

RIESGO DE REMOCIÓN EN MASA EN LA COMUNA DE SANTA JUANA POSTERIOR AL INCENDIO FORESTAL DE FEBRERO DE 2023

B. León Solar¹, C. Arias Tapia², R. King St-Onge³

RESUMEN:

El incendio forestal que aquejó a la comuna de Santa Juana en febrero de 2023 es el segundo incendio más grande en la historia de Chile, afectando aproximadamente al 60% de la superficie comunal. Además de su gran afectación a la población, la severidad de este incendio provocó una gran reducción de vegetación, dejando al suelo desprotegido ante el impacto de las precipitaciones, las que corresponden al factor desencadenante de procesos de remoción en masa más importante en Chile. El objetivo de esta investigación es determinar el riesgo de ocurrencia de procesos de remoción en masa en la comuna de Santa Juana, como aporte a la gestión del riesgo de desastres. Se realiza un modelo conceptual que describe la litología, orientación de laderas y el grado de pendiente de éstas, nivel de precipitación, cobertura vegetal y severidad del incendio, ponderándolas mediante el *software* QGIS y utilizando un proceso de análisis jerárquico para evaluar el peligro de remoción en masa en la comuna. Asimismo, se zonifica la vulnerabilidad de la población mediante un mapa de exposición. Finalmente, el mapa de riesgo demuestra que los sectores con mayor riesgo se encuentran en los alrededores de la zona urbana, como Curalí, Diñico, Huallerehue y Tricauco, y en la zona rural oriental de la comuna, en los sectores de Chacay, Colico, Malal y Palihue. Se propone la focalización de los esfuerzos de gestión del riesgo, así como de estudios de mayor detalle, en las áreas señaladas como más riesgosas.

PALABRAS CLAVES: Procesos de remoción en masa; Riesgos naturales; Incendios forestales.

ABSTRACT:

The forest fire that affected the community of Santa Juana during February 2023 was the second largest in the history of Chile, affecting approximately 60% of the surface of Santa Juana. In addition to a huge impact on the population, the severity of the fire caused a vast reduction in vegetation, leaving the soil unprotected from the impact of rainfall, which is the most important triggering factor for landslides in the country. The objective of this research is to determine the risk of occurrence of landslides in the community of Santa Juana, as a contribution to disaster risk management. A conceptual model was elaborated that describes the lithology, orientation and angle of the slopes, levels of precipitation, vegetation cover and the severity of the fire, weighting them through the QGIS software and using a hierarchical analysis to evaluate de risk of landslides. Finally, the risk map shows that sectors with the highest risk are in the urban area and its surroundings, such as Curalí, Diñico, Huallerehue and Tricauco, and in the eastern rural area of the community, in the sectors of Chacay, Colico, Malal and Palihue. It is proposed to focus risk management efforts, as well as more detailed studies, in the areas indicated as the most risky.

KEYWORDS: Landslides; Natural risks; Forest fire.

¹ Alumno, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, bleon@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, cesar.arias@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rking@ing.ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

El incendio forestal ocurrido en la Región del Biobío durante febrero de 2023, denominado “incendio de Santa Ana”, es el segundo incendio más grande en la historia de Chile, quemando 74.101 hectáreas, de las cuales 44.236 ha corresponden a la superficie de Santa Juana, es decir, aproximadamente un 60% de la superficie comunal (Corporación Nacional Forestal (Conaf), 2023). Este incendio dejó en Santa Juana un saldo de 15 víctimas fatales, 1.140 damnificados y 2.756 afectados, arrasando con 842 viviendas, 6 escuelas y 7 postas de salud rural, además de miles de personas afectadas con relación a la interrupción de su sistema eléctrico, suministro de agua potable, conectividad de los caminos y/o carreteras, entre otros (Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (Senapred), 2023).

Un incendio forestal corresponde a un fuego de origen natural o antrópico fuera de control que ocurre en los ecosistemas terrestres y se propaga por la vegetación (Pausas, 2012), y en Chile el 99,7% de su origen corresponde a la acción humana (Conaf, 2016). El fuego es capaz de destruir la cubierta orgánica del suelo y la vegetación, modificando las condiciones de infiltración debido a la exposición del suelo al impacto de la lluvia (DeBano *et al.*, 1998), facilitando la movilización de sedimentos que impactan significativamente la calidad de los cursos de agua, induciendo cambios en las características geomorfológicas e hidrológicas de los ecosistemas, poniendo en riesgo su futura fertilidad (Shakesby y Doerr, 2006). La severidad del fuego (el grado de afectación de la cubierta orgánica y la superficie mineral del suelo) y la ocurrencia de eventos de precipitación después de éste, son dos de los aspectos más influyentes en la producción de escorrentía y sedimentos después del incendio (Fernández y Vega, 2011). En la comuna de Santa Juana, aproximadamente el 97,1% de la superficie está cubierta por vegetación, lo que explica en gran medida la razón de la afectación de los incendios forestales y el permanente riesgo al que está expuesta la población.

El concepto de “riesgo” ha estado en constante evolución a lo largo de los años, intentando englobar y acotar más al mismo tiempo. En la actualidad, puede ser definido como la probabilidad de sufrir daños y pérdidas en una zona definida durante un periodo de tiempo determinado (Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior y Seguridad Pública (ONEMI), 2017). Esto ocurre como resultado de la interacción entre una amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos a dicho peligro (ONEMI, 2017). Dentro del desarrollo de este concepto, la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) irrumpe como una metodología que busca disminuir las pérdidas causadas por desastres, enfocada en el conocimiento y la reducción del riesgo de desastres (RRD). Esta última considera todas aquellas acciones orientadas a la prevención de nuevos riesgos, la reducción de los riesgos existentes y la gestión del riesgo residual (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, 2021). Dentro de las amenazas señaladas, los peligros geológicos, tales como sismos, erupciones volcánicas, erosión costera y procesos de remoción en masa, entre otros, ocupan un lugar predominante (Arias *et al.*, 2021).

Los procesos de remoción en masa, definidos como aquellos movimientos gravitacionales de material del terreno, son uno de los más importantes y recurrentes agentes modeladores del relieve (Cruden, 1991). Los principales factores que influyen en la generación de éstos están asociados a las pendientes, precipitaciones, cobertura vegetal, litología, actividades antrópicas y sismicidad (Mardones y Vidal, 2001), de los cuales, en nuestro país, las precipitaciones, sismos y la acción del humano corresponden a los principales factores desencadenantes de estos fenómenos (Arias *et al.*, 2018). En Santa Juana se han visto alterados varios de estos factores producto del incendio, principalmente por la pérdida de vegetación, lo cual ha dejado el terreno más expuesto a los efectos de la precipitación, como la escorrentía superficial, saturación del suelo y/o erosión superficial, haciéndola más susceptible a la ocurrencia de procesos de remoción en masa.

La zona de estudio corresponde a la comuna de Santa Juana (Figura 1), ubicada 45 km al SSE de Concepción, capital de la Región del Biobío, y 557 km al SSW de Santiago de Chile. Cuenta con una población de 13.749 habitantes según el Censo de Población y Vivienda realizado el año 2017 (Biblioteca del Congreso Nacional

(BCN), 2021). Presenta una superficie total de 731 km² y está emplazada en el valle de Catirai, en la ribera sur del río Biobío (Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo, 2021). Este valle incluye la ladera oriental de las montañas de la cordillera de Nahuelbuta, donde desciende hacia el valle del río Biobío. La cordillera de Nahuelbuta corresponde a un tramo de la Cordillera de la Costa que se levanta como un macizo de más de 1500 m s.n.m., extendiéndose desde el río Biobío hasta el río Imperial en la Región de la Araucanía (BCN, 2021).

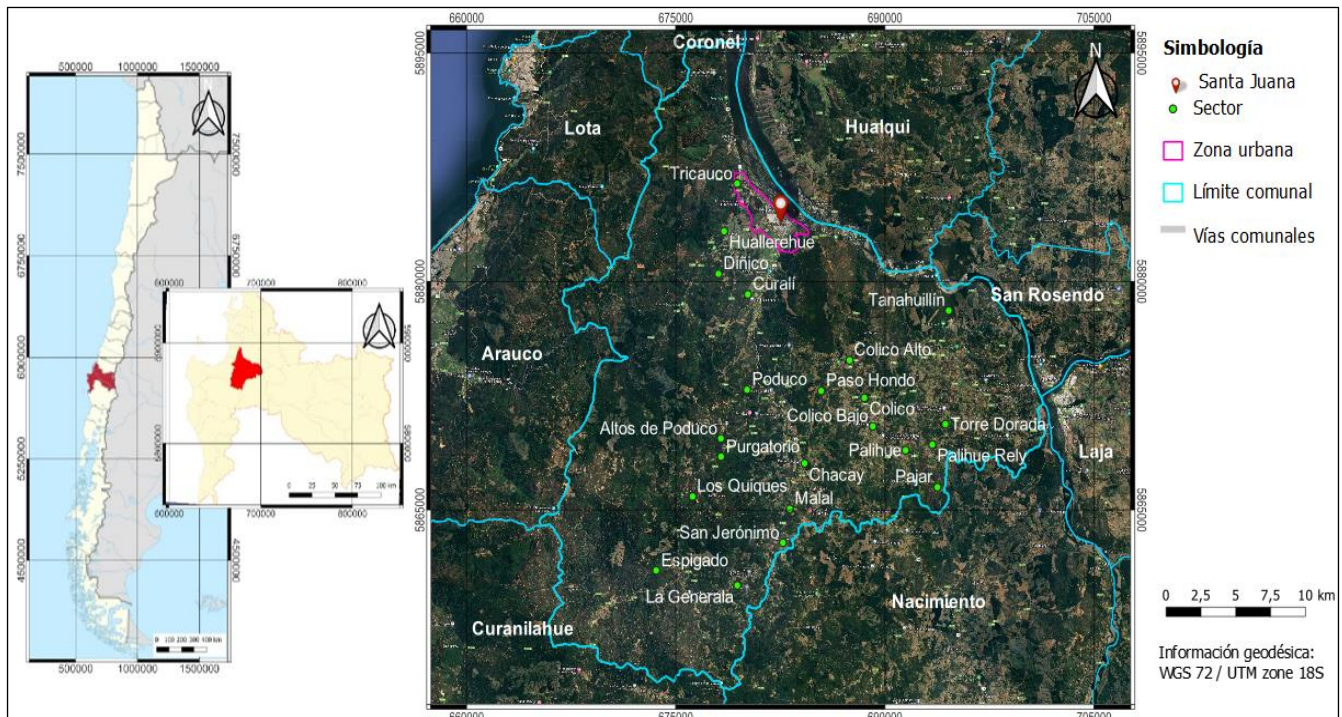


Figura 1: Mapa de ubicación de la zona de estudio: comuna de Santa Juana, Región del Biobío, Chile (Elaboración propia, 2023).

El objetivo principal de esta investigación es determinar el riesgo a sufrir procesos de remoción en masa en la comuna de Santa Juana luego de ocurrido el incendio forestal señalado, con la finalidad de contribuir a la gestión del riesgo de desastres en la comuna. Se analizarán distintos factores que desencadenan la ocurrencia de remociones en masa en el territorio, con los cuales se elaborará un mapa de peligro. Se realizará un mapa de vulnerabilidad física (exposición) para llevar a cabo un análisis georreferenciado de la población. Todo lo anterior tiene como finalidad elaborar el mapa de riesgo de remoción en masa de Santa Juana.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Composición del riesgo

2.1.1 Riesgo

La ONEMI (2017) coincide en lo expuesto con especialistas en el área como Hyndman y Hyndman (2010) en que el riesgo puede ser definido como la probabilidad de sufrir daños y pérdidas de vidas humanas, sociales, económicas o ambientales en una ubicación específica durante un periodo de tiempo determinado como resultado de la interacción entre una amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos a dicho peligro. Además, Keller y Blodgett (2004) refuerzan que el evento en sí no es un riesgo, si no que se convierte en riesgo cuando amenaza los intereses humanos.

Diversos autores afirman que el riesgo es una construcción social (García, 2005), haciendo referencia a las condiciones de vulnerabilidad generadas por el humano y la reproducción de estas mismas, las cuales terminan por definir y determinar la magnitud de los efectos y consecuencias ante la ocurrencia de un peligro natural.

2.1.2 Susceptibilidad

La ONEMI (2018) define específicamente la susceptibilidad a sufrir remociones en masa como la propensión que posee un terreno a experimentar fenómenos de este tipo debido a sus características geológicas, morfológicas, geotécnicas e hidrogeológicas y otras no intrínsecas como el uso del suelo o la cobertura vegetal; Sin embargo, no establece relación alguna con la probabilidad temporal de ocurrencia de un proceso de remoción en masa, pues esto depende básicamente de los factores detonantes como las lluvias o los sismos.

2.1.3 Peligro o amenaza

Ocola (2005) señala que el peligro hace referencia a aquellos procesos, eventos físicos, fenómenos naturales, incidentes tecnológicos o humanos que son potencialmente dañinos y pueden generar pérdidas o heridos, