

Tabla de Contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Formulación del problema propuesto	1
1.2	Objetivos.....	3
1.2.1	Objetivo general	3
1.2.2	Objetivos específicos.....	3
1.3	Metodología.....	3
2	Marco teórico.....	4
2.1	Remociones en masa.....	4
2.1.1	Definición.....	4
2.1.2	Tipos de remociones en masa.....	4
2.2	Flujos de detritos.....	8
2.2.1	Composición granulométrica y morfología de flujos de detritos	8
2.2.2	Reología de flujos de detritos	9
2.2.3	Propiedades de la mecánica de movimiento de flujos de detritos	10
2.2.4	Cómo distinguir entre tipos de flujos a partir de evidencias de campo en pequeñas cuencas hidrográficas	11
2.3	Software RAMMS-debris flow.....	15
3	Metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos mediante análisis jerárquico de procesos (AHP).....	18
3.1	Introducción	18
3.2	Descripción del área de estudio	19
3.3	Determinación de factores condicionantes	20
3.4	Elaboración de mapas temáticos.....	20
3.5	Reclasificación de mapas temáticos mediante AHP.....	21
3.6	Elaboración de mapa de susceptibilidad de flujos de detritos	22
3.7	Validación de mapa de susceptibilidad de flujos de detritos	24
3.8	Resumen esquemático de metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos	25
4	Metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos.....	26
4.1	Introducción	26
4.2	Revisión y corrección del Modelo de Elevación Digital (DEM).....	26

4.3	Metodología para estimar parámetros físicos de un flujo de detritos (MPF)	27
4.3.1	Introducción.....	27
4.3.2	Trayectoria de un flujo de detritos.....	28
4.3.3	Puntos de control	29
4.3.4	Volumen de un flujo de detritos	30
4.3.5	Densidad de un flujo de detritos	31
4.3.6	Hidrograma y área de liberación	31
4.3.7	Resumen esquemático de MPF.....	33
4.4	Calibración de parámetros de resistencia.....	33
4.5	Elaboración de un mapa de amenaza de flujos de detritos	35
4.6	Resumen esquemático de metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos...	38
5	Susceptibilidad de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso.....	40
5.1	Descripción del área de estudio	40
5.1.1	Ubicación y vías de acceso.....	40
5.1.2	Antecedentes de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso.....	41
5.1.3	Marco Geológico	47
5.1.4	Marco Geomorfológico	56
5.1.5	Clima	60
5.1.6	Hidrometeorología.....	61
5.2	Determinación de factores condicionantes	62
5.3	Elaboración de mapas temáticos.....	63
5.4	Reclasificación de mapas temáticos mediante AHP	68
5.5	Elaboración de mapa de susceptibilidad de flujos de detritos	75
5.6	Validación de mapa de susceptibilidad de flujos de detritos	78
6	Amenaza de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso	79
6.1	Introducción.....	79
6.2	DEM corregido a partir de GPS diferencial.....	79
6.3	Estimación de parámetros físicos del flujo de detritos	80
6.3.1	Trayectoria del flujo de detritos.....	80
6.3.2	Puntos de control, volumen, densidad e hidrograma del flujo de detritos	80
6.4	Calibración de parámetros de resistencia.....	82

6.5	Elaboración del mapa de amenaza de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso	84
7	Discusiones.....	87
7.1	Análisis de metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos	87
7.2	Análisis de metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos	88
7.2.1	Análisis de metodología para estimar parámetros físicos de un flujo de detritos (MPF).....	89
7.2.2	Uso de RAMMS-debris flow en la elaboración de un mapa de amenaza de flujos de detritos.....	90
7.3	Evaluación de la susceptibilidad de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso	92
7.4	Evaluación de la amenaza de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso	94
8	Conclusiones.....	96
9	Recomendaciones	97
9.1	Estudios metodológicos futuros.....	97
9.2	Estudios futuros de flujos de detritos en la cuenca del rio Maipo	97
9.3	Sistema de monitoreo de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso	97
10	Glosario	99
11	Bibliografía.....	100

Índice de Figuras

Figura 2.1. Tipos de movimientos de remociones en masa, según Cruden & Varnes (1996). a) Caída, b) Volcamiento, c) Deslizamiento, d) Propagación lateral, e) Flujo.....	8
Figura 2.2. Corte esquemático típico de un flujo de detritos. Frente con bloques de un pulso del flujo de detritos (diagrama de Pierson, 1986). Tomado de Proyecto Multinacional Andino (2007).	9
Figura 2.3. Evidencias de campo del paso de a) flujos de detritos e b) inundaciones. Modificada de Pierson (2005).	14
Figura 3.1 Esquema de ejemplo de aplicación de AHP para la elaboración de mapa continuo de susceptibilidad. Elaboración propia.....	23
Figura 3.2. Campos de validación de un mapa de susceptibilidad de flujos de detritos a partir de un catastro de activación. Elaboración propia.	24
Figura 3.3. Flujograma de metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos. Elaboración propia.....	25
Figura 4.1. Resumen de corrección de DEM a partir de mediciones en terreno con GPS diferencial. Elaboración propia.....	27

Figura 4.2. Flujograma para estimar parámetros de flujo a partir de fórmulas empíricas. Modificado de Rickenmann (1999).....	28
Figura 4.3. Mapeo de la trayectoria de un flujo de detritos. Modificada de Nhuchhen (2017). ...	29
Figura 4.4. Ejemplo de punto de control para la aplicación de la Ecuación de Selby (1993), a) vista en planta y b) vista en sección transversal del canal. Elaboración propia.....	29
Figura 4.5. Ejemplo de Hidrograma de Tres Puntos. Tomado de WLS (2013).	32
Figura 4.6. Flujograma de metodología para estimar parámetros físicos de un flujo de detritos con trabajo en terreno y gabinete (MPF). Elaboración propia.	33
Figura 4.7. Datos necesarios para calibrar un evento conocido con el software RAMMS-debris flow. Elaboración propia.	34
Figura 4.8. Ejemplo generalizado de zonificación de grados de amenaza. Grados de amenaza: Muy alto (rojo), Alto (naranja), Medio (amarillo) y Bajo (verde). Elaboración propia.	37
Figura 4.9. Flujograma de metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos. Elaboración propia.....	39
Figura 5.1. Ubicación del área de estudio con sus estaciones meteorológicas más cercanas. Elaboración propia.....	40
Figura 5.2. Catastro de activaciones recientes de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.....	42
Figura 5.3. a) Secciones media e inferior del estero San Alfonso, se indican los puntos de muestras. b) Marcas de olas y depósitos de flujo en el punto de la muestra SA (1). Tomada de Sepúlveda <i>et al.</i> (2014).	44
Figura 5.4. Trayectoria de flujo y depósito del evento del 21 de enero de 2013. Recuadro rojo corresponde a la imagen de la derecha. Elaboración propia.....	44
Figura 5.5. a) Altura de las marcas de olas en los pilares del puente de la vía del tren. b) Depósito final en la zona de descarga al río Maipo. c) Embancamiento local del río Maipo por la descarga del aluvión. Tomada de Marín <i>et al.</i> (2017).	46
Figura 5.6. Trayectoria de flujo y depósito del evento del 25 de febrero de 2017. Recuadro rojo corresponde a la imagen de la derecha. Elaboración propia.....	47
Figura 5.7. Segmentación morfoestructural del Orógeno Andino entre los 32°S y los 35°S. El recuadro blanco encierra el área estudiada. Tomado de Quiroga (2013).	48
Figura 5.8. Mapa Geológico Regional adaptado por Fock (2005) de la Hoja de Santiago 1:250.000 (Thiele, 1980). Tomado de Fock (2005). El recuadro negro encierra el área de estudio. Los recuadros rojos indican la geología regional involucrada en este estudio.....	49
Figura 5.9. Mapa Geológico (y geotécnico) del área de estudio a escala 1:20.000. Elaboración propia.	55
Figura 5.10. Mapa Geomorfológico Regional de la Región Metropolitana. El recuadro negro encierra el área de estudio. Tomado de Börgel (1983).....	56
Figura 5.11. Mapa Geomorfológico del área de estudio a escala 1:20.000. Elaboración propia. .	59
Figura 5.12. Mapa con climas presentes en la Región Metropolitana. Tomado de Padilla (2006). El recuadro negro corresponde a la zona de estudio.	60
Figura 5.13. (a) Representación esquemática de las condiciones meteorológicas durante días lluviosos TWW y (b) días lluviosos TSW. Modificada de Viale & Garreaud (2014).	62

