



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE  
FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA MEDIANTE ANÁLISIS DE REDES  
NEURONALES APLICADA EN EL FIORDO COMAU, REGIÓN DE LOS LAGOS, CHILE**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO**

**BRUNO FRANCO VILLELA RAMÍREZ**

**PROFESOR GUÍA  
RODRIGO CAMPOS DELGADO**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS  
MARISOL LARA CASTILLO  
PABLO GONZÁLEZ RAMOS**

**SANTIAGO DE CHILE  
2017**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE: Geólogo**  
**POR: Bruno Villela**  
**FECHA: 26/04/2017**  
**PROFESOR GUÍA: Rodrigo Campos**

## **METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA MEDIANTE ANÁLISIS DE REDES NEURONALES APLICADA EN EL FIORDO COMAU, REGIÓN DE LOS LAGOS, CHILE**

El presente trabajo tiene como objetivo principal presentar una metodología para la evaluación de susceptibilidad de remociones en masa, y aplicarla en la ladera este del fiordo Comau, región de Los Lagos, Chile.

Se trabajó con una escala de 1:25.000 y con una resolución de DEM (*Digital Elevation Model*) de 30x30. Por otra parte, los condicionantes para el análisis fueron: elevación, pendiente, orientación de ladera, curvatura media, geología, distancia a lineamientos, distancia a fallas, distancia a cursos de agua, distancia a ríos y radiación solar anual, los cuales fueron normalizados.

Para la evaluación de susceptibilidad, se ocuparon redes neuronales (*Análisis Neural Network ANN*) del tipo *Multi Layer Perceptron (MLP)*, con el método de aprendizaje *feed forward backpropagation* o propagación de error y con el método de convergencia Levenberg-Marquardt.

Para llevar a cabo la metodología, el área de estudio se redujo a puntos equiespaciados a 30 metros, se tomaron los puntos de generación de remociones en masa y puntos que no cumplen con las condiciones de remociones en masa, y se le dio diez valores correspondientes al valor de cada factor condicionante normalizado. Asimismo, los puntos del área de estudio quedaron asociados a un valor de los factores condicionantes.

Con los puntos de inicio o generación y de zonas con ausencia de remoción en masa, se configuraron matrices para el proceso de entrenamiento, validación y *test* de la red neuronal.

Una vez entrenada la red y corroborado su buen desempeño, se evaluaron los puntos del área de estudio, obteniendo un valor de susceptibilidad para cada uno de ellos, los que fueron categorizados cualitativamente en muy baja, baja, media, alta y muy alta.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la red, se determinó una correlación entre zonas de alta y muy alta susceptibilidad con elevaciones entre los 800 y 1.600 m s.n.m, pendientes entre los 35° y 70°, orientación de laderas oeste y curvaturas medias cóncavas; mientras que zonas de baja y muy baja susceptibilidad presentaron correlación con elevaciones inferiores a 100 m s.n.m., pendientes menores a 35°, orientación de ladera este, curvaturas medias convexas y planas, y distancia a fallas, lineamientos, cursos de agua y ríos, muy lejanas.

Considerando los pesos sinápticos de la capa de entrada, se determinó que los factores que poseían mayor peso eran: elevación, distancia a lineamientos, geología, pendiente, orientación de ladera, distancia a ríos, distancia a fallas, curvatura, radiación y distancia a cursos de agua.

Así, se realizaron análisis con los seis factores más importantes, y luego, con tres, lo que demostró que el análisis con diez factores es óptimo, pero un análisis con 6 factores es suficiente, y entrega una buena aproximación de susceptibilidad, además de tener una correlación positiva con los análisis. Por su parte, un análisis con tres factores no presentó una buena aproximación de susceptibilidad.

*“... Cuando tengas que matar a un hombre  
tienes un deber para con él.  
Debes mirarlo a los ojos y oír  
sus últimas palabras.  
Si no puedes con eso,  
quizá ...  
No debe morir”*

*N. S.*

## AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a ARCADIS CHILE SpA por brindarme esta oportunidad, así también, a José Lagos por sus gestiones.

Agradezco a los miembros de la comisión a Rodrigo Campos y Pablo González, por creer en mí para desarrollar este tema, por apoyarme aconsejarme, y por ser grandes personas. A Marisol Lara por su gran paciencia, consejos y buena disposición, a Sofía Rebolledo por sus correcciones.

Quiero agradecer de manera especial a mi familia por ser todo lo que deben y más. A mi padre por inculcarme la perseverancia y superación, a mi madre por su apoyo y tremenda comprensión, a mis hermanas por ayudarme y enseñarme a superar las adversidades, a Andrés por darnos a nuestra Catalina, la mayor alegría.

Agradezco al resto de mi familia: a primo Nicolás por esas largas noches de estudio, a mis tías, Belén y Nicole, por brindarme calor de hogar cuando fue necesario, a mis tí@s Villela y mi tía Lucía por darme estancia. A mis pequeños, por ser ustedes.

A mis abuelas, a ti por darme el carácter, el ajedrez, la astucia y siempre creer que era el más inteligente. Y a ti, por ser mi guía, confidente, abogada, enseñarme a ser un hombre de valores y que no hay límites para el amor.

Agradezco a mi equipo de Taekwondo FCFM y escuela Ilyeo, quienes me acompañaron en mi carrera universitaria. A su líder, Profe Alejandro Allende por ser entrenador, psicólogo, compañero y amigo, cuando fue necesario. Así también a los amigos que salieron de ahí: los brocas Tito y Pinga, grandes apoyos, Gaby, Nico, Libe, Ortiz, Caro, Manuel, Andrew, Uriel, Marce, Pancho, Juaco, Liss, Fabián, y mención especial para Ale Nancupil.

A mis grandes amigos de la vida Cindy y Cristián, y al perdido Boris. A Panchana, Javi, Violchen y Natascha por ser los mejores geo-amigos.

Agradezco a Uriel y Jorge por su ayuda con MATLAB, y a Cony Molina por su bondad.

No pueden quedar ausentes todos los maestros, docentes y profesores que gracias a su gran vocación me ayudaron desde un comienzo, creyeron en mis capacidades y me alentaron a superarme. Tía Sofía, Elcira, Paty, Millo (mi primer Maestro), profe Pablo Olivares, Sergio Rojas, Jeanette Gacitúa, Carmen Otárola, Marta y Consuelo Gamboa, María Ester Moreno, Elizabeth Biscarra, profes Cristián y Héctor (mis coach de Ajedrez), y Ana María Carvallo. Muchísimas gracias por todo lo enseñado.

A ti, mi fuerza y motivación para terminar esta carrera, memoria y etapa de la vida, gracias por tu enorme ayuda, compañerismo, contención y paciencia, por motivarme a ser un mejor hombre. Sin ti, nada de esto hubiese sido posible. Gracias infinitas mi Nico.



## TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Ubicación y vías de acceso.....	1
1.2	Motivación y formulación del problema .....	3
1.3	Objetivos .....	3
1.3.1	Objetivo general.....	3
1.3.2	Objetivos específicos.....	3
1.4	Metodología .....	3
1.4.1	Revisión de antecedentes y catastro .....	4
1.4.2	Trabajo de terreno .....	4
1.4.3	Trabajo de gabinete.....	4
1.5	Limitaciones .....	5
2	MARCO TEÓRICO .....	6
2.1	Clasificación de remociones en masa.....	6
2.2	Factores condicionantes .....	12
2.2.1	Geología y geotecnia.....	13
2.2.2	Geomorfología .....	14
2.2.3	Hidrología e hidrogeología.....	14
2.2.4	Vegetación.....	15
2.2.5	Clima .....	16
2.2.6	Actividad antrópica .....	16
2.3	Factores detonantes .....	17
2.3.1	Precipitaciones .....	17
2.3.2	Sismos.....	18
2.3.3	Actividad volcánica .....	19
2.3.4	Otros.....	19
2.4	Conceptos de peligro en remociones en masa .....	19
2.4.1	Susceptibilidad.....	20
2.4.2	Peligro .....	20
2.5	Metodología para la evaluación de peligro.....	20
2.5.1	Metodologías cualitativas .....	21
2.5.1.1	Análisis del campo geomorfológico.....	21
2.5.1.2	Índice de mapas de parámetros.....	22
2.5.2	Metodologías cuantitativas .....	23
2.5.2.1	Metodologías de análisis estadístico.....	23

2.5.2.1.1	Metodología cuantitativa bivalente.....	24
2.5.2.1.2	Metodología cuantitativa multivalente.....	24
2.5.2.2	Metodología geotécnica ingenieril.....	24
2.5.2.2.1	Metodología geotécnica ingenieril determinística .....	25
2.5.2.2.2	Metodología geotécnica ingenieril probabilística .....	25
2.5.2.3	Análisis con redes neuronales .....	26
2.5.3	Metodologías mixtas.....	28
3	ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	30
3.1	Geomorfología regional.....	30
3.1.1	Unidades morfoestructurales.....	30
3.1.2	Hoyas hidrográficas.....	33
3.1.3	Complejos volcánicos .....	35
3.1.3.1	Volcán Yate.....	37
3.1.3.2	Volcán Hornopirén .....	37
3.1.3.3	Volcán Apagado.....	37
3.1.3.4	Volcán Huequi.....	37
3.1.3.5	Volcán Michimahuida.....	38
3.1.3.6	Volcán Chaitén.....	38
3.2	Geomorfología local.....	39
3.2.1	Unidades morfoestructurales.....	39
3.2.2	Hoyas hidrográficas.....	47
3.2.3	Glaciares .....	50
3.2.4	Complejos volcánicos .....	52
3.3	Geología regional.....	54
3.3.1	Litologías .....	56
3.3.1.1	Rocas sedimentarias, metamórficas y volcánicas.....	56
3.3.1.1.1	Paleozoico – Triásico (PzTr).....	56
3.3.1.1.2	Pleistoceno – Holoceno (PIHs).....	57
3.3.1.1.3	Cuaternario (PiHv) .....	57
3.3.1.2	Rocas intrusivas.....	57
3.3.1.2.1	Pérmico – Triásico (PTrg; 265 -245 Ma).....	57
3.3.1.2.2	Jurásico Inferior (Jg; 202 – 178 Ma) .....	58
3.3.1.2.3	Cretácico Inferior (Kg; 144 – 90 Ma).....	58
3.3.1.2.4	Mioceno (Mg ;18 – Ma).....	58
3.3.2	Fallas y estructuras.....	58
3.4	Geología local.....	61

3.4.1	Litologías .....	63
3.4.1.1	Rocas metamórficas .....	63
3.4.1.1.1	Esquistos anfibolíticos (PzTr4c).....	63
3.4.1.2	Rocas ígneas .....	65
3.4.1.2.1	Dioritas (Jg) .....	65
3.4.1.2.2	Tonalitas (Kg) .....	66
3.4.1.2.3	Dioritas y tonalitas (Mg) .....	67
3.4.1.3	Depósitos no-consolidados .....	70
3.4.1.3.1	Depósitos fluviodeltaicos .....	70
3.4.1.3.2	Depósitos fluviotorrenciales .....	72
3.4.2	Unidades de suelo .....	76
3.4.2.1	Depósitos de suelo vegetal (Qtve; Cuaternario).....	76
3.4.2.2	Depósitos de suelo con material volcánico (Qtvo; Cuaternario).....	78
3.4.3	Fallas y estructuras.....	79
3.5	Clima y vegetación .....	84
3.5.1	Regímenes climáticos.....	84
3.5.2	Temperatura .....	86
3.5.3	Humedad .....	87
3.5.4	Pluviometría.....	88
3.5.5	Vegetación.....	90
3.6	Sismicidad de la zona de estudio.....	92
3.7	Inventario de remociones en masa .....	97
3.7.1	Caídas de roca .....	99
3.7.2	Deslizamiento irregular de roca (deslizamiento de roca) .....	100
3.7.3	Deslizamiento planar de arcilla/limo (deslizamiento de suelo).....	102
3.7.4	Deslizamientos de suelo y roca .....	103
3.7.5	Flujos de detritos .....	104
4	EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA.....	105
4.1	Redes neuronales en remociones en masa.....	105
4.1.1	Funcionamiento de la red neuronal .....	105
4.1.2	Número de neuronas en la capa oculta .....	107
4.1.3	Algoritmo <i>feed forward backpropagation</i> .....	108
4.1.4	Sobrentrenamiento .....	111
4.2	Metodología de análisis .....	112
4.2.1	Elección de factores para el área de estudio .....	112
4.2.2	Tratamiento de factores .....	112

4.2.3	Normalización de factores .....	113
4.2.4	Mapas de factores normalizados .....	113
4.2.4.1	Elevación.....	113
4.2.4.2	Pendiente.....	117
4.2.4.3	Aspecto u orientación de ladera.....	120
4.2.4.4	Curvatura media.....	123
4.2.4.5	Distancia a redes de drenaje.....	126
4.2.4.6	Distancia a fallas y lineamientos .....	131
4.2.4.7	Geología.....	136
4.2.4.8	Radiación solar anual.....	138
4.2.5	Determinación de puntos de información .....	141
4.2.5.1	Puntos de remociones en masa (PRM) .....	141
4.2.5.2	Puntos libres de remociones en masa (PLRM) .....	141
4.2.6	Matriz de características.....	141
4.2.7	Vector de clases .....	142
4.2.8	Matriz de puntos de evaluación .....	143
4.2.9	Tratamiento de datos y creación de la red neuronal.....	143
4.2.9.1	Separación de datos de la matriz de entrenamiento .....	143
4.2.9.1.1	Entrenamiento y matriz de entrenamiento .....	144
4.2.9.1.2	Validación y matriz de validación .....	144
4.2.9.1.3	<i>Test</i> y matriz de <i>test</i> .....	144
4.2.10	Creación de la red neuronal <i>multilayer perceptron</i> .....	145
4.2.11	Desempeño de la red neuronal .....	148
4.2.11.1	Performance .....	148
4.2.11.2	Training state.....	149
4.2.11.3	Error Histogram (Histograma de error) .....	150
4.2.11.4	Receiver Operating Characteristic (Curva de Característica Operativa del Receptor) .....	151
4.2.12	Análisis con variación de factores .....	152
4.2.13	Categorización de susceptibilidad y factores.....	153
5	RESULTADOS.....	157
5.1	Susceptibilidad.....	157
5.1.1	Caso A: Diez factores .....	157
5.1.1.1	Elevación.....	160
5.1.1.2	Geología.....	161
5.1.1.3	Pendiente.....	162

5.1.1.4	Orientación de ladera.....	163
5.1.1.5	Curvatura media.....	164
5.1.1.6	Distancia a ríos .....	165
5.1.1.7	Distancia a cursos de agua.....	166
5.1.1.8	Distancia a fallas .....	167
5.1.1.9	Distancia a lineamientos .....	168
5.1.1.10	Radiación solar anual.....	168
5.1.1.11	Desempeño de la red neuronal .....	169
5.1.2	Caso B: Seis factores .....	172
5.1.3	Caso C: Tres factores.....	177
5.1.4	Caso D: Sin elevación .....	182
5.2	Correlación entre casos .....	187
6	DISCUSIONES .....	189
6.1	Discusión de la escala de trabajo .....	189
6.2	Discusión de la cantidad de datos y su representatividad.....	189
6.3	Discusión del mapa de catastro .....	190
6.4	Discusión de la elección de factores.....	190
6.5	Discusión de la red neuronal.....	192
6.5.1	Número de capas ocultas .....	192
6.5.2	Número de neuronas en la capa oculta .....	192
6.5.3	Funciones de activación .....	193
6.6	Discusión de los resultados del análisis de susceptibilidad .....	194
6.6.1	Factores condicionantes.....	195
6.6.1.1	Elevación.....	195
6.6.1.2	Geología.....	195
6.6.1.3	Pendiente.....	196
6.6.1.4	Orientación de ladera.....	196
6.6.1.5	Curvatura media.....	196
6.6.1.6	Distancia a ríos .....	197
6.6.1.7	Distancia a cursos de agua .....	197
6.6.1.8	Distancia a fallas .....	198
6.6.1.9	Distancia a lineamientos .....	198
6.6.1.10	Radiación solar anual.....	199
6.6.2	Categorías de susceptibilidad.....	199
6.6.2.1	Susceptibilidad muy alta .....	199
6.6.2.2	Susceptibilidad alta .....	199

6.6.2.3	Susceptibilidad media .....	200
6.6.2.4	Susceptibilidad baja .....	200
6.6.2.5	Susceptibilidad muy baja.....	200
6.6.3	Variación en la cantidad de factores.....	200
6.7	Validación <i>in situ</i> .....	202
6.8	Ventajas y desventajas .....	208
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	210
7.1	Conclusiones .....	210
7.2	Recomendaciones .....	212
8	BIBLIOGRAFÍA .....	213
9	ANEXOS .....	220

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación de remociones en masa según tipo movimiento y material involucrado (Varnes, 1978). .....	6
Tabla 2.2. Clasificación de velocidad de remociones (Cruden y Varnes, 1996). .....	6
Tabla 2.3. Clasificación de remociones en masa (Hungry <i>et al.</i> , 2013). .....	8
Tabla 2.4. Factores condicionantes relevantes para cada remoción en masa. Modificado de Lara (2007). .....	12
Tabla 2.5. Remociones en masa inducidas por sismos. Las magnitudes en negrita son magnitudes de momento, y las otras son ondas superficiales Richter (Keefer, 2002). ..	19
Tabla 2.6. Cuadro de resumen de métodos, ventajas y desventajas. Escala a la que puede ser usado (S: pequeña, M: mediana y L: gran escala). R significa que su uso es restringido e Y que su uso es completo (Aleotti y Chowdhury, 1988). .....	28
Tabla 3.1 Temperaturas máximas y mínimas de las estaciones Osorno, Puerto Montt, Futaleufú Aeródromo y Alto Palena Aeródromo. ....	86
Tabla 3.2. Humedad relativa del ambiente de las estaciones mencionadas. ....	87
Tabla 3.3. Precipitaciones anuales. ....	88
Tabla 3.4. Precipitaciones máximas en 24 horas. ....	89
Tabla 3.5. Ubicación, área y perímetro de caídas de roca del fiordo Quintupeu. ....	99
Tabla 3.6. Ubicación, área y perímetro de caídas de rocas entre cerro Ugalde y Tambor. ....	99
Tabla 3.7. Ubicación, área y perímetro de caídas de rocas entre los fiordos Quintupeu y Cahuelmó. ....	100
Tabla 3.8. Ubicación, área y perímetro de deslizamientos de roca. ....	101
Tabla 3.9. Ubicación, área y perímetro de deslizamientos de suelo. ....	102
Tabla 4.1. Número de neuronas en la capa oculta. $n$ : número de neuronas en la capa de entrada, $m$ : número de neuronas en la capa de salida, $l$ : número de datos de entrenamiento, y $k$ : factor de ruido (varía entre 4 y 10), número de índice que representa el porcentaje de mediciones falsas en los datos o grado de error. Modificado de Kavzoglu (2001). ....	108
Tabla 4.2. Equivalencia de normalización y colores. ....	113
Tabla 4.3. Normalización geología. ....	136
Tabla 4.4. Extracto de matriz de características con los valores normalizados. ....	142
Tabla 4.5. Extracto de vector de clases. ....	142
Tabla 4.6. Intervalos de quintiles de susceptibilidad .....	154
Tabla 4.7. Tabla de categorización de susceptibilidad. PRM: puntos de escarpes de remoción en masa, PLRM: puntos libres de remociones en masa, Porcentaje ac: porcentaje acumulado. ....	154
Tabla 4.8. Categorización de la elevación. ....	154
Tabla 4.9. Categorización de la geología. ....	155

Tabla 4.10. Categorización de la pendiente. ....	155
Tabla 4.11. Categorización de orientación de ladera .....	155
Tabla 4.12. Categorización de la curvatura media. ....	155
Tabla 4.13. Categorización de cursos de agua y ríos. ....	156
Tabla 4.14. Categorización de distancia a lineamientos y fallas. ....	156
Tabla 4.15. Categorización de la radiación solar anual. ....	156
Tabla 5.1. Influencia porcentual de la elevación según las categorías de susceptibilidad. ....	160
Tabla 5.2. Influencia porcentual de las formaciones geológicas según las categorías de susceptibilidad. ....	162
Tabla 5.3. Influencia porcentual de la pendiente según las categorías de susceptibilidad. ....	163
Tabla 5.4. Influencia porcentual de la pendiente según las categorías de susceptibilidad. ....	164
Tabla 5.5. Influencia porcentual de la curvatura media según las categorías de susceptibilidad. ....	164
Tabla 5.6. Influencia porcentual de la distancia a ríos según las categorías de susceptibilidad. ....	165
Tabla 5.7. Influencia porcentual de la distancia a cursos de agua según las categorías de susceptibilidad. ....	166
Tabla 5.8. Influencia porcentual de la distancia a fallas según las categorías de susceptibilidad. ....	167
Tabla 5.9. Influencia porcentual de la distancia a lineamientos según las categorías de susceptibilidad. ....	168
Tabla 5.10. Influencia porcentual de radiación solar anual según las categorías de susceptibilidad. ....	169
Tabla 5.11. Coeficientes para medir correlación del Caso B y C, respecto al Caso A. ....	188
Tabla 6.1. Factores condicionantes propuestos por esta metodología, y los propuestos por Molina (2016). ....	194
Tabla 6.2. Comparación del desempeño de la red neuronal en los casos A, B y C. ....	201
Tabla 6.3. Tabla de categorías de susceptibilidad y equivalencia de colores. ....	202



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1.1. Mapa rutero con los accesos a la zona de estudio.....	2
Figura 2.1. Diagrama de clasificación de metodologías de acuerdo a su carácter cualitativo o cuantitativo (Aleotti y Chowdhury, 1998). .....	21
Figura 2.2. A: Red neuronal, muestra la capa de entrada ( <i>input layer</i> ), capa escondida ( <i>hidden layer</i> ) y capa de salida ( <i>output layer</i> ). Estas se conectan directamente con el peso de los factores, y la sumatoria de estas, entrega un valor de salida ( <i>output</i> ). B: Proceso que genera una red neuronal hasta lograr la convergencia. ....	27
Figura 3.1. Unidades morfoestructurales de la región de Los Lagos. Polígono rojo indica el área de estudio.....	32
Figura 3.2. Subsubcuencas hidrográficas de la zona de estudio. Fuente: DGA.....	34
Figura 3.3. Volcanes cercanos a la zona de estudio. ....	36
Figura 3.4. Unidades morfoestructurales y depósitos no consolidados del fiordo Comau. ....	40
Figura 3.5. Perfil de elevación del fiordo Comau (Perfil 1). ....	41
Figura 3.6 . Ladera norte del fiordo Quintupeu.....	41
Figura 3.7. Perfil de elevación del fiordo Quintupeu (Perfil 2). ....	42
Figura 3.8. Ladera norte del fiordo Cahuelmó. ....	42
Figura 3.9. Perfil de elevación del fiordo Cahuelmó (Perfil 3).....	43
Figura 3.10. Modelo de Elevación Digital (DEM).....	44
Figura 3.11. Pendientes de la zona de estudio. ....	45
Figura 3.12. Orientación de las laderas.....	46
Figura 3.13. Subdivisión de la Subsubcuenca Costera entre río Negro y río Huinay. ....	49
Figura 3.14. Ladera NE del Glaciar Comau.....	50
Figura 3.15. Glaciares y glaciaretos de la zona de estudio. ....	51
Figura 3.16. Mapa de ubicación de manifestaciones termales.....	53
Figura 3.17. Mapa geológico de la zona de estudio (Ordoñez y Crignola, 2003). ....	55
Figura 3.18. Configuración tectónica y subdivisión de la ZVS (Stern <i>et al.</i> , 2007). ....	60
Figura 3.19. Mapa geológico de la zona de estudio. ....	62
Figura 3.20. Simbología de mapa geológico de la zona de estudio. ....	63
Figura 3.21. Ladera sur del fiordo Cahuelmó. Afloramiento de rocas metamórficas. ....	64
Figura 3.22. Muestra de mano de roca metamórfica. ....	64
Figura 3.23. Muestra de mano de diorita con brújula como escala. ....	65
Figura 3.24. Muestra de mano de metatonalita. ....	66
Figura 3.25. Ladera este del fiordo Comau. Afloramiento de metatonalita.....	67
Figura 3.26. Muestra de mano de diorita.....	68
Figura 3.27. Muestra de mano de tonalita. ....	68

Figura 3.28. Ladera este del fiordo Comau. Afloramiento de tonalita con enclaves máficos. .....	69
Figura 3.29. Ladera este del fiordo Comau. Afloramiento de tonalita con enclaves máficos de distinto tamaño y forma. ....	69
Figura 3.30. Depósito fluviodeltaico río Quintupeu.....	70
Figura 3.31. Depósito fluviodeltaico río Mirta. ....	71
Figura 3.32. Depósito fluviodeltaico río Huinay. ....	71
Figura 3.33. Depósito fluviodeltaico río Vodudahue. ....	72
Figura 3.34. Ladera este del fiordo Comau. Depósitos fluvio- torrenciales. ....	73
Figura 3.35. Depósitos fluvio- torrenciales. ....	74
Figura 3.36. Ladera este del fiordo Comau. Depósitos fluvio- torrenciales en zona de menor pendiente.....	75
Figura 3.37. Ladera este del fiordo Comau. Playa compuesta por depósitos fluvio- torrenciales. ....	75
Figura 3.38. Ladera este del fiordo Comau. Playa de depósitos fluvio- torrenciales compuesta por bloques angulosos de distintos tamaños. ....	76
Figura 3.39. Ladera este del fiordo Comau. Depósitos de suelo vegetal. ....	77
Figura 3.40. Espesor de suelo vegetal. Raíces intercrecidas con presencia de hojas. ..	77
Figura 3.41. Ladera este del fiordo Comau. Depósitos de suelo con material volcánico. .....	78
Figura 3.42. Espesor de depósitos de suelo volcánico. ....	78
Figura 3.43. Diagrama de polos asociados a fallas, obtenidos del <i>software Dips</i> .....	79
Figura 3.44. Diagrama de rosetas asociado a fallas, obtenido del <i>software Dips</i> . ....	80
Figura 3.45. Polos y planos asociados a fallas, obtenidos del <i>software Dips</i> .....	80
Figura 3.46. Diagrama de concentración de polos asociado a lineamientos, obtenido del <i>software Dips</i> .....	81
Figura 3.47. Roseta de los lineamientos, obtenida del <i>software Dips</i> . ....	81
Figura 3.48. Polos y planos de los dominios estructurales asociados a lineamientos, obtenido del <i>software Dips</i> . ....	82
Figura 3.49. Dominios estructurales. DN: Dominio Norte, DC: Dominio Central, DS: Dominio Sur.....	83
Figura 3.50. Mapa de regímenes climáticos del fiordo Comau.....	85
Figura 3.51. Temperaturas de la estación meteorológica Hornopirén.....	86
Figura 3.52. Humedad relativa del ambiente. Estación meteorológica Hornopirén. ....	87
Figura 3.53. Precipitaciones acumuladas entre mayo y octubre de 2016. Estación meteorológica Hornopirén. ....	88
Figura 3.54. Precipitaciones máximas en 24 horas informadas por la estación Hornopirén .....	90

Figura 3.55 Ladera este del fiordo Comau, correspondiente al Bosque Laurifolio Valdiviano.....	91
Figura 3.56. Sotobosque con lianas y enredaderas. ....	92
Figura 3.57. Sotobosque con helechos de tamaños cercanos a dos metros de altura. .	92
Figura 3.58. Historial sísmico correspondiente a la región de Los Lagos entre 17 mayo del 2011 hasta 12 de agosto del 2016. ....	94
Figura 3.59. Sismos de la región de Los Lagos con magnitud $M_w$ igual o mayor a 5.0. .	95
Figura 3.60. Epicentros sísmicos cercanos a la región de Los Lagos.....	96
Figura 3.61. Mapa de catastro de remociones en masa sobre un mapa de relieve sombreado. A: sector A, B: sector B, C: sector C.....	98
Figura 3.62. Caída de roca (polígono verde). Ladera este del fiordo Comau.....	100
Figura 3.63. Deslizamiento de roca irregular. Ladera este del fiordo Comau. Se diferencia entre zona de ruptura (polígono verde) y depósito de remoción en masa (polígono violeta). ....	101
Figura 3.64. Deslizamiento planar de limo y arcilla. Ladera este del fiordo Comau. ....	103
Figura 3.65. Deslizamiento de suelo y roca, ladera este fiordo Comau. Se demarca el área de deslizamiento (polígono rojo) y la zona del depósito (polígono violeta). ....	104
Figura 4.1. Esquema de una neurona artificial y sus respectivos equivalentes de neurona humana (Martín y Sanz, 2010). ....	106
Figura 4.2. Diagrama del método <i>feed forward backpropagation</i> .....	109
Figura 4.3. Ejemplo ilustrativo de las fases <i>forward</i> (negro) y <i>backward</i> (azul) del algoritmo <i>backpropagation</i> (Haykin, 1999).....	110
Figura 4.4. Modelo de elevación digital normalizado, basado en la Figura 3.10. ....	115
Figura 4.5. Elevación categorizada. ....	116
Figura 4.6. Pendiente normalizada, basado en la Figura 3.11. ....	118
Figura 4.7. Pendiente categorizada.....	119
Figura 4.8. Orientación de ladera normalizada, basado en la Figura 3.11. ....	121
Figura 4.9. Orientación de ladera categorizada.....	122
Figura 4.10. Curvatura media normalizada. ....	124
Figura 4.11. Curvatura media categorizada. ....	125
Figura 4.12. Distancia a cursos de agua normalizada, basado en la Figura 3.19. ....	127
Figura 4.13. Distancia a cursos de agua categorizada.....	128
Figura 4.14. Distancia a ríos normalizada, basado en la Figura 3.19.....	129
Figura 4.15. Distancia a ríos categorizada. ....	130
Figura 4.16. Distancia a fallas normalizada, basado en la Figura 3.49. ....	132
Figura 4.17. Distancia a fallas categorizada.....	133
Figura 4.18. Distancia a lineamientos normalizada, basado en la Figura 3.49. ....	134
Figura 4.19. Distancia a lineamientos categorizada. ....	135

Figura 4.20. Geología normalizada, basada en la Figura 3.19.....	137
Figura 4.21. Radiación solar normalizada. ....	139
Figura 4.22. Radiación solar anual categorizada. ....	140
Figura 4.23. Creación de matriz de puntos a partir del <i>DEM</i> .....	143
Figura 4.24. Esquema de la red neuronal. Fuente: <i>MATLAB</i> . ....	146
Figura 4.25. Interfaz del proceso de entrenamiento de la red neuronal. Fuente: <i>MATLAB</i> . .....	147
Figura 4.26. <i>Performance</i> . Fuente: <i>MATLAB</i> . ....	149
Figura 4.27. Estado de entrenamiento. Fuente: <i>MATLAB</i> . ....	150
Figura 4.28. Histograma de error. Fuente <i>MATLAB</i> . ....	151
Figura 4.29. Curva <i>ROC</i> . Punto rojo (esquina superior izquierda) indica la clasificación perfecta. Fuente: <i>MATLAB</i> :.....	152
Figura 5.1. Mapa de susceptibilidad, clasificación continua. Caso A. ....	158
Figura 5.2. Mapa de susceptibilidad categorizado cualitativamente. Caso A. ....	159
Figura 5.3. Histograma de elevación según su susceptibilidad, ordenados por clases. .....	161
Figura 5.4. Histograma de influencia de las formaciones geológicas según su susceptibilidad, ordenados por clases.....	162
Figura 5.5. Histograma de influencia de la pendiente según su susceptibilidad, ordenados por clases.....	163
Figura 5.6. Histograma de orientación de ladera según su clase y categoría de susceptibilidad.....	164
Figura 5.7. Histograma de curvatura media según sus clases y categoría de susceptibilidad.....	165
Figura 5.8. Histograma de distancia a ríos según sus clases y categoría de susceptibilidad.....	166
Figura 5.9. Histograma de distancia a cursos de agua según sus clases y categoría de susceptibilidad.....	167
Figura 5.10. Histograma de distancia a fallas según sus clases y categoría de susceptibilidad.....	167
Figura 5.11. Histograma de distancia a lineamientos según sus clases y categoría de susceptibilidad.....	168
Figura 5.12. Histograma de radiación solar anual según sus clases y categoría de susceptibilidad.....	169
Figura 5.13 <i>Performance</i> . Caso A. ....	170
Figura 5.14. <i>Training state</i> . Caso A.....	170
Figura 5.15. <i>Error histogram</i> . Caso A.....	171
Figura 5.16. Curva <i>ROC</i> . Caso A. ....	172
Figura 5.17. Mapa de susceptibilidad, clasificación continua. Caso B. ....	173

Figura 5.18. Mapa de susceptibilidad categorizado cualitativamente. Caso B. ....	174
Figura 5.19. <i>Performance</i> . Caso B. ....	175
Figura 5.20. <i>Training state</i> . Caso B. ....	176
Figura 5.21. <i>Error histogram</i> . Caso B. ....	176
Figura 5.22. Curva <i>ROC</i> . Caso B. ....	177
Figura 5.23. Mapa de susceptibilidad, clasificación continua. Caso C. ....	178
Figura 5.24. Mapa de susceptibilidad categorizado cualitativamente. Caso C. ....	179
Figura 5.25 <i>Performance</i> . Caso C. ....	180
Figura 5.26. <i>Train state</i> . Caso C. ....	181
Figura 5.27. <i>Error histogram</i> . Caso C. ....	181
Figura 5.28. Curva <i>ROC</i> . Caso C. ....	182
Figura 5.29. Mapa de susceptibilidad, clasificación continua. Caso D. ....	183
Figura 5.30. Mapa de susceptibilidad categorizado cualitativamente. Caso D. ....	184
Figura 5.31. <i>Performance</i> . Caso D. ....	185
Figura 5.32. <i>Training state</i> . Caso D. ....	186
Figura 5.33. <i>Error histogram</i> . Caso D. ....	186
Figura 5.34. Curva <i>ROC</i> . Caso D. ....	187
Figura 6.1. A: Fotografía del sector oriente del fiordo Cahuelmó, desembocadura del río Mirta. B: Diferenciación de zonas de susceptibilidad muy baja (polígono verde oscuro), baja (polígono verde claro), media (polígono amarillo), alta (polígono anaranjado) y muy alta (polígono rojo). ....	203
Figura 6.2. A: Fotografía del pueblo Huinay. B: Diferenciación de zonas de susceptibilidad muy baja (polígono verde oscuro), baja (polígono verde claro), media (polígono amarillo), alta (polígono anaranjado) y muy alta (polígono rojo). ....	204
Figura 6.3. A: Ladera sur del fiordo Cahuelmó. Se logra diferenciar zonas de muy alta susceptibilidad en zonas de baja susceptibilidad. B: Diferenciación de zonas de susceptibilidad media (polígono amarillo), alta (polígono anaranjado) y muy alta (polígono rojo). ....	206
Figura 6.4. A: Fotografía desde la ribera del río Huinay. Al fondo se observa la ladera oeste del río. B: Diferenciación de zonas de susceptibilidad muy baja (polígono verde oscuro) y muy alta (polígono rojo). ....	207

# 1 INTRODUCCIÓN

En el marco del proceso de titulación se ha elaborado el tema de memoria basado en la metodología de evaluación de susceptibilidad asociado a remociones en masa mediante redes neuronales, desarrollado para la empresa ARCADIS CHILE SpA.

Los fenómenos de remoción en masa (RM) son procesos de transporte de material definidos como procesos de 'movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, generados por una serie de factores' (Hauser, 1993).

Las remociones en masa son un peligro geológico de gran impacto, que todos los años generan millonarias pérdidas en infraestructura y cobran la vida de muchas personas (Aleotti y Chowdhury, 1999).

Las circunstancias que favorecen las RM se traducen en factores condicionantes, y como lo indica su nombre, son contextos que aumentan o disminuyen la estabilidad de una ladera. En otras palabras, son factores que intervienen en una situación potencialmente inestable, y que, por lo tanto, juegan un rol fundamental en la susceptibilidad a generar una remoción en masa, entendiéndose por susceptibilidad a la capacidad o potencialidad de una unidad geológica o geomorfológica de ser afectada por un proceso geológico determinado (Sepúlveda, 1998).

En tanto, las redes neuronales (*ANN Artificial Neural Network*) son un dispositivo de procesamiento, implementado como un algoritmo o en el *hardware*, cuyo diseño fue motivado por el funcionamiento del cerebro de los mamíferos. Estas reaccionan a la entrada de datos, y se entrenan de una manera tal como para alterar su estado inicial, algo que ningún algoritmo convencional hace: puede aprender.

Es así como la metodología busca zonificar de manera precisa la susceptibilidad, tomando los puntos de generación de remociones en masa, ya que la representatividad de los modelos que evalúan susceptibilidad aumenta al utilizar los puntos de remociones apropiados (Wang *et al.*, 2015). De este modo, se busca que la metodología determine la susceptibilidad, para orientar la ubicación de obras ingenieriles.

Además, esta metodología pretende entregar una clasificación de susceptibilidad que no implique a priori una categorización de los factores condicionantes, así como su peso en la susceptibilidad.

## 1.1 Ubicación y vías de acceso

La zona de estudio se encuentra en el extremo sur de Chile, y corresponde al sector este del fiordo Comau el cual comprende el fiordo Quintupeu y Cahuelmó. Esta zona pertenece a la comuna de Hualaihué en la provincia de Palena, región de Los Lagos (Figura 1.1).

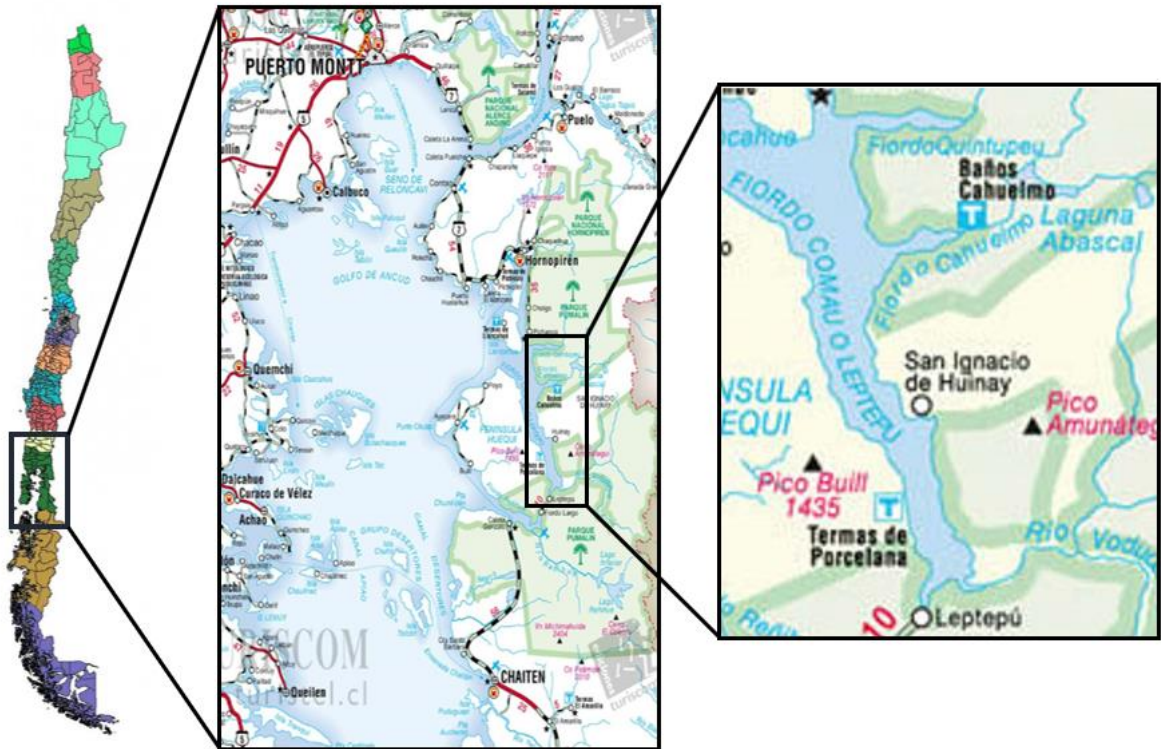


Figura 1.1. Mapa rutero con los accesos a la zona de estudio.

La zona es de difícil acceso con tramos de camino pavimentado, tramos de ripio y tierra, y lugares donde la única opción es vía marítima mediante ferry o embarcaciones menores (bote o lancha).

Para acceder a la zona de estudio se debe llegar a Puerto Montt vía terrestre o aérea. Luego, se accede a la Ruta 7, conocida como Carretera Austral, hasta llegar al sector de Caleta La Arena. En ese punto el transporte es mediante ferry, el que tiene como destino Caleta Puelche. Una vez allí, se continúa por la Ruta 7 por 9 km aproximadamente hasta Contao donde comienza la carretera de ripio que tiene una extensión cercana a 40 km hasta la localidad de Río Negro conocido popularmente como Hornopirén.

Después de pasar por esta localidad, se continúa por la Carretera Austral hasta el embarcadero Pichanco. El tramo comprendido corresponde a un camino de tierra de una sola vía. Al llegar al terminal Pichanco, se desplaza en una embarcación menor (lancha) hasta la zona de estudio.

Como opción, existe la posibilidad de volar en avioneta desde Puerto Montt hasta el Aeródromo Nuevo Chaitén (SCTN), para posteriormente desplazarse por la Ruta 7 hasta Caleta Gonzalo, y cruzar, finalmente, en la barcaza que recorre el trayecto entre la caleta indicada y fiordo Largo.

## **1.2 Motivación y formulación del problema**

Las remociones en masa son uno de los peligros geológicos de mayor impacto. En muchas ocasiones, traen consigo resultados catastróficos cobrando la vida de muchas personas y dejando millonarias pérdidas en infraestructura.

Es así como poder determinar las condiciones bajo las que se producen remociones en masa, y la susceptibilidad a estos procesos es fundamental.

Si bien, existen metodologías para la evaluación de susceptibilidad, estas tienen un carácter cualitativo, o si son cuantitativas determinan a priori la interacción de los factores condicionantes.

Esta metodología busca encontrar el peso de los factores condicionantes mediante *ANN* lo que elimina, de cierto modo, la subjetividad que se tiene en los métodos cualitativos, y el peso de los factores condicionantes en los métodos cuantitativos.

## **1.3 Objetivos**

El objetivo general engloba 7 objetivos específicos que fueron definidos para cumplir paso a paso el propósito general.

### **1.3.1 Objetivo general**

El objetivo general es aplicar redes neuronales artificiales para reconocer zonas de diferente susceptibilidad asociado a remociones en masa.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

Los objetivos específicos son:

1. Determinar los factores condicionantes en la zona de estudio.
2. Crear una red neuronal tipo *MLP* determinando su número óptimo de capas ocultas, número de neuronas en la capa oculta y funciones de activación.
3. Evaluar mediante la red neuronal entrenada la zona de estudio, reconociendo zonas de mayor susceptibilidad.
4. Reconocer cuáles son los factores más relevantes para la evaluación de susceptibilidad.
5. Determinar el número óptimo de factores condicionantes.
6. Determinar las variables que tienen mayor y menor correlación en la susceptibilidad con los factores condicionantes.
7. Generar un mapa de susceptibilidad de remociones en masa.

## **1.4 Metodología**

La metodología de trabajo se divide en tres etapas: previa al terreno, durante el terreno y trabajo de gabinete posterior al terreno.



#### **1.4.1 Revisión de antecedentes y catastro**

La etapa previa al terreno consta de la recopilación de material bibliográfico útil para los alcances de esta memoria, primero, relacionado con las remociones en masa, su definición y clasificación, determinación de factores condicionantes y detonantes de una remoción en masa, definiciones de susceptibilidad y peligro, diferentes metodologías para la evaluación de susceptibilidad y peligro, entre ellas *ANN*.

Con respecto a la zona de estudio, la búsqueda de bibliografía se enfocó en la geología, geomorfología, clima, vegetación y sismicidad de la región de Los Lagos, y en particular del fiordo Comau.

También se realizó una exhaustiva fotointerpretación mediante los *softwares Google Earth, ArcGIS Earth, ArcGIS 10.2.2, Global Mapper 12*, y de ortofotografías, realizando un catastro de remociones en masa, mapeo geológico por diferencia de litologías y lineamientos de fallas.

#### **1.4.2 Trabajo de terreno**

La primera campaña de terreno se realizó desde el 13 al 17 de octubre del 2016, con los geólogos Rodrigo Campos, Eugenia Ríos y David Álvarez.

En esta etapa se analizó la topografía y geomorfología de la ladera este del fiordo Comau y las laderas norte y sur de los fiordos Quintupeu y Cahuelmó. Se observaron las geometrías de las laderas y las áreas propensas a ser removidas, como también las zonas que presentan remociones.

Además, se analizó y reconoció la geología de la zona, determinando el tipo de roca, edad, morfología de los afloramientos y su grado de meteorización. También se ubicaron zonas de fallas, set de diaclasas y zonas de cizalle.

Conjuntamente, se fotografiaron remociones en masa con una cámara digital con GPS incluido, y se corroboró la fotointerpretación realizada en la etapa previa al terreno, para luego mejorar el catastro de remociones en masa. Los puntos de control se encuentran en el Anexo A.

#### **1.4.3 Trabajo de gabinete**

En el trabajo posterior al terreno, se gestionaron los datos obtenidos en el trabajo de campo, para lo cual se ingresaron las fotografías con su punto GPS al *software Global Mapper 12*. Esto permitió delimitar correctamente las remociones mejorando el catastro. Además de poder clasificar su tipo, también favorece el reconocimiento de las diferentes litologías, zonas de fallas y lineamientos, y caracterización de macizos rocosos y discontinuidades.

Se determinaron los factores condicionantes relevantes para la zona de estudio, y mediante *ANN* se determinó el peso de los factores condicionantes.

Se generaron las discusiones y conclusiones para la elaboración de un mapa de susceptibilidad de la zona de estudio, y se confeccionó el informe final.

## **1.5 Limitaciones**

En la etapa de revisión y recopilación bibliográfica, la principal limitación fue la escasa información del área de estudio. Si bien, se cuenta con la geología de 1:1.000.000 desarrollada por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), la información de detalle o a menor escala es bastante exigua y antigua. Se tiene el Boletín N°19 de Levi *et al.* (1996), pero posee un detalle geológico antiguo y solo en las costas de la zona de estudio, además de poseer una limitada información de la edad de los afloramientos, claramente limitada por la tecnología de la época. La carta geológica que brindó mayor información corresponde a la de Ordoñez y Crignola (2003), pero posee una escala 1:500.000 lo que no permite conocer en detalle la geología de la zona.

En la etapa de terreno, el clima jugó un papel preponderante, pues en caso de mal clima (viento y lluvia) no se permitía zarpar embarcaciones menores ya que se cerraban los embarcaderos, significando un día perdido de trabajo.

Por su parte, el fiordo en sí, era un lugar de difícil acceso, con pocos afloramientos que, al llegar a pleamar, quedaban completamente cubiertos por agua. El acceso a tierra firme en las costas del fiordo estaba caracterizado por altas pendientes, en algunos lugares casi verticales, con suelo vegetal que se deslizaba con facilidad e impedía el ascenso. Por lo mencionado, el mapeo se realizó en su mayoría en bote, sólo por los bordes costeros.

## 2 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los antecedentes teóricos consultados para el desarrollo de este trabajo. Se describe una clasificación reciente de remociones en masa, una definición de los factores condicionantes y detonantes, conceptos de susceptibilidad y peligro, además de una descripción de las metodologías para evaluación de susceptibilidad.

### 2.1 Clasificación de remociones en masa

La clasificación más usada de las remociones en masa es la propuesta por Cruden y Varnes (1996), que está basada en dos factores: tipo de movimiento y material involucrado (Varnes, 1978). Así, se tienen las remociones por caída (*falls*), volcamientos (*topple*) deslizamiento rotacional o traslacional (*slides*), extensiones laterales (*spreads*) y flujos (*flows*), los que podían involucrar roca, suelo de grano fino y grano grueso (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Clasificación de remociones en masa según tipo movimiento y material involucrado (Varnes, 1978).

Tipo de movimiento		Tipo de material			
Caída		Roca	Suelo		
Volcamiento					
Deslizamiento	Rotacional				
	Traslacional				
Extensiones laterales				Grano grueso (detritos, < 80 % partículas < 2 mm)	Grano Fino (barro, > 80% partículas < 2 mm)
Flujos					
Complejos					

Las RM pueden generar movimientos que pueden ocurrir en segundos o en años. Esto da origen a otro tipo de clasificación propuesta por Cruden y Varnes (1996), quienes clasifican de manera cualitativa las distintas velocidades a la que ocurre una determinada remoción (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Clasificación de velocidad de remociones (Cruden y Varnes, 1996).

Clase según velocidad	Descripción	Velocidad (mm/s)	Velocidad típica
7	Extremadamente rápido	$5 \times 10^3$	5 m/s
6	Muy rápido	$5 \times 10^1$	3 m/min
5	Rápido	$5 \times 10^{-1}$	1,8 m/h
4	Moderado	$5 \times 10^{-3}$	13 m/mes
3	Lento	$5 \times 10^{-5}$	1,6 m/año
2	Muy lento	$5 \times 10^{-7}$	16 mm/año
1	Extremadamente lento	$< 5 \times 10^{-7}$	> 16 mm/año

Hungr *et al.* (2013), proponen una modificación a la clasificación propuesta por Cruden y Varnes (1996), ya que esta no considera el comportamiento que tienen los distintos tipos de suelo, es decir, suelos que con un tamaño de grano similar se pueden comportar totalmente distintos. Por ejemplo, una arcilla sensitiva perderá la fuerza para remodelarse, mientras que el limo parcialmente saturado puede perder la cohesión aparente en humedad (Hungr *et al.*, 2013).

Es así como se reclasificaron los fenómenos de remociones en masa, y se definieron considerando conceptos propuestos por Cruden y Varnes (1996). En resumen, la clasificación mantiene los tipos de movimientos ya definidos, como también el tipo de material, pero se generan, además, subdivisiones para clasificar las remociones según el comportamiento de la roca en la remoción. Por otra parte, el tipo de suelo que es removido da origen a diferentes remociones (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Clasificación de remociones en masa (Hungar *et al.*, 2013).

Tipo de movimiento	Roca	Suelo
Caída	1. Caída de roca/hielo	2. Caída de peñasco/detrito/limo
Volcamiento	3. Volcamiento de bloque de roca	5. Volcamiento en bloque de grava/arena/limo
	4. Volcamiento flexural de roca	
Deslizamiento	6. Deslizamiento rotacional de roca (" <i>rock slump</i> ")	11. Deslizamiento rotacional de arcilla/limo (" <i>soil slump</i> "):
	7. Deslizamiento planar de roca (" <i>block slide</i> ")	12. Deslizamiento planar de arcilla/limo
	8. Deslizamiento en cuña de roca	13. Deslizamiento de grava/arena/detrito
	9. Deslizamiento compuesto de roca	14. Deslizamiento compuesto de arcilla/limo
	10. Deslizamiento irregular de roca (" <i>rock collapse</i> ")	
Spread	15. Expansión de pendiente de roca	16. Expansión por licuefacción de arena/limo
		17. Expansión de arcillas sensitivas
Flujo	18. Avalancha de roca/hielo	19. Flujo de arena/limo/grava/detrito seco (o no licuado)
		20. Deslizamiento de flujo de arena/limo/detrito
		21. Deslizamiento de flujo de arcillas sensitivas
		22. Flujo de detrito
		23. Flujo de lodo
		24. Inundación de detrito
		25. Avalancha de detritos
		26. Flujo de tierra
27. Flujo turbulento		
Deformación de pendiente	28. Deformación de pendiente de montaña	30. Deformación de pendiente de suelo
	29. Deformación de pendiente de roca	31. Reptación de suelo
		32. Soliflucción

1. Caída de roca/ hielo: Desprendimiento, caída, rodamiento, y rebote de fragmentos de roca o hielo. Puede ocurrir aislado o en conjunto, pero hay poca interacción dinámica entre los fragmentos más móviles que interactúan principalmente con el sustrato. La deformación de fragmentos no es importante, aunque los fragmentos se pueden romper durante el impacto. Usualmente, son de volumen limitado.

2. Caída de peñasco/detrimento/limo: Desprendimiento, caída, rodamiento y rebote de fragmentos de suelo como grandes clastos con depósitos de suelo o bloques de suelo cohesivo (cementado o no saturado). El mecanismo de propagación es similar al de caída de rocas, aunque los impactos pueden fuertemente reducirse por la debilidad de las partículas en movimiento.
3. Volcamiento de bloque de roca: Rotación hacia adelante y vuelco de columnas o placas de roca (una o muchas), separadas por planos de discontinuidades con inclinación pronunciada. La roca es relativamente masiva y la rotación ocurre en discontinuidades basales bien definidas. El movimiento puede comenzar lentamente, pero la última etapa de fallamiento puede ser extremadamente rápida. Ocurre a toda escala.
4. Volcamiento flexural de roca: Flexión y rotación hacia adelante de una masa roca caracterizada por juntas espaciadas cercanamente y buzamiento abrupto o separaciones esquistosas, con strike perpendicular a la línea de caída de la pendiente. La roca es relativamente débil y frágil. No existen discontinuidades basales bien definidas por lo que la rotación del estrato debe ser facilitada por flexión. El movimiento generalmente es lento y tiende a estabilizarse por sí mismo. Sin embargo, se pueden generar deslizamiento rotacional secundario en la zona de charnela del volcamiento. Ocurre a gran escala.
5. Volcamiento en bloque de grava/arena/limo: Volcamiento en bloque de suelo cohesivo (cementado), separado por juntas verticales.
6. Deslizamiento rotacional de roca ("*rock slump*"): Deslizamiento de una masa de roca débil en una superficie de ruptura rotacional cilíndrica u otra, que no está controlada estructuralmente. La morfología está caracterizada por un escarpe principal prominente, un banco inclinado hacia atrás en la cabecera y limitado por deformación interna. Ocurre lento a moderadamente lento.
7. Deslizamiento planar de roca ("*block slide*"): Deslizamiento de una masa de roca en una superficie de ruptura planar. Deformación interna escasa o ausente. La cabecera de deslizamiento puede estar separada de la roca estable por medio de una grieta de tensión vertical y profunda. Es, por lo general, extremadamente rápido.
8. Deslizamiento en cuña de roca: Deslizamiento de una masa de roca sobre una superficie de ruptura formada por dos planos con una intersección orientada pendiente abajo. No presenta deformación interna. Es extremadamente rápido.
9. Deslizamiento compuesto de roca: Deslizamiento de una masa de roca sobre una superficie de ruptura compuesto por varios planos, con una superficie de curvatura irregular, por lo que el movimiento es cinemáticamente visible solo si es acompañado de una importante distorsión interna de la masa en movimiento. Son típicos las características de *horst* y *graben* en la cabecera y varias superficies de cizalle secundarias. Lento o rápido.

10. Deslizamiento irregular de roca ("*rock collapse*"): Deslizamiento de una masa de roca sobre una superficie de ruptura irregular compuesta por un número de discontinuidades orientadas aleatoriamente, separadas por segmentos de roca intacta ("*rock bridges*"). Ocurre en rocas con estructuras no sistemáticas. El mecanismo de falla es complejo y difícil de describir. Puede incluir elementos de volcamiento. Ocasionalmente son muy repentinos y extremadamente rápidos.
11. Deslizamiento rotacional de arcilla/limo ("*soil slump*"): Deslizamiento de una masa de suelo (homogéneo y usualmente cohesivo) sobre una superficie de ruptura rotacional. Escasa deformación interna. Escarpe principal prominente y cabecera de la remoción inclinada hacia atrás. Puede ser lento o rápido, pero puede extremadamente rápido en suelos sensitivos o colapsables.
12. Deslizamiento planar de arcilla/limo: Deslizamiento de un bloque de suelo cohesivo sobre una superficie de ruptura planar inclinada, formada por una capa débil. La cabecera de la masa deslizada está separada del suelo estable por medio de una grieta de tensión profunda (no hay cuña activa). Puede ser lento o rápida.
13. Deslizamiento de grava/arena/detrito: Deslizamiento de una masa de material granular sobre una superficie planar poco profunda paralela al terreno. La masa deslizada es un conjunto cohesionado de coluvio, suelo húmedo o depósitos piroclásticos que se deslizan por sobre un sustrato más fuerte. Muchos deslizamientos de detritos se vuelven de flujo luego de haber recorrido una corta distancia y se transforman en avalanchas de detrito extremadamente rápidas.
14. Deslizamiento compuesto de arcilla/limo: Deslizamiento de una masa de suelo sobre una superficie de ruptura compuesta por varios planos, por lo que el movimiento es cinemáticamente posible solo si es acompañada por distorsión interna importante de la masa en movimiento. Se observan características de *horst* y *graben* en la cabecera y muchas superficies de cizalle secundarias. El segmento basal de la superficie de ruptura, por lo general, sigue un horizonte débil en la estratigrafía de suelo.
15. Expansión de pendiente de roca: Elongación horizontal de una masa de bloques de roca coherentes como resultado de una deformación intensa de un material débil subyacente, o por múltiples deslizamientos retrogresivos controlados por una superficie basal débil. Con un desplazamiento total bastante limitado y lento.
16. Expansión por licuefacción de arena/limo: Expansión lateral extremadamente rápida de una serie de bloques de suelo que flotan en una capa de suelo granular (suelto) saturado. La licuefacción ocurre por terremotos o espontánea.
17. Expansión de arcillas sensitivas: Expansión lateral extremadamente rápida de una serie de bloques de arcilla coherente que flotan en una capa de arcillas sensitiva remodeladas.
18. Avalancha de roca/hielo: Movimiento extremadamente rápido, masivo y parecido al flujo de rocas fragmentadas, a partir de un gran deslizamiento de roca o caída de roca.

19. Flujo de arena/limo/grava/detrito seco (o no licuado): Movimiento de flujo lento o rápido de material granular seco suelto, húmedo o subacuoso, seleccionado o no seleccionado, sin exceso de presión de poros.
20. Deslizamiento de flujo de arena/limo/detrito: Flujo muy rápido a extremadamente rápido de material granulado, saturado, seleccionado o no seleccionado, sobre pendientes moderadas involucrando excesos de presión de poros o licuefacción de material originado en la fuente de la remoción. El material puede variar desde arena suelta a detrito suelto, loess y limo. Usualmente, se origina como una falla retrogresiva múltiple. Puede ocurrir subarealmente o bajo el agua.
21. Deslizamiento de flujo de arcillas sensitivas: Flujo muy rápido a extremadamente rápido de arcilla sensitiva licuada, debido al remoldeamiento, durante una falla de deslizamiento retrogresiva múltiple en o cercana al contenido de agua original.
22. Flujo de detrito: Flujo surgente muy rápido a extremadamente rápido de detrito saturado en un canal empinado. Fuerte arrastre de material y agua del camino del flujo.
23. Flujo de lodo: Flujo surgente muy rápido a extremadamente rápido de suelo plástico saturado en un canal empinado, involucrando un mayor contenido de agua en relación al material original. Fuerte arrastre de material y agua del camino del flujo (índice de plasticidad > 5%).
24. Inundación de detrito: Flujo muy rápido de agua altamente cargada con detritos en un canal empinado. La máxima descarga es comparable con una inundación de agua.
25. Avalancha de detritos: Flujo superficial muy rápido a extremadamente rápido de detrito parcial o totalmente saturado sobre una pendiente empinada sin confinamiento en un canal establecido. Ocurre a toda escala.
26. Flujo de tierra: Movimiento de flujo rápido o lento, intermitente de suelo plástico y arcilloso, facilitado por una combinación de deslizamientos a través de superficies de cizalle múltiples discretos, y tensión de cizalle interna. Largos periodos de inactividad relativa se alternan con periodos de rápida actividad.
27. Flujo turbulento: Flujo rápido de turba licuada, causado por una falla no drenada.
28. Deformación de pendiente de montaña: Deformación gravitacional de gran escala de pendientes inclinadas de altas montañas, manifestada por escarpes, bancos (*"benches"*), grietas (*"cracks"*), trincheras (*"trenches"*) y protuberancias (*"bulges"*), pero sin una superficie de ruptura definida completamente. Extremadamente lento o tasas de movimiento no medibles.
29. Deformación de pendiente de roca: Deformación asentada en profundidad, lenta a extremadamente lenta de pendiente de valle o colina. Disminución de crestas de pendiente y desarrollo de grietas o fallas sin una superficie de ruptura bien definida. Tasas de movimiento extremadamente lentas.



30. Deformación de pendiente de suelo: Deformación asentada en profundidad, lenta a extremadamente lenta de pendiente de valle o colina formada de suelos (usualmente cohesivos). Por lo general, presente en pendientes permafrost o alto contenido de hielo.
31. Reptación de suelo: Movimiento extremadamente lento de capas de suelos superficiales en una pendiente (típicamente menor a un metro de profundidad), como resultado de cambios de volumen cíclicos derivados del clima (humedecimiento y secado, heladas).
32. Solifluxión: Reptación de suelo superficial muy lenta pero intensa, que involucra la capa activa en permafrost alpino o polar. Forma lóbulos característicos de solifluxión.

## 2.2 Factores condicionantes

Los factores condicionantes son, como lo indica su nombre, condiciones que aumentan o disminuyen la estabilidad de una ladera. En otras palabras, son factores que intervienen en una situación potencialmente inestable, y que, por lo tanto, juegan un rol fundamental en la susceptibilidad a generar una remoción en masa, donde se entiende susceptibilidad como la capacidad o potencialidad de una unidad geológica o geomorfológica de ser afectada por un proceso geológico determinado (Sepúlveda, 1998).

Los factores condicionantes propuestos por Lara (2007) corresponden a geología y geotecnia, geomorfología, hidrología e hidrogeología, clima y vegetación, y actividad antrópica. En la Tabla 2.4 se presentan los factores condicionantes y los tipos de RM, que ha sido modificada de Lara (2007) agregando deformación de pendiente como una nueva reclasificación de RM propuesta por Hungr *et al.* (2013).

Tabla 2.4. Factores condicionantes relevantes para cada remoción en masa. Modificado de Lara (2007).

Tipo de RM Factor Condicionante	Caída	Volcamiento	Deslizamiento	Spread	Flujo	Deformación de Pendiente
Geología y geotecnia	X	X	X	X	X	X
Geomorfología	X	X	X	X	X	X
Hidrología e hidrogeología	X	X	X	X	X	X
Clima y vegetación			X	X	X	X
Actividad antrópica	X	X	X		X	X

Si bien, los factores condicionantes son los mismos propuestos por Lara (2007), a continuación, se presenta una breve definición de estos.

### 2.2.1 Geología y geotecnia

La geología y geotecnia son características que, en general, tienen gran preponderancia al momento de evaluar susceptibilidad pues indican las características del material (suelo o roca) que involucraría una RM. El material tiene características intrínsecas que determinan el comportamiento que tendrá en un evento de remoción en masa; y, dependiendo del tipo de material y sus condiciones, este puede ser más susceptible a generar una remoción que otro.

La geología se refiere a depósitos y afloramientos. Considera su composición, litología, estructuras internas (estratificación, gradación, foliación, plegamiento, etc.), relaciones de contacto, edad, meteorización, alteraciones y tipo de depósitos; por ejemplo, las características de los depósitos volcanoclásticos, glaciales, escombros de falda, aluviales y coluviales, y de antiguos flujos de detritos son susceptibles a ser movilizados o removilizados, ya que son materiales permeables donde el agua se infiltra, satura y facilita el escurrimiento del depósito (Hauser, 1997).

La geología dispone condiciones que favorecen las RM. Particularmente, en Chile, los ambientes andinos constituidos con secuencias sedimentarias y volcanoclásticas sometidas a intensas deformaciones tectónicas postcretácicas, junto con terrenos vinculados a actividad eruptiva terciaria a moderna, resultan especialmente favorables al desarrollo de procesos de remociones en masa (Hauser, 1993).

La geotecnia se refiere al comportamiento geomecánico del material, que se divide en macizo rocoso (matriz rocosa y discontinuidades) y suelo. En el caso del macizo rocoso es importante caracterizar sus discontinuidades (planos de estratificación, planos de foliación, fallas, vetas) y la roca, tanto en su litología como resistencia, la que se puede encontrar meteorizada y/o alterada y presentar minerales secundarios como ceolitas, arcillas, sericita y clorita que disminuyen la estabilidad del macizo.

En la geotecnia de suelos, la composición y la granulometría adquieren relevancia al ser determinantes en sus propiedades, tanto en resistencia como en la estabilidad de ladera (Lara, 2007). Suelos finos plásticos con un alto grado de cohesión, si se encuentran en niveles de poco espesor, pueden considerarse un tipo de lubricante que facilita el deslizamiento de material que lo sobreyace.

Las remociones en masa pueden ocurrir a mayor velocidad debido a rupturas o fallas, cuando la resistencia del material es excedida, en función de la cohesión de los materiales. Normalmente, suelos cohesivos generan planos de ruptura profundos (Hauser, 2000).

En conjunto, la geología y geotecnia dan origen al factor características geológicas-geotécnicas, ya que su coexistencia permite caracterizar una zona de estudio. Por ejemplo, la zona andina central presenta extensos macizos rocosos que están integrados por una cobertura de rocas volcánicas rígidas y resistentes (Formación Farellones), que se apoyan discordantemente sobre una potente secuencia volcanoclástica integrada por rocas menos resistentes, susceptibles a experimentar deformaciones plásticas (Formación Abanico). Su desarrollo provoca esfuerzos tensionales, en las primeras, con ruptura frágil, concordante con discontinuidades mecánicas, vinculadas a planos de

estratificación; ello acentúa los procesos de desintegración superficial, acelerando la penetración de posteriores remociones en masa (Hauser, 1993).

### **2.2.2 Geomorfología**

La geomorfología es uno de los factores principales cuando se trata de eventos de remociones. Factores como topografía, pendiente, variaciones fuertes de pendiente de laderas, y extensión y altura de laderas condicionan las remociones en masa (Lara, 2007).

Variaciones fuertes en la topografía y altos ángulos de pendiente favorecerán eventos de remociones en masa del tipo caídas, deslizamientos y flujos. Las pendientes altas, son un factor de primer orden para generar flujos de gran velocidad pues poseen una alta energía potencial que se transformará en un flujo veloz. Las pendientes, tanto de laderas como de cauces (ejes hidráulicos), mientras mayores son, otorgan una mayor capacidad de transporte y energía a los flujos. Así, tributarios cortos de alta pendiente, rectos, y estrechos (o encajonados) concentran el transporte del material incrementando su energía cinética (Jacoby, 2001).

La geomorfología es evaluada, principalmente, según su elevación, pendiente, aspecto y curvatura. Elevación es el número de metros por sobre el nivel del mar en los que se encuentra un determinado punto y, como se mencionó, es importante pues zonas de mayor elevación poseen mayor capacidad de generar RM. Pendiente es la variación que existe entre dos puntos de una zona (ladera, montaña, hoya hidrográfica, etc.); zonas de altas pendientes generan inestabilidad de ladera. Aspecto corresponde a la dirección hacia donde cae (buza) la pendiente; puede ejercer un control climático, en las condiciones de humedad y vegetación presente en el suelo, como de amplificación del movimiento sísmico, dependiendo de la dirección de propagación y otras características de la onda sísmica (Náquira, 2009). Curvatura es la variación de la pendiente entre el sentido horizontal y vertical, y tiene directa relación con el contenido de humedad y saturación de agua.

La geomorfología por sí sola no puede generar una remoción pues, naturalmente, debe tener material susceptible de ser movilizado. Por esto, es fundamental el reconocimiento de eventos anteriores que hayan dejado material suelto, como también, coluvios que se ubiquen en pies de laderas y quebradas, donde su condición de equilibrio límite los hace propensos a generar flujos o deslizamientos.

### **2.2.3 Hidrología e hidrogeología**

Hidrología e hidrogeología considera todas las condiciones asociadas a red de drenaje (densidad y distancia), posición y variación del nivel freático, caudales, escorrentías y coeficiente de infiltración, que están directamente relacionados al aporte de agua y que hacen más susceptible a un material (suelo o macizo rocoso) a generar en una remoción.

Los suelos son muy susceptibles a cambios hídricos; un suelo parcialmente saturado que se satura puede colapsar. Según Jiménez Salas y Justo (1975), algunos materiales arcillosos de baja y mediana plasticidad presentan un comportamiento combinado de

hinchamiento y colapso cuando se los satura. Asimismo, la resistencia de corte del suelo saturado es la resistencia mínima del suelo saturado, es decir, la condición más desfavorable del suelo con la saturación completa.

Teniendo en cuenta los amplios grados de saturación a que el suelo puede estar sometido en la naturaleza, el conocimiento de la variación de la resistencia asociado a los cambios del contenido de agua (o grado de saturación) conducirá al conocimiento más completo de su comportamiento. Los principales factores que afectan la resistencia al corte son la densidad seca (o el índice de poros), el contenido de humedad y el tipo de estructura (Barrera, 2002).

Para el caso de flujos, estos ocurren principalmente por la saturación del suelo que aumenta la presión de poros y disminuye la resistencia efectiva (Lara, 2007). Por ejemplo, las arcillas sensitivas corresponden a arcillas marinas post-glaciar y generan flujos rápidos a extremadamente rápidos debido al remoldeamiento producto de la saturación (Hung, 2013); pasan de comportarse como un sólido saturado a un líquido.

Por su parte, los macizos rocosos pueden ser afectados por el agua ya que puede infiltrarse en la roca a través de las discontinuidades provocando pérdida de resistencia.

#### **2.2.4 Vegetación**

La vegetación se considera como un factor condicionante de remociones en masa y se ha usado ampliamente para mejorar la estabilidad de taludes (Peduzzi, 2002; Chatenoux y Peduzzi, 2004; SWCB, 2010). En general, se considera un agente estabilizador, pues puede captar la lluvia disminuyendo su capacidad erosiva, aumenta la resistencia del suelo y su porosidad, y disminuye la saturación del suelo por la participación en la evapotranspiración.

La capacidad de otorgar estabilidad a laderas está fuertemente ligada a las condiciones climáticas, topográficas y de suelo. Por ejemplo, en zonas que sufren de fuertes vientos, si la pendiente es fuerte, los árboles remueven el terreno provocando su desestabilización (Prieto, 1985). Abundante lluvia sumado a las condiciones geo-mecánicas desfavorables del suelo, no favorecen la evapotranspiración generando una saturación del suelo, lo que eleva el nivel freático pudiendo generar remociones en masa de carácter profundo. Así pues, se considera que la permeabilidad está controlada por la matriz del suelo (Collison, 1996).

El tipo de vegetación también juega un rol fundamental. Árboles con entramados complejos de raíces y bien desarrollados ayudan más rápidamente a estabilizar la ladera. El mismo criterio aplica a las copas de los árboles: copas grandes, bien desarrolladas y densas, protegen la superficie directa de precipitaciones y viento (Lu, 2014).

Existen casos en que remociones en masa sismo-inducidas, a pesar de tener gran vegetación, no han sido estabilizadas. Por ejemplo, en Chile, el año 2007, tuvo lugar una crisis sísmica con epicentro en el fiordo de Aysén, zona del archipiélago de Patagonia caracterizada por una abundante vegetación, con un sismo ( $M_w$  6.2) que generó variadas remociones, de las cuales tres con mayor volumen generaron veloces tsunamis (Naranjo, et al., 2009). Mientras que, para remociones producidas por precipitaciones, la vegetación

es esencial para prevenir deslizamientos (Popescu, 2002; Alcántara-Ayala, 2004; Peduzzi, 2010).

### **2.2.5 Clima**

Los principales factores que condicionan la erosión de una ladera son las precipitaciones, la temperatura y sus variaciones, el viento y la radiación solar, siendo las precipitaciones el más importante entre ellos (Lara, 2007).

Las precipitaciones se consideran un factor detonante, pero a su vez, disminuyen la estabilidad del material. En macizos rocosos, la lluvia se infiltra por las discontinuidades disminuyendo la estabilidad del macizo y favoreciendo RM del tipo caída, mientras que, para el caso de suelos, las precipitaciones los saturan aumentando la susceptibilidad de una remoción.

Lara (2007) indica que la temperatura determina el estado de la precipitación, es decir, si es líquida (lluvia) o sólida (nieve). Además, controla el punto de fusión de la nieve, modifica la humedad del suelo luego de las lluvias y condiciona el congelamiento del suelo.

Hauser (1991) indica que la presencia de viento aumenta la energía de caída de las gotas del agua que, al impactar el suelo, propician la desagregación de partículas detríticas superficiales, favoreciendo las acciones dinámicas. Por su parte, Grutic (2016) sugiere que el viento tiene un rol preponderante pero poco estudiado, e indica que, aproximadamente, la mitad de las remociones tipo deslizamientos no están condicionadas solo por las precipitaciones, o lluvia sobre la nieve, sino que el viento juega un papel crucial.

La radiación solar influye en los niveles de humedad del material, disminuyendo la estabilidad al aumentar la humedad.

### **2.2.6 Actividad antrópica**

La actividad antrópica incluye toda actividad humana que pueda producir desestabilidad y aumente la susceptibilidad de un evento de remociones en masa. Puede considerarse a escala local, regional y global.

A escala local, dice relación a construcciones de menor envergadura (carreteras, caminos, edificios, túneles), excavaciones, extracción de áridos, relleno de suelo artificial y acumulación de escombros. Estos factores pueden disminuir la resistencia del suelo, cambiar la distribución de los stress o dejar material disponible para ser removido.

Las construcciones de mayor envergadura, como faenas mineras y embalses, disminuyen gradualmente la estabilidad de las laderas, ya sea por la actividad propia de la construcción como por la sismicidad inducida (Lara, 2007).

A nivel global, de acuerdo con el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, la actividad humana es la principal responsable del

calentamiento global debido al aumento de la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero (Estrada, 2015). Los efectos del cambio climático generan variaciones en las precipitaciones y temperatura, tanto en su cantidad como su distribución e influyen directamente en eventos de remociones en masa.

## **2.3 Factores detonantes**

Los factores detonantes corresponden a los procesos que detonan una remoción en masa. Entre ellos se encuentran las precipitaciones, los sismos, la actividad volcánica y la actividad antrópica.

### **2.3.1 Precipitaciones**

El desencadenamiento de los movimientos de ladera por causas meteorológicas y climáticas está relacionado fundamentalmente con el volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones, y con el régimen climático. En consecuencia, debe considerarse la respuesta del terreno a precipitaciones intensas durante horas (tormentas) o días, y la respuesta estacional o plurianual, refiriéndose a épocas secas y lluviosas a lo largo del año, y a ciclos húmedos y de sequía, respectivamente (González *et al.*, 2002).

La presencia de agua en los taludes, asociada a precipitaciones, tiende a disminuir la resistencia del terreno y aumentar las fuerzas desestabilizadoras. Los efectos más importantes son la reducción de la tensión de corte del material, aumento del peso del material por saturación y aumento de la presión ejercida en las grietas de tracción, acrecentando las fuerzas que generan inestabilidad.

El control y velocidad de infiltración en el terreno producto de precipitaciones determina el flujo de agua sub-superficial y subterráneo, lo que controla el contenido de agua en la zona no saturada y una consecuente elevación del nivel freático. Los factores que controlan la infiltración son: intensidad y duración de las precipitaciones, tamaño de la cuenca, contenido previo de agua en el terreno (posición del nivel freático y grado de saturación) y presencia de vegetación.

Precipitaciones intensas durante horas o días, pueden generar movimientos superficiales de volúmenes variables. Por ejemplo, en noviembre de 1984 en Piamonte, norte de Italia, intensas lluvias, que se prolongaron por dos días acumulando 400 mm, provocaron más de mil remociones del tipo deslizamiento y flujos de carácter catastrófico (Vallejos *et al.*, 2002). En junio de 1991, en el norte de Chile, la región de Antofagasta se vio afectada por un repentino frente de mal tiempo, intensas lluvias en la zona litoral sumado a fuertes nevadas en la pampa, zona preandina y andina. Las precipitaciones tuvieron una duración de 3 horas con valores de 4,7 - 14,0 mm/h (para una zona que tiene normalmente 5 - 10 mm/h) lo que generó aluviones catastróficos (Hauser, 1997).

Así como las precipitaciones son consideradas como factores detonantes, si se suma el ascenso en el nivel de la isoterma 0°, los efectos pueden ser aún más devastadores. En Santiago de Chile, en la Quebrada Macul, el 3 de mayo de 1993, intensas precipitaciones sumadas al ascenso de la isoterma a 2.600 m s.n.m. aumentaron el área de precipitación de 20 km<sup>2</sup> a 23,3 km<sup>2</sup> y 5,5 km<sup>2</sup> en la Quebrada San Ramón, lo que además de aumentar

captación, también generó una fusión de la nieve blanca caída días atrás aumentando el aporte de líquido (Naranjo y Varela, 1996).

Precipitaciones de intensidad variable por un largo período de tiempo se podrían considerar como el factor detonante de eventos de remociones en masa profundas, pero según González *et al.* (2002) estas deben corresponder a condiciones climáticas permanentes y no a fenómenos climáticos estacionales, pues los regímenes de precipitaciones y las condiciones de humedad deben ser suficientes para aumentar el nivel freático.

### 2.3.2 Sismos

Los sismos son otro factor detonante de gran importancia pues existe abundante evidencia que demuestra que eventos sísmicos pueden generar fenómenos de remociones en masa. Keefer (1984) indica que en los 40 terremotos históricos se produjeron 14 tipos de remociones causadas por ellos.

El área afectada por un deslizamiento está relacionada directamente con la magnitud del sismo. Puede variar de 0 km<sup>2</sup> para un sismo M = 4.0 hasta aproximadamente 500.000 km<sup>2</sup> para sismos M = 9.2. Otros factores, como la composición geológica, profundidad del sismo y las características específicas del evento, influyen en la capacidad desencadenante del sismo (Keefer, 1984).

Keefer (1984) define los umbrales de sismos que pueden generar distintos tipos de remociones. Las medidas indirectas de estos umbrales son: los sismos más débiles que causan remociones, la máxima distancia de deslizamientos desde el epicentro o zona de ruptura, y la mínima intensidad para un deslizamiento. Estas medidas indican que sismos pequeños que se caracterizan por su alta frecuencia y corta duración, pueden generar remociones superficiales como deslizamientos de roca, caídas de roca y suelo (peñascos, detrito y limo) y, en ocasiones, deslizamientos de suelo, principalmente en pendientes pronunciadas altamente afectadas por remociones anteriores. Por otra parte, sismos fuertes, de baja frecuencia y corta duración pueden provocar remociones profundas como expansiones (*spread*) y flujos, y excepcionalmente para los máximos umbrales puede producir avalanchas de roca y suelo.

Por ejemplo, en el fiordo de Aysén, Chile, año 2007, un enjambre de más de 7.000 sismos produjo remociones de menor magnitud, pero a su vez, dentro de este mismo evento, un sismo mayor, de intensidad VI, generó variadas remociones en masa, algunas de tipo flujo de detritos, tres de las cuales generaron tsunamis con efectos catastróficos.

Keefer (2002) realiza un acabado estudio bibliográfico de las remociones en masa sismo-inducidas. En la Tabla 2.5 se presenta un resumen de los sismos más importantes y la cantidad de remociones en masa asociadas. Cabe señalar que estos antecedentes están limitados por la bibliografía existente y la tecnología, por tanto, la exactitud para cuantificar la magnitud de los sismos ha mejorado, lo que indica que la comparación es levemente subjetiva.

Tabla 2.5. Remociones en masa inducidas por sismos. Las magnitudes en negrita son magnitudes de momento, y las otras son ondas superficiales Richter (Keefer, 2002).

Localización	Fecha	Magnitud	Número de remociones
Daly City, Calif. EE.UU.	Mayo 1957	5.3	23
Guatemala	Febrero 1976	<b>7.5</b>	~ 50.000
Mt. Diablo, Calif. EE.UU.	Enero 1980	5.8	103
Mammoth Lakes, Calif. EE.UU.	Mayo 1980	<b>6.2</b>	5.253
Coalinga, Calif. EE.UU.	Mayo 1983	<b>6.5</b>	9.389
San Salvador, El Salvador	Octubre 1986	<b>5.7</b>	> 216
Loma Prieta, Calif. EE.UU.	Octubre 1989	<b>6.9</b>	~ 1.500
Northridge, Calif. EE.UU.	Febrero 1994	<b>6.7</b>	> 11.000
Hygoken-Nanbu, Japón	Febrero 1995	<b>6.9</b>	647 - 747
Umbria-Marche, Italia	Septiembre 1977	<b>6.0</b>	100 - 124
Chi-Chi, Taiwán	Septiembre 1999	<b>7.7</b>	22.000

Es importante señalar que los indicadores de la susceptibilidad a remociones en condiciones no sísmicas deben aplicarse con precaución a remociones provocados por terremotos; la predicción precisa de los deslizamientos de tierra causados por los terremotos requiere el análisis de materiales y entornos geológicos que son particularmente susceptibles a deslizamientos de tierra cuando el desencadenamiento es sísmico (Keefer, 1984).

### 2.3.3 Actividad volcánica

Al comenzar un proceso de actividad volcánica y generar erupciones, los volcanes pueden provocar remociones en masa por el derretimiento de nieve acumulada, lo que, sumado a otros factores como precipitaciones y material piroclástico disponible, puede generar lahares de gran magnitud.

Otro ejemplo de remociones en ambientes volcánicos son las avalanchas por colapso del edificio volcánico, por ejemplo, las ocurridas en 1980, por la erupción del Volcán St. Helena, en Estados Unidos (Lara, 2007).

### 2.3.4 Otros

Otros factores detonantes corresponden a actividad antrópica, asociada a la pérdida de material involucrado, por ejemplo, la sobre excavación, represamientos de causas, fallas de presas, etc.

## 2.4 Conceptos de peligro en remociones en masa

Para todos los análisis de susceptibilidad y peligro, ya sea asociado a remociones en masa, como asociado a cualquier otro ámbito, se deben tener claros los conceptos y qué



factores son los que abarcan, pues en la literatura muchas veces son ocupados como sinónimos, pero no corresponden a lo mismo.

#### **2.4.1 Susceptibilidad**

Sepúlveda (1998) indica que la susceptibilidad es la capacidad o potencialidad de una unidad geológica o geomorfológica de ser afectada por un proceso geológico determinado.

En tanto, Gonzalez (2002) define la susceptibilidad como la posibilidad de que una zona quede afectada por un determinado proceso, expresada en diversos grados cualitativos y relativos. Depende de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos, que pueden ser intrínsecos a los propios materiales geológicos o externos.

En conclusión, y para los alcances de este trabajo, susceptibilidad se considerará como una condición potencial de una unidad geológica a ser removida y, por ende, causar una remoción en masa. En palabras simples, qué tan posible es que una zona genere un evento de remoción en masa. Esta susceptibilidad estará controlada por los factores condicionantes que se definieron anteriormente.

#### **2.4.2 Peligro**

Peligro es un concepto más complejo y no debe ser nunca ocupado como símil de riesgo. Es una condición o proceso geológico potencialmente catastrófico. Existen dos tipos de peligros distinguibles: peligro declarado y peligro potencial. El peligro declarado o actual es una condición o proceso geológico que constituye un peligro, y que se ha producido en el pasado o está en evolución, dejando evidencias geomorfológicas, sedimentológicas o de otra naturaleza que permiten identificarlo. Peligro potencial, por otro lado, es la condición o proceso geológico que potencialmente puede ocurrir en el futuro en una determinada zona, constituyendo un peligro geológico. Se define a través del análisis de factores desfavorables que pueden inducir el peligro o actualizarlo (Oliver y Renet, 1976).

