvestre con escasa información, sirviendo como herramienta preventiva y de alerta temprana para futuros escenarios de planificación urbana sostenible.

Es fundamental establecer lineamientos correctos para la planificación urbana futura, considerando e integrando la combinación de amenazas inherentes asociadas al contexto geológico de Chile Central, con la construcción social del riesgo relacionada

con la expansión urbana, la actividad forestal y su dinámica, las políticas socioeconómicas y políticas entre otras.

9. REFERENCIAS

- Adams, P. W., & Sidle, R. C. (1987). Soil conditions in three recent landslides in Southeast Alaska. *Forest Ecology and Management*, 18(2), 93-102. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-1127\(87\)90136-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-1127(87)90136-8)
- Alavalapati, J. R. R., Carter, D. R., & Newman, D. H. (2005). Wildland–urban interface: Challenges and opportunities. *Forest Policy and Economics*, 7(5), 705-708. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.forpol.2005.03.001>
- Alcántara, T. d. J. (2019). La gestión integral del riesgo de incendios en las zonas de interfaz urbano-forestal: el caso del megaincendio de Valparaíso 2014.
- Arnone, E., Caracciolo, D., Noto, L. V., Preti, F., & Bras, R. L. (2016). Modeling the hydrological and mechanical effect of roots on shallow landslides. 52(11), 8590-8612. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2015WR018227>
- Assouline, S., & Or, D. (2014). The concept of field capacity revisited: Defining intrinsic static and dynamic criteria for soil internal drainage dynamics. 50(6), 4787-4802. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2014WR015475>
- Astorga, L., & Burschel, H. (2019). *Chile necesita un nuevo modelo forestal: Ante los desafíos climáticos, sociales y ambientales*. LOM ediciones.
- Astorga, L. B., Heinrich. (2019). *Chile necesita un nuevo modelo forestal: Ante los desafíos climáticos, sociales y ambientales*. LOM ediciones.
- Ávila, H. S. (2009). Periurbanización y espacios rurales en la periferia de las ciudades. *Estudios agrarios*, 15(41), 93-123.
- Azócar, G., & Sanhueza, C. (1999). Evolución del uso del suelo en las cuencas hidrográficas de las lagunas de la comuna de San Pedro de la Paz, Región del Biobío: análisis histórico y tendencias.
- Baeriswyl, S. J. S., Coloquio del País Urbano al País Metropolitano. (2007). Patrones de ocupación del Gran Concepción. A través del modelo de consumo de suelo.
- Barik, M. G., Adam, J. C., Barber, M. E., & Muhunthan, B. (2017). Improved landslide susceptibility prediction for sustainable forest management in an altered climate. *Engineering Geology*, 230, 104-117. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.09.026>
- Blok, C., De Kreij, C., Baas, R. O. B., & Wever, G. (2008). 7 - ANALYTICAL METHODS USED IN SOILLESS CULTIVATION. In M. Raviv & J. H. Lieth (Eds.), *Soilless Culture* (pp. 245-289). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-044452975-6.50009-5>
- Bravo Muñoz, C. E. (2018). *Umbral de precipitación de procesos de remoción en masa, en la Provincia de Concepción*. Universidad Católica de la Santísima Concepción. <http://repositoriodigital.ucsc.cl/handle/25022009/1394>
- Bray, J., & Frost, D. (2010). Geo-engineering reconnaissance of the 2010 Maule, Chile earthquake. *Report No. GEER-022 of the NSF Sponsored GEER Association Team*, 1.
- Brutsaert, W. (1982). *Evaporation into the atmosphere: Theory, History and Applications*. 1.