Figura 5.14. Mapa temático de Pendiente. Elaboración propia.....	64
Figura 5.15. Mapa temático de Elevación y Crioclastia. Elaboración propia.	66
Figura 5.16. Mapa temático de Antecedentes por subcuenca. Las etiquetas corresponden al nombre de cada subcuenca. Elaboración propia.	67
Figura 5.17. Mapa temático de Curvatura. Elaboración propia.	68
Figura 5.18. Mapas temático y reclasificado del factor Geomorfología. Elaboración propia.....	70
Figura 5.19. Mapas temático y reclasificado del factor Geología. Elaboración propia.	71
Figura 5.20. Mapas temático y reclasificado del factor Pendiente. Elaboración propia.	72
Figura 5.21. Mapas temático y reclasificado del factor Elevación y Crioclastia. Elaboración propia.	73
Figura 5.22. Mapas temático y reclasificado del factor Antecedentes. Elaboración propia.....	74
Figura 5.23. Mapas temático y reclasificado de Curvatura. Elaboración propia.....	75
Figura 5.24. Distribución de ponderación de los factores condicionantes para la susceptibilidad de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.....	75
Figura 5.25. Mapas continuo y reclasificado de susceptibilidad de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.	76
Figura 5.26. Mapa final de susceptibilidad de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso. Escala 1:20.000. Elaboración propia.	77
Figura 5.27. Izquierda: distribución del catastro al superponerlo sobre el mapa de susceptibilidad de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso. Derecha: valores dentro de los campos que validan el mapa anterior. Cada “x” representa porcentaje de puntos en cada zona de susceptibilidad. Elaboración propia.....	78
Figura 6.1. a) Comparación entre drenajes generados por DEM original (10 m) y DEM corregido (5 m) y, b) Puntos de elevación tomados con GPS diferencial. Elaboración propia.....	79
Figura 6.2. Puntos de control del evento del 25 de febrero de 2017 y localización de hidrograma. Elaboración propia.....	81
Figura 6.3. Hidrograma para una C_v de a) 48% y b) 57%. Elaboración propia.	82
Figura 6.4. Localización de áreas de liberación en bloque y alcance del flujo simulado para zonificar el grado de amenaza medio de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.....	85
Figura 6.5. Mapa de amenaza de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso. Escala 1:20.000. Elaboración propia.....	86
Figura 9.1. Propuesta de armonización de metodología expuesta con estudios de vulnerabilidad y de capacidades, para la reducción de riesgos de desastres siconaturales. Elaboración propia....	97
Figura 9.2. Localización de herramientas para un sistema de monitoreo de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.	98

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Resumen del nuevo Sistema de Clasificación de Varnes según Hungr et al. (2014).....	4
Tabla 2.2. Escala de velocidades de remociones en masa según Cruden & Varnes (1996). La respuesta humana se basa en Hungr (1981).....	5

Tabla 2.3. Clasificación de un flujo canalizado con arrastre de detritos según concentración volumétrica. Modificada de Costa (1988).	8
Tabla 2.4. Aspectos físicos asociados al movimiento de flujos de detritos. Modificado de Sepúlveda (1998).	10
Tabla 2.5. Formas y márgenes de depositación como evidencias para distinguir entre inundaciones, flujos hiperconcentrados y flujos de detritos. Modificado de Pierson (2005).	12
Tabla 2.6. Estratificación y texturas de sedimentos como evidencias para distinguir entre inundaciones, flujos hiperconcentrados y flujos de detritos. Modificado de Pierson (2005).	13
Tabla 2.7. Datos de entrada necesarios para simular en RAMMS. Elaboración propia.	16
Tabla 2.8. Rangos recomendados para μ , ξ y C. Tomada de WSL (2013).	17
Tabla 3.1. Escala de Saaty (2008) para la toma de decisiones. Modificado de Saaty (2008).	19
Tabla 3.2. Ejemplo de factores condicionantes para un análisis de susceptibilidad de remociones en masa. Modificado de Lara (2007).	20
Tabla 3.3. Relación referencial entre escala de trabajo y resolución espacial en metros. Modificado de Sepúlveda & Patiño (2016).	21
Tabla 3.4. Ejemplo de matriz de comparación a pares con su error de consistencia asociado e IS _n dentro de cada factor condicionante. Elaboración propia.	22
Tabla 4.1. Fórmulas empíricas que relacionan la descarga máxima (Qp) y el volumen total de flujo de detritos (Vt). Modificado de Jakob (2005).	30
Tabla 4.2. Parámetros utilizados para la calibración de un evento conocido en RAMMS-debris flow. Modificado de Hussin et al. (2012).	34
Tabla 4.3. Grados de amenaza y clasificación de tamaño de flujos de detritos de Jakob (2005). Modificada de Jakob (2005).	36
Tabla 4.4. Ejemplo generalizado de criterios de zonificación de grados de amenaza. Elaboración propia.	37
Tabla 5.1. Eventos declarados en la desembocadura del estero San Alfonso. Modificado de Muñoz (2016).	41
Tabla 5.2. Precipitaciones registradas entre el 19 y el 22 de enero 2013. Modificada de Sepúlveda et al. (2014).	43
Tabla 5.3. Precipitaciones ocurridas entre el 24 y el 26 de febrero 2017. Modificada de Marín et al. (2017).	45
Tabla 5.4. Descripción de las morfologías descritas en el área de estudio, con sus respectivos procesos morfogenéticos. Elaboración propia.	57
Tabla 5.5. Factores condicionantes en la generación de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.	63
Tabla 5.6. Clasificación y justificación del factor Pendiente. Elaboración propia.	63
Tabla 5.7. Clasificación y justificación del factor Elevación y Crioclastia. Elaboración propia.	65
Tabla 5.8. Clasificación y justificación del factor de Antecedentes. Elaboración propia.	66
Tabla 5.9. Clasificación y justificación del factor Curvatura. Elaboración propia.	67
Tabla 5.10. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Geomorfología. Elaboración propia.	69

Tabla 5.11. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Geología. Elaboración propia.....	70
Tabla 5.12. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Pendiente de morfologías aluviales. Elaboración propia.....	71
Tabla 5.13. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Pendiente de morfología predominantemente no aluviales. Elaboración propia.	72
Tabla 5.14. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Elevación y Crioclastia. Elaboración propia.	73
Tabla 5.15. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Antecedentes por subcuenca. Elaboración propia.	74
Tabla 5.16. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Curvatura. Elaboración propia.....	74
Tabla 5.17. Comparación a pares, error de consistencia y ponderación de cada factor condicionante. Elaboración propia.....	76
Tabla 6.1. Aplicación de relaciones empíricas para la estimación de volumen y concentración volumétrica del flujo. Elaboración propia.	81
Tabla 6.2. Estimación de densidad del flujo. Elaboración propia.	82
Tabla 6.3. Datos necesarios para la calibración de los parámetros de resistencia del evento ocurrido el 25 de febrero de 2017. Elaboración propia.....	82
Tabla 6.4. Control de parámetros utilizados para la calibración del evento ocurrido el 25 de febrero de 2017 evento, para $C_v=48\%$, $\mu=0,08$, $\xi=600 \text{ m}^2/\text{s}$ y $C=0 \text{ Pa}$. Elaboración propia.	83
Tabla 6.5. Criterios de zonificación de grados de amenaza para la elaboración de mapa de amenaza de flujos de detritos para la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.....	84

Anexos

Anexo I	– Clasificación de flujos
Anexo II	– Resumen de modelos hidráulicos para flujos de detritos
Anexo III	– Resumen de estudios orientados a evaluar la susceptibilidad de remociones en masa
Anexo IV	– Trabajo en terreno
Anexo V	– Sobrevuelo SERNAGEOMIN
Anexo VI	– Justificación de comparación a pares mediante AHP
Anexo VII	– Análisis de sensibilidad de simulaciones en RAMMS-debris flow