Por su parte, Hauser (1985) define como peligro geológico, o amenaza, a la 'condición o proceso geológico potencialmente catastrófico' o bien a la 'probabilidad de que suceda un evento de este tipo durante un periodo de tiempo en un sitio dado'.

Relacionado al concepto de peligro está la peligrosidad, *P*, (*hazard*) que hace referencia a la frecuencia de ocurrencia de un proceso y al lugar. Se define como la probabilidad de ocurrencia de un proceso de un nivel de intensidad o severidad determinado, dentro de un periodo de tiempo dado y dentro de un área específica (Vames, 1984; Barbat, 1998) y que no debe confundirse con el concepto de peligro.

### **2.5 Metodología para la evaluación de peligro**

Aleotti y Chowdhury (1998) realizan un acabado estudio bibliográfico de las metodologías para la evaluación de peligro, en las que considera el tipo de información evaluada, cómo se evalúa esta información y los resultados obtenidos.

En general, dentro de las metodologías para la evaluación de susceptibilidad y, consecuentemente, peligro, se definen dos grandes grupos: metodologías cualitativas y cuantitativas (Aleotti y Chowdhury, 1998). Cada una de estas puede ser subdividida, evidenciando una clasificación más específica (Figura 2.1).

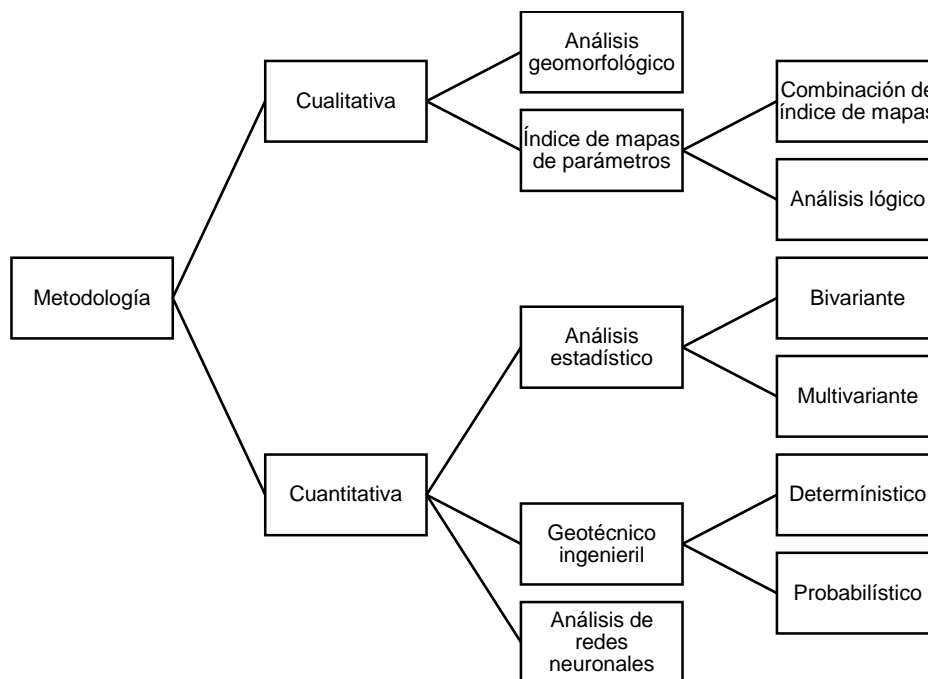


Figura 2.1. Diagrama de clasificación de metodologías de acuerdo a su carácter cualitativo o cuantitativo (Aleotti y Chowdhury, 1998).

Las metodologías cualitativas se caracterizan por depender, en gran medida, de la pericia del geólogo, mientras que las cuantitativas comparan distintos parámetros con la distribución de remociones. Además, existen metodologías mixtas, la que se caracterizan por tener una proporción cualitativa y otra cuantitativa.

### 2.5.1 Metodologías cualitativas

Las metodologías cualitativas tienen una directa relación con la observación del geólogo y su criterio es fundamental, ya que está basada en su experiencia en terreno, análisis de imágenes satelitales, fotografías aéreas, etc. También es conocido como Enfoque de Criterio Experto (Leroi, 1966). Esta metodología puede ser dividida en análisis del campo geomorfológico e índice de mapas de parámetros.

#### 2.5.1.1 *Análisis del campo geomorfológico*

Esta es una de las metodologías más sencillas, pues la evaluación y zonación de peligro está determinada por la experiencia o por situaciones similares, y no existe ningún conjunto de reglas para la evaluación. Asimismo, la estabilidad de una ladera se obtiene directamente de los mapas geomorfológicos.

Las principales desventajas de esta metodología son la subjetividad en la toma de datos y creación en los mapas de peligro, por lo mismo, es muy difícil la comparación de mapas con otros autores; el uso de reglas implícitas más que explícitas no favorecen la incorporación de nueva información; y la necesidad de grandes y detallados estudios de campo.

Por otro lado, su gran ventaja es que son metodologías sencillas que permiten una rápida evaluación de peligro geológico, además de que pueden ser aplicadas a muchas escalas y se logran adaptar a diferentes zonas de estudio.

Estas metodologías fueron fuertemente usadas en los años 70s y 80s (Bosi *et al.*, 1982; Carrara y Merenda, 1976; Fenti *et al.*, 1979; Guerricchio y Melidoro, 1979; Kienholz, 1978; Ives y Messerli, 1981; Rupke *et al.*, 1988).

Una de las metodologías más comprensibles es la propuesta por la literatura francesa (Antonie, 1977; Humbert, 1977; Meneroud y Calvino, 1976), la que se separa en dos fases: análisis y extrapolación. Primero evalúan todos los factores que afectan la estabilidad de una ladera y que son permanentes, es decir, topografía, geología, hidrología, hidrogeología, etc., y luego, se evalúan los factores temporales (clima, uso del suelo y factores antrópicos). Finalmente, en la segunda fase se extrapolan todos los factores a áreas con similares características y se evalúan en tres secciones: peligro nulo, peligro potencial y peligro comprobado.

El cálculo de peligro en esta metodología es relativo y depende completamente del conocimiento del autor. Asimismo, las áreas de peligro no pueden ser comparadas con otras (Aleotti y Chowdhury, 1998).

#### 2.5.1.2 Índice de mapas de parámetros

Esta metodología se basa en la selección de los mapas de parámetros para luego otorgar un peso a cada uno de ellos, el cual es relativo al aporte que tienen en la generación de inestabilidad en una ladera.

Soeters y Van Westen (1996) indican que primero se debe subdividir cada parámetro (factor condicionante) en un número de clases relevantes, luego se entrega un peso para cada clase, después se entrega el peso a cada parámetro, y finalmente, se realiza una sobreposición de mapas y se genera un mapa de peligro.

En estas metodologías, se determina el peso de los factores condicionantes (mapa de parámetros) en la susceptibilidad y, por consiguiente, el delimitar zonas de mayor o menor peligro queda supeditado, de todas formas, a la subjetividad del experto que evalúa, siendo esta su principal desventaja. Además, extrapolar la metodología desarrollada en una zona particular de estudio a otra diferente, presenta una gran dificultad (Carrara, 1983).

Otros autores, como Carrara (1989), indican que conocer los procesos que desestabilizan las laderas, para reconocer y evaluar los diferentes factores de manera sistemática, es otra gran dificultad y es en donde se determina el éxito o fracaso de estas metodologías cualitativas. También, generar una correcta ordenación y ponderación de los factores

según su importancia asumida o esperada en la formación de una remoción (Carrara *et al.*, 1995) y los mapas de parámetros de índices y su sobreposición, es la base para la determinación cualitativa de susceptibilidad y peligro geológico (Lara, 2007), y favorecerá la obtención de mapas correctos y extrapolables a zonas de condiciones similares.

En tanto, Parise (2001) generó una metodología para la evaluación de peligro basado en cuatro mapas: mapa de inventario de deslizamientos, mapa de actividad que representa los deslizamientos activos, mapa de susceptibilidad y mapa de vulnerabilidad, lo que da origen a metodologías semi-cuantitativas.

Actualmente, son variadas las metodologías semi-cuantitativas, las que, por medio de una suma ponderada de los factores condicionantes mediante mapa de factores (Guzzeti, 2005; Lara, 2007; Sepúlveda *et al.*, 2011), que provienen principalmente de modelos de elevación digital (DEM) y de imágenes satelitales, a cada mapa factor otorga un peso relativo de aporte a la generación de remociones. La evaluación de susceptibilidad y peligro de remociones en masa mediante superposición de mapas es una herramienta muy efectiva (Nefeslioglu *et al.*, 2008).

La evaluación de peligro mediante estas metodologías, sumadas al uso de herramientas computacionales como la tecnología de Sistemas de Información Geográfica (SIG), ha favorecido su desarrollo e incrementado su relevancia.

## **2.5.2 Metodologías cuantitativas**

Las metodologías cuantitativas intentan determinar susceptibilidad y peligro geológico mediante cálculos estadísticos y/o probabilísticos para, así, disminuir la subjetividad asociada que tienen las metodologías cualitativas. Dentro de estas metodologías se encuentran los análisis estadísticos (bivariante y multivariante), geotécnico ingenieril (determinístico y probabilístico) y análisis de redes neuronales (ANN).

Las metodologías cuantitativas ocupan herramientas estadísticas o probabilísticas que son combinadas, generalmente, con tecnología GIS para generar mapas y delimitar las zonas de mayor susceptibilidad y peligro.

### *2.5.2.1 Metodologías de análisis estadístico*

Aleotti y Chowdhury (1998) definen las metodologías estadísticas como la comparación de la distribución espacial de las remociones en masa con los parámetros seleccionados (factores condicionantes), pudiendo obtener áreas que se encuentran libres de deslizamientos pero que en el futuro podrían generar una RM.

En tanto, Sepúlveda *et al.* (2011) indican que las metodologías cuantitativas estadísticas relacionan parámetros con la distribución de los deslizamientos, entre ellos los métodos estadísticos bivariantes y multivariantes, los que son básicamente la combinación de pasos, considerando las variables intrínsecas del terreno (mapas de factor) con un inventario de remociones (mapa de evidencia).

#### 2.5.2.1.1 Metodología cuantitativa bivariante

Esta metodología compara cada factor condicionante con el mapa de inventario de remociones. A cada parámetro se le calcula su densidad y se le asigna un peso ponderado.

Aleotti y Chowdhury (1998) definen los pasos para realizar un análisis mediante esta metodología. Primero se realiza un mapeo de los factores relevantes y se categorizan en un número relevante de remociones; segundo, se realiza un inventario de remociones en masa; tercero, se cruza el mapa de parámetros con el mapa de remociones; cuarto, se determina la densidad de deslizamientos para cada parámetro; quinto, se define y asigna de peso para cada factor; finalmente, se superponen los mapas y se calcula la susceptibilidad para cada unidad definida en la zona.

Si bien, este es considerado un método cuantitativo, la definición y asignación de peso para cada factor, tiene un grado de subjetividad. Además, los parámetros no son independientes entre sí y pueden tener un grado de correlación (Leori, 1966).

#### 2.5.2.1.2 Metodología cuantitativa multivariante

Esta metodología ha sido aplicada en distintas áreas de la geología, pero sólo en los 80s comenzó a ser utilizada en peligro geológico asociado a remociones en masa. Náquira (2009) la define como la conversión de factores cualitativos a mapas numéricos, para así ser combinados con el mapa de unidades, y crear una matriz en que el peso de cada factor indica una contribución relativa en el grado de susceptibilidad de la unidad.

Una revisión más detallada fue realizada por Aleotti y Chowdhury (1988), en la que se indican todos los pasos a seguir. Primero, clasificación del área de estudio en las unidades de suelo/roca, en primera instancia (Carrara *et al.* 1978; Carrara, 1983,1988) se definieron como unidades rectangulares con lados de 100 m a 200 m, posteriormente se dividieron según su base morfométrica (Carrara *et al.*, 1991, 1992). Segundo, identificación de los factores importantes y creación de los mapas de parámetros de entrada, que incluyen información concerniente a las remociones (tipo, grado de actividad, etc.) y georrefenciación. Tercero, construcción de un mapa de remociones. Cuarto, identificación de los porcentajes de área afecta por remociones y clasificación de las unidades de suelo/roca en inestable o estable. Quinto, combinación de los mapas de parámetros con el mapa de remociones y creación de una matriz con presencia/ausencia de cada factor. Sexto, análisis estadístico multivariable mediante *softwares* computacionales. Y, séptimo, clasificación de las unidades de suelo según los resultados alcanzados en el punto anterior y clasificación según su susceptibilidad.

#### 2.5.2.2 Metodología geotécnica ingenieril

Esta metodología aborda la susceptibilidad aplicada a métodos ingenieriles. Puede ser subdividida en metodologías probabilísticas o determinísticas, las que calculan índices u otros factores (probabilidad de falla, deformación) basados en estabilidad de laderas generalmente con parámetros geotécnicos.

#### 2.5.2.2.1 Metodología geotécnica ingenieril determinística

Esta metodología realiza análisis en sitios específicos y en estabilidad de ladera desde un punto de vista ingenieril. Las principales propiedades físicas son cuantificadas e ingresadas a modelos matemáticos, para luego calcular el factor de seguridad. Este enfoque es empleado en ingeniería civil e ingeniería geológica para la evaluación de peligro de remociones y mapeo.

El índice de estabilidad que se calcula en esta metodología es conocido como factor de seguridad (F) y es la manera en que se cuantifica la susceptibilidad. Para el correcto cálculo de F se requiere información de la geometría de la ladera, parámetros de stress (cohesión y ángulo de fricción interna), y presión de poros. También, se debe tener claro si se trabajará bajo los máximos stress o residuales (o entre estos), por esto se aplica a zonas específicas de la superficie de deslizamiento (Chowdhury y Bertoldi 1977). Es por ello que la metodología no puede ser usada para áreas extensas, sino que solo para áreas pequeñas y a escala de detalle.

#### 2.5.2.2.2 Metodología geotécnica ingenieril probabilística

La metodología determinística por años facilitó la cuantificación de estabilidad. Sin embargo, el factor de seguridad no considera la cohesión, ángulo de fricción interna y la resistencia al corte sin drenaje, los que varían su comportamiento en función del tiempo. La variación temporal del agua también es importante, pero tampoco es considerada en los cálculos convencionales del factor de seguridad.

Algunos parámetros que no logran ser considerados por la metodología determinística y que aumentan la incerteza, pueden ser variables o sistemáticos. Entre los sistemáticos se encuentra: la masa del suelo que solo puede ser investigada en un número finito de puntos, la determinación de parámetros del suelo tanto en campo como en ensayos de laboratorio que está limitada por el financiamiento y el tiempo disponible, y el equipamiento de ensayo y métodos que no son perfectos. Además, se adicionan incertezas asociadas al mecanismo de fallamiento, ocurrencia de fallamiento y sus impactos.

El reconocimiento de estas incertezas ha llevado al desarrollo del método probabilístico, cuyo trabajo se realiza bajo un componente probabilístico, pero también considerando las condiciones básicas de los modelos geotécnicos.

En busca de dar una solución a estas incertezas, la probabilidad de falla es definida como la probabilidad de que la función de rendimiento tenga un valor bajo el umbral, considerando F como la función de rendimiento (Aleotti y Chowdhury, 1988). Así, matemáticamente, la probabilidad de falla (pF) se definió como  $pF = P [F < 1]$ , y la probabilidad de confianza (ps) es el complemento; por lo tanto,  $ps = 1 - pf$ . Pero, para el cálculo de probabilidad de falla se requiere la función de densidad de probabilidad de la función de rendimiento, por lo tanto, el factor de seguridad (F) no depende de un solo valor, y su distribución de probabilidad se puede caracterizar por al menos dos parámetros estadísticos: la media del valor F y la desviación estándar  $\sigma_f$ . Así, queda definida la confianza ( $\beta$ ) como:  $\beta = (F - 1) / \sigma_f$ , donde F es la función de rendimiento y

$\sigma_f$  la desviación estándar, el numerador da la razón en que el valor medio es mayor al valor umbral, y el denominador refleja la dispersión del valor medio.

El cálculo de la probabilidad se puede realizar mediante distintos métodos, entre los que están: *Method First Order Second Moment Method (FOSM)*, Método Estimado de Puntos y Método de Estimación Montecarmelo. Los detalles de cada método pueden ser encontrados en el trabajo de Chowdury (1984).

Esta metodología ha sido un gran aporte para la evaluación de susceptibilidad y peligro para las obras ingenieriles, pero una de sus mayores desventajas es que requiere mucha información para tener aproximaciones probabilísticas certeras.

### 2.5.2.3 Análisis con redes neuronales

Las Redes Neuronales Artificiales (*ANN*), son el método cuantitativo más reciente para evaluar susceptibilidad en remociones en masa. Las redes, en palabras sencillas, son algoritmos de “aprendizajes” en los que pesos y combinaciones de parámetros se combinan iterativamente con datos efectivos en zonas de prueba hasta lograr convergencia.

Lees (1966) las define como un dispositivo de procesamiento implementado como un algoritmo o en el *hardware*, cuyo diseño fue motivado por el funcionamiento del cerebro de los mamíferos; que reaccionan a la entrada de datos, y se entrena de una manera tal como para alterar su estado inicial, algo que ningún algoritmo convencional hace: puede aprender.

La configuración más común en redes neuronales es la compuesta por tres capas, capa de entrada, (*input layer*), capa oculta (*hidden layer*) y capa de salida (*output layer*). La capa de entrada corresponde al ingreso de los parámetros, la capa escondida es una capa que realiza el entrenamiento y aprendizaje de las neuronas, es decir, realiza los procesos que dan las restricciones a las neuronas y busca de manera iterativa la combinación del peso de los parámetros que son los esperados, y la capa de salida entrega los valores de cada parámetro ingresado. En la red de alimentación hacia adelante (*feed-forward network*), las capas están completamente conectada a las otras. Una representación esquemática en la Figura 2.2.A muestra cómo se realiza el cálculo: primero se atribuye un peso a las conexiones de manera casual, los valores de salida son comparados con lo esperado y se calcula el error. El procedimiento progresa de manera iterativa hasta la convergencia de los valores de salida calculada y esperada. Esta es la fase de aprendizaje, en que la función de la red neuronal se crea.

El proceso que realiza cada red neuronal consiste en 5 pasos (Figura 2.2.B): primero, atribución casual de pesos a las conexiones; segundo, escoger los parámetros de entrada; tercero, calcular los valores de salida y comparar con los valores de salida esperados; cuarto, calcular el error y el cambio en los pesos iniciales; quinto, repetición de la operación hasta converger (iteración).

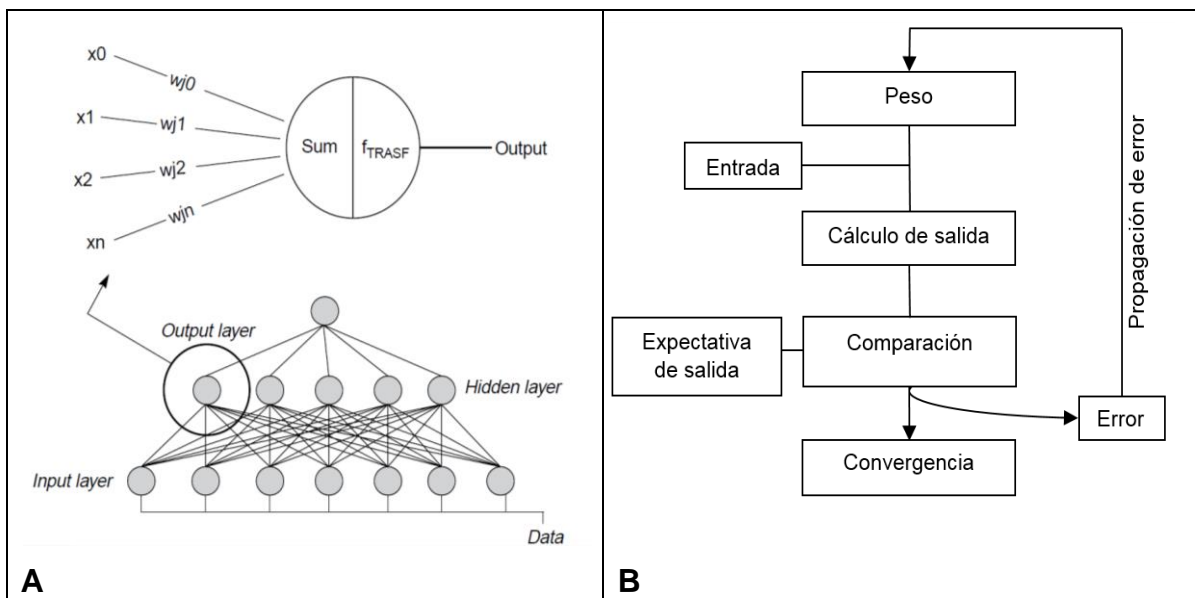


Figura 2.2. A: Red neuronal, muestra la capa de entrada (*input layer*), capa escondida (*hidden layer*) y capa de salida (*output layer*). Estas se conectan directamente con el peso de los factores, y la sumatoria de estas, entrega un valor de salida (*output*). B: Proceso que genera una red neuronal hasta lograr la convergencia.

Yilmaz (2009), indica que redes neuronales entrenadas pueden ser consideradas como un experto en la categoría de información que se ha dado a analizar. Este experto, puede ser utilizado para proporcionar proyecciones a las nuevas situaciones de interés y la respuesta a preguntas como qué sucede. Otras ventajas incluyen: aprendizaje adaptativo, la auto-organización, el funcionamiento en tiempo real y la tolerancia a fallos a través de la codificación de la información redundante.

Biswajeet y Saro (2010), aplican el método de redes neuronales en Klang Valley, Malasya. Consideran 11 parámetros: pendiente, curvatura, altitud, aspecto, distancia a caminos, distancia a fallas, distancia a ríos, litologías, cubierta de suelo, suelo e índice de vegetación. Del mapa de catastro de remociones, consideran un 90% de la evidencia para entrenar las redes, es decir, para indicar las restricciones que harán iterar a las redes hasta encontrar el resultado esperado, mientras que el 10% restante se deja para validar el método. Mediante esta validación, Biswajeet y Saro (2010) indican que se obtienen mejores resultados con un número acotado de parámetros, el que determinaron como 7; por lo tanto, considerar una gran cantidad de parámetros no siempre lleva a obtener mejores resultados.

En tanto, otros autores como Tien Bui *et al.* (2015), ocupan 15 parámetros y 70% del catastro de remociones para el entrenamiento de neuronas, y el otro 30% para la validación del método, obteniendo alto porcentaje de éxito.

Cabe señalar que la cantidad de parámetros y el porcentaje ocupado para entrenar y validar las metodologías asociadas a redes neuronales están determinadas, principalmente, por la zona de estudio, es decir, los factores condicionantes y la cantidad de evidencia de remociones que pueden ser observadas y catastradas.



La Tabla 2.6 presenta un resumen de las distintas metodologías abordadas por Aleotti y Chowdhury (1988), indicando las ventajas, las desventajas y a la escala a la que pueden ser ocupadas.

Tabla 2.6. Cuadro de resumen de métodos, ventajas y desventajas. Escala a la que puede ser usado (S: pequeña, M: mediana y L: gran escala). R significa que su uso es restringido e Y que su uso es completo (Aleotti y Chowdhury, 1988).

Método	Ventaja	Desventaja	Escala		
			S	M	L
Análisis geomorfológico	Permite una rápida evaluación tomando en cuenta un gran número de factores	Totalmente subjetivo con reglas implícitas que impiden análisis críticos de los resultados	R	Y	Y
Combinación de mapas de índices	Resuelve el problema de reglas implícitas pues realiza todos los pasos de manera automática y se normalizan los datos	Subjetivo al atribuir el valor de los pesos a las clases de los parámetros	R	Y	Y
Análisis lógico	Permite la comparación de diferentes pendientes, riguroso	Requiere datos de instrumentos de monitoreo, usado principalmente para remociones lentas	R	R	Y
Análisis estadísticos (bivariante y multivariante)	Objetivo en la metodología, pasos totalmente automáticos en la gestión de los datos	Sistema de colección y análisis de datos con respecto a los factores, es bastante engorroso	Y	Y	R
Determinístico	Objetiva y cuantitativa en su alcance, fomenta la investigación y medición de parámetros geotécnicos	Necesita un detallado conocimiento de la zona, como también geotécnico. No considera variadas incertidumbres	R	R	Y
Probabilístico	Permite la consideración de distintas incertidumbres, provee una nueva visión de lo que no es posible determinar en métodos determinísticos	Requiere amplia comprensión del área de probabilística. Dificulta la distribución de probabilidad para zonas de bajo nivel de peligro	Y	R	R
Redes neuronales	Metodología objetiva, no requiere de conocimiento teórico en aspectos físicos del problema	Difícil de verificar los resultados cuando los datos instrumentales no están disponibles	R	Y	Y

### 2.5.3 Metodologías mixtas

Las metodologías mixtas, como su nombre lo indica, son una mezcla de métodos cualitativos y cuantitativos.

Sepúlveda (1998), propone una metodología mixta, en la que evalúa el peligro relacionado a flujos de detrito, aplicada en la Quebrada Lo Caña. Tiene un componente

cuantitativo pues identifica los factores condicionantes, y cuantitativo ya que otorga a cada factor un peso que en conjunto permite determinar la susceptibilidad.

Lara (2007) propone una metodología mixta en la que una parte se determina mediante las observaciones de terreno y la pericia del geólogo para dar el peso de los factores condicionantes, pero también tiene un carácter cuantitativo ya que se debe combinar la información de la probabilidad de falla del material, del alcance de la remoción y, alternativamente, del agente detonante, para cada tipo de fenómeno.

### 3 ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO

Los antecedentes geológicos y geomorfológicos recopilados de la zona se obtuvieron de:

- Börgel, R., 1983. Geomorfología. Geografía de Chile. IGM. Tomo II.
- Levi, B., Aguilar, A., Fuenzalida, R., 1966. Reconocimiento geológico en las provincias de Llanquihue y Chiloé. Boletín N°19.
- Ordoñez, A., Crignola, P., 2003. Depósitos metalíferos, anomalías geoquímicas, rocas y minerales industriales y recursos energéticos del sector sur de la Región de Los Lagos. Servicio nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos, N°21, p. 32, escala 1:500.000.
- SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 75, escala 1: 1.000.000.
- Stern, C. R., 2004. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. Revista geológica de Chile, 31(2), p.161-206.

Además, cabe señalar que todos los antecedentes y archivos computacionales descargados desde la página oficial del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y Dirección General de Aguas (DGA) bajo los cuales se trabajó, están representados con el elipsoide WGS84, en coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator) con huso 18 Sur.

#### 3.1 Geomorfología regional

La geomorfología regional se compone de unidades morfoestructurales, hoyas hidrográficas, glaciares y complejos volcánicos.

##### 3.1.1 Unidades morfoestructurales

La costa de la parte superior de la provincia de Llanquihue y la de Chiloé Continental forma el borde oriental del seno de Reloncaví, golfo de Ancud y golfo de Corcovado, prolongándose, en la parte norte, en fiordos y canales que disectan al continente (Levi *et al.*, 1966).

Las características morfológicas costeras de la zona, que es la continuación de la Cordillera Principal, indican que, al sur de la latitud de Puerto Montt, son diferentes según constituya el límite oriental de senos y golfos o los bordes de estuarios, fiordos y canales. En el primer caso, hasta la bahía Corcovado la costa tiene una dirección norte con pendientes suaves, terrazas y playas. Los sectores de pendientes suaves están principalmente en el sector noroeste de la península de Huequi, y entre la punta Chumildén y Chaitén, y están formados, en mayor parte, por sedimentos de origen glacial o corrientes de barro, de probable edad cuaternaria, y por rocas metamórficas y sedimentarias de edad precámbrica (?) a paleozoica. Las costas de terrazas se presentan en la parte nororiental y en las islas del seno de Reloncaví, la altura máxima de las terrazas es de 100 m s.n.m.; forman acantilados con playas de ripio. Hay escasa presencia de costas de playa y al sur de la bahía de Corcovado la costa continúa con

dirección norte, es abrupta, alcanza 1400 m s.n.m. y está constituida por rocas sedimentario-volcánicas de edad superior a pleistocena.

Las costas de los fiordos, estuarios y canales son abruptas y de dirección variable entre norte, este y noroeste, y alcanzan alturas hasta de 1.700 m s.n.m. Está constituida predominantemente por rocas graníticas y migmatitas de edad terciaria y/o cretácica y en menor medida por rocas metamórficas de edad precámbrica (?) a paleozoica.

La geomorfología de la zona se puede dividir en cuatro: Cordillera de los Andes, Valle Central, Planicies Costeras y Cordillera de la Costa.

La Cordillera de los Andes tiene un relieve positivo, se dispone N-S con un largo estimado de 1500 km y con un ancho variable del orden de 60 a 120 km. Se extiende desde el norte del Canal Comau, frente al Golfo de Ancud, hasta la cordillera de Darwin al sur. En esta zona, sufre una mayor intensidad de fragmentación en islas, canales, senos, etc., por efecto de su progresivo hundimiento. El límite cordillerano oeste corresponde a la línea de costa que es, al mismo tiempo, la fachada litoral occidental del territorio andino. Esta línea es muy irregular pues algunos fiordos como Comau y Riñihue realizan una fuerte penetración hacia el E y SE, y ocupan los cursos inferiores de los ríos Vodudahue y Riñihue (Börgel, 1983).

La Depresión Central se extiende desde el Seno de Reloncaví hasta el istmo de Ofqui, tiene una orientación N-S y un ancho estimado en 580 km. La mayor parte del llano aparece ocupada por el mar, debido al hundimiento que ha experimentado esta zona del territorio nacional. Las estructuras geomorfológicas más distintivas son: el seno de Reloncaví, golfo de Ancud y golfo Corcovado. Dentro de la Depresión Central hay relieves positivos que representan islas de baja altura. Se conecta con la cordillera de los Andes mediante un muro costero, un frente de falla bien conservado presente entre Puerto Montt y Puerto Palena.

Las Planicies Litorales están presentes en la isla Grande de Chiloé, entre Chacao y la estación Mocopulli, desde este último punto hasta Chonchi. Corresponde a una estrecha llanura costera de unos 30 km con orientación N-S con fragmentación que da origen a numerosas islas, tales como, Quinchao, Lemuy, Quehui, Chelín, etc.

La Cordillera de la Costa está afectada por hundimiento, lo que genera una geomorfología particular respecto al resto del país. Tiene una extensión aproximada de 560 km correspondiendo a 60 km al sector insular de Chiloé. En la isla grande de Chiloé las cordilleras de Piuchué y Pirulil, separadas por el lago Cucao, representan una orografía cordillerana costera que alcanza puntos de gran altura como los cerros Metalqui de 820 m s.n.m y Cucao de 698 m s.n.m. Al sur del Golfo Corcovado, la Cordillera de la Costa aparece representada por islas, archipiélagos y penínsulas debido a fragmentación y hundimiento.

Las unidades morfoestructurales se encuentran en la Figura 3.1.

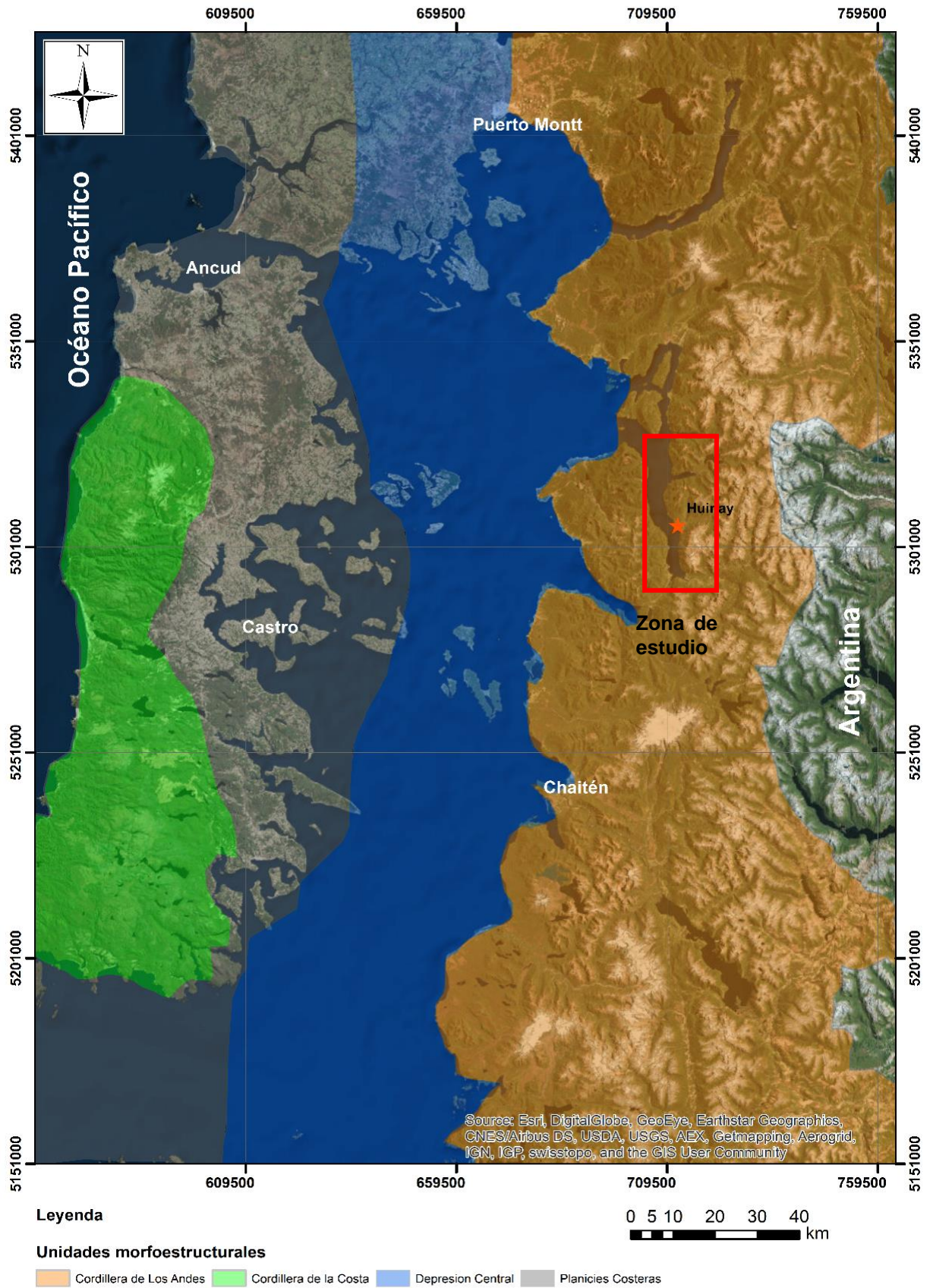


Figura 3.1. Unidades morfoestructurales de la región de Los Lagos. Polígono rojo indica el área de estudio.

### **3.1.2 Hoyas hidrográficas**

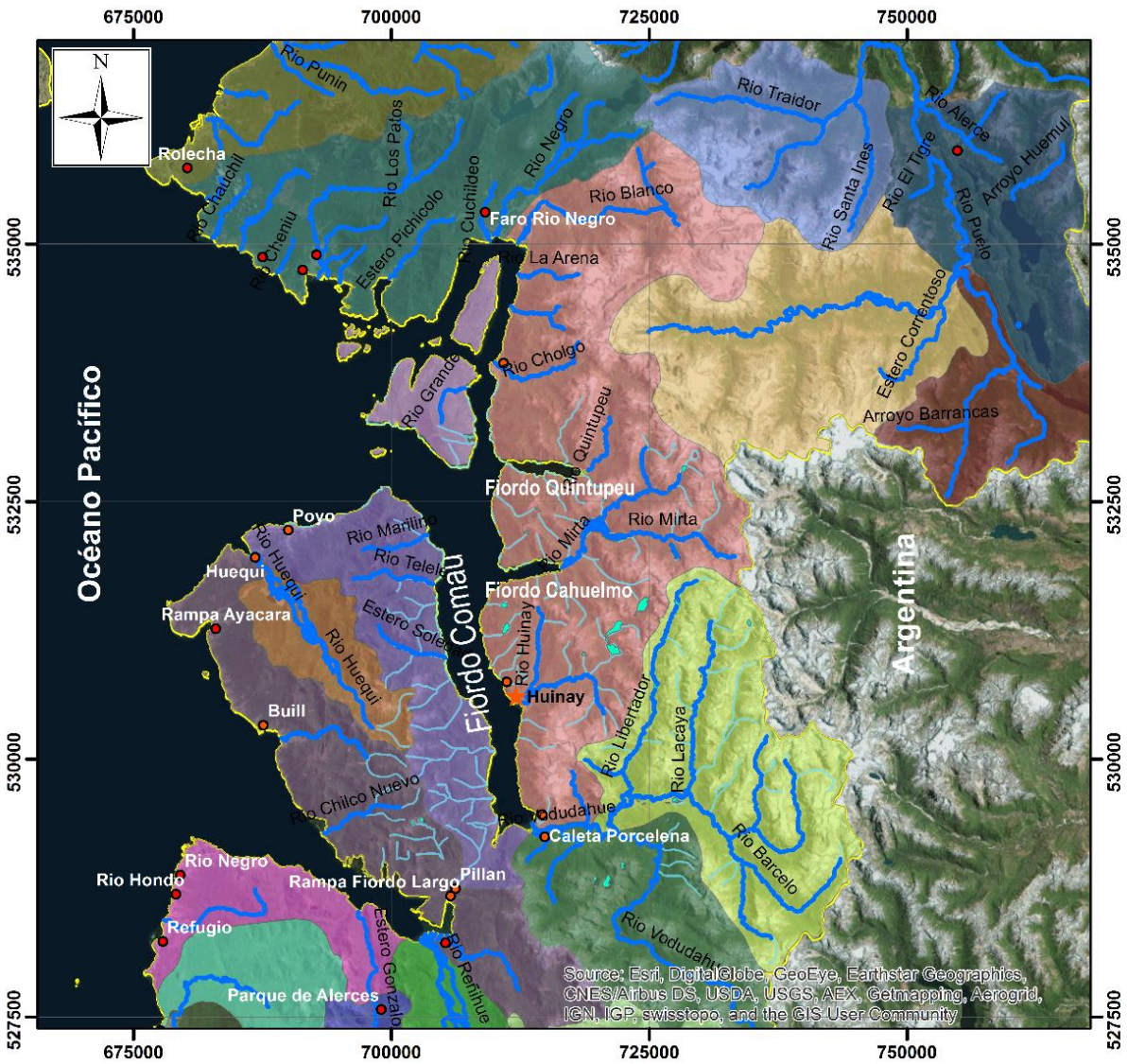
La DGA define la zona de estudio como la subcuenca hidrográfica de tipo exorreica que se encuentra entre río Negro y río Vodudahue. Al norte limita con la subcuenca Costera entre Punta Tentelhue y Río Negro, subcuenca Río Traidor y Río Ventisquero, al sur colinda con las subcuencas Río Barceló y Río Vodudahue, mientras que al oeste colinda con el mar fiordo Comau y al este con el límite fronterizo.

La subcuenca entre río Negro y Vodudahue, tiene ríos de menor caudal, entre los que están (de norte a sur) los ríos Blanco, La Arena y Mariquita que desembocan en el Canal Cholgo; el río Quintupeu que desemboca en el canal homónimo; el río Mirta que desemboca en el canal Cahuelmó y el río Huinay que desemboca en el fiordo Comau. Existe una gran densidad de cursos de agua de menor envergadura, asociados a quebradas, que son esporádicos y se activan en periodos de lluvia.

La subcuenca tiene más de 25 masas de agua considerando lagunas, lagos y esteros, siendo los lagos los de mayor extensión areal. Entre ellos están el Lago Inexplorado, Lago Quintupeu, Lago Abascal, Lago Soledad y Lago Orfa.

Las subcuencas se presentan en la Figura 3.2.





**Leyenda**

**Subsubcuencas**

	Costeras Entre Punta Tentelhue y Rio Negro (Incluido)		Isla Talcan		Rio Puelo entre Arroyo Ventisquero y bajo Rio Negro
	Costeras Entre Rio Huequi y Rio Pillan (Incluido)		Islas Ahullini y Mayahue		Rio Puelo entre frontera y Rio Ventisquero
	Costeras del fiordo Coman		Islas Pelada y Llancahue		Rio Purilauquen
	Costeras entre Rio Negro y Rio Vodudahue		Islas Puluqui y adyacentes		Rio Reñihue Entre Arriba Rio Cipreses y Desembocadura
	Costeras entre Rio Puelo y Punta Trentelhue		Islotes Independientes		Rio Reñihue hasta junta Rio Cipreses
	Costeras entre Rio Purilauquen y Rio Negro		Rio Barcelo en junta con Rio Vodudahue		Rio Traidor
	Costeras entre Rio Reñihue y Rio Purilauquen		Rio Huequi		Rio Ventisquero
	Isla Chulin		Rio Negro		Rio Vodudahue

**Simbología**

- Centros Poblados
- Límite regional
- Ríos
- Cursos de agua
- Lago
- Laguna

Figura 3.2. Subsubcuencas hidrográficas de la zona de estudio. Fuente: DGA.

### **3.1.3 Complejos volcánicos**

Próximos al área de estudio se encuentran seis complejos volcánicos, cinco de los cuales no presentan actividad volcánica reciente. Ellos son están Yate, Hornopirén, Apagado, Huequi, Michimahuida y Chaitén (Figura 3.3).



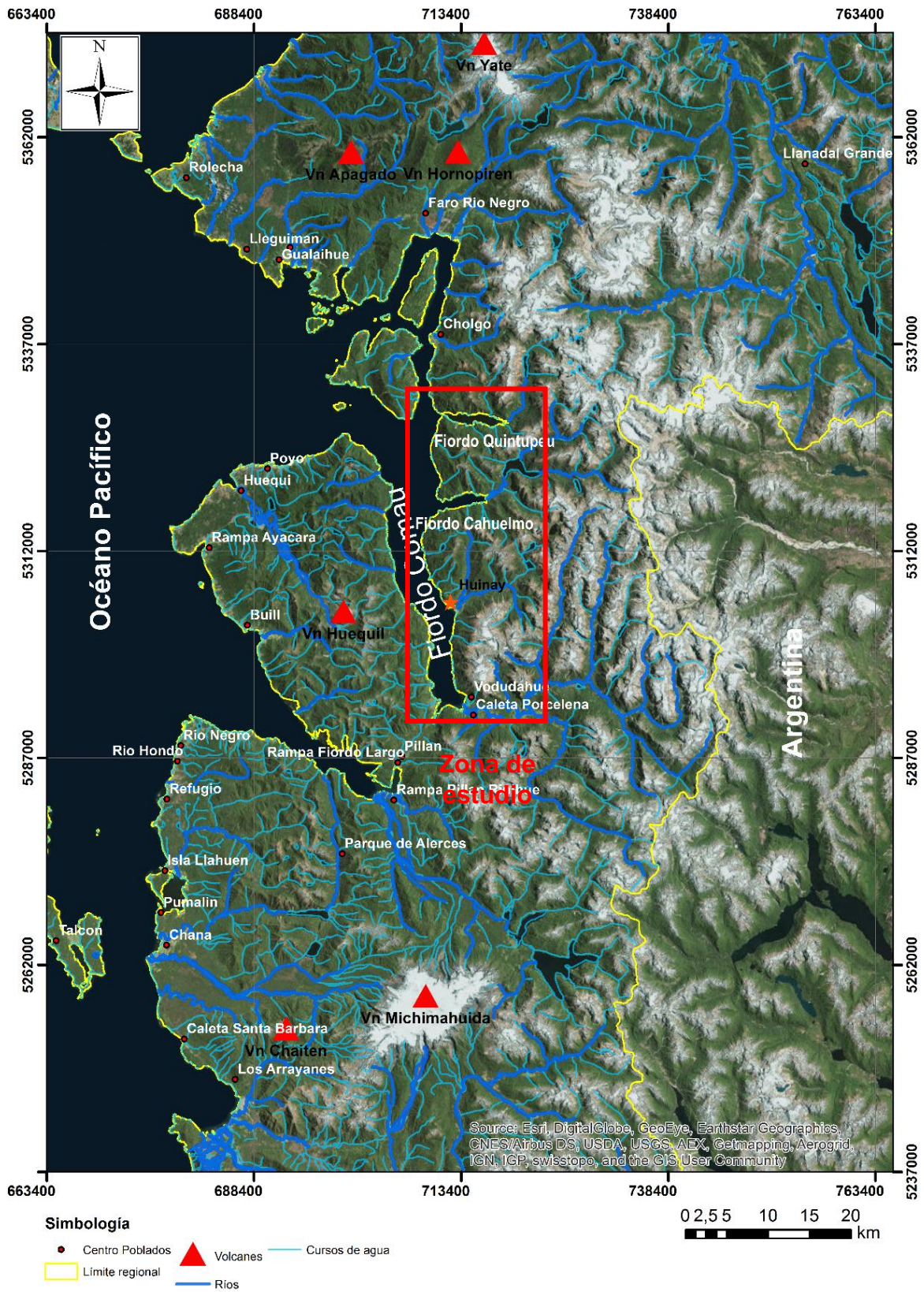


Figura 3.3. Volcanes cercanos a la zona de estudio.

### 3.1.3.1 *Volcán Yate*

Los antecedentes provistos por González-Ferrán (1995) y Lara *et al.* (2011) indican que el volcán Yate corresponde a un estratovolcán compuesto, presumiblemente Pleistoceno, elongado en dirección NNW. Presenta importantes evidencias de acción glacial, albergando actualmente una importante cubierta de hielos tanto en su cima como en algunos de sus flancos. Sus productos corresponden a lavas, domos y depósitos de flujos piroclásticos, variando composicionalmente desde andesita a dacita.

Este volcán no registra actividad eruptiva histórica. Sin embargo, existen registros de una serie de eventos catastróficos, como avalanchas de detritos, aludes y crecidas de ríos en los siglos XIX y XX (Lara *et al.*, 2011).

### 3.1.3.2 *Volcán Hornopirén*

El volcán Hornopirén es holoceno, está localizado al suroeste del volcán Yate (41,87°S, 72,43°W), y se presenta como un cono simétrico de forma elíptica de rápido crecimiento. Algunos de sus depósitos corresponden a acumulaciones de tefra que se caracterizan por componerse por escoria vítrea muy estratificada a escala de centímetros, distribuida de este a oeste (Watt *et al.*, 2011). No presenta registro histórico de actividad eruptiva reciente a pesar de que se le atribuye, junto con el volcán Apagado, las erupciones explosivas más voluminosas de Holoceno dentro del sector de Hualaihué.

### 3.1.3.3 *Volcán Apagado*

El volcán Apagado, cuya posición corresponde a las coordenadas 41,88°S, 72,58°W, constituye un cono monogenético de escoria que se ubica dentro de un complejo volcánico de edad pleistocena el cual se encuentra erodado; adicionalmente, se le relacionan depósitos de lava andesita-basáltica (Ruiz, 2015). Por otra parte, se le atribuyen erupciones explosivas y con importante emisión de material (Watt *et al.*, 2011), sin embargo, no presenta registro de erupciones históricas en el corto plazo, al igual como ocurre con el volcán Hornopirén.

### 3.1.3.4 *Volcán Huequi*

El volcán Huequi se compone de un conjunto de domos y depósitos piroclásticos asociados, estos últimos generados probablemente por el colapso de los domos activos, aunque también se reconocen depósitos de caída y de avalancha. Se emplaza en el centro de la península de Ayacara, Chiloé Continental, sitio remoto y de difícil acceso por vía terrestre. Los productos identificados se caracterizan por composiciones que van desde andesitas-basálticas a dacitas. Estudios recientes indican propiedades geoquímicas y mineralógicas singulares poco comunes en el contexto regional de este segmento en la zona volcánica sur de los Andes. Estas características tendrían, a su vez, influencia en el estilo eruptivo dominante que contrasta con de otros volcanes vecinos.

Existen reportes de pequeñas erupciones en los años 1890 y 1920, aunque se desconoce si esta actividad tuvo relación con la extrusión de magma en forma de domos. Por otro

lado, estudios tefrocronológicos regionales no han reportado erupciones mayores de este complejo volcánico durante el Holoceno (Watt *et al.*, 2011).

### 3.1.3.5 *Volcán Michimahuida*

El volcán Michimahuida corresponde a un voluminoso estratovolcán ubicado a unos 20 km al este del recientemente activo volcán Chaitén. En la parte superior del aparato volcánico se reconoce una estructura caldérica, dentro de la cual se ha construido el estratocono principal. Pequeños conos piroclásticos se emplazan principalmente hacia el sur, oeste y noreste del volcán, algunos con flujos de lava asociados. Presenta una persistente cobertura de hielo, con lenguas glaciares que bajan hacia todos los flancos.

Su actividad durante el Holoceno es poco conocida, aunque estudios recientes indican que al menos ocurrió una gran erupción generadora de potentes depósitos ignimbríticos andesítico-basálticos, hace algo más de 9 mil años. Por otro lado, durante el Holoceno habrían ocurrido importantes erupciones explosivas, con dispersión de material piroclástico hacia el este. Las lavas de este volcán son de composición mayoritariamente andesítico-basálticas, aunque en los piroclastos se han identificado términos más evolucionados (andesíticos y dacíticos).

No hay certeza de la fecha de la última actividad eruptiva. Sin embargo, el naturalista británico Charles Darwin reportó una erupción en Chiloé continental durante la primera mitad del siglo XIX, cuyo origen podría corresponder al volcán Michimahuida.

### 3.1.3.6 *Volcán Chaitén*

El volcán Chaitén es un centro volcánico de pequeñas dimensiones situado al oeste del volcán Michimahuida en el sector de Chiloé continental. Está formado por una secuencia preglacial de lavas y brechas que forman una estructura caldérica en cuyo interior se había edificado un domo holoceno. Este domo fue parcialmente destruido por la erupción del año 2008 y reconstruido por el mismo ciclo eruptivo. Actualmente, un nuevo domo de aproximadamente 1 km<sup>3</sup> ocupa la posición central de la caldera y mantiene actividad fumarólica débil.

La historia eruptiva del volcán Chaitén, en lo que respecta a su fase de construcción previa al Holoceno, es aún muy desconocida. Una secuencia de lavas andesítico basálticas con rasgos de contacto con hielo sugiere un periodo de volcanismo principalmente subglacial. La actividad eruptiva en los últimos 10 mil años, en cambio, incluye importantes eventos explosivos comparables o incluso superiores en magnitud a la última erupción del año 2008. En estos ciclos eruptivos se evacuó también magma riolítico, inusual en este sector de los Andes del Sur y profundamente contrastante con los productos generados por su vecino el volcán Michimahuida.

La presencia de numerosos centros volcánicos activos en la región, como se ha indicado anteriormente, unido a la existencia de fallas regionales tales como la Liquiñe-Ofqui determinan la existencia y focalización de numerosas fuentes termales en la región, que se distribuyen desde el borde litoral hasta las zonas más elevadas de Los Andes. Muestran un incremento de las temperaturas y niveles de mineralización, hacia el este, a

medida que se aproximan a los centros volcánicos activos de la cordillera andina, donde prevalecen elevados gradientes geotérmicos, vinculados a la presencia de cámaras magmáticas someras.

## **3.2 Geomorfología local**

### **3.2.1 Unidades morfoestructurales**

La zona de estudio se encuentra enmarcada, desde un punto de vista geomorfológico, por un cordón montañoso de orientación N-S correspondiente a la Cordillera de los Andes. Este cordón montañoso está limitado al norte por el río Negro y al sur por el río Vodudahue.

El área se compone de dos valles glaciares correspondientes al fiordo Cahuelmó y a las cercanías del río Vodudahue con orientación EW. Se ubican en la zona central y en el sector inferior del área de estudio, respectivamente, y están compuestos por depósitos fluviodeltaicos, fluvioglaciares y fluviotorrenciales (Figura 3.4).



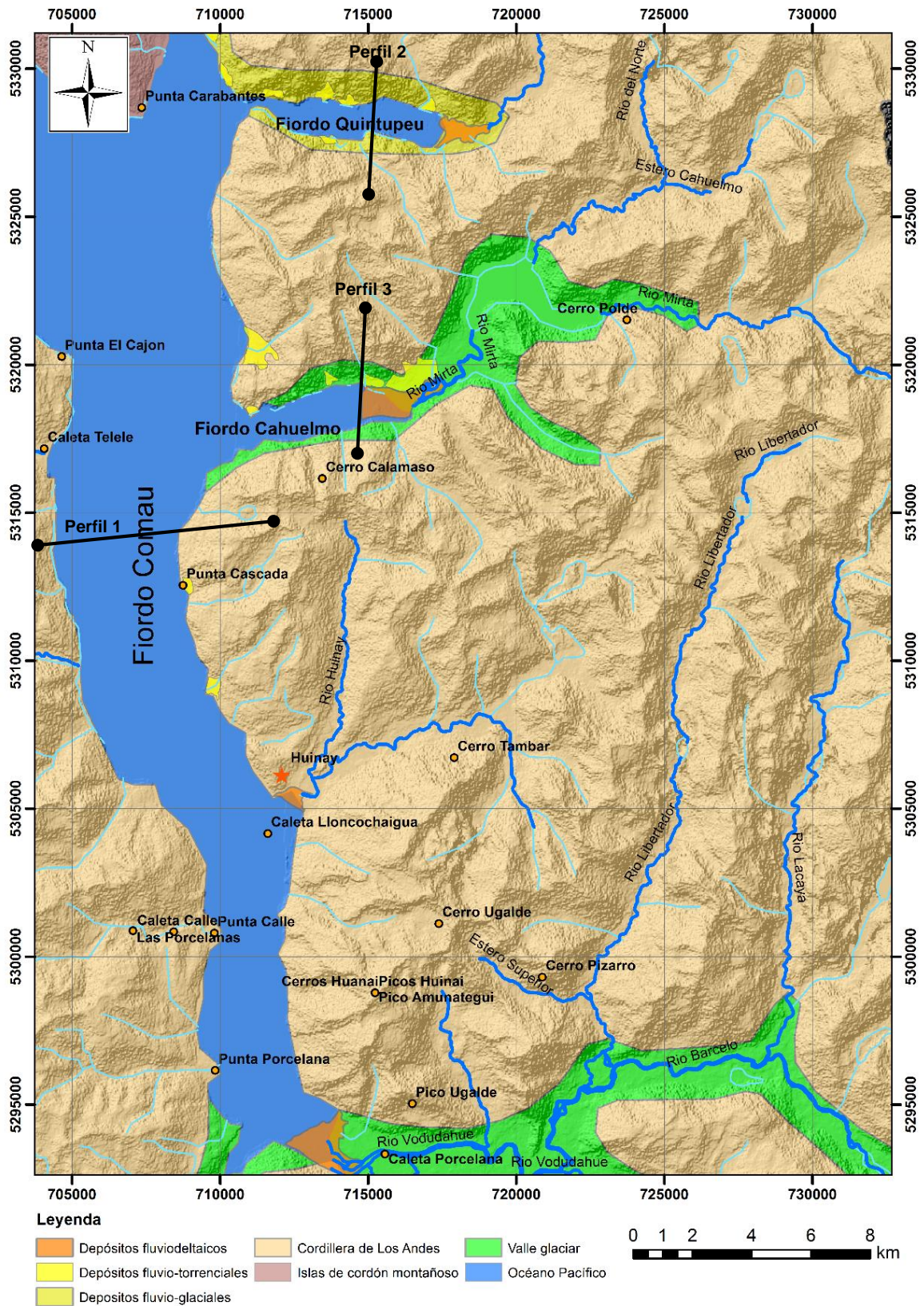


Figura 3.4. Unidades morfoestructurales y depósitos no consolidados del fiordo Comau.

La fragmentación de este cordón montañoso dio origen al fiordo Comau, el que tiene una extensión aproximada de 30 km de largo y entre 4 a 6 km de ancho, con un área de 150 km<sup>2</sup>. Su orientación es NNW (Figura 3.5).

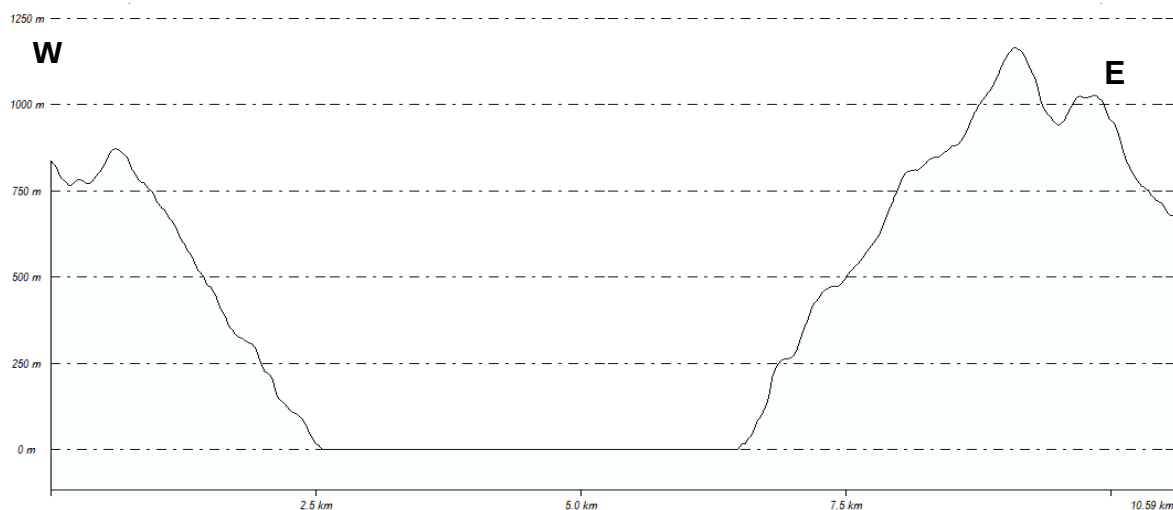


Figura 3.5. Perfil de elevación del fiordo Comau (Perfil 1).

En el límite norte del fiordo Comau se encuentra el fiordo Quintupeu (Figura 3.6) que posee una menor extensión, cercana a los 7 km, y ancho variable de 0,4 a 1,3 km, con gran presencia de depósitos fluviodeltaicos, y en menor medida, depósitos fluvio-torrenciales (Figura 3.7).



Figura 3.6 . Ladera norte del fiordo Quintupeu.



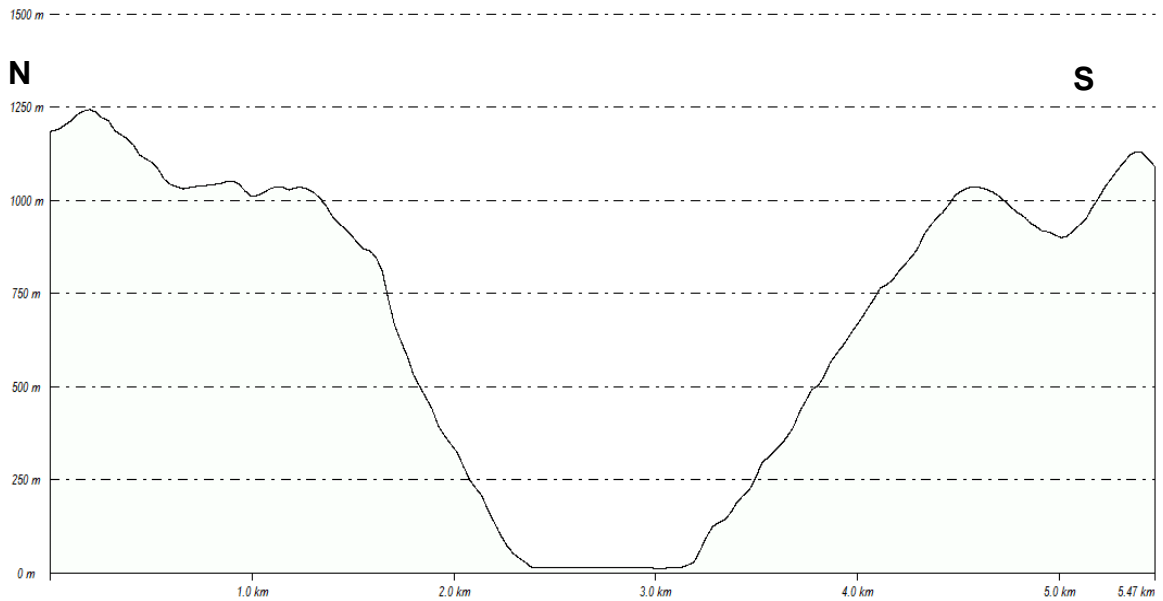


Figura 3.7. Perfil de elevación del fiordo Quintupeu (Perfil 2).

En el centro de la zona de estudio se ubica el fiordo Cahuelmó (Figura 3.8) con una extensión de 5 km de largo y 1,3 de ancho, orientación W-E. Su formación se atribuye a la acción glacial, es decir, los glaciares erosionaron esta zona creando un valle con forma de U característico de valles glaciares (Figura 3.9). Una vez comenzado el proceso de desglaciación, el nivel oceánico aumentó e ingresó a los valles. Posteriormente, se produjo una inundación, lo que formó los denominados fiordos. Una morfología similar tiene el valle por el que fluye el río Vodudahue, que posee múltiples valles glaciares.



Figura 3.8. Ladera norte del fiordo Cahuelmó.

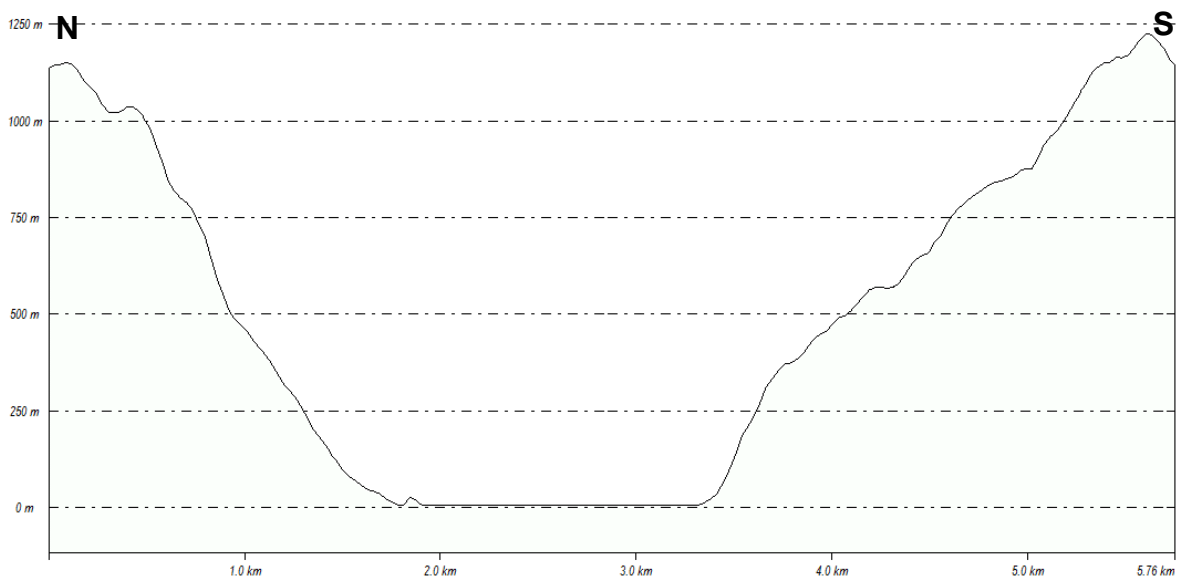
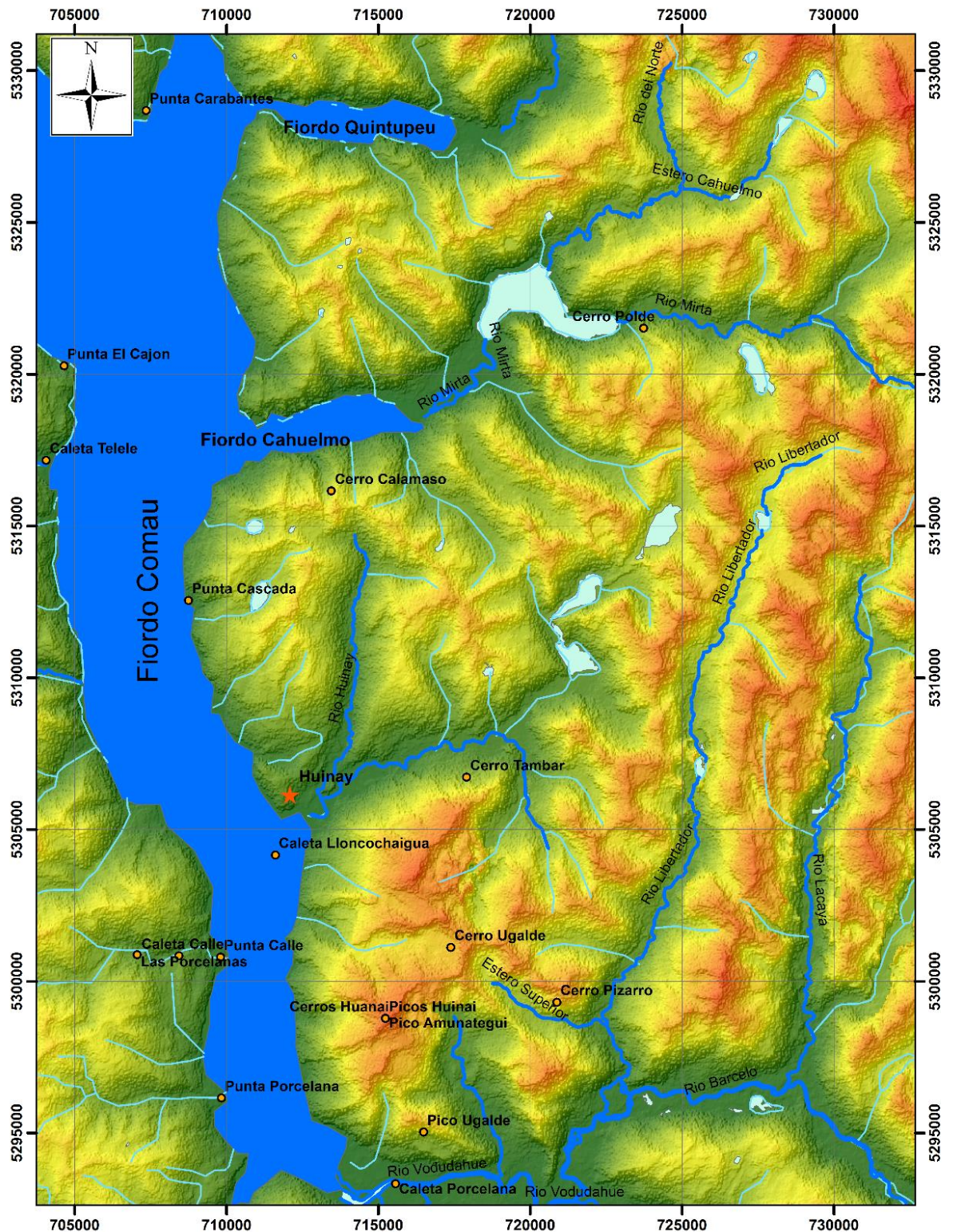


Figura 3.9. Perfil de elevación del fiordo Cahuelmó (Perfil 3).

La zona de estudio presenta un relieve variable siendo predominante una elevación inferior a los 1.015 m s.n.m. Áreas puntuales presentan elevaciones cercanas a los 2.000 m s.n.m, y los cerros Calamaso, Tambar o Tambor y Amunátegui corresponden a las cumbres de mayor elevación con 1.500, 1.450 y 2.000 m s.n.m, respectivamente (Figura 3.10). Las cumbres poseen laderas de pendientes muy inclinadas (Figura 3.11), siendo los circos y conos glaciares característicos de esta zona, con orientación de ladera predominantemente este (Figura 3.12).





<p><b>Legenda</b></p> <p>Elevación [m s.n.m]</p> <p>2453 0</p>	<p><b>Simbología</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; border: 1px solid black; border-radius: 50%; margin-right: 5px;"></span> Nombres geográficos</li> <li><span style="display: inline-block; width: 20px; height: 2px; background-color: blue; margin-right: 5px;"></span> Ríos</li> <li><span style="display: inline-block; width: 20px; height: 2px; background-color: lightblue; margin-right: 5px;"></span> Cursos de agua</li> <li><span style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: lightgreen; margin-right: 5px;"></span> Masas de agua</li> </ul>	<p>0 1 2 4 6 8 km</p>
--	---	-----------------------

Figura 3.10. Modelo de Elevación Digital (DEM).



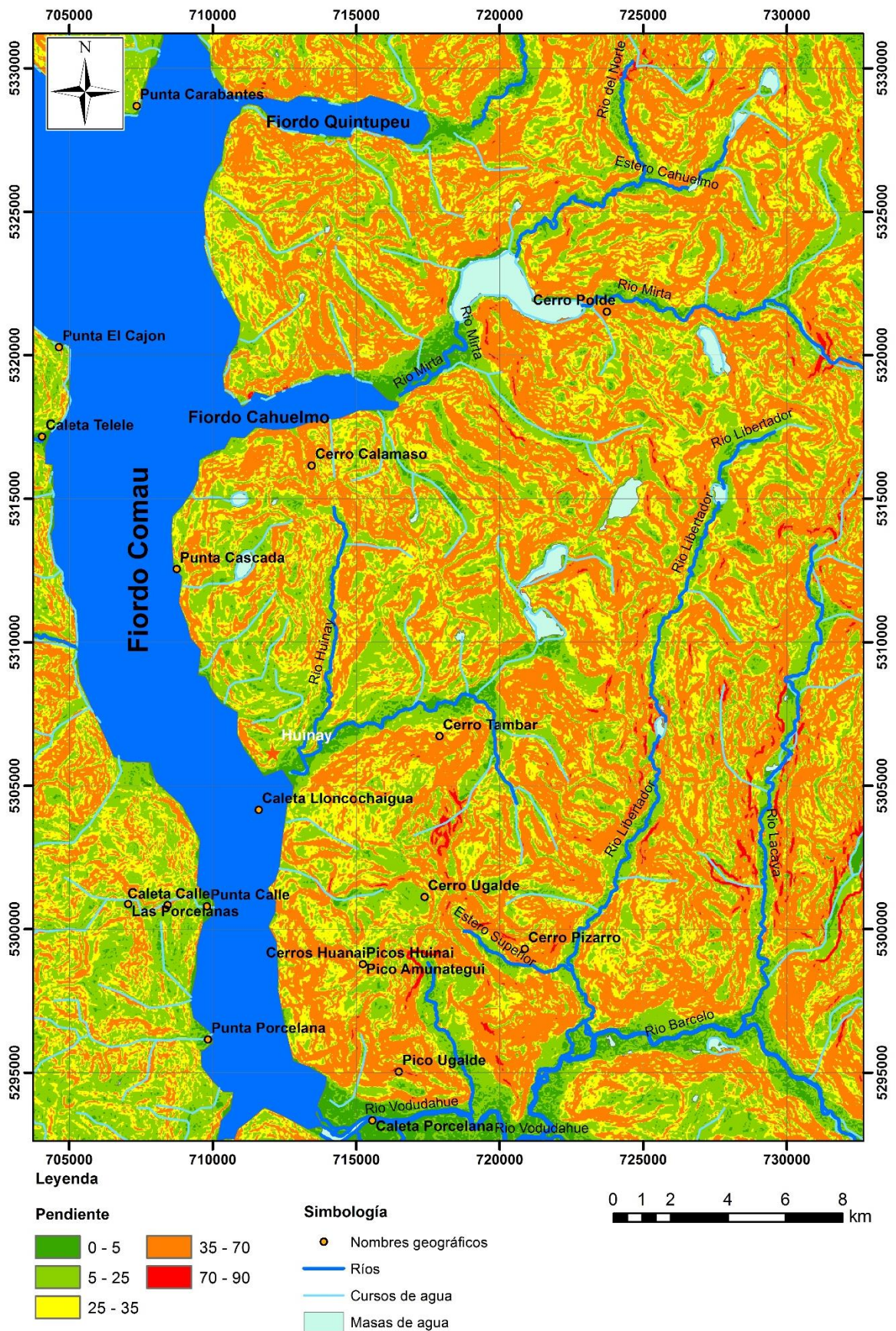


Figura 3.11. Pendientes de la zona de estudio.



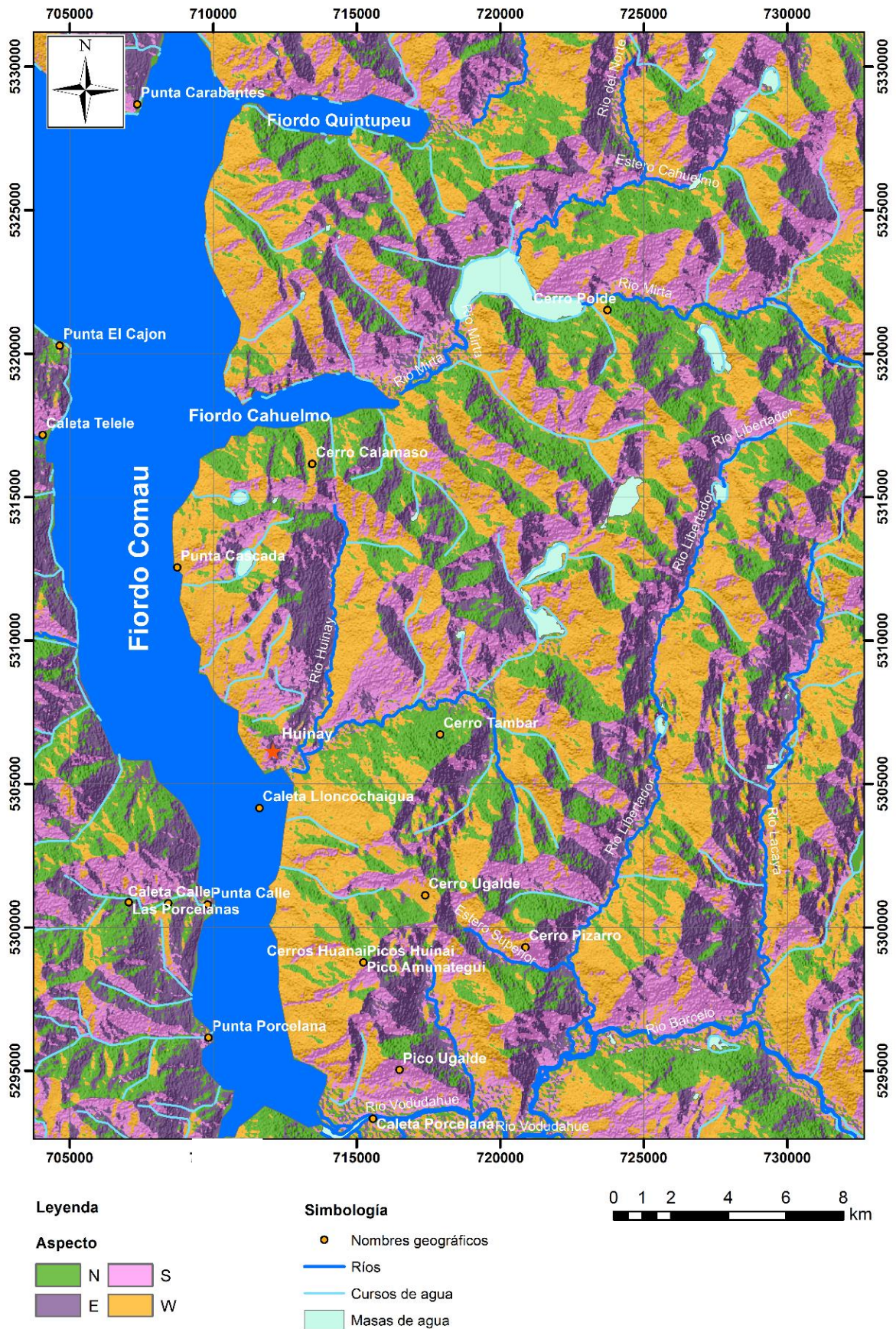


Figura 3.12. Orientación de las laderas.

La ladera norte del fiordo Quintupeu posee altas pendientes que van entre 45-90° con orientación S. Corresponde a grandes paredes de roca subverticales (farellones) de rocas intrusivas, mientras que la ladera sur del fiordo posee pendientes menores que van entre los 30° y 60° con una moda entre 45°-60°. La orientación de esta ladera es preferentemente norte con acotadas zonas de orientación oeste.

En cuanto al fiordo Cahuelmó, ambas laderas, norte y sur, poseen pendientes menos inclinadas que van desde 15° a 45° con acotadas zonas de mayor pendiente entre 45 y 60°, y en menor medida, zonas de 60° a 90°. La zona norte del fiordo posee laderas de orientación sur y algunas este, y la zona sur, por su parte, posee laderas de orientación norte y zonas puntuales de orientación este. En la ladera este se encuentra el cerro Calasmo que, como se mencionó, es uno de los que presenta mayor elevación. Mediante el perfil de elevación es posible reconocer que el fiordo posee forma de U característicos de valles glaciares, además, la ladera norte posee una inclinación mayor respecto a la sur. En ambas laderas, la elevación no supera los 1.250 m s.n.m.

La costa este del fiordo Comau posee características similares. Desde el fiordo Quintupeu hasta Caleta Lloncochaigua en el sector de Huinay, se tienen pendientes predominantes de 15-30° con elevaciones inferiores a los 1.300 m s.n.m. con desarrollo de pequeñas playas de depósitos fluvio-torrenciales. Desde Huinay hasta el río Vodudahue, la pendiente es abrupta y va desde los 45° a 60°, con elevaciones cercanas a los 2.000 m s.n.m. sin desarrollo de playa. La orientación de las laderas de la costa este del fiordo es oeste, con zonas particulares de orientación norte.

### **3.2.2 Hoyas hidrográficas**

La cuenca hidrográfica del área de estudio corresponde a la cuenca de nombre Costeras entre río Negro y río Huinay, pero mediante las observaciones de terreno y fotointerpretación fue posible dividir esta cuenca en tres subcuencas: río Quintupeu, río Mirta, río Huinay y río Barceló (Figura 3.13).

La subcuenca río Quintupeu, tiene como río principal el río Quintupeu que pasa de ser un río recto a uno anastomosado cerca de su desembocadura en el fiordo homónimo. Los afluentes de este río corresponden a quebradas de corta extensión. Estas quebradas pueden tener anchos métricos variables, a través de las cuales fluyen cursos de agua de escaso caudal permanente. Durante los episodios de lluvias estas quebradas se activan de forma rápida con un brusco incremento de los caudales, llegando a generarse caídas de agua en aquellos lugares con pendientes subverticales.

La subcuenca río Mirta, tiene como afluentes al estero Cahuelmo y río Norte, los que juntos desembocan en el sector norte del Lago Abascal. El río Mirta comienza su curso en la divisoria de agua de la Cordillera de Los Andes siendo un río recto, y luego desemboca en el Lago Abascal, donde se une con los flujos del Estero Cahuelmó y río Norte, para continuar su curso hasta desembocar en el fiordo Cahuelmó. En este tramo el río se vuelve sinuoso producto de la disminución de la pendiente y la energía. Al igual que en la subcuenca río Quintupeu, existen quebradas de anchos métricos que llevan cursos de agua intermitente que contribuyen al caudal del río Mirta y sus afluentes desembocan directamente en el fiordo.

La subcuenca río Huinay tiene dos ríos considerados los de mayor afluencia en la cuenca: río Lloncochaigua y Huinay. Ambos ríos son levemente sinuosos pues recorren zonas de baja pendiente, siendo el de mayor caudal el río Huinay. Estos se unen a escasos 1.500 m de la línea de costa, para luego desembocar en el fiordo Comau. Quebradas de anchos métricos generan cursos de agua intermitente que son activados en períodos de altas precipitaciones, y además pueden contribuir al caudal cursos de agua de origen glaciar producto de glaciares de montaña cercanos a la zona.



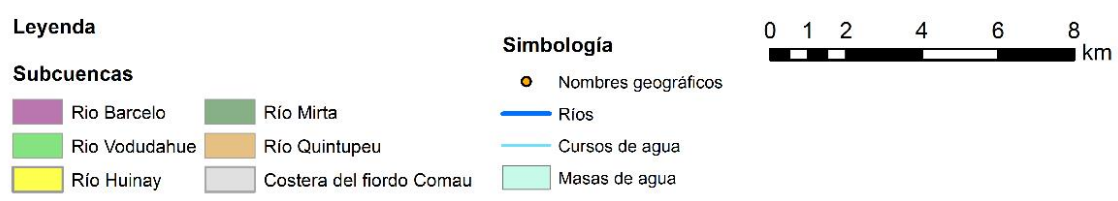
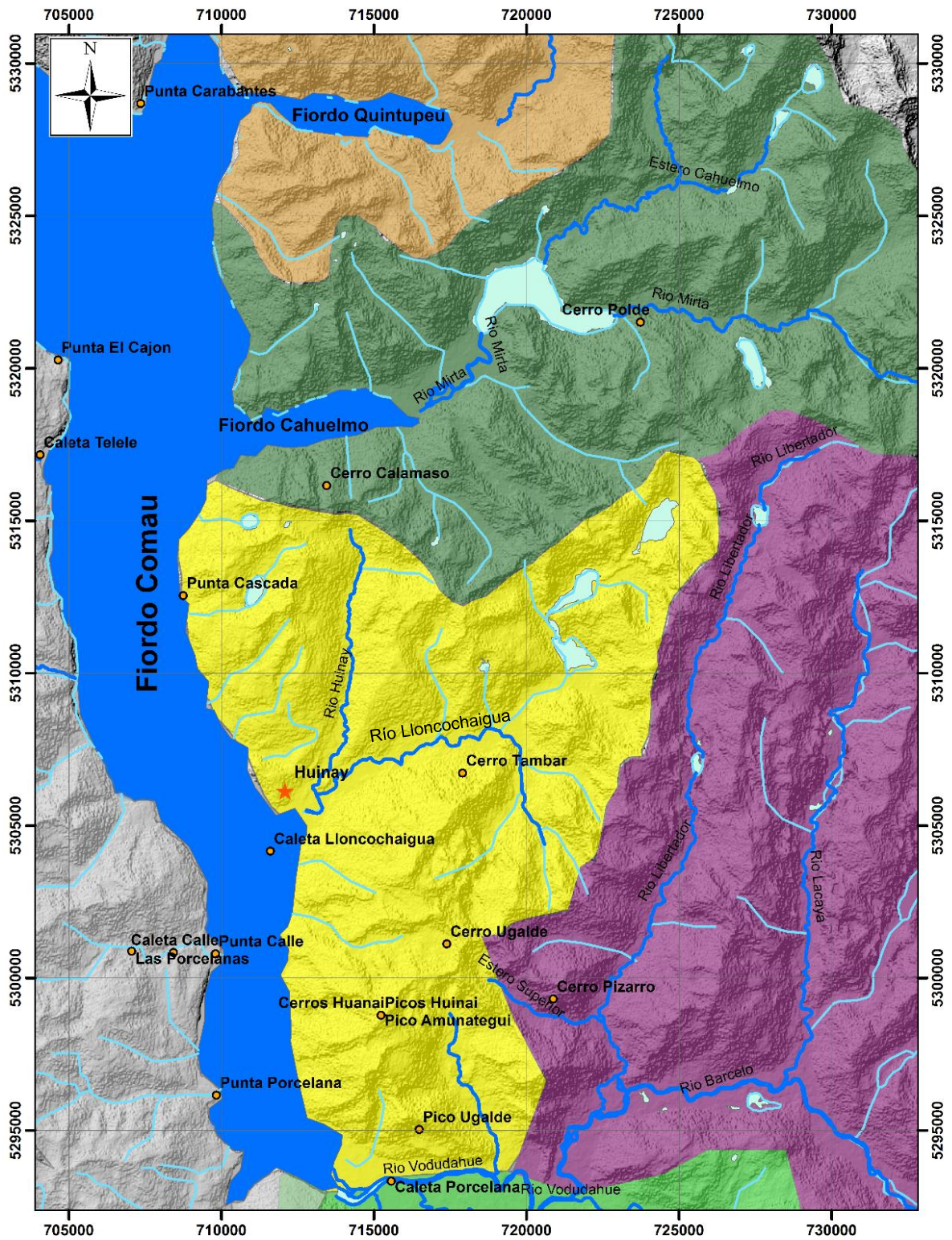


Figura 3.13. Subdivisión de la Subsubcuenca Costera entre río Negro y río Huinay.

### 3.2.3 Glaciares

Durante el Pleistoceno, la zona de estudio estuvo afectada por sistemas erosivos de tipo glacial y periglacial. Con la llegada de las grandes épocas glaciales (inicio del Pleistoceno), se produjeron fenómenos erosivos que afectaron durante 1,8 millones de años de forma rítmica y alterna al sustrato rocoso de la zona (Börgel, 1983).

Producto del derretimiento y posterior retroceso de los glaciares, como es el caso del glaciar Comau (Figura 3.14), la morfología ha quedado expuesta pudiendo reconocer la acción de la erosión glacial y dejando a la vista circos glaciares, valles glaciares y tarn.

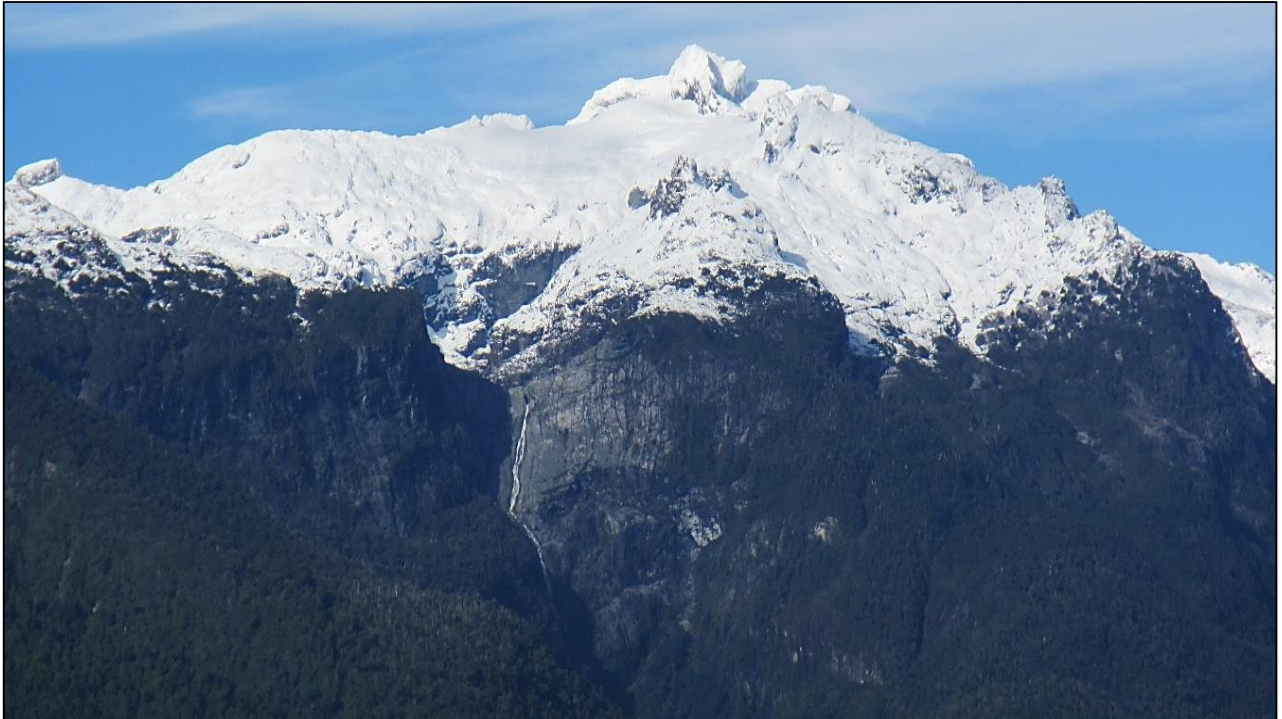


Figura 3.14. Ladera NE del Glaciar Comau.

En la actualidad, la zona presenta glaciares de montaña y glaciaretos (Figura 3.15), los que se ubican entre el cerro Tambar y cerro Ugalde; están asociadas a las zonas de mayor elevación y altas pendientes.



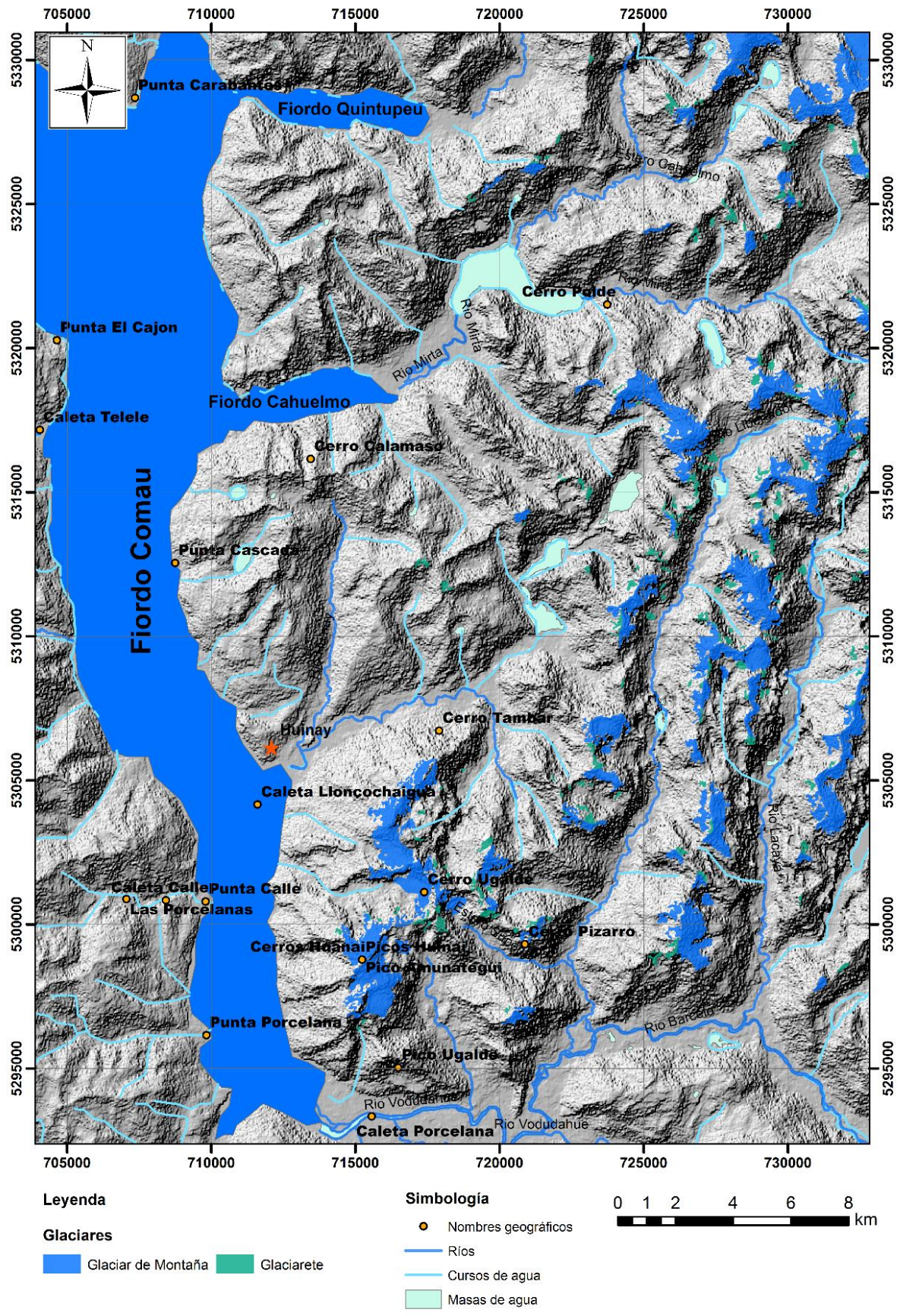


Figura 3.15. Glaciares y glaciaretes de la zona de estudio.



### 3.2.4 Complejos volcánicos

En la zona no hay presencia de volcanes, siendo el volcán más próximo el Huequi, que se ubica a 10 km al oeste del fiordo Comau. Más lejanos al área de estudio, 36 km al norte del fiordo (de su límite norte) se ubica el volcán Horonopirén y al suroeste a una distancia aproximada de 40 km y 45 km se ubican los volcanes Michimahuida y Chaitén, respectivamente.

Producto de los numerosos centros activos en la región, existen manifestaciones termales que se distribuyen en el borde litoral y zonas elevadas de los Andes. Entre las manifestaciones termales más conocidas se encuentran Cahuelmó, Porcelana Grande, Porcelana Chico y Comau. Cahuelmó se considera un manantial caliente, se ubica al noreste del fiordo homónimo y tiene temperaturas cercanas a los 60 °C. Las manifestaciones restantes se ubican en suroeste del fiordo Comau: Porcelana Chico presenta manantiales calientes y géiseres, con presencia de mineralización de aragonito, arcillas y óxidos de hierro y titanio con temperaturas de 80°C y se diferencia de Porcelana grande pues este último no presenta mineralización y tiene temperaturas no superiores a los 57°C considerándose esencialmente manantial caliente. Por su parte, Comaucorresponde a un afloramiento de aguas termales en zona intermareal, con temperaturas cercanas a los 75°C y muestra evidencia de una moderada alteración propilítica (Figura 3.16).

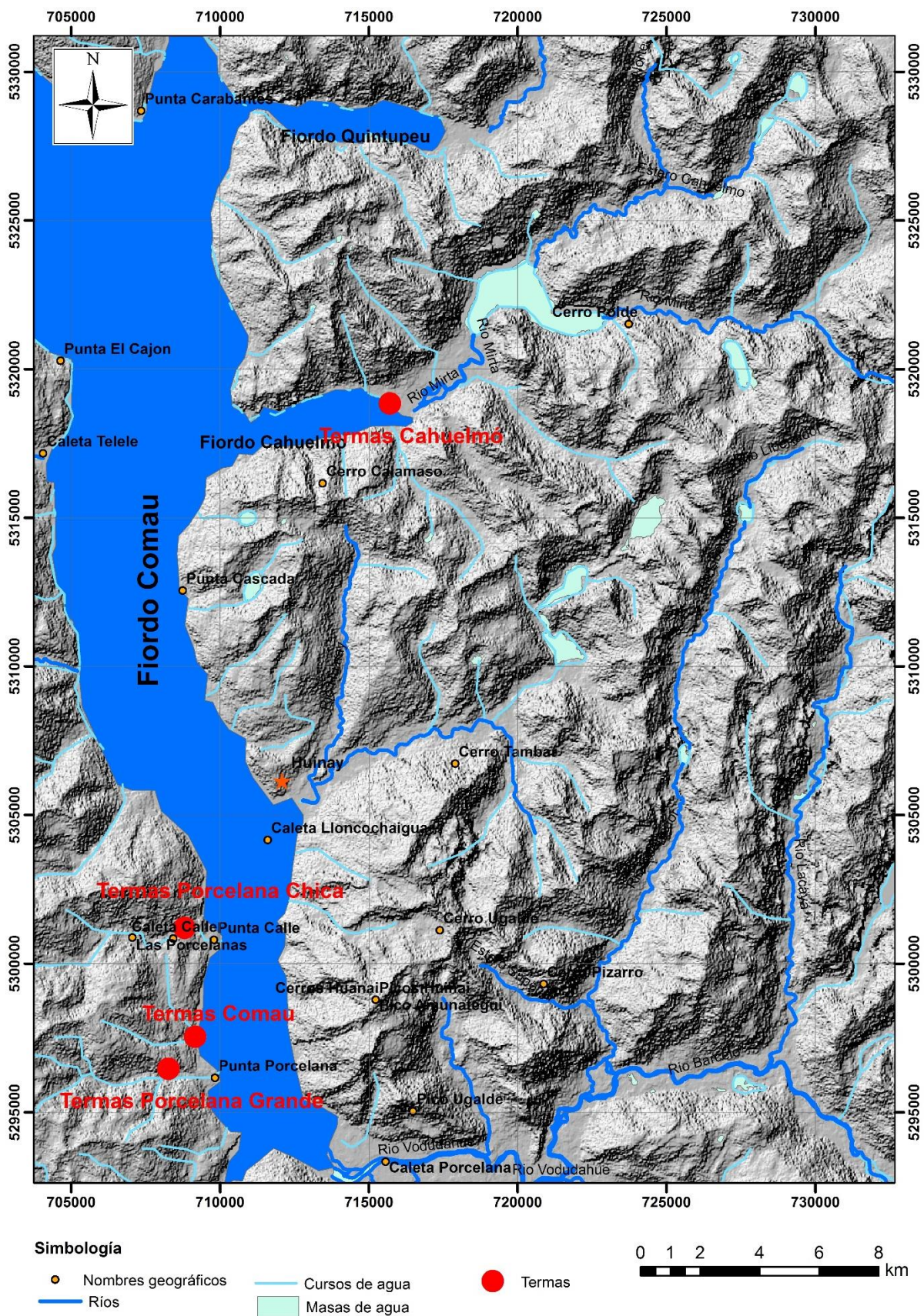


Figura 3.16. Mapa de ubicación de manifestaciones termales.

### 3.3 Geología regional

La geología regional de la zona de estudio fue obtenida del Mapa Geológico de Chile, publicación digital, N°4, SERNAGEOMIN (2003) y, principalmente, de Ordoñez y Crignola (2003), que presentan un mapa geológico con información más actualizada y de mayor detalle (Figura 3.17). También, se consideró el trabajo de Levi *et al.* (1966), que, a pesar de ser antigua, posee información relevante sobre la geología costera.



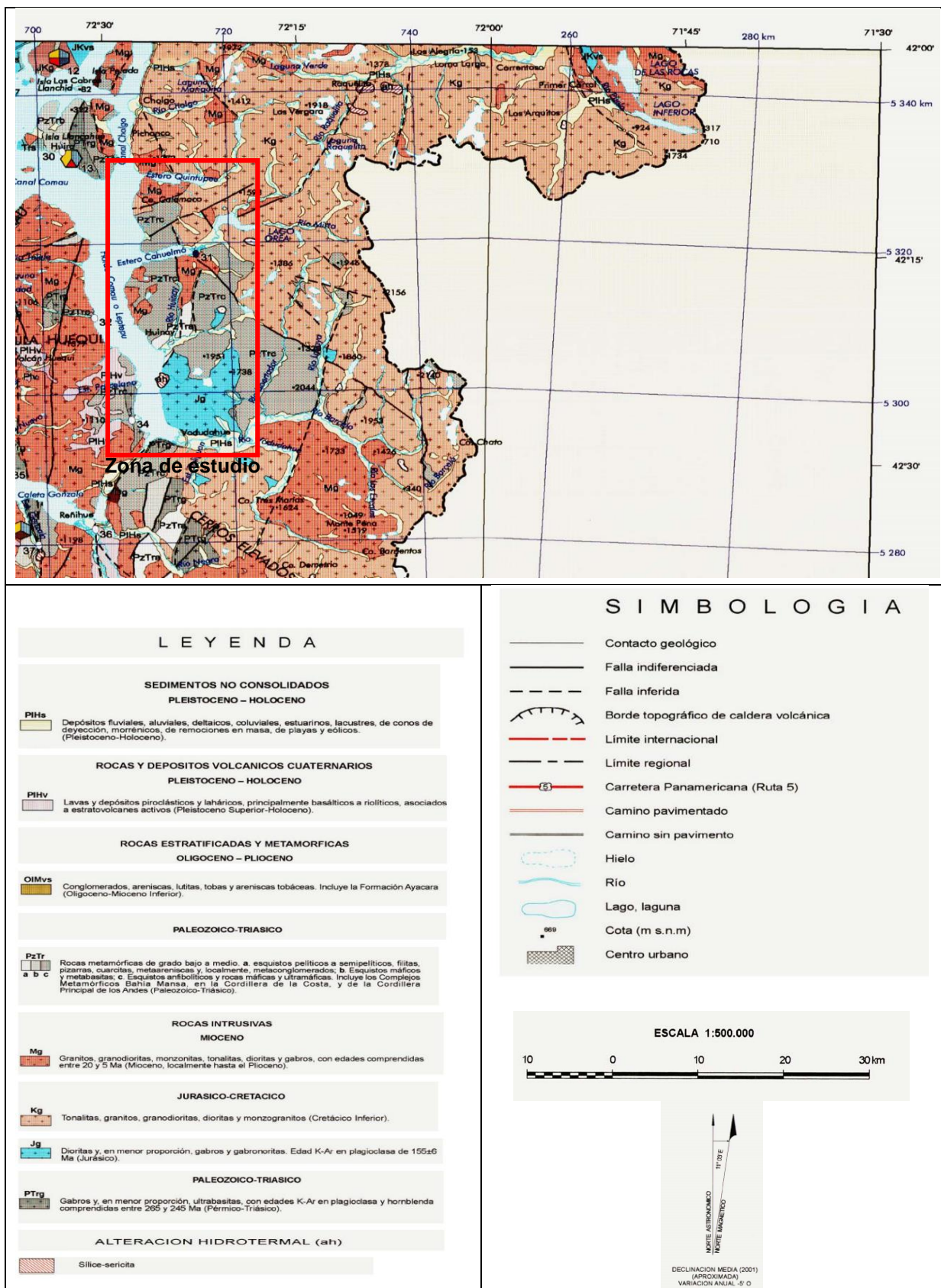


Figura 3.17. Mapa geológico de la zona de estudio (Ordoñez y Crignola, 2003).

### 3.3.1 Litologías

Las unidades geológicas que presentan una mayor área son cinco, correspondiendo, en gran medida, a rocas intrusivas, y en menor medida, a afloramientos de rocas extrusivas, metamórficas y sedimentarias. Las rocas intrusivas corresponden a granitos, granodioritas y tonalitas, y representan en su mayoría al Batolito Norpatagónico. Las rocas metamórficas corresponden a los esquistos y anfibolitas, y las rocas extrusivas y sedimentarias se presentan como secuencias volcánicas continentales y marinas, formadas por lavas y aglomerados, tobas, con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales (Levi *et al.*, 1966).

#### 3.3.1.1 Rocas sedimentarias, metamórficas y volcánicas

Estas rocas no poseen una continuidad areal. La asignación de la edad se realiza mediante métodos de datación K-Ar, y en otros casos, se obtiene una edad relativa basada en correlaciones litológicas y en consideraciones y comparaciones del grado de metamorfismo, estructuras y rasgos morfológicos.

##### 3.3.1.1.1 Paleozoico – Triásico (PzTr)

Corresponden a rocas metamórficas, metapelitas, metachert, metabasitas y, en menos proporción, gneises y rocas ultramáficas con protolitos de edades desde el Devónico al Triásico y metamorfismo del Pérmico al Jurásico (Levi *et al.*, 1966).

Al oeste del área de estudio, en la península de Huequi, los afloramientos están en contacto con rocas graníticas miocénicas (Mg). En tanto, en la zona costera oriental se ubican desde la ladera norte del fiordo Cahuelmó hasta Huinay donde son intruídas localmente por Mg. Al sur del río Huinay, las rocas metamórficas continúan en dirección SE hasta limitar con el río Vodudahue; son intruídas por rocas graníticas jurásicas (Jg) en el sector oeste, y limitan con rocas graníticas jurásicas (Kg) al oriente, mediante una falla indiferenciada.

Debido a las características litológicas y al grado de metamorfismo, las rocas metamórficas se pueden diferenciar en dos grupos. Uno comprende esquistos y anfibolitas de edad Precámbrico – Paleozoico Inferior, y el otro, asignado al Paleozoico, está constituido por pizarras, lutitas fisibles y cuarcitas.

#### Unidades gnéissicas mesozonales

PzTr se divide en dos unidades que se diferencian en que solo una de ellas presenta en sus bordes una progresiva variación hacia granitoides, originando xenolitos de varios tamaños (Complejo Fiordo Cahuelmó).

##### *Complejo Fiordo Cahuelmó.*

Complejo Metamórfico de origen plutónico. Aflora en ambas laderas del fiordo Cahuelmó, siendo intruído por Mg y Kg en el sector norte, y solo por Kg en el sector sur.

Este complejo está formado por anfibolitas masivas y gneises micáceos asociados a material plutónico feldespático. Lo anterior podría ser un indicador de que probablemente ocurrió anatexia en el curso del Paleozoico Inferior (Prian, 1990).

#### *Complejo Metamórfico Fiordo Comau-Huinay*

Definido por Cembrano (1990), presenta un grado metamórfico menor que el anterior y se diferencia de él por la ausencia de material plutónico.

Se ubica al sur de la localidad de Huinay y se extiende hasta el río Vodudahue. Está compuesto por micaesquistos, paragneises micáceos y metapelitas, y su origen es, esencialmente, sedimentario (Prian, 1990).

##### 3.3.1.1.2 Pleistoceno – Holoceno (PIHs)

Corresponden, principalmente, a depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa, y, en menor proporción, a depósitos fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados.

Los depósitos aluviales se ubican en las riberas de los ríos Quintupeu, Mirta, Huinay y Vodudahue, mientras que, los depósitos deltaicos, se encuentran cercanos a las desembocaduras de los ríos anteriormente nombrados.

También, existen numerosos depósitos de remociones en masa antiguas que desarrollaron playas en la ladera este del fiordo Comau, compuestas por bloques de tamaño que varía entre 30 cm hasta 5 m.

##### 3.3.1.1.3 Cuaternario (PiHv)

Secuencia de rocas volcánicas. Los estratovolcanes y complejos volcánicos están compuestos por lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesítico-basálticos a dacíticos. Su composición es principalmente calcoalcalina, y también adakítica al sur de los 47°S.

Estos depósitos se ubican en la ladera poniente del fiordo Comau, cercano a Caleta Porcelana. Las secuencias volcánicas son atribuibles a la actividad volcánica desarrollada por los centros eruptivos cercanos: Huequi, Michimahuida, Chaitén y Hornopirén.

Esta unidad cuaternaria se depositó sobre rocas metamórficas (PzTr) y rocas graníticas (Mg). Se le atribuye una edad Pleistoceno-Holoceno.

#### *3.3.1.2 Rocas intrusivas*

##### 3.3.1.2.1 Pérmico – Triásico (PTrg; 265 -245 Ma)

Corresponde a gabros y, en menor proporción, ultrabasitas datadas con K-Ar en plagioclasas y hornblenda (Ordoñez y Crignola, 2003). Se ubica en la zona más austral del fiordo Comau, intruyendo una pequeña porción de rocas metamórficas PzTr.

#### 3.3.1.2.2 Jurásico Inferior (Jg; 202 – 178 Ma)

Corresponde a dioritas, gabros y monzodioritas de piroxeno, dioritas cuarcíferas y granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita. Dataciones en plagioclasas entregan una edad de  $155 \pm 6$  Ma (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995). Se ubica en la ladera este del fiordo Comau, entre el río Huinay y Vodudahue, y al este intuye al Complejo Metamórfico Fiordo Comau – Huinay.

#### 3.3.1.2.3 Cretácico Inferior (Kg; 144 – 90 Ma)

Unidad conformada por granitos, granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita. Aflora en la Cordillera Principal, a lo largo de las regiones Biobío y Aysén, correspondiendo al Batolito Norpatagónico, pues el BNP va desde el Golfo de Penas hacia norte y está conformado por numerosos complejos plutónicos calcoalcalinos, los cuales se emplazaron durante el Jurásico tardío al Mioceno de manera episódica.

Las edades del BNP predominantes varían según su ubicación. Se encontraron edades del Jurásico tardío al Cretácico medio en los márgenes del batolito, mientras que hacia el centro dominan edades miocenas tempranas a pliocenas, pudiendo asociarse su actividad a la subducción de un margen continental (Weaver *et al.*, 1990; Parada *et al.*, 1987; Hervé, 1984; Munizaga *et al.*, 1988). Por lo tanto, la unidad Kg es uno de los complejos plutónicos distales del BNP, correspondiente a su edad Cretácico Inferior.

#### 3.3.1.2.4 Mioceno (Mg ;18 – Ma)

Unidad compuesta por granodioritas, dioritas y tonalitas. (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995), y corresponde a la zona más central del BNP.

Esta unidad aflora en ambas laderas del fiordo Comau. En la ladera occidental ocupa casi la totalidad de la península Huequi, mientras que, en la oriental, se ubica al sureste del fiordo Cahuelmó limitado entre fallas indiferenciadas, además de algunas intrusiones menores en las rocas metamórficas comprendidas entre el fiordo Cahuelmó y Huinay.

### 3.3.2 Fallas y estructuras

Chile presenta un encuentro entre las placas sudamericanas, Nazca y Antártica, donde las dos últimas están subductadas bajo la placa Sudamericana. En este contexto, está la Cordillera de los Andes, estructura de más de 7.500 km de largo del límite occidental del continente sudamericano (Stern, 2004). Las diferentes zonas de Chile presentan un magmatismo característico debido a las condiciones en las que se genera el magma, principalmente, el régimen de stress. Según estos criterios Stern (2004), definió como: Zona Volcánica Norte (ZVN: 2°N-5°S), Zona Volcánica Central (ZVC: 14°-28°S), Zona Volcánica Sur (ZVS: 33°-46°S) y Zona Volcánica Austral (ZVA: 49°-55°S).

La zona de estudio, está ubicada en los 42°S, pertenece a la zona volcánica sur (SVZ), que se extiende desde 33°S a 46°S y su configuración tectónica se caracteriza por un arco volcánico de más de 1.400 km de longitud con una convergencia oblicua,

ligeramente dextral, entre las placas Nazca y Sudamericana a una tasa de 7-9 cm/año que ha prevalecido durante los últimos 20 Ma (Somoza, 1998; Angermann *et al.*, 1999).

Al sur de los 38°S, incluyendo la zona de estudio, volcanes recientes se han formado directamente sobre rocas plutónicas meso-cenozoicas del Batolito Patagónico, y se ha calculado una tasa de exhumación regional cenozoica de más de 1 mm/año (mientras que al norte de los 38°S es de menos de 0,1 mm/año). Además, el espesor cortical bajo el arco volcánico desciende hacia el sur, de 50 km a los 33°S a 35 km a los 46°S, acompañado por una disminución en la altitud promedio de la cordillera principal, de 5.000 m a 2.000 m (Tassara y Yáñez, 2003).

En la región, entre los 38° y 47°S, el sistema de falla principal de intra-arco que domina, es la zona de falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO) (Cembrano *et al.*, 1996; Rosenau *et al.*, 2006). Zonas de cizalle, dúctil a frágil, documentan que la ZFLO ha estado activa como una estructura transpresional dextral al menos durante los últimos 6 Ma, mientras que evidencia geológica sugiere que la ZFLO fue, probablemente, una falla transformante durante 25 Ma (Hervé *et al.*, 1994). La componente de acortamiento de deformación intra-arco del Plioceno a la actualidad, aumenta hacia el sur, a medida que la ZFLO se acerca al punto triple de placas, cerca de los 46°S (Cembrano *et al.*, 2002; Thomson, 2002; Rosenau *et al.*, 2006).

Al este de la ZFLO no se desarrolla una faja plegada y corrida de antepaís significativa, donde solo se describe evidencia limitada pre-Cuaternario de deformación transpresional dextral (Diraison *et al.*, 1998).

Es importante señalar que existe una relación directa entre el régimen tectónico y el volcanismo de la región. Esto queda demostrado por las características de los productos volcánicos asociados a ciertas etapas geológicas. El último gran cambio geológico fue el paso de régimen tectónico extensivo a compresivo, dominado por un cambio en las características de convergencia de placas, que habría causado una evolución en el magmatismo (Mpodozis y Ramos, 1989).

Según Stern *et al.* (2007), la ZVS se subdivide en Zona Norte (ZVSN), Zona Transicional (ZVST) y Zona Sur (ZVSS) (Figura 3.18).





### **3.4 Geología local**

Cabe señalar que realizar un mapeo de detalle de la zona de estudio escapa del objetivo de esta memoria, aun así, en el trabajo de terreno se realizó un mapeo de las unidades, se logró rectificar y mejorar contactos, subdividir y agregar información sobre los depósitos cuaternarios, como también aportar con lineamientos estructurales.

La Figura 3.19 muestra el mapa geológico de la zona de estudio y la Figura 3.20 su correspondiente leyenda y simbología.



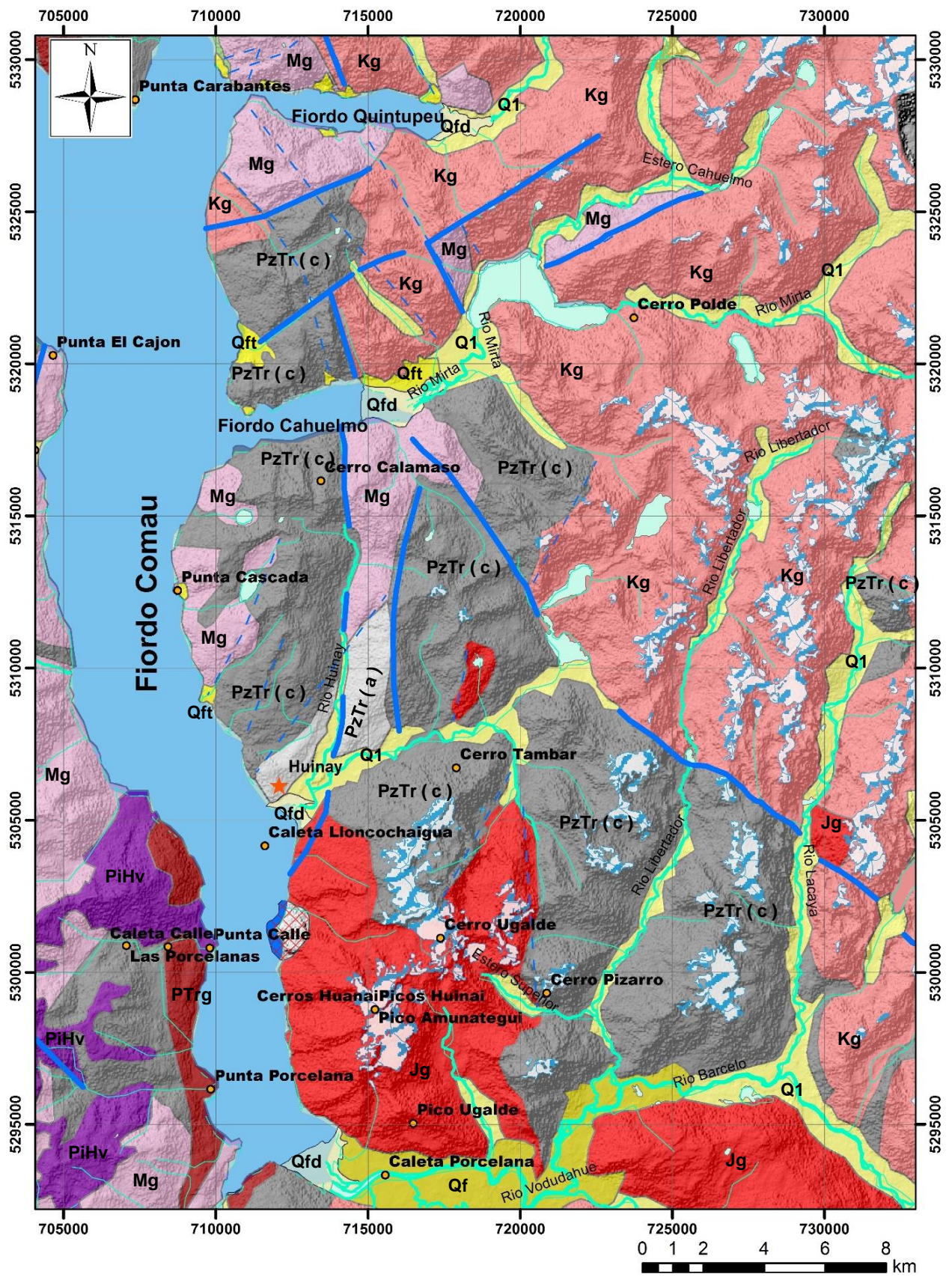


Figura 3.19. Mapa geológico de la zona de estudio.

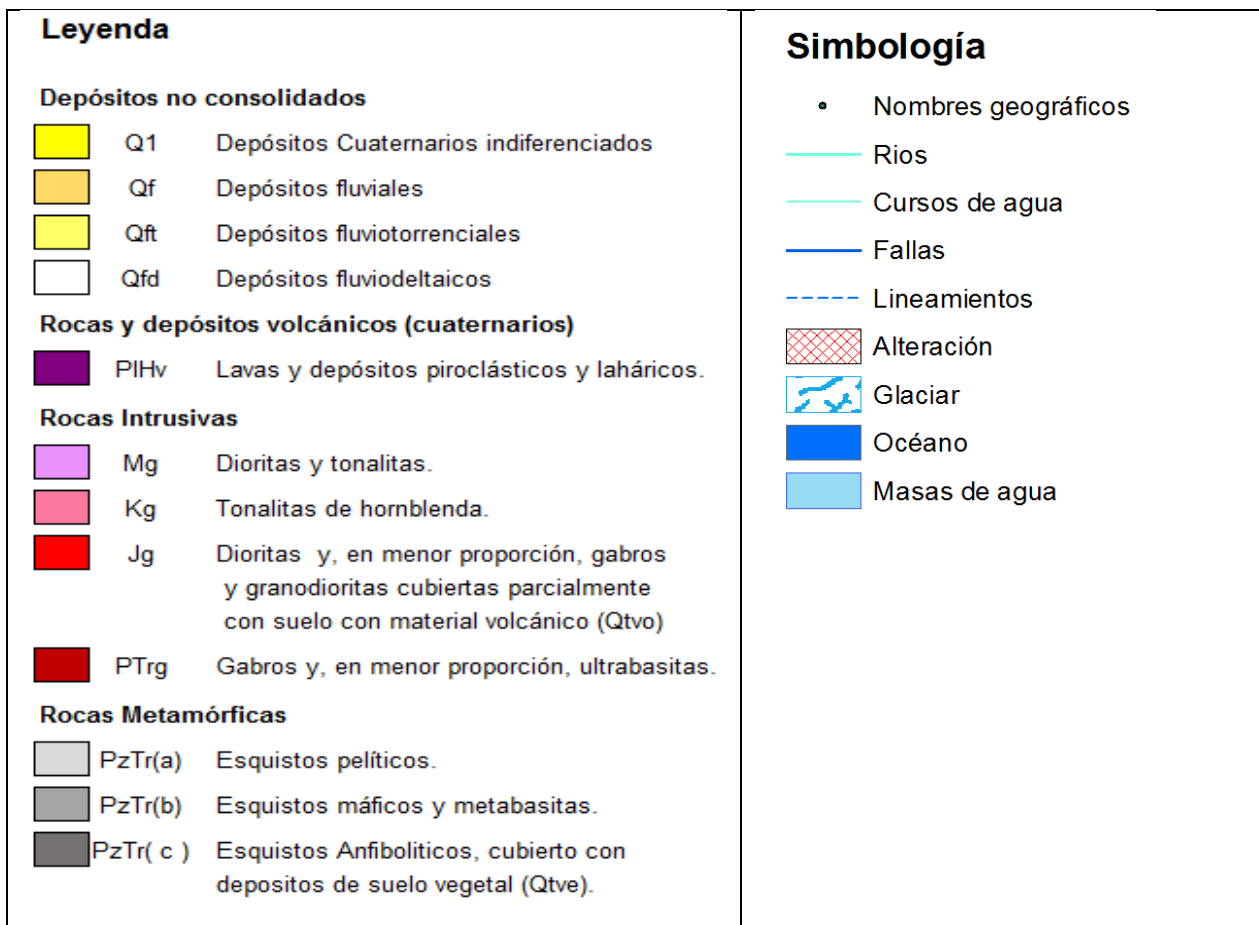


Figura 3.20. Simbología de mapa geológico de la zona de estudio.

### 3.4.1 Litologías

#### 3.4.1.1 Rocas metamórficas

##### 3.4.1.1.1 Esquistos anfibolíticos (PzTr4c)

Las rocas metamórficas se disponen con orientación NS y manto subhorizontal. Presentan foliaciones de espesores centimétrico (Figura 3.21), distinguibles a simple vista con intercalaciones de zonas félsicas con zonas máficas. También presenta zonas con plegamiento.





Figura 3.21. Ladera sur del fiordo Cahuelmó. Afloramiento de rocas metamórficas.

Dentro de la roca, los minerales tienen una fábrica planar. Presenta cristales de cuarzo y anfíbolos, equigranulares de tamaño no superior a un milímetro, en una proporción de 70% de anfíbolos y 30% de cuarzo, con textura granonematoblástica (Figura 3.22).



Figura 3.22. Muestra de mano de roca metamórfica.

La roca presenta una esquistosidad de grano fino, por lo tanto, corresponde a un esquistito anfibolítico, por lo que se puede correlacionar a la formación PzTr4(c) definida en marco geológico regional, pues presentan características mineralógicas y relaciones de contacto similares.

### 3.4.1.2 Rocas ígneas

#### 3.4.1.2.1 Dioritas (Jg)

Roca intrusiva de composición básica e índice de color melanocrática. Las rocas están formadas completamente por cristales (textura holocristalina), y el tamaño del grano de los minerales presentes es en general, de grano medio (Figura 3.23).

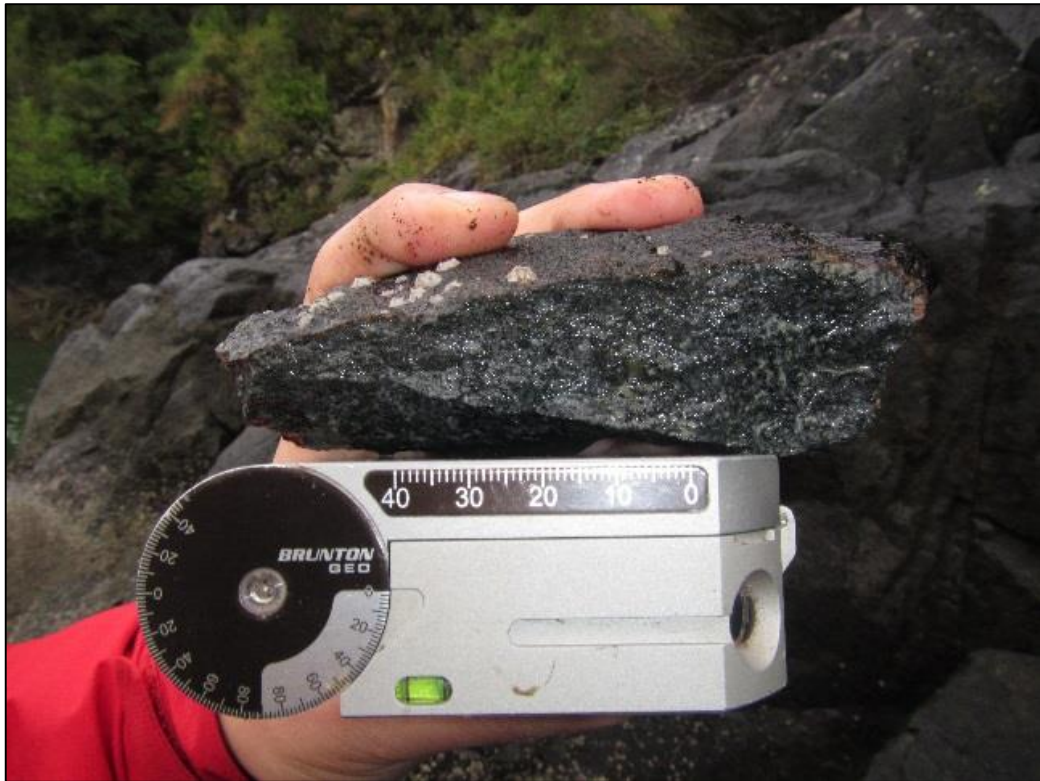


Figura 3.23. Muestra de mano de diorita con brújula como escala.

Los minerales se disponen homogéneamente y de manera isótropa, poseen tamaños relativos similares, por lo que se considera una roca equigranular. La mineralogía de la roca consiste de plagioclasa, y feldespato potásico y cuarzo subordinados (30% de la roca).

Los minerales máficos presentes en la roca corresponden a anfíbolos y biotitas con un porcentaje cercano al 70% del total de la roca. Por otra parte, se reconocieron minerales opacos (pirita) de manera aislada, con concentraciones estimadas inferiores al 1%.

Como se ha indicado anteriormente, y de acuerdo a las características mineralógicas, las dioritas descritas corresponderían a la unidad geológica Jg, definida en el Mapa



Metalogénico del SERNAGEOMIN (Ordoñez y Crignola, 2003) como: “Dioritas y en menor proporción, gabros y gabronoritas. Edad K-Ar en plagioclasa de  $155\pm 6$  Ma (Jurásico)”.

#### 3.4.1.2.2 Tonalitas (Kg)

Estas rocas están compuestas completamente por cristales (holocristalina), con una textura fanerítica y equigranular. Los cristales son generalmente de tamaño de grano grueso y mayoritariamente subhedrales. La relación entre minerales félsicos y máficos es de aproximadamente 60% félsicos y 40% máficos. respecto a su color se trata de rocas mesocráticas. Los minerales máficos corresponden a biotita y hornblenda, mientras que los minerales félsicos corresponden a plagioclasa, cuarzo, y en menor medida feldespato potásico (Figura 3.24).



Figura 3.24. Muestra de mano de metatonalita.

De acuerdo a la descripción de la roca, esta corresponde a una tonalita de hornblenda, pero debido a los procesos de metamorfismo de bajo grado, posiblemente metamorfismo de contacto, es correctamente llamada metatonalita.

Cabe señalar que este afloramiento posee variaciones composicionales, las que fueron observadas en la etapa de terreno, pero debido a las complicaciones propias del lugar, como la gran vegetación y la inaccesibilidad al interior de la zona de estudio, no se logró un mayor detalle. Aun así, es posible correlacionar esta unidad con el marco geológico regional, determinando que corresponde a la unidad Kg, que está constituida por tonalitas, granitos, granodioritas, dioritas y monzogranito.

Las rocas intrusivas han sido afectadas por procesos de metamorfismo de bajo grado, presentando una fuerte anisotropía del tipo planar, es decir, la orientación de los cristales está elongada en su eje mayor (Figura 3.25).



Figura 3.25. Ladera este del fiordo Comau. Afloramiento de metatonalita.

#### 3.4.1.2.3 Dioritas y tonalitas (Mg)

Esta unidad está constituida por rocas ígneas intrusivas de composición intermedia con un índice de color melanocrático (dioritas) a mesocrático (tonalitas). Ambas rocas están compuestas, en más del 90%, por cristales (holocristalina) que tienen un tamaño de grano medio (2-5 mm) mientras que el tamaño relativo de los cristales indica que tienen una textura equigranular.

Esta unidad se diferencia de la unidad anterior en que los cristales se presentan en una estructura homogénea y fábrica isótropa, es decir, no tienen una orientación preferencial.

Las dioritas están compuestas por aproximadamente un 70% de minerales máficos (anfíbola y biotita) y un 30% de minerales félsicos (plagioclasa y cuarzo), con cristales subhedrales. También se observó la presencia del mineral opaco piritita en vetillas en concentraciones traza, y en menor medida diseminado, de tamaño submilimétrico (Figura 3.26).





Figura 3.26. Muestra de mano de diorita.

En tanto, las tonalitas poseen aproximadamente un 60% de minerales félsicos (feldespatos y cuarzo) y un 40% de minerales máficos (biotita), siendo los cristales en su mayoría subhedrales (Figura 3.27). Además, la tonalita presenta enclaves máficos redondeados de tamaño variable entre 5- 15 cm (Figura 3.28), los que presentaron mayor erosión respecto al resto de la roca (Figura 3.29).



Figura 3.27. Muestra de mano de tonalita.





Figura 3.28. Ladera este del fiordo Comau. Afloramiento de tonalita con enclaves máficos.



Figura 3.29. Ladera este del fiordo Comau. Afloramiento de tonalita con enclaves máficos de distinto tamaño y forma.

### 3.4.1.3 Depósitos no-consolidados

#### 3.4.1.3.1 Depósitos fluviodeltaicos

Estos depósitos se ubican fundamentalmente en la desembocadura de los ríos Quintupeu (Figura 3.30), Mirta (Figura 3.31), Huinay (Figura 3.32) y Vodudahue (Figura 3.33). Se trata de arenas y limos con algunos clastos de gravas redondeados. Corresponden a suelos modernos no consolidados, con un espesor inferido de decenas de metros.

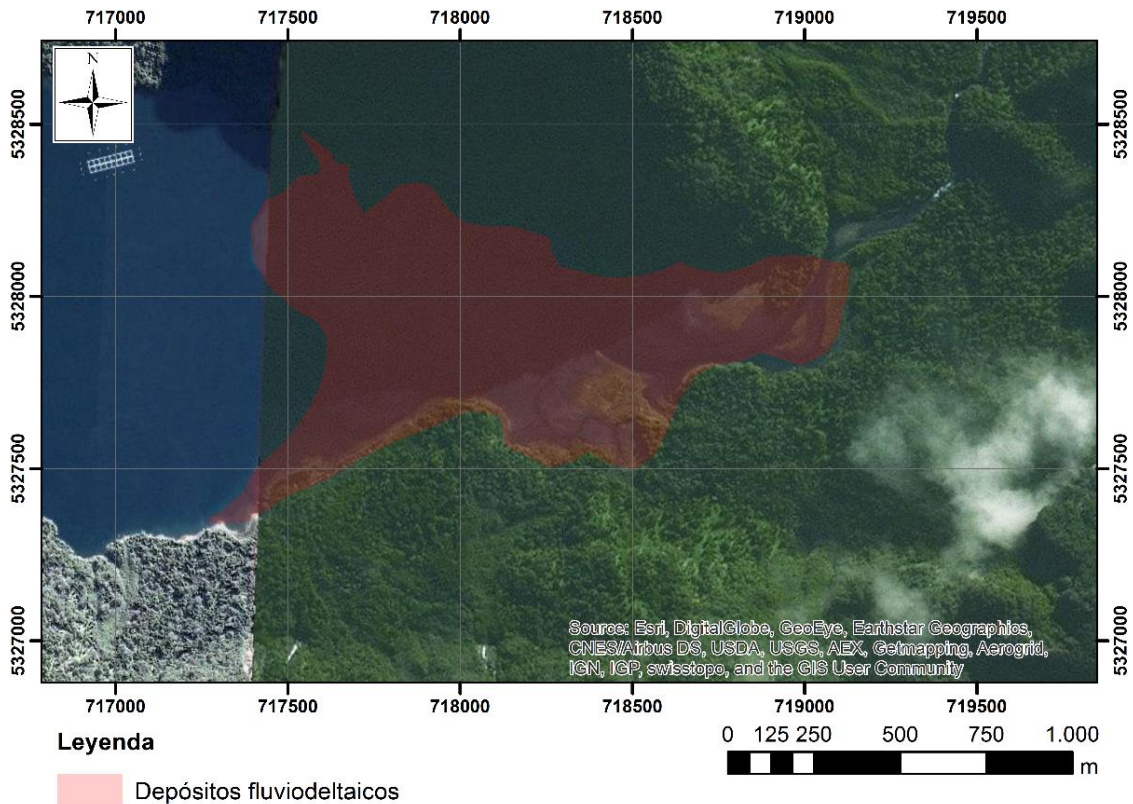


Figura 3.30. Depósito fluviodeltaico río Quintupeu.



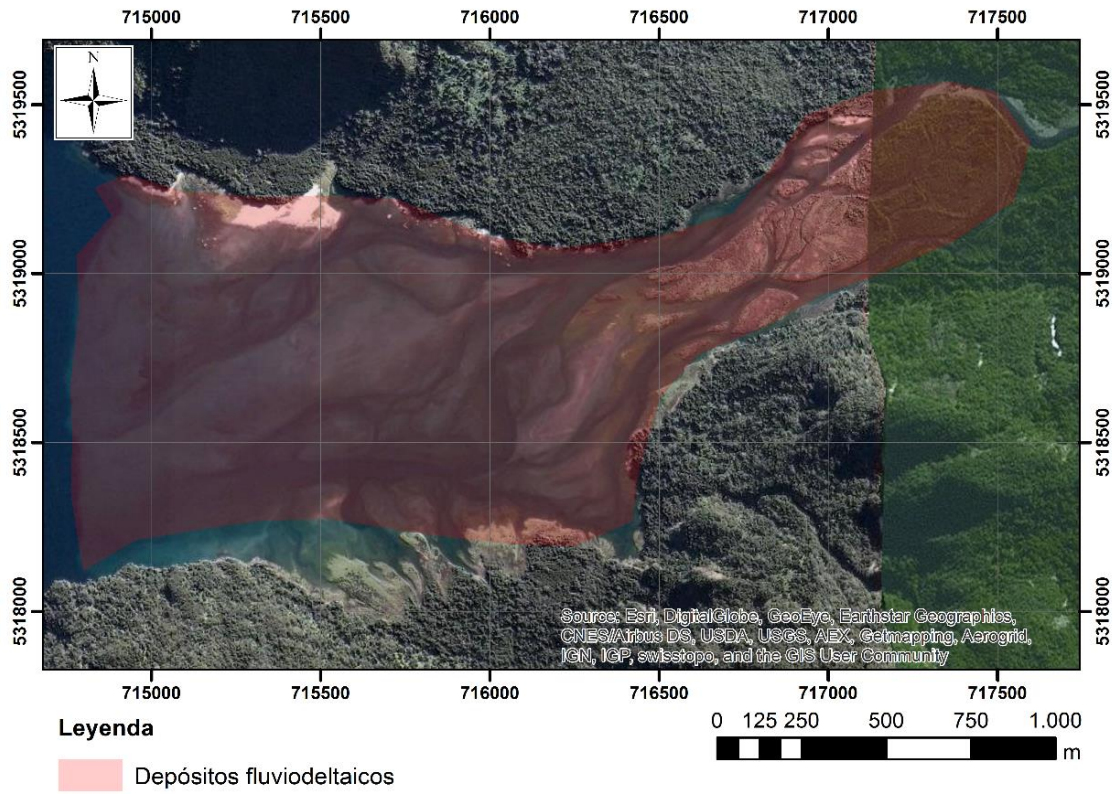


Figura 3.31. Depósito fluviodeltaico río Mirta.

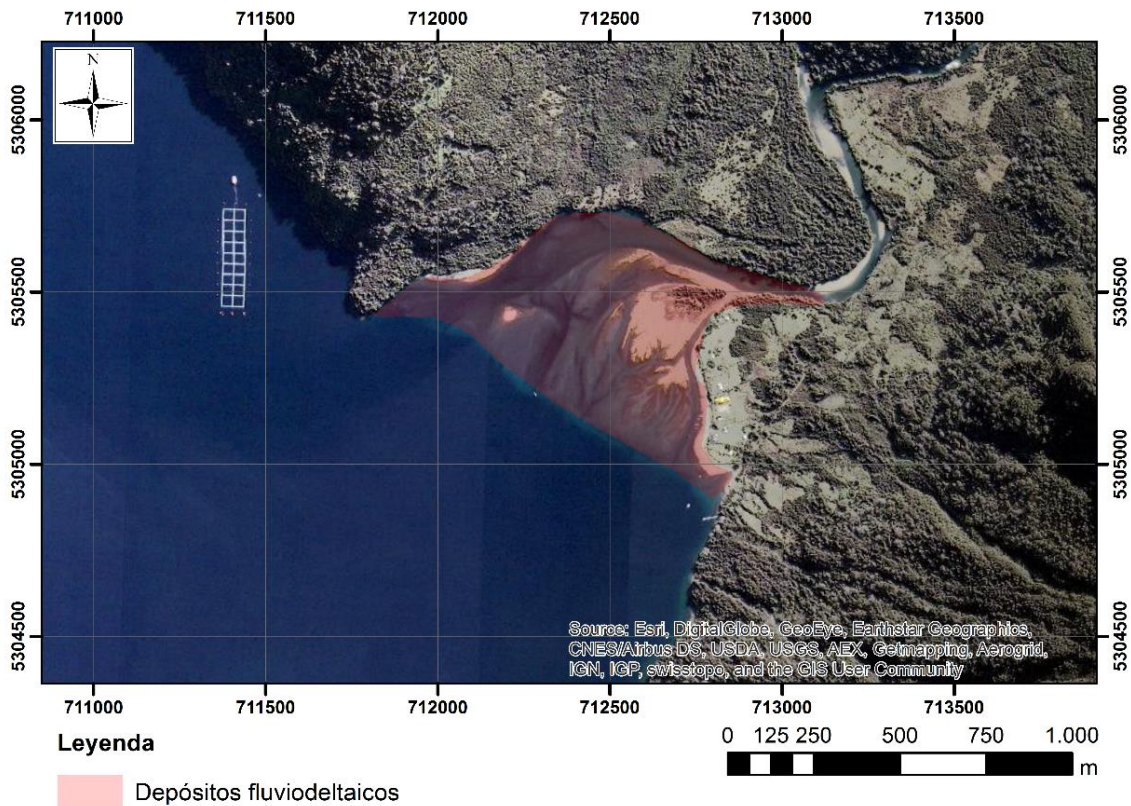


Figura 3.32. Depósito fluviodeltaico río Huinay.

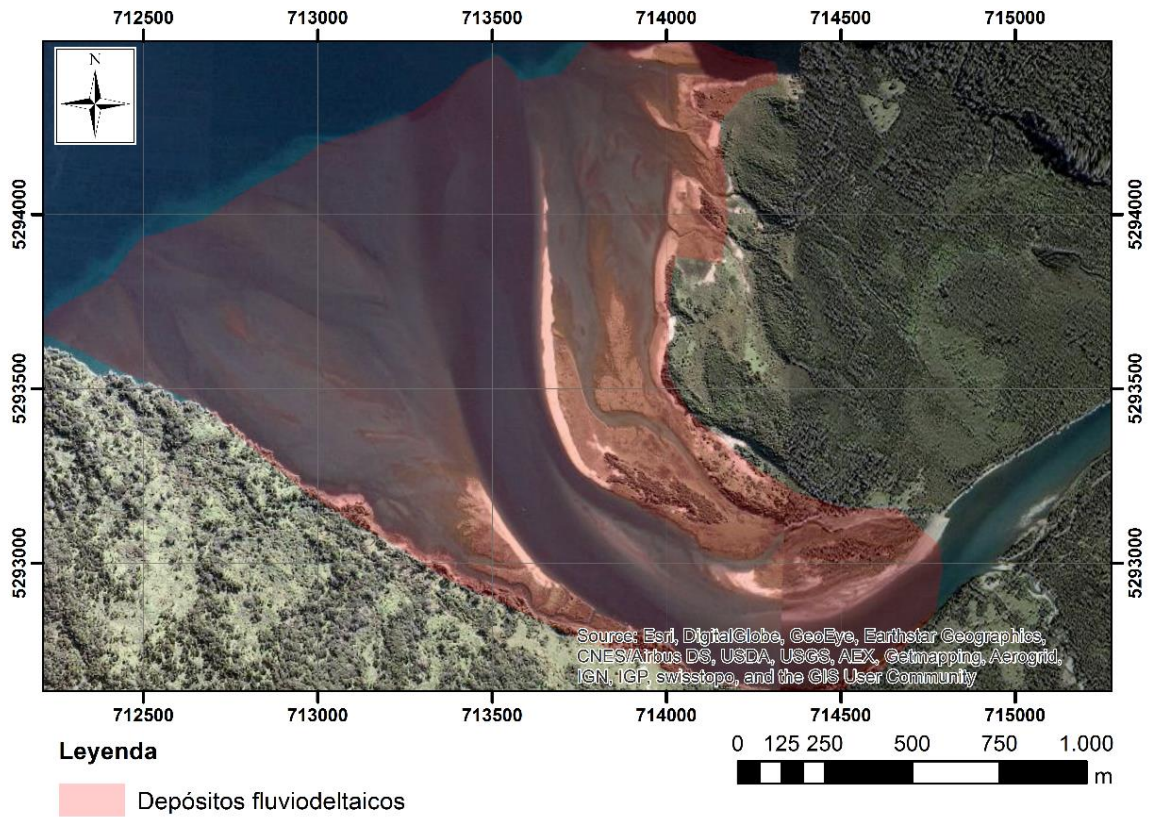


Figura 3.33. Depósito fluviodeltaico río Vodudahue.

### 3.4.1.3.2 Depósitos fluvio-torrenciales

Estos depósitos corresponden a materiales no consolidados compuestos por clastos de composición diorítica con una distribución de tamaños variable entre gravas y bloques (Figura 3.34).





Figura 3.34. Ladera este del fiordo Comau. Depósitos fluviotorrenciales.

Se encuentran depositados en los pies de laderas (Figura 3.35), su morfología es similar a la de un abanico (Figura 3.36) y forman pequeñas playas (Figura 3.37). Destacan por presentar zonas de pendiente que puede variar entre  $15^{\circ}$  y  $30^{\circ}$ , además de presentar una vegetación distintiva respecto al resto de la zona de estudio: es de color verde claro y de menor altura (Figura 3.38). Estos clastos fueron trasladados por acción de la gravedad o por los cursos de agua que se producen en quebradas.



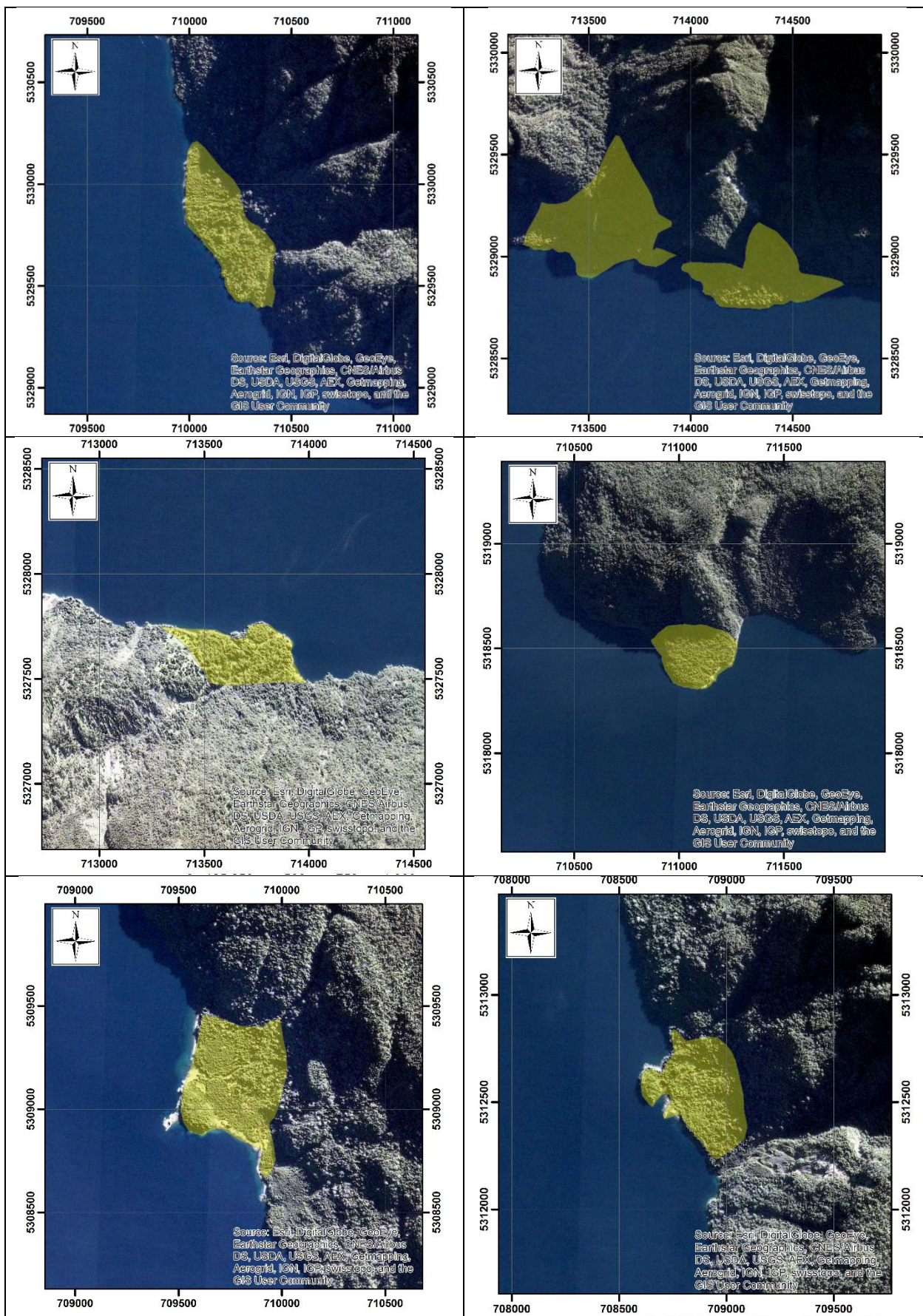


Figura 3.35. Depósitos fluviotorrenciales.





Figura 3.36. Ladera este del fiordo Comau. Depósitos fluviotorrenciales en zona de menor pendiente.



Figura 3.37. Ladera este del fiordo Comau. Playa compuesta por depósitos fluviotorrenciales.





Figura 3.38. Ladera este del fiordo Comau. Playa de depósitos fluvio-torrenciales compuesta por bloques angulosos de distintos tamaños.

### **3.4.2 Unidades de suelo**

#### *3.4.2.1 Depósitos de suelo vegetal (Qtve; Cuaternario)*

La cubierta que posee el sustrato rocoso entre el sector fiordo Comau y Huinay, corresponde a suelo vegetal, compuesto principalmente por materia orgánica (Figura 3.39). Este suelo corresponde a limos y arcillas plásticas de color marrón oscuro, las que se mezclarían con raíces de la vegetación presente con un espesor estimado de hasta 2 m (Figura 3.40).





Figura 3.39. Ladera este del fiordo Comau. Depósitos de suelo vegetal.



Figura 3.40. Espesor de suelo vegetal. Raíces intercrecidas con presencia de hojas.



### 3.4.2.2 Depósitos de suelo con material volcánico (Qtvo; Cuaternario)

Sobre las rocas que conforman el sustrato rocoso entre el sector de Huinay y el río Vodudahue, existe un depósito de origen volcánico de grano fino y fragmentos de pómez de diámetro centimétrico y aspecto blanquecino, de baja densidad y elevada porosidad (Figura 3.41). Estos materiales se encuentran mezclados con abundante materia orgánica de origen vegetal. El espesor observado en terreno de estos depósitos oscila entre 0,5 y 1,5 m (Figura 3.42).

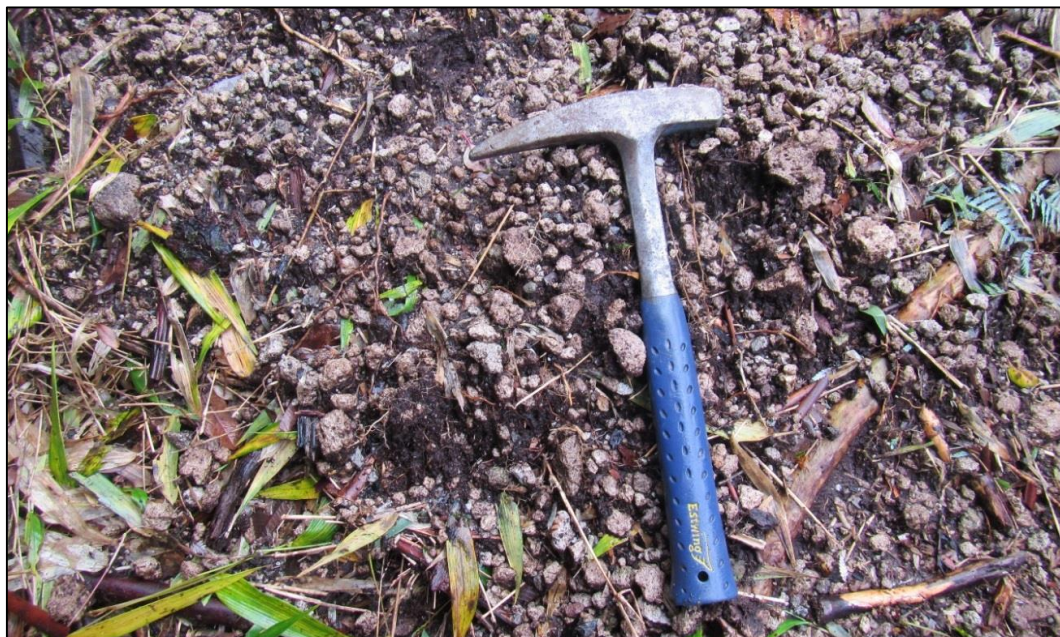


Figura 3.41. Ladera este del fiordo Comau. Depósitos de suelo con material volcánico.



Figura 3.42. Espesor de depósitos de suelo volcánico.

### 3.4.3 Fallas y estructuras

Basado en la fotointerpretación que se realizó mediante los *softwares Google Earth, ArcGIS Earth*, y el modelo de elevación digital proveniente de la imagen ASTER-GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – Global Digital Elevation*), desarrollada por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria del Gobierno de Japón y de La Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) del Gobierno de Estados Unidos, se obtuvieron lineamientos de la zona de estudio.

Los datos, tanto de las fallas provenientes de la literatura como los lineamientos fotointerpretados, fueron ingresados al *software Dips*, para poder reconocer predominancia de algún dominio estructural.

El diagrama de concentración de polos asociados a fallas se presenta en la Figura 3.43, en el que se indican dos concentraciones principales.

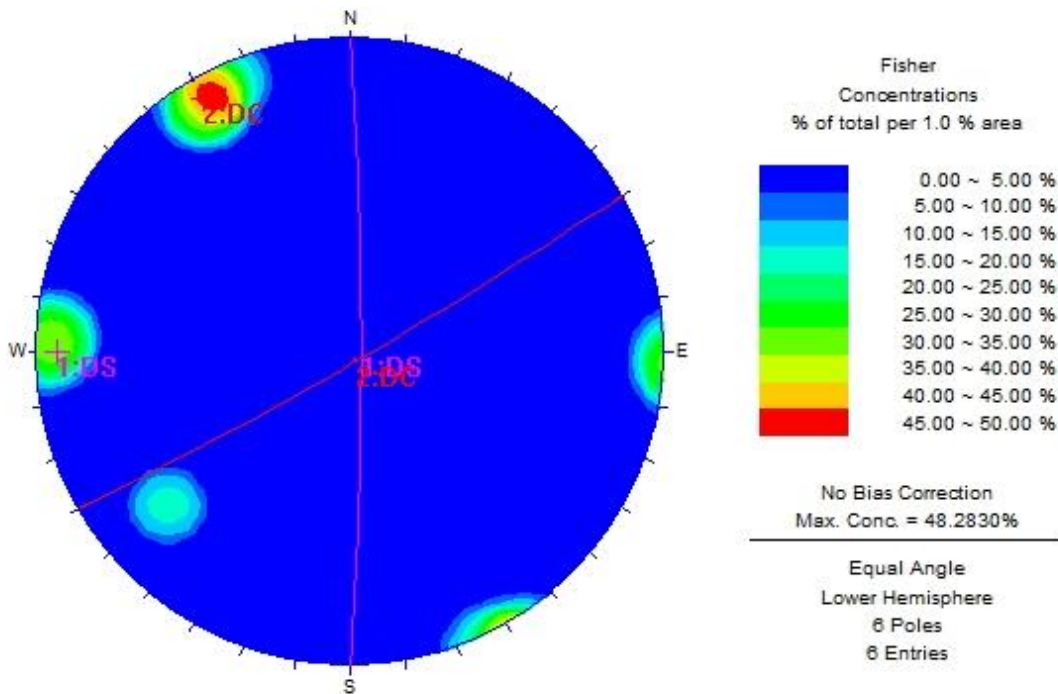


Figura 3.43. Diagrama de polos asociados a fallas, obtenidos del *software Dips*.

También se realizó un diagrama de rosetas, el que indicó que existían dos orientaciones predominantes en las fallas (Figura 3.44).



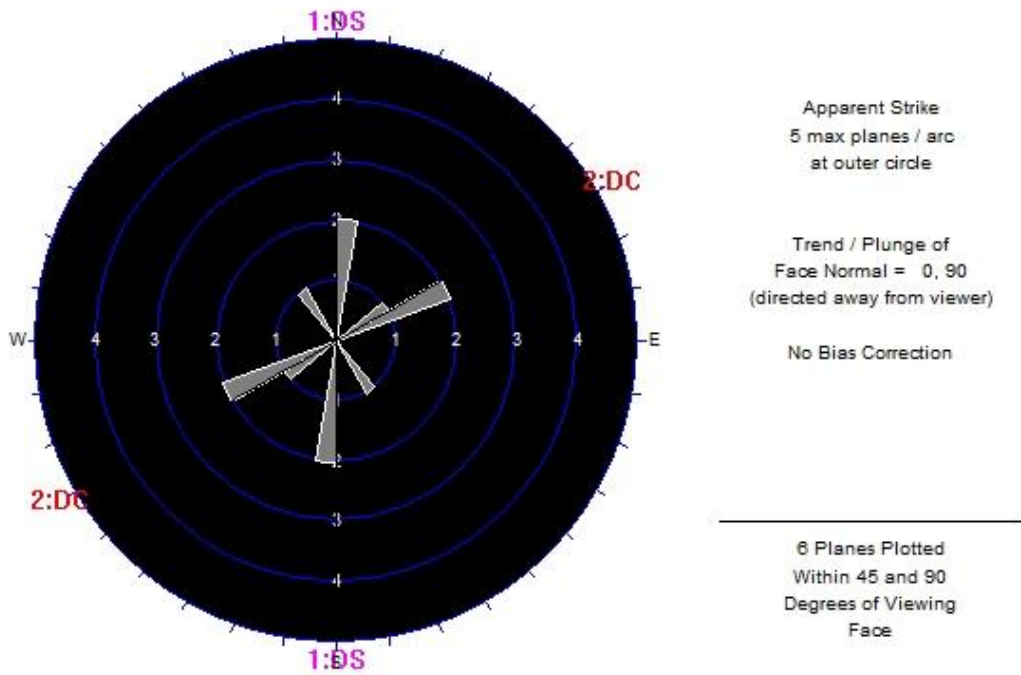


Figura 3.44. Diagrama de rosetas asociado a fallas, obtenido del *software Dips*.

Los polos y planos asociados a las dos orientaciones predominantes se indican en la Figura 3.45.

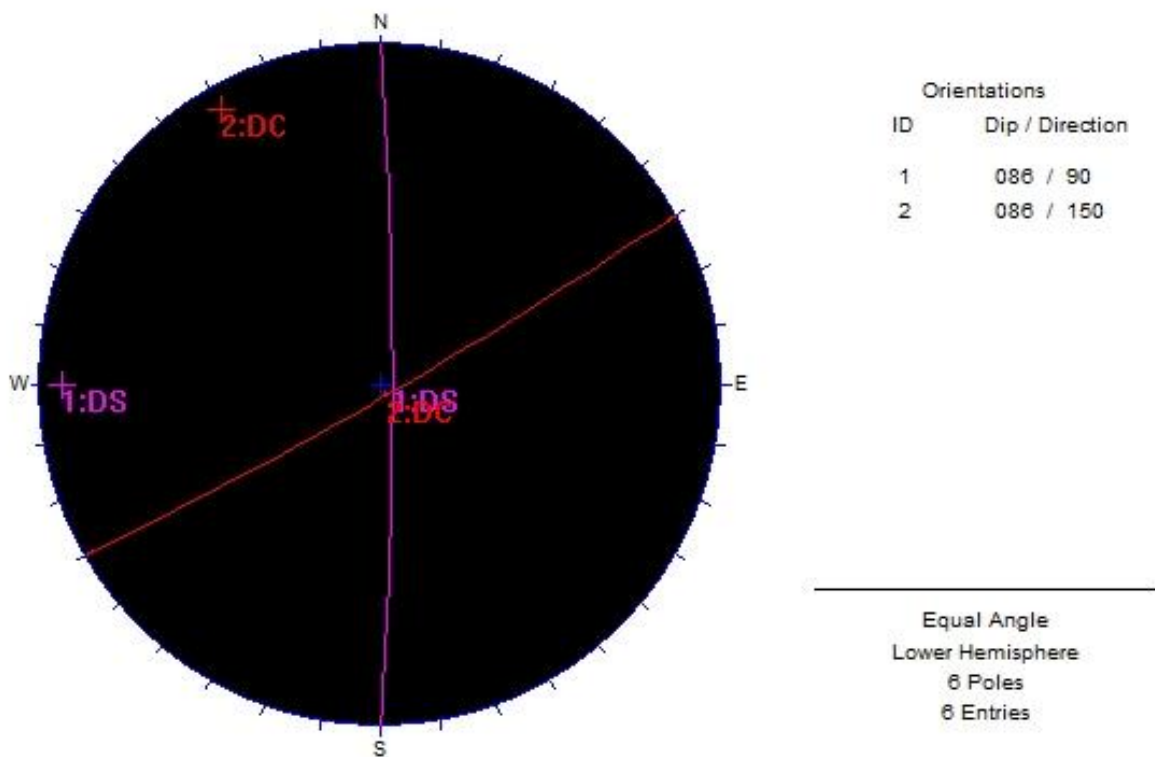


Figura 3.45. Polos y planos asociados a fallas, obtenidos del *software Dips*.

Respecto a los lineamientos, se obtuvo un diagrama de concentración de polos, donde se observaron tres concentraciones principales, las que se muestran en la Figura 3.46.

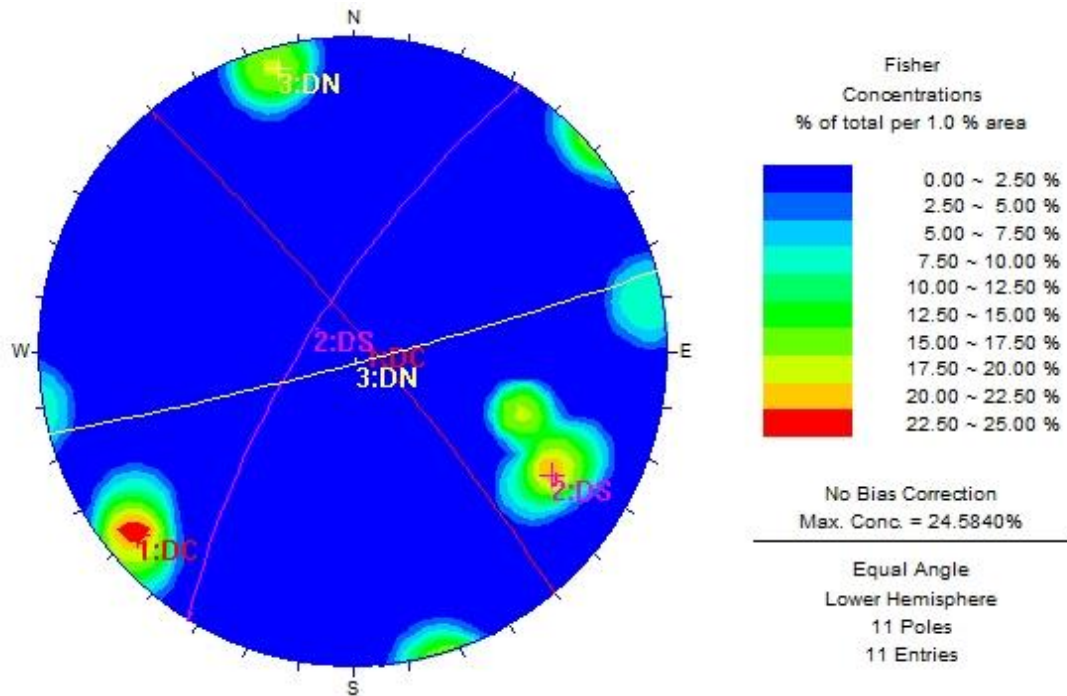


Figura 3.46. Diagrama de concentración de polos asociado a lineamientos, obtenido del *software Dips*.

También se generó el diagrama de rosetas (Figura 3.47), el que permitió reconocer las orientaciones de las concentraciones de los polos. Se reconocieron tres dominios estructurales asociado a los lineamientos.

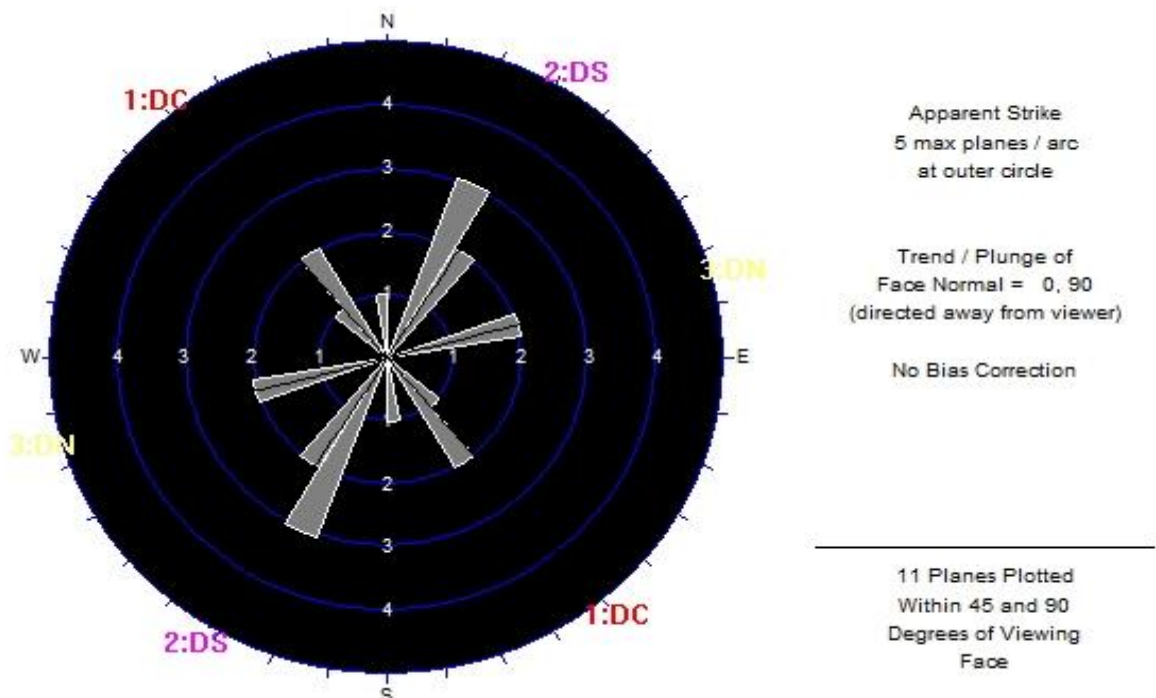


Figura 3.47. Roseta de los lineamientos, obtenida del *software Dips*.

Las orientaciones de los dominios estructurales asociados a lineamientos se obtuvieron del diagrama de polos y planos (Figura 3.48).

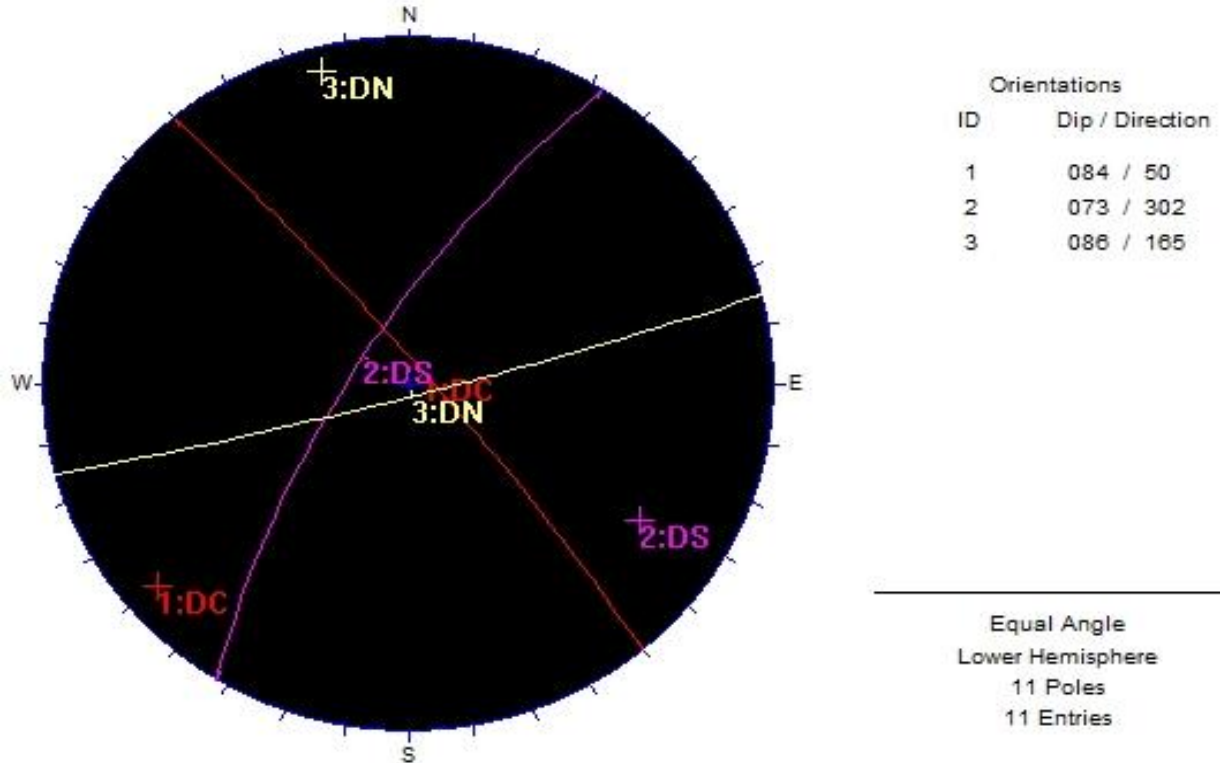


Figura 3.48. Polos y planos de los dominios estructurales asociados a lineamientos, obtenido del *software Dips*.

Basado en los diagramas de polos, rosetas y orientaciones, fue posible identificar tres dominios estructurales: el primero se ubica al norte del fiordo Quintupeu (Dominio Norte DN), el segundo entre el fiordo Quintupeu y Cahuelmó (Dominio Central DC), y el tercero entre el fiordo Cahuelmó y Huinay (Dominio Sur DS). Entre Huinay y Vodudahue no fue posible fotointerpretar lineamientos, y tampoco existen fallas mapeadas en la bibliografía.

El Dominio Norte carece de fallas, y tiene lineamientos 84NE/N75E; el Dominio Central, presenta fallas 86SE/N60E y lineamientos 84NE/N40W, y, el Dominio Sur, por su parte, presenta fallas con manteo 87E y rumbo NS, con lineamientos 73SE/N32E. En la Figura 3.49 se observa la ubicación de los dominios.



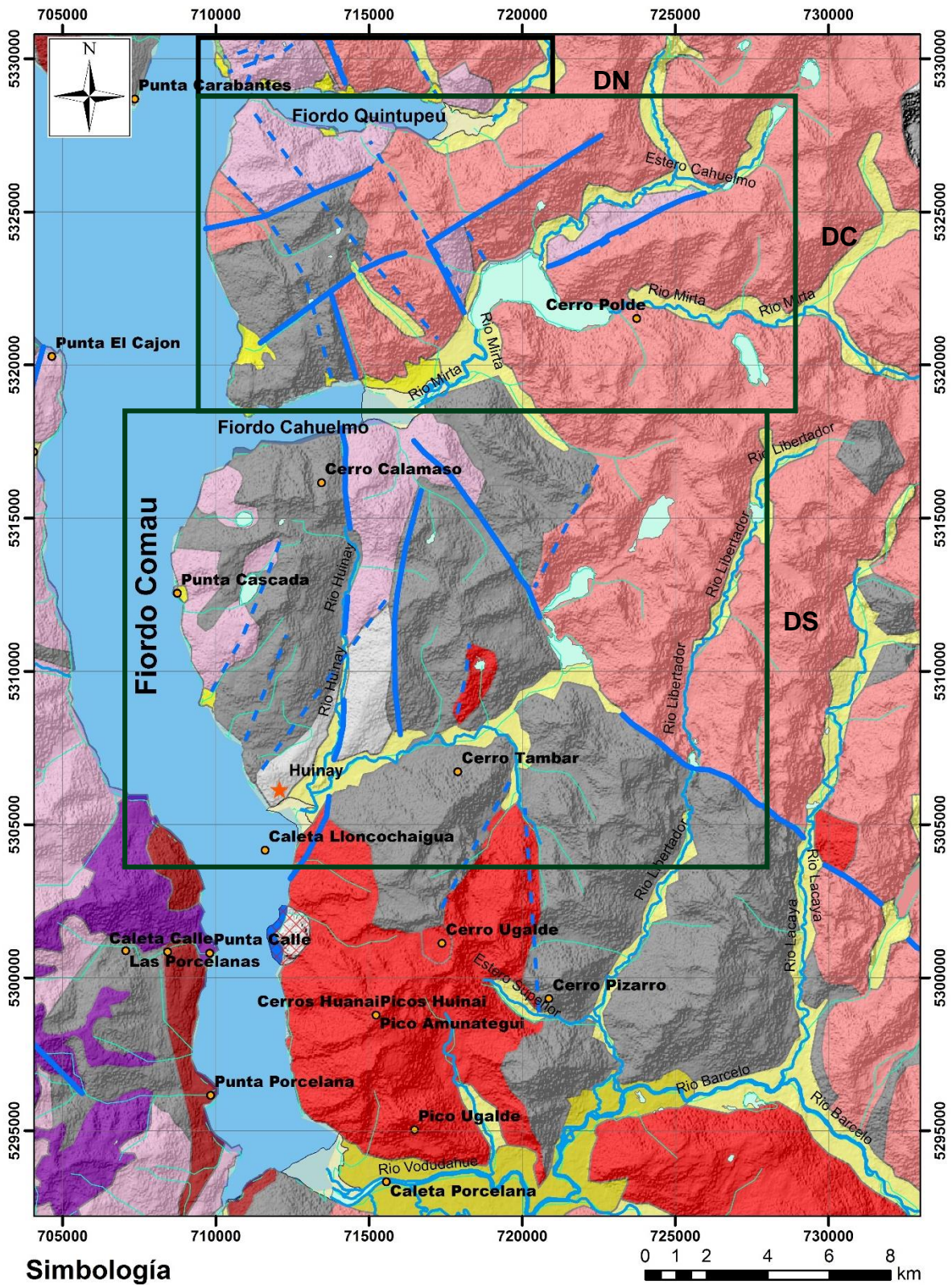


Figura 3.49. Dominios estructurales. DN: Dominio Norte, DC: Dominio Central, DS: Dominio Sur.



### **3.5 Clima y vegetación**

Cabe señalar que los antecedentes climatológicos fueron obtenidos de la página web oficial de la Dirección General de Aguas (DGA), con los cuales se confeccionó un mapa climático que se observa en el punto 3.5.1 Regímenes Climáticos.

Por otra parte, la información de temperatura, precipitaciones y humedad de la región de Los Lagos fue obtenida de los anuarios climatológicos de los años 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 y 2015, que realizan la Dirección de Aeronáutica Civil, Dirección Meteorológica de Chile y Subdepartamento Climatológico y Meteorología Aplicada.

Además, se obtuvo información de la estación meteorológica Hornopirén que se ubica en la Ciudad de Río Negro, siendo la estación más cercana a la zona de estudio. Posee antecedentes climatológicos de los meses entre mayo y octubre del año 2016, los que fueron procesados y presentados en gráficos.

#### **3.5.1 Regímenes climáticos**

La región en la cual se enmarca el área de estudio, posee mayormente climas templados, los que tienen como características principales temperaturas medias a bajas, alta pluviosidad y alta humedad relativa del ambiente.

Con la información obtenida de la DGA se procedió a confeccionar un mapa de climas de la zona en el que se pueden reconocer tres tipos de climas: templado cálido lluvioso sin estación seca, templado frío lluvioso sin estación seca y tundra por efecto de la altura.

El clima templado cálido lluvioso sin estación seca es característico de las zonas costeras del fiordo Comau como así de los fiordos Quintupeu y Cahuelmó, constituyendo una franja N-S de hasta aproximadamente 15 km entre el borde costero del fiordo Comau hacia el este (Figura 3.50), con una isoterma de 8 °C. En este clima la temperatura media anual es baja y desciende a medida que se avanza hacia el sur. Llueve durante prácticamente todo el año por lo que no es posible encontrar meses secos.

Por su parte, el clima templado frío lluvioso sin estación seca, es de similares características que el mencionado anteriormente, pero se diferencia en poseer temperaturas inferiores (isoterma 4°C) y presentar nevadas en algunas ocasiones. Este clima se presenta en sectores más cordilleranos del área de estudio, y se dispone como una franja N-S con un ancho máximo de 4 km (Figura 3.50).

En la zona cordillerana más este, hasta el límite fronterizo con Argentina, se tiene un clima de tundra por efecto de la altura. El clima de tundra se caracteriza por veranos cortos y frescos con lluvias ligeras, mientras que los inviernos suelen ser muy fríos y con nevadas, con generalizadas temperaturas muy bajas y una isoterma de 0°C (Figura 3.50).

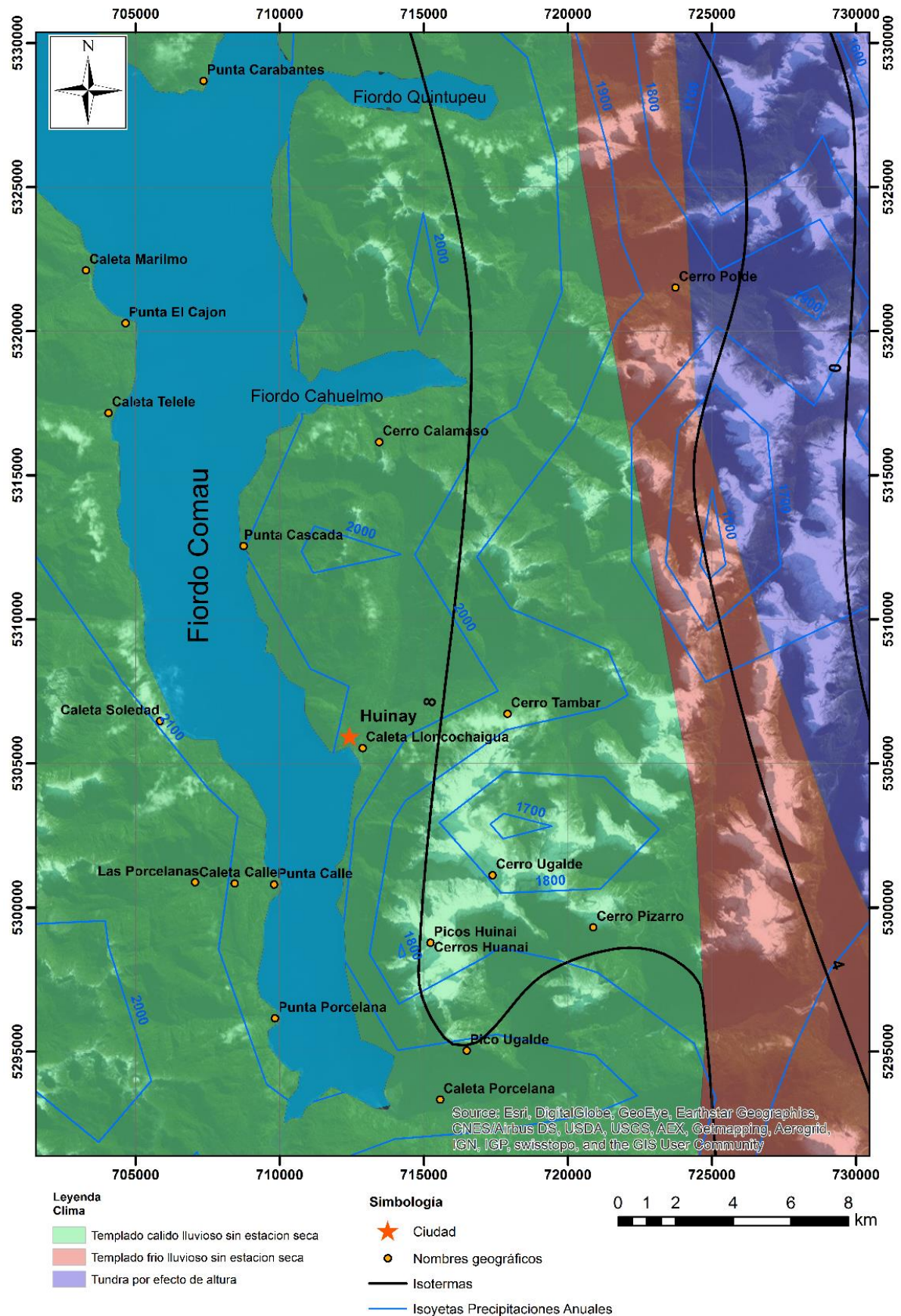


Figura 3.50. Mapa de regimenes climáticos del fiordo Comau.

### 3.5.2 Temperatura

Las estaciones climatológicas de la región de los Lagos son: Osorno, Puerto Montt, Futaleufú Aeródromo y Alto Palena Aeródromo. De estas se puede observar que la temperatura mínima puede presentar variaciones, pero siempre se encuentra en valores bajo los 0°C (Tabla 3.1), mientras que la variación de la temperatura máxima va entre los 25,3 y 35°C. La estación Puerto Montt presenta temperaturas máximas menores en comparación con las otras estaciones.

Tabla 3.1 Temperaturas máximas y mínimas de las estaciones Osorno, Puerto Montt, Futaleufú Aeródromo y Alto Palena Aeródromo.

Estaciones	Temperatura [°C]	Año					
		2010	2011	2012	2013	2014	2015
Osorno	Máxima	28,1		32,5	34,0	30,0	33,0
	Mínima	-6,8	-5,2	-4,5	-4,6	-3,3	-4,3
Puerto Montt	Máxima	25,3	29,8	26,4	32,7	28,7	28,9
	Mínima	-5,1	-3,6	-3,5	-4,4	-2,2	-3,9
Futaleufú Aeródromo	Máxima		34,9	23,6	33,4	30,4	33,5
	Mínima		-8,7	-8,5	-8,1	-6,1	-6,3
Alto Palena Aeródromo	Máxima			33,0	35,0	31,0	33,6
	Mínima			-7,0	-7,0	-4,9	-4,6

En tanto, la estación Hornopirén indica temperaturas máximas que tienen una tendencia a estar por sobre los 10°C, siendo el mes de septiembre el que presenta una mayor temperatura de 18,39°C. En cuanto a los valores mínimos, estos están cercanos a los 0°C, teniendo una mínima en julio de -3,78 °C; por su parte las temperaturas medias poseen variaciones entre los 5,2 y 11°C, manteniendo una tendencia sobre los 5°C (Figura 3.51).

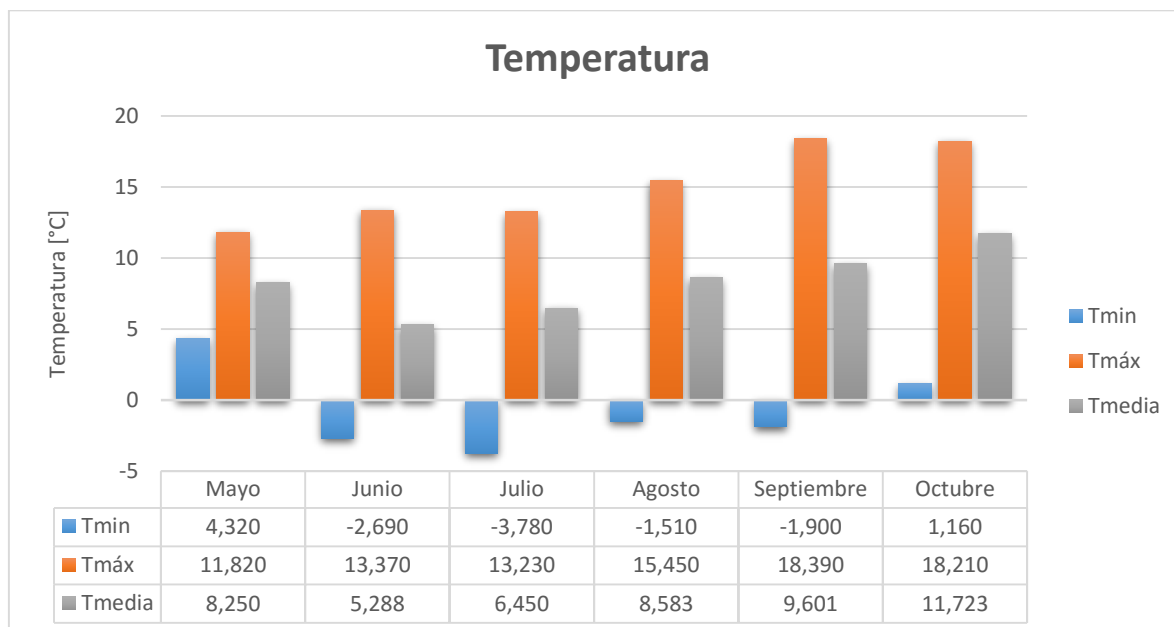


Figura 3.51. Temperaturas de la estación meteorológica Hornopirén.

### 3.5.3 Humedad

La humedad relativa del ambiente promedio anual tiene una tendencia a estar sobre el 80%. Si bien, algunas estaciones presentan poca y ninguna información al respecto, como es el caso de la estación Futaleufú Aeródromo, esta tendencia se condice con la información entregada por la Estación Hornopirén (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Humedad relativa del ambiente de las estaciones mencionadas.

Estaciones	Humedad relativa [%]					
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Osorno					82	81
Puerto Montt	85	86	87	82		80
Futaleufú Aeródromo						
Alto Palena Aeródromo					64	66

La estación Hornopirén indica que, entre los meses comprendidos, la humedad mínima varía entre los 19,16% y 92%, mientras que la humedad máxima alcanza valores entre los 98% y 99%. La humedad media mensual tiene una tendencia a la baja, pero manteniéndose sobre el 80%, lo que se correlaciona directamente con los datos de la estación Puerto Montt (Figura 3.52).

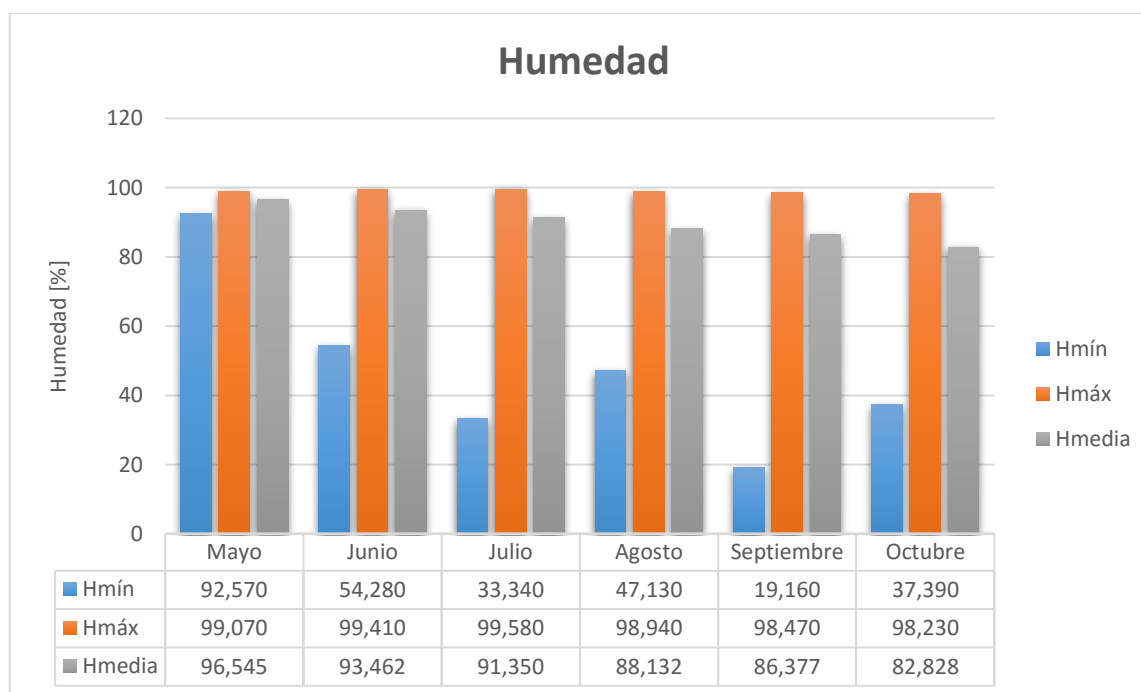


Figura 3.52. Humedad relativa del ambiente. Estación meteorológica Hornopirén.

### 3.5.4 Pluviometría

La región de los Lagos se destaca históricamente por su alto régimen pluviométrico. Asimismo, la zona de estudio se caracteriza por presentar abundantes lluvias, tanto en invierno como en periodos estivales.

Las estaciones de la región indican que las precipitaciones anuales están siempre por sobre los 900 mm al año, por lo que se considera abundante y son características de los regímenes climáticos de la zona de estudio (Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Precipitaciones anuales.

Estaciones	Precipitaciones anuales [mm]					
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Osorno	1.041,3	994,7	1.225,0	1.106,5	1.373,0	1.185,4
Puerto Montt	1.293,2	1.680,9	1.526,7	1.595,4	1.507,8	1.432,9
Futaleufú Aeródromo		1.691,1				1.947,5

Por su parte, la estación Hornopirén indica que las precipitaciones acumuladas medias hasta el mes de octubre tienen un valor de 1.305,083 mm y, además, se indica agosto como el mes más lluvioso. Es importante señalar que la estación no presenta los datos de los meses entre enero y abril del año 2016, por lo que es posible que las precipitaciones acumuladas sean mayores (Figura 3.53).

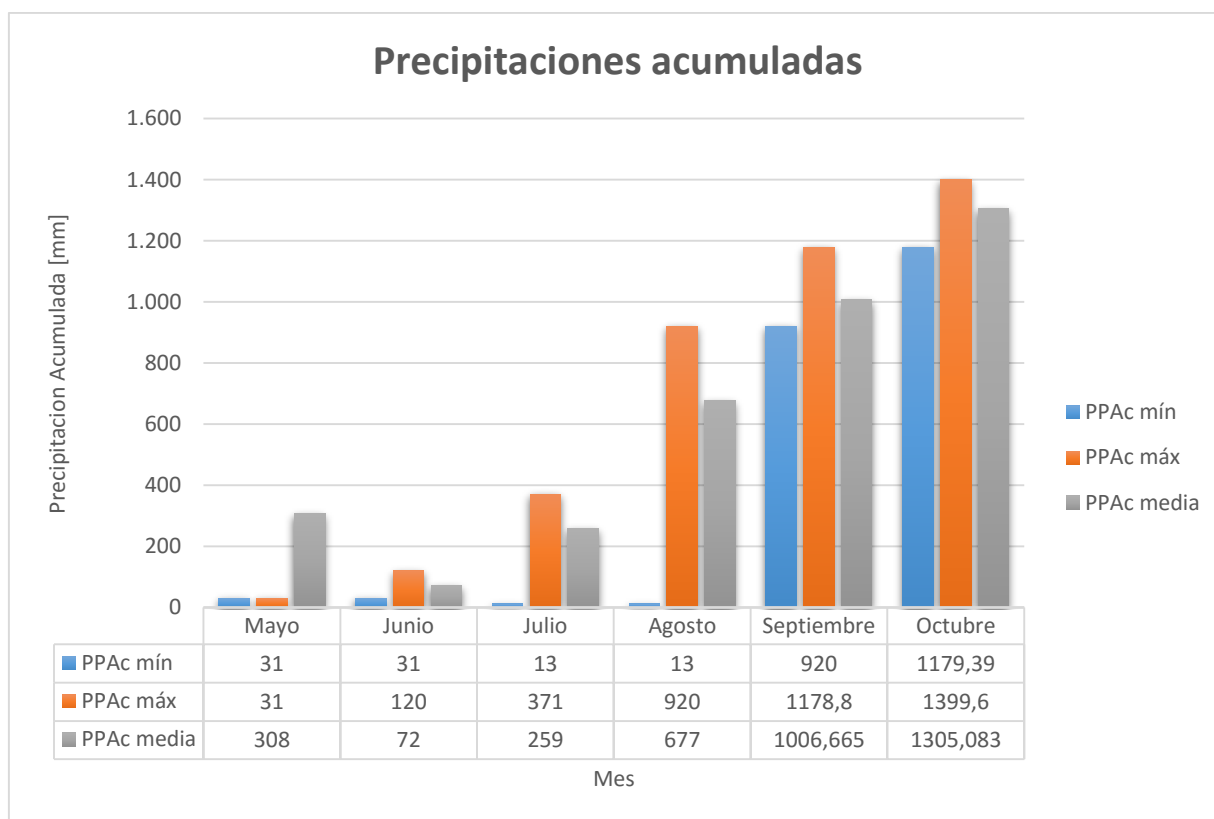


Figura 3.53. Precipitaciones acumuladas entre mayo y octubre de 2016. Estación meteorológica Hornopirén.

Con respecto a las isoyetas es posible observar que las precipitaciones en el fiordo Comau varían entre los 1.700 y 2.100 mm al año. Las zonas de precipitaciones cercanas a las 2.100 mm corresponden a zonas costeras entre Huinay y el fiordo Quintupeu; precipitaciones cercanas a los 2.000 mm se ubican en la costa de Huinay hasta el río Vodudahue, además de zonas acotadas al norte del fiordo Cahuelmó y al sur del cerro Calasmo; precipitaciones entre 1.700 y 1.800 mm se ubican en cerro Tambar, cerro Ugalde y Cerro Huinay, correspondiente a zonas de mayor elevación, del mismo modo el valor de las isoyetas disminuye en zonas más cordilleranas

Las precipitaciones máximas en 24 horas, indican los milímetros máximos de agua lluvia que precipitaron en un periodo de 24 horas. Estos datos son relevantes ya que altas intensidades de lluvia en cortos periodos de tiempo pueden causar muchas catástrofes, entre ellas, puede detonar fenómenos de remociones en masa.

Se indica en la Tabla 3.4 que el máximo de precipitaciones en 24 horas encontrado corresponde a la estación Futaleufú en el año 2011, mientras que estaciones como Osorno y Puerto Montt tienen variaciones entre 43,3 - 89,7 mm y 34,2 - 61,2 mm.

Tabla 3.4. Precipitaciones máximas en 24 horas.

Estaciones	Precipitaciones máximas en 24 horas [mm]					
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Osorno</b>	43,3	75,0	59,4	89,7	58,8	72,8
<b>Puerto Montt</b>	34,2	54,0	43,0	48,2	61,2	40,0
<b>Futaleufú Aeródromo</b>		124,0				93,0
<b>Alto Palena Aeródromo</b>						93,7

En tanto, la estación Hornopirén indica que en el mes de agosto se tuvo un máximo de 385,4 mm en 24 horas, situándose muy por sobre los datos de las estaciones anteriores. Cabe señalar que las estaciones (Figura 3.54) presentan un promedio anual de las precipitaciones, mientras que la estación Hornopirén entrega el máximo mensual.



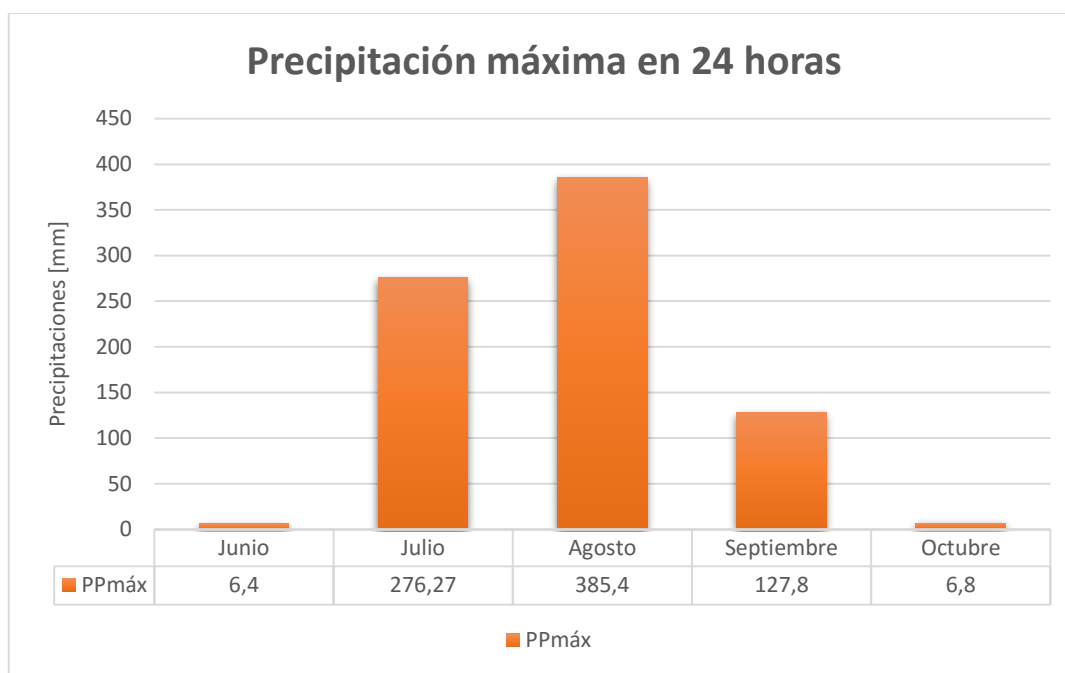


Figura 3.54. Precipitaciones máximas en 24 horas informadas por la estación Hornopirén

### 3.5.5 Vegetación

La configuración geomorfológica, sumada a las condiciones climáticas (temperatura, precipitaciones, humedad, etc.) de la región de Los Lagos, dan origen a un bosque caduco y de hoja perenne que se mantiene siempre verde. Dentro de estos bosques existen clasificaciones basadas en la configuración arbórea. Así, se tiene el Bosque Siempre Verde Patagónico, Bosque Laurifolio Valdiviano y Bosque Andino Patagónico (García y Ormazábal, 2008).

El Bosque Siempre Verde Patagónico se sitúa en la ladera oeste del fiordo Comau, y en ambas laderas de los fiordos Quintupeu y Cahuelmó, así también en la zona interior del área del estudio. La configuración arbórea corresponde a Alerce, Ciprés de Las Guaitecas, Cohiüe de Chiloé, Cohiüe de Magallanes, Leña Dura, Mañío de Hojas Punzantes y Tepú. Todas las especies mencionadas se mantienen siempre verdes, tienen copas frondosas y alturas variables de 5 m (Leña Dura) hasta 50 m (Alerce), con un ancho de tronco variable de 30 cm hasta 2,5 m.

El Bosque Andino Patagónico, se ubica en la zona más andina, cercano al límite con Argentina. Las principales especies arbóreas son la Araucaria, Lengua, Notro y Ñiree, siendo la Araucaria el árbol de mayor tamaño alcanzando alturas de 50 m con un diámetro de tronco de hasta 2,5 m.

El Bosque Laurifolio Valdiviano se sitúa en la ladera este del fiordo Comau y en las laderas del río Mirta y Huinay. Sus árboles son Arrayán, Avellano, Canelo, Chaquihue, Fuinque, Luma, Mañío de Hojas Cortas, Meli, Olivillo, Palo Santo, Pillo Pillo, Sauco del Diablo, Tepa, Tiaca, Tineo y Ulmo. Todas estas especies son siempreverde, de copas frondosas con tamaños de 8 a 25 m de altura y diámetro de tronco variable de 30 cm hasta 1 m (Figura 3.55).



Figura 3.55 Ladera este del fiordo Comau, correspondiente al Bosque Laurifolio Valdiviano.

También, se encuentra un desarrollado sotobosque que está compuesto de una gran variedad de arbustos: Quilas, Colihues, Ciruelillo, Chilca, Murtilla y Maqui. Alrededor de los troncos de los árboles hay abundantes lianas que se entrelazan aumentando la exuberancia del bosque (Figura 3.56). Además, al ser una zona muy húmeda, el suelo se encuentra tapizado de una gran variedad de helechos de alturas inferiores a 2 m (Figura 3.57). Debido a las altas laderas, la acotada presencia de suelo y la superficialidad de los macizos rocosos, las raíces de los árboles son poco profundas por lo que es común ver árboles abatidos.





Figura 3.56. Sotobosque con lianas y enredaderas.



Figura 3.57. Sotobosque con helechos de tamaños cercanos a dos metros de altura.

### **3.6 Sismicidad de la zona de estudio**

La configuración tectónica que posee Chile, lo hace uno de los países más sísmicos del mundo y acreedor del terremoto de mayor magnitud del que se tiene registro  $M_w = 9.5$  que tuvo lugar en la ciudad de Valdivia en el año 1960, como también del noveno

terremoto de mayor magnitud con  $M_w = 8.8$  en el Maule. Desde 1962 a 1998, se produjeron más de 4.000 sismos de magnitud superior a 5 (Madariaga, 1998), lo que corrobora que Chile es un país eventualmente sísmico.

En general, en Chile las zonas sismogénicas están bien establecidas: terremotos intraplaca (0 - 50 km) a lo largo de la costa (desde Arica hasta la Península de Taitao); terremotos interplaca profundos (70 - 100 km) que se generan dentro de la placa de Nazca subductante; y sismicidad cortical superficial (0 - 20 km) en zonas cordilleranas (Barrientos, 2007).

Un aspecto interesante de la sismicidad en Chile es la cada vez mayor evidencia de sismicidad cortical (0 - 20 km) en los Andes y/o sus piedemontes a lo largo de todo el país (Barrientos, 2007). Lamentablemente, las características de este tipo de sismos no se conocen muy bien, y por ende tampoco el peligro asociado (Serey, 2011).

Como se mencionó, la zona de estudio se encuentra cercana al punto triple en el que convergen las placas de Sudamérica, Nazca y Antártica. Consecuentemente, se tiene la ZFLO que, si bien posee alta sismicidad asociada, no se tenían registros de terremotos de mayor magnitud hasta el día 27 de abril de 2007 en el que un terremoto  $M_w = 6.2$  sacudió la región de Aysén generando un evento de remoción en masa que desencadenó en un tsunami con resultados fatales. Este evento se convirtió en el primer terremoto al que se le atribuye la ZFLO.

Los antecedentes sísmicos que se presentan a continuación corresponden a información proveniente del Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile (CSN). En ellos se muestran los sismos de la región de Los Lagos en magnitud local Richter ( $M_L$ ), comprendidos entre enero de 2011 hasta noviembre de 2016 (Figura 3.58), que fueron sensibles, es decir, que lograron ser percibidos por personas.



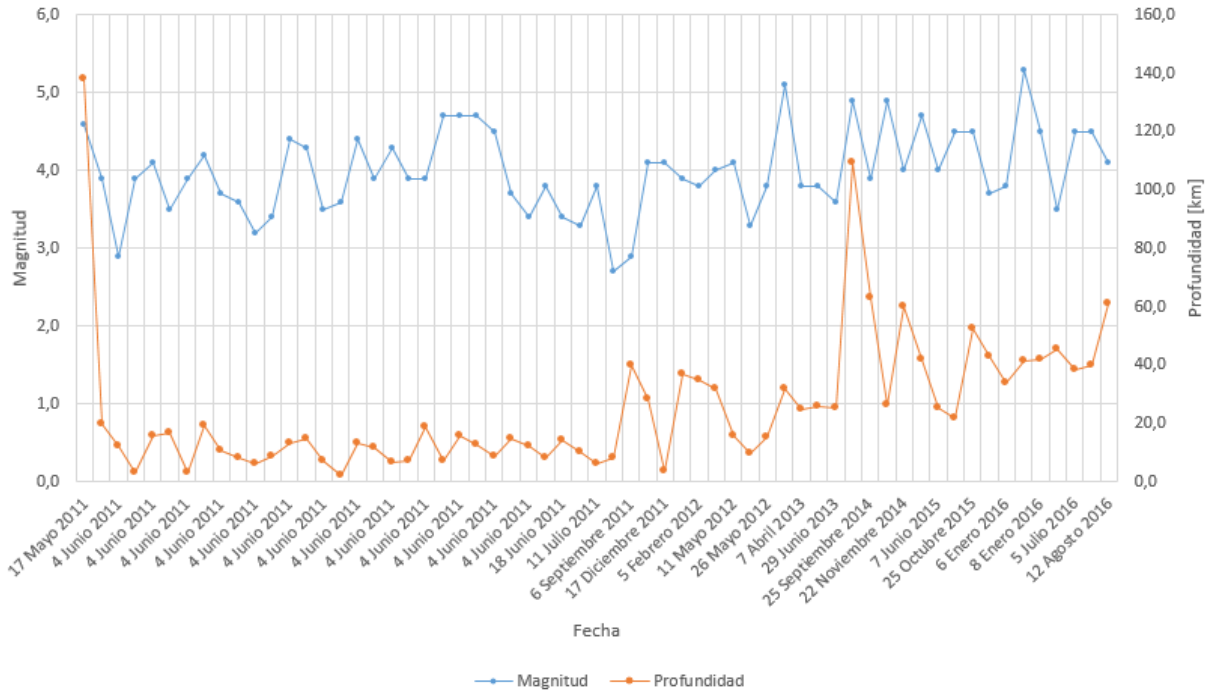


Figura 3.58. Historial sísmico correspondiente a la región de Los Lagos entre 17 mayo del 2011 hasta 12 de agosto del 2016.

Se desprende del historial sísmico, que la región ha sido activa sísmicamente con un total de 164 sismos, de los cuales 61 son sensibles y 101 no percibidos. Dentro de los sismos sensibles, la magnitud máxima alcanzada corresponde a un sismo 5.3 que tuvo lugar el día 7 de enero de 2016, con una profundidad de 41 km, 31 km al noroeste de Ancud, el cual no registró daños. También es posible reconocer un enjambre sísmico, que tuvo como epicentro el sector de Futrono, donde se registraron más de 45 sismos en menos de 24 horas, con magnitudes entre los 2.7 y 4.8.

En general, los sismos presentan una magnitud inferior a 5.0 con profundidades inferiores a los 20 km. Ya que poseen profundidades inferiores menores pueden considerarse sismicidad cortical. Por otra parte, los sismos de mayor intensidad se producen a más de 100 km de profundidad.

Adicionalmente, se entrega información sobre los sismos de magnitud mayor o igual a  $M_w = 5.0$  (Figura 3.59) obtenida de la página web oficial de la USGS (*United States Geological Surveys*), pues Rodríguez *et al.* (1999) indican que los eventos de remociones en masa pueden ocurrir desde esta magnitud.

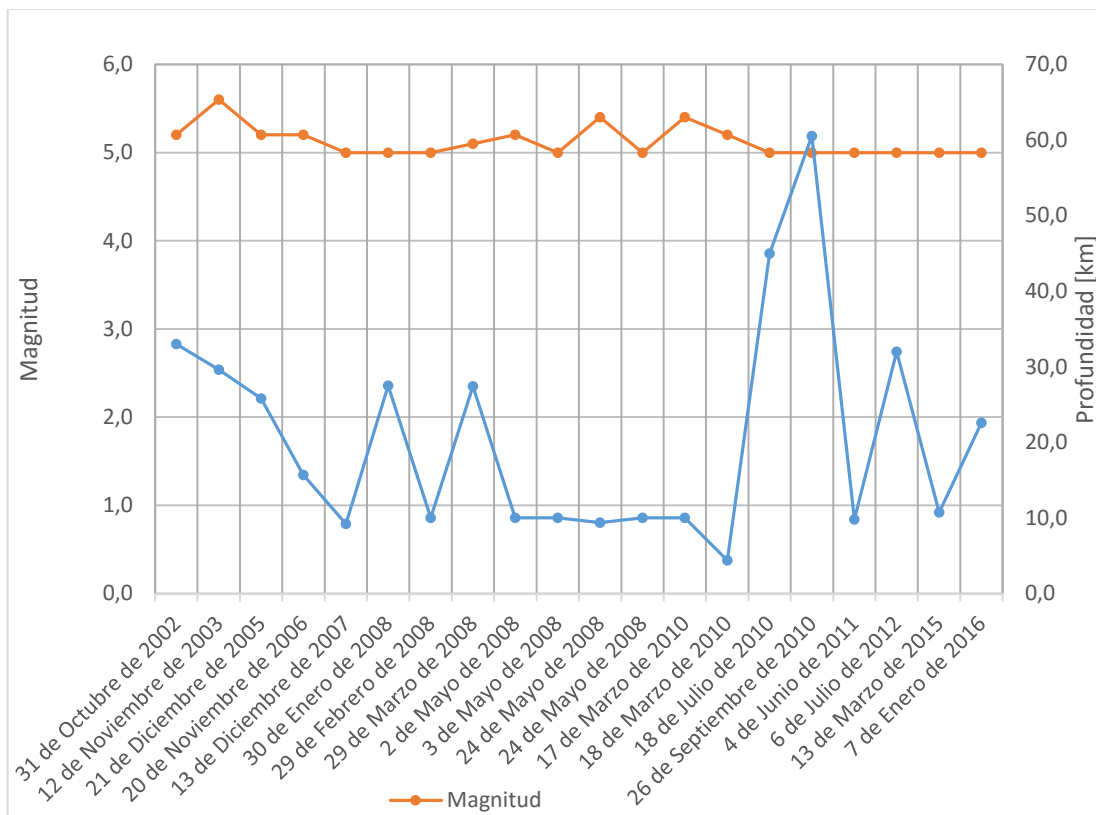


Figura 3.59. Sismos de la región de Los Lagos con magnitud  $M_w$  igual o mayor a 5.0.

Al igual que lo observado en el gráfico anterior, se observa que corresponden a sismos corticales, que en general, presentan profundidades inferiores a 30 km, exceptuando dos sismos de profundidad 45 y 60,5 km, respectivamente.

Cabe señalar que algunos eventos sísmicos pueden variar en magnitud y profundidad respecto a la fuente de información. La Figura 3.60 muestra todos los sismos provenientes tanto de la información obtenida por el CSN como por USGS.

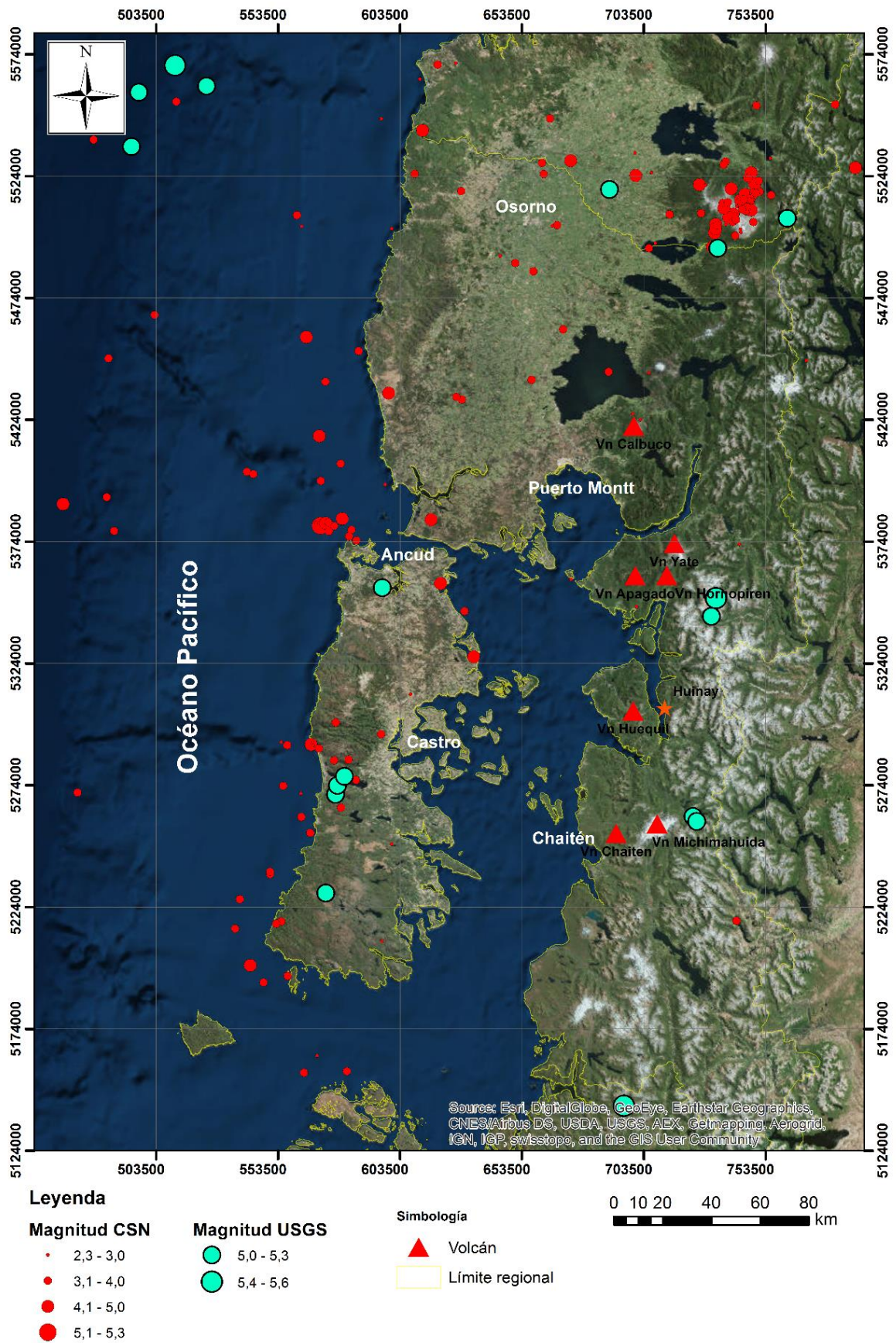


Figura 3.60. Epicentros sísmicos cercanos a la región de Los Lagos.

### 3.7 Inventario de remociones en masa

El inventario de remociones en masa se elaboró mediante fotointerpretación con los programas *Google Earth*, *ArcGIS Earth* y *ArcMap 10.2.2*, y ortofotografías del sector este del fiordo Comau, facilitadas por ARCADIS CHILE SpA, cuyo análisis fue integrado con las observaciones y datos obtenidos de la etapa de terreno.

Este inventario o catastro fue comparado y complementado con el realizado por Náquira (2009), que se traslapan en el sector este del fiordo Quintupeu, y por Molina (2016), que se traslapan en la zona este del fiordo Comau, desde el río Vodudahue hasta la ladera sur del fiordo Quintupeu.

De este modo se obtuvo el mapa de catastro de remociones en masa (Figura 3.61) el que, con el objeto de simplificar el entendimiento del mismo, considera una clasificación distinta a la presentada en el punto 2.1 Clasificación de remociones en masa propuesta por Hungr *et al.* (2013).

Las evidencias de remociones en masa que fueron reconocidas en la zona de estudio corresponden a fenómenos de caídas de roca, deslizamiento de roca irregular o deslizamiento de roca, deslizamiento de suelos y flujos de detritos. Dentro de cada evidencia se diferenció la zona donde se generó la RM de sus depósitos, siendo estos últimos denominados depósitos de remoción en masa.

Además, se observaron algunas RM que, debido a su compleja configuración, no fueron posibles de diferenciar entre deslizamiento de roca o deslizamiento de suelo, por lo que se denominaron deslizamientos de roca y suelo.

En el Anexo B, se presentan en detalle los puntos de remociones en masa con sus áreas y perímetros.



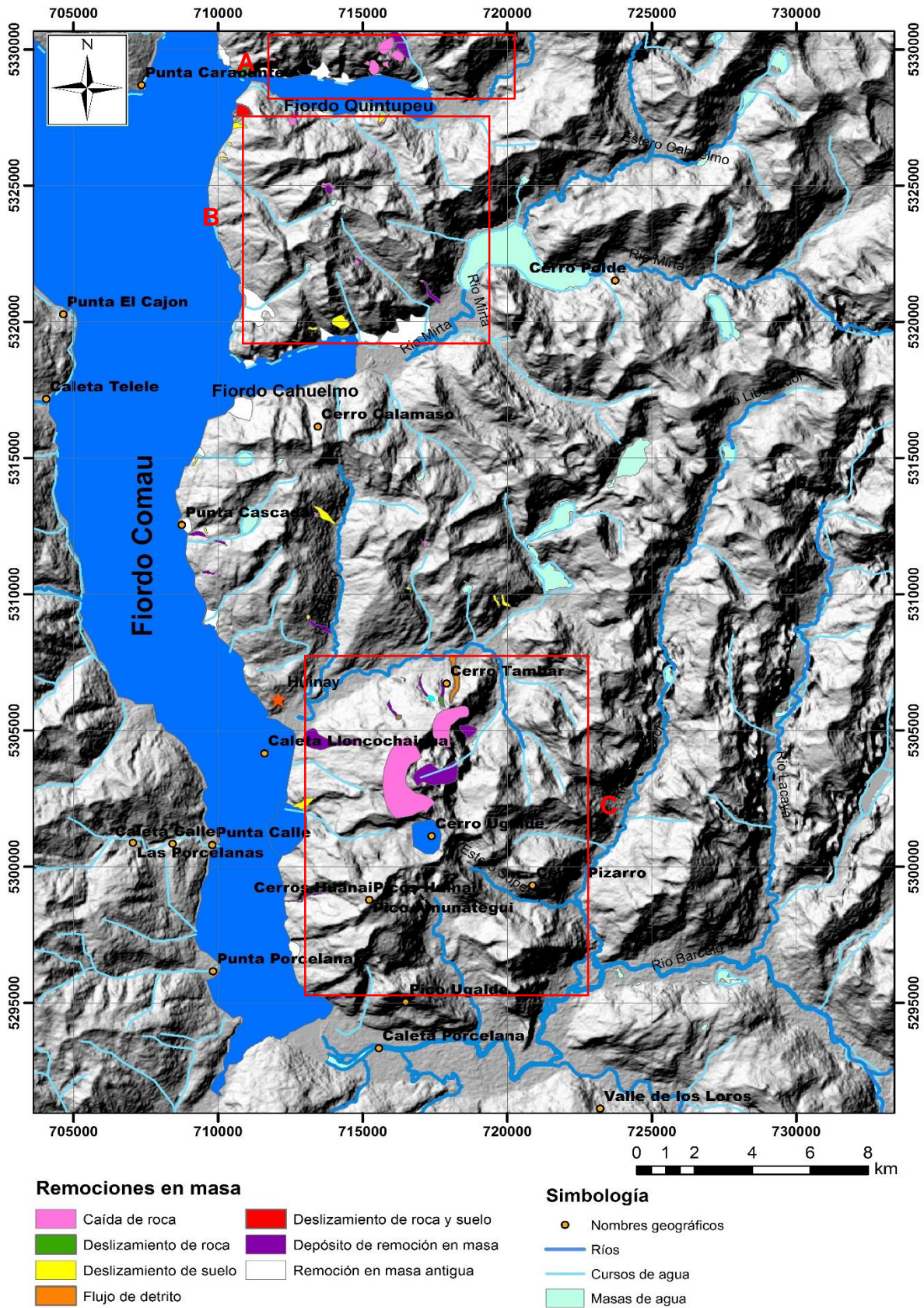


Figura 3.61. Mapa de catastro de remociones en masa sobre un mapa de relieve sombreado. A: sector A, B: sector B, C: sector C.

### 3.7.1 Caídas de roca

Las caídas de roca corresponden a fenómenos que se inician con el desprendimiento de un bloque de roca, cuyo transporte puede ser mediante rodamiento y/o rebote de fragmentos de roca. Pueden ocurrir aislados o en conjunto, pero hay poca interacción dinámica entre los fragmentos más móviles los que interactúan principalmente con el sustrato. La deformación de fragmentos no es importante, aunque los fragmentos se pueden romper durante el impacto. Usualmente, son de volumen limitado (Hungar *et al.*, 2013).

Se reconoció un total de 40 RM del tipo caída de roca. Estas RM se ubicaron en la ladera norte del fiordo Quintupeu (sector A), entre el Cerro Ugalde y Cerro Tambor (sector B), y en menor cantidad, entre los fiordos Quintupeu y Cahuelmó (sector C).

Los desprendimientos o caídas de bloques de rocas generadas en la ladera norte del fiordo Quintupeu tienen una extensión areal entre los 34.371,47 y 144.045,37 m<sup>2</sup>, con un perímetro entre los 852,96 m y los 1.792,91 m (Tabla 3.5), mientras que en la ladera sur se presentan en menor cantidad y envergadura, respecto al sector norte.

Tabla 3.5. Ubicación, área y perímetro de caídas de roca del fiordo Quintupeu.

n°	Coordenada X	Coordenada Y	Área [m <sup>2</sup> ]	Perímetro [m]
1	715808,87	5329457,51	34.371,47	852,96
2	715170,66	5329494,46	18.788,50	600,24
3	715394,72	5329333,87	144.045,37	1.473,29
4	716220,37	5329762,99	124.651,60	1.368,39
5	715810,10	5330123,08	217.446,38	1.792,91

Las caídas de roca ubicadas entre el cerro Tambar (o Tambor) y cerro Ugalde, correspondieron a dos grandes zonas, donde la enorme densidad de remociones no fue posible identificarlas individualmente, por lo tanto, son un conjunto de remociones pequeñas. Los depósitos producidos tienen un área de 4.438,143 m<sup>2</sup> y 179.177,04 m<sup>2</sup>.

En el mismo sector, un poco más al oeste se observó una caída de roca de menor envergadura la que posee un área de 45.709,27 m<sup>2</sup> con un depósito de área 637.578,22 m<sup>2</sup> (Tabla 3.6; Figura 3.62).

Tabla 3.6. Ubicación, área y perímetro de caídas de rocas entre cerro Ugalde y Tambor.

n°	Coordenada X	Coordenada Y	Área [m <sup>2</sup> ]	Perímetro [m]
1	716392,61	5303118,35	290.5657,98	8.475,99
2	717926,49	5305244,11	980.666,32	4.603,76
3	714860,26	5304590,60	45.709,27	837,16





Figura 3.62. Caída de roca (polígono verde). Ladera este del fiordo Comau.

Las caídas de roca que se encuentran entre los fiordos Quintupeu y Cahuelmó, son de menor extensión areal desde 8.294,03 m<sup>2</sup> hasta 59.547,12 m<sup>2</sup> (Tabla 3.7) con un promedio de 25.506 m<sup>2</sup>, siendo de mucho menor tamaño que las otras caídas de rocas.

Tabla 3.7. Ubicación, área y perímetro de caídas de rocas entre los fiordos Quintupeu y Cahuelmó.

n°	Coordenada X	Coordenada Y	Área [m <sup>2</sup> ]	Perímetro [m]
1	712860,07	5327498,17	25.032,18	1.324,19
2	712575,38	5327362,23	59.547,12	906,20
3	713167,88	5327602,08	17.978,77	666,58
4	713131,04	5327069,61	8.294,03	496,43
5	715655,38	5327264,00	11.273,55	479,10
6	717051,55	5321498,77	6.801,61	333,11
7	713787,50	5325010,18	49.620,14	1.329,64

Es importante señalar que en el trabajo de terreno se observaron bloques desde tamaños centimétricos hasta bloques de 10 m.

### 3.7.2 Deslizamiento irregular de roca (deslizamiento de roca)

El deslizamiento irregular de roca corresponde a un deslizamiento de una masa de roca sobre una superficie de ruptura irregular compuesta por un número de discontinuidades

orientadas aleatoriamente, separadas por segmentos de roca intacta (“*rock bridges*”). Ocurre en rocas con estructuras no sistemáticas. El mecanismo de falla es complejo y difícil de describir. Puede incluir elementos de volcamiento. Ocasionalmente son muy repentinos y extremadamente rápidos (Hungry *et al.*, 2013).

En la zona de estudio, se reconocieron 4 deslizamientos (Tabla 3.8). Los de menor área, en general, tenían un plano de ruptura irregular, además de tener sus depósitos *in situ* que, debido al proceso de RM, se disgregaron (Figura 3.63), mientras que el depósito de mayor área no presentaba disgregación en su depósito de remoción.

Tabla 3.8. Ubicación, área y perímetro de deslizamientos de roca.

N°	Coordenada X	Coordenada Y	Área [m <sup>2</sup> ]	Perímetro [m]
1	711184,68	5318881,92	5.078,45	288,36
2	710889,52	5329212,60	94.928,38	1.530,47
3	717369,09	5306192,81	6.988,95	393,99
4	717734,35	5306070,84	41.797,03	935,04



Figura 3.63. Deslizamiento de roca irregular. Ladera este del fiordo Comau. Se diferencia entre zona de ruptura (polígono verde) y depósito de remoción en masa (polígono violeta).

Los depósitos de deslizamientos tienen espesores variables que fueron estimados desde unos pocos centímetros hasta un máximo de 3 m, con un volumen de depósito aproximado de 250 m<sup>3</sup>.



### 3.7.3 Deslizamiento planar de arcilla/limo (deslizamiento de suelo)

Deslizamiento de un bloque de suelo cohesivo sobre una superficie de ruptura planar inclinada, formada por una capa débil. La cabecera de la masa deslizada está separada del suelo estable por medio de una grieta de tensión profunda (no hay cuña activa). Puede ser lento o rápido (Hungar *et al.*, 2013).

En la zona de estudio, se observaron pocos deslizamientos de suelo que se pudieron clasificar como tal, pues la mayoría eran compuestos por suelo y roca.

La mayor concentración de los deslizamientos de suelo se encontró en la ladera sur del fiordo Quintupeu, la ladera norte del fiordo Cahuelmó y zonas próximas al río Huinay, mientras que el deslizamiento de mayor extensión se halló en la ladera norte del fiordo Cahuelmó con un área de 207.907,57 m<sup>2</sup> (Tabla 3.9).

Tabla 3.9. Ubicación, área y perímetro de deslizamientos de suelo.

N°	Coordenada X	Coordenada Y	Área [ m <sup>2</sup> ]	Perímetro [m]
1	710646,39	5327427,19	5.951,12	449,62
2	710697,00	5327196,87	72.979,34	1.425,13
3	710772,18	5327395,14	5.923,06	447,72
4	710395,20	5326526,73	14.904,43	480,85
5	710188,43	5326001,49	17.713,78	618,41
6	712641,20	5319321,45	4.126,41	367,00
7	714240,84	5319985,36	207.907,57	1.735,25
8	709225,94	5314892,35	22.579,13	887,16
9	719629,76	5309767,96	34.513,33	1.140,85
10	719920,39	5309719,42	55.493,43	1.358,71
11	712965,40	5302319,48	137.908,75	1.799,74
12	713284,69	5319758,63	25.814,54	789,14
13	713348,13	5330951,25	5.243,92	319,91
14	716595,24	5310218,72	14.737,31	623,06
15	710234,63	5326181,43	5.934,58	409,43
16	715675,91	5327533,50	67.111,26	1.133,55
17	709579,79	5312337,36	13.204,83	545,17
18	713680,66	5312909,06	152.862,63	2.275,49
19	713120,10	5309172,30	15.619,03	467,51
20	716457,83	5306795,63	2.354,23	197,39

Al ocurrir estos eventos, y remover todo el suelo sobre la roca, la vegetación presente, árboles, arbustos y helechos, se deslizó junto con el suelo. Estas zonas de deslizamientos poseían una incipiente vegetación inferior a 50 cm de altura, lo que indica que existe un crecimiento de vegetación posterior al deslizamiento, siendo una característica distintiva (Figura 3.64).



Figura 3.64. Deslizamiento planar de limo y arcilla. Ladera este del fiordo Comau.

Los espesores de suelo varían entre 0,1 y 2 m, por lo que los volúmenes de depósitos de deslizamientos de suelo pueden estimarse entre 50 y 200 m<sup>3</sup>.

#### **3.7.4 Deslizamientos de suelo y roca**

En la zona de estudio se observaron muchos deslizamientos que tenían un carácter compuesto, es decir, no se logró diferenciar si el material involucrado correspondía solo a roca o solo a suelo, por lo que fueron denominados como deslizamientos de suelo y roca (Figura 3.65).

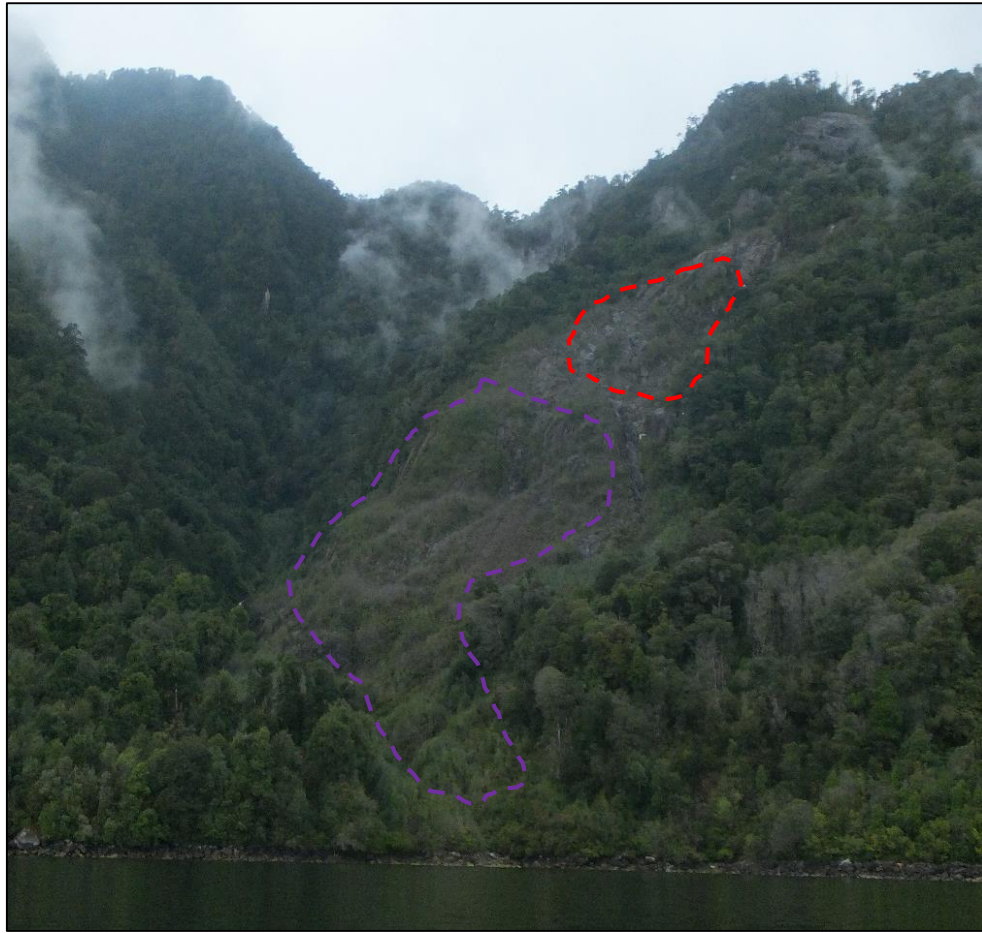


Figura 3.65. Deslizamiento de suelo y roca, ladera este fiordo Comau. Se demarca el área de deslizamiento (polígono rojo) y la zona del depósito (polígono violeta).

Los depósitos de deslizamientos compuestos pueden tener espesores de hasta 3 m, lo que permite estimar volúmenes aproximados de hasta 300 m<sup>3</sup>.

### 3.7.5 Flujos de detritos

Hungr *et al.* (2013), lo define como un flujo surgente muy rápido a extremadamente rápido de material detrítico saturado en un canal empinado. Involucra un fuerte arrastre de material y agua del camino del flujo.

Se pudieron reconocer los depósitos de flujos en quebradas de alta pendiente, los que tenían un aspecto similar a los depósitos producidos por deslizamientos de roca, pero se lograron diferenciar ya que los depósitos de flujos de detritos no se producen en macizos rocosos que no generan detritos.

Cabe señalar que estas RM no pudieron ser observados directamente ya que se ubican en zonas de difícil acceso, por lo que no se pudo estimar sus espesores y volúmenes involucrados.

## 4 EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA

El proceso de evaluación de susceptibilidad comenzó con la creación de una red neuronal.

Es importante recalcar que la metodología trabaja sobre dos hipótesis:

1. Las zonas en donde se generaron remociones en masa presentan las condiciones bajo las que se pueden producir remociones en masa en el futuro.
2. Los factores condicionantes pueden estar correlacionados entre sí, pudiendo influir en el análisis.

### 4.1 Redes neuronales en remociones en masa

Como se mencionó en el punto 2.5.2.3 Análisis con redes neuronales, las redes son algoritmos de aprendizaje que funcionan sobre la base de principios matemáticos y programación computacional.

La finalidad de una red neuronal es tener varias unidades de procesamiento, de modo que puedan llevarse a cabo múltiples tareas a la vez. Cada proceso en paralelo es llevado a cabo por una unidad funcional llamada neurona, la cual ocupa la información almacenada para procesarla y enviarla a otra neurona.

En palabras sencillas, la red tiene un proceso en que se ingresan parámetros en la capa de entrada, luego se genera un entrenamiento con los datos conocidos, es decir, la red se entrena bajo resultados existentes para que evalúe datos desconocidos, pero que son de similares características a los datos que se ocupan para el entrenamiento.

El proceso de entrenamiento escogido para la evaluación de susceptibilidad fue el de retropropagación de error (*backpropagation*), que entregó como resultado final una clasificación sobre la susceptibilidad de una zona.

Para asegurar el correcto funcionamiento de la red neuronal, esta tiene los procesos de entrenamiento, validación y *test*, los que se explicarán más adelante.

#### 4.1.1 Funcionamiento de la red neuronal

Existen diferentes tipos de redes neuronales dentro de las cuales se encuentra una llamada *Multilayer Perceptron (MLP)* la que fue utilizada en el presente trabajo. Una red del tipo MLP está conformada por distintas capas (entrada, oculta y salida) las que están compuestas por neuronas. Cada neurona está constituida por pesos sinápticos, regla de propagación, bias y funciones de activación y de salida. Cada una de las partes y procesos de la neurona artificial están relacionado a partes y procesos de una neurona humana (Figura 4.1).



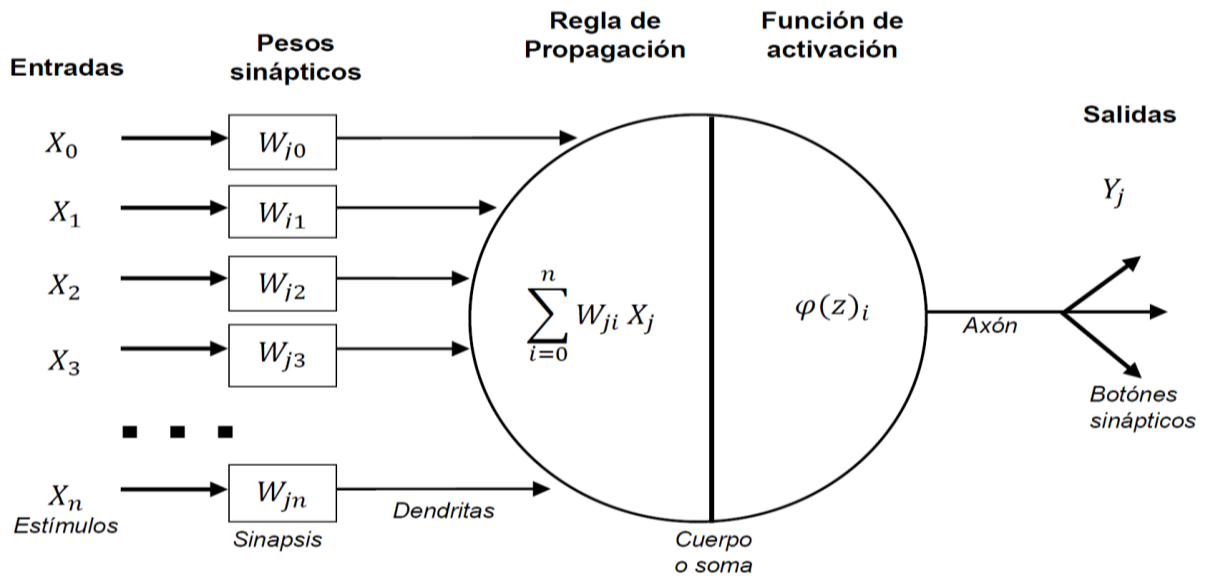


Figura 4.1. Esquema de una neurona artificial y sus respectivos equivalentes de neurona humana (Martín y Sanz, 2010).

Los pesos sinápticos tienen gran importancia pues son los encargados de almacenar la información en el proceso de aprendizaje. Cada conexión entre las neuronas, puede tener un valor negativo o positivo, a fin de activarla o inhibirla. La importancia de estas conexiones neuronales se denomina pesos sinápticos, los que en neuronas humanas cumplen el proceso de la sinapsis.

Por su parte, la regla de propagación es una función matemática  $h_j$ , tiene como parámetros los valores de entrada  $X_i$  y los pesos sinápticos  $W_{ji}$ , que, para el caso de remociones en masa, corresponde a una función lineal, que resulta de la combinación de los parámetros mencionados.

$Q_i$  corresponde a la constante Bias. Este es un parámetro externo a la neurona, el que puede hacer más grande o pequeño el valor de entrada a la función  $\varphi$ , ayudando a la convergencia del método.

$$h_j(X_0, X_1, X_2, \dots, X_n, W_{j0}, W_{j1}, W_{j2}, W_{j3}, \dots, W_{jn}) = \sum_{i=0}^n W_{ij} X_i + Q_i \quad (4.1)$$

En tanto, la función de activación determina si una neurona se activa o no: en caso de activarse transmitirá un impulso sináptico, y en caso de no activarse, no se emitirá. La función de activación para evaluación de susceptibilidad asociado a remociones en masa según Yilmaz (2009), corresponde a la tangente hiperbólica  $\varphi(h_j)$ , aunque también puede ser ocupada la función logística  $\tau(h_j)$  o una función lineal determinada.

$$\tanh(h_j) = \frac{e^h - e^{-h}}{e^h + e^{-h}} \quad (4.2)$$

$$\tau(h_j) = \frac{1}{1 + e^{-h}} \quad (4.3)$$

La capa de entrada recibe los valores del exterior para pasarlos a la capa oculta, la que puede tener la cantidad de capas que sean necesarias, pudiendo ser más de una. Esta última, como su nombre lo indica, no es una capa visible para el usuario, y es en esta capa donde se produce el proceso de entrenamiento de las neuronas.

Por su parte, la capa de salida recibe la información desde la(s) capa(s) oculta(s), y sus valores son los valores de salida de la red neuronal hacia el exterior.

#### 4.1.2 Número de neuronas en la capa oculta

No existe una razón teórica por la que se deba escoger una determinada cantidad de capas ocultas. Asimismo, este número de capas está determinado por la complejidad del problema, y por un proceso de ensayo y error.

Si bien, el análisis de redes neuronales es práctico y eficiente, el uso de muchas capas ocultas puede prolongar excesivamente el tiempo requerido para la obtención de resultados, pues se ha comprobado que el uso de una sola capa oculta otorga resultados suficientemente exactos (Lippmann, 1987; Rumelhart *et al.*, 1986).

Es por esto, que siempre se debe trabajar con una capa oculta independiente del número de neuronas, y en caso que la red no entregue buenos resultados, se debe aumentar el número de capas ocultas.

En casos de pocas neuronas, es a veces conveniente trabajar con dos capas, ya que el objetivo es obtener un óptimo considerando dos elementos: la demora que implica el adicionar capas ocultas y la demora que ocasiona no tener suficientes capas en el proceso de entrenamiento.

Algunas reglas permiten determinar el número de neuronas en la capa oculta (Tabla 4.1). Kavzoglu (2001) realiza un resumen de las formas que ocupan los autores para determinar la cantidad de neuronas en la capa oculta.

Tabla 4.1. Número de neuronas en la capa oculta.  $n$ : número de neuronas en la capa de entrada,  $m$ : número de neuronas en la capa de salida,  $l$ : número de datos de entrenamiento, y  $k$ : factor de ruido (varía entre 4 y 10), número de índice que representa el porcentaje de mediciones falsas en los datos o grado de error. Modificado de Kavzoglu (2001).

Propuesto por	Fórmula heurística
Hecht-Nielsen (1987)	$2 \cdot n + 1$
Hush (1989)	$3 \cdot n$
Ripley (1993)	$\frac{(n + m)}{2}$
Paola (1994)	$\frac{2 + m \cdot n + \frac{1}{2} m + (n^2 + m) - 3}{n + m}$
Wang (1994)	$2 \cdot \frac{n}{3}$
Aldrich <i>et al.</i> (1994)	$\frac{l}{k \cdot (m \cdot n)}$
Kaastra y Boyd (1996)	$\sqrt{m \cdot n}$
Kanellopoulas y Wilkinson (1997)	$2 \cdot n$

Para el caso de redes neuronales aplicadas a remociones en masa, el número de neuronas depende de la cantidad de parámetros de entrada y de salida, pudiendo coincidir con alguna fórmula heurística, pero realmente se obtiene por ensayo y error.

#### 4.1.3 Algoritmo *feed forward backpropagation*

La conexión entre las distintas neuronas corresponde al algoritmo *feed forward backpropagation*. Este algoritmo consta de dos fases: *forward* y *backward*.

En la fase *forward* se transmiten los pesos sinápticos desde la capa de entrada hasta la capa de salida, manteniendo constantes.

La fase *backward*, compara la diferencia entre el valor deseado y el valor obtenido, es decir, el error. Esto se envía de vuelta por la red capa por capa para ir ajustando los pesos.

Una vez realizada la fase *forward* y *backward*, se reinicia la fase *forward*, pero ahora con los nuevos pesos sinápticos, para seguir con una nueva fase *backward*, y así se itera hasta disminuir el error entre el resultado esperado y el resultado obtenido (Figura 4.2).

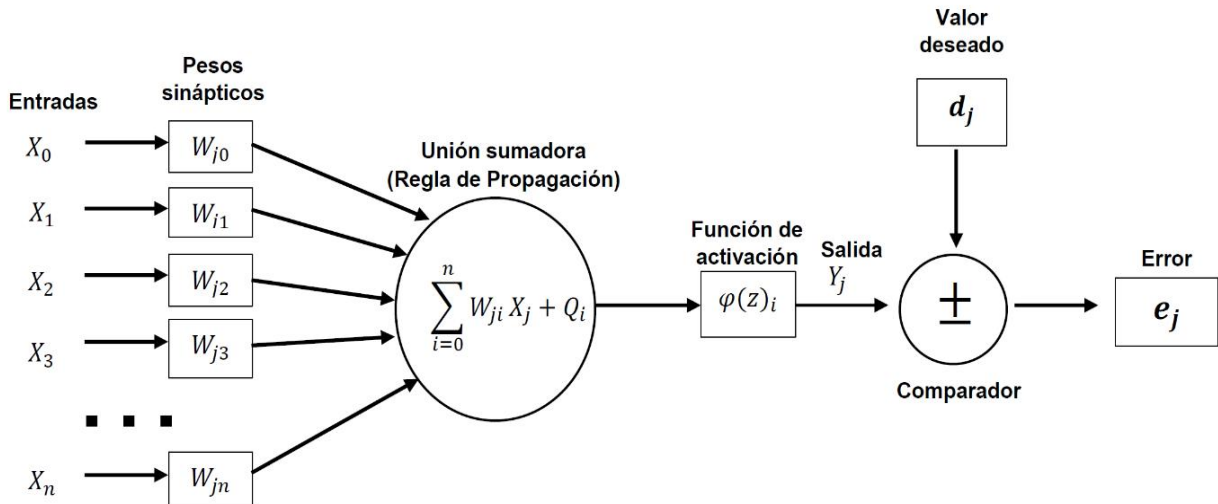


Figura 4.2. Diagrama del método *feed forward backpropagation*.

Los algoritmos de la fase *forward* corresponden a la ecuación 4.1 (regla de propagación) y ecuación 4.2 o 4.3 (función de activación).

Por su parte, la fase *backward* son funciones asociadas al error.

$$e_j = d_j - y_j \quad (4.4)$$

La diferencia entre el valor deseado y el valor de salida entregado por la red neuronal corresponde al error  $e_j$ .

$$\xi = \sum_{j \in A} \frac{1}{2} e_j^2 \quad (4.5)$$

$\xi$  es a la energía del error (instantáneo), donde A es el conjunto de todas las neuronas de la capa de salida de la red neuronal.

$$\Delta W_{ij} = -\eta \cdot \frac{\partial (\xi)}{\partial W_{ij}} \quad (4.56)$$

Se establece que el factor de corrección  $\Delta W_{ij}$  del peso sináptico  $W_{ij}$  es proporcional al cambio instantáneo de la energía del error con respecto al peso sináptico en cuestión, lo que es más menos intuitivo ya que la energía del error está directamente relacionada con alteraciones en  $W_{ij}$ . Notar que el signo negativo responde a la necesidad de aplicar el factor de corrección en el sentido en que la energía del error disminuya. La constante de proporcionalidad en dicha relación  $\eta$  recibe el nombre de tasa de aprendizaje.



Así, el desarrollo matemático converge a la expresión

$$\Delta W_{ij} = \eta \cdot \delta_j \cdot y_j \quad (4.7)$$

donde  $\delta_j$  se define como la gradiente en la neurona j-ésima. Según:

- Neurona j-ésima está en una capa oculta.

$$\delta_j = \varphi'_j(h_j) \cdot \sum_k \delta_k w_{kj} \quad (4.8)$$

donde el índice k indica que es la neurona en la capa inmediatamente siguiente a la capa en la que está la neurona j-ésima.

- Neurona j-ésima está en la capa de salida.

$$\delta_j = e_j \cdot \varphi'_j(h_j) \quad (4.9)$$

Finalmente, y por recursividad, el desarrollo de la ecuación 4.8 tomará una solución del tipo 4.9.

En la Figura 4.3 se ilustra el proceso mediante el cual funcionan las fases del algoritmo *backpropagation*, se indica el recorrido de ida (*forward*) y el de regreso (*backward*), bajo los cuales se produce la propagación de error y se ajusta con el resultado esperado.

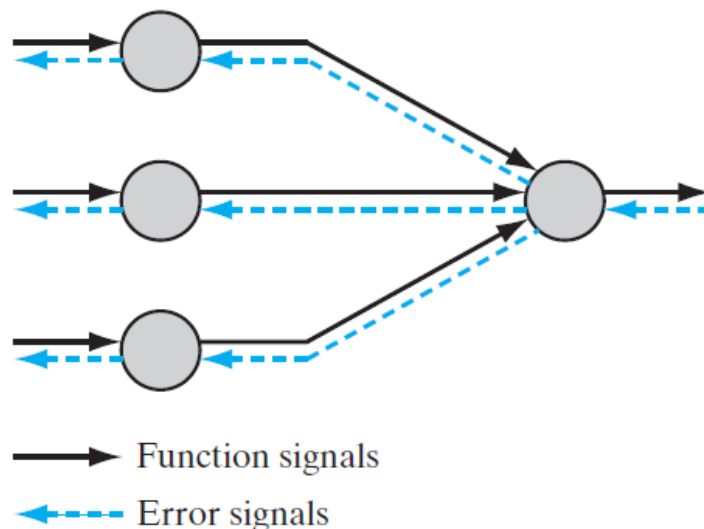


Figura 4.3. Ejemplo ilustrativo de las fases *forward* (negro) y *backward* (azul) del algoritmo *backpropagation* (Haykin, 1999).

Dentro de los algoritmos *feed forward backpropagation* existen distintos tipos que permiten la convergencia de la red neuronal, pero para objetivos de esta metodología el algoritmo ocupado será Levenberg Marquardt.

El algoritmo Levenberg Marquardt permite obtener una aproximación de la matriz de Hesse sin tener que obtenerla (matriz cuadrada de las segundas derivadas parciales de la función de rendimiento).

Así, se tiene que la matriz hessiana  $H$  es la matriz jacobiana  $J$  (primera derivada parcial de la función de rendimiento) producto punto con la matriz jacobiana traspuesta.

$$H = J^T \cdot J \quad (4.10)$$

Si el gradiente (operador diferencial Nabla) de la función es presentado como

$$g = J^T \cdot e \quad (4.11)$$

donde  $g$  es el gradiente,  $J$  la matriz jacobiana que contiene las derivadas de las funciones de errores de la red con sus pesos y  $e$  es un vector de errores de la red, se tendrá una aproximación para obtener la matriz de Hesse sin obtenerla directamente.

$$x_{k+1} = x_k - [J^T + \mu I]^{-1} J^T e \quad (4.12)$$

En este caso,  $x$  es el factor que itera,  $\mu$  es un factor escalar que se determina mediante recursividad, e  $I$  es la matriz identidad.

El objetivo de esta aproximación es desplazar el valor  $\mu$  a cero lo más rápidamente, por lo tanto,  $\mu$  disminuye después de cada paso exitoso. De esta forma la función de rendimiento se reduce siempre en cada paso de la iteración del algoritmo.

#### 4.1.4 Sobreentrenamiento

El proceso de entrenamiento de una red neuronal es, de modo sencillo, encontrar una curva ajustada que representa la respuesta de la red a sucesivas iteraciones de entrenamientos.

Una vez entrenada, la red tiene la capacidad de generalizar, lo que, de manera gráfica, se puede interpretar como la interpolación de datos. Luego, la red responde (clasifica) correctamente a los estímulos (datos) que son similares a las que se ocuparon para entrenar la red.

En algunos casos, cuando los datos ocupados en el proceso de entrenamiento no son del todo correctos, o hay una exageración en el número de neuronas de la capa oculta,

se produce un sobreentrenamiento de la red neuronal, lo que significa que la red solo reconocerá los datos con los que se entrenó, perdiendo la capacidad de generalizar.

Cuando la red pierde la capacidad de generalizar, también pierde la capacidad de clasificar otros datos, aunque tengan características similares.

## **4.2 Metodología de análisis**

Como se mencionó, la metodología que se ocupará será redes neuronales del tipo *Multilayer Perceptron* con el algoritmo *backpropagation*.

Para comenzar el análisis, primero se almacenaron y trataron los datos mediante mapas de formato *shapefile* y *raster* en el software *ArcMap 10.2.2*.

Por su parte, la implementación de las redes neuronales se realizó con el software *MATLAB R216a (MATrix LABoratory)*, que corresponde a un medio de programación integrado con lenguaje propio que tiene como función el tratamiento de datos en forma de matrices, presentación de datos y funciones, además de la creación de algoritmos.

### **4.2.1 Elección de factores para el área de estudio**

Respecto a la literatura y observaciones de terreno los factores escogidos arbitrariamente para la evaluación de susceptibilidad fueron: elevación, pendiente, geología, dirección de ladera, curvatura media, distancia a ríos, distancia a cursos de agua, distancia a fallas, distancia a lineamientos y radiación solar anual.

### **4.2.2 Tratamiento de factores**

La elevación se obtuvo directamente del Modelo de Elevación Digital o *Digital Elevation Model* en inglés (MED y *DEM*); son sinónimos y se pueden referir a ellos indistintamente.

La pendiente, curvatura, aspecto y radiación solar, se obtuvieron a partir del *DEM*, con las herramientas que son provistas por *ArcMap*: *Slope*, *Curvature*, *Aspect* y *Area Solar Radiation*, respectivamente.

En tanto, los cursos de agua, ríos y fallas fueron obtenidos de la DGA y el SERNAGEOMIN. Por su parte, los lineamientos fueron creados, todos ellos en formato *shapefile*.

Los mapas *raster* de distancia se crearon a partir de los archivos mencionados, con la herramienta *Euclidean Distance* de *ArcMap*.

La geología (Figura 3.19) se convirtió a formato *raster* y se otorgó un número entre 1 y 10, aleatoriamente a las formaciones.

### 4.2.3 Normalización de factores

Una vez que todos los archivos se encontraban en formato *raster*, se procedió a normalizarlos para que se encontraran con valores entre 0 y 1. Esto favorece el funcionamiento de la red neuronal.



La normalización de datos se realizó bajo el siguiente criterio:

$$X_n = \frac{X_i - V_{min}}{V_{máx} - V_{min}} \quad (4.13)$$

siendo  $X_n$  valor normalizado,  $X_i$  valor no normalizado,  $V_{min}$  valor mínimo,  $V_{máx}$  valor máximo.

Los mapas de factores normalizados son datos continuos entre 0 y 1. Las tonalidades de verde son valores cercanos a 0, tonalidades de amarillo valores cercanos al valor medio 0,5, y tonalidades de roca son valores cercanos a 1 (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Equivalencia de normalización y colores.

Valores	Valor Normalizado	Color
Valor mínimo	0,0	
Valór máximo	1,0	

Además, para tener una mejor comprensión de los mapas normalizados, se presentan los mapas categorizados, pero se recalca que no tienen una influencia en el análisis, es exclusivamente para tener una comparación entre los mapas normalizados.

### 4.2.4 Mapas de factores normalizados

Bajo el criterio señalado en el punto anterior se normalizaron los mapas, los que se presentan a continuación.

#### 4.2.4.1 Elevación

La elevación corresponde a la distancia vertical que tiene un determinado punto considerando el nivel del mar como origen y se mide en metros sobre el nivel del mar (m s.n.m. (Figura 4.4 y Figura 4.5).

Muchos autores señalan que existe una fuerte evidencia de que la elevación es un indicador de la susceptibilidad de remociones en masa (Duman *et al.*, 2006; Gokceoglu *et al.*, 2005; Pachauri y Pant, 1992), ya que ocurren, generalmente en zonas de elevaciones intermedias puesto que las laderas tienden a estar cubiertas por un suelo fino que lo hace propenso a removerse (Dai y Lee, 2002).



Por su parte, las remociones son menos propensas a ocurrir a alturas muy elevadas debido a que las rocas solo están expuestas debido a que su condición de corte es más alta (Dragičević *et al.*, 2015).

En las elevaciones más bajas, las pendientes suelen ser suaves y están cubiertas por un coluvio más espeso. La probabilidad de que se produzcan una remoción en masa es menor a menos que el nivel freático se eleve y genere inestabilidad (Dragičević *et al.*, 2015).

Otros autores plantean que la elevación no tiene una contribución directa con las remociones en masa, sin embargo, se relaciona con parámetros como erosión, procesos de meteorización y precipitaciones. Además, contribuye a la manifestación de estos procesos e influye en todo el sistema (Ercanoglu *et al.*, 2004; Rozos *et al.*, 2011).