- Bryant, C. R., Russwurm, L. J., & McLellan, A. G. (1986). The city's countryside. Land and its management in the rural-urban fringe. *The city's countryside. Land and its management in the rural-urban fringe.*, xi + 249pp.
- Busquets, J. (1999). *La urbanización marginal* (1a. ed. ed.). Universitat Politècnica de Catalunya.
- Butler, C. P. (1976). The urban/wildland fire interface.
- Caballero, D. (2004). Gestión de los riesgos de incendios en la interfase forestal-urbana: Proyecto WARM. IIº Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Programas de Protección contra los incendios Forestales,
- Cammeraat, E., Beek, R. v., & Kooijman, A. (2007). Vegetation succession and its consequences for slope stability in SE Spain. In A. Stokes, I. Spanos, J. E. Norris, & E. Cammeraat, *Eco-and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability* Dordrecht.
- Cannon, S. H., Gartner, J. E., Rupert, M. G., Michael, J. A., Rea, A. H., & Parrett, C. (2010). Predicting the probability and volume of postwildfire debris flows in the intermountain western United States. *Geological Society of America Bulletin*, 122(1-2), 127-144. <https://doi.org/10.1130/B26459.1>
- Carlevaro, M., Colombana, C. I., & Reyes, J. I. (2015). Evaluación de la exactitud posicional planimétrica de Google Earth para Uruguay.
- Carson, M., & Kirby, M. (1972). Hillslope Form and Process: By MA Carson,... and Mf Kirkby. In: The University Press.
- Casadei, M., Dietrich, W., & Miller, N. (2003). Controls on shallow landslide size. Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Davos, Switzerland,
- CIREN. (1999). Centro de Información de Recursos Naturales. Estudio agrológico VIII Región. Descripciones de suelos, materiales y símbolos.
- CIREN. (2010). Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile, Región del Bío-Bío. Síntesis de Resultados.
- Cohen, D., Lehmann, P., & Or, D. (2009). Fiber bundle model for multiscale modeling of hydromechanical triggering of shallow landslides. 45(10). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2009WR007889>
- Cornforth, D. (2005). Landslides in Practice: Investigation, Analysis, and Remedial/Preventative Options in Soils. 624.
- Coutts, M. P. (1983). Root architecture and tree stability. *Plant and Soil*, 71(1), 171-188. <https://doi.org/10.1007/BF02182653>
- Creixell, C. J. M. p. o. a. T. d. G. U. d. C., Departamento Ciencias de la Tierra. (2001). Petrología y Geotermobarometría de las Rocas Intrusivas de la Cordillera de la Costa entre los 36°30'S y 38°00'S.
- Cruden, D., & Varnes, D. (1993). Landslides: Investigation and Mitigation. Chapter 3: Landslides types and processes.
- Cruden, D., & Varnes, D. (1996). Landslide types and processes, transportation research board, us national academy of sciences, special report, 247: 36-75. 36-57.
- Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 43(1), 27-29. <https://doi.org/10.1007/BF02590167>

- De Graff, J. V., Cannon, S. H., Gallegos, A. J., Schaefer, V., Schuster, R., & Turner, A. (2007). Reducing post-wildfire debris flow risk through the Burned Area Emergency Response (BAER) process. Conference Presentations, 1st North American Landslide Conference, Vail, CO, AEG Special Publication,
- de la Barrera, F., Barraza, F., Favier, P., Ruiz, V., & Quense, J. (2018). Megafires in Chile 2017: Monitoring multiscale environmental impacts of burned ecosystems. *Sci Total Environ*, 637-638, 1526-1536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.119>
- De Mattos, C. A. (1999). Santiago de Chile, globalización y expansión metropolitana: lo que existía sigue existiendo. *EURE*, XXV(76), 0. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=19607602> (IN FILE)
- del Corral, I. P.-S. D., & Shaw, C. J. J. R. A. d. A. P. (2019). Interfaz urbano-forestal e incendios forestales: regulación legal en España. (53), 158-219.
- Derose, R. C., Trustrum, N. A., & Blaschke, P. M. (1993). Post-deforestation soil loss from steepland hillslopes in Taranaki, New Zealand. *18*(2), 131-144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/esp.3290180205>
- Dhakal, A. S., & Sidle, R. C. (2003). Long-term modelling of landslides for different forest management practices. *28*(8), 853-868. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/esp.499>
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. (1977). Crop Water Requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 24*, FAO, Rome, , 144 pp.
- Duan, L., Huang, M., & Zhang, L. (2016). Differences in hydrological responses for different vegetation types on a steep slope on the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 537, 356-366. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.057>
- Ekanayake, J. C., & Phillips, C. J. (1999). A method for stability analysis of vegetated hillslopes: an energy approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(6), 1172-1184. <https://doi.org/10.1139/t99-060>
- Eyo, E. U., Ng'ambi, S., & Abbey, S. J. (2022). An overview of soil-water characteristic curves of stabilised soils and their influential factors. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 34(1), 31-45. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.013>
- Fan, L., Lehmann, P., & Or, D. (2015). Effects of hydromechanical loading history and antecedent soil mechanical damage on shallow landslide triggering. *120*(10), 1990-2015. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2015JF003615>
- Fan, L., Lehmann, P., & Or, D. (2016). Effects of soil spatial variability at the hillslope and catchment scales on characteristics of rainfall-induced landslides. *52*(3), 1781-1799. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2015WR017758>
- FAO. (2015). Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Actualización 2015.
- Feng, S., Liu, H. W., & Ng, C. W. W. (2020). Analytical analysis of the mechanical and hydrological effects of vegetation on shallow slope stability. *Computers and Geotechnics*, 118, 103335. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103335>

- Flageollet, J. (1989). Landslides in France: A risk reduced by recent legal provisions. *International Geological Congress: symposium on landslides*. 28,
- Forbes, K., Broadhead, J., Brardinoni, A. D., Gray, D., & Stokes, B. V. J. R. p. (2013). Forests and landslides: The role of trees and forests in the prevention of landslides and rehabilitation of landslide-affected areas in Asia Second edition. 02.
- Forman, R. T., & de Valicourt, C. S. (2004). *Mosaico territorial para la región metropolitana de Barcelona*. Gustavo Gili Barcelona.
- Frêne, C., & Núñez, M. (2010). Hacia un nuevo modelo forestal en Chile. *AIFBN, Socios %J Revista Bosque Nativo*, 47, 25-35.
- Furbish, D. J., & Rice, R. M. (1983). Predicting Landslides Related to Clearcut Logging, Northwestern California, U.S.A. *Mountain Research and Development*, 3(3), 253-259. <https://doi.org/10.2307/3673019>
- Galiana, L. (2012). Las interfaces urbano-forestales: un nuevo territorio de riesgo en España. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*.
- Galli, C., & Lemke, W. (1967). "El suelo de fundación de Concepción". *Estudios geotécnicos N° 2*, Institución de Investigaciones Geológicas. .
- García-Gaines, R. A., & Frankenstein, S. (2015). USCS and the USDA soil classification system: Development of a mapping scheme.
- García Acosta, V. (2005). El riesgo como construcción social y la construcción social de riesgos. *Desacatos. Revista de Ciencias Sociales*(19), 11-24. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=13901902> (IN FILE)
- Gellert-de Pinto, G. (2012). El cambio de paradigma: De la atención de desastres a la gestión del riesgo. *Boletín Científico. Sapiens Res.*, 2.
- Gerding, V. J. T. r. i. y. d. U. A. d. C., Valdivia, Chile. (2009). La tala rasa y su efecto en la productividad del sitio. 17-39.
- Glade, T. J. C. (2003). Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand. *51*(3-4), 297-314.
- Gonçalves, J. L. M., Stape, J. L., Laclau, J. P., Bouillet, J. P., & Ranger, J. (2008). Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 70(2), 105-118. <https://doi.org/10.2989/SOUTH.FOR.2008.70.2.6.534>
- González-Bonorino, F., & Aguirre, L. J. G. R. (1970). Metamorphic facies series of the crystalline basement of Chile. *59*, 979-994.
- Gonzalez-Ollauri, A., & Mickovski, S. B. (2017). Hydrological effect of vegetation against rainfall-induced landslides. *Journal of Hydrology*, 549, 374-387. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.014>
- Goodman, R. E. (1980). *Introduction to Rock Mechanics*. Wiley. <https://books.google.cl/books?id=KKFU8WYUemkC>
- Goodman, R. E., & Seed, H. B. (1966). Earthquake-induced displacements in sand embankments. *J Journal of the Soil Mechanics Foundations Division*, 92(2), 125-146.
- Gorsevski, P. V., Gessler, P. E., Boll, J., Elliot, W. J., & Foltz, R. B. (2006). Spatially and temporally distributed modeling of landslide susceptibility. *Geomorphology*, 80(3), 178-198. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.02.011>

- Gray, D. H., & Megahan, W. F. (1981). *Forest vegetation removal and slope stability in the Idaho Batholith* (Vol. no.271). U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Forestry Sciences, Laboratory. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/136919>
- Greenwood, J. R., Norris, J. E., Wint, J. J. G., & Engineering, G. (2006). Site investigation for the effects of vegetation on ground stability. *24*, 467-481.
- Grigal, D. F. (2000). Effects of extensive forest management on soil productivity. *Forest Ecology and Management*, *138*(1), 167-185. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00395-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00395-9)
- Groenendyk, D. G., Ferré, T. P., Thorp, K. R., & Rice, A. K. (2015). Hydrologic-Process-Based Soil Texture Classifications for Improved Visualization of Landscape Function. *PLoS One*, *10*(6), e0131299. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131299>
- Guerrero, R., & Hernández, H. (1966). "Le secteur Nord du Concepción (Chili), les quartiers recents d'une ville chilienne". *Bolletín de l'Asociación de Geógrafos Francéses*.
- Gyssels, G., Poesen, J., Bochet, E., & Li, Y. (2005). Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *29*(2), 189-217. <https://doi.org/10.1191/0309133305pp443ra>
- Hauser, A. (1985). FLUJOS DE BARRO EN LA ZONA PREANDINA DE LA REGION METROPOLITANA: CARACTERISTICAS, CAUSAS, EFECTOS, RIESGOS Y MEDIDAS PREVENTIVAS. *Revista Geológica de Chile*, *24*, 75-92.
- Hauser, A. (1993). *Remociones en mas en Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Hernández, P. Y. T. (2010). El ordenamiento territorial y su construcción social en Colombia: ¿un instrumento para el desarrollo sustentable? *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*(19), 97-109. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281822029008> (IN FILE)
- Herrero-Corral, G., Jappiot, M., Bouillon, C., & Long-Fournel, M. J. A. G. (2012). Application of a geographical assessment method for the characterization of wildland–urban interfaces in the context of wildfire prevention: A case study in western Madrid. *35*(1-2), 60-70.
- Hervé, F., Munizaga, F., Parada, M., Brook, M., Pankhurst, R., Snelling, N., & Drake, R. J. J. o. S. A. E. S. (1988). Granitoids of the Coast Range of central Chile: geochronology and geologic setting. *1*(2), 185-194.
- Herzer, H. (2011). Construcción del riesgo, desastre y gestión ambiental urbana. (Perspectivas en debate).
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *The landslide handbook-A guide to understanding landslides*. US Geological Survey.
- Hillel, D. (2007). *Soil in the environment: crucible of terrestrial life*. Elsevier.
- IGM. (2001). Geografía de Chile: geografía de la región del Bío-Bío. Tomo VIII de Región del Bío-Bío.
- Imaizumi, F., Sidle, R. C., & Kamei, R. (2008). Effects of forest harvesting on the occurrence of landslides and debris flows in steep terrain of central Japan. *33*(6), 827-840. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/esp.1574>
- IMC. (2004). Ilustre Municipalidad de Concepción. Memoria Explicativa Plan Regulador Comunal.

- INE. (2002). Censo 2002. Resultados población y vivienda. País-región-provincia-comuna.
- INE. (2017). Censo 2017.
- INFOR. (2008). Instituto Forestal. Anuario Forestal 2008. Santiago, Chile.
- Issaadi, N., Aït-Mokhtar, A., Belarbi, R., & Hamami, A. (2018). 8 - Effect of Variability of Porous Media Properties on Drying Kinetics: Application to Cement-based Materials. In F. Nicot & O. Millet (Eds.), *Advances in Multi-Physics and Multi-Scale Couplings in Geo-Environmental Mechanics* (pp. 243-289). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-278-6.50008-6>
- Jakob, M. (2000). The impacts of logging on landslide activity at Clayoquot Sound, British Columbia. *CATENA*, 38(4), 279-300. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00078-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00078-8)
- Jakob, M., Hungr, O., Cannon, S. H., Gartner, J. E. J. D.-f. h., & phenomena, r. (2005). Wildfire-related debris flow from a hazards perspective. 363-385.
- Jaque, E., Castillo, C., Ojeda, C., & Díaz, P. (2019). Vulnerabilidad educativa ante incendios forestales en el Área Metropolitana de Concepción: Caso de estudio: Penco, Chile. *Estudios Socioterritoriales*, 25, 0-0.
- Kapstein, P. (2004). Análisis de asentamientos precarios en Valparaíso y su incidencia en el crecimiento urbano. *Revista INVI*, 18. <https://doi.org/10.5354/0718-8358.2004.62210>
- Karsli, F., Atasoy, M., Yalcin, A., Reis, S., Demir, O., Gokceoglu, C. J. E. m., & assessment. (2009). Effects of land-use changes on landslides in a landslide-prone area (Ardesen, Rize, NE Turkey). 156, 241-255.
- Keefer, D. K. (1984). Landslides caused by earthquakes. *GSA Bulletin*, 95(4), 406-421. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1984\)95<406:LCBE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95&lt;406:LCBE&gt;2.0.CO;2) %J GSA Bulletin
- Korup, O., Seidemann, J., & Mohr, C. H. (2019). Increased landslide activity on forested hillslopes following two recent volcanic eruptions in Chile. *Nature Geoscience*, 12(4), 284-289. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0315-9>
- Laio, F. (2006). A vertically extended stochastic model of soil moisture in the root zone. 42(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2005WR004502>
- Lara, M. (2007). *Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana* Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias, mención Geología. Memoria ...].
- Laugenie, C. (1968). Croquis morfológico de la llanura de Concepción. Instituto de Geografía, Universidad de Concepción. Inédito.
- Lavell, A. (2000). Desastres y desarrollo: hacia un entendimiento de las formas de construcción social de un desastre: el caso del huracán Mitch en Centroamérica.
- Lavell, A. S., Secretaría Predecán, Proyecto. (2007). Apuntes para una reflexión institucional en países de la Subregión Andina sobre el enfoque de la gestión del riesgo.
- Lehmann, P., & Or, D. J. W. R. R. (2012). Hydromechanical triggering of landslides: From progressive local failures to mass release. 48.
- Lehmann, P., von Ruetten, J., & Or, D. (2019). Deforestation Effects on Rainfall-Induced Shallow Landslides: Remote Sensing and Physically-Based

- Modelling. 55(11), 9962-9976.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2019WR025233>
- León, J., Cortés, F., & Bisbal, I. (2019). Desafíos para la gobernanza en espacios periurbanos metropolizados: El caso de Nonguén, en Concepción, Chile. *Revista Pensamiento y Acción Interdisciplinaria*, 4, 24-43.
<https://doi.org/10.29035/pai.4.2.24>
- Li, Y. H. M., Zhao, W. W., & Zhou, M.-F. J. J. o. A. E. S. (2017). Nature of parent rocks, mineralization styles and ore genesis of regolith-hosted REE deposits in South China: An integrated genetic model. 148, 65-95.
- Liu, J., Wu, Z., & Zhang, H. (2021). Analysis of Changes in Landslide Susceptibility according to Land Use over 38 Years in Lixian County, China. 13(19), 10858.
<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/19/10858>
- Llorens, P., & Domingo, F. (2007). Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*, 335(1), 37-54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.032>
- López Filun, P. A. (2015). Análisis de umbrales de precipitación de procesos de remoción en masa, en laderas urbanizadas de la costa de Chile centro-sur. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 93-112.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281839793006> (IN FILE)
- Lu, N., Godt, J. W., & Wu, D. T. (2010). A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil. 46(5). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2009WR008646>
- Marden, M., & Rowan, D. J. N. Z. j. o. f. s. (1993). Protective value of vegetation on tertiary terrain before and during Cyclone Bola, East Coast, North Island, New Zealand. 23(3), 255-263.
- Mardones, M., & Brito, M. J. I. d. G. U. d. C. p. C. p. C. p. y. P. (1978). El sitio geomorfológico de las ciudades de Concepción y Talcahuano. 67.
- Mardones, M., Rodríguez, A., & Soto, J. (1994). Los riesgos naturales en la comuna de Talcahuano. Actas del 7 Congreso Geológico Chileno,
- Mardones, M., & Rojas, J. (2012). Procesos de remoción en masa inducidos por el terremoto del 27F de 2010 en la franja costera de la Región del Biobío, Chile %J Revista de geografía Norte Grande. 57-74.
http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022012000300004&nrm=iso
- Mardones, M., & Vidal, C. (2001). La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción %J EURE (Santiago). 27, 97-122.
http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-71612001008100006&nrm=iso
- Marín, M., Neira, H., Garrido, N., & Báez, F. (2021). Visor Territorial de fallecidos por Remociones en Masa (RM) en Chile entre los años 1938-2020.
- Marín, M. V., Muñoz, A., & Naranjo, J. (2018). Víctimas fatales causadas por remociones en masa en Chile (1928-2017). Congreso Geológico Chileno,
- Matthews, J. A. B., D.; Frenzel, B.; Gla"ser, B.; Weiß, M.M. . (1997). Rapid Mass Movement as a Source of Climatic Evidence for the Holocene. *Paläoklimaforschung - Palaeoclimate Research*, 19, 444 pp.
- Meunier, P., Hovius, N., & Haines, A. J. (2007). Regional patterns of earthquake-triggered landslides and their relation to ground motion. 34(20).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2007GL031337>

- Miller, J. (2008). Conserving Biodiversity in Metropolitan Landscapes: A Matter of Scale (But Which Scale?). *Landscape Journal*, 27, 114-126. <https://doi.org/10.3368/lj.27.1.114>
- MINVU. (2017). Secretaría Regional Ministerial del Bio Bio. Ordenanza Modificación Plan Regulador Metropolitano Concepción. .
- MINVU. (2018). Informe Ambiental Complementario. Evaluación ambiental estratégica modificación Plan Regulador Metropolitano de Concepción.
- Moody, J., Martin, D., Haire, S., & Kinner, D. (2008). Linking Runoff Response to Burn Severity After a Wildfire. *Hydrological Processes*, 22, 2063-2074. <https://doi.org/10.1002/hyp.6806>
- Morales, R. (1988). "Evolución demográfica de la ciudad de Concepción en el período intercensal 1970-82". Boletín Informativo IGM. 1^{er} Sem. 36-64.
- Mugagga, F., Kakembo, V., & Buyinza, M. (2012). Land use changes on the slopes of Mount Elgon and the implications for the occurrence of landslides. *CATENA*, 90, 39-46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.11.004>
- Naranjo, J., Ramírez, P., Clavero, J., & Hauser, A. (2006). REMOCIONES EN MASA CAUSADAS POR LLUVIAS TORRENCIALES, JUNIO 26–27, 2005 CONCEPCIÓN, VIII REGIÓN. XI Congreso Geológico Chileno,
- Nicoll, B. C., Berthier, S., Achim, A., Gouskou, K., Danjon, F., & van Beek, L. P. H. (2006). The architecture of *Picea sitchensis* structural root systems on horizontal and sloping terrain. *Trees*, 20(6), 701-712. <https://doi.org/10.1007/s00468-006-0085-z>
- Nilaweera, N. S., & Nutalaya, P. (1999). Role of tree roots in slope stabilisation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57(4), 337-342. <https://doi.org/10.1007/s100640050056>
- Nimmo, J. R. J. E. o. S. i. t. E. (2004). Porosity and pore size distribution. 3(1), 295-303.
- OEA. (1991). *Desastres, planificación y desarrollo: manejo de amenazas naturales para reducir los daños*. Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente. <https://books.google.cl/books?id=AeOeAAAAIAAJ>
- Oguz, E. A., Depina, I., & Thakur, V. (2022). Effects of soil heterogeneity on susceptibility of shallow landslides. *Landslides*, 19(1), 67-83. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01738-x>
- Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrelli, P., & Alewell, C. (2014). Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. *Science of The Total Environment*, 479-480, 189-200. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.010>
- Parise, M., & Cannon, S. H. (2012). Wildfire impacts on the processes that generate debris flows in burned watersheds. *Natural Hazards*, 61(1), 217-227. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9769-9>
- Pauchard, A., Aguayo, M., Peña, E., & Urrutia, R. (2006). Multiple effects of urbanization on the biodiversity of developing countries: The case of a fast-growing metropolitan area (Concepci??n, Chile). *Biological Conservation*, 127, 272-281. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.05.015>
- Peña, C., Mardones, F., & Tavares, C. (1993). Las condiciones climáticas como factor de riesgo natural en la comuna de Talcahuano.

- Petit, S., Firbank, L., Wyatt, B., & Howard, D. (2001). MIRABEL: Models for Integrated Review and Assessment of Biodiversity in European Landscapes. *Ambio*, 30, 81-88. [https://doi.org/10.1639/0044-7447\(2001\)030\[0081:MMFIRA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1639/0044-7447(2001)030[0081:MMFIRA]2.0.CO;2)
- Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40(10), 927-930. <https://doi.org/10.1130/G33217.1>
- Phillips, C., Marden, M., & Basher, L. R. (2018). Geomorphology and forest management in New Zealand's erodible steepplands: An overview. *Geomorphology*, 307, 107-121. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.031>
- Poblete, M., & Dobry, R. J. R. I. (1968). Modelo dinámico del subsuelo de Concepción. 7(3), ág. 111-planos.
- Popescu, M. E. (1994). A suggested method for reporting landslide causes. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 50(1), 71-74. <https://doi.org/10.1007/BF02594958>
- Potere, D. (2008). Horizontal Positional Accuracy of Google Earth's High-Resolution Imagery Archive. 8(12), 7973-7981. <https://www.mdpi.com/1424-8220/8/12/7973>
- Rab, M. A. (2004). Recovery of soil physical properties from compaction and soil profile disturbance caused by logging of native forest in Victorian Central Highlands, Australia. *Forest Ecology and Management*, 191(1), 329-340. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.12.010>
- Ramke, H.-G. (2018). 8.2 - Collection of Surface Runoff and Drainage of Landfill Top Cover Systems. In R. Cossu & R. Stegmann (Eds.), *Solid Waste Landfilling* (pp. 373-416). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407721-8.00019-X>
- Ravetz, J., Fertner, C., & Nielsen, T. S. (2013). The Dynamics of Peri-Urbanization. In K. Nilsson, S. Pauleit, S. Bell, C. Aalbers, & T. A. Sick Nielsen (Eds.), *Peri-urban futures: Scenarios and models for land use change in Europe* (pp. 13-44). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30529-0_2
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Saxtonn, K. E. J. T. o. t. A. (1982). Estimation of Soil Water Properties. 25, 1316-1320.
- Raz-Yaseef, N., Rotenberg, E., & Yakir, D. (2010). Effects of spatial variations in soil evaporation caused by tree shading on water flux partitioning in a semi-arid pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(3), 454-462. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.01.010>
- Reichenbach, P., Busca, C., Mondini, A., & Rossi, M. J. E. m. (2014). The influence of land use change on landslide susceptibility zonation: the Briga catchment test site (Messina, Italy). 54, 1372-1384.
- Reid, L. M., & Keppeler, E. T. (2012). Landslides after clearcut logging in a coast redwood forest. Redwood Forests in a Changing California Science Symposium,
- Rengers, F. K., McGuire, L. A., Kean, J. W., Staley, D. M., & Hobley, D. E. J. (2016). Model simulations of flood and debris flow timing in steep catchments after wildfire. 52(8), 6041-6061. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2015WR018176>
- Reubens, B., Poesen, J., Danjon, F., Geudens, G., & Muys, B. (2007). The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus

- on root system architecture: a review. *Trees*, 21(4), 385-402. <https://doi.org/10.1007/s00468-007-0132-4>
- Rickenmann, D. (1999). Empirical Relationships for Debris Flows. *Natural Hazards*, 19(1), 47-77. <https://doi.org/10.1023/A:1008064220727>
- Rodríguez-Echeverry, J., Echeverría, C., Oyarzún, C., & Morales, L. (2018). Impact of land-use change on biodiversity and ecosystem services in the Chilean temperate forests. *Landscape Ecology*, 33(3), 439-453. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0612-5>
- Rojas, C., Pino, J., Basnou, C., & Vivanco, M. J. A. g. (2013). Assessing land-use and-cover changes in relation to geographic factors and urban planning in the metropolitan area of Concepción (Chile). Implications for biodiversity conservation. 39, 93-103.
- Saito, H., Murakami, W., Daimaru, H., & Oguchi, T. (2017). Effect of forest clear-cutting on landslide occurrences: Analysis of rainfall thresholds at Mt. Ichifusa, Japan. *Geomorphology*, 276, 1-7. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.09.024>
- Salazar, A. (2010). Transformaciones socio-territoriales en la periferia metropolitana: la ciudad periurbana, estrategias locales y la gobernanza en Santiago de Chile. *Scripta Nova: revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, 14, 47.
- Salinas, E., & Pérez, L. (2011). Procesos urbanos recientes en el Área Metropolitana de Concepción: transformaciones morfológicas y tipologías de ocupación %J Revista de geografía Norte Grande. 79-97. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022011000200006&nrm=iso
- Schmidt, K. M., Roering, J. J., Stock, J. D., Dietrich, W. E., Montgomery, D. R., & Schaub, T. (2001). The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5), 995-1024. <https://doi.org/10.1139/t01-031>
- Schwarz, M., Cohen, D., & Or, D. (2011). Pullout tests of root analogs and natural root bundles in soil: Experiments and modeling. 116(F2). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2010JF001753>
- Seed, B. H., & Goodman, R. E. (1964). Earthquake Stability of Slopes of Cohesionless Soils. 90(6), 43-74. <https://doi.org/doi:10.1061/JSFEAQ.0000684>
- Sepúlveda, S., Rebolledo Lemus, S., Verdugo Alvarado, R., & Elgueta Dedes, S. (1998). Metodología para evaluar el peligro de flujos de detritos en ambientes montañosos: aplicación en la quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana. Tesis (geólogo)--Universidad de Chile.
- Sepúlveda, S. A., Rebolledo, S., & Vargas, G. J. Q. I. (2006). Recent catastrophic debris flows in Chile: Geological hazard, climatic relationships and human response. 158(1), 83-95.
- SERNAGEOMIN. (2002). Mapa Geológico de Chile. Escala 1:1.000.000.
- SERNAGEOMIN. (2017). Principales desastres ocurridos desde 1980 en Chile.
- Side, R., & Ochiai, H. J. W. r. m. A. G. U., Washington. (2006). Processes, prediction, and land use. 525.

- Sidle, R. C. (1991). A Conceptual Model of Changes in Root Cohesion in Response to Vegetation Management. 20(1), 43-52. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/jeq1991.00472425002000010009x>
- Sidle, R. C. (1992). A theoretical model of the effects of timber harvesting on slope stability. 28(7), 1897-1910. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/92WR00804>
- Sidle, R. C., Pearce, A. J., & O'Loughlin, C. L. (1985). *Hillslope stability and land use*. American geophysical union.
- Smith, P., & Romero, H. (2009). Efectos del crecimiento urbano del Área Metropolitana de Concepción sobre los humedales de Rocuant-Andalién, Los Batros y Lenga %J Revista de geografía Norte Grande. 81-93. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022009000200005&nrm=iso
- Soutadé, G. (1998). *Les tremblements de terre dans les Pyrénées orientales et en Catalogne: de l'imaginaire au réel*. Trabucaire.
- Stokes, A., Norris, J. E., van Beek, L. P. H., Bogaard, T., Cammeraat, E., Mickovski, S. B., . . . Fourcaud, T. (2008). How Vegetation Reinforces Soil on Slopes. In J. E. Norris, A. Stokes, S. B. Mickovski, E. Cammeraat, R. van Beek, B. C. Nicoll, & A. Achim (Eds.), *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions* (pp. 65-118). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6676-4_4
- Stothoff, S. J. P. f. U. h. p. n. g. d. M. M. h. (2008). Infiltration tabulator for Yucca mountain: Bases and confirmation.
- Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de
- Swanson, F. J., & Dyrness, C. T. (1975). Impact of clear-cutting and road construction on soil erosion by landslides in the western Cascade Range, Oregon. *Geology*, 3(7), 393-396. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1975\)3<393:IOCARC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1975)3<393:IOCARC>2.0.CO;2) %J Geology
- Teramoto, Y., & Shimokawa, E. J. J. o. t. J. S. o. C. F. (2011). Revegetation on steep slopes prone to shallow landslides in an abandoned clear-cut plantation forest, Kuma-mura, Kumamoto Prefecture. 10(1), 15-19.
- Terzaghi, K. (1950). Mechanism of landslides.
- Thien, S. J. (1979). A flow diagram for teaching texture-by-feel analysis. 8(1), 54-55. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/jae.1979.0054>
- TRAGSA, G. (1994). Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. *Madrid, España: Mundi-Prensa*.
- Trivelli, P. (1981). Reflexiones en torno a la política nacional de desarrollo urbano. *Revista EURE - Revista de Estudios Urbano Regionales*, 8(22). <https://doi.org/10.7764/921>
- UNDRO. (1980). Natural disasters and vulnerability analysis :report of Expert Group Meeting, 9-12 July 1979. In. Geneva :: UN.
- Vanacker, V., Vanderschaeghe, M., Govers, G., Willems, E., Poesen, J., Deckers, J., & De Bievre, B. J. G. (2003). Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andean watersheds. 52(3-4), 299-315.
- Varnes, D. J. J. S. r. (1978). Slope movement types and processes. 176, 11-33.
- Vince, S. W., Duryea, M. L., Macie, E. A., & Hermansen, A. (2004). *Forests at the wildland-urban interface: conservation and management*. CRC Press.

- Vivallos, J., Ramírez, P., & Fonseca, A. (2010). Microzonificación sísmica de la ciudad de Concepción-Chile.
- von Ruetze, J., Lehmann, P., & Or, D. (2016). Linking rainfall-induced landslides with predictions of debris flow runout distances. *Landslides*, 13(5), 1097-1107. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0621-2>
- Wasowski, J., Lamanna, C., & Casarano, D. (2010). Influence of land-use change and precipitation patterns on landslide activity in the Daunia Apennines, Italy. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 43(4), 387-401. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/08-101> %J Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology
- Weih Jr, R. C., Gilbert, M., Cross, J., & Freeman, D. J. J. o. t. A. A. o. S. (2009). Accuracy assessment of recreational and mapping grade GPS receivers. 63(1), 163-168.
- Wever, L. A., Flanagan, L. B., & Carlson, P. J. (2002). Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance and surface conductance in a northern temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 112(1), 31-49. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00041-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00041-2)
- Wieczorek, G. F. J. T. R. B. S. R. (1996). Landslides: investigation and mitigation. Chapter 4-Landslide triggering mechanisms. (247).
- Wilkinson, P. L., Anderson, M. G., & Lloyd, D. M. (2002). An integrated hydrological model for rain-induced landslide prediction. 27(12), 1285-1297. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/esp.409>
- Willatt, S. T., & Sulistyarningsih, N. (1990). Effect of plant roots on soil strength. *Soil and Tillage Research*, 16(4), 329-336. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0167-1987\(90\)90068-O](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0167-1987(90)90068-O)
- Wing, M. G., Eklund, A., & Kellogg, L. D. (2005). Consumer-Grade Global Positioning System (GPS) Accuracy and Reliability. *Journal of Forestry*, 103(4), 169-173. <https://doi.org/10.1093/jof/103.4.169> %J Journal of Forestry
- Wischmeier, W. H., Johnson, C. B., Cross, B. J. J. o. S., & Conservation, W. (1971). SOIL ERODIBILITY NOMOGRAPH FOR FARMLAND AND CONSTRUCTION SITES. 26, 5189.
- Youd, L. T., & Perkins, D. M. (1978). Mapping Liquefaction-Induced Ground Failure Potential. 104(4), 433-446. <https://doi.org/doi:10.1061/AJGEB6.0000612>
- Zeri, M., S. Alvalá, R. C., Carneiro, R., Cunha-Zeri, G., Costa, J. M., Rossato Spatafora, L., . . . Marengo, J. (2018). Tools for Communicating Agricultural Drought over the Brazilian Semiarid Using the Soil Moisture Index. 10(10), 1421. <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/10/1421>
- Zêzere, J. L. s., de Brum Ferreira, A., & Rodrigues, M. L. s. J. G. (1999). The role of conditioning and triggering factors in the occurrence of landslides: a case study in the area north of Lisbon (Portugal). 30(1-2), 133-146.
- Zhou, Y., Watts, D., Li, Y., & Cheng, X. (1998). A case study of effect of lateral roots of *Pinus yunnanensis* on shallow soil reinforcement. *Forest Ecology and Management*, 103(2), 107-120. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00216-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00216-8)