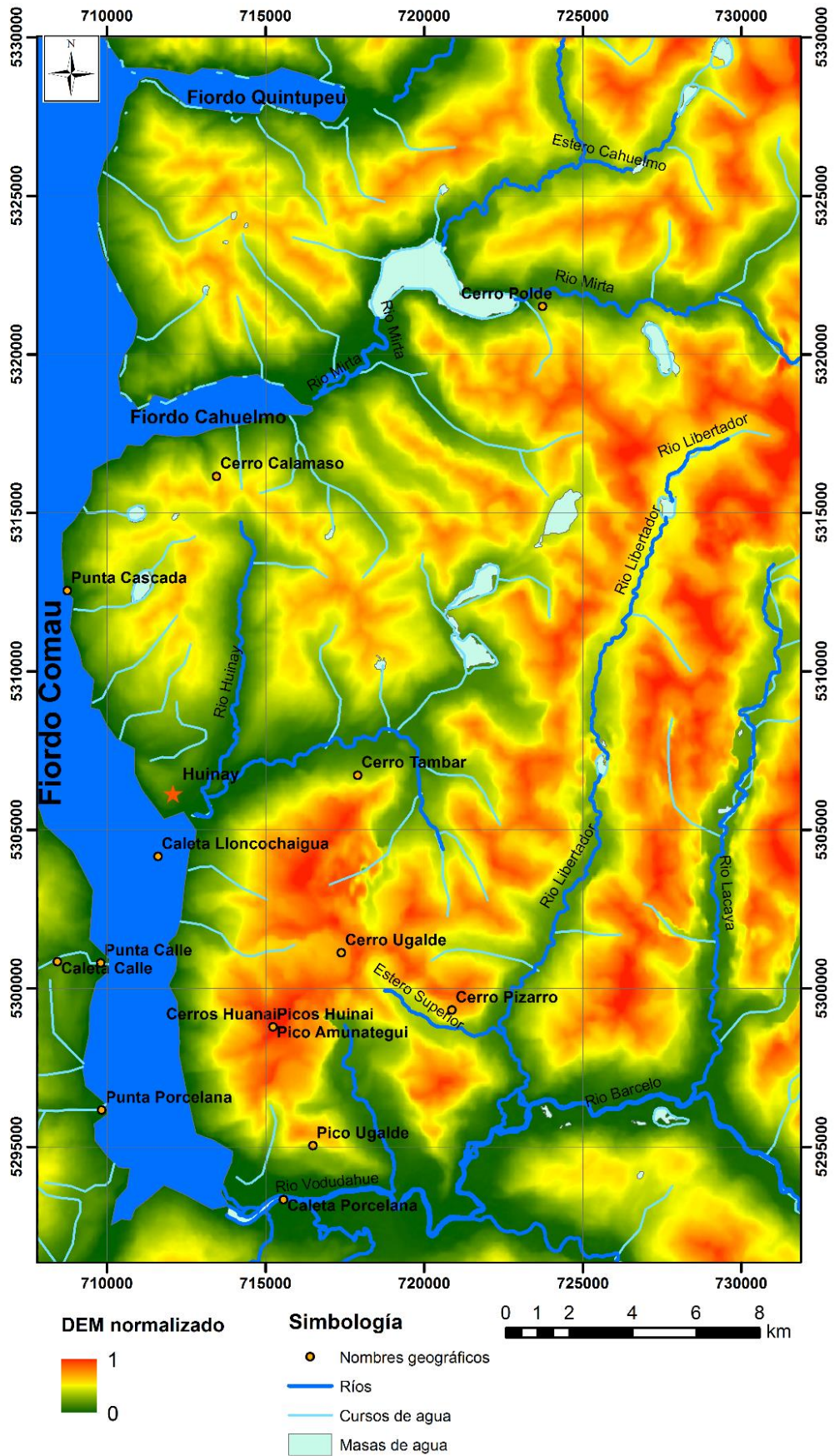


Figura 4.4. Modelo de elevación digital normalizado, basado en la Figura 3.10.



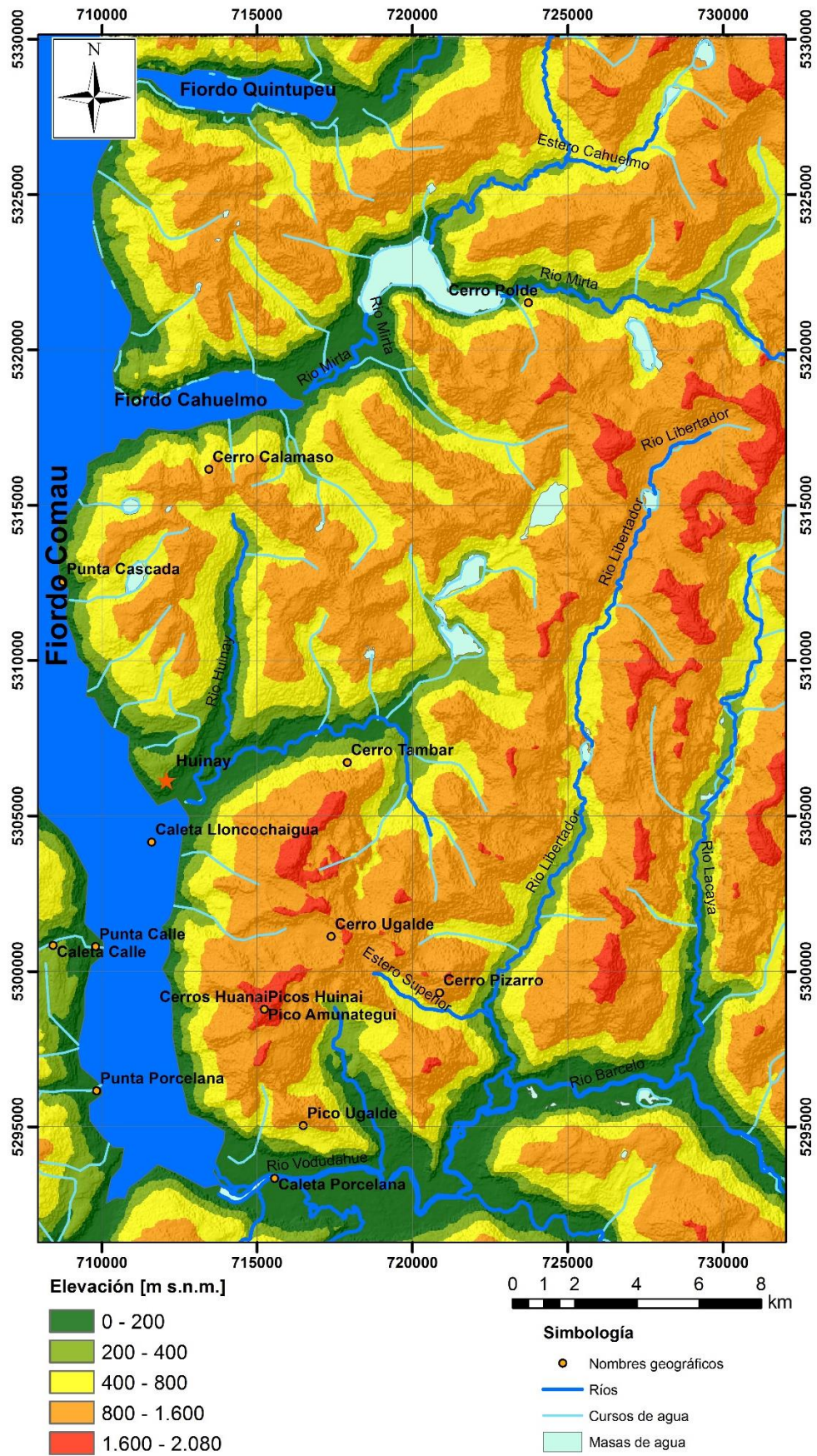


Figura 4.5. Elevación categorizada.

#### 4.2.4.2 Pendiente

La pendiente es ampliamente utilizada en estudios de susceptibilidad de remociones en masa, ya que está directamente conectada con el movimiento de los materiales deslizantes (Dai *et al.*, 2001, Lee y Min, 2001, Van Westen *et al.*, 2003). Específicamente, las tensiones de cizalle en el material aumentan con la pendiente y se espera que, generalmente, las remociones ocurran en las laderas más escarpadas (Dragičević *et al.*, 2015).

Por lo tanto, se espera que a medida que aumenta la pendiente aumenta también la probabilidad de generar remociones en masa (Figura 4.6 y Figura 4.7).



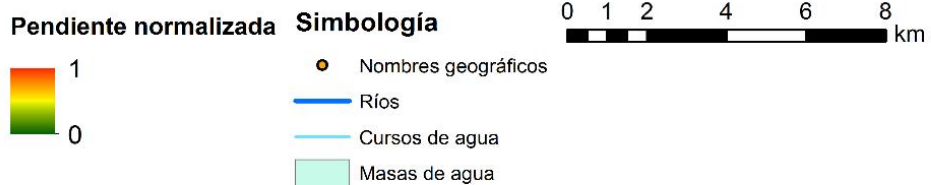
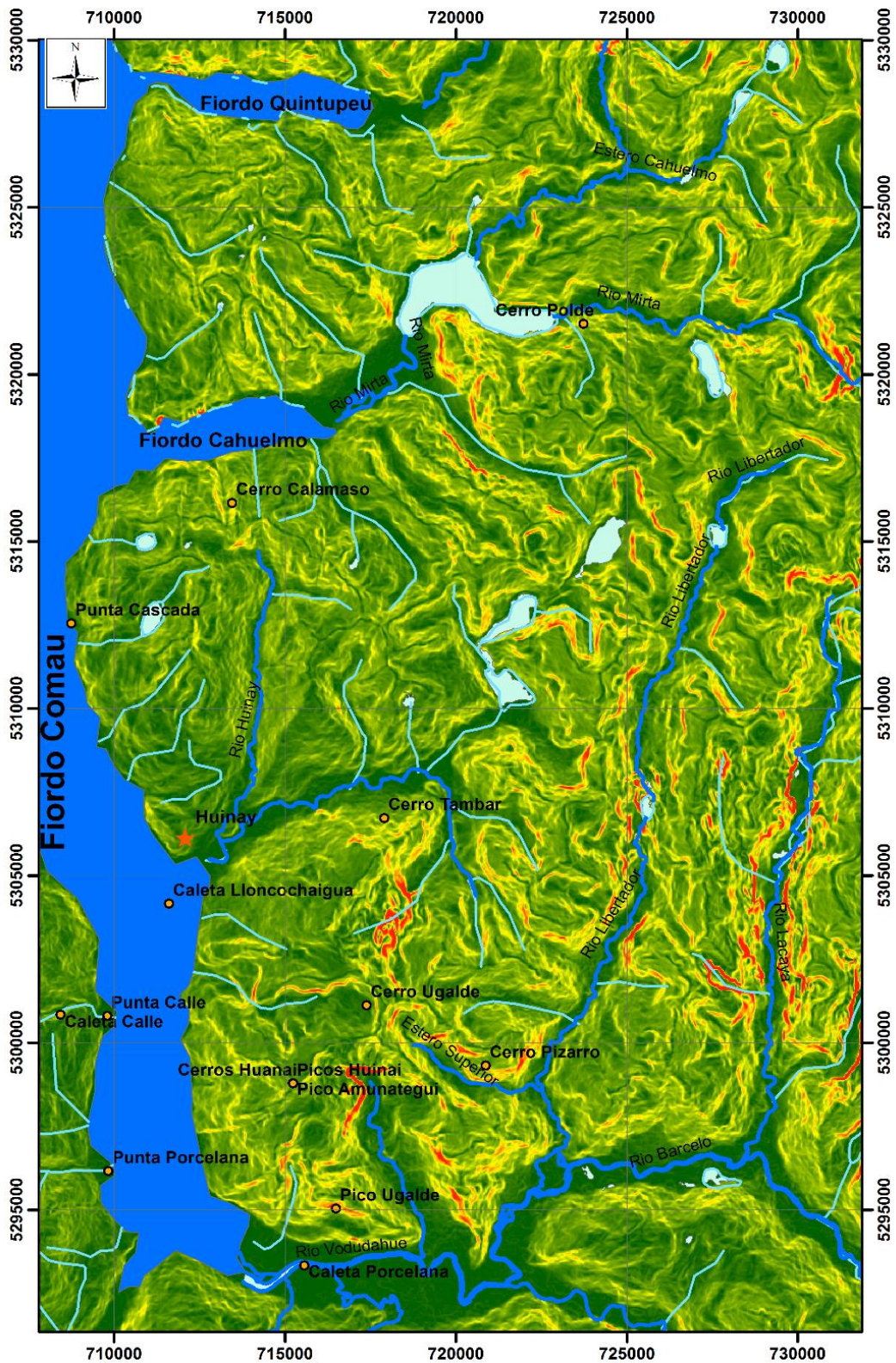


Figura 4.6. Pendiente normalizada, basado en la Figura 3.11.



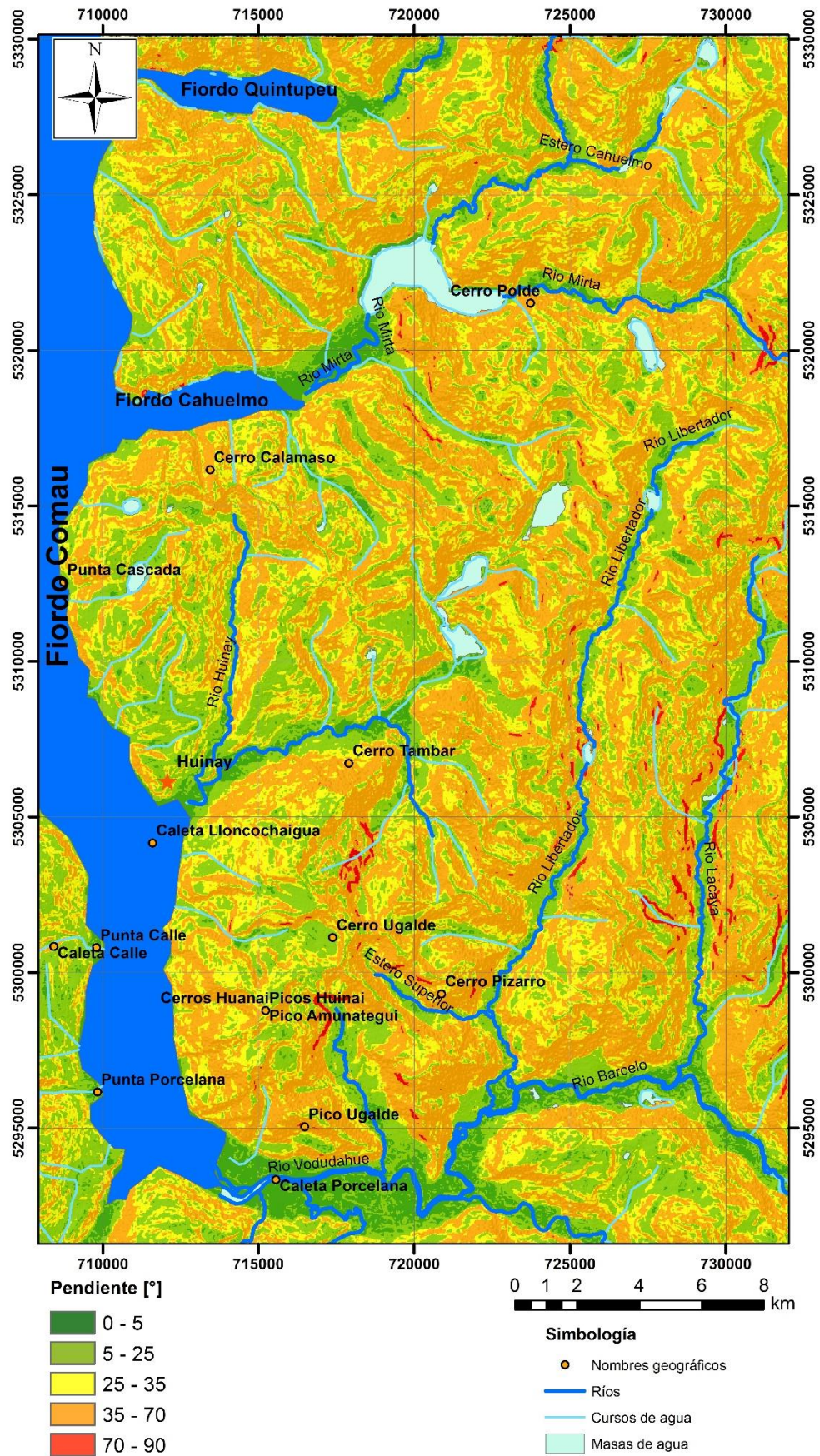


Figura 4.7. Pendiente categorizada.

#### 4.2.4.3 Aspecto u orientación de ladera

La orientación de la ladera afecta la superficie de manera indirecta pues el aspecto determina la exposición a precipitaciones y al sol, y por lo tanto la propensión a la vegetación, lo que a su vez afecta la estabilidad del suelo (Carrara *et al.*, 1991) (Figura 4.8 y Figura 4.9).

Como consecuencia, la orientación de la ladera puede considerarse un sustituto de los datos sobre atributos del suelo que pueden no estar disponibles (Dragičević *et al.*, 2015).

Es así como el aspecto puede ejercer un control climático, en las condiciones de humedad. Esto se debe a la exposición que tienen al sol, por lo que se espera que cuan mayor sea la exposición al sol, menor será la humedad, por tanto, menor será la potencialidad de generar una remoción en masa, ya que el agua tiene un importante rol desestabilizante.



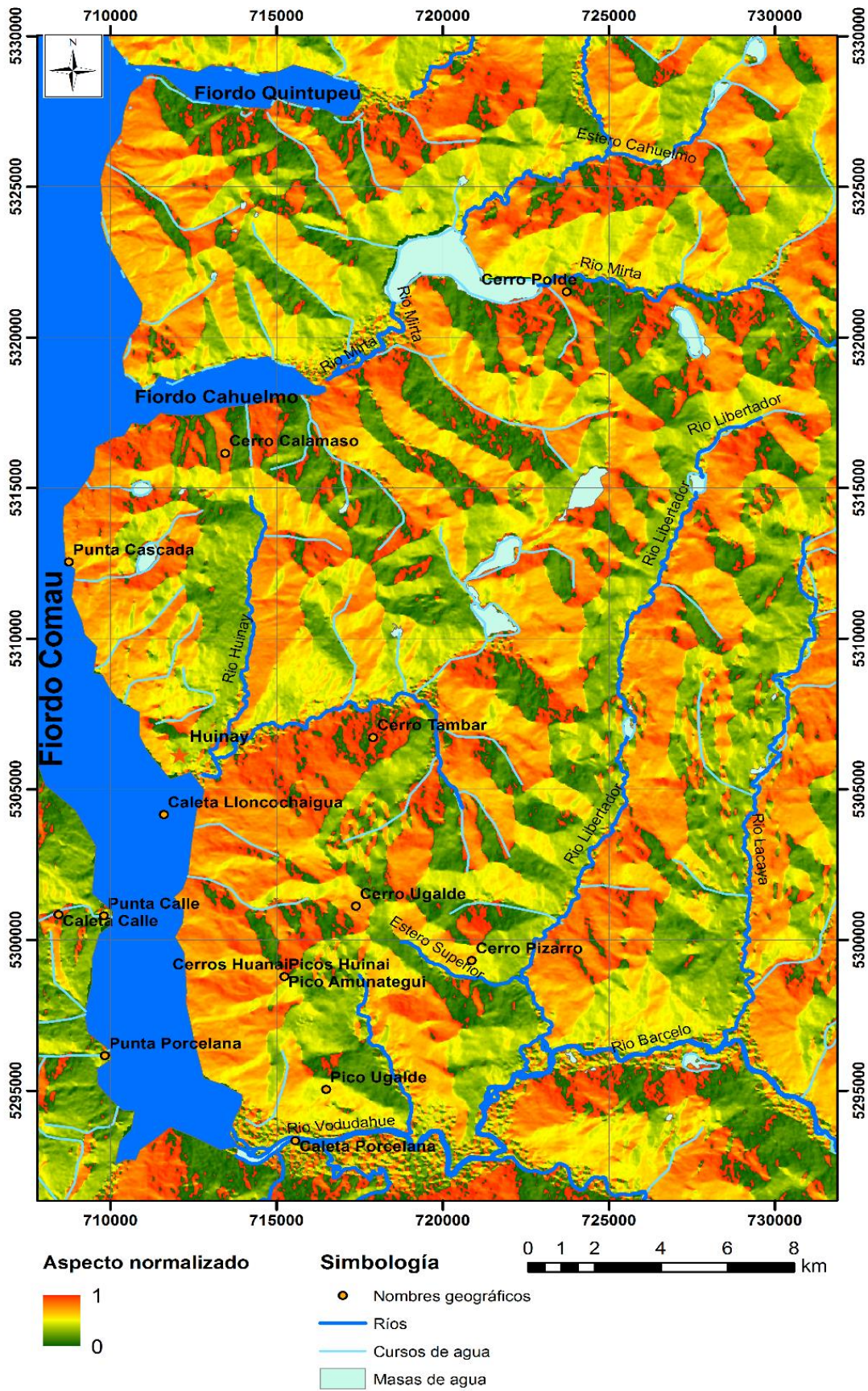


Figura 4.8. Orientación de ladera normalizada, basado en la Figura 3.11.



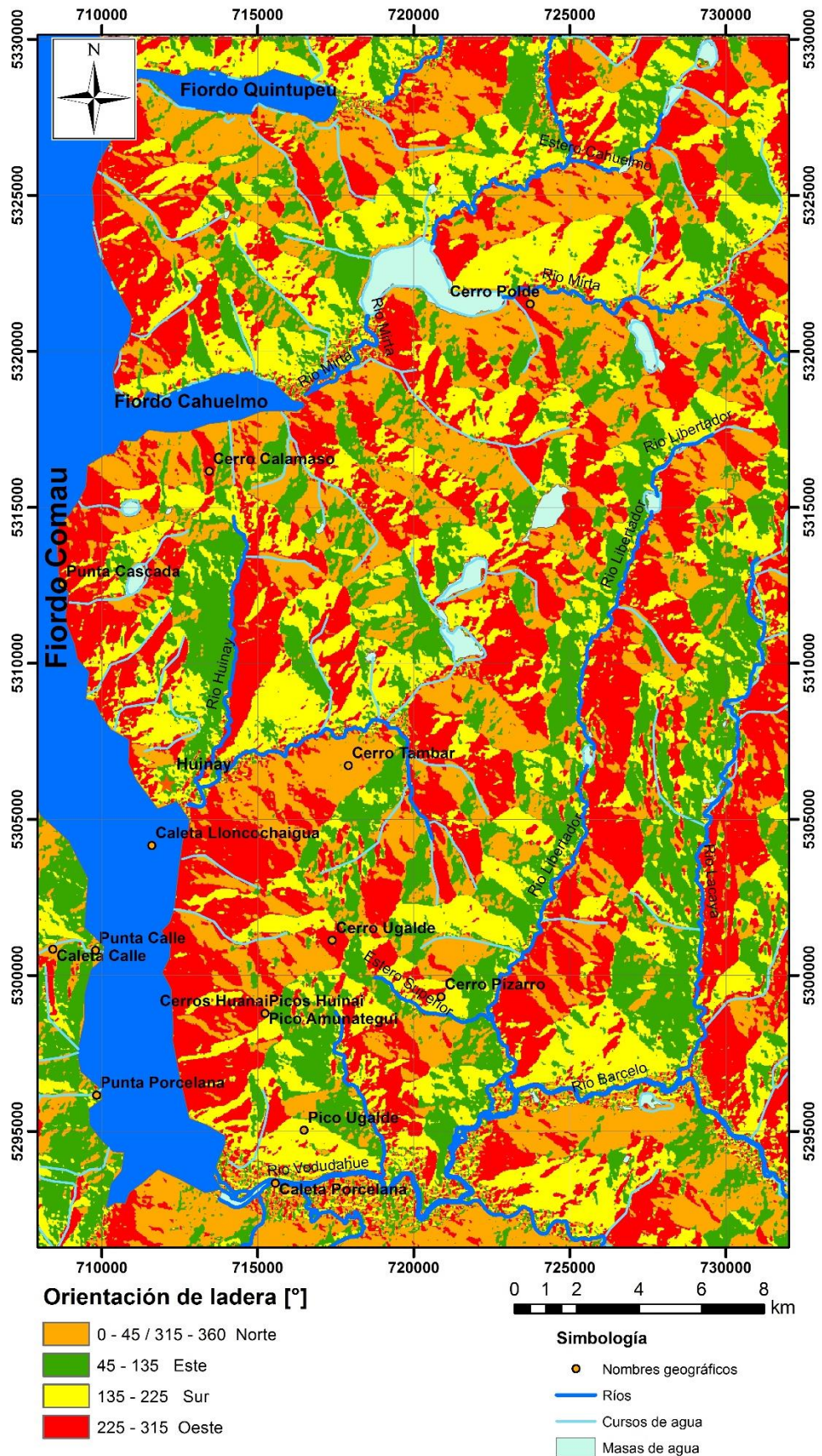


Figura 4.9. Orientación de ladera categorizada.

#### 4.2.4.4 *Curvatura media*

La curvatura corresponde al tipo o variación de la pendiente media, entre el sentido horizontal y vertical. La curvatura controla las zonas de acumulación o propagación de agua, lo que influye directamente en el grado de humedad y/o saturación del suelo o sedimento (Figura 4.10 y Figura 4.11).



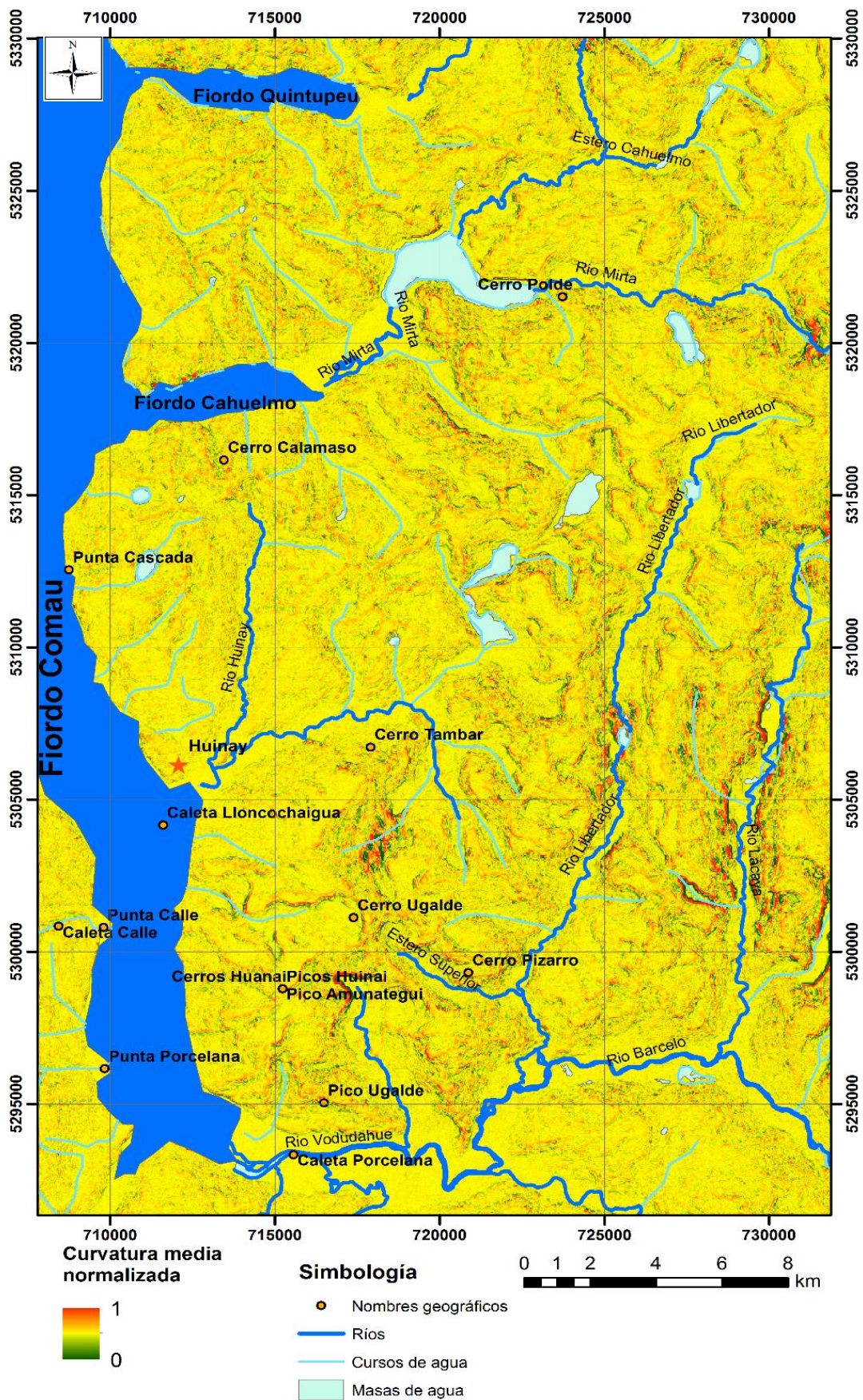


Figura 4.10. Curvatura media normalizada.



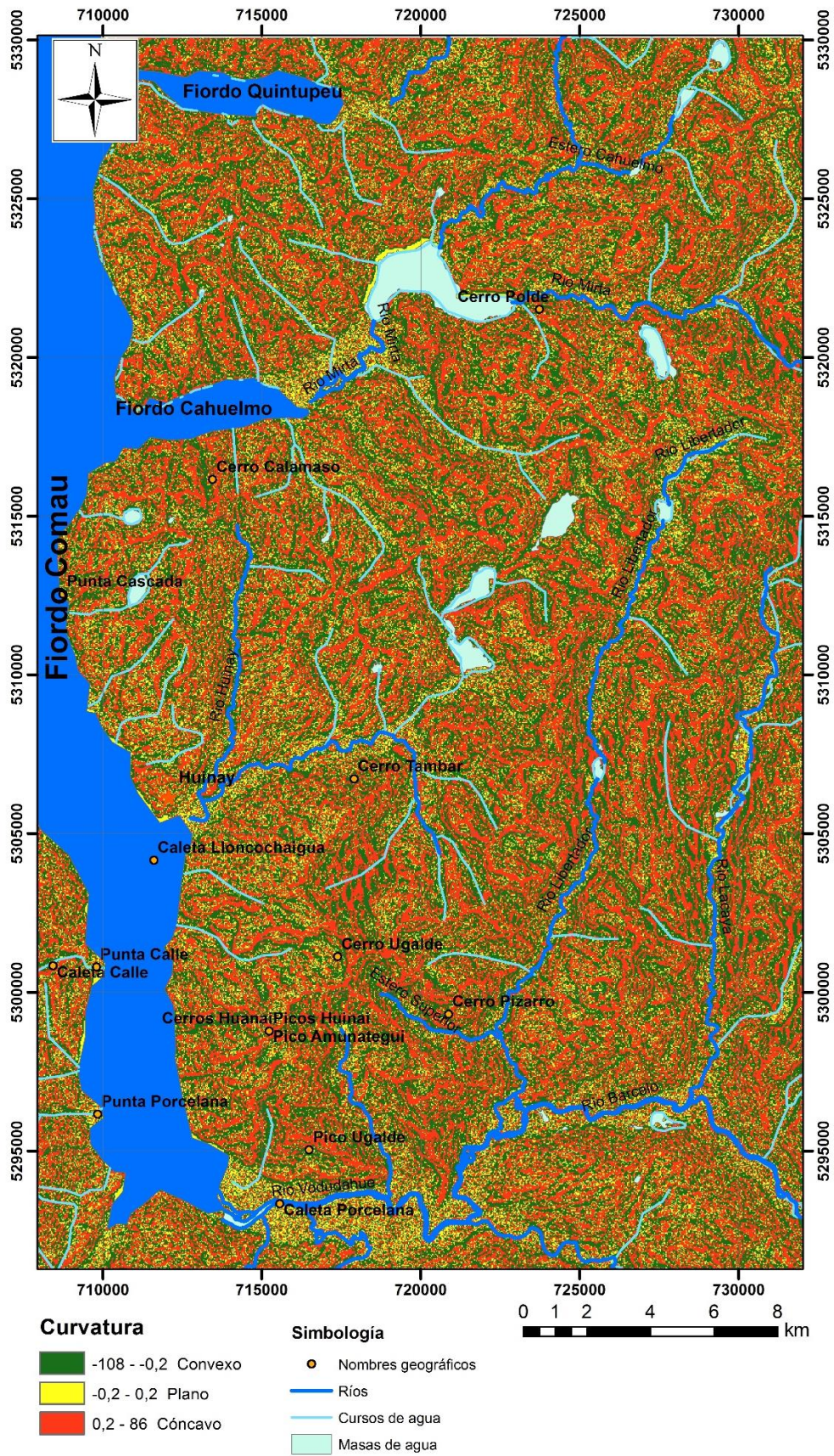


Figura 4.11. Curvatura media categorizada.



#### 4.2.4.5 Distancia a redes de drenaje

Las remociones en masa se asocian con la proximidad a redes de drenaje porque el terreno superficial puede ser modificado por la erosión que producen los ríos y cursos de agua, y también puede producir un socavamiento en los pies de las laderas (Dai y Lee, 2002).

Por otra parte, las redes de drenaje pueden elevar el nivel freático de áreas circundantes, pudiendo disminuir la estabilidad de las laderas. Por lo tanto, se reconoce que existen menos remociones en masa a medida que aumenta la proximidad a redes de drenaje (Dragičević *et al.*, 2015).

Para este caso se realizó una subdivisión entre distancia a cursos de agua (Figura 4.12 y Figura 4.13) y distancia a ríos (Figura 4.14 y Figura 4.15), pues la envergadura y densidad de estos son muy distintas. Por una parte, se tienen cerca de seis ríos de gran caudal, mientras que hay más de 100 cursos de agua, algunos de los cuales poseen un menor caudal permanente, y otros poseen un caudal intermitente que sólo se activa en periodos de prolongadas e intensas lluvias. Por lo mencionado, se consideró que el efecto de los dos tipos es también diferente.

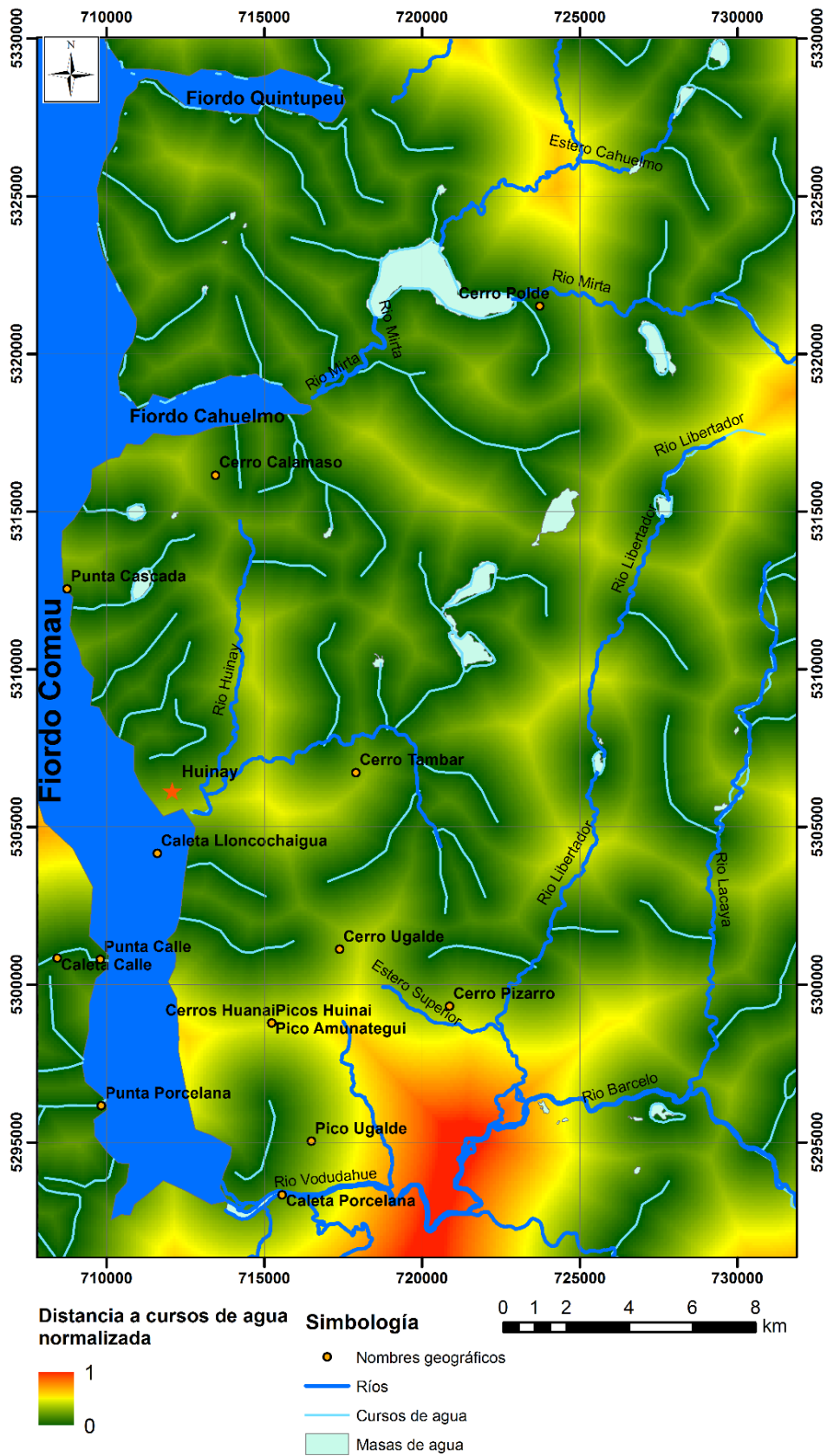


Figura 4.12. Distancia a cursos de agua normalizada, basado en la Figura 3.19.

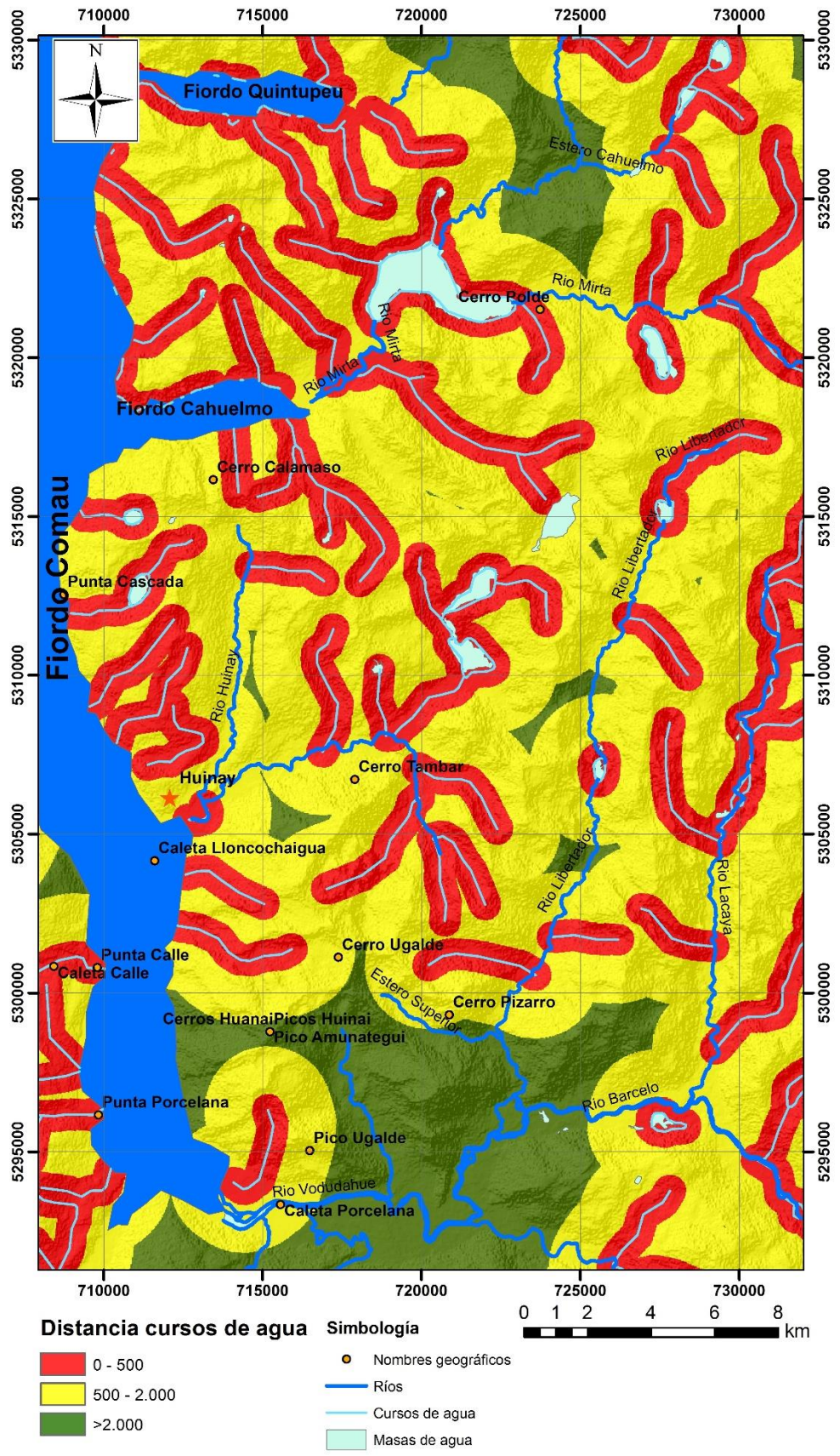


Figura 4.13. Distancia a cursos de agua categorizada.



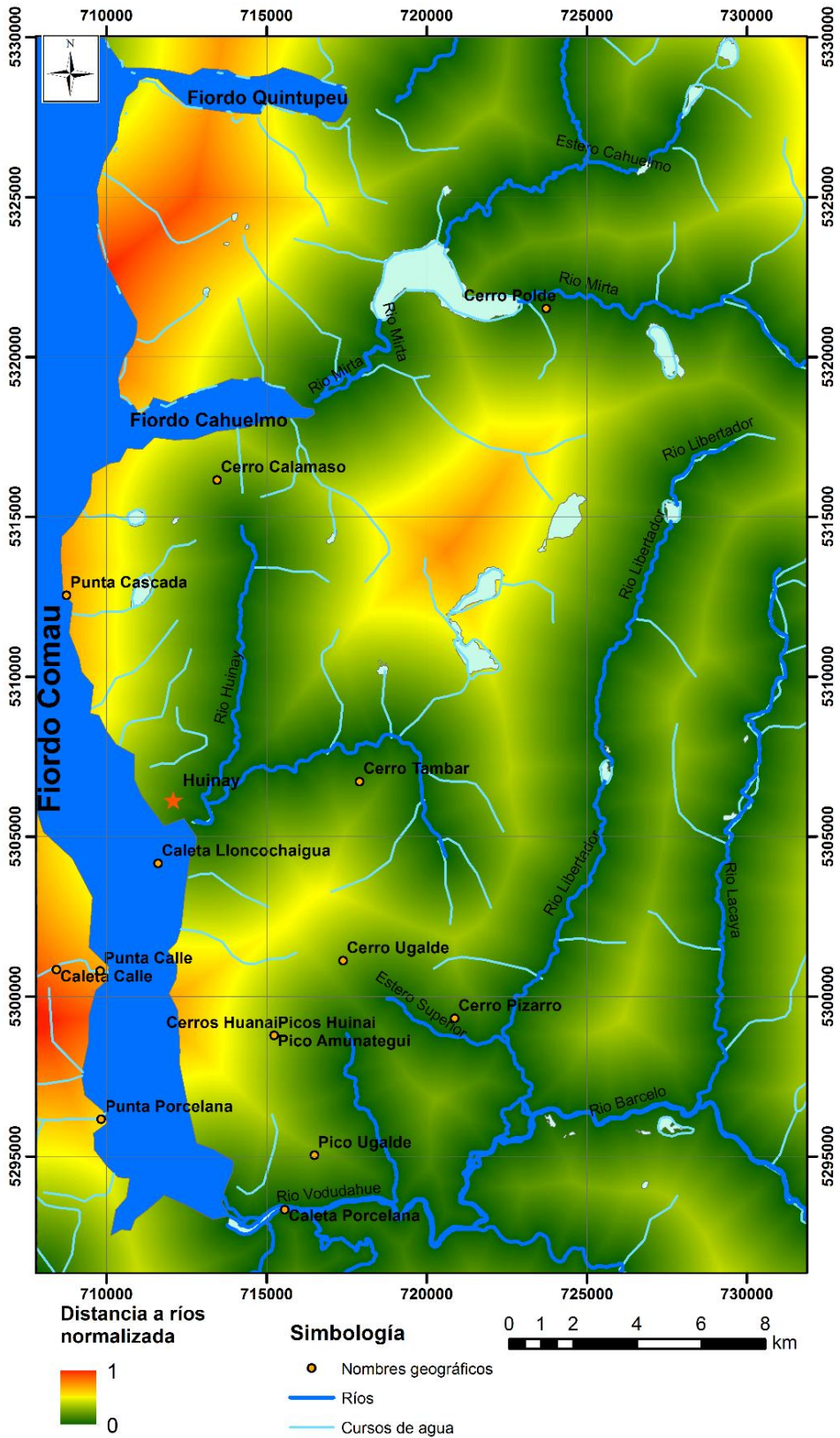


Figura 4.14. Distancia a ríos normalizada, basado en la Figura 3.19.



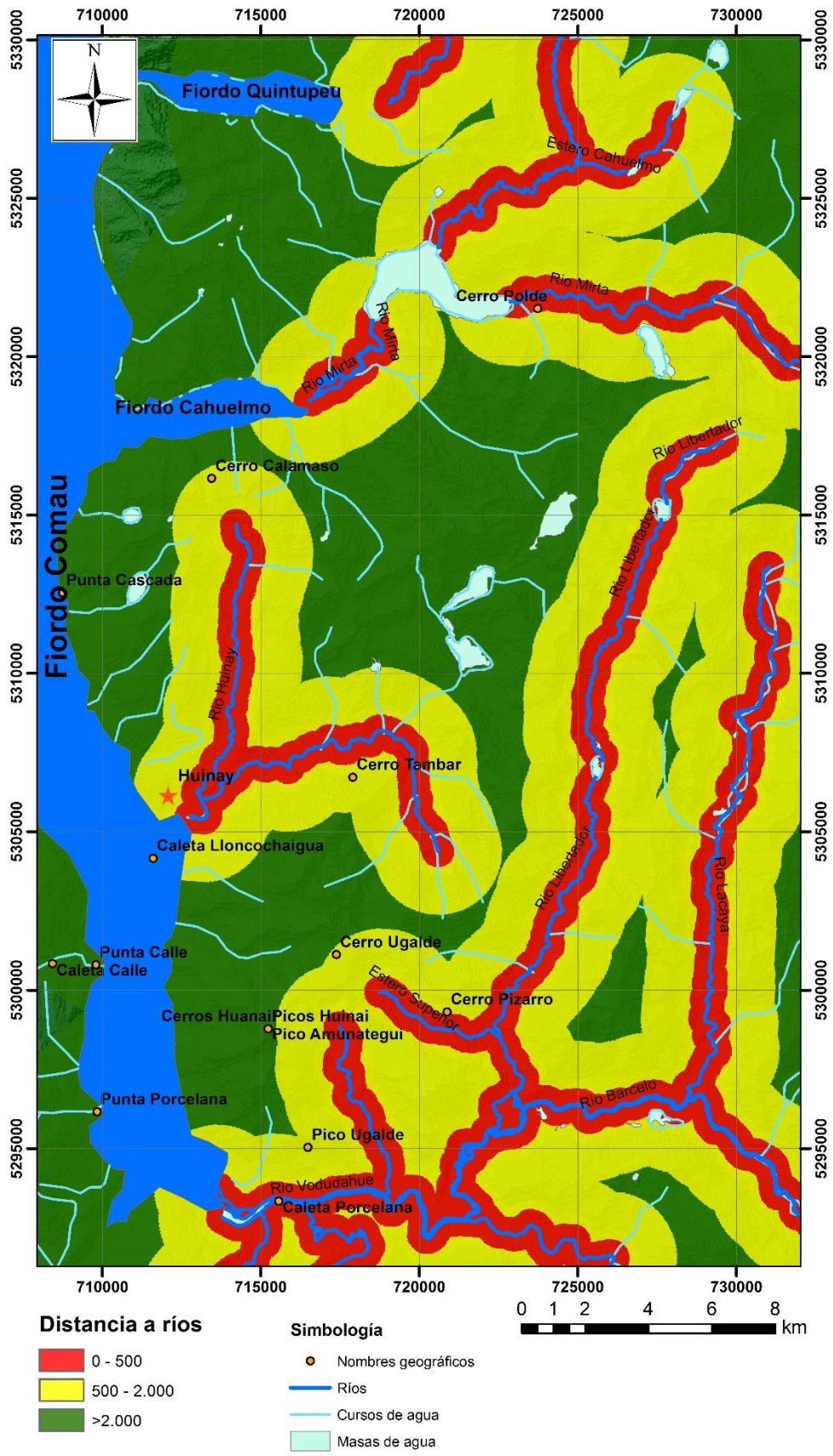


Figura 4.15. Distancia a ríos categorizada.

#### *4.2.4.6 Distancia a fallas y lineamientos*

Las áreas cercanas a fallas y lineamientos pueden ser afectadas por fracturamiento, erosión y meteorización asociada a la actividad de las mismas, así también, por procesos de alteraciones de fluidos hidrotermales que pueden ascender los planos de fallas.

Corresponde a la distancia que existe entre un punto determinado y la falla o lineamiento más cercana. Para este caso, se subdividió entre fallas reconocidas y mapeadas en la literatura (Figura 4.16 y Figura 4.17), y lineamientos que corresponden a fotointerpretación y observaciones de terreno (Figura 4.18 y Figura 4.19) y, por lo tanto, fueron de elaboración propia para esta metodología.

Además, las fallas presentes en la zona de estudio tienen cercanía con fallas de gran envergadura como lo es ZFLO, y pueden tener una incidencia distinta en la susceptibilidad respecto a los lineamientos que son de menor envergadura y locales.

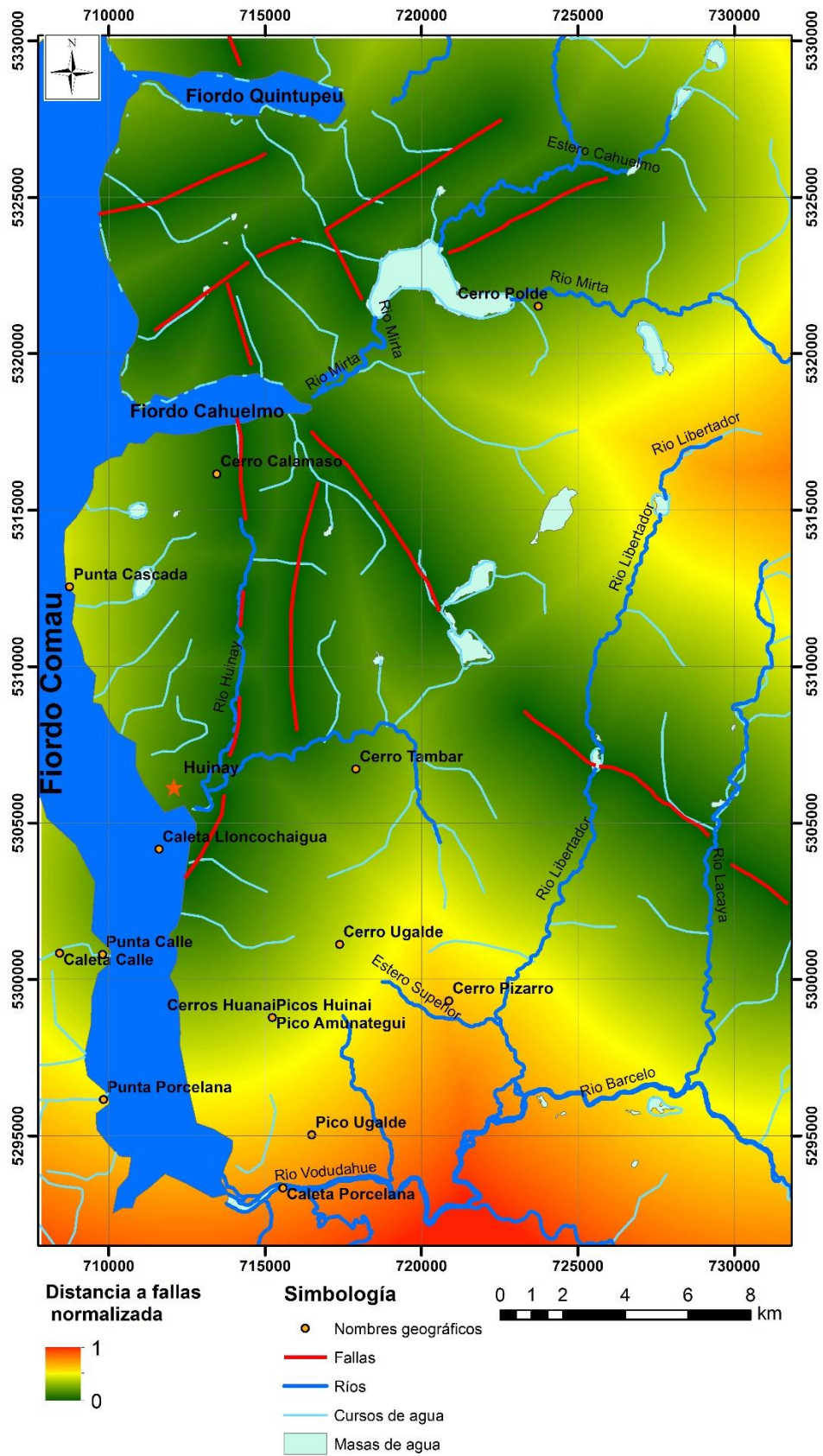


Figura 4.16. Distancia a fallas normalizada, basado en la Figura 3.49.



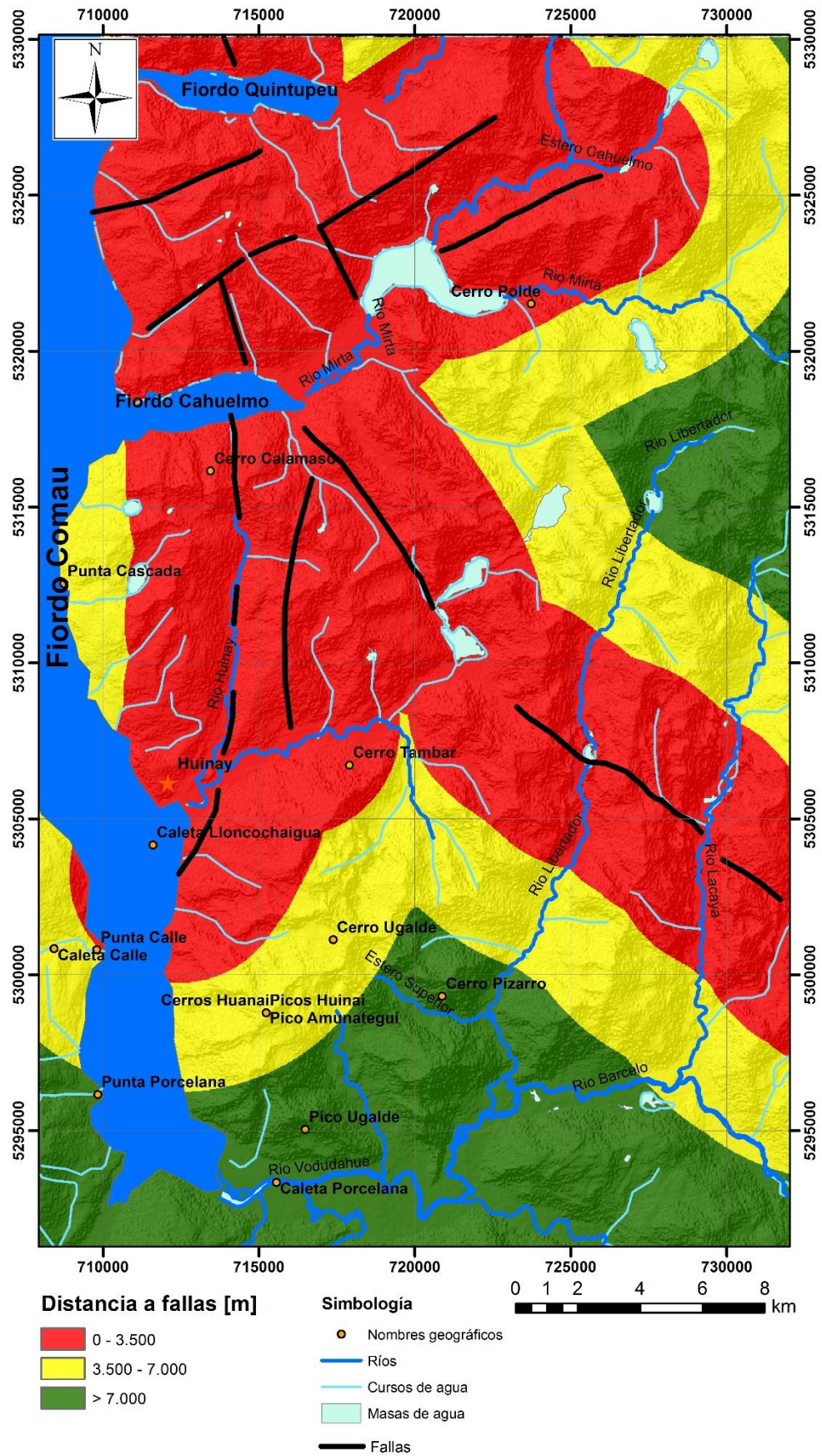


Figura 4.17. Distancia a fallas categorizada.



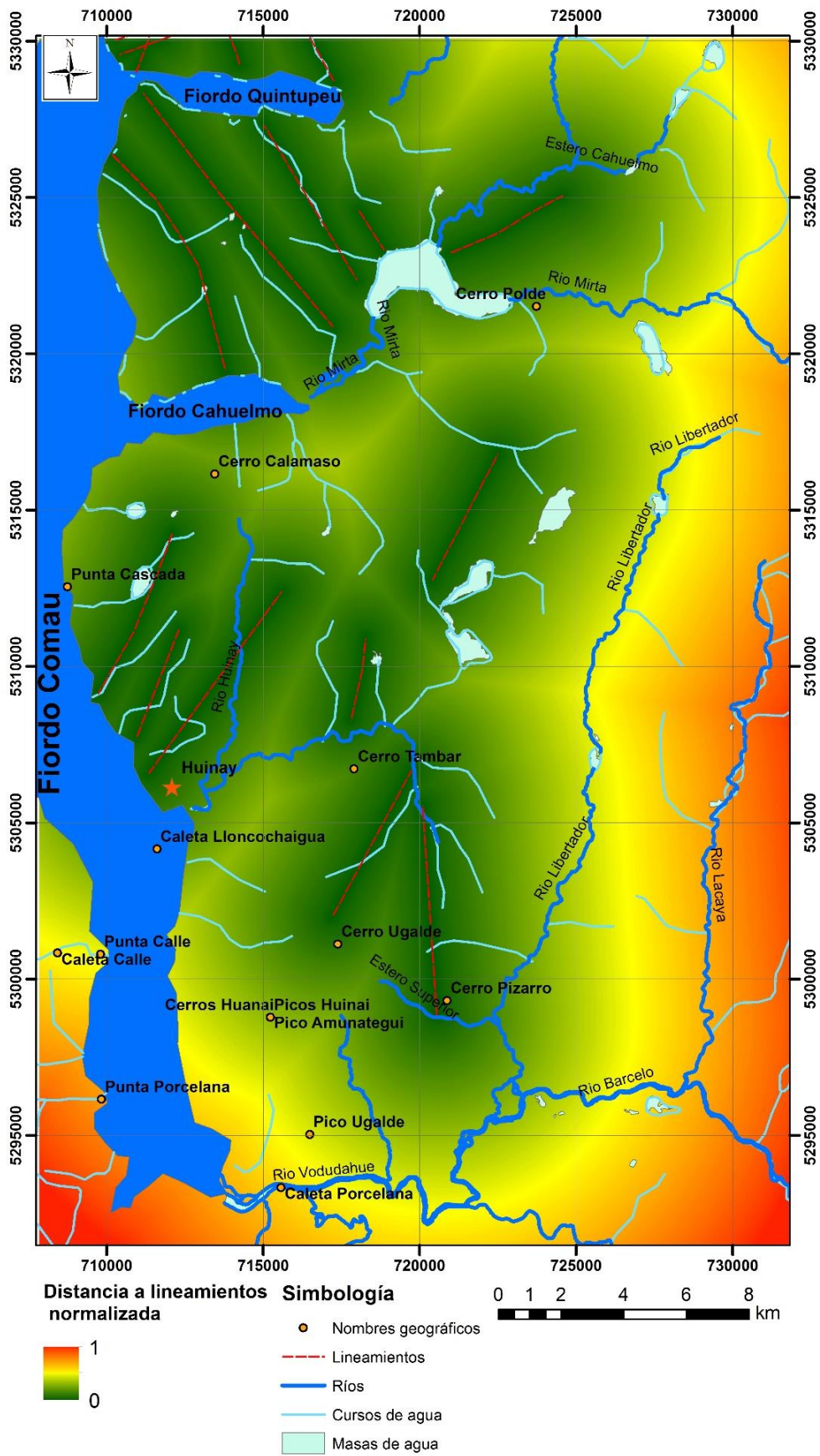


Figura 4.18. Distancia a lineamientos normalizada, basado en la Figura 3.49.

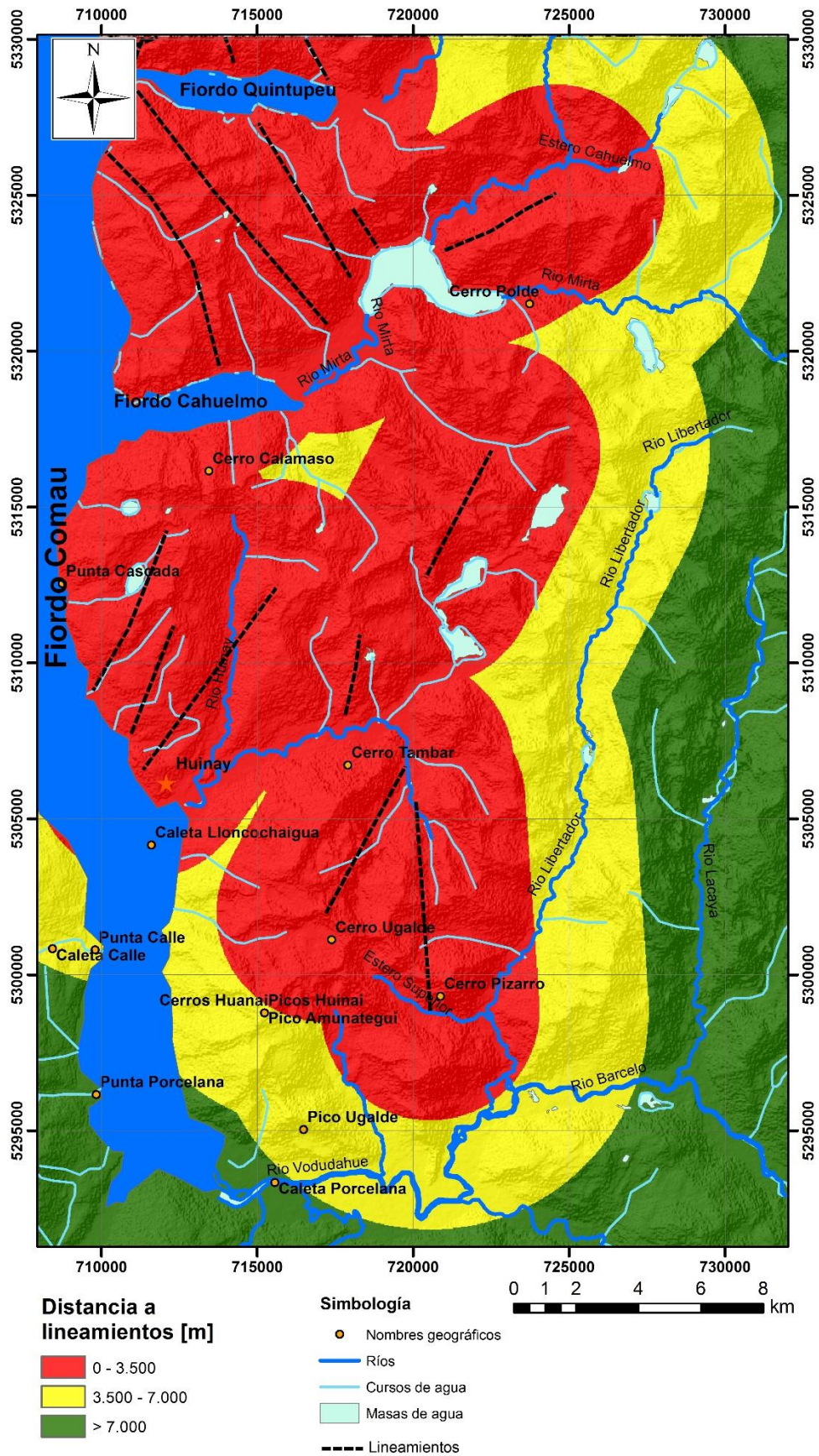


Figura 4.19. Distancia a lineamientos categorizada.

#### 4.2.4.7 Geología

La formación geológica puede favorecer o disminuir la susceptibilidad a las remociones en masa, pues su composición, litología, estructuras internas (estratificación, gradación, foliación, plegamiento, etc.), relaciones de contacto, edad, meteorización, alteraciones y tipo de depósitos, determinan la estabilidad de las laderas.

La normalización de la geología, se determinó dándole un valor correlativo a las formaciones, para luego normalizarlas (Tabla 4.3).

Tabla 4.3. Normalización geología.

<b>Rango</b>	<b>Valor</b>	<b>Valor Normalizado</b>
Q1	0	0
Jg	1	0,1
Qf	2	0,2
PzTr4(c)	3	0,3
PTrg	4	0,4
PzTr4(a)	5	0,5
Mg	6	0,6
Kg	7	0,7
Pl1m	8	0,8
Qft	9	0,9
Qfd	10	1



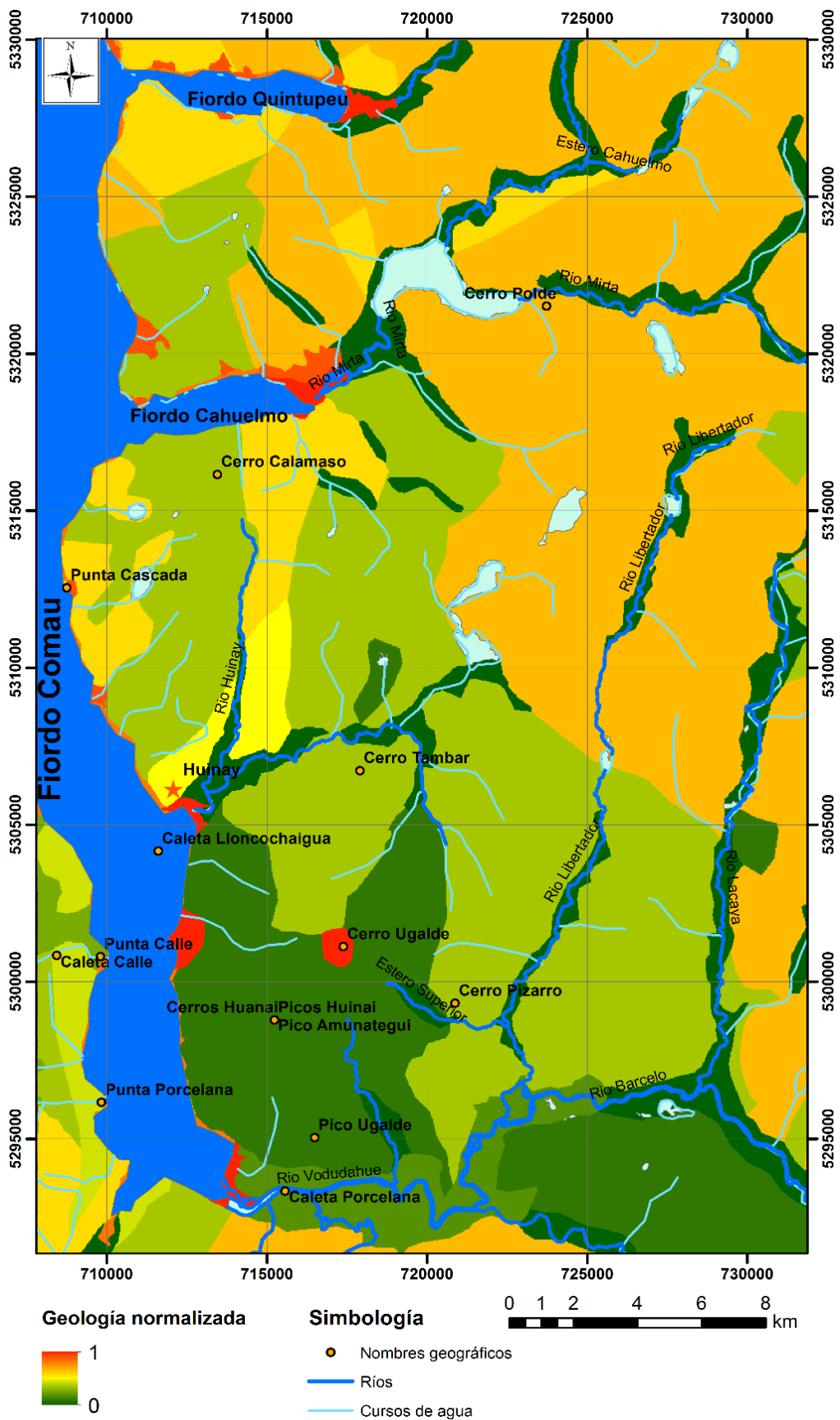


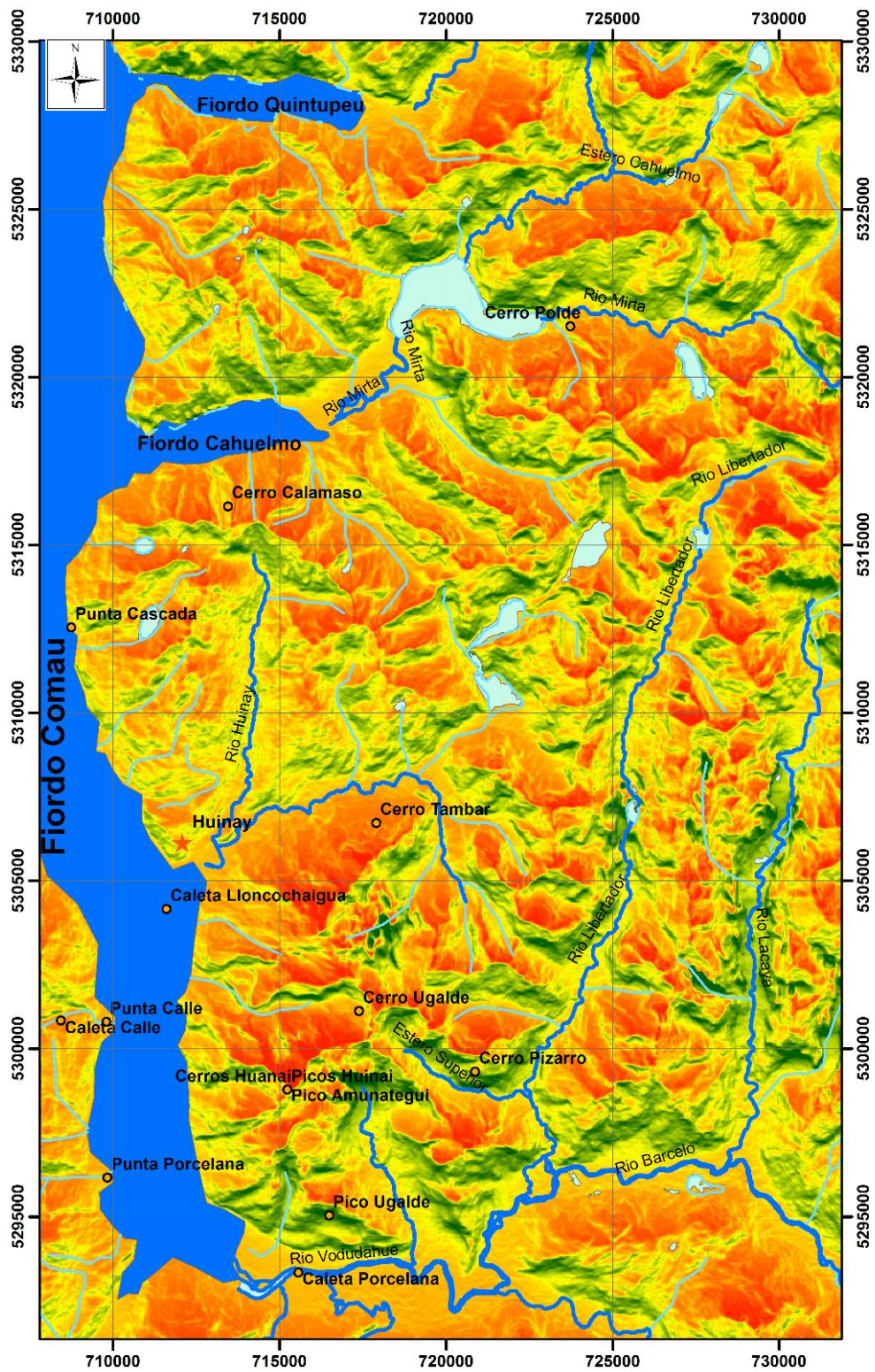
Figura 4.20. Geología normalizada, basada en la Figura 3.19.



#### 4.2.4.8 Radiación solar anual

La radiación solar es la energía emitida por el sol en forma de radiación electromagnética que llega a la atmósfera. La energía que efectivamente llega a la tierra en un año es la radiación solar anual y se mide en superficie horizontal (Figura 4.21 y Figura 4.22).

La radiación influye en los niveles de humedad del material disminuyendo la estabilidad al aumentar la humedad, y se mide en vatios por metro cuadrado ( $\frac{w}{m^2}$ ).



Radiación normalizada



Simbología

- Nombres geográficos
- Ríos
- Cursos de agua
- Masas de agua

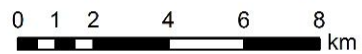


Figura 4.21. Radiación solar normalizada.



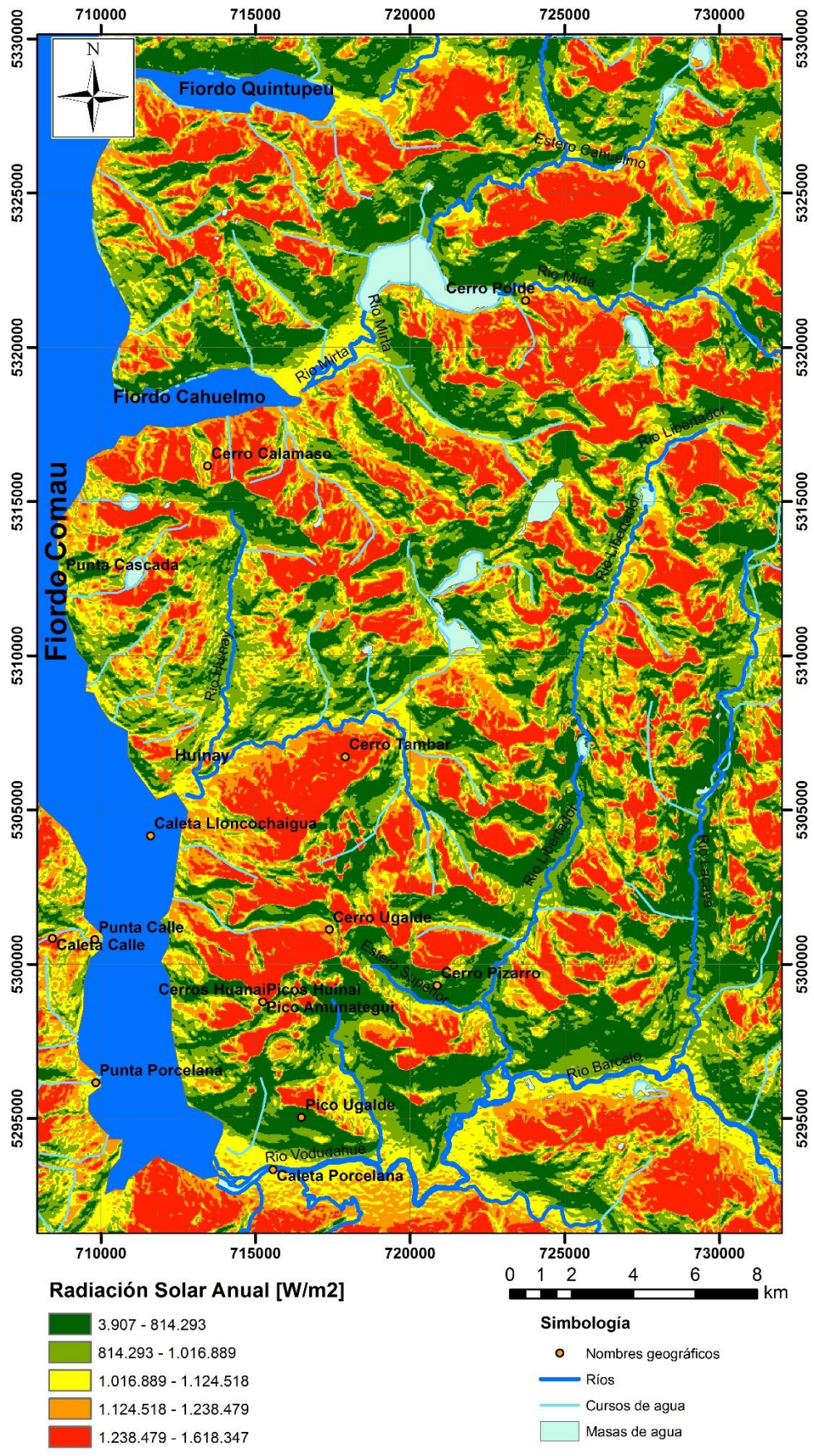


Figura 4.22. Radiación solar anual categorizada.

## 4.2.5 Determinación de puntos de información

Se determinaron dos tipos de puntos de información: por una parte, todos los puntos bajo los cuales ocurrieron remociones en masa, y por otra, todos los puntos en los que no pueden ocurrir remociones en masa.

### 4.2.5.1 Puntos de remociones en masa (PRM)

Para cada depósito de remoción en masa que fue mapeada, adicionalmente, se mapearon sus zonas de generación, los que fueron ingresados a *ArcMap* y luego transformados a puntos.

De este modo se tuvo 730 puntos, los que representan las condiciones bajo las que se generaron RM. Estas condiciones corresponden a los factores determinados en el punto 4.3.1, que en la jerga de inteligencia computacional son llamadas características.

### 4.2.5.2 Puntos libres de remociones en masa (PLRM)

Las características bajo las cuales no se generaron remociones en masa fueron complejas de definir. Para esto, el criterio ocupado corresponde a zonas de pendiente planas, conos de deyección, depósitos fluvio-torrenciales y fluvio-deltaicos, ya que, por las observaciones de terreno y fotointerpretación, las zonas mencionadas no cumplían con las condiciones para generar remociones en masa.

Estos puntos entregan las características bajo las cuales no ocurren remociones en masa a la red neuronal.

## 4.2.6 Matriz de características

Con el uso de la herramienta *Extract Multi Values to Point* de *ArcMap*, se extrajo el valor de los mapas *raster* (elevación, pendiente, aspecto, curvatura, distancia a redes de drenaje, ríos, fallas, lineamientos, radiación solar anual y geología) para cada PRM y PLRM.

Luego, se extrajo su tabla de atributos y se creó una matriz de 10 columnas con los datos de los PRM y PLRM (Tabla 4.4).



Tabla 4.4. Extracto de matriz de características con los valores normalizados.

DEM	ASPECTO	RADIACION	CURVATURA	PENDIENTE	GEOLOGIA	CURSOS	RIOS	FALLAS	LINEAMIENTOS
0,49087	0,72773	0,64547	0,56153	0,04816	0,13333	0,14746	0,28318	0,48492	0,45338
0,53750	0,74370	0,56598	0,55925	0,09479	0,13333	0,13108	0,29552	0,48071	0,44489
0,60048	0,67700	0,46771	0,57069	0,09814	0,13333	0,11586	0,31021	0,47412	0,43545
0,58365	0,75140	0,59615	0,55009	0,08347	0,13333	0,13999	0,32443	0,46338	0,42792
0,50865	0,65126	0,44517	0,56211	0,08172	0,13333	0,15544	0,32055	0,46067	0,43287
0,46202	0,64661	0,40846	0,56268	0,09349	0,13333	0,18681	0,32359	0,45379	0,43542
0,47692	0,66597	0,45515	0,56726	0,08818	0,13333	0,21300	0,33593	0,44505	0,43033
0,46106	0,65159	0,47283	0,56153	0,07261	0,13333	0,22821	0,34486	0,43783	0,42830
0,39808	0,72019	0,53757	0,56440	0,08072	0,13333	0,24956	0,34714	0,43373	0,43231
0,39712	0,70516	0,44432	0,52490	0,10698	0,13333	0,24956	0,35380	0,42981	0,42881
0,43942	0,75030	0,56915	0,55295	0,09197	0,13333	0,25646	0,36394	0,42435	0,42238
0,47981	0,70945	0,55494	0,57012	0,07539	0,13333	0,25010	0,36764	0,42326	0,41826

#### 4.2.7 Vector de clases

La creación del vector de clases significa que para cada fila de la matriz de características se le asignó un valor 0 o 1.

Asignación 0 tuvieron todos los puntos que no tenían las condiciones de generar remociones en masa, es decir, PLRM.

En tanto, se les asignó valor 1 a PRM, ya que tienen las condiciones bajo las que se produjeron RM. (Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Extracto de vector de clases.

CLASE
0
0
0
0
1
0
0
0
1
1
1
0

## 4.2.8 Matriz de puntos de evaluación

La creación de la matriz de puntos de evaluación se confeccionó con el *software ArcMap*. En esta plataforma el *DEM* del área de estudio se transformó a puntos con la herramienta *Raster to point*. Como el tamaño de los pixeles que conforman del *DEM* es de 30 m, cada punto se ubicó al centro del pixel quedando equidistante de todos los puntos vecinos (Figura 4.23).

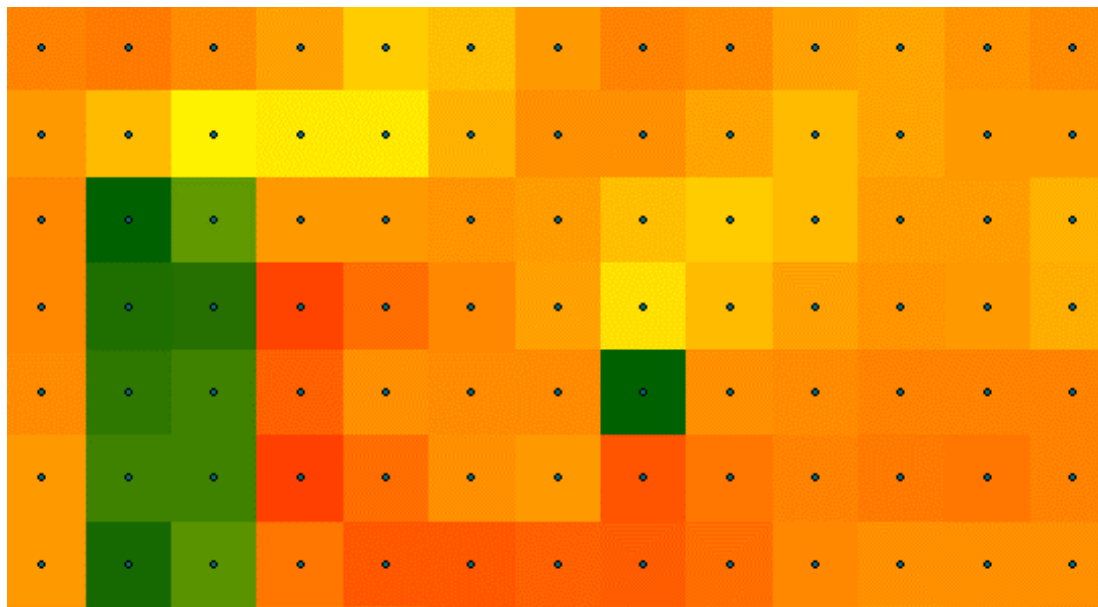


Figura 4.23. Creación de matriz de puntos a partir del *DEM*.

Una vez obtenida la capa de puntos, se extrajo el valor de las características (factores) para cada punto y se obtuvo una matriz de 10 columnas, similar a la matriz de características, pero, en este caso, el vector de clases es desconocido.

## 4.2.9 Tratamiento de datos y creación de la red neuronal

El proceso de creación de la red tuvo dos pasos, primero el tratamiento que consistió en la separación del conjunto de datos de la matriz de características en entrenamiento, validación y test, y segundo, en la creación de la red propiamente tal.

### 4.2.9.1 Separación de datos de la matriz de entrenamiento

Los datos de la matriz de características se separaron en entrenamiento, validación y test, que correspondieron al 70%, 15% y 15% de los valores de las clases, es decir, se aseguró que un 70% de las características con clase 1 y un 70% de las características con clase 0, estuvieran en la matriz de entrenamiento. Con los datos restantes, se extrajo el 15% para la validación de la red y el 15% restante para *test*, siempre considerando el porcentaje de las clases.

Así, la matriz de entrenamiento está compuesta por el 70% de las características de clase 1 más el 70% de las características con clase 0, de la misma manera estarán creadas la matriz de validación y test, pero con su 15% respectivo.

Cabe señalar que la elección de los datos debe ser y fue completamente aleatoria. Además, el porcentaje para entrenamiento, validación y *test*, son los recomendados por los desarrollados del *software MATLAB*.

#### 4.2.9.1.1 Entrenamiento y matriz de entrenamiento

Las características en la matriz de entrenamiento indican a la red neuronal cuáles son las condiciones bajo las que se producen remociones en masa. Por lo tanto, condiciones similares a ellas tienen una alta probabilidad de producir una RM y, por ende, poseen una mayor susceptibilidad. Así también, las condiciones indican zonas que tienen menor susceptibilidad.

Las redes neuronales son entrenadas con la matriz de entrenamiento, lo que les permite reconocer condiciones similares.

Cuando se evalúan condiciones distintas, la red entrega un valor que será el grado de pertenencia al valor de la clase (0 o 1).

Así, zonas con características de alta susceptibilidad deberían tener valores cercanos a 1 y zonas de menor susceptibilidad deberían tener valores cercanos a 0. En este análisis la matriz de entrenamiento tiene el 70% de los datos de la matriz de características, es decir, 70% de con clase 0 y 1, respectivamente.

#### 4.2.9.1.2 Validación y matriz de validación

En paralelo al proceso de entrenamiento, la red realiza el proceso de validación, el cual consiste en ocupar los datos de la matriz de validación para corroborar si los resultados que entrega la red son correctos o no. Como los datos de la matriz de validación tienen asociada una clase, la red ingresa estos datos, los evalúa y verifica si el resultado es igual a la clase asociada.

El proceso de validación permite saber si la red está siendo bien entrenada, y termina el ciclo de iteración de entrenamiento cuando la matriz comienza a sobreentrenarse y pierde la capacidad de generalizar.

#### 4.2.9.1.3 *Test* y matriz de *test*

El proceso de *test*, evalúa el desempeño de la red neuronal, es decir, cuánta precisión posee. Para esto, la matriz de *test* tiene una clase asociada conocida (al igual que la matriz de entrenamiento y validación).

La red neuronal evalúa estos datos y analiza a cuántos de ellos acertó. En palabras sencillas, se tienen características con clase 1, y si la red neuronal evalúa estas

características y les otorga un valor 1, significa que tiene un correcto desempeño. En caso contrario se debe reentrenar la red.

#### 4.2.10 Creación de la red neuronal *multilayer perceptron*

La creación de la red neuronal se realizó en su totalidad con *MATLAB r2016a*, en particular con la función *feedforwardnet* y el algoritmo, Levenber Marquardt. Este algoritmo fue nombrado en el punto 4.1.3 Algoritmo *feed forward backpropagation* pero es importante explicar cómo es el funcionamiento en *MATLAB* para entender los parámetros que se ingresan.

Este algoritmo permite detener el entrenamiento de la red si el rendimiento no mejora o se mantiene igual durante un determinado número de épocas (iteraciones). Funciona bajo la ecuación que se presenta a continuación, que está escrita por la forma en que se presenta en el lenguaje de *MATLAB*.

$$jj = jX * jX \quad (4.14)$$

$$je = jX * E \quad (4.15)$$

$$dx = -(jj + I * mu) / je \quad (4.16)$$

donde *jj* es la matriz hessiana, *jX* es el jacobiano de la función rendimiento, *e* es el vector de errores, *I* es la matriz identidad y *mu* es un factor escalar.

A continuación, se presenta el código creado que permitió el funcionamiento de la red. Para esto, primero se determinó el número de neuronas en la capa oculta, y se creó la red.

```
%inicialización de la red neuronal
```

```
n=100; % número de neuronas en la capa oculta.  
net = feedforwardnet(n,'trainlm'); % creación de la red, trainml corresponde a la  
función de entrenamiento.
```

El método *feed forward backpropagation*, tiene como algoritmo de gradiente descendente de entrenamiento para asegurar la convergencia de la red: Levenberg Marquardt, el que se implementó en '*trainlm*'.

```
% determinación de los parámetros del algoritmo trainml
```

```
net.trainParam.epoch = 1000; % número de épocas (iteraciones)  
net.trainParam.goal = 0; % objetivo de rendimiento  
net.trainParam.max_fail = 6; % número máximo de fallas  
net.trainParam.min_grade = 1e-7; % gradiente de rendimiento mínimo  
net.trainParam.mu = 0,001; % mu inicial  
net.trainParam.mu_dec = 0,1; % factor de declinación de mu  
net.trainParam.mu_inc = 10; % factor de incremento de mu
```



```

net.trainParam.mu_max = 1e10; % valor máximo de mu
net.trainParam.show = 25; % épocas visibles en la interfaz
net.trainParam.CommandLine = false; % no generación del comando de línea de salida
net.trainParam.Window = true; % mostrar interfaz de entrenamiento
net.trainParam.time = inf; % límite de tiempo de entrenamiento infinito

```

Con la determinación de los parámetros de la función `trainlm`, la red neuronal se entrenará hasta que se alcance el número máximo de épocas (`net.trainParam.epoch = 1000`), se alcance la cantidad máxima de tiempo (`net.trainParam.time = inf`) que en este caso no se alcanzará pues es infinito, el rendimiento se reduzca al mínimo (`net.trainParam.goal = 0`), el gradiente de rendimiento cae por debajo de un  $1e-7$  (`net.trainParam.min_grad = 1e-7`), `mu` supera su valor máximo (`net.trainParam.mu_max`) o la validación del rendimiento haya aumentado su número de fallas llegando a 6 fallas consecutivas (`net.trainParam.max_fail = 6`).

Luego, se configuró la red, con los `Input` (filas de la matriz de características) y `Target` (vector de clases), y se indicó las funciones de transferencia para la primera (oculta) y segunda capa (salida), que fueron `tansig` y `purelin`, respectivamente

```
% configuración de la red
```

```

net = configure (net, Input, Target);
net.layer{1}.transferFcn = 'tansig'; %función de transferencia tangente hiperbólica
net.layer{2}.transferFcn = 'purelin'; %función de transferencia lineal

```

El proceso de entrenamiento se realizó con el comando `train`, se ingresó la red `net` y las variables `Input` y `Target`.

```
%entrenamiento de la red
```

```

net = train(net, Input, Target); % entrenar la red neuronal net con las características
Input y las clases Target.

```

El entrenamiento permite observar dos interfaces. La primera indicó la creación de la red neuronal, el número de input (características), la función de activación en la capa oculta que corresponde a la tangente hiperbólica (`tansig`) y que tiene 100 neuronas, y la capa de salida con una neurona, con una función de activación lineal (`purelin`) (Figura 4.24).

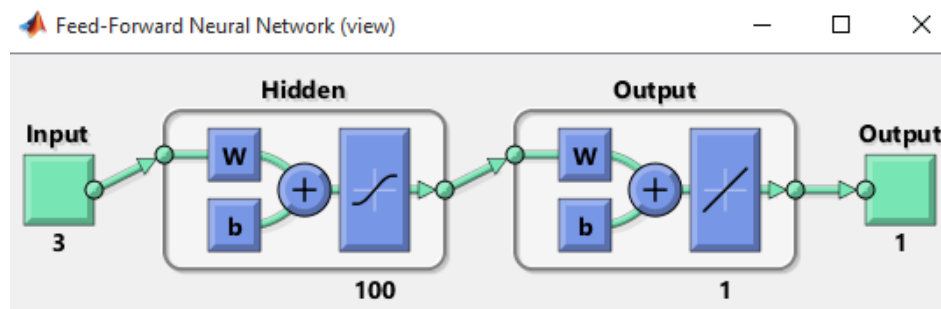


Figura 4.24. Esquema de la red neuronal. Fuente: MATLAB.

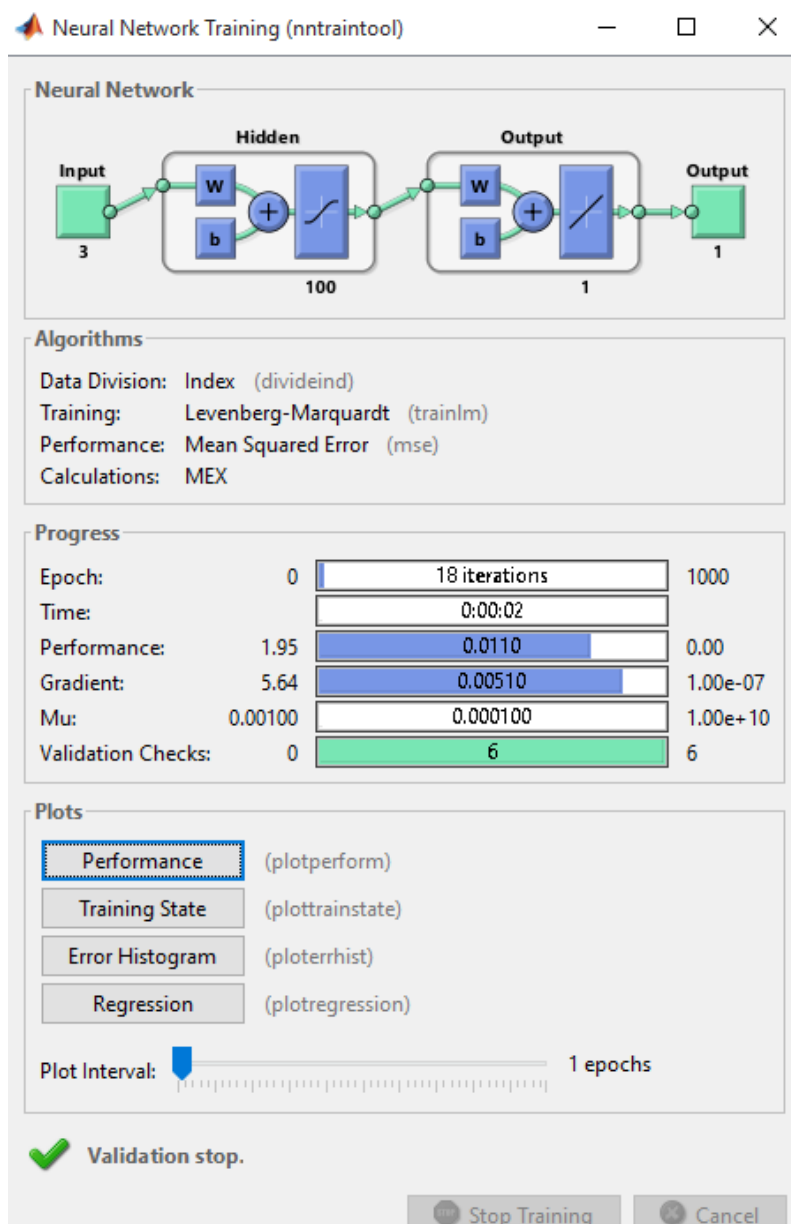


Figura 4.25. Interfaz del proceso de entrenamiento de la red neuronal. Fuente: *MATLAB*.

La segunda interfaz, permitió observar las épocas, el tiempo, y la variación de los parámetros que terminan el proceso de entrenamiento.

Adicionalmente, fue posible observar los gráficos de *performance*, *training state*, *error y histogram*, que permitieron determinar el desempeño de la red neuronal.

Finalmente, para obtener los resultados provistos por la red neuronal, se genera una nueva variable con el comando `sim`, el que permite la evaluación de la matriz de los puntos de información.

```
%Evaluación de la matriz de puntos de información (variable sample)
output = sim (net, sample'); % guardar en la variable output los resultados de la
evaluación de la variable sample traspuesta, en la red neuronal net.
```

El código completo puede ser consultado el anexo C.

#### 4.2.11 Desempeño de la red neuronal

El desempeño de la red neuronal se evaluó mediante una interfaz que entrega *MATLAB*. Esta interfaz permite visualizar el error cuadrático medio en el proceso de entrenamiento, validación y *test* (*performance*), un histograma de error respecto del valor esperado y el valor obtenido (*error histogram*), una curva *Receiver Operating Characteristic* (*ROC*), y gráficos del estado de entrenamiento (*training state*)

##### 4.2.11.1 *Performance*

Esta interfaz permite visualizar un gráfico de error cuadrático medio, o en inglés *mean squared error* (*MSE*), en el eje de la ordenada, y las épocas (iteraciones) en el eje de la abscisa para el proceso de entrenamiento (*train*), validación (*validation*) y *test*. Además, indica en qué época y error se terminó el entrenamiento (*best*), y cuál es el error que tuvo.

El óptimo de estas curvas indica un buen desempeño de la red, y corresponde al sector en que las tres curvas tienen los menores errores posibles y están siempre cercanas entre sí, pues esto indica que el error fue mínimo para cada una de ellas.

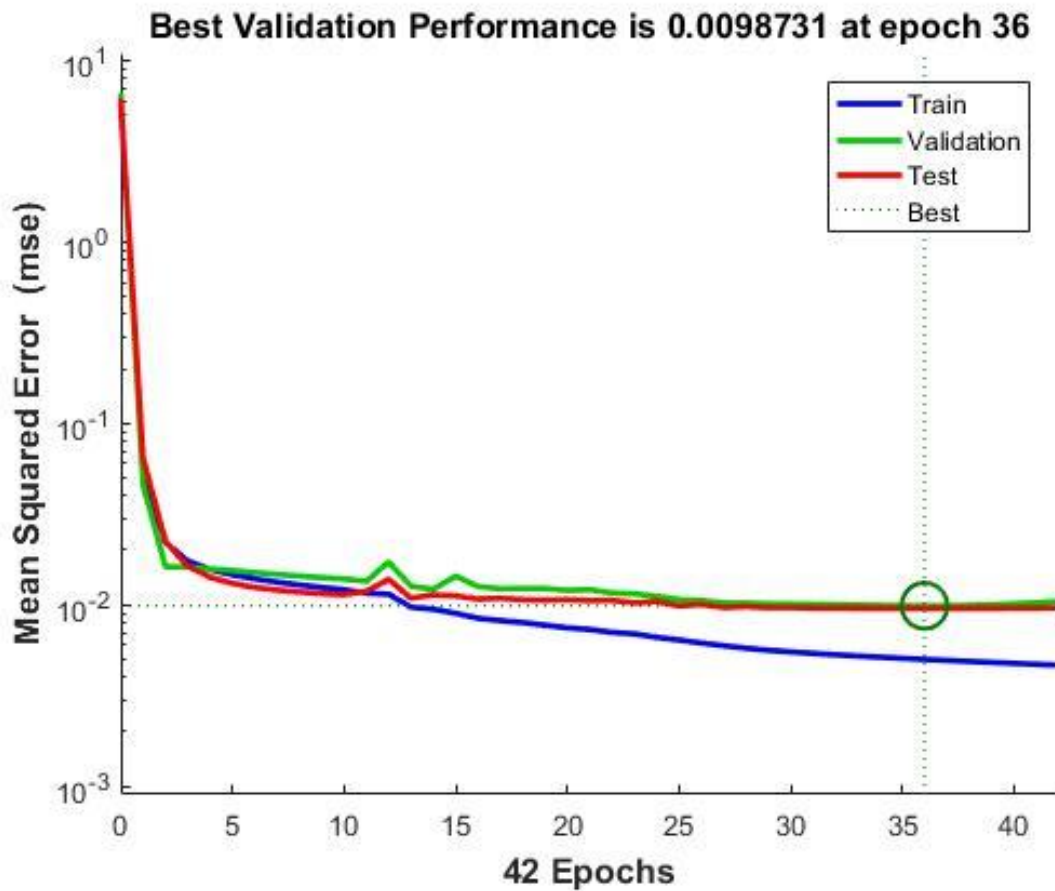


Figura 4.26. Performance. Fuente: MATLAB.

Como un ejemplo se tiene la Figura 4.26, en la que se observa que el error cuadrático medio para la validación y *test* es 0,01 mientras que para el entrenamiento es menor. El óptimo fue alcanzado en la época 35 con un error de 0,01.

Si bien, este gráfico muestra un correcto desempeño de la red, no es del todo óptimo pues la curva de entrenamiento posee un error menor que la curva de validación y *test*.

#### 4.2.11.2 Training state

Como se mencionó en el proceso de entrenamiento de la red, este puede detenerse por diferentes motivos. *Training state*, muestra la evolución del entrenamiento y el motivo por el que se terminó.

Un aumento en el gradiente de rendimiento, un valor inferior de *mu* o 6 errores consecutivos en el proceso de validación terminan el proceso de entrenamiento.

En la Figura 4.27, se observa que ocurrieron 6 errores consecutivos en la validación, es decir, la red no continuó mejorando.



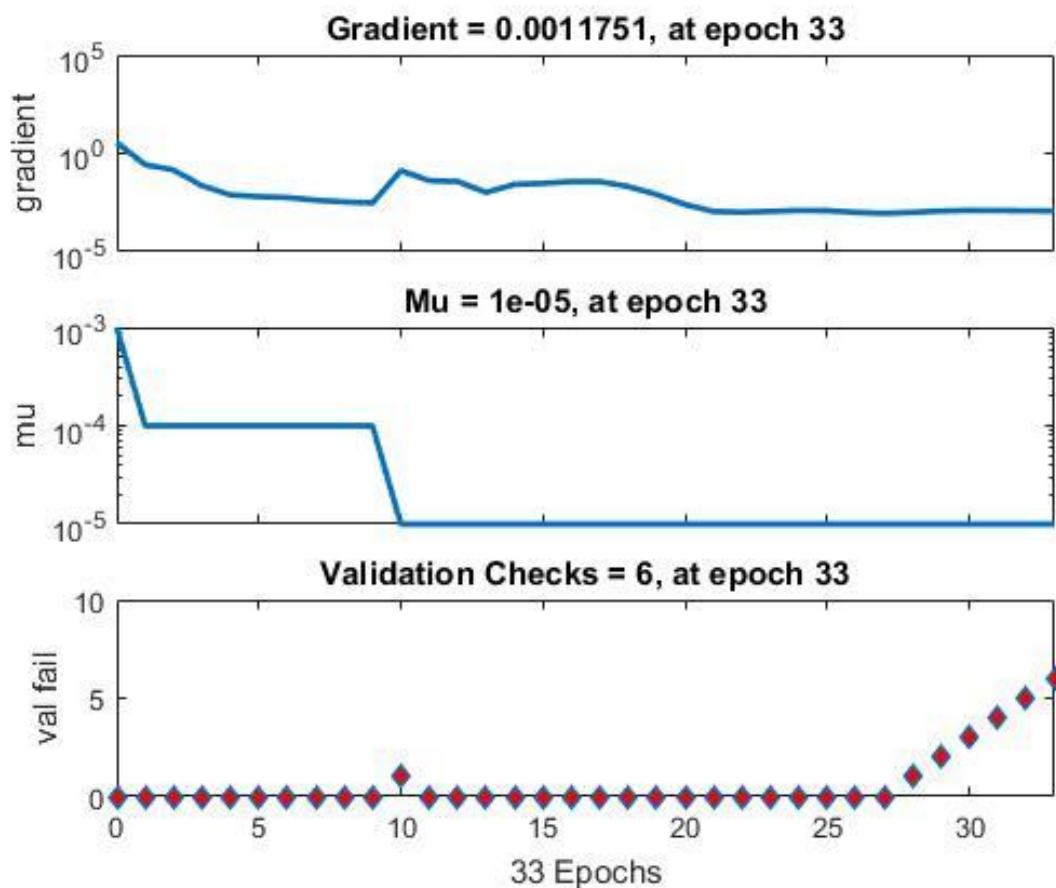


Figura 4.27. Estado de entrenamiento. Fuente: *MATLAB*.

Esta forma de terminar el proceso de entrenamiento permite que la red no se sobreentrene, y no pierda la capacidad de generalizar.

#### 4.2.11.3 Error Histogram (Histograma de error)

En el histograma de error (Figura 4.28) se presenta la diferencia entre el valor esperado (conocido) y el valor obtenido, tanto para el proceso de entrenamiento, validación y *test*. Es decir, para los datos de las matrices de características que tienen una clase determinada (0 o 1), una vez entrenada la red, se reevalúan estos datos, obteniéndose un valor, el que se resta con los resultados conocido (clase 0 o 1).

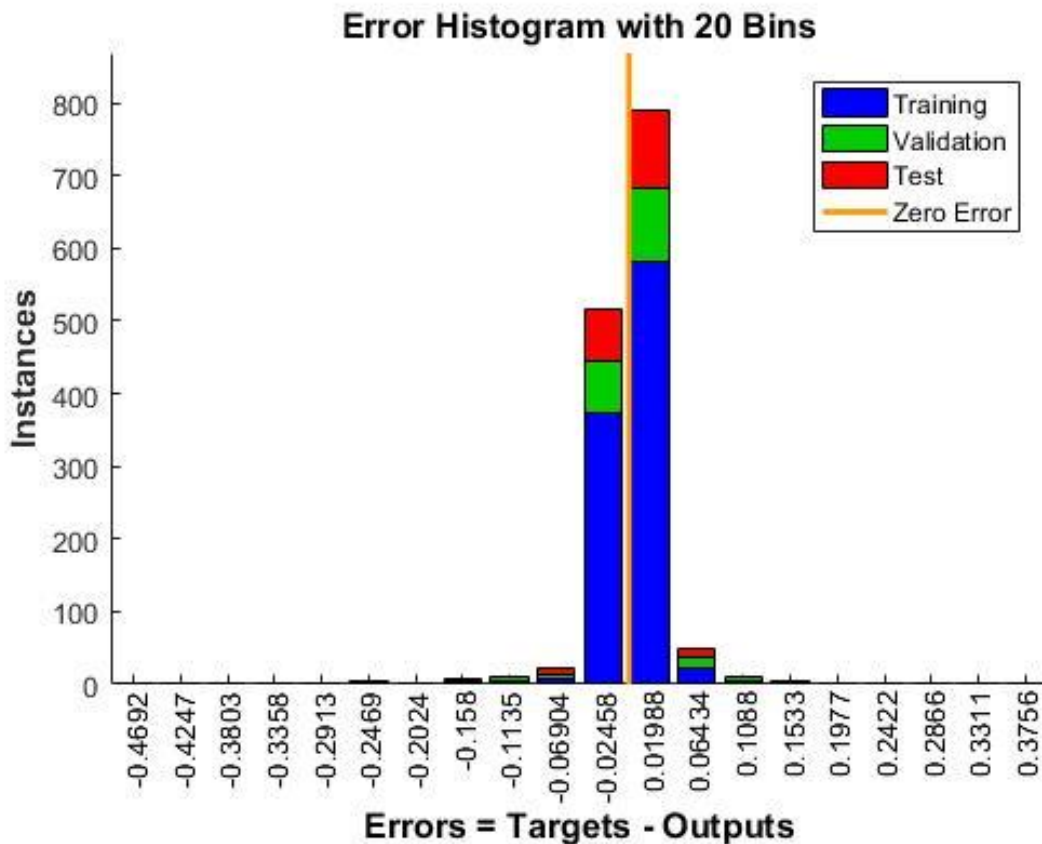


Figura 4.28. Histograma de error. Fuente *MATLAB*.

De lo mencionado, es evidente que un histograma que presente mayor cantidad de datos cercanos al valor 0 indica un mejor desempeño de la red neuronal.

#### 4.2.11.4 Receiver Operating Characteristic (Curva de Característica Operativa del Receptor)

La curva Característica Operativa del Receptor más conocida como curva *ROC* por su acrónimo en inglés *Receiver Operating Characteristic* es usada para evaluar la eficacia de diferentes modelos clasificadores. En el eje de la abscisa se tiene la especificidad (capacidad de dar datos negativos cuando no están presentes) y en la ordenada se tiene sensibilidad (capacidad de dar datos positivos cuando sí se presentan).

El óptimo de una curva *ROC* (Figura 4.29) se obtiene en el punto (0,1), lo que indica que no existirán casos de falsos positivos o verdaderos negativos. Es decir, el clasificador funciona perfectamente, aunque sobre el 80% se considera un buen clasificador.

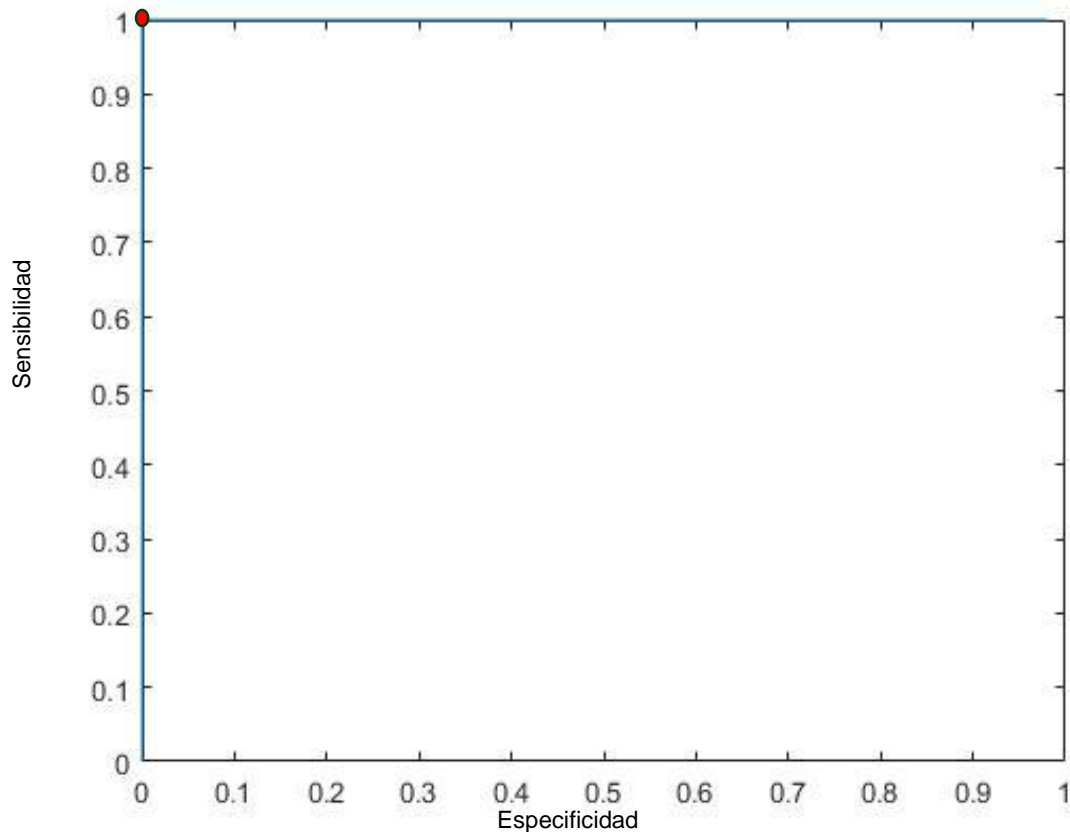


Figura 4.29. Curva ROC. Punto rojo (esquina superior izquierda) indica la clasificación perfecta. Fuente: *MATLAB*:

#### 4.2.12 Análisis con variación de factores

Mediante los resultados de la red neuronal fue posible conocer, de manera cualitativa, cuáles son los factores de mayor peso.

Para saber cuáles son los factores más importantes, se tomaron todos los pesos sinápticos de un factor antes de la capa de entrada y se sumaron. Mientras mayor fue el valor de la suma, mayor influencia tiene en la determinación de susceptibilidad.

Es así como se realizaron tres análisis, primero con 10 factores, luego se redujo a 6, y finalmente a 3.

Del primer análisis, con 10 factores, se obtuvo que los de mayor relevancia en orden descendente son: elevación, distancia a lineamientos, geología, pendiente, orientación de ladera, distancia a ríos, distancia a fallas, curvatura, radiación y distancia cursos de agua.

Por esto, el segundo análisis se realizó con elevación, distancia a lineamientos, geología, pendiente, orientación de ladera y distancia a ríos, los seis factores de mayor relevancia entregados por el primer análisis.

Con los nuevos resultados obtenidos y bajo el mismo criterio antes señalado, se realizó un tercer análisis donde los factores considerados fueron, elevación, distancia a lineamientos y geología.

Finalmente, se realizó un cuarto análisis con nueve factores sin considerar la elevación, pues como este factor fue el más relevante, se determinó evaluar el desempeño de la red neuronal y la susceptibilidad.

#### **4.2.13 Categorización de susceptibilidad y factores**

Los resultados que entrega la red neuronal corresponden a una cantidad continua de datos no categorizada. Para facilitar el entendimiento del mapa de susceptibilidad se decidió categorizar los resultados en muy baja, baja, media, alta y muy alta susceptibilidad.

Las categorías de susceptibilidad se definieron según la probabilidad de las remociones en masa a ser removidas y su estabilidad de ladera.

- **Muy alta susceptibilidad:** Laderas potencialmente inestables, que poseen alta presencia de puntos de generación de remociones en masa. Por lo tanto, bajo la acción de un factor detonante propicio estas se removerían con mayor facilidad.
- **Alta:** Laderas con una gran probabilidad a generar remociones en masa, pero no se correlacionan en gran medida con puntos de generación de remociones en masa ocurridas. También pueden ser removidas, pero con una menor probabilidad.
- **Media:** Son áreas con una mayor estabilidad de ladera respecto a las zonas de susceptibilidad alta y muy alta. Al ser afectadas por un factor detonante, es probable que sean removidas por el efecto colateral de otras RM.
- **Baja:** Corresponde a zonas que presentan bastante similitud a las zonas de muy baja susceptibilidad (nula), pero las laderas tienen una mínima probabilidad de ser removidas.
- **Muy baja:** Zonas con una nula probabilidad de generar una remoción, es decir, áreas de gran estabilidad.

Al categorizar la susceptibilidad, se adoptó una clasificación por quintiles (Tabla 4.6) que fue aquella que entregó mejores resultados, pues cerca de un 90% de los puntos de los puntos de generación de remoción en masa (PRM) fueron clasificados como zonas de alta y muy alta susceptibilidad, mientras que el 100% de los puntos libres de remoción en masa (PLRM) se ubicó en la categoría de baja susceptibilidad (Tabla 4.7).



Tabla 4.6. Intervalos de quintiles de susceptibilidad.

Susceptibilidad	Quintiles	
	Valor Inicial	Valor final
Muy baja	0	0,3928
Baja	0,3929	0,474
Media	0,4741	0,5032
Alta	0,5033	0,5324
Muy alta	0,5325	1

Tabla 4.7. Tabla de categorización de susceptibilidad. PRM: puntos de escarpes de remoción en masa, PLRM: puntos libres de remociones en masa, Porcentaje ac: porcentaje acumulado.

Susceptibilidad	Clase	PRM			PLRM		
		Frecuencia	Porcentaje [%]	Porcentaje ac [%]	Frecuencia	Porcentaje [%]	Porcentaje ac [%]
Muy baja	1	0	0,00	0,00	688	99,14	99,14
Baja	2	5	0,68	0,68	6	0,86	100,00
Media	3	13	1,78	8,90	0	0,00	100,00
Alta	4	60	8,22	98,22	0	0,00	100,00
Muy alta	5	652	89,32	100,00	0	0,00	100,00

Además de ser una forma de categorizar la susceptibilidad, esto indicó que el porcentaje de éxito del análisis es superior al 90%, tanto para reconocer zonas de alta y muy alta susceptibilidad, como zonas de muy baja susceptibilidad.

Por otra parte, los factores también fueron categorizados para determinar que rango de cada factor influyó más en la susceptibilidad, pero en este caso no se otorgó un nombre, sino que solo un valor entero correlativo.

La elevación fue dividida en 5 categorías, las que de acuerdo a la distribución de datos presentaban acumulaciones similares de datos (Tabla 4.8).

Tabla 4.8. Categorización de la elevación.

Rango [m s.n.m]	Clase
0 - 200	1
200 - 400	2
400 - 800	3
800 - 1.600	4
1.600 - 2.080	5

En tanto, la geología fue categorizada según sus unidades litológicas descritas en la geología local (Tabla 4.9).

Tabla 4.9. Categorización de la geología.

Rango	Clase
Q1	1
Jg	2
Qf	3
PzTr4(c)	4
PTrg	5
PzTr4(a)	6
Mg	7
Kg	8
Pl1m	9
Qft	10
Qfd	11

La pendiente, la orientación de ladera y la curvatura media fueron categorizadas según el criterio de Arenas *et al.* (2008) (Tabla 4.10, Tabla 4.11 y Tabla 4.12).

Tabla 4.10. Categorización de la pendiente.

Rango [°]	Clase
0 - 5	1
5 - 25	2
25 - 35	3
35 - 70	4
> 70	5

Tabla 4.11. Categorización de orientación de ladera.

Orientación	Rango [°]	Clase
N	0 -45 /315 - 360	1
E	45 - 135	2
S	135 - 225	3
W	225 - 315	4

Tabla 4.12. Categorización de la curvatura media.

Nombre	Rango	Clase
Convexo	< -0,2	1
Plano	-0,2 - 0,2	2
Cóncavo	> 0,2	3

En tanto, la distancia a cursos de agua y ríos (Tabla 4.13) fue categorizada según la acumulación de datos, y para el caso de distancia a lineamientos y fallas se ocupó la categorización de la Tabla 4.14.

Tabla 4.13. Categorización de cursos de agua y ríos.

Rango [m]	Clase
0 - 500	1
500 - 2.000	2
> 2.000	3

Tabla 4.14. Categorización de distancia a lineamientos y fallas.

Rango [m]	Clase
0 - 3.500	1
3.500 - 7.000	2
> 7.000	3

En cuanto a la radiación solar anual, esta se clasificó en quintiles, al igual que la susceptibilidad (Tabla 4.15).

Tabla 4.15. Categorización de la radiación solar anual.

Rango [ $\frac{W}{m^2}$ ]	Clase
3,90 - 814,29	1
814,24 - 1.016.889,34	2
1.016.889,34 - 1.124.518,65	3
1.124.518,65 - 1.238.479,10	4
1.238.479,10 - 1.618.347,25	5

Una vez que los datos fueron categorizados, se calculó la frecuencia de cada uno de ellos, para cada categoría de susceptibilidad. Se calculó su porcentaje y se realizaron histogramas y tablas que se presentan en el capítulo de resultados, con la finalidad de conocer las características de cada categoría de susceptibilidad.

## 5 RESULTADOS

Los resultados obtenidos se presentan a continuación y fueron divididos en análisis con 10 factores (Caso A), 6 factores (Caso B) y 3 factores (Caso C). Es importante indicar que la escala de trabajo utilizada es 1.25.000 con una resolución de DEM de 30x30 m.

La disminución de los factores se determinó respecto a cuáles generaron un mayor aporte en la capa de entrada. Este aporte se determinó mediante la suma escalar del vector de pesos sinápticos asociada a cada factor.

Adicionalmente, se evaluó el desempeño de la red para cada análisis.

### 5.1 Susceptibilidad

Los resultados obtenidos para susceptibilidad se presentaron en mapas de valores continuos normalizados entre 0 y 1. Los resultados de susceptibilidad presentan una distribución normal, por esto, se categorizaron en quintiles y se clasificó cualitativamente en muy baja, baja, media, alta y muy alta.

Para el análisis de 10 factores, se reconocieron los factores que tenían mayor peso. Para cada uno de estos factores, se obtuvo un intervalo que indica qué valores aportan más en la susceptibilidad. Por ejemplo, la pendiente es un factor relevante y su mayor influencia esta entre los 35° y 70°.

Considerando el análisis con 10 factores como el caso base o teórico, y los análisis con 6,3, 9 factores (sin elevación) como casos experimentales, se determinó el coeficiente de correlación para evaluar qué tanto se asemejan el valor de la susceptibilidad en los distintos análisis respecto a los resultados base.

#### 5.1.1 Caso A: Diez factores

Como se determinó en el punto 4.2.1, los factores fueron determinados basados en los antecedentes, y en las observaciones de terreno. Es así como los resultados de la evaluación de la susceptibilidad (Figura 5.1 y Figura 5.2) mediante redes neuronales indican que la relevancia de los factores en orden descendente corresponde a elevación, distancia a lineamientos, geología, pendiente, dirección de ladera, distancia a ríos, curvatura media, distancia a fallas, radiación solar y distancia a cursos de agua.

La Figura 5.1, muestra el mapa de susceptibilidad con los resultados que se obtuvieron directamente de la red neuronal, por lo que representa un continuo de datos que no se encuentran categorizados, siendo 0 y 1 las zonas de menor y mayor susceptibilidad, respectivamente. Por su parte, la Figura 5.2, muestra el mapa de susceptibilidad categorizado.



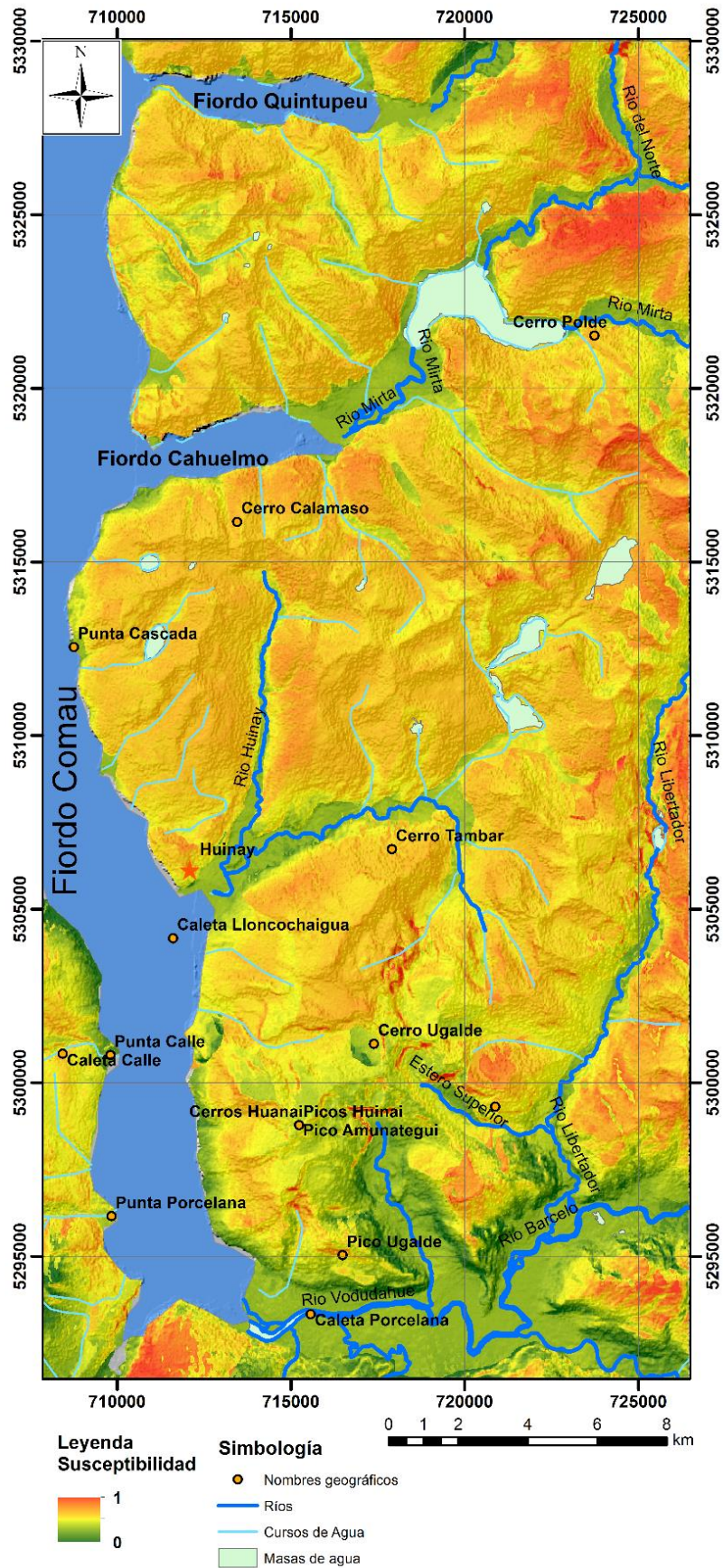


Figura 5.1. Mapa de susceptibilidad, clasificación continua. Caso A.



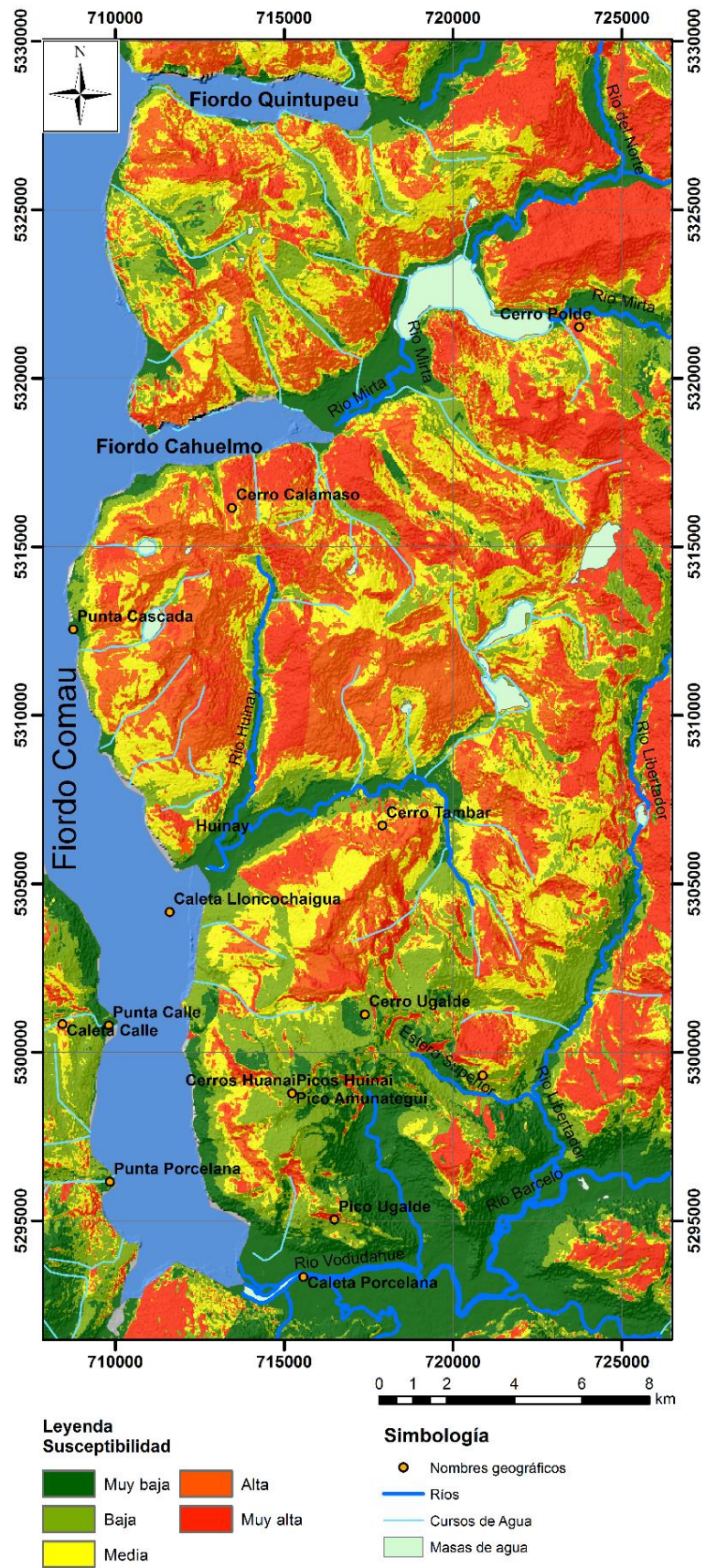


Figura 5.2. Mapa de susceptibilidad categorizado cualitativamente. Caso A.

A continuación, se muestran los resultados de las tablas e histogramas de frecuencia de cada factor categorizado, según su susceptibilidad: muy baja, baja, media, alta o muy alta.

Se debe tener claro que se referirá a porcentaje respecto al total de los datos de una categoría de susceptibilidad, y estos porcentajes fueron determinados a través de la frecuencia de las clases de los factores.

#### 5.1.1.1 Elevación

Zonas de muy alta susceptibilidad presentaron una predominancia de la clase 4, y en menor medida, de la clase 3. Similares características se tuvieron en las zonas de susceptibilidad alta y media.

Zonas de baja y muy baja susceptibilidad presentaron una predominancia de las zonas de menor elevación asociada a la clase 1 y 2, correspondiente a elevación de 0 -200 y 200 – 400 m s.n.m.

La clase 5, tuvo limitados porcentajes dentro de 2,93 y 0,42 (Tabla 5.1), mostrando un descenso en zonas de menor susceptibilidad. En tanto, la clase 4, evidenció una notoria disminución porcentual a medida que disminuye la susceptibilidad. Similar comportamiento tuvo la clase 3, pero el descenso fue menos brusco.

Tabla 5.1. Influencia porcentual de la elevación según las categorías de susceptibilidad.

Rango [m s.n.m]	Clase	Susceptibilidad				
		Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
0 - 200	1	59,83	14,24	5,73	2,58	2,04
200 - 400	2	18,05	19,62	15,21	9,59	5,86
400 - 800	3	14,75	27,85	31,92	37,52	28,49
800 - 1.600	4	6,95	36,25	45,72	48,44	60,68
1.600 - 2.080	5	0,42	2,04	1,42	1,87	2,93

A medida que disminuyó la susceptibilidad, los rangos de menor valor de elevación mostraron un aumento. Particularmente la clase 2 aumentó sus porcentajes (Figura 5.3), llegando a 18,05 en zonas de muy baja susceptibilidad, mientras que la clase 1, aumentó a 59,83 en la misma zona.

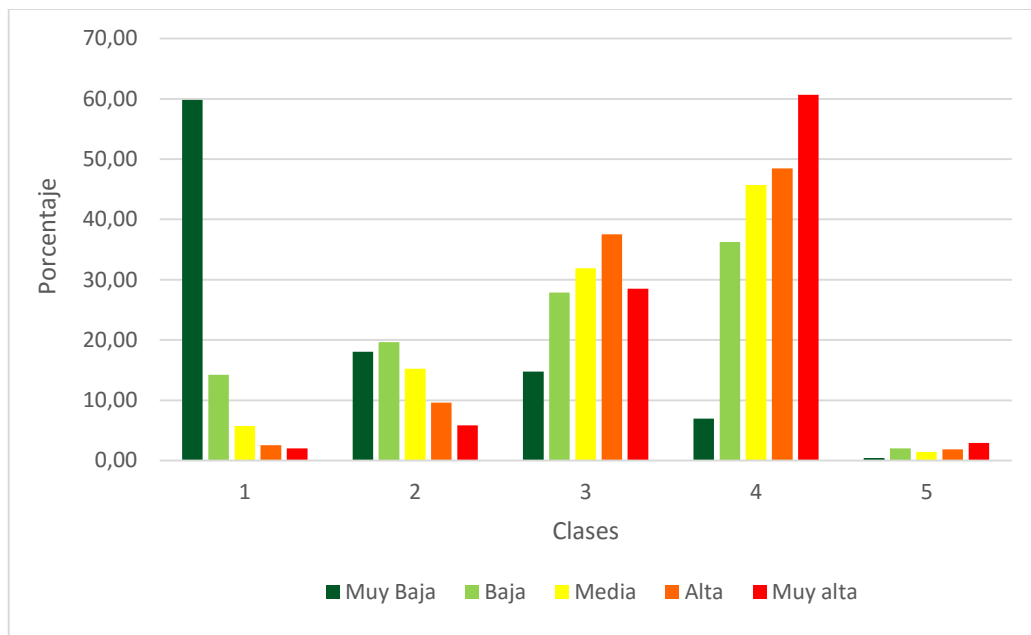


Figura 5.3. Histograma de elevación según su susceptibilidad, ordenados por clases.

### 5.1.1.2 Geología

En zonas de muy alta susceptibilidad, los afloramientos de granitos, granodioritas y tonalitas del Cretácico (Kg), fueron los más frecuentes mientras que los afloramientos Paleozoicos-Triásicos correspondientes a rocas metamórficas se ubican en el segundo lugar (PzTr4(c)). En tercer lugar, con 12,29% se ubicó la formación Mg, granodioritas, dioritas y tonalitas.

En zonas de media y alta susceptibilidad la formación PzTr4(c) tomó mayor relevancia que la formación Kg, y aumentó levemente Jg, correspondiente a dioritas, gabros y mozodioritas de piroxeno de edad jurásica.

En zonas de susceptibilidad baja, se mantiene un codominio de Kg, PzTr4(c) y Jg, ya que se tuvo porcentajes similares. Además, se tuvo un aumento de Q1 (depósitos cuaternarios) y PTrg (gabros y ultrabásitas pérmico-triásicas).

En tanto, zonas de muy baja susceptibilidad tuvieron altos porcentajes de depósitos cuaternarios (Q1 y Qf), así como también un alto porcentaje de Jg (Tabla 5.2).



Tabla 5.2. Influencia porcentual de las formaciones geológicas según las categorías de susceptibilidad.

Formación	Clase	Susceptibilidad				
		Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Q1	1	26,61	6,47	1,11	0,26	0,33
Jg	2	21,24	27,97	10,67	4,18	5,31
Qf	3	19,77	0,02	0,00	0,00	0,00
PIHv	4	0,79	0,95	0,50	0,26	0,19
PzTr4(c)	5	10,10	26,61	43,72	55,18	33,59
PTrg	6	2,08	4,65	1,37	0,50	0,83
PzTr4(a)	7	0,38	2,05	1,74	1,16	2,94
Mg	8	3,75	5,92	10,28	13,25	12,29
Kg	9	8,55	25,18	30,60	25,20	44,42
Qft	10	3,33	0,16	0,00	0,00	0,00
Qfd	11	3,37	0,00	0,00	0,00	0,05

Se desprende del Histograma (Figura 5.4) que la clase 5 y 8 aumentaron en zonas de mayor susceptibilidad, teniendo su máximo en la categoría alta. Similar tendencia tuvo Kg, pero su máximo fue alcanzado en la categoría muy alta.

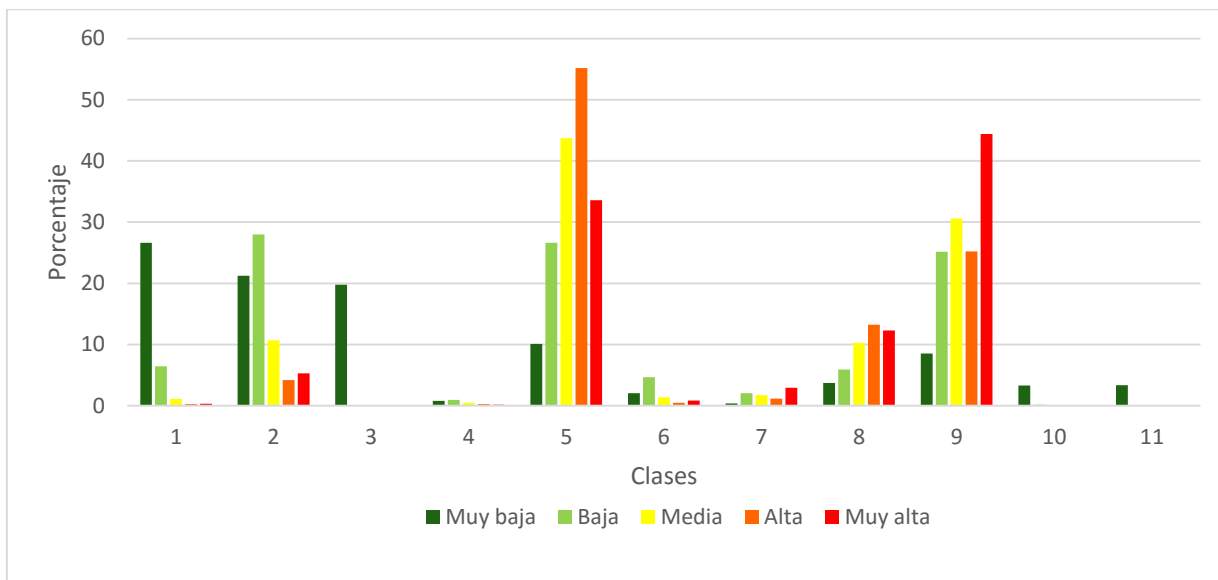


Figura 5.4. Histograma de influencia de las formaciones geológicas según su susceptibilidad, ordenados por clases.

Por otro lado, las clases 1, 2, 3, 10 y 11, tuvieron un aumento en sus porcentajes a medida que disminuía la susceptibilidad, obteniendo su máximo en la categoría muy baja.

### 5.1.1.3 Pendiente

Zonas de media, alta y muy alta susceptibilidad indicaron un mayor porcentaje de la clase 4 (35° - 70°) y en segundo lugar la clase 3. Por su parte, zonas de baja y muy baja susceptibilidad mostraron un porcentaje mayor de la clase 2 (Tabla 5.3).

Tabla 5.3. Influencia porcentual de la pendiente según las categorías de susceptibilidad.

Rango [°]	Clase	Susceptibilidad				
		Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
0 - 5	1	26,00	2,84	0,94	0,66	0,89
5 - 25	2	42,26	36,30	23,25	18,04	21,83
25 - 35	3	13,02	26,60	28,51	24,49	28,81
35 - 70	4	18,65	34,18	47,24	56,71	46,67
> 70	5	0,06	0,08	0,07	0,09	1,80

Al evaluar las clases, se observó que la clase 5 presentó bajos porcentajes, los que disminuían a medida que descendía la susceptibilidad, mientras que la clase 4 muestra un *peak* en la susceptibilidad de categoría alta, y luego disminuye a medida que disminuye la susceptibilidad (Figura 5.5).

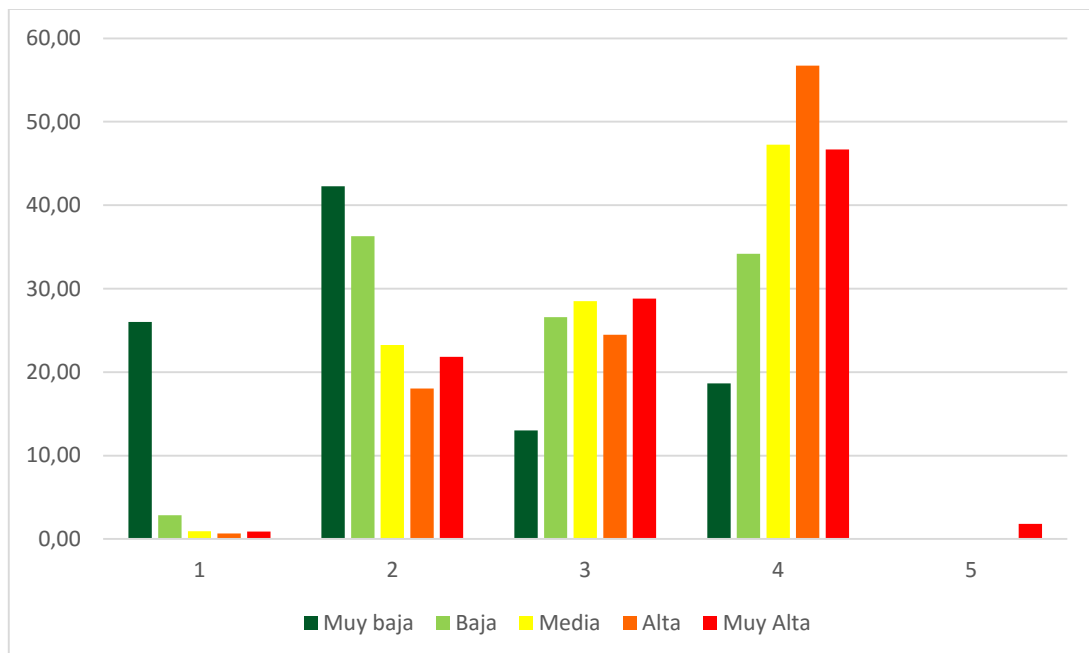


Figura 5.5. Histograma de influencia de la pendiente según su susceptibilidad, ordenados por clases.

La clase 3 presenta una disminución en su porcentaje a medida que disminuye la susceptibilidad, y aumenta en zonas de mayor susceptibilidad.

En contraste a las clases mencionadas, aquellas de menor pendiente (1 y 2), presentan frecuencias más altas a medida que disminuye la pendiente.

#### 5.1.1.4 Orientación de ladera

Si bien, el factor orientación de laderas no presenta marcadas tendencias en los rangos de susceptibilidad baja, media y alta, la zona de muy alta susceptibilidad fue caracterizada por laderas con orientación oeste con un 42,81%, y en menor porcentaje, norte 29,92%. En tanto, la zona de muy baja susceptibilidad presentó un porcentaje mayor de laderas con orientación sur (Tabla 5.4 y Figura 5.6).

Tabla 5.4. Influencia porcentual de la pendiente según las categorías de susceptibilidad.

Orientación	Rango [°]	Clase	Susceptibilidad				
			Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
N	0 -45 /315 - 360	1	23,66	27,11	26,59	20,01	29,92
E	45 - 135	2	22,40	24,50	20,70	22,16	11,57
S	135 - 225	3	29,18	19,30	25,18	31,38	16,70
W	225 - 315	4	24,76	29,10	27,53	26,44	41,81

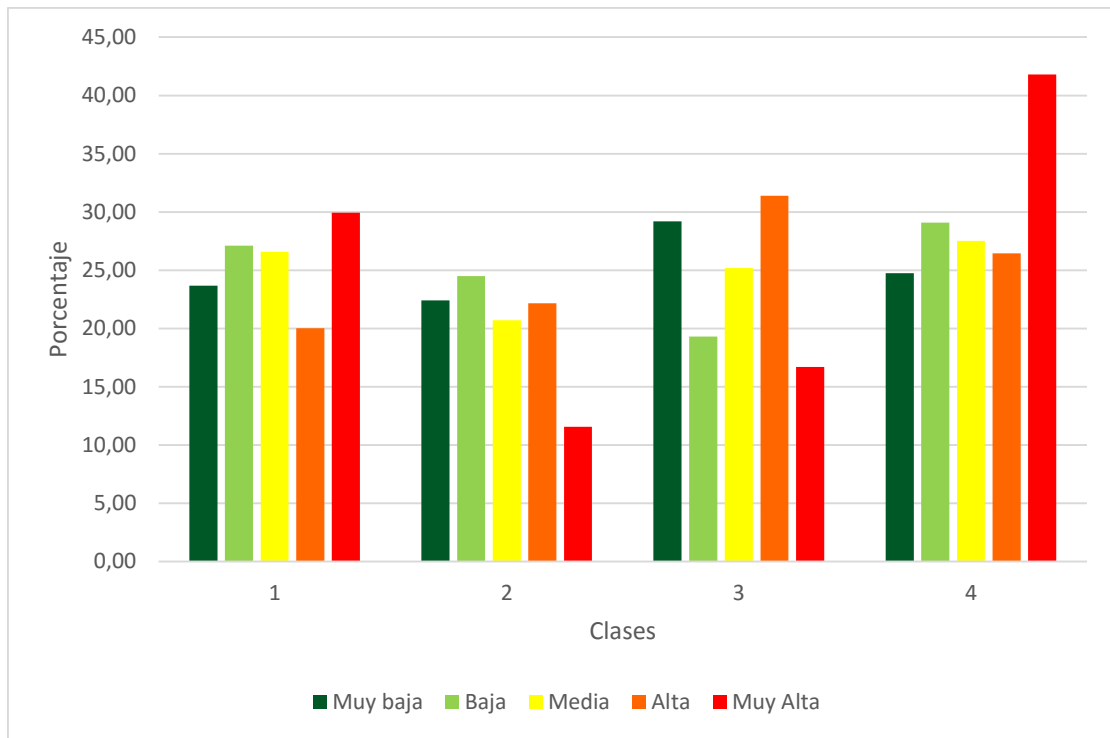


Figura 5.6. Histograma de orientación de ladera según su clase y categoría de susceptibilidad.

### 5.1.1.5 Curvatura media

Al igual que en el factor orientación de ladera, no fue posible encontrar una marcada tendencia, pero se logró observar que zonas de susceptibilidad media, alta y muy alta presentaron mayores porcentajes de zonas cóncavas con un 44,15%, 45,94% y 45,83%, respectivamente (Tabla 5.5), mientras que zonas de muy baja y baja susceptibilidad presentaron mayor porcentaje de zonas convexas.

Tabla 5.5. Influencia porcentual de la curvatura media según las categorías de susceptibilidad.

Nombre	Rango	Clase	Susceptibilidad				
			Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Convexo	< -0,2	1	45,00	45,61	41,78	40,62	40,19
Plano	-0,2 - 0,2	2	23,29	15,75	14,07	13,44	13,98
Cóncavo	> 0,2	3	31,71	38,64	44,15	45,94	45,83

La clase cóncava aumenta a medida que aumenta la susceptibilidad, en tanto que el porcentaje de curvatura plana y convexa aumenta a medida que disminuye la susceptibilidad (Figura 5.6).

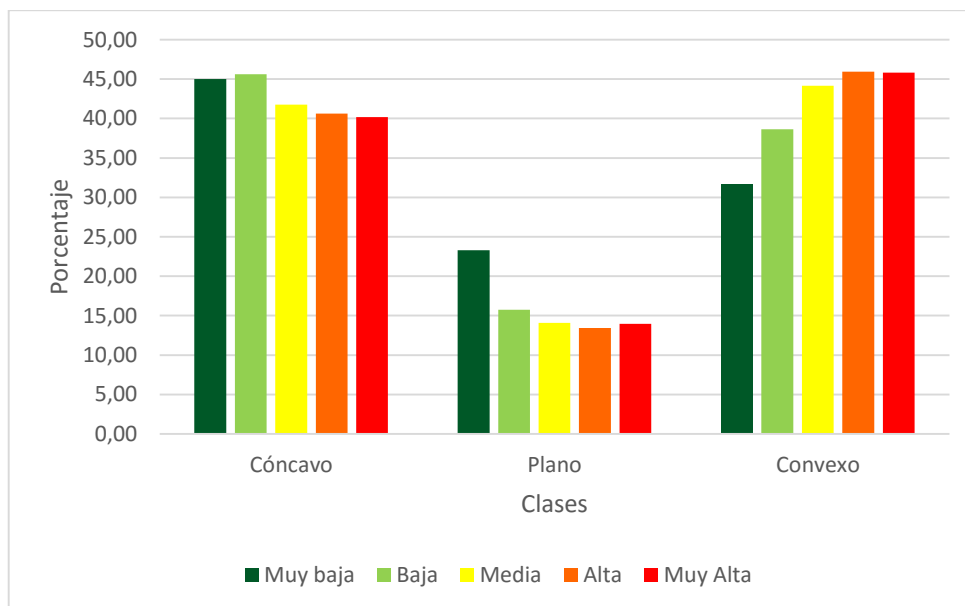


Figura 5.7. Histograma de curvatura media según sus clases y categoría de susceptibilidad.

#### 5.1.1.6 Distancia a ríos

El factor distancia a ríos, la susceptibilidad muy baja fue característica de distancias más cercanas a la ribera de los ríos, entre los 0 y 500 m. Por otro lado, en muy alta susceptibilidad fue característico del rango de distancia entre los 500 y 2.000 con un 69% (Tabla 5.6).

Tabla 5.6. Influencia porcentual de la distancia a ríos según las categorías de susceptibilidad.

Rango [m]	Clase	Susceptibilidad				
		Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
0 - 500	1	62,76	22,07	9,71	6,25	9,69
500 - 2.000	2	33,47	54,42	56,42	59,15	69,00
> 2.000	3	3,77	23,51	33,88	34,61	21,31

La mayor concentración porcentual de datos se produce en la clase 2, mostrándose una marcada disminución de esta clase a medida que disminuye la susceptibilidad (Figura 5.8).



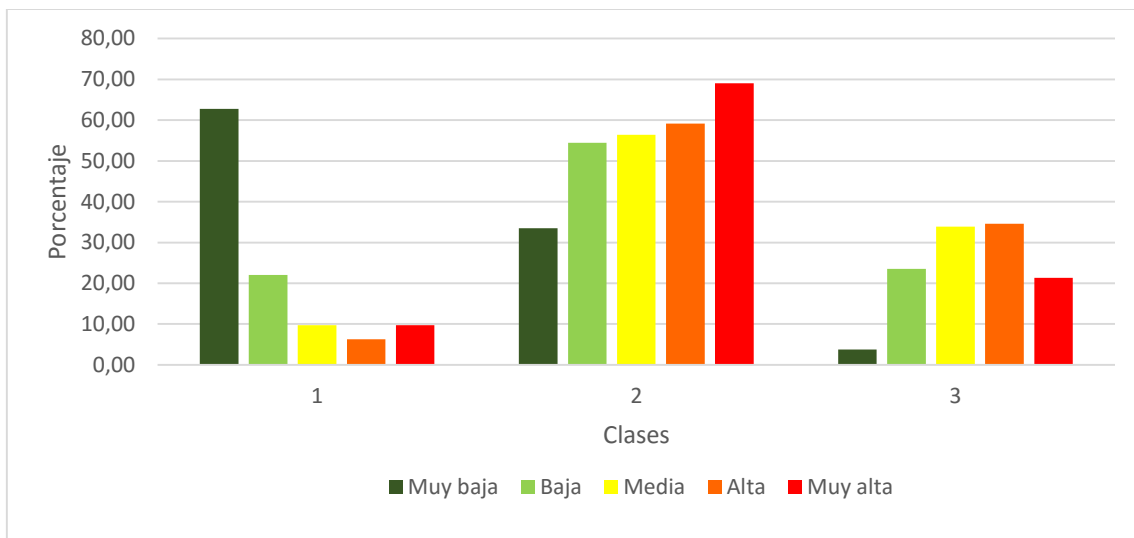


Figura 5.8. Histograma de distancia a ríos según sus clases y categoría de susceptibilidad.

### 5.1.1.7 Distancia a cursos de agua

En el rango de distancias entre los 500 – 2.000 m se presenta la mayor acumulación de datos porcentuales, alcanzando sus máximos valores en la susceptibilidad media, alta y muy alta (Tabla 5.7).

Tabla 5.7. Influencia porcentual de la distancia a cursos de agua según las categorías de susceptibilidad.

Rango [m]	Clase	Susceptibilidad				
		Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
0 - 500	1	19,61	39,25	42,74	36,76	18,47
500 - 2.000	2	33,52	45,76	51,97	59,95	62,25
> 2.000	3	46,86	14,98	5,30	3,29	19,28

Por otra parte, la susceptibilidad muy baja se asoció a distancias superiores a los 2.000 metros (Figura 5.9).

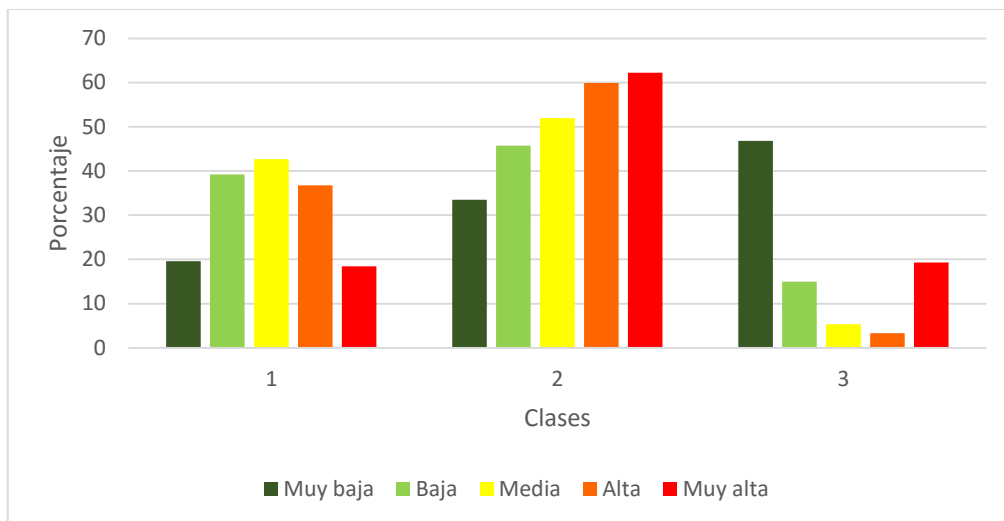


Figura 5.9. Histograma de distancia a cursos de agua según sus clases y categoría de susceptibilidad.

### 5.1.1.8 Distancia a fallas

Se obtuvo que las distancias a fallas hasta los 3.500 m presentan el *peak* para susceptibilidad media, alta y muy alta, mientras que la clase 2 (3.500 – 7.000 m) no presenta una clara dominancia de una categoría de susceptibilidad (Tabla 5.8).

Tabla 5.8. Influencia porcentual de la distancia a fallas según las categorías de susceptibilidad.

Rango [m]	Clase	Susceptibilidad				
		Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
0 - 3.500	1	25,02	35,48	56,36	64,31	53,46
3.500 - 7.000	2	12,27	22,58	28,84	26,31	18,80
> 7.000	3	62,71	41,94	14,79	9,38	27,74

Por otra parte, zonas muy lejanas a fallas con distancias superiores a los 7.000 m son características de zonas de muy baja susceptibilidad (Figura 5.10).

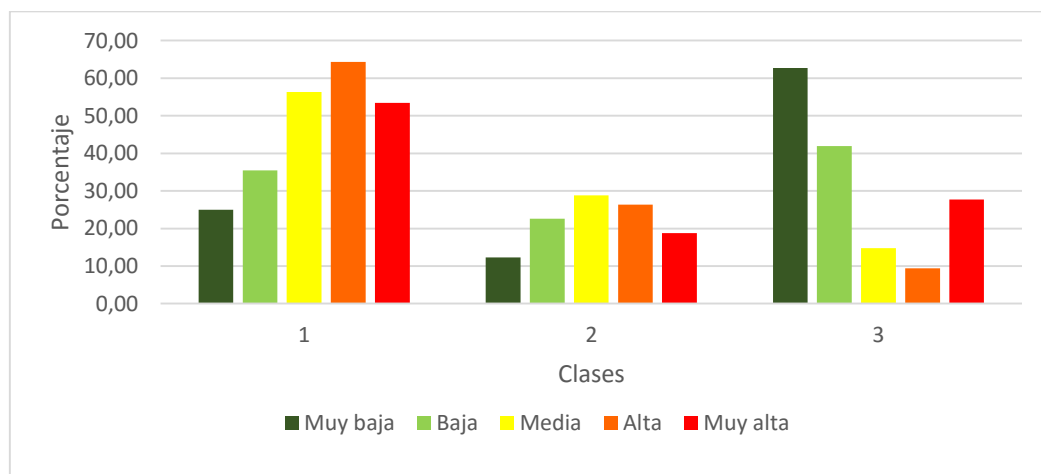


Figura 5.10. Histograma de distancia a fallas según sus clases y categoría de susceptibilidad.

En tanto, zonas de susceptibilidad baja presentaron una acumulación mayor de datos entre las clases 9 y 12.

#### 5.1.1.9 Distancia a lineamientos

Se observó que la distancia a lineamientos tuvo un comportamiento similar al factor distancia a fallas, pues la muy baja susceptibilidad estuvo marcada por zonas distales (Tabla 5.9).

Tabla 5.9. Influencia porcentual de la distancia a lineamientos según las categorías de susceptibilidad.

Rango [m]	Clase	Susceptibilidad				
		Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
0 - 3.500	1	30,89	46,74	63,77	75,81	48,59
3.500 - 7.000	2	28,83	29,76	26,68	18,92	33,32
> 7.000	3	40,26	23,52	9,55	5,28	18,08

La susceptibilidad muy alta alcanzó su mayor acumulación de datos en la clase 1, distancia entre 0 y 3.500 m, al igual que la susceptibilidad media y alta (Figura 5.11).

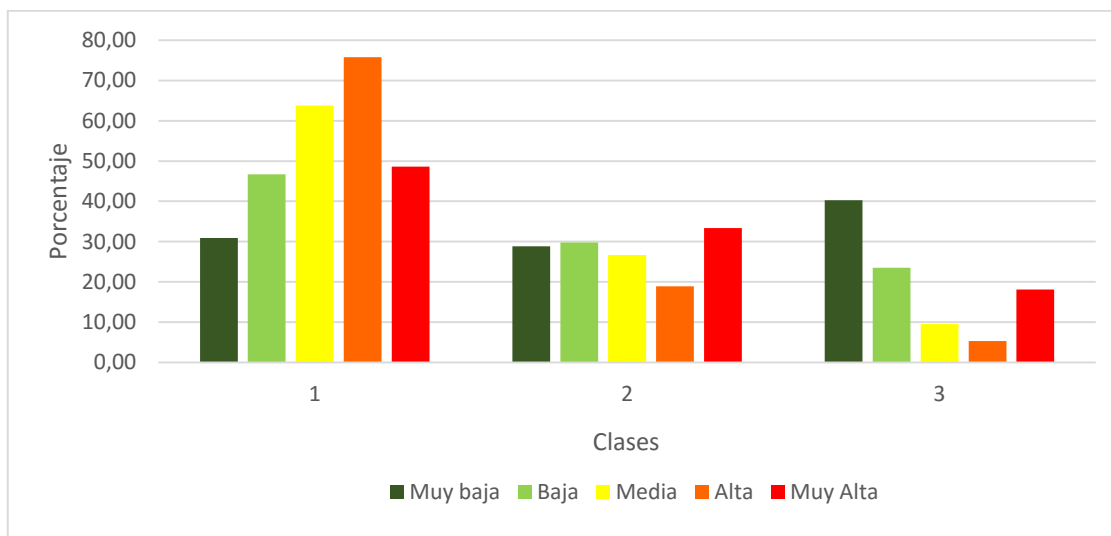


Figura 5.11. Histograma de distancia a lineamientos según sus clases y categoría de susceptibilidad.

#### 5.1.1.10 Radiación solar anual

Del factor radiación solar no se pudo obtener una correlación respecto a su distribución de datos con la susceptibilidad (Tabla 5.10). Solo se observó que las zonas de baja y muy baja susceptibilidad presentaron un mayor valor de radiación solar anual en la clase 4, la que fue disminuyendo hacia la clase 1 (Figura 5.12).

Tabla 5.10. Influencia porcentual de radiación solar anual según las categorías de susceptibilidad.

Rango [ $\frac{w}{m^2}$ ]	Clase	Susceptibilidad				
		Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
3,90 - 814,29	1	5,53	5,97	7,95	11,86	6,25
814,24 - 1.016.889,34	2	13,08	14,45	18,39	22,30	13,63
1.016.889,34 - 1.124.518,65	3	28,81	23,86	21,73	22,06	18,43
1.124.518,65 - 1.238.479,10	4	45,46	33,21	27,67	23,70	29,37
1.238.479,10 - 1.618.347,25	5	7,12	22,51	24,27	20,07	32,31

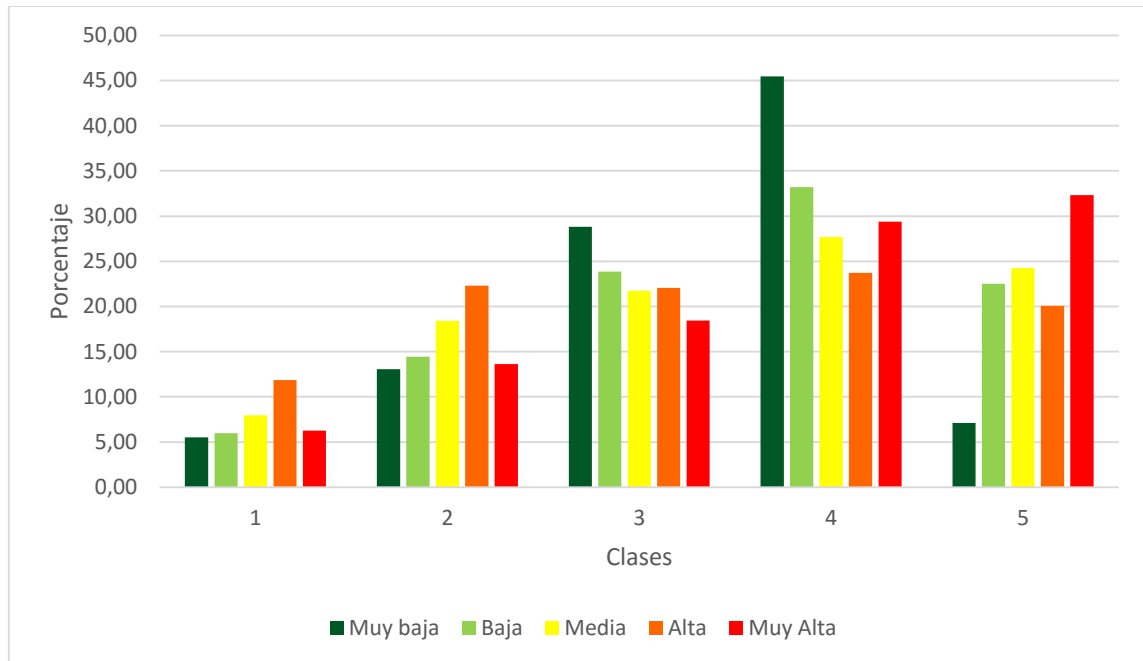


Figura 5.12. Histograma de radiación solar anual según sus clases y categoría de susceptibilidad.

### 5.1.1.11 Desempeño de la red neuronal

La evaluación del desempeño de la red neuronal para 10 factores según los parámetros indicados en el punto 4.2.11 indicaron que el *MSE* en el proceso de entrenamiento, validación y *test*, fueron similares (curvas similares), y el óptimo de las tres curvas se alcanzó en la época 11, cuando la validación tuvo un error menor al 0,243% (Figura 5.13).



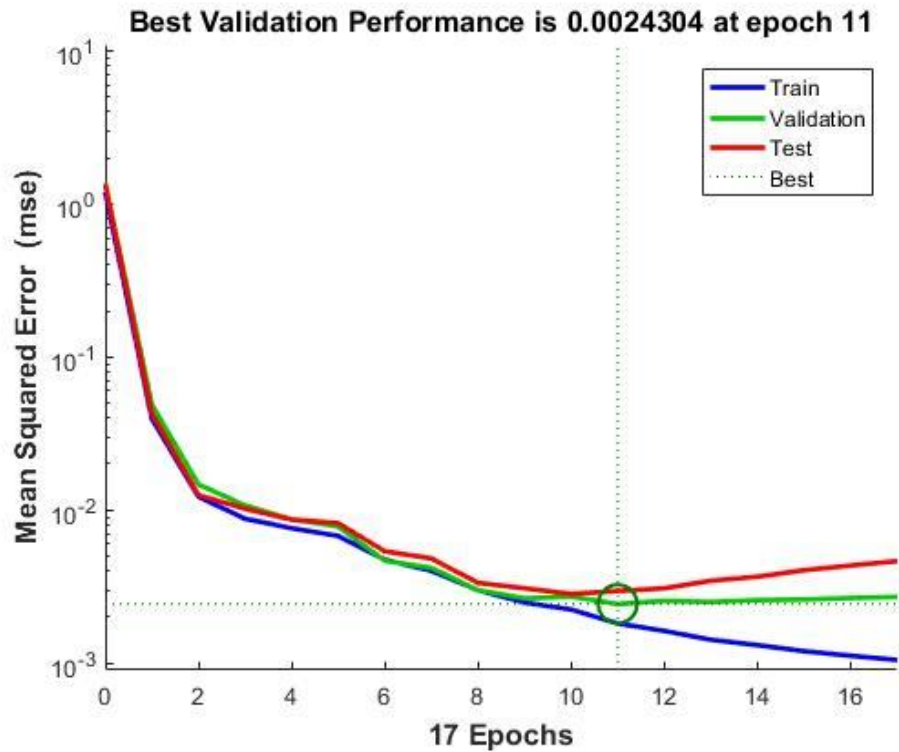


Figura 5.13 Performance. Caso A.

En tanto, *training state* (Figura 5.14) indicó que el proceso de entrenamiento se llevó a cabo hasta la época 17, en donde se tuvo 6 errores consecutivos, por lo que, el entrenamiento de la red dejó de mejorar en la época 11, lo que indica que en ese punto se detuvo el entrenamiento.

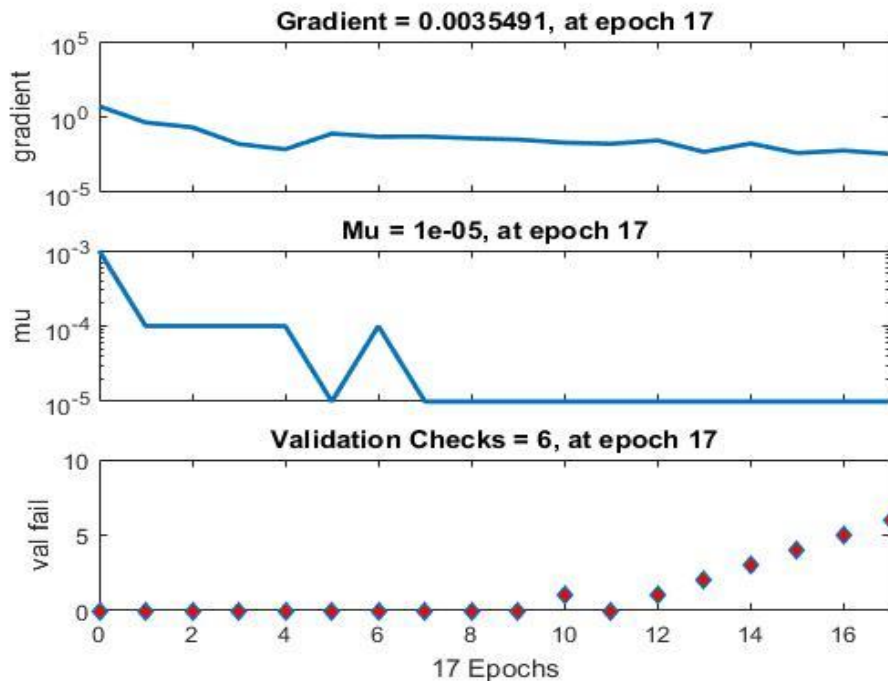


Figura 5.14. Training state. Caso A.

El histograma de error (Figura 5.15) indicó que más del 90% de los datos tienen un error entre -0,03119 y 0,06056, y cerca de un 75% de los datos tienen error cero. Esto, para fines prácticos indica que el error es aceptable, y que la red neuronal clasificó los datos conocidos correctamente.

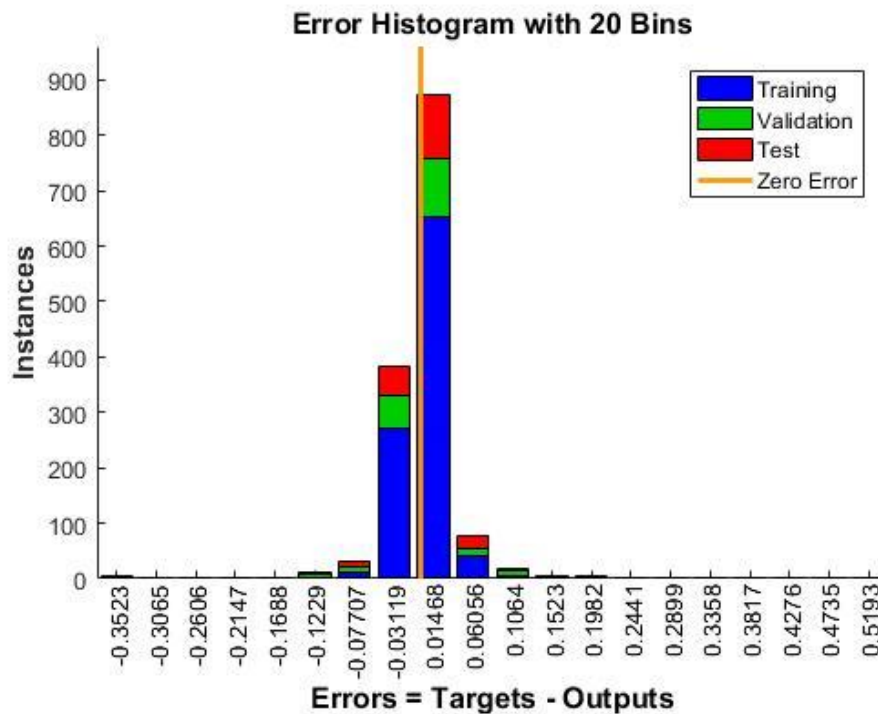


Figura 5.15. Error histogram. Caso A.

Por su parte, la curva ROC (Figura 5.16) indicó que la red neuronal es un modelo de clasificación óptimo, que no entrega valores falsos positivos o verdaderos negativos. Es decir, según los datos conocidos por la red neuronal, esta los clasifica perfectamente.

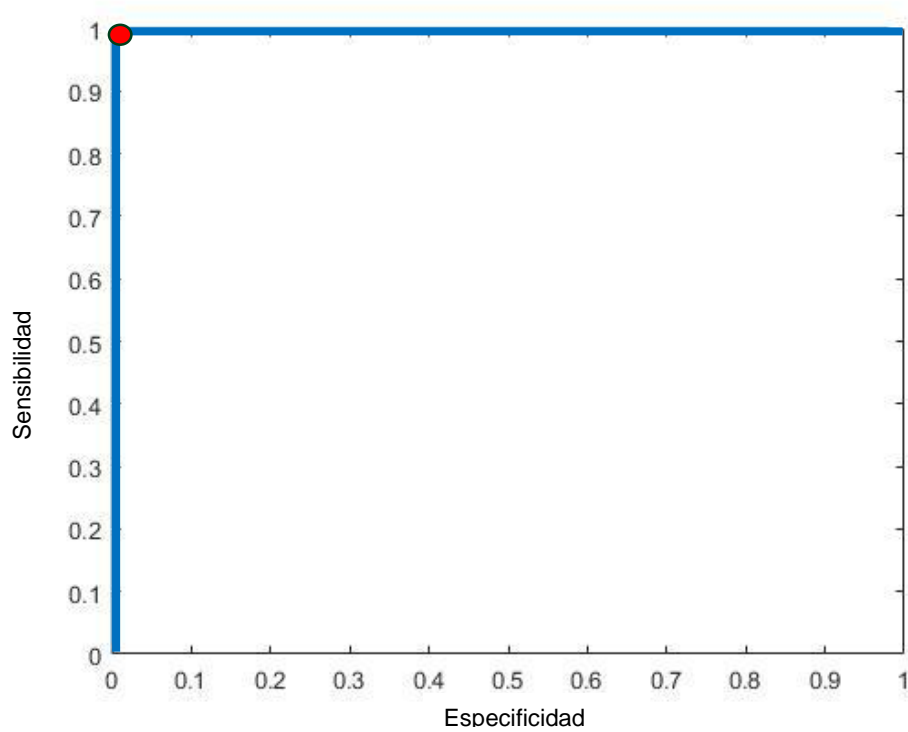


Figura 5.16. Curva ROC. Caso A.

Según los parámetros que evalúan el desempeño de la red neuronal, es posible decir que la red neuronal posee un excelente desempeño, alcanzando su óptimo en la época 11.

### 5.1.2 Caso B: Seis factores

Este análisis se realizó con los factores: elevación, distancia a lineamientos, geología, pendiente, orientación de ladera y distancia a ríos, que eran los seis factores con mayor relevancia según los resultados obtenidos en el análisis con 10 factores.

La Figura 5.17 muestra el mapa de susceptibilidad de valores continuos, y la Figura 5.18 el mapa categorizado.

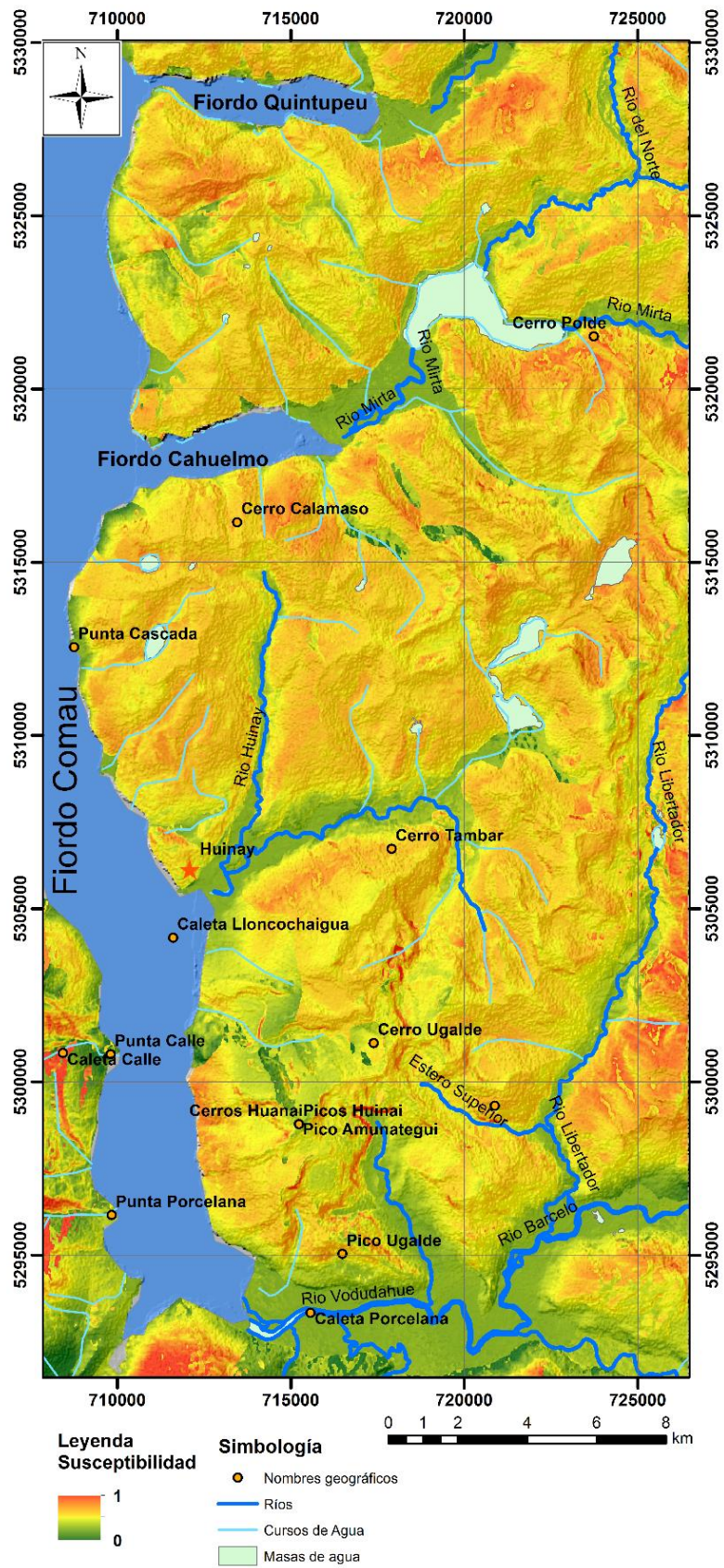


Figura 5.17. Mapa de susceptibilidad, clasificación continua. Caso B.



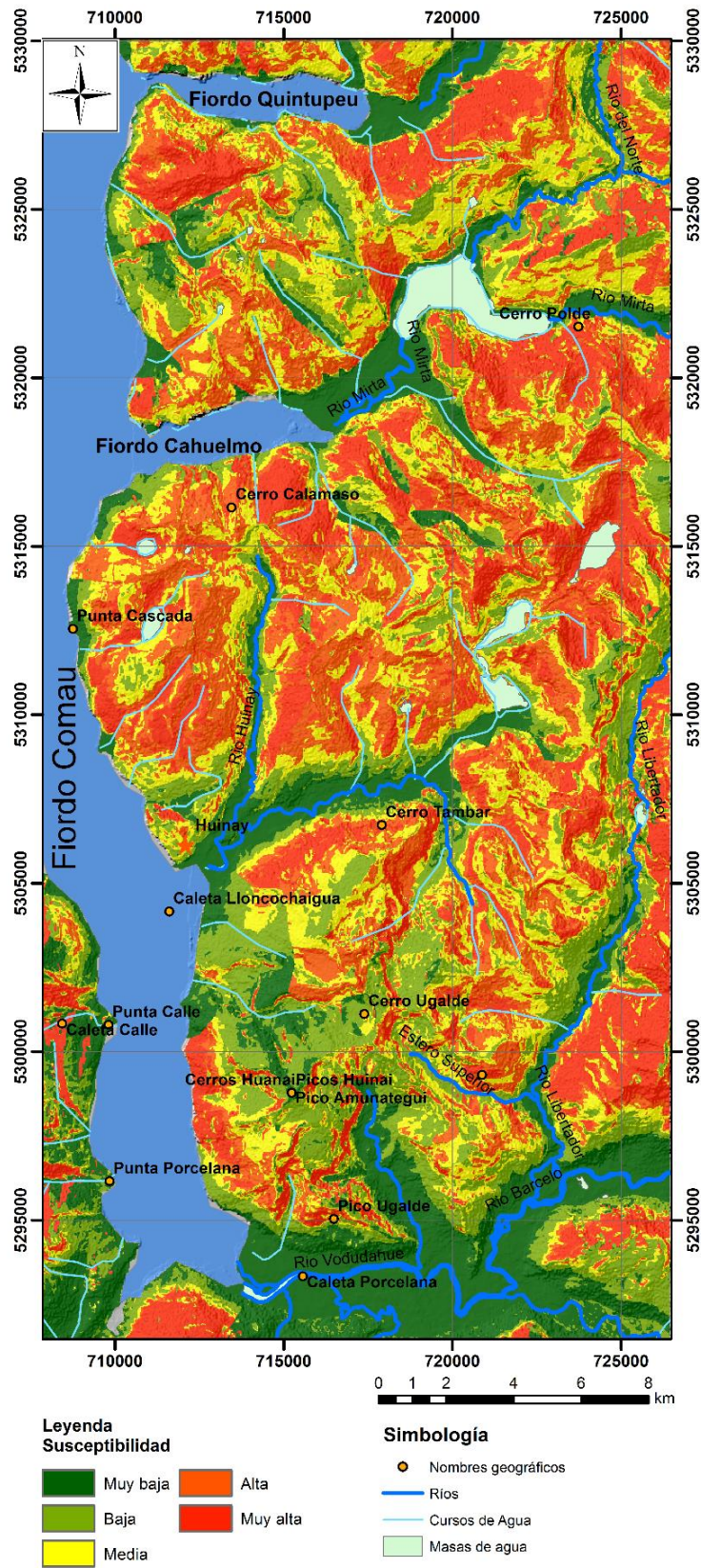


Figura 5.18. Mapa de susceptibilidad categorizado cualitativamente. Caso B.

En cuanto al desempeño de la red neuronal, el gráfico *MSE* indicó que las curvas de entrenamiento, validación y *test*, alcanzaron su óptimo en la época 27 con un error cuadrático medio de 0.3191%, pero la curva de entrenamiento en la época 27 tuvo un error menor mientras que la curva de *test* uno mayor.

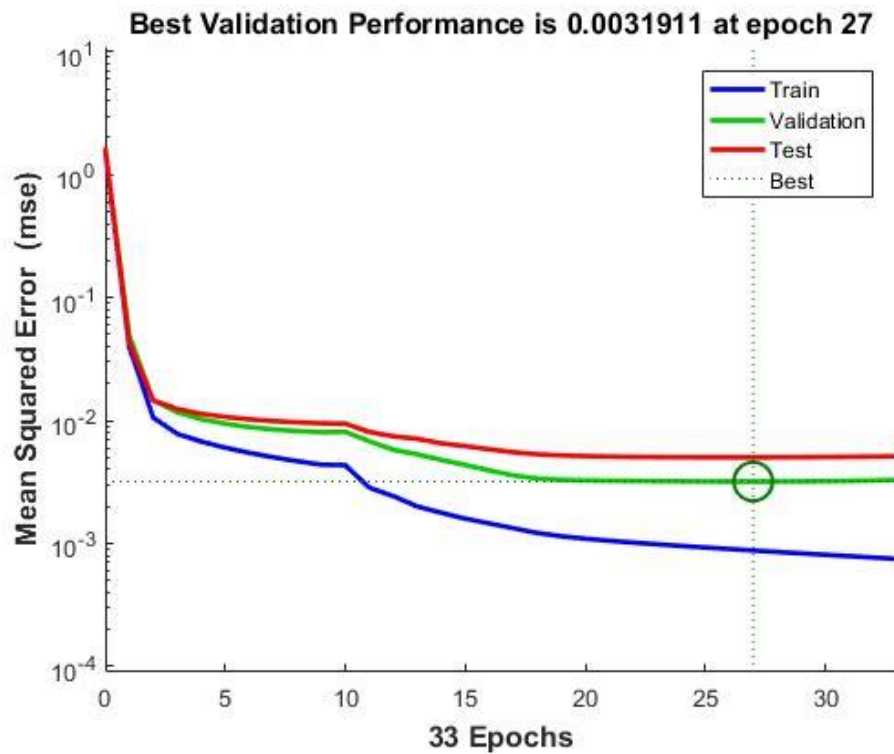


Figura 5.19. Performance. Caso B

En tanto, el estado de entrenamiento indicó que se realizaron 33 épocas, en las que las 6 últimas épocas tuvieron un error en la validación, por lo tanto, *validation check* fue el parámetro por el que la red neuronal detuvo sus iteraciones.

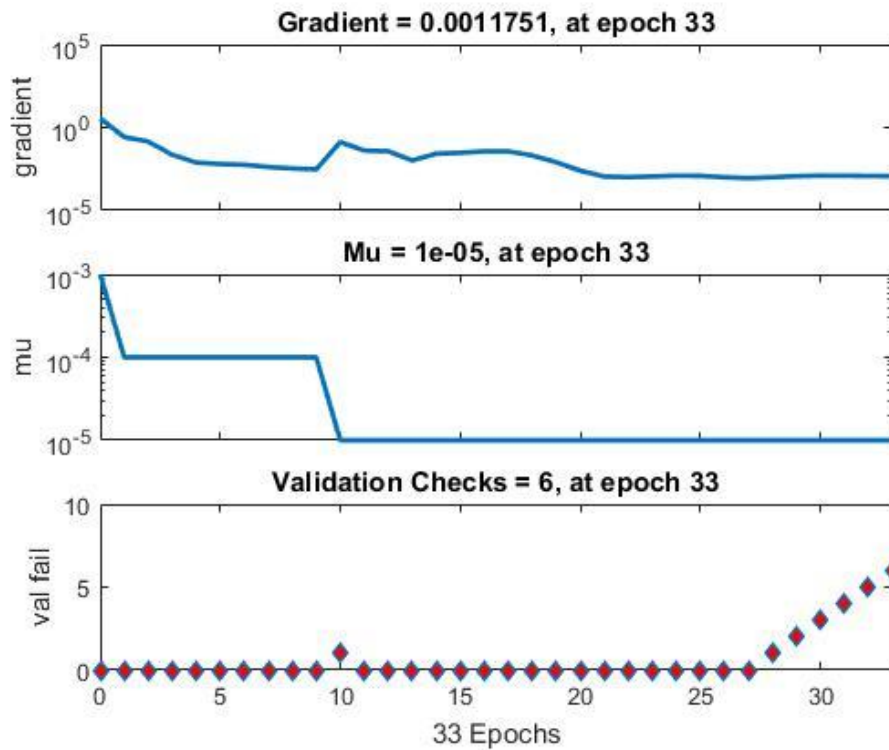


Figura 5.20. Training state. Caso B.

El histograma de error indicó que cerca del 90% de los datos tienen un error entre -0.0690 y 0.0643. Por lo tanto, la red neuronal clasificó de manera correcta los datos conocidos, con un error bastante bajo.

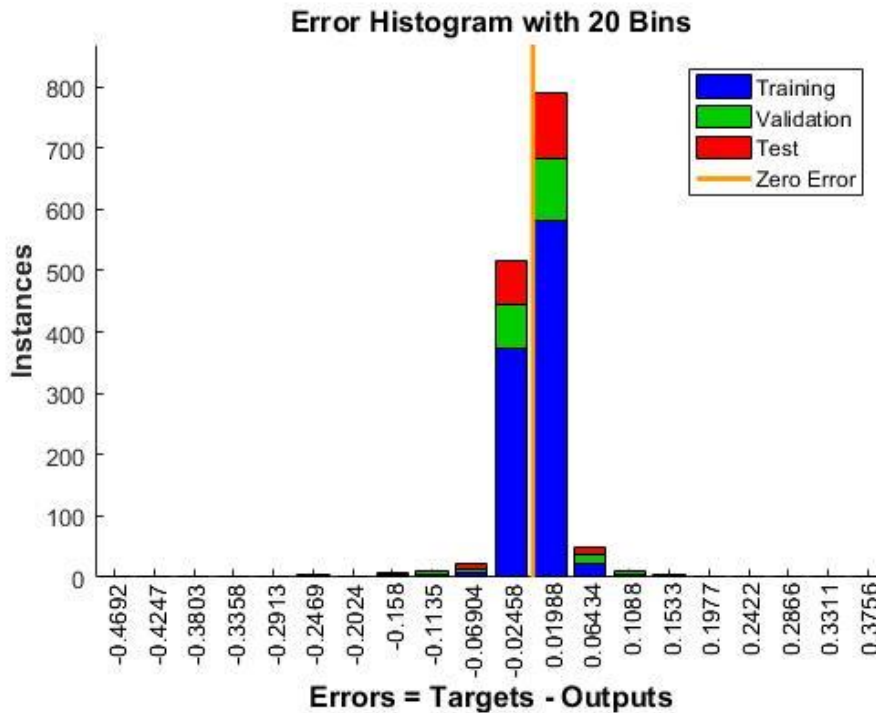


Figura 5.21. Error histogram. Caso B.

La curva *ROC* mostró una clasificación óptima, igual que para el Caso A.

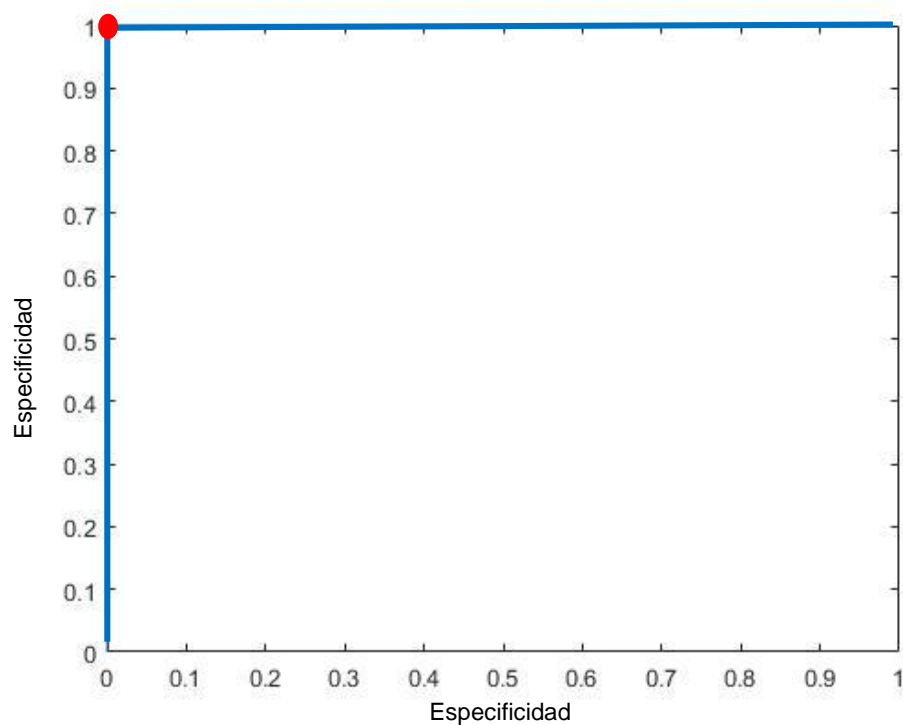


Figura 5.22. Curva *ROC*. Caso B.

### 5.1.3 Caso C: Tres factores

El tercer análisis se realizó con la elevación, distancia a lineamientos y geología. El mapa de susceptibilidad se presenta en la Figura 5.23 y Figura 5.24.



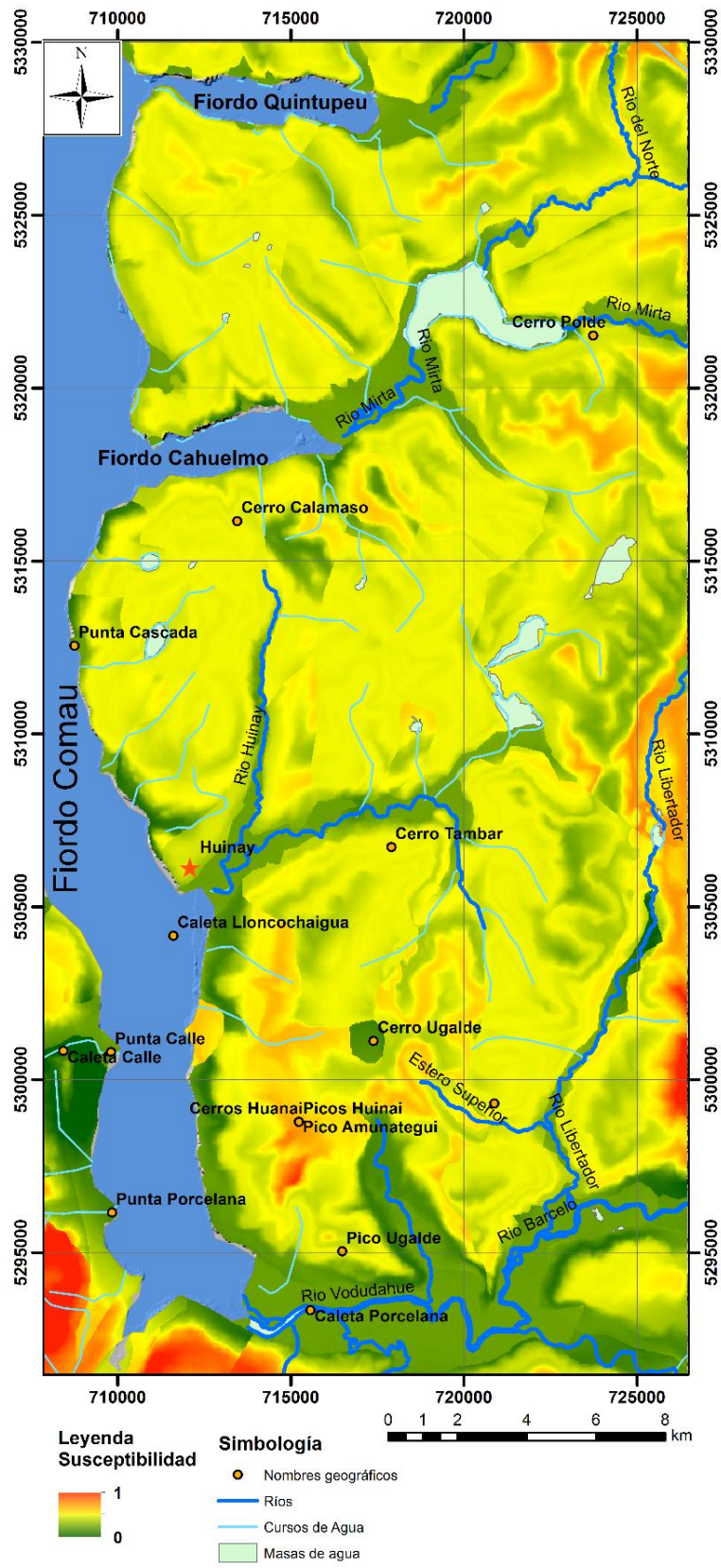


Figura 5.23. Mapa de susceptibilidad, clasificación continua. Caso C.

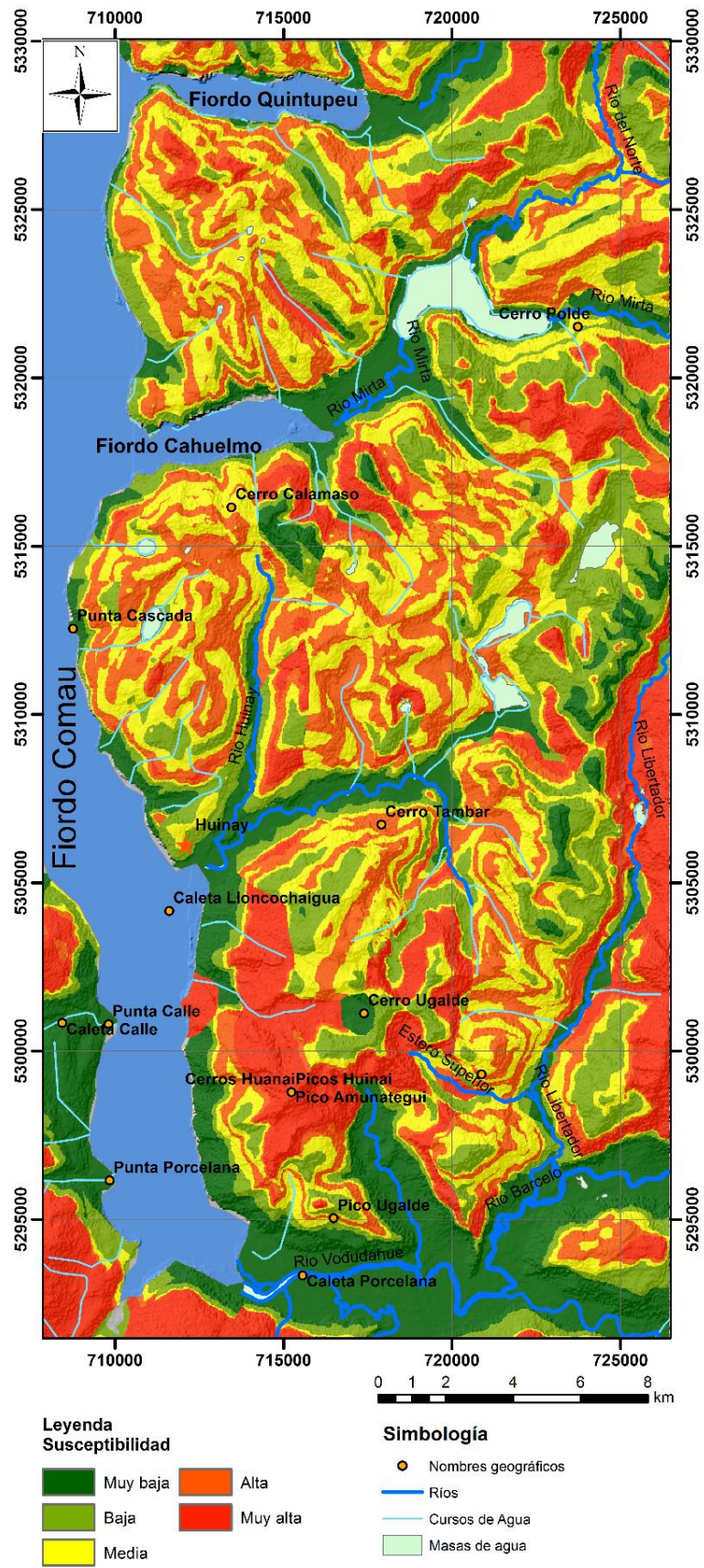


Figura 5.24. Mapa de susceptibilidad categorizado cualitativamente. Caso C.

En cuanto al desempeño de la red neuronal con tres factores, se observó que el *MSE* es el mismo para la curva de entrenamiento, validación y *test*, y es alcanzado en la época 13, con un valor de 0,9732%.

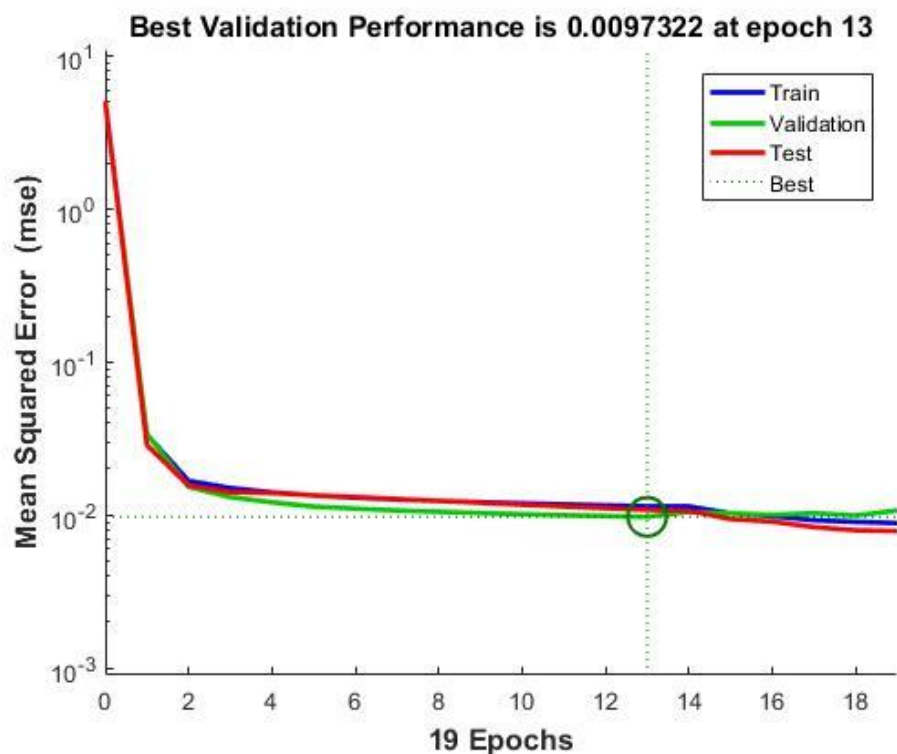


Figura 5.25 Performance. Caso C.

El gráfico del estado de entrenamiento, indicó que este se detuvo por seis errores consecutivos en la validación, al igual que el caso A y caso B.



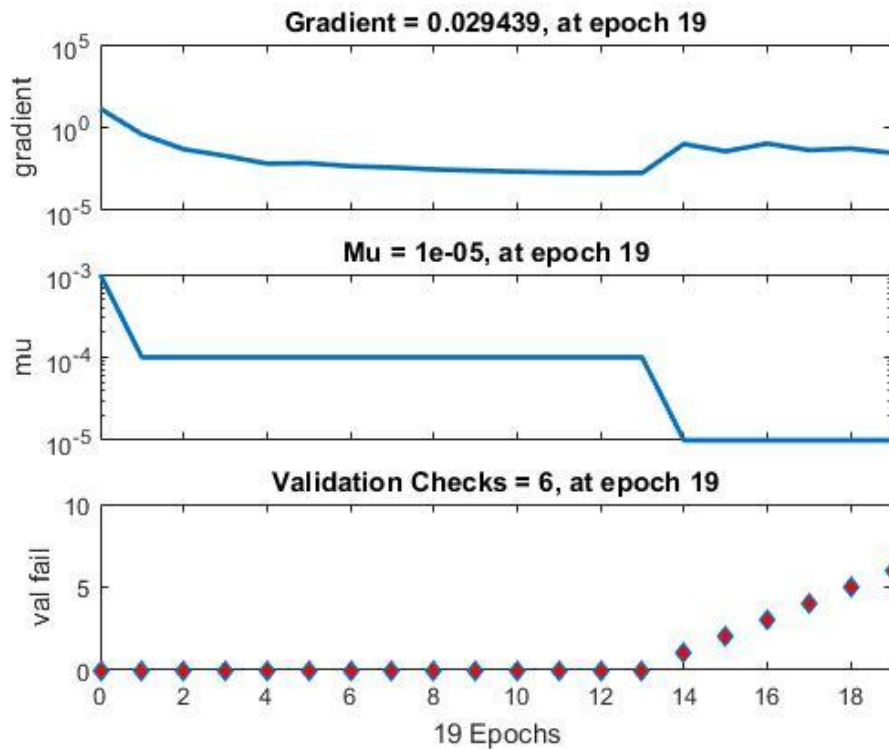


Figura 5.26. Train state. Caso C.

En tanto, el histograma de error (Figura 5.27) indica que más del 90% de los datos están entre -0.0790 y 0,0596. Esto indica que la red evaluó los datos de entrenamiento de manera correcta.

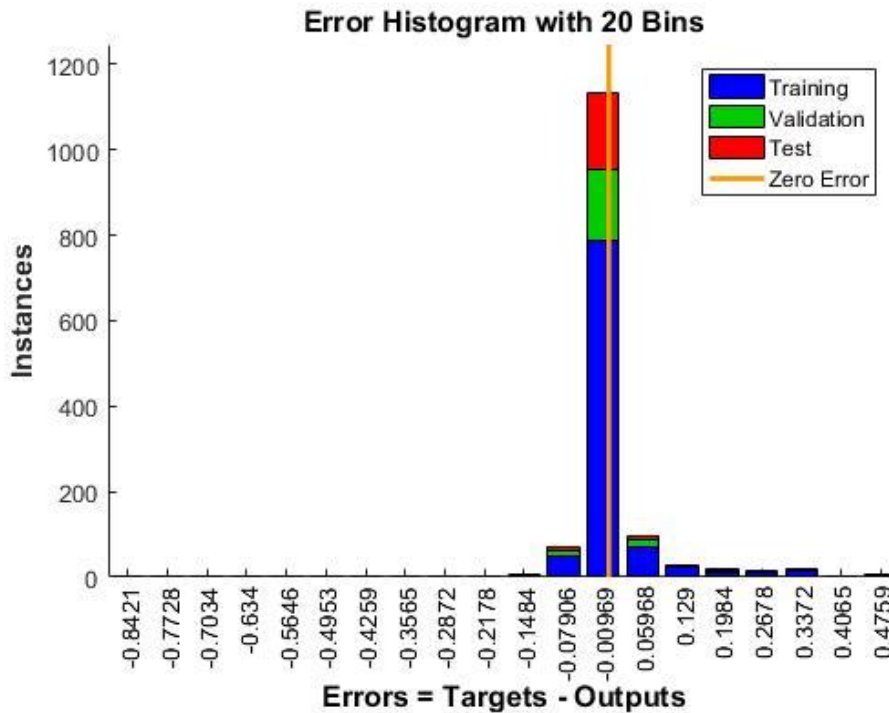


Figura 5.27. Error histogram. Caso C



La curva *ROC* indicó que la clasificación no es perfecta, y que puede tener falsos positivos o verdaderos negativos (Figura 5.28).

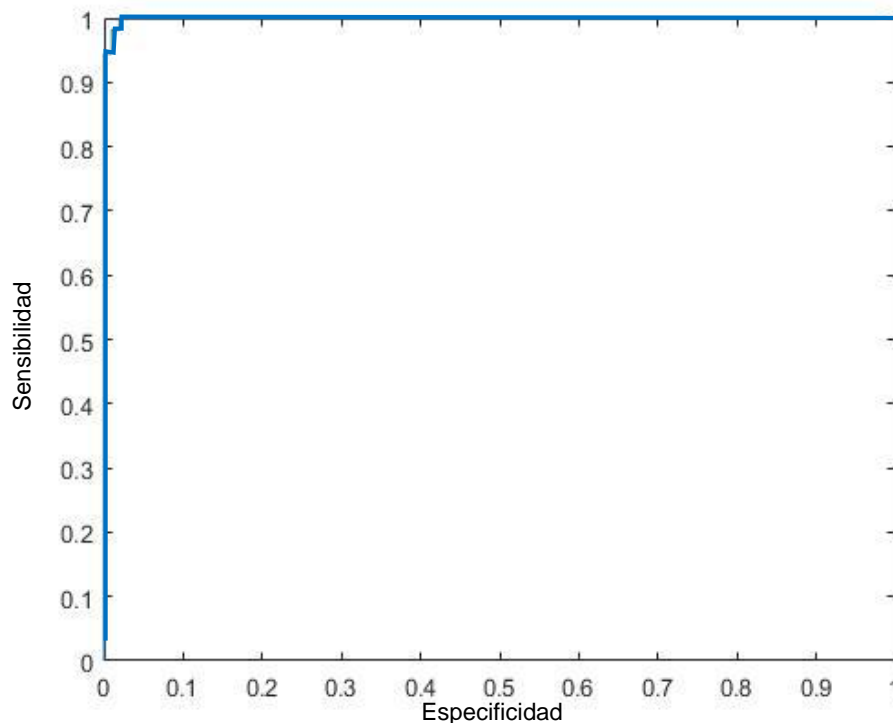


Figura 5.28. Curva *ROC*. Caso C.

#### 5.1.4 Caso D: Sin elevación

El factor elevación fue clasificado por la red neuronal como el más relevante, por esto, se decidió hacer un análisis sin considerar este factor, para determinar cómo varía el desempeño de la red sin este factor. Los nueve factores fueron distancia a lineamientos, geología, pendiente, dirección de ladera, distancia a ríos, curvatura media, distancia a fallas, radiación solar y distancia a cursos de agua (Figura 5.29 y Figura 5.30).

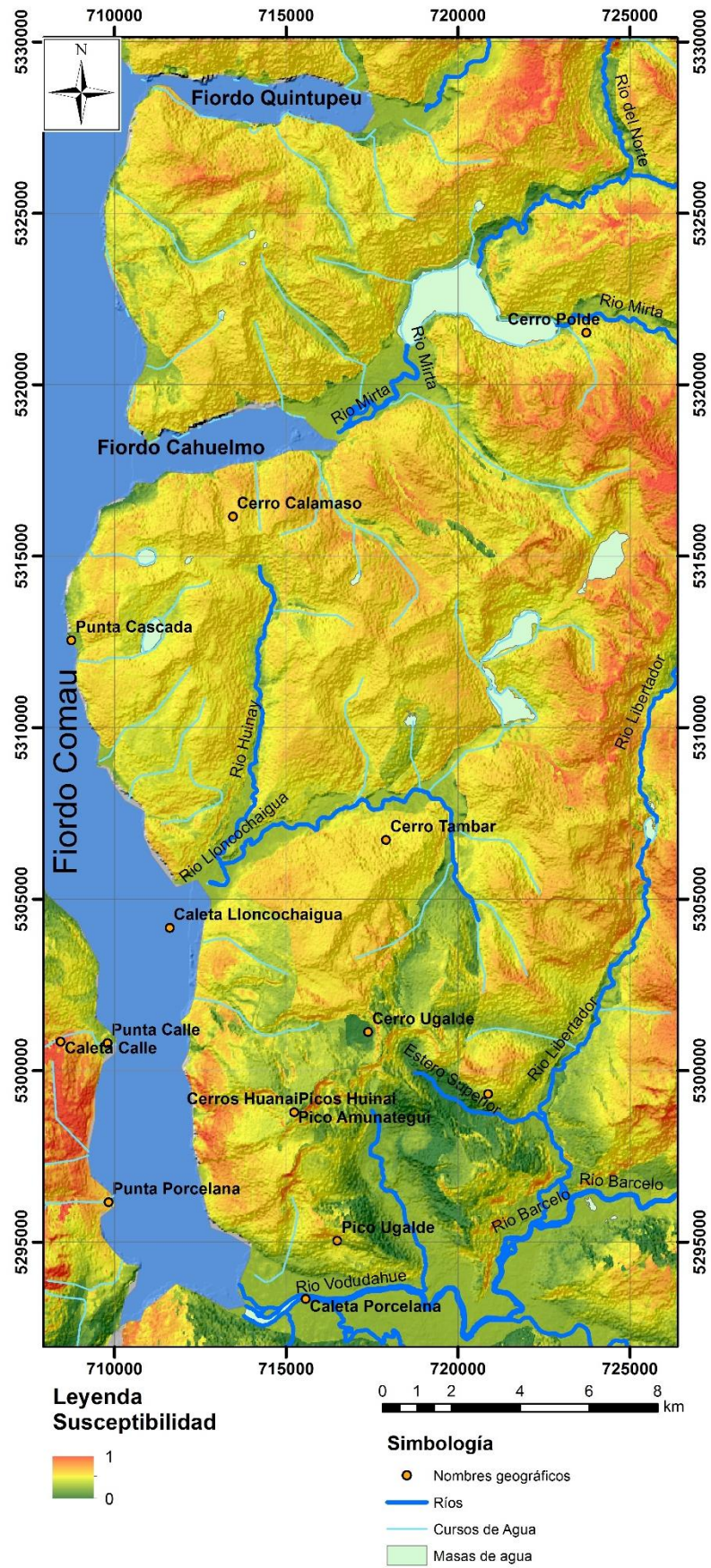


Figura 5.29. Mapa de susceptibilidad, clasificación continua. Caso D.



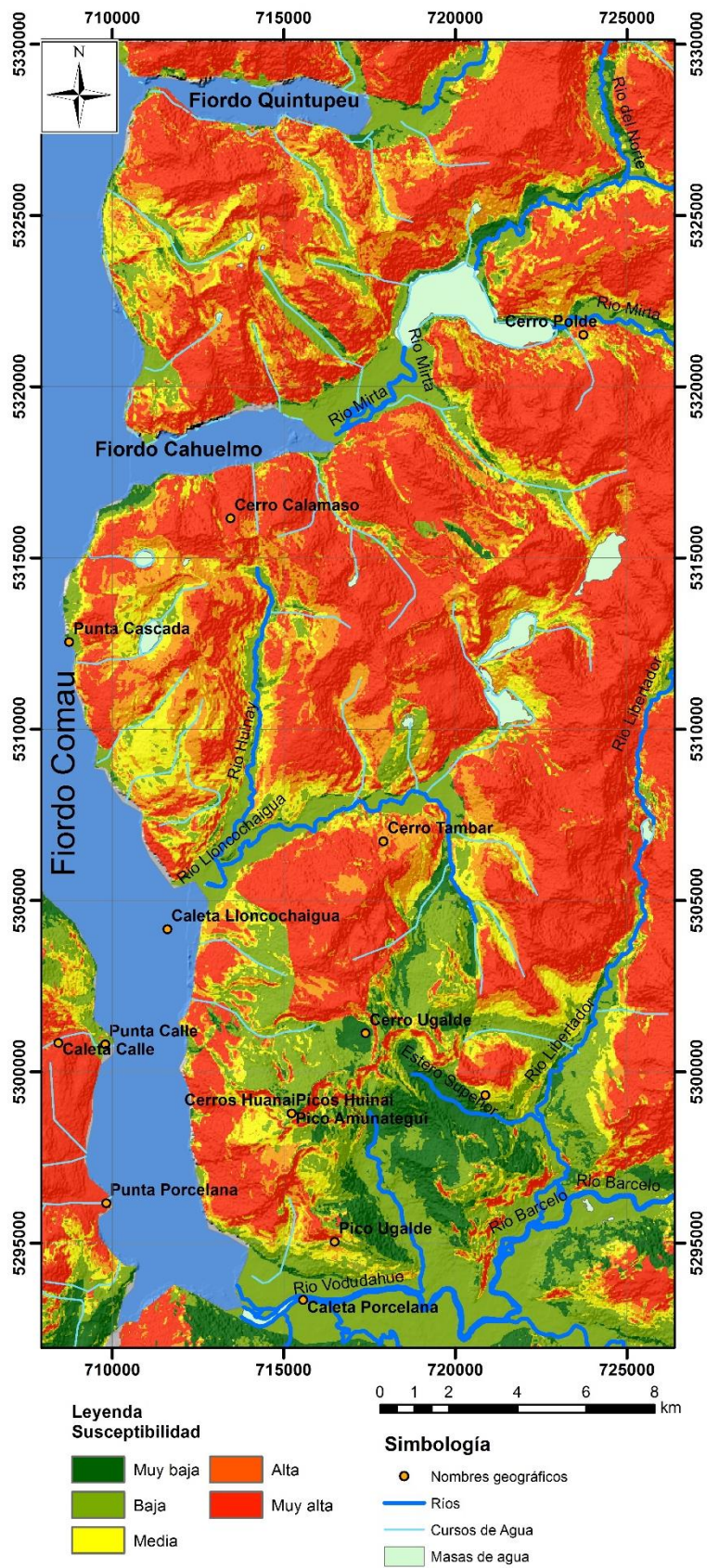


Figura 5.30. Mapa de susceptibilidad categorizado cualitativamente. Caso D.

En cuanto al desempeño de la red neuronal se tiene esta converge en la época 17 con un error cuadrático medio de 0,0058 (Figura 5.31).

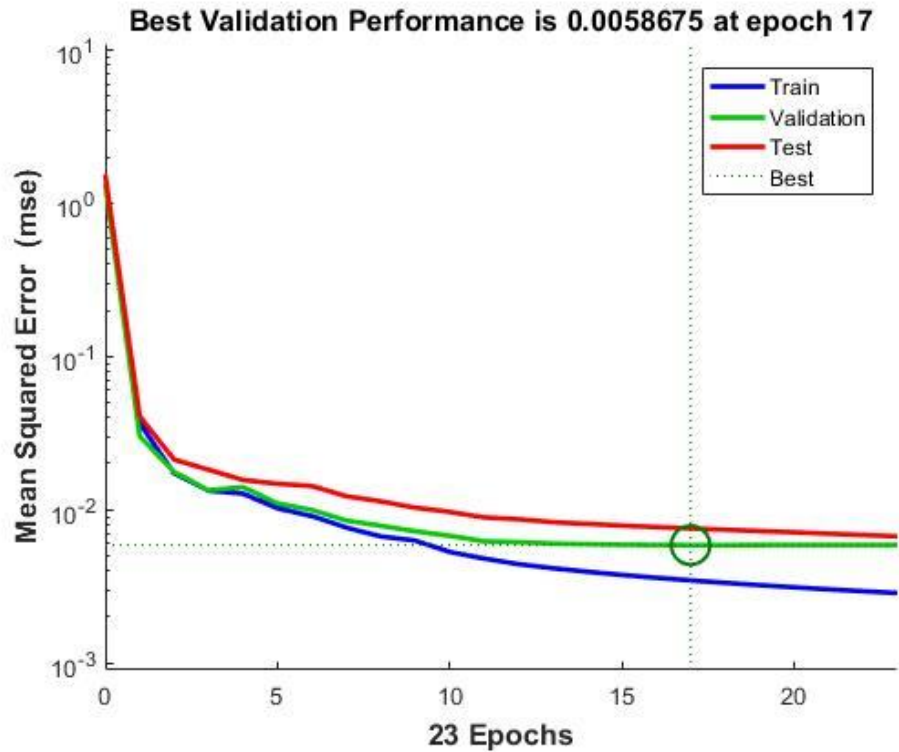


Figura 5.31. Performance. Caso D.

En tanto, *training state* indicó que el proceso de entrenamiento se llevó a cabo hasta la época 23, en donde se obtuvo 6 errores consecutivos, por lo que la red dejó de entrenar (Figura 5.32).



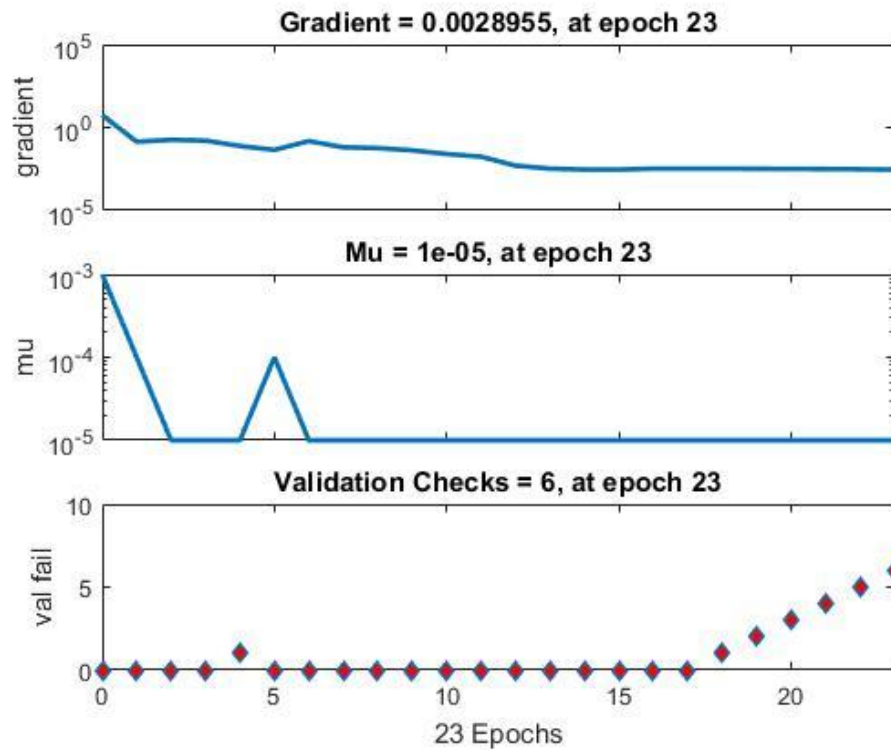


Figura 5.32. *Training state.* Caso D.

El histograma de error indicó que cerca del 90% de los datos tienen un error entre -0,1618 y 0,1283. Esto significa que el error entregado es poco aceptable (Figura 5.33).

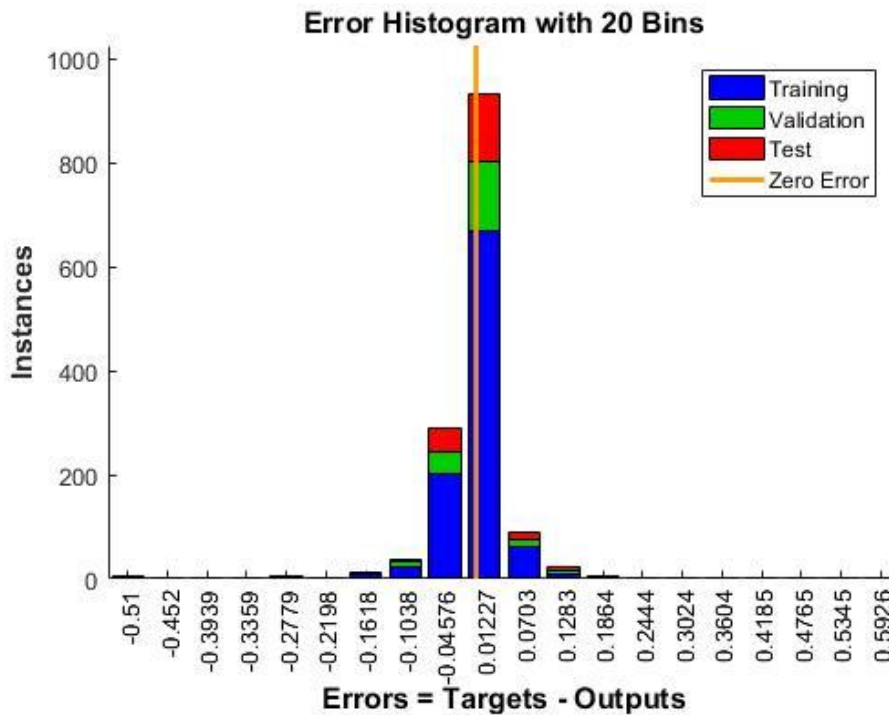


Figura 5.33. *Error histogram.* Caso D.

Respecto a los resultados obtenidos de la curva *ROC* estos indicaron que tiene un desempeño cercano al 96%, lo que significa que puede entregar resultados falsos positivos (Figura 5.34).

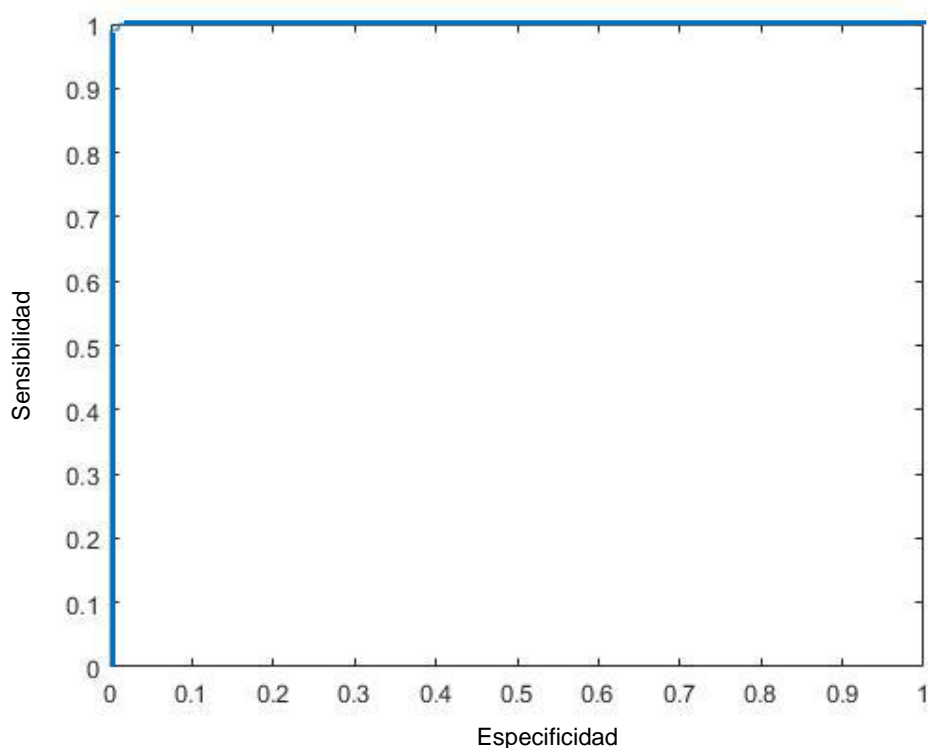


Figura 5.34. Curva *ROC*. Caso D.

## 5.2 Correlación entre casos

Para la evaluación de la correlación entre los análisis se ocupó el coeficiente de correlación de Pearson y la covarianza. Para esto se consideró como caso base o teórico los resultados de susceptibilidad del Caso A, análisis con 10 factores, y los casos C, B y D, como caso estudio.

Así, se estudió si la correlación entre los datos teóricos y los análisis tenían era positiva, negativa, o si no tenían ninguna correlación.

Según lo mencionado, el coeficiente de Pearson para el Caso B tuvo un valor de 0,57 (Tabla 5.11), dentro del rango entre 0 y 1, lo que indica que se tiene una correlación positiva, es decir, para altos valores de la susceptibilidad para el Caso A se tuvo altos valores para el Caso B de igual forma para el caso D con un valor de 0,59.

En tanto la covarianza tuvo un valor mayor a 0, lo que indicó, al igual que el coeficiente de Pearson, que se existe una correlación positiva para todos los casos respecto al caso A.

Para el caso C, también se tuvo una correlación positiva pues el coeficiente de Pearson tuvo un valor de 0,4495, dentro del rango 0 y 1 que indica correlación positiva, mientras que la covarianza posee un valor 0,0070.

En el caso D, el coeficiente de Pearson indicó una correlación positiva con un valor de 0,5902. La covarianza con un valor de 0,0057, cercano a 0, indicó que para altos valores del caso A, se tienen valores altos del caso D.

Tabla 5.11. Coeficientes para medir correlación del Caso B y C, respecto al Caso A

<b>Coeficientes</b>	<b>Caso B</b>	<b>Caso C</b>	<b>Caso D</b>
Coeficiente de Pearson	0,5726	0,4495	0,5902
Covarianza	0,0043	0,0070	0,0057

## 6 DISCUSIONES

A continuación, se presentan las discusiones del presente trabajo, que fueron divididas en: los resultados obtenidos del mapa de catastro, la elección de factores, escala de trabajo, la representatividad y cantidad de datos necesario para realizar un análisis de susceptibilidad mediante redes neuronales, los parámetros en la creación de la misma (número de capas oculta, cantidad de neuronas en la capa oculta y función de activación), discusión de la susceptibilidad de los diferentes casos, una comparación con otros trabajos existentes a la fecha (Náquira, 2009 y Molina, 201), validación *in situ* y ventajas y desventajas.

### 6.1 Discusión de la escala de trabajo

Determinar la escala de trabajo cuando se realiza un estudio de susceptibilidad tanto para fines académicos como empresariales (asociadas a geología y obras civiles) es relevante pues incide de manera directa en los gastos económicos asociados, ya que levantar información geológica en una determinada área con una escala de 1:10.000 tendrá costos monetarios menores que si realiza a una escala de 1:1.000, además de grandes variaciones significativas en el tiempo invertido. Es así como determinar una escala óptima de trabajo se vuelve fundamental.

Las metodologías que ocupan redes neuronales para la evaluación de susceptibilidad de generación de remociones en masa en general utilizan escalas de trabajo de detalle 1:10.000 (Saro, 2016; Tien Bui *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015), aunque Yilmaz (2009), pionero en el uso de redes neuronales aplicada a susceptibilidad de remociones en masa, ocupó una escala de 1:25.000 obteniendo buenos resultados en su análisis.

En tanto, la resolución de los archivos DEM de los cuales se obtiene la información, y que son en gran medida la fuente principal de información de los análisis de susceptibilidad, tienen una resolución de 10x10 m, pero Yilmaz (2009) ocupa mapas geológicos que presentan una escala de trabajo de 1:35.000 los que son convertidos a formato *raster* con un tamaño de 10x10 m, lo que implica una extrapolación de datos, pero aun así los resultados obtenidos son validados.

En este estudio se ocupó un DEM resolución de 30 m, y se realizaron análisis aumentando el tamaño del pixel del DEM a 90x90 m. Esto impactó negativamente al análisis de susceptibilidad, pues llevó a tomar puntos de información poco exactos, lo que disminuyó la capacidad de la red neuronal de reconocer correctamente las características de la zona de estudio, provocando que otorgue valores de susceptibilidad poco correctos.

La escala de trabajo ocupada en este estudio fue 1:25.000, y una resolución del DEM de 30 m, lo que permitió tener datos óptimos con resultados representativos de lo observado.

### 6.2 Discusión de la cantidad de datos y su representatividad

Las redes neuronales son un modelo de clasificación robusto, que permite reconocer características similares basadas en el entrenamiento con datos conocidos. Por tanto, determinar los datos con los cuales se entrena una red neuronal es prioridad, pues al



entregar datos incorrectos la red no podrá reconocer y clasificar datos desconocidos que no pertenezcan a la matriz de entrenamiento.

La literatura no tiene consenso en una cantidad mínima de datos para realizar un análisis de susceptibilidad, ya que existen análisis con 100 datos de deslizamientos (Dieu Tien *et al.*, 2015), mientras que otros ocupan cerca de 700 datos de remociones en masa.

En lo que respecta al análisis realizado en este trabajo, se utilizaron 730 puntos de información que correspondieron a las zonas de escarpe de 126 remociones en masa, mientras que los puntos donde no ocurre remoción correspondieron a 345, que equivale a 0,079% y 0,037%, respectivamente, del total de puntos evaluados (916.816).

Si bien, es importante tener una cantidad mínima de datos, es más relevante saber que las características (factores) que se ocupan son representativas, es decir, que las características seleccionadas tienen una correlación con los eventos de remociones en masa y permiten generar un punto de inflexión en el análisis.

Por lo mencionado, cuando se tenga características representativas, y la zona de estudio presente una configuración de factores similar, se sugiere que la cantidad mínima de datos para obtener resultados óptimos es de 100 (Dieu Tien *et al.*, 2015).

### **6.3 Discusión del mapa de catastro**

Según lo observado en el mapa de catastro, es posible determinar que las remociones en masa más frecuentes son las caídas de roca y, en segundo lugar, los deslizamientos de suelo.

Dado que en esta metodología no se evaluó el área de las remociones, sino que el área de generación de las mismas, se determinó que las caídas de rocas poseen una mayor área de generación, seguida por los deslizamientos de suelo.

En tanto, los depósitos de remoción en masa ocupan un área de 3,92 km<sup>2</sup> y las remociones en masa antiguas, que fueron consideradas dentro de depósitos fluviotorrenciales, ocupan un área de 5,23 km<sup>2</sup>.

Generar una diferencia en el mapeo, subdividiendo una remoción entre su zona de generación y su depósito, facilitó reconocer los escarpes de las remociones, que a su vez sirvieron a esta metodología para que la red neuronal replicara las condiciones bajo las cuales se produjeron las remociones en masa, y no replicara condiciones bajo las que se encuentran los depósitos de las remociones, las que en muchas ocasiones han perdido las condiciones generadoras y solo se han depositado sobre una superficie por efecto de la gravedad.

### **6.4 Discusión de la elección de factores**

Cabe señalar que todas las metodologías de evaluación de susceptibilidad trabajan bajo la premisa de que los factores condicionantes no son necesariamente independientes entre sí, y pueden tener algún grado de correlación entre ellos.

La elección de los factores condicionantes de eventos de remociones en masa es un punto de controversia, pues no existe un criterio establecido que determine cuáles son los factores de mayor relevancia. Así, determinar los factores condicionantes y la cantidad de estos para aplicar una determinada metodología depende de quien realice el análisis.

Si bien es cierto, hay factores que son comunes en todas las metodologías y ampliamente usados, como la pendiente, la orientación de ladera, la distancia y densidad de drenaje, la distancia y densidad de fallas, mientras que otros que son particulares de una determinada zona de estudio como la vegetación, el espesor de suelo, la distancia a caminos, etc., y, por lo tanto, las metodologías se ajustan a las características de cada zona.

Es así como se deben descartar factores que no presenten una correlación con los eventos de remociones en masa y, por otra parte, si se observa que existe un factor correlacionado a las remociones en masa, este debe ser agregado al análisis pues favorecerá el reconocimiento de la susceptibilidad.

Para efectos de esta metodología, la elección de factores se realizó, en primera instancia, bajo los criterios de la literatura disponible y, en segunda instancia, bajo las observaciones de terreno. Es así como se determinó trabajar con 10 factores.

Factores como geología, pendiente, dirección de la ladera y curvatura, fueron considerados a partir de la literatura, ya que Náquira (2009) realiza un análisis de susceptibilidad de remociones en masa con el método estadístico bivariado, al norte del fiordo Quintupeu, considerando estos factores los que entregan información relevante de la zona.

Asimismo, los factores como distancia a fallas y lineamientos también son considerados por influencia de la literatura. En una primera instancia se creyó que las fallas podían estar influenciados por la ZFLO, lo que no fue del todo concluyente con los resultados obtenidos. Por otro lado, los lineamientos que corresponden a discontinuidades locales de menor envergadura.

Es por esto que incluir ambas dentro de un solo factor, se consideró poco correcto, ya que la influencia que pueden tener en los eventos de remociones en masa es distinta. Zonas de discontinuidades importantes (fallas observadas) tendrán un área de impacto mayor ya que la actividad que tuvieron en el pasado, pudieron generar zonas de mayor inestabilidad (fracturamiento, erosión, meteorización) en las laderas, mientras que el impacto de discontinuidades menores (lineamientos) tendrán un área de impacto menor.

Para el caso de distancia a ríos y cursos de agua, también se consideraron por separado dichas distancias, ya que la zona de estudio presenta cuatro ríos importantes: Quintupeu, Mirta, Huinay y Vodudahue, los que tienen un caudal importante y permanente en todas las estaciones del año, mientras que los cursos de agua corresponden a quebradas de caudal menor e intermitente, que solo se activan bajo periodos prolongados e intensos de lluvia, generalmente en épocas de invierno.

En tanto, la radiación solar anual fue considerada porque en un primer momento se creyó que podía reemplazar el efecto del factor orientación de ladera, ya que tienen

características similares, pues ambos están relacionados con el grado de la saturación del suelo o roca. Pero bajo los resultados obtenidos, se determinó que la orientación de la ladera posee una relación mucho más evidente que la radiación solar anual.

Por otra parte, la zona de estudio presentaba abundante vegetación, tanto de árboles y arbustos. Se trata de una de las zonas de mayor flora del país, pues en ella se encuentran el Bosque Siempre Verde Patagónico, el Bosque Laurifolio Valdiviano y el Bosque Andino Patagónico (García y Ormazábal, 2008). Laurifolio Valdiviano es, además, un denso sotobosque. Pero en el trabajo de terreno se observó que a pesar de la gran presencia de vegetación las remociones en masa ocurrían de manera indistinta, es decir, no existía una correlación entre remoción en masa y vegetación, ya sea por su tipo, densidad o altura. Por lo tanto, este factor no fue considerado dentro del análisis de susceptibilidad.

## **6.5 Discusión de la red neuronal**

En la configuración del *script* de la red neuronal propiamente tal, parámetros como el número de capas ocultas, número de neuronas en la capa oculta y funciones de activación, fueron determinantes en la obtención del resultado de susceptibilidad.

### **6.5.1 Número de capas ocultas**

El número de capas ocultas de una red neuronal determina su desempeño, según los parámetros indicados en el punto 4.3.11 Desempeño de la red neuronal, como también el tiempo que demora el proceso de entrenamiento de la red neuronal.

Por lo mencionado, se realizaron distintos análisis variando la cantidad de capas. Primero, se realizó un análisis con una capa oculta el que entregó buenos resultados de susceptibilidad, como también un correcto desempeño de la red neuronal. Luego, se aumentó gradualmente el número de capas llegando a un máximo de 5 lo cual incrementó notoriamente el tiempo de entrenamiento de 30 segundos a 25 minutos sin que esto implicase mejoras significativas en el desempeño de la red neuronal disminuyendo en un 0,1% el error. Es decir, se aumentó en 60 veces el tiempo de entrenamiento de la red neuronal para disminuir el error en un factor de 1/1000 lo que en términos prácticos no representa una mejora.

Es importante señalar, y no se debe perder de vista, que las redes neuronales abordan problemas de mucha mayor complejidad, en donde se utilizan centenares de características (factores) y millones de datos. Para esos casos es recomendable aumentar el número de capas ocultas.

De esta forma, se concluyó que el número óptimo de capas ocultas de la red neuronal para este conjunto de datos es de una.

### **6.5.2 Número de neuronas en la capa oculta**

Al igual que el número de capas ocultas, la cantidad de neuronas en la capa oculta, también determina el desempeño de la red neuronal y el tiempo implicado en el proceso de entrenamiento.

Si bien, en la literatura se plantean variadas reglas para determinar el número de neuronas en la capa oculta, el resultado de este procedimiento se obtuvo luego de un proceso de ensayo y error.

El primer análisis se realizó con 25 neuronas, lo que reveló un mal desempeño de la red neuronal. Luego, se incrementó el número en múltiplos de 25, hasta llegar a 200 neuronas. De estos análisis se determinó que un número inferior de 100 neuronas evidenciaba un mal desempeño de la red, con un mayor porcentaje de error e histogramas de error dispersos.

Con una cantidad de neuronas de 100, la mejoría en el desempeño de la red fue notoria, y son los resultados que se muestran en el punto 5.5.1. Al continuar aumentando la cantidad de neuronas, si bien, el tiempo de entrenamiento no aumentaba significativamente, la mejoría en el desempeño tampoco lo hacía, ya que el *MSE*, *error histogram* y curvas *ROC* se mostraban constantes.

### 6.5.3 Funciones de activación

Las funciones de activación determinan cómo serán traspasados los pesos sinápticos de una capa a la siguiente; si lo harán de forma lineal (*purelin*), logística (*logsig*) o como la función tangente hiperbólica (*tansig*).

Como la metodología determinó el uso de una única capa oculta, se requirió de dos funciones de activación, una para la capa oculta, y otra para la capa de salida.

Para determinar las funciones de activación se realizaron análisis con las funciones logística, tangente hiperbólica y lineal, tanto como para la activación de la capa oculta como de la capa de salida.

Primero se realizaron análisis con la misma función para la capa oculta y para la capa de salida. Para el caso de la función logística, si bien, se tuvo un excelente desempeño de la red neuronal, los datos se acumulaban en el valor medio de la función 0,5, y no se obtenía valores menores a este. Para la función tangente hiperbólica, también se tuvo un excelente desempeño de la red neuronal, pero los valores de susceptibilidad se acumulaban en los extremos de los valores de imagen de la función, obteniéndose valores -1 y 1, con una cantidad mínima de valores intermedios. En tanto, realizando análisis con funciones lineales, el desempeño de la red disminuía notoriamente, obteniendo errores altísimos, el histograma de error mostraba una alta dispersión y las curvas *ROC* muy lejanas a una clasificación óptima.

Segundo, se realizaron análisis con una combinación de las funciones de activación, es decir, una función para la capa oculta y una función diferente para la capa de salida. Así se evidenció que poner una función de activación lineal en la capa oculta disminuía notoriamente el desempeño de la red, por lo que se descartó. En tanto, una combinación de la función logística y tangente hiperbólica, entregaba un conjunto de datos anómalos que en el histograma de error se ubicaban con un valor cercano al -0,5%, lo que no se logró explicar, pero influía negativamente en el desempeño de la red.



Por lo mencionado, se optó por una combinación de las funciones de activación del tipo tangente hiperbólica en la capa oculta, y una función lineal en la capa de salida. Esto permitió obtener una distribución de susceptibilidad del tipo gaussiana que es lo esperable en fenómenos naturales.

## 6.6 Discusión de los resultados del análisis de susceptibilidad

Bajo los análisis realizados en el punto 5.11 Caso A: Diez factores, fue posible reconocer las condiciones que caracterizan las distintas categorías de susceptibilidad.

También se cuenta con los resultados provistos por Molina (2016), que mediante el método bivalente determina el peso de cada factor y la clase de cada uno. Esto sirvió para encontrar diferencias y similitudes en la evaluación de susceptibilidad propuesta por esta metodología, así como también con la incidencia de los factores condicionantes.

Cabe señalar que Molina (2016) trabajó sobre ambas laderas del fiordo Comau, mientras que esta metodología se aplicó solo sobre la ladera este.

Además, hay diferencias entre la elección de los factores condicionantes, la que se observa en la Tabla 6.1. Mientras esta metodología diferencia entre cursos de agua y ríos, Molina (2016) sólo los considera como drenaje. Asimismo, distancia a fallas y distancia a lineamientos, lo considera distancia a lineamientos/fallas.

Tabla 6.1. Factores condicionantes propuestos por esta metodología, y los propuestos por Molina (2016).

<b>Factores de este trabajo</b>	<b>Factores Molina (2016)</b>
Pendiente	Pendiente
Elevación	Altura
Orientación	Orientación
Curvatura media	Curvatura de plano
	Curvatura en perfil
	Densidad de drenaje
Distancia a ríos	Distancia a drenaje
Distancia a cursos de agua	
Distancia a fallas	Distancia a lineamientos/fallas
Distancia a lineamientos	
	Densidad de lineamientos/fallas
Geología	Geología

Esta metodología, no considera factores como densidad de drenaje y densidad de fallas a lineamientos, pues si ya se consideró un factor de distancia a lineamientos/fallas y drenaje, considerar un factor de densidad es darle un doble valor a un mismo factor, ya que estarán correlacionados positivamente.

## 6.6.1 Factores condicionantes

Una vez clasificados los factores condicionantes, se pudo reconocer qué clase tenía mayor incidencia en las remociones en masa. Es así como se reconoció cuál tenía más aporte a la susceptibilidad.

### 6.6.1.1 Elevación

Las zonas de elevación entre los 800 y 1.600 m s.n.m. caracterizaron las zonas de susceptibilidad muy alta. Esto tiene una correlación con lo esperado, que indica que elevaciones intermedias poseen una mayor correlación con remociones en masa (Duman *et al.*, 2006; Gokceoglu *et al.*, 2005; Pachauri y Pant, 1992) pues estas zonas presentan nieve y escasa cubierta vegetal, por lo que quedan expuestas a condiciones de erosión y meteorización, lo que debilita la calidad de las rocas y deja material disponible para ser removido (Ercanoglu *et al.*, 2004; Rozos *et al.*, 2011). Esto, sumado a un factor detonante, puede generar una remoción en masa.

Lo anterior concuerda con lo propuesto por Molina (2016) que indica que elevaciones sobre 750 m poseen mayor aporte a zonas de mayor susceptibilidad.

Por su parte, elevaciones menores a 200 m estuvieron relacionadas a zonas de muy baja susceptibilidad que corresponden a zonas que, en general, eran planas y correspondientes a depósitos cuaternarios, sin la capacidad de generar una remoción. Esto concuerda con lo propuesto por Dragičević *et al.* (2015).

### 6.6.1.2 Geología

Las unidades geológicas que presentaron mayor aporte en las zonas de media, alta y muy alta susceptibilidad correspondieron a Kg que, según lo observado en terreno, eran rocas intrusivas afectadas por metamorfismo de bajo grado, lo que generó una anisotropía que pudo favorecer zonas de inestabilidad, generando eventos de remociones en masa.

En esta unidad geológica se identificaron la mayor cantidad de escarpes, por lo que era esperable que fuese considerada como un factor de gran influencia en la susceptibilidad.

Por otra parte, las unidades geológicas que caracterizaron zonas de muy baja y baja susceptibilidad, fueron depósitos cuaternarios (Q1), fluviales (Qf), fluviodeltaicos (Qfd) y fluviotorrenciales (Qft), que corresponden a unidades depositadas casi al nivel de mar y con pendientes planas, con una baja o casi nula capacidad de generar remociones en masa.

La unidad Jg (dioritas), presentó una baja susceptibilidad, lo que se debe a que presenta una acotada extensión, y dentro de esta, las zonas que tienen condiciones para generar una remoción son aún más limitadas, como lo son una intermedia elevación y alta pendiente.

Como la metodología hace una evaluación punto a punto, pixel a pixel, reconoce zonas de diferentes categorías de susceptibilidad dentro de un área, es decir, puede reconocer un área diminuta de baja susceptibilidad dentro de una gran área de muy alta susceptibilidad.

Si bien, era esperable que la unidad Jg presentara una alta susceptibilidad según lo propuesto por Molina (2016), por lo mencionado, la metodología logró reconocer correctamente la susceptibilidad en la unidad geológica. Porcentualmente, esta unidad no corresponde a la que genera mayor aporte en las zonas de muy alta, alta y media susceptibilidad.

#### 6.6.1.3 *Pendiente*

La pendiente presentó una evidente correlación entre la susceptibilidad y su rango. Así, zonas de pendiente entre 35 y 70° fueron características de zonas de muy alta, alta y media susceptibilidad, ya que zonas de mayor pendiente aumentan la inestabilidad de los macizos rocosos favoreciendo las remociones, mientras que en suelos y material no consolidado aumenta el cizalle facilitando los deslizamientos de suelo. Esto que concuerda con lo propuesto por Dragičević *et al.* (2015).

Pendientes inferiores a 35° caracterizaron zonas de baja y muy baja susceptibilidad.

Además, las observaciones respecto al factor pendiente son concordantes con lo que plantea Molina (2016).

#### 6.6.1.4 *Orientación de ladera*

La orientación de ladera oeste, fue característica en zonas de muy alta susceptibilidad. Esto concuerda con lo propuesto por Náquira (2009) y Molina (2016), ya que las laderas con orientación oeste son más afectas por la erosión y meteorización que puede ejercer el mar. Siendo el fiordo Comau una zona evidentemente marina, este factor genera una influencia considerable.

Durante el Pleistoceno, la zona de estudio estuvo afectada por sistemas erosivos de tipo glacial y periglacial. Con la llegada de las grandes épocas glaciales (inicio del Pleistoceno) se produjeron fenómenos erosivos que afectaron durante 1,8 millones de años de forma rítmica y alterna al sustrato rocoso de la zona, los que al retirarse producen una mayor erosión en las laderas oeste, dejándolas más inestables y susceptibles a generar remociones en masa.

Por otro lado, zonas de susceptibilidad baja y muy baja están correlacionadas a laderas de orientación este.

#### 6.6.1.5 *Curvatura media*

Si bien este factor no tuvo una tendencia significativa, fue posible correlacionar zonas de mayor susceptibilidad con curvaturas cóncavas. Esto concuerda con lo esperado, ya que

siendo el fiordo Comau una zona con altas precipitaciones, las zonas cóncavas, acumularan más agua, aumentando la saturación del suelo y roca.

Por otro lado, zonas de susceptibilidad baja y muy baja, presentaron una correlación a zonas convexas y planas, ya que no favorecen la saturación de suelo y roca.

#### *6.6.1.6 Distancia a ríos*

Es importante tener claro, al evaluar este factor, que en el área de estudio se tienen, principalmente, ríos asociados a valles glaciares con forma de U: Quintupeu, Mirta, Huinay (cercano a su desembocadura) y Vodudahue. Estos presentan amplios depósitos fluviales en sus riberas que corresponden a zonas de muy baja susceptibilidad. Por otro lado, se tienen ríos asociados a valles en forma de V, los que tienen zonas de muy alta susceptibilidad muy cercana. Es por esto, que la correlación entre la distancia a ríos y las categorías de susceptibilidad pueden ser no tan clara.

Respecto a los resultados, se determinó que distancias menores a 500 m son características de zonas de muy baja susceptibilidad. Esto se debe a que ríos asociados a valles glaciares tienen amplias áreas de depósitos fluviales y fluviodeltaicos, los que tiene una muy baja susceptibilidad a ser removidos.

Este mismo rango de distancia tiene asociado un leve porcentaje de zonas de media, alta y muy alta susceptibilidad, la que es atribuida al socavamiento que produce el río a sus mismos depósitos, además de los ríos que fluyen en valles tipo V que producen un socavamiento en zonas más cercanas, y por tanto, son más inestables.

Zonas de muy alta susceptibilidad están en el rango de distancia entre los 500 y 2.000 m, lo que es posible ya que los ríos de valles glaciares en periodos donde aumenta el caudal pueden generar un socavamiento en los pies de las laderas, haciendo estas zonas más inestables.

A distancias mayores a 2.000 m se presentan categorías de susceptibilidad media, alta y muy alta, lo que se le atribuye al valle del río Vodudahue, pues en él se tienen depósitos de hasta 3 km de distancia (desde el río a zonas de susceptibilidad media, alta y muy alta).

Además, es posible que zonas muy lejanas no tengan influencia de la erosión, meteorización y socavamiento producto de la acción del río.

#### *6.6.1.7 Distancia a cursos de agua*

De acuerdo al factor distancia a cursos de agua, las zonas más lejanas a los cursos presentan una susceptibilidad muy baja, ya que no tienen ninguna influencia de este factor.

En tanto, zonas en el rango de 500 a 2.000 m son las que se correlacionan con zonas de mayor susceptibilidad, tanto para media, alta y muy alta. Esto puede ser posible ya que los cursos de agua erosionan y meteorizan generando socavamientos profundos con



laderas de altas pendientes, en algunos casos casi verticales, afectando la estabilidad en las zonas más cercanas a la cresta de los cerros, que en lugares en contacto con el cauce de agua.

Dentro de este mismo rango de distancia se encuentran zonas de susceptibilidad baja, y en menor medida, muy baja, lo que puede deberse a que no existe una confluencia total de los factores en las zonas cercanas a los cursos de agua, de modo que sean clasificadas como de alta o muy alta susceptibilidad.

#### *6.6.1.8 Distancia a fallas*

Las zonas de mayor susceptibilidad están correlacionadas a distancias menores a los 3.500 m. Esto es evidente ya que el área de estudio presenta un fuerte control estructural, además que es probable que las fallas mayores se encuentren influenciadas por la ZFLO, y tengan estructuras subordinadas como fallas menores o lineamientos, los que no lograron ser fotointerpretados producto de la extensa vegetación del área.

Por otro lado, se debe tener presente que solo se tenían 8 fallas mapeadas, información proveniente de los antecedentes geológicos existentes del área de estudio. Es posible que esto entregue un sesgo a este factor, de modo que no presente resultados tan concluyentes.

Zonas muy lejanas, a una distancia mayor a 7.000 m, presentan mayor porcentaje de áreas de baja y muy baja susceptibilidad, dado que en este rango las fallas no producen una mayor influencia.

#### *6.6.1.9 Distancia a lineamientos*

El proceso de fotointerpretación de los lineamientos consideró los talweg de ríos y cursos de agua. Cuando se observaron puntos de quiebre en los talweg en distintos flujos de agua, se trazó una línea perpendicular que une estos puntos, interpretándose como lineamiento.

Las zonas cercanas, con distancias a lineamientos menores a los 3.500 m se correlacionan con zonas de media, alta y muy alta susceptibilidad. Áreas muy próximas a los lineamientos presentan erosión, meteorización y fracturamiento, y además se cree que pueden favorecer el ascenso de flujos hidrotermales que favorezcan la inestabilidad de las rocas.

Por otro lado, que zonas lejanas a lineamientos presenten una baja susceptibilidad concuerda con lo esperado y lo que plantea Molina (2016).

Cabe señalar que la fotointerpretación de los lineamientos se vio dificultada por la prominente vegetación y la presencia de glaciares, por lo que es posible que no se mapearan todos los lineamientos pudiendo generar un problema menor con este factor. Aun así, bajo las observaciones de terreno se logró identificar que existe un importante control estructural en las remociones en masa observadas, así como en las laderas inestables.

### 6.6.1.10 *Radiación solar anual*

Según lo esperado, zonas con mayor radiación solar anual tendrán una menor susceptibilidad, ya que a mayor radiación se tienen suelo y roca con menor saturación. Solo se logró correlacionar débilmente que zonas de susceptibilidad muy baja y baja, presentaban mayor radiación que las otras categorías de susceptibilidad.

Es posible que este efecto se haya visto mermado pues la zona de estudio presenta abundantes y permanentes precipitaciones, por lo que el efecto de la radiación en las laderas pudo verse disminuido.

### 6.6.2 **Categorías de susceptibilidad**

Las categorías de susceptibilidad asignadas corresponden a muy alta, alta, media, baja y muy baja. Cada una de ellas, presenta una configuración, las que fueron reconocidas mediante los factores condicionantes. Es así, como se evaluó cada factor en la susceptibilidad y se determinó cuáles tenían mayor incidencia.

Además, es importante entender que las zonas de mayor susceptibilidad cumplen con una coexistencia de los factores condicionantes. Así, zonas de alta pendiente pueden tener susceptibilidad baja, o zonas de elevación intermedia pueden tener alta susceptibilidad.

Así, se debe tener claro que las zonas de mayor susceptibilidad representan áreas en donde el conjunto de factores condicionantes, más propicios para la susceptibilidad, caracterizan el lugar.

#### 6.6.2.1 *Susceptibilidad muy alta*

Se caracterizan por elevaciones entre los 800 y 1.600 m, con pendientes entre los 35 y 70°, con orientación de ladera oeste, y en menor medida norte, con curvaturas cóncavas.

La unidad geológica más susceptible corresponde a Kg, y en segundo lugar, a rocas metamórficas de la formación PzTr4(c).

En cuanto a la distancia a ríos, el rango característico de zona de susceptibilidad muy alta estará entre los 500 y 2.000 m al igual que la distancia a cursos de agua, mientras que la distancia a fallas estará entre 0 y 3.500 m, de manera similar a distancia a lineamientos.

#### 6.6.2.2 *Susceptibilidad alta*

Las zonas de susceptibilidad alta presentan condiciones similares a las zonas de susceptibilidad muy alta, pero se diferencian en que la unidad geológica de mayor preponderancia es PzTr(c) de rocas metamórficas, y que la distancia a cursos de agua es de 500 a 2.000 m.

### *6.6.2.3 Susceptibilidad media*

Presenta condiciones similares a susceptibilidad alta en cuanto a las condiciones geológicas, pendiente, elevación, pero se diferencia porque tiene orientación de ladera predominantemente norte.

### *6.6.2.4 Susceptibilidad baja*

Se caracteriza por tener un amplio rango de elevación entre los 0 y 1.600 m, pendientes entre los 5 y 25°, orientación de ladera no definida, pudiendo encontrarse N, E, S o W. En cuanto a la curvatura media, tiene predominantemente zonas convexas y planas.

Ocupa un amplio rango de unidades geológicas, tanto las mencionadas en la susceptibilidad muy alta, como rocas intrusivas jurásicas y miocénicas (Jg y Kg).

En cuanto a los factores de distancia, no presenta una marcada tendencia, distribuyéndose de manera casi pareja en todas las clases.

### *6.6.2.5 Susceptibilidad muy baja*

Se caracteriza por una elevación inferior a los 200 m, pendientes menores a 25°, una orientación de ladera sur y curvaturas convexas y planas. También se caracteriza por distancias de ríos y cursos de agua muy cercana y muy lejana, dejando un *gap* intermedio. Al igual que en los factores distancia a fallas y lineamientos.

Finalmente, se observó que las zonas de muy alta, y muy baja susceptibilidad presentaron características muy distintivas, respecto de la influencia de los factores condicionantes.

En tanto, zonas de susceptibilidad alta y media, presentaron características similares a zonas de muy alta susceptibilidad, pero con una predominancia menos clara de las clases de los factores condicionantes.

Respecto a zonas de susceptibilidad baja, presentó un amplio rango de las clases de los factores que la caracterizan.

## **6.6.3 Variación en la cantidad de factores**

Se realizaron análisis variando la cantidad de factores, pues se considera importante no sobreestimar el número de factores y encontrar un óptimo con el que se pueda obtener buenas aproximaciones de susceptibilidad.

Una buena aproximación de susceptibilidad con una menor cantidad de factores puede significar un ahorro importante en el tiempo que demora la aplicación de una metodología, lo que, para el rubro empresarial, es bastante favorable.

De los diferentes casos, el caso A (10 factores) presentó el mejor desempeño de la red neuronal, con 11 épocas, el menor error cuadrático medio (*MSE*), un rango menor de error, y una curva *ROC* con clasificación perfecta (Tabla 6.2).

En tanto el caso B, tuvo un error cuadrático medio solo con una variación de 0,0007 respecto al caso A. En el histograma de error y curva *ROC* se obtuvieron resultados similares al caso A, con una pequeña variación en el rango de error.

El Caso C, presentó un *MSE* y rango de error en el histograma mayor que en los casos A y B, mientras que el desempeño de la curva *ROC* es bastante inferior, ya que tiene un alto porcentaje de entregar resultados falsos positivos.

Tabla 6.2. Comparación del desempeño de la red neuronal en los casos A, B y C.

Parámetros	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
Épocas	11	27	13	17
<i>MSE</i>	0,0024	0,0031	0,0097	0,0058
<i>Training state</i>	<i>Validation check 6</i>	<i>Validation check 6</i>	<i>Validation check 6</i>	<i>Validation check 6</i>
<i>Error histogram</i>	-0,0311 - 0,0605	-0,0690 - 0,0643	-0,0796 - 0,0596	-0,1618 - 0,1283
Curva <i>ROC</i>	99%	99%	95%	96%

En tanto, la correlación que existe entre los datos es bastante alta, y bajo los criterios del coeficiente de correlación de Pearson y la covarianza, se indica que tanto para el caso B como el C, existe una correlación positiva respecto a la susceptibilidad, es decir, zonas más susceptibles del Caso A, también serán las áreas de mayor susceptibilidad para el caso B y C.

Finalmente, se pudo determinar que el caso que presentó mejor desempeño de la red neuronal es el caso A, siendo el mejor análisis de susceptibilidad.

El caso B presentó un desempeño de la red neuronal levemente inferior respecto al caso A, pero los resultados se correlacionan positivamente con el Caso A. Mediante una inspección visual de los mapas, se corroboró que las zonas de muy alta susceptibilidad son similares en ambos, teniendo el caso B áreas más amplias.

El caso C no presentó una buena aproximación, ya que su curva *ROC* tuvo un mal desempeño, pudiendo entregar resultados erróneos.

Por lo tanto, los factores que ocupó la red para su entrenamiento en el caso A: elevación, distancia a lineamientos, geología, pendiente, orientación de ladera, distancia a ríos, distancia a fallas, curvatura, radiación y distancia cursos de agua, fueron una correcta elección para la evaluación de susceptibilidad.

De los 10 factores mencionados, los que presentaron un mayor aporte para el proceso de entrenamiento de la red neuronal fueron, en orden descendente, elevación, distancia a lineamientos, geología, pendiente, orientación de ladera y distancia a ríos.



Cabe señalar que los factores que presentan un mayor aporte para la red neuronal, no son los que presentan las condiciones más características de muy alta susceptibilidad. Así, una pendiente entre los 35 y 70°, es muy característica de zonas de alta susceptibilidad, pero el factor pendiente en conjunto, presentó la cuarta mayoría en los pesos sinápticos de la capa de entrada de la red neuronal, que es una forma cualitativa de indicar su aporte en el análisis de susceptibilidad.

Respecto al caso D, los resultados obtenidos por el análisis sin el factor elevación indican que el desempeño de la red neuronal se vio disminuido. Aumentó su época de convergencia en 6 respecto al caso A, así también *Error Histogram* arrojó un error bastante superior.

La curva *ROC* tuvo un desempeño solo un poco superior respecto al caso C, lo que indica que puede entregar resultados falsos positivos.

En la inspección visual que se realizó del mapa del caso D, se observó que entrega amplias zonas de muy alta susceptibilidad, y no logra reconocer con precisión las zonas de muy baja que corresponden puntos libres de remoción en masa (PLRM) que no tienen una potencialidad para generar RM.

Por lo tanto, eliminar el factor elevación afecta negativamente al desempeño de la red neuronal, y le impide reconocer de manera precisa las zonas de muy baja susceptibilidad.

## 6.7 Validación *in situ*

Como se mencionó en el punto 1.4.2 Trabajo de terreno, la segunda etapa de terreno sirvió para contrastar el mapa de susceptibilidad obtenido de este trabajo con observaciones de terreno y así, validar la metodología *in situ*.

Se observaron zonas de muy alta, alta, media, baja y muy baja susceptibilidad en el mapa. Luego, bajo una inspección visual se determinó si eran concordantes, si se lograba diferenciar zonas de muy baja y baja susceptibilidad, entre sí, así como zonas de muy alta y alta.

Los resultados de este proceso de validación se presentan mediante fotografías de la zona de estudio. Los colores están directamente relacionados al mapa de susceptibilidad como se indica en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3. Tabla de categorías de susceptibilidad y equivalencia de colores.


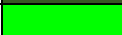



Susceptibilidad	Nombre del color	Color
Muy baja	Verde oscuro	
Baja	Verde Claro	
Media	Amarillo	
Alta	Anaranjado	
Muy alta	Rojo	



Figura 6.1. A: Fotografía del sector oriente del fiordo Cahuelmó, desembocadura del río Mira. B: Diferenciación de zonas de susceptibilidad muy baja (polígono verde oscuro), baja (polígono verde claro), media (polígono amarillo), alta (polígono anaranjado) y muy alta (polígono rojo).

En primer plano se observaron áreas con inclinaciones subhorizontales y elevación cercana al nivel del mar, correspondientes a depósitos fluviodeltaicos los que, según el mapa de susceptibilidad, corresponden a muy baja susceptibilidad (polígono verde oscuro) y, sobre este, se reconocieron dos zonas de leve inclinación y elevación, la que fue clasificada de baja susceptibilidad (polígono verde claro).

Las áreas de susceptibilidad media (polígono amarillo) y alta (polígono anaranjado), se diferenciaron entre sí porque una presentó inclinaciones menores y menor elevación, y la otra presentó pendientes escarpadas ubicadas en zonas más cercanas a la cresta de las laderas. Asimismo, se distinguió zonas muy escarpadas, casi verticales, con alta elevación, visiblemente erosionadas y meteorizadas, con baja a nula presencia de



vegetación, las que según los resultados de este trabajo son zonas de susceptibilidad muy alta.

La Figura 6.2 es una fotografía del pueblo Huinay ubicado en la ladera este del fiordo Comau. En el extremo inferior derecho se observa la Fundación Huinay.



Figura 6.2. A: Fotografía del pueblo Huinay. B: Diferenciación de zonas de susceptibilidad muy baja (polígono verde oscuro), baja (polígono verde claro), media (polígono amarillo), alta (polígono anaranjado) y muy alta (polígono rojo).

Las construcciones urbanas de este pueblo se ubican en zonas prácticamente planas, con una baja elevación y que son depósitos de remociones en masa antiguas, las que fueron catalogadas como zonas de muy baja y baja susceptibilidad.

Sobre los asentamientos, y a medida que crece la pendiente, la susceptibilidad aumenta. Además, se reconocen dos direcciones de depósitos de RM, con alta pendiente y escasa vegetación, los que podrían reactivarse y generar un deslizamiento de suelo y roca.

En la zona superior de la imagen se observa un escarpe de gran extensión, visiblemente fracturado, erosionado y meteorizado, sin presencia de vegetación, y pendiente recta, que se clasificó como muy alta susceptibilidad.

La Figura 6.3 muestra la ladera sur del fiordo Cahuelmó, en la que se logró diferenciar una superficie de mayor erosión y pendientes escarpadas en el centro (800 m<sup>2</sup> aproximadamente) de la ladera y en la cima, lo que corrobora que la metodología diferencia con gran precisión zonas de muy alta susceptibilidad.



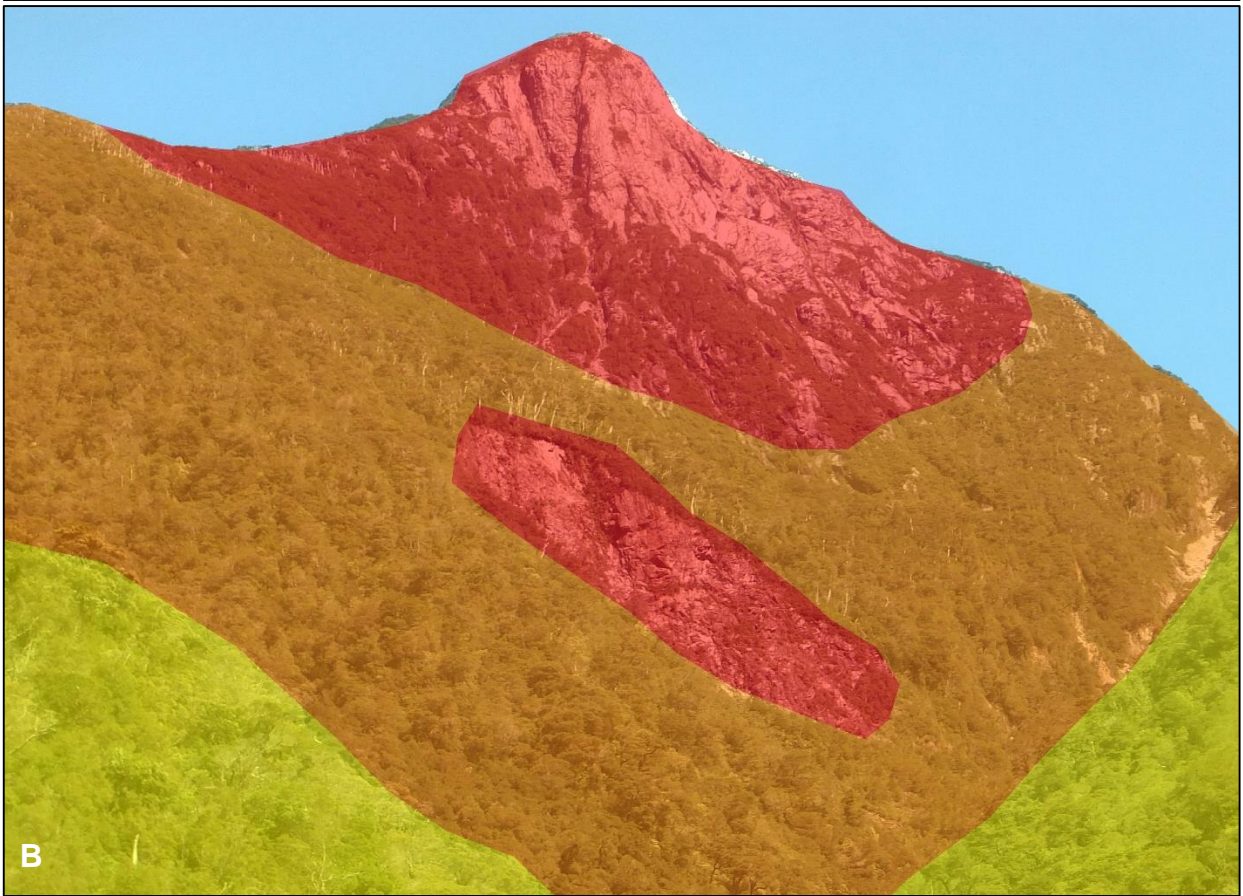
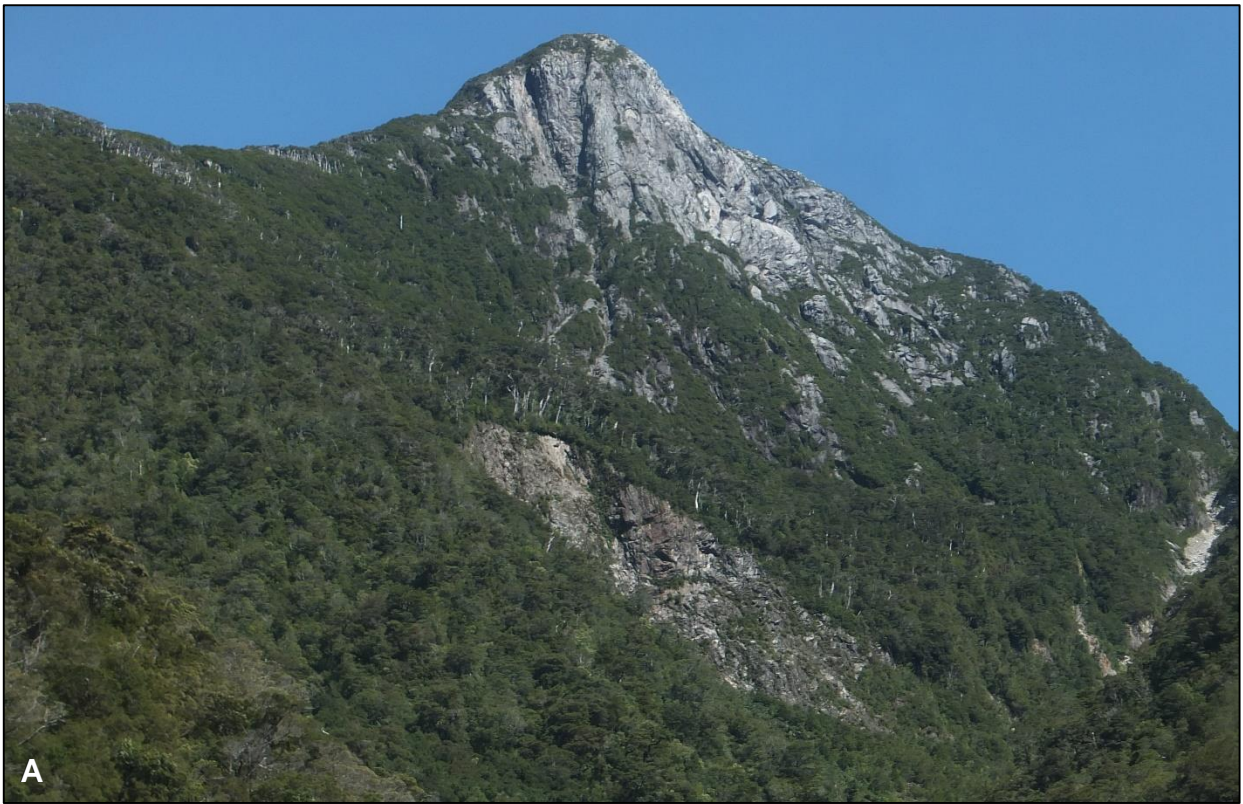


Figura 6.3. A: Ladera sur del fiordo Cahuelmó. Se logra diferenciar zonas de muy alta susceptibilidad en zonas de baja susceptibilidad. B: Diferenciación de zonas de susceptibilidad media (polígono amarillo), alta (polígono anaranjado) y muy alta (polígono rojo).



La Figura 6.4, muestra una fotografía tomada en Huinay enfocando la ladera oriente del río homónimo. El primer plano de la fotografía corresponde a depósitos fluviales, sin inclinación y baja elevación, con vegetación abundante y de gran altura. Esta superficie fue clasificada de muy baja susceptibilidad.

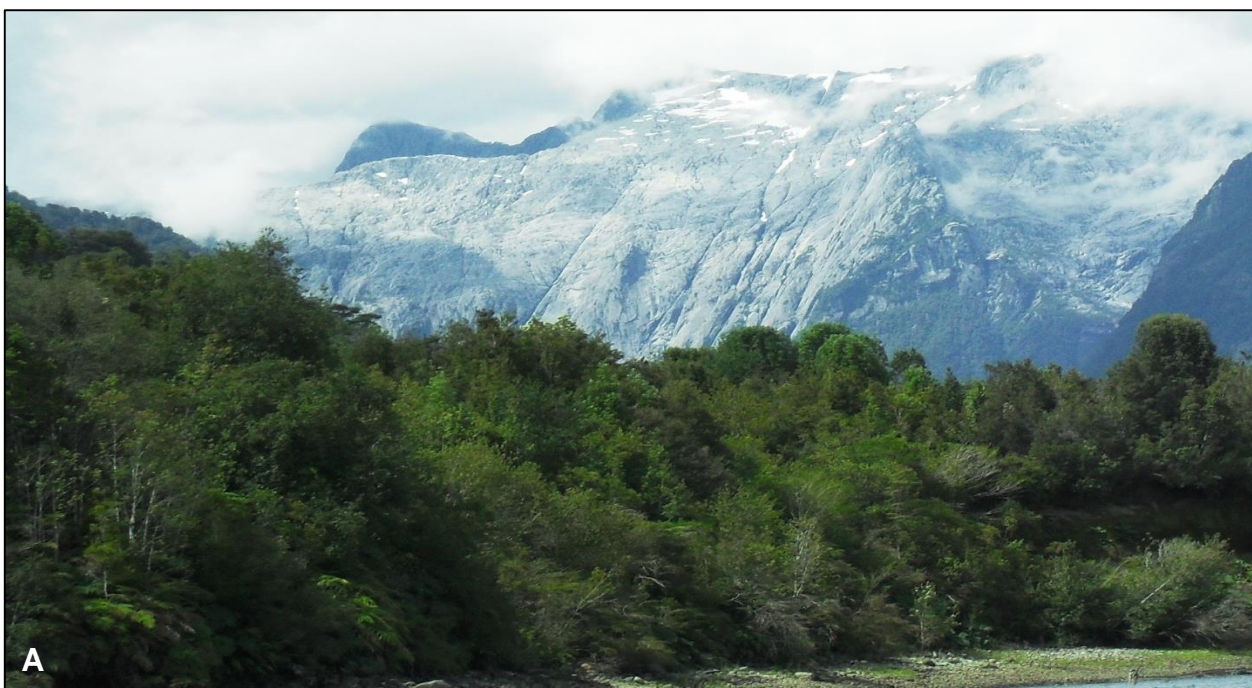


Figura 6.4. A: Fotografía desde la ribera del río Huinay. Al fondo se observa la ladera oeste del río. B: Diferenciación de zonas de susceptibilidad muy baja (polígono verde oscuro) y muy alta (polígono rojo).

Al fondo de la Figura 6.4 se observan zonas de alta elevación, pendientes escarpadas, con visible erosión y meteorización además de una marcada ausencia de vegetación, lo que fue catalogado como un área de muy alta susceptibilidad según la metodología de este trabajo.

## 6.8 Ventajas y desventajas

El análisis de susceptibilidad asociado a remociones en masa mediante redes neuronales presenta grandes ventajas, ya que es una metodología robusta, que entrega una buena precisión en los análisis.

Esta metodología no necesitó que los factores condicionantes fueran clasificados, lo que presenta una gran diferencia respecto a metodologías cualitativas y cuantitativas, pues los factores solo debieron ser normalizados para facilitar el funcionamiento de la red neuronal para que, luego, la red por sí sola entregara qué factor y qué rango de este mismo influyó más en la susceptibilidad.

Si bien, para caracterizar las distintas categorías de susceptibilidad se subdividió cada factor en un rango de clases, esto fue posterior a los resultados de susceptibilidad.

En esta metodología, se consideraron las áreas de generación de remociones en masa y fueron tratados como puntos. Es así como estos puntos representaron las condiciones bajo las cuales se produjeron remociones en masa, lo que es una diferencia frente a metodologías que trabajan con el catastro de remociones considerando áreas, y en algunos casos los depósitos de las remociones en masa, las que no siempre presentan las condiciones necesarias para generar una remoción pues son depósitos de material que fue depositado por efecto de la gravedad en zonas de baja pendiente.

Otras metodologías, como es el caso del peso de la evidencia, otorga un valor a un determinado rango (clase) de un factor, el que será proporcional a su influencia en la susceptibilidad. Por ejemplo, en el caso de la geología, al entregar un alto valor a una determinada unidad geológica, los resultados de susceptibilidad estarán influenciados arealmente, lo que presenta una dificultad de la metodología para reconocer zonas de menor susceptibilidad en zonas de alta susceptibilidad.

En tanto, esta metodología evalúa las condiciones punto a punto, pixel a pixel, y otorga una determinada susceptibilidad a cada uno, lo que permite reconocer la susceptibilidad con un detalle de 30x30 m, correspondiente al tamaño del Modelo de Elevación Digital, favoreciendo el reconocimiento de zonas de muy baja y baja susceptibilidad en zonas de muy alta y alta susceptibilidad.

La metodología permite una verificación por sí sola, ya que, en el proceso interno de la red neuronal, la curva *ROC* con clasificación perfecta, indica que las zonas de mayor susceptibilidad corresponden en un 99% a los puntos de los escarpes donde se produjeron las remociones en masa.

Una gran ventaja de esta metodología es que debido a su análisis punto a punto, pixel a pixel, permite reconocer la susceptibilidad de una zona en particular, pudiendo diferenciar zonas de baja susceptibilidad en zonas amplias de muy alta susceptibilidad. Esto, para

obras ingenieriles como por ejemplo portales de túneles y carreteras de corta extensión, es un primer paso para favorecer la elección de la ubicación de las obras.

Respecto a las desventajas de la metodología, está el tener que definir puntos donde no se producen remociones en masa, pues si son escogidos erróneamente, se tendrán resultados poco correctos.

Por otra parte, la metodología presenta un carácter más complejo frente a otras, ya que se debe tener un conocimiento teórico respecto a algoritmos computacionales para ajustar el funcionamiento de la red neuronal.



## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 Conclusiones

Las remociones en masa son fenómenos geológicos muy frecuentes a nivel mundial, los que pueden acarrear grandes pérdidas tanto materiales como humanas. Por lo tanto, delimitar zonas de susceptibilidad de manera precisa, sin subestimar ni sobreestimar, es un primer paso para evaluar procesos de urbanización.

Respecto a la metodología, la elección de los factores condicionantes de la zona de estudio estuvo basada en la revisión de antecedentes bibliográficos y a observaciones de terreno las que permitieron reconocer las características del área de estudio y de este modo, determinar aquellos factores más representativos, los que resultaron ser: elevación, geología, pendiente, orientación de ladera, curvatura media, distancia a fallas, distancia a lineamientos, distancia a ríos y distancia a cursos de agua.

En tanto, la determinación del algoritmo de la red neuronal se realizó mediante ensayo y error. De esta forma, se determinó que su funcionamiento era óptimo en los casos en que se consideraba una capa oculta compuesta por 100 neuronas.

Respecto a las funciones de activación, la combinación que entregó el mejor desempeño de la red neuronal y una buena distribución de datos fue considerar la función tangente hiperbólica (*tansig*) en la capa oculta, y una función lineal en la capa de salida (*purelin*).

Por su parte, el proceso de entrenamiento tuvo resultados óptimos separando los datos de la matriz de características en un 70% para entrenamiento, 15% para validación y 15% para *test*. Esta configuración fue validada calculando el error cuadrático medio, histograma de error y curvas *ROC*.

La metodología de análisis mediante redes neuronales aplicada a la zona de estudio permitió definir zonas de mayor y menor susceptibilidad.

Mediante la suma de los pesos sinápticos de la capa de entrada de cada factor, fue posible determinar de manera cualitativa qué factores eran los de mayor relevancia en el entrenamiento de la red neuronal. Así, la red arrojó que los factores más relevantes en su análisis fueron (en orden descendente): elevación, distancia a lineamientos, geología, pendiente, orientación de ladera, distancia a ríos, distancia a fallas, curvatura, radiación y distancia cursos de agua.

A pesar de que se esperaba que los factores de mayor peso identificados por la red presentaran una fuerte correlación con las zonas de mayor susceptibilidad, esto no ocurrió, pues la red otorgó un mayor peso a los factores que le prestaron mayor información respecto a clasificar un punto según su pertenencia al valor de clase 0 o 1, los que no deben corresponder estrictamente a los factores más característicos de zonas de muy alta susceptibilidad, pues estos mismos factores le permiten a la red reconocer zonas de muy baja susceptibilidad.

La variación respecto a los factores condicionantes de mayor peso sináptico demostró que un análisis considerando sólo seis factores: elevación, distancia a lineamientos, geología, pendiente, orientación de ladera y distancia a ríos, caracterizan correctamente la zona de estudio, y entregan una correlación positiva con los resultados de susceptibilidad de diez factores. Por lo tanto, un análisis con seis factores es suficiente para la evaluación de susceptibilidad pues presentaron resultados correctos, mientras que un análisis con tres factores, elevación, distancia a lineamientos y geología, no presenta resultados consistentes con lo esperado.

Respecto al análisis sin el factor elevación, se determinó que la ausencia de este factor disminuye el desempeño de la red neuronal, y entrega un mapa de susceptibilidad poco correcto. Por lo tanto, fue posible determinar que la elevación entrega basta información a la red para diferenciar la susceptibilidad, principalmente, zonas de baja y muy baja.

Los factores que presentan una mayor correlación con zonas de muy alta susceptibilidad son: elevaciones entre los 800 y 1.600 m s.n.m., pendientes entre los 35 y 70°, laderas con orientación oeste, curvaturas cóncavas, la formación geológica Kg y distancias a fallas y lineamientos inferiores a los 3.500 m.

Si bien, no fue posible encontrar una influencia directa de ZFLO en las zonas de muy alta y alta susceptibilidad, sí se logró observar un fuerte control estructural que correlaciona lineamientos con mayor susceptibilidad.

Por otro lado, las zonas de muy baja susceptibilidad presentan una fuerte correlación con elevaciones inferiores a los 200 m, pendientes menores a 25°, una orientación de ladera sur, y curvaturas convexas y planas, como también con zonas muy cercanas a cursos de agua y zonas muy lejanas.

Así las zonas de muy alta susceptibilidad se ubican principalmente en la ladera sur del fiordo Cahuelmó, en las cercanías de la laguna Abascal entre los ríos Mirta y del Norte. También, en la ladera oeste del río Huinay, ladera sur del río Lloncochaigua, y zonas puntuales de la ladera este del fiordo Comau, entre Huinay y Vodudahue.

Dentro del contexto de la construcción de la continuidad de la Ruta 7, conocida como Carretera Austral, el tramo comprende entre Pichanco y Leptepu, e involucra numerosos túneles, caminos y un puente que cruce el fiordo Quintupeu. Esta metodología provee una excelente aproximación de susceptibilidad de la ladera este del fiordo Comau, pudiendo favorecer la elección de portales y tramos de camino en etapas iniciales del proyecto, ya que logra diferenciar zonas de baja susceptibilidad en áreas de muy alta susceptibilidad.

Finalmente, mediante esta metodología se comprobó que las redes neuronales son un método de clasificación robusto que, aplicado a los análisis de susceptibilidad de remociones en masa, entregan resultados óptimos ya que replican las condiciones bajo las que se generaron remociones en masa.

## 7.2 Recomendaciones

Cada área de estudio presenta una configuración geológica, geotécnica, geomorfología, hidrológica-hidrogeológica y estructural distinta. Por lo tanto, los factores condicionantes escogidos en este trabajo no son extrapolables a zonas con condiciones diferentes. Es por esto que se recomienda determinar los factores condicionantes bajo las observaciones de terreno, teniendo en cuenta las condiciones características del área en que se pretende evaluar susceptibilidad.

Se recomienda que al momento de utilizar esta metodología se dé un especial énfasis al momento de escoger los puntos libres de remociones en masa. Se sugiere apoyarse en la bibliografía disponible, como también considerar el criterio de más de un experto de modo de escoger con gran precisión estos puntos.

Asimismo, se recomienda evaluar la correlación entre las zonas de mayor susceptibilidad y los factores condicionantes, pues la correlación varía según la zona de estudio.

Se recomienda evaluar la categorización de susceptibilidad. Para este caso particular se ajustaba correctamente a lo esperado, pero puede que en otras zonas los porcentajes de cada categoría varíen.

Se propone hacer un análisis estructural detallado, para reconocer y trazar con mayor precisión las fallas y lineamientos presentes, de modo que permitan determinar de manera concluyente si se tiene o no una influencia del ZFLO.

Se propone hacer un análisis con el modelo de clasificación de árboles de decisiones que entregan de una manera precisa y cualitativa el peso de los factores condicionantes en la generación de remociones en masa.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- Alcantara-Ayala, I., 2004. Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico. *Geomorphology* 61(1-2), p. 19–40.
- Aldrich, C., Reuter, M.A., Deventer, J.S.J., 1994. The application of neural nets in the metallurgical industry. *Minerals Engineering* 7, p. 789– 809.
- Aleotti, P., Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and Environment* 58, p. 21-44.
- Barbat, A., 1998. El riesgo sísmico en el diseño de edificios. Cuadernos Técnicos, 3. Calidad Siderúrgica, Madrid.
- Barrera, M., 2002. Estudio experimental del comportamiento hidro-químico de suelos colapsables. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Barrientos, S., 2007. Earthquakes in Chile. En: *The Geology of Chile*. Geological Society of London, p. 263-287.
- Biswajeet, P., Saro, L., 2010. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. *Environmental Modelling y Software* Vol 25, p. 747–759.
- Börgel, R., 1983. Geomorfología. Geografía de Chile Tomo II Geomorfología. Geografía de Chile. IGM.
- Bosi, C., Dramis, F., Gentili, B., 1982. Carte geomorfologiche di dettaglio e carte di stabilità: esempi nel territorio marchigiano. *Geol Appl ed Idrogeol*, 20, p. 53–62.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., 1992. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. *ITC Journal*, 2: p. 172–183.
- Carrara, A., Merenda, L., 1976. Landslide inventory in northern Calabria, southern Italy. *Geol Soc Am Bull*, 87: p. 1153–1162.
- Carrara, A., 1982. Cartografía temática, stoccaggio ed elaborazione dati. En: *atti del Convegno Conclusivo P.F. Conser. Suolo, Sottopr. Fenomeni Franosi, Relazione Generale*, 9–10 giugno 1982, Roma, p. 265–281.
- Carrara, A., 1983. Multivariate methods for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geol*, 15: p. 403–426.



- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., Reichenbach, P., 1991. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16: p. 427–445.
- Carrara, A., 1988. Landslide hazard mapping by statistical methods: a black box model. En: *Proc of the Workshop on Natural Disaster in European Mediterranean Countries*. Perugia, Italy. Consiglio Nazionale delle Ricerche.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 1995. GIS-based techniques for mapping landslide hazard. En: Carrara, A., Guzzetti, F. (Eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publications. S.l.: Dordrecht, The Netherlands, p. 135–176.
- Chatenoux, B., Peduzzi, P., 2007. Impacts from the 2004 Indian Ocean tsunami: analyzing the potential protecting role of environmental features. *Natural Hazards* 40(2): p. 289–304.
- Collison, A.J.C., Anderson, M.G., 1996. Using a combined slope hydrology and stability model to identify suitable conditions for landslide prevention by vegetation cover in the humid tropics. *Earth Surface Processes and Landforms* 21: p. 737–747.
- Cruden, D., Varnes, D., 1996. Landslide types and processes. En: *Landslides: Investigation and Mitigation*. Special Report 247. Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press, Washington D.C. 675 p.
- Dai, F. C., Lee, C. F., Li, J., Xu, Z.W., 2001. Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology*, 40.
- Dai, F.C, Lee, C.F., 2002, Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* No.42, p. 213–228.
- Dragičević, S., Lai, T., Balram, S., 2015. GIS-based multicriteria evaluation with multiscale analysis to characterize urban landslide susceptibility in data-scarce environments. *Habitat International*, No.45, p. 114-125.
- Duman, T. Y., Can, T., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H. A., y Sonmez, H., 2006. Application of logistic regression for landslide susceptibility zoning of Cekmece Area, Istanbul, Turkey. *Environmental Geology*, 51.
- Ercanoglu, M., y Gokceoglu, C., 2004. Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey). *Engineering Geology*, No.75 (3), p. 229-250.
- Estrada, I., Equihua, M., Castillo, G., Rojas, O., 2015. Climate change and effects on vegetation in Veracruz, Mexico: an approach using ecological niche modelling. *Acta botánica mexicana*, (112), p. 73-93.

- Fenti, V., Silvano, S., Spagna, V., 1979. Methodological proposal for an engineering geomorphological map. Forecasting rockfalls in the Alps. Bull of the Int Assoc Eng Geol 19: p. 134–138.
- García, N. y Ormazabal. C., 2008. Árboles Nativos de Chile. Enersis S.A. Santiago, Chile. 196 p.
- Gokceoglu, C., Sonmez, H., Nefeslioglu, H. A., Duman, T. Y., Can, T., 2005. The 17 March 2005 Kuzulu landslide (Sivas, Turkey) and landslide-susceptibility map of its near vicinity. Engineering Geology, 81.
- González-Ferrán, O., 1995. Volcanes de Chile. Instituto Geográfico Militar, Santiago, 640 p.
- González De Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C., 2002. Ingeniería Geológica. Editorial Prentice Hall. 715 p.
- Guerricchio, A., Melidoro, G., 1979. Fenomeni franosi e neotettonici nelle argille grigio-azzurre calabriane di Pisticci (Lucania). Geol Appl e Idrogeol, 14: p. 105–138.
- Guthrie, R.H., Mitchell, S.J., Lanquaye-Opoku, N., Evans, S.G., 2010. Extreme weather and landslide initiation in coastal British Columbia. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrology, 43: p. 417-428.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., Ardizzone, F., 2005. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. Geomorphology, 72: p. 272-299.
- Hauser, A., 1993. Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Boletín No. 45: p. 7-29.
- Hauser, A., 1997. Los aluviones del 18 de junio de 1991 en Antofagasta: Un análisis crítico a cinco años del desastre. Boletín N° 49. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Hauser, A., 2000. Remociones en masa en Chile (Versión actualizada). Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Boletín No. 59: p. 10-17.
- Hecht-Nielsen, R., 1987. Kolmogorov's mapping neural network existence theorem. Proceedings of the First IEEE International Conference on Neural Networks, San Diego, CA, USA, p. 11 –14.
- Hervé, F., 1984. Rejuvenecimiento de edades radiométricas en la zona de falla Liquiñe-Ofqui en Aysén, Comunicaciones, No.34: p. 107–115.
- Hungr, O., Serge, L., Picarelli, L., 2013. The varnes classification of landslide types, an update. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. 167-194.

- Hush, D.R., 1989. Classification with neural networks: a performance analysis. Proceeding of the IEEE International Conference on Systems Engineering, Dayton, Ohio, USA, p. 277– 280.
- Ives, J.D., Messerli, B., 1981. Mountain Hazard Mapping in Nepal: Introduction to an Applied Mountain Research Project. Mountain Research and Development, 1: p. 223–230.
- Jacoby, D., 2001. Vulnerabilidad del sector urbano de La Reina frente a desbordes de la Quebrada de Ramón. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Jiménez Salas, J.A. y Justo, J.L., 1995. Propiedades de los suelos y de las rocas. Geotecnia y Cimentaciones I, Editorial Rueda, Madrid.
- Kaastra, I., Boyd, M., 1996. Designing a neural network for forecasting financial and economic time series. Neurocomputing 10 (3), p. 215–236.
- Kanellopoulos, I., Wilkinson, G.G., 1997. Strategies and best practice for neural network image classification. International Journal of Remote Sensing 18, p. 711 – 725.
- Kavzoglu, T., 2001. An investigation of the design and use of feedforward artificial neural networks in the classification of remotely sensed images. PhD Thesis, University of Nottingham. School of Geography, 306 pp.
- Keefer, D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. Geological Society of America Bulletin, Vol. 95, p. 406-421.
- Keefer, D.K., 2002. Investigating landslide by earthquakes – a historical review. Surveys in Geophysics, Vol. 23, p. 473-510.
- Kienholz, H., 1978. Maps of Geomorphology and Natural Hazard of Griendelwald, Switzerland, scale 1: 10.000. Artic and Alpine Research, 10: p. 169–184.
- Lara, L.E., Orozco, G., Amigo, A., Silva, C., 2011. Peligros Volcánicos de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental, No.13, p. 34, 1 mapa escala 1:2.000.000. Santiago.
- Lara, M., 2007. Metodología de evaluación de peligro de remoción en masa Chile Central, con aplicación en la quebrada San Ramón, Santiago Oriente. Tesis de Magíster en Ciencias, mención Geología. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Lees, B., 1996. Neural networks applications in the geosciences: an introduction. Computer and Geosciences, 22: p. 955–957.

- Lee, S., y Min, K., 2001. Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology*, 40, p. 1095-1113.
- Leroi, E., 1996. Landslide hazard – Risk maps at different scales: objectives, tools and developments. In: *Proc VII Int Symp Landslides*, Trondheim, June 1996, 1: p. 35–52.
- Levi, B., Aguilar, A., Fuenzalida, R., 1966. Reconocimiento geológico en las provincias de Llanquihue y Chiloé. *Boletín N°19*.
- Lippmann, R., 1987. *An Introduction to Computing with Neural Nets*, IEEE ASSP, p. 4.
- Lu, P., 2014. Using multiple vegetation layers to reduce the risk of rainfall-induced landslides and facilitate post-landslide slope rehabilitation. *Access International Journal of Agriculture Sciences*, Vol. 2(2): p. 13-17.
- Madariaga, R., 1998. Sismicidad de Chile. *Física de la Tierra*, 10, p. 221-258.
- Munizaga, F., Hervé, F., Drake, R., Pankhurst, R., Brook, M., Snelling, N., 1988. Geochronology of the lake region of south central Chile (39°-42°S): Preliminary results. *J. S. Am. Earth Sci.* No.1: p. 309-316.
- Náquira, M.V., 2009. Susceptibilidad de remociones en masa en las costas de fiordos cercanos a Hornopirén, X región. Memoria para optar al título de geólogo. Departamento de Geología. Universidad de Chile.
- Naranjo, J.A. y Varela, J., 1996. Flujos de detritos y barro que afectaron el sector oriente de Santiago el 3 de mayo de 1993. *Servicio Nacional de Geología y Minería*, Boletín No.47.
- Nesfeslioglu, H. A., Duman, T. Y., Durmaz, S., 2008. Landslides susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea región of Turkey). *Geomorphology*, 94 (3-4), p. 401-418.
- Ordoñez, A. y Crignola, P., 2003. Depósitos metalíferos, anomalías geoquímicas, rocas y minerales industriales y recursos energéticos del sector sur de la Región de Los Lagos. *Servicio nacional de Geología y Minería*, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos, No 21, 32 p., 1 mapa escala 1:500.000.
- Pachauri, A. K. y Pant, M., 1992. Landslide hazard mapping based on geological attributes. *Engineering Geology*, 32.
- Pankhurst, R. J., Weaver, S. D., Hervé, F., Larrondo, P., 1999. Mesozoic-Cenozoic evolution of the North Patagonian Batholith in Aysen, southern Chile, *Journal of the Geological Society*, No.156: p. 673-694.



- Paola, J.D., 1994. Neural network classification of multispectral imagery. MSc Thesis, The University of Arizona, USA.
- Parada, M.A., Godoy, E., Hervé, F., Thiele, R., 1987. Miocene calc-alkaline plutonism in the Chilean southern Andes. *Rev.Bras. Geocienc.*, No.17: p. 450-455.
- Parise, M., 2001. Landslide Mapping Techniques and their use in the assessment of the landslide hazard. *Phys. Chem. Earth*, Vol 26, Elsevier, p. 697-703.
- Peduzzi P., 2010. Landslides and vegetation cover in the 2005 North Pakistan earthquake: a GIS and statistical quantitative approach. *Natural Hazards Earth System Sci.* 10(4): p. 623–640.
- Popescu, M.E., 2002. Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options. Keynote Lecture, Proceedings 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infra-Structures, Singapore, p. 61-81.
- Prian, J., 1994. Síntesis geológica entre los 40°30' y 42°15' latitud sur. Parte centro-sur de la X Región, y programa de geocronología, Proyecto inventario geológico y minero de la X región, SERNAGEOMIN.
- Prieto, C., 1985. Inestabilidades y erosión de laderas asociadas a riadas. *Geología y prevención de riesgos por inundaciones*, Instituto Geológico y Minero de España, p. 117-192.
- Ripley, B.D., 1993. Statistical aspects of neural networks. In: Barndorff-Nielsen, O.E., Jensen, J.L., Kendall, W.s. (Eds.), *Networks and Chaos-Statistical and Probabilistic Aspects*. Chapman y Hall, London, p. 40–123.
- Rodriguez, C.E., Bommer, J.J., Chandler, R.J., 1999. Earthquake-induced landslides: 1980-1997. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18, p. 325-346.
- Rozos, D., Bathrellos, G. D., Skillodimou, H. D., 2011. Comparison of the implementation of rock engineering system and analytic hierarchy process methods, upon landslide susceptibility mapping, using GIS: a case study from the Eastern Achaia County of Peloponnesus, Greece. *Environmental Earth Sciences*, No 63(1): p. 49-63.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E, and Williams, R. J., 1986. Learning internal representations by error propagation. en *Parallel Distributed Proccesing*. Vols. I y II, Cambridge, MA.
- Rupke, J., Cammeraat, E., Seijmonsbergen, A., Van Westen, J., 1988. Engineering geomorphology of Widentobel Catchment, Appenzell and Sankt Gallen, Switzerland: a geomorphological inventory system applied to geotechnical appraisal of slope stability. *Engineering Geology*, 26: p. 33–68.

- Sepúlveda, S.A., 1998. Metodología para Evaluar el Peligro de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos: Aplicación en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Sepúlveda, S.A., Náquira, M.V., Arenas, M., 2011. Susceptibility of coastal landslides and related hazards in the Chilean Patagonia: The case of Hornopirén area (42°). *Investigaciones Geográficas*, 43: p. 35-46.
- SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 75, escala 1: 1.000.000.
- Stern, C. R., 2004. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista geológica de Chile*, 31(2): p.161-206.
- SWCB, 2010. The annual report of the landslide disasters in Taiwan, Soil and Water conservation Bureau (SWCB) of Executive Yuan, Taiwan ROC.
- Tien Bui, D., Anh Tuan, T., Harald, K., Biswajeet, P., Inge, R., 2015. Spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015.
- Van Westen, C. J., Rengers, N., Soeters, R., 2003. Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural Hazards*, 30.
- Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. In *Landslides, Analysis and Control*, Special Report N°176. Schuster, R.L., Krizek, R.J., edits. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., p.11-33.
- Wang, C., 1994. A theory of generalization in learning machines with neural application. PhD Thesis, The University of Pennsylvania, USA.
- Wang, L.J., Guo, M., Sawada, K., Lin, J., Zhang, J., 2015. A comparative study of landslide susceptibility maps using logistic regression, frequency ratio, decision tree, weights of evidence and artificial neural network. *Geosciences Journal*. © The Association of Korean Geoscience Societies and Springer 2015
- Watt, S. F., Pyle, D. M., Naranjo, J. A., Rosqvist, G., Mella, M., Mather, T. A., Moreno, H., 2011. Holocene tephrochronology of the Hualaihué region (Andean southern volcanic zone, ~42° S), southern Chile. *Quaternary International*, 246(1): p. 324-343.
- Watt, S.F., Pyle, D.M., Mather, T.A., 2011. Geology, petrology and geochemistry of the dome complex of Huequi volcano, southern Chile. *Andean Geology* 38(2): p. 335-348.

## 9 ANEXOS

### ANEXO A

N°	Longitud	Latitud
1	710.586	5.327.741
2	710.599	5.327.744
3	710.613	5.327.738
4	710.549	5.327.784
5	710.541	5.327.216
6	710.541	5.327.216
7	710.542	5.327.216
8	710.542	5.327.216
9	710.574	5.327.222
10	710.574	5.327.222
11	710.581	5.327.213
12	710.581	5.327.213
13	710.580	5.327.227
14	710.580	5.327.227
15	710.459	5.327.583
16	710.459	5.327.583
17	710.466	5.327.575
18	710.466	5.327.575
19	710.465	5.327.570
20	710.518	5.327.186
21	710.518	5.327.186
22	709.808	5.325.662
23	709.808	5.325.662
24	709.795	5.325.551
25	709.795	5.325.551
26	709.781	5.325.484
27	709.797	5.324.301
28	709.780	5.324.297
29	709.780	5.324.297
30	709.769	5.324.302
31	709.774	5.324.298
32	709.775	5.324.305
33	709.775	5.324.305
34	709.775	5.324.305
35	709.775	5.324.305
36	709.816	5.323.715
37	709.816	5.323.715
38	709.816	5.323.715
39	709.811	5.323.719

N°	Longitud	Latitud
40	711.589	5.317.632
41	711.589	5.317.632
42	711.829	5.317.682
43	711.829	5.317.682
44	711.829	5.317.682
45	712.069	5.317.735
46	712.292	5.317.705
47	712.292	5.317.705
48	712.399	5.317.531
49	712.471	5.317.457
50	712.500	5.317.443
51	712.510	5.317.438
52	712.533	5.317.425
53	712.534	5.317.417
54	712.535	5.317.415
55	712.528	5.317.422
56	712.594	5.317.682
57	712.594	5.317.682
58	712.619	5.317.848
59	712.619	5.317.848
60	712.619	5.317.848
61	712.619	5.317.848
62	712.646	5.318.029
63	712.645	5.318.214
64	712.430	5.318.215
65	711.963	5.318.208
66	711.748	5.318.201
67	711.483	5.318.170
68	710.984	5.318.221
69	710.984	5.318.221
70	710.748	5.318.318
71	710.748	5.318.318
72	710.748	5.318.318
73	710.516	5.318.457
74	710.516	5.318.457
75	710.339	5.318.628
76	710.339	5.318.628
77	710.339	5.318.628
78	710.253	5.318.853
79	710.223	5.319.087
80	710.223	5.319.087
81	710.233	5.319.287

N°	Longitud	Latitud
82	710.233	5.319.287
83	710.233	5.319.287
84	710.233	5.319.287
85	710.279	5.319.550
86	710.279	5.319.550
87	710.279	5.319.550
88	710.345	5.319.747
89	710.345	5.319.747
90	710.448	5.319.965
91	710.448	5.319.965
92	710.711	5.320.812
93	710.510	5.321.215
94	710.510	5.321.215
95	710.323	5.321.576
96	709.877	5.322.442
97	709.877	5.322.442
98	709.719	5.322.903
99	709.719	5.322.903
100	709.675	5.323.074
101	709.640	5.323.141
102	709.598	5.323.290
103	709.542	5.323.565
104	709.514	5.323.757
105	709.490	5.324.051
106	709.491	5.324.532
107	709.491	5.324.532
108	709.502	5.324.825
109	709.604	5.325.279
110	709.673	5.325.521
111	709.746	5.325.760
112	709.825	5.325.979
113	709.977	5.326.301
114	709.977	5.326.301
115	710.092	5.326.481
116	710.249	5.326.689
117	710.249	5.326.689
118	710.346	5.326.845
119	710.358	5.326.985
120	710.356	5.327.116
121	710.344	5.327.272
122	710.346	5.327.351
123	710.344	5.327.559

N°	Longitud	Latitud
124	710.675	5.328.336
125	710.675	5.328.336
126	710.835	5.328.548
127	710.835	5.328.548
128	710.886	5.328.703
129	710.709	5.328.836
130	710.704	5.328.837
131	710.406	5.329.068
132	710.233	5.329.235
133	710.233	5.329.235
134	710.126	5.329.384
135	710.126	5.329.384
136	710.003	5.329.569
137	710.003	5.329.569
138	709.899	5.329.777
139	710.451	5.327.354
140	710.444	5.327.394
141	710.442	5.327.411
142	710.441	5.327.439
143	710.440	5.327.458
144	710.440	5.327.484
145	710.440	5.327.493
146	710.441	5.327.506
147	710.027	5.326.188
148	710.043	5.326.211
149	710.160	5.326.496
150	710.165	5.326.509
151	710.168	5.326.517
152	710.264	5.326.628
153	710.494	5.327.146
154	710.500	5.327.159
155	710.503	5.327.170
156	710.505	5.327.167
157	710.506	5.327.162
158	710.509	5.327.150
159	710.510	5.327.148
160	710.510	5.327.148
161	710.509	5.327.150
162	710.505	5.327.188
163	710.490	5.327.228
164	710.488	5.327.235
165	710.478	5.327.256

N°	Longitud	Latitud
166	710.471	5.327.275
167	710.465	5.327.291
168	710.460	5.327.312
169	710.453	5.327.340
170	710.451	5.327.354
171	710.444	5.327.394
172	710.442	5.327.411
173	710.441	5.327.439
174	710.440	5.327.458
175	710.440	5.327.484
176	710.440	5.327.493
177	710.441	5.327.506
178	710.442	5.327.522
179	710.443	5.327.539
180	710.448	5.327.553
181	710.457	5.327.580
182	710.474	5.327.599
183	710.497	5.327.623
184	710.510	5.327.638
185	710.520	5.327.650
186	710.533	5.327.663
187	710.550	5.327.685
188	710.560	5.327.696
189	710.580	5.327.717
190	710.584	5.327.723
191	710.592	5.327.736
192	710.596	5.327.743
193	710.697	5.328.309
194	710.708	5.328.353
195	710.757	5.328.516
196	710.841	5.328.765
197	710.850	5.328.790
198	710.867	5.328.844
199	710.873	5.328.864
200	710.876	5.328.906
201	710.879	5.328.915
202	710.881	5.328.932
203	710.882	5.328.938
204	710.512	5.329.040
205	710.498	5.329.055
206	710.489	5.329.067
207	710.463	5.329.113

N°	Longitud	Latitud
208	710.450	5.329.146
209	710.446	5.329.159
210	710.439	5.329.183
211	710.432	5.329.201
212	710.405	5.329.292
213	710.402	5.329.300
214	710.397	5.329.316
215	710.393	5.329.334
216	710.393	5.329.344
217	710.380	5.329.366
218	710.354	5.329.368
219	710.342	5.329.366
220	710.463	5.329.469
221	710.459	5.329.467
222	710.487	5.329.467
223	710.515	5.329.479
224	710.495	5.329.470
225	710.498	5.329.460
226	710.395	5.329.335
227	710.400	5.329.331
228	710.407	5.329.333
229	710.408	5.329.335
230	710.406	5.329.339
231	708.847	5.311.528
232	708.849	5.311.531
233	708.850	5.311.533
234	708.849	5.311.533
235	708.854	5.311.556
236	708.855	5.311.555
237	708.861	5.311.559
238	708.857	5.311.562
239	708.850	5.311.561
240	708.859	5.311.558
241	708.860	5.311.568
242	708.858	5.311.569
243	708.859	5.311.565
244	708.861	5.311.562
245	708.850	5.311.519
246	708.848	5.311.515
247	708.848	5.311.511
248	708.847	5.311.507
249	708.848	5.311.504



N°	Longitud	Latitud
250	708.847	5.311.494
251	708.838	5.311.481
252	708.835	5.311.472
253	708.837	5.311.442
254	708.839	5.311.434
255	708.840	5.311.431
256	708.842	5.311.425
257	708.839	5.311.405
258	708.849	5.311.390
259	708.859	5.311.395
260	708.857	5.311.388
261	708.859	5.311.368
262	708.863	5.311.361
263	708.875	5.311.351
264	708.875	5.311.345
265	708.882	5.311.304
266	708.887	5.311.301
267	708.894	5.311.297
268	708.896	5.311.294
269	708.908	5.311.288
270	708.914	5.311.285
271	708.919	5.311.277
272	708.920	5.311.276
273	708.924	5.311.273
274	708.940	5.311.252
275	708.938	5.311.256
276	708.945	5.311.258
277	708.920	5.311.253
278	708.918	5.311.191
279	708.908	5.311.181
280	708.907	5.311.177
281	708.917	5.311.156
282	708.918	5.311.156
283	708.922	5.311.152
284	708.920	5.311.156
285	708.916	5.311.156
286	708.916	5.311.139
287	708.957	5.311.046
288	708.959	5.311.045
289	708.962	5.311.044
290	708.965	5.311.043
291	708.992	5.310.988

N°	Longitud	Latitud
292	708.994	5.310.984
293	709.184	5.310.294
294	709.184	5.310.294
295	709.184	5.310.294
296	709.184	5.310.293
297	709.184	5.310.292
298	709.196	5.310.233
299	709.193	5.310.213
300	709.194	5.310.209
301	709.195	5.310.207
302	709.210	5.310.190
303	709.213	5.310.185
304	709.219	5.310.182
305	709.226	5.310.174
306	709.227	5.310.167
307	709.230	5.310.154
308	709.256	5.310.109
309	709.256	5.310.104
310	709.257	5.310.101
311	709.258	5.310.096
312	709.259	5.310.092
313	709.261	5.310.076
314	709.262	5.310.071
315	709.269	5.310.020
316	709.270	5.310.018
317	709.273	5.310.013
318	709.289	5.310.006
319	709.292	5.310.008
320	709.294	5.310.010
321	709.288	5.310.001
322	709.290	5.310.000
323	709.297	5.309.996
324	709.304	5.309.988
325	709.315	5.309.968
326	709.317	5.309.960
327	709.319	5.309.957
328	709.342	5.309.939
329	709.356	5.309.918
330	709.363	5.309.915
331	709.397	5.309.886
332	709.398	5.309.884
333	709.398	5.309.883

N°	Longitud	Latitud
334	709.398	5.309.882
335	709.400	5.309.879
336	709.420	5.309.886
337	709.431	5.309.901
338	709.429	5.309.902
339	709.409	5.309.866
340	709.417	5.309.852
341	709.418	5.309.844
342	709.418	5.309.836
343	709.419	5.309.816
344	709.420	5.309.806
345	709.440	5.309.761
346	709.446	5.309.752
347	709.477	5.309.742
348	709.501	5.309.703
349	709.500	5.309.694
350	709.519	5.309.673
351	709.523	5.309.669
352	709.530	5.309.660
353	709.532	5.309.657
354	709.555	5.309.635
355	709.556	5.309.632
356	709.558	5.309.628
357	709.223	5.310.306
358	709.217	5.310.306
359	709.213	5.310.310
360	709.216	5.310.310
361	709.260	5.310.203
362	709.271	5.310.203
363	709.282	5.310.213
364	709.283	5.310.215
365	709.282	5.310.213
366	709.284	5.310.235
367	709.273	5.310.225
368	709.271	5.310.219
369	710.540	5.317.121
370	710.557	5.317.146
371	710.560	5.317.158
372	710.561	5.317.167
373	710.562	5.317.175
374	710.562	5.317.188
375	710.576	5.317.209

N°	Longitud	Latitud
376	710.579	5.317.208
377	711.461	5.317.415
378	711.453	5.317.416
379	708.907	5.307.286
380	708.937	5.307.196
381	708.950	5.307.133
382	708.957	5.307.102
383	709.011	5.306.938
384	709.032	5.306.878
385	709.419	5.305.442
386	709.438	5.305.338
387	709.468	5.305.242
388	709.493	5.305.176
389	709.547	5.304.977
390	709.558	5.304.927
391	709.575	5.304.868
392	709.740	5.304.181
393	709.750	5.304.130
394	709.759	5.304.080
395	710.133	5.302.690
396	710.136	5.302.637
397	710.147	5.302.593
398	710.188	5.302.444
399	710.709	5.298.485
400	710.714	5.298.420
401	710.744	5.297.978
402	710.792	5.297.454
403	710.798	5.297.387
404	710.803	5.297.344
405	710.872	5.296.669
406	710.883	5.296.578
407	710.888	5.296.520
408	710.992	5.295.442
409	711.015	5.295.303
410	711.083	5.294.722
411	711.085	5.294.701
412	711.092	5.294.623
413	711.096	5.294.585
414	711.112	5.294.437
415	711.119	5.294.399
416	714.032	5.294.937
417	714.032	5.294.946

N°	Longitud	Latitud
418	714.029	5.294.953
419	714.026	5.294.950
420	714.035	5.294.940
421	714.034	5.294.942
422	714.034	5.294.996
423	714.033	5.294.993
424	714.027	5.294.995
425	714.025	5.294.992
426	714.000	5.294.960
427	713.998	5.294.967
428	713.990	5.294.979
429	713.737	5.294.990
430	713.716	5.295.003
431	713.687	5.295.022
432	713.559	5.295.092
433	713.542	5.295.100
434	713.505	5.295.117
435	713.469	5.295.132
436	713.293	5.295.205
437	713.260	5.295.209
438	713.229	5.295.203
439	713.184	5.295.215
440	713.156	5.295.225
441	712.805	5.295.524
442	712.804	5.295.535
443	712.808	5.295.561
444	712.785	5.295.574
445	712.756	5.295.567
446	712.730	5.295.595
447	712.718	5.295.620
448	712.490	5.296.213
449	712.465	5.296.359
450	712.411	5.296.515
451	712.409	5.296.553
452	712.415	5.297.215
453	712.420	5.297.243
454	712.390	5.297.277
455	712.375	5.297.299
456	712.341	5.297.364
457	712.335	5.297.375
458	712.328	5.297.394
459	712.322	5.297.410

N°	Longitud	Latitud
460	712.314	5.297.432
461	712.311	5.297.455
462	712.309	5.297.485
463	712.308	5.297.497
464	712.307	5.297.504
465	712.305	5.297.525
466	712.262	5.297.655
467	712.255	5.297.663
468	712.237	5.297.715
469	712.237	5.297.725
470	712.237	5.297.735
471	712.237	5.297.741
472	712.238	5.297.750
473	712.242	5.297.763
474	712.242	5.297.769
475	712.250	5.297.817
476	712.303	5.297.956
477	712.314	5.297.978
478	712.292	5.298.386
479	712.299	5.298.396
480	712.222	5.298.690
481	712.210	5.298.744
482	712.209	5.298.758
483	712.210	5.298.807
484	712.122	5.299.611
485	712.024	5.299.827
486	712.013	5.299.862
487	712.001	5.299.933
488	711.998	5.299.966
489	711.997	5.299.995
490	711.995	5.300.028
491	711.996	5.300.053
492	712.002	5.300.088
493	712.102	5.300.247
494	712.136	5.300.284
495	710.977	5.300.730
496	710.924	5.300.724
497	710.879	5.300.725
498	712.863	5.295.600
499	712.860	5.295.612
500	712.857	5.295.619
501	712.829	5.295.555

N°	Longitud	Latitud
502	712.830	5.295.552
503	712.498	5.297.249
504	712.493	5.297.250
505	712.521	5.297.275
506	712.514	5.297.267
507	712.518	5.297.266
508	712.533	5.297.295
509	712.410	5.297.452
510	712.417	5.297.444
511	712.417	5.297.445
512	712.410	5.297.449
513	712.415	5.297.453
514	712.413	5.297.462
515	712.440	5.298.008
516	712.436	5.298.014
517	712.433	5.298.017
518	712.440	5.298.035
519	712.442	5.298.037
520	712.443	5.298.039
521	712.442	5.298.040
522	712.020	5.297.475
523	712.006	5.297.415
524	711.969	5.297.206
525	711.955	5.297.166
526	711.921	5.297.089
527	711.678	5.296.460
528	711.640	5.296.368
529	711.618	5.296.328
530	712.468	5.297.304
531	712.476	5.297.297
532	712.478	5.297.294
533	712.475	5.297.296
534	712.396	5.297.322
535	712.389	5.297.316
536	712.379	5.297.325
537	712.389	5.297.317
538	712.403	5.297.325
539	712.391	5.297.326
540	712.391	5.297.325
541	712.389	5.297.367
542	712.391	5.297.364
543	712.394	5.297.365

N°	Longitud	Latitud
544	712.406	5.297.358
545	712.388	5.297.368
546	712.358	5.298.095
547	712.361	5.298.113
548	712.369	5.298.126
549	712.381	5.298.133
550	712.388	5.298.144
551	712.377	5.298.138
552	712.347	5.298.270
553	712.350	5.298.282
554	712.359	5.298.275
555	712.355	5.298.289
556	712.339	5.298.285
557	712.332	5.298.288
558	712.334	5.298.310
559	712.334	5.298.310
560	712.334	5.298.313
561	712.335	5.298.333
562	712.342	5.298.369
563	712.346	5.298.377
564	712.352	5.298.371
565	712.352	5.298.371
566	712.355	5.298.379
567	712.354	5.298.380
568	712.354	5.298.380
569	712.361	5.298.378
570	712.362	5.298.379
571	712.362	5.298.379
572	712.180	5.301.031
573	712.170	5.301.036
574	712.173	5.301.046
575	712.177	5.301.040
576	712.179	5.301.039
577	712.195	5.301.037
578	712.188	5.301.034
579	712.098	5.301.110
580	712.101	5.301.115
581	712.103	5.301.117
582	712.103	5.301.111
583	712.107	5.301.117
584	712.111	5.301.118
585	712.121	5.301.116

N°	Longitud	Latitud
586	712.125	5.301.112
587	712.129	5.301.109
588	712.138	5.301.113
589	712.139	5.301.118
590	712.129	5.301.121
591	712.136	5.301.112
592	712.119	5.301.131
593	712.122	5.301.127
594	712.107	5.301.145
595	712.106	5.301.151
596	712.101	5.301.160
597	712.095	5.301.168
598	712.093	5.301.174
599	712.092	5.301.175
600	712.090	5.301.179
601	712.089	5.301.182
602	712.088	5.301.183
603	712.085	5.301.186
604	712.085	5.301.187
605	712.084	5.301.190
606	712.083	5.301.193
607	712.081	5.301.207
608	712.081	5.301.211
609	712.079	5.301.215
610	712.075	5.301.221
611	712.072	5.301.228
612	712.064	5.301.251
613	712.122	5.300.250
614	712.111	5.300.249
615	712.090	5.300.225
616	712.085	5.300.211
617	712.081	5.300.198
618	712.080	5.300.191
619	712.073	5.300.153
620	712.074	5.300.153
621	712.075	5.300.152
622	712.074	5.300.148
623	712.074	5.300.153
624	712.017	5.300.094
625	712.025	5.300.068
626	712.008	5.300.020
627	712.011	5.300.014

N°	Longitud	Latitud
628	712.014	5.300.012
629	712.021	5.300.012
630	712.020	5.300.015
631	712.027	5.300.010
632	712.029	5.300.010
633	712.030	5.300.011
634	712.044	5.299.920
635	712.036	5.299.884
636	712.061	5.299.906
637	712.063	5.299.911
638	712.065	5.299.919
639	712.061	5.299.830
640	712.064	5.299.827
641	712.080	5.299.809
642	712.078	5.299.814
643	712.070	5.299.748
644	712.074	5.299.745
645	712.076	5.299.743
646	712.101	5.299.721
647	712.116	5.299.697
648	712.133	5.299.702
649	712.132	5.299.693
650	712.128	5.299.690
651	712.189	5.298.798
652	712.188	5.298.784
653	712.189	5.298.774
654	712.834	5.295.492
655	712.844	5.295.519
656	712.866	5.295.489
657	712.896	5.295.469
658	712.901	5.295.466
659	712.927	5.295.449
660	712.929	5.295.448
661	712.931	5.295.446
662	712.931	5.295.445
663	712.963	5.295.444
664	712.968	5.295.454
665	712.967	5.295.457
666	712.977	5.295.451
667	713.046	5.295.375
668	713.053	5.295.371
669	713.060	5.295.372

N°	Longitud	Latitud
670	713.074	5.295.382
671	713.067	5.295.371
672	713.060	5.295.366
673	713.065	5.295.368
674	712.446	5.298.369
675	712.444	5.298.371
676	712.453	5.298.378
677	712.454	5.298.382
678	712.987	5.295.400
679	712.998	5.295.398
680	713.006	5.295.391
681	713.052	5.295.322
682	713.058	5.295.306
683	713.091	5.295.285
684	713.134	5.295.311
685	713.179	5.295.264
686	713.184	5.295.261
687	713.201	5.295.250
688	713.214	5.295.255
689	713.216	5.295.254
690	713.249	5.295.236
691	713.257	5.295.235
692	713.266	5.295.231
693	713.268	5.295.228
694	713.286	5.295.224
695	713.281	5.295.222
696	713.290	5.295.219
697	713.338	5.295.201
698	713.341	5.295.206
699	713.345	5.295.210
700	713.386	5.295.209
701	713.395	5.295.208
702	713.413	5.295.234
703	713.409	5.295.236
704	713.459	5.295.192
705	713.457	5.295.191
706	713.463	5.295.189
707	713.472	5.295.187
708	713.481	5.295.180
709	713.516	5.295.171
710	713.531	5.295.173
711	713.540	5.295.170

N°	Longitud	Latitud
712	713.563	5.295.154
713	713.592	5.295.142
714	713.606	5.295.126
715	713.664	5.295.088
716	713.663	5.295.087
717	713.722	5.295.056
718	713.720	5.295.053
719	713.723	5.295.055
720	713.753	5.295.044
721	713.755	5.295.044
722	713.758	5.295.039
723	713.764	5.295.031
724	713.766	5.295.027
725	713.821	5.294.959
726	713.826	5.294.954
727	713.780	5.295.039
728	713.777	5.295.035
729	713.778	5.295.024
730	713.779	5.295.023
731	713.779	5.295.023
732	713.887	5.294.914
733	713.896	5.294.907
734	713.915	5.294.907
735	711.379	5.293.799
736	711.321	5.293.750
737	711.281	5.293.718
738	711.201	5.293.639
739	712.242	5.299.617
740	712.249	5.299.614
741	712.245	5.299.592
742	712.230	5.299.598
743	712.257	5.299.623
744	712.232	5.299.581
745	712.210	5.300.225
746	712.211	5.300.234
747	712.213	5.300.235
748	712.211	5.300.232
749	712.264	5.300.254
750	712.260	5.300.251
751	712.269	5.300.251
752	712.172	5.300.222
753	712.171	5.300.224



N°	Longitud	Latitud
754	712.174	5.300.228
755	712.020	5.301.185
756	712.022	5.301.207
757	712.020	5.301.207
758	712.018	5.301.224
759	712.016	5.301.228
760	712.014	5.301.229
761	712.012	5.301.233
762	712.011	5.301.236
763	712.009	5.301.241
764	712.008	5.301.245
765	712.008	5.301.247
766	712.006	5.301.251
767	712.005	5.301.253
768	712.004	5.301.257
769	712.005	5.301.261
770	712.005	5.301.266
771	712.065	5.301.278
772	712.047	5.301.293
773	712.101	5.301.265
774	712.101	5.301.263
775	712.104	5.301.264
776	712.219	5.301.051
777	712.179	5.301.041
778	712.184	5.301.041
779	712.508	5.303.361
780	712.511	5.303.359
781	712.376	5.302.468
782	712.381	5.302.461
783	712.386	5.302.457
784	712.476	5.302.459
785	712.477	5.302.462
786	712.479	5.302.473
787	712.477	5.302.472
788	712.481	5.302.471
789	712.239	5.302.192
790	712.231	5.302.166
791	712.335	5.298.110
792	712.336	5.298.054
793	713.107	5.295.269
794	713.135	5.295.259
795	713.153	5.295.252

N°	Longitud	Latitud
796	713.566	5.295.100
797	712.476	5.302.459
798	712.386	5.302.457
799	712.476	5.302.459
800	712.477	5.302.462

## ANEXO B

Se indican las remociones en masa, su ubicación (latitud y longitud) en coordenadas UTM, área en metros cuadrados y perímetro en metros.

N°	Tipo RM	Longitud	Latitud	Área [m <sup>2</sup> ]	Perímetro [m]
1	RMA	709.733,72	5.331.326,73	309.160,82	2.367,85
2	RMA	710.191,55	5.329.775,67	197.010,98	2.084,10
3	DR	710.889,52	5.329.212,60	94.928,39	1.530,48
4	CR	711.896,21	5.329.645,79	16.720,96	539,40
5	FD	713.234,94	5.329.396,01	6.735,43	887,34
6	RMA	713.574,50	5.329.179,27	255.169,27	2.513,12
7	RMA	714.341,15	5.328.906,06	158.290,06	2.071,34
8	RMA	715.543,32	5.329.054,91	20.414,35	660,19
9	CR	715.808,88	5.329.457,51	34.371,47	852,96
10	CR	715.170,66	5.329.494,46	18.788,50	600,24
11	RMA	713.678,52	5.327.610,63	126.851,59	1.793,44
12	CR	712.860,08	5.327.498,18	25.032,19	1.324,19
13	CR	712.575,39	5.327.362,24	59.547,12	906,20
14	DRS	710.818,53	5.327.730,37	217.276,46	2.192,54
15	DS	710.646,39	5.327.427,19	5.951,12	449,62
16	DS	710.697,00	5.327.196,87	72.979,34	1.425,13
17	DS	710.772,18	5.327.395,14	5.923,06	447,72
18	RMA	711.274,12	5.320.497,04	886.139,05	5.167,61
19	DS	710.395,20	5.326.526,73	14.904,43	480,85
20	DS	710.188,43	5.326.001,49	17.713,78	618,41
21	RMA	711.076,37	5.318.473,83	93.060,61	1.162,31
22	DR	711.184,68	5.318.881,92	5.078,45	288,36
23	DS	712.641,20	5.319.321,45	4.126,41	367,00
24	FD	716.904,77	5.326.527,05	30.594,11	1.931,12
25	DRM	715.818,73	5.327.456,41	12.893,50	889,17
26	CR	713.167,89	5.327.602,08	17.978,77	666,59
27	CR	717.411,88	5.326.920,79	7.316,68	410,45
28	DRM	715.418,32	5.326.170,31	18.069,97	1.007,81
29	CR	713.131,04	5.327.069,61	8.294,04	496,43
30	DRM	712.897,93	5.329.093,23	3.595,81	628,94
31	CR	712.788,67	5.319.885,18	3.548,56	236,88
32	FD	714.310,43	5.320.543,86	6.870,67	784,70
33	FD	714.166,40	5.320.684,58	5.940,06	809,88
34	DRM	714.035,67	5.320.948,32	4.555,19	696,84
35	FD	713.954,00	5.321.332,02	3.557,54	613,25
36	DS	714.240,84	5.319.985,36	207.907,57	1.735,25
37	FD	716.355,94	5.321.483,59	109.680,14	3.237,52

N°	Tipo RM	Longitud	Latitud	Área [m <sup>2</sup> ]	Perímetro [m]
38	DRM	717.393,75	5.321.010,07	102.353,05	2.184,39
39	DRM	714.152,87	5.316.740,41	28.001,80	1.482,61
40	RMA	709.380,23	5.315.218,90	70.870,91	1.067,98
41	DS	709.225,94	5.314.892,35	22.579,13	887,16
42	DRM	709.298,33	5.312.216,91	71.833,32	1.395,60
43	DRM	710.091,16	5.311.918,04	28.609,37	956,47
44	RMA	709.782,16	5.309.125,25	260.470,26	2.336,62
45	RMA	708.885,56	5.312.547,94	175.153,58	2.002,74
46	DRM	709.666,07	5.310.798,51	36.531,19	1.083,77
47	DRM	713.525,12	5.308.811,04	129.493,80	2.276,48
48	DRM	717.073,67	5.306.591,88	64.206,17	2.032,79
49	DRM	717.761,66	5.306.494,21	60.937,02	1.705,36
50	DRM	716.432,99	5.306.888,56	6.699,75	565,82
51	DRM	716.015,93	5.305.780,62	60.709,83	1.669,69
52	DRM	717.554,11	5.303.375,64	936.969,99	4.438,14
53	DRM	718.655,05	5.305.001,81	179.177,04	1.702,44
54	DS	719.629,76	5.309.767,96	34.513,33	1.140,85
55	DS	719.920,39	5.309.719,42	55.493,43	1.358,71
56	DRM	713.619,58	5.304.617,92	637.578,22	4.495,31
57	DS	712.965,40	5.302.319,48	137.908,75	1.799,74
58	DRM	713.006,91	5.298.885,82	65.687,41	3.164,54
59	FD	715.184,55	5.321.417,44	9.673,52	1.198,77
60	CR	714.786,56	5.322.164,82	25.327,75	822,80
61	FD	714.346,48	5.322.421,05	8.729,09	910,51
62	FD	714.106,96	5.322.566,31	12.086,06	1.466,96
63	FD	713.985,98	5.323.027,74	24.690,62	2.269,64
64	FD	718.294,87	5.334.102,86	53.773,79	1.257,05
65	DS	713.284,69	5.319.758,63	25.814,54	789,14
66	RMA	716.548,81	5.319.635,94	1.212.356,18	5.422,17
67	RMA	715.139,79	5.319.431,33	251.051,23	2.204,82
68	RMA	713.706,55	5.319.530,45	122.394,32	1.718,76
69	DRM	712.756,82	5.330.772,97	18.642,22	932,30
70	DS	713.348,13	5.330.951,25	5.243,92	319,91
71	DRM	715.589,73	5.331.152,48	113.908,62	1.381,91
72	RMA	717.036,03	5.328.753,13	173.294,59	1.800,83
73	CR	717.063,40	5.311.923,56	6.289,21	526,61
74	CR	717.171,76	5.311.872,18	25.162,04	868,04
75	DS	716.595,24	5.310.218,72	14.737,31	623,06
76	DRM	714.056,13	5.295.130,94	27.448,52	1.210,08
77	RMA	712.617,22	5.296.907,76	235.368,08	2.024,42
78	RMA	710.836,69	5.316.822,92	514.454,95	2.894,45
79	DS	710.234,63	5.326.181,43	5.934,58	409,43

N°	Tipo RM	Longitud	Latitud	Área [m²]	Perímetro [m]
80	CR	715.394,73	5.329.333,87	144.045,37	1.473,30
81	DRM	715.269,46	5.329.027,27	8.629,24	531,32
82	DRM	713.831,43	5.324.859,86	54.555,45	904,75
83	CR	712.665,58	5.331.473,22	45.920,09	1.054,55
84	RMA	711.771,04	5.329.172,53	175.440,41	1.976,06
85	CR	714.974,08	5.330.635,53	21.838,76	565,28
86	DS	715.675,91	5.327.533,50	67.111,26	1.133,55
87	CR	716.139,28	5.332.211,08	93.527,19	1.401,28
88	CR	716.089,86	5.332.641,20	12.649,85	679,43
89	CR	716.524,47	5.333.016,50	164.167,74	1.741,43
90	CR	717.080,93	5.333.156,88	56.014,40	1.315,89
91	CR	716.220,38	5.329.762,99	124.651,60	1.368,39
92	CR	715.810,11	5.330.123,08	217.446,39	1.792,91
93	FD	718.177,00	5.306.919,40	272.816,46	3.873,78
94	DS	709.579,79	5.312.337,36	13.204,83	545,17
95	DS	713.680,65	5.312.909,06	152.862,63	2.275,49
96	CR	713.384,49	5.312.923,64	14.436,31	491,04
97	DRM	712.693,64	5.327.716,06	55.662,97	1.310,78
98	CR	715.655,39	5.327.264,01	11.273,55	479,11
99	CR	715.302,01	5.325.951,31	2.567,99	205,22
100	CR	712.767,44	5.329.204,37	1.356,21	145,29
101	CR	717.051,56	5.321.498,77	6.801,61	333,12
102	CR	714.037,36	5.316.441,48	6.834,58	354,17
103	CR	709.633,38	5.312.124,53	8.299,19	379,05
104	CR	710.281,90	5.311.808,66	4.691,49	254,14
105	CR	709.944,35	5.310.783,25	8.797,97	350,38
106	DS	713.120,10	5.309.172,30	15.619,03	467,51
107	DR	717.369,10	5.306.192,81	6.988,95	394,00
108	DR	717.734,35	5.306.070,84	41.797,03	935,04
109	DS	716.457,83	5.306.795,63	2.354,23	197,39
110	FD	716.252,99	5.305.486,96	19.489,20	529,80
111	CR	716.392,62	5.303.118,36	2.905.657,98	8.475,99
112	CR	717.926,49	5.305.244,12	980.666,33	4.603,76
113	CR	714.860,26	5.304.590,60	45.709,28	837,17
114	CR	713.674,71	5.299.062,17	7.026,09	365,52
115	DRM	714.887,04	5.322.247,73	16.918,89	636,81
116	CR	712.544,44	5.330.766,73	1.152,42	139,01
117	DRM	713.219,91	5.330.972,25	4.329,28	354,75
118	CR	715.445,99	5.331.285,30	113.328,05	1.682,16
119	CR	714.317,40	5.295.231,45	6.579,42	322,25
120	CR	715.182,15	5.329.144,32	223,30	61,55
121	CR	713.787,50	5.325.010,19	49.620,15	1.329,65



<b>N°</b>	<b>Tipo RM</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Área [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Perímetro [m]</b>
122	DRM	712.867,45	5.331.515,99	134.494,65	1.608,59
123	DRM	716.855,29	5.332.669,05	692.293,20	4.226,93
124	DRM	716.444,18	5.329.993,00	176.625,14	1.748,76
125	DRM	716.226,89	5.330.480,09	177.062,68	1.742,59
126	CR	714.188,25	5.320.990,27	2.994,61	211,25

## ANEXO C

Se indica el código de la red neuronal, se subdividió en función *data\_base*, función *net* y el código que permite la evaluación de susceptibilidad.

### Función 1: función *data\_base*

```
Function[Input,Target,ind_train,ind_val,ind_test]=data_base(landslide,no_landslide)

data_0 = no_landslide;
data_1 = landslide;

[ceros , x] = size(data_0);
[unos , x] = size(data_1);

r0 = randperm(ceros);
r1 = randperm(unos);

n_train_0 = floor(.7*ceros);
n_valid_0 = floor(.15*ceros);
n_test_0 = floor(.15*ceros);
n_0 = n_train_0+n_valid_0+n_test_0;

if n_0 < ceros
    n_train_0 = n_train_0 + (ceros - n_0);
elseif n_0 > ceros
    n_valid_0 = n_valid_0 - (ceros - n_0);
end

n_train_1 = floor(.7*unos);
n_valid_1 = floor(.15*unos);
n_test_1 = floor(.15*unos);
n_1 = n_train_1+n_valid_1+n_test_1;

if n_1 < unos
    n_train_1 = n_train_1 + (unos - n_1);
elseif n_1 > unos
    n_valid_1 = n_valid_1 - (unos - n_1);
end

train_0 = data_0 (r0(1 : n_train_0) , :);
valid_0 = data_0 (r0(n_train_0+1 : n_train_0+n_valid_0) , :);
test_0 = data_0 (r0(n_train_0+n_valid_0+1 : end), :);

train_1 = data_1 (r1(1 : n_train_1) , :);
valid_1 = data_1 (r1(n_train_1+1 : n_train_1+n_valid_1) , :);
test_1 = data_1 (r1(n_train_1+n_valid_1+1 : end), :);

Train = [train_0(:,1:end-1) ; train_1(:,1:end-1)];
Valid = [valid_0(:,1:end-1) ; valid_1(:,1:end-1)];
Test = [test_0(:,1:end-1) ; test_1(:,1:end-1)];

C_train = [train_0(:,end) ; train_1(:,end)];
C_valid = [valid_0(:,end) ; valid_1(:,end)];
C_test = [test_0(:,end) ; test_1(:,end)];
```

```

l_train = length(Train);
l_valid = length(Valid);
l_test = length(Test);

ind_train = 1 : 1 : l_train;
ind_val = l_train+1 : 1 : l_train+l_valid;
ind_test = l_train+l_valid+1 : 1 : l_train+l_valid+l_test;

Input = [Train' Valid' Test'];
Target = [C_train' C_valid' C_test'];
save variables.mat

end

```

## Función 2: función *net*

```

function net = new_ffnet(n,Input,Target,ind_train,ind_val,ind_test)
net = feedforwardnet(n);
net = configure(net,Input,Target);

net.layers{1}.transferFcn = 'tansig';
net.layers{2}.transferFcn = 'purelin';

net.divideFcn = 'divideind';
net.divideParam.trainInd = ind_train;
net.divideParam.valInd = ind_val;
net.divideParam.testInd = ind_test;
net.divideParam

end

```

## Código de la red neuronal

```

n = [100];
net = new_ffnet(n,Input,Target,ind_train,ind_val,ind_test);
view(net)

net = train(net,Input,Target);

outTest = sim(net,Input(:,ind_test));
[tpr,fpr,thresholds] = roc(Target(ind_test),outTest);

figure
plot(fpr,tpr)

load 'sample.mat'

output = sim(net,sample');
out = output'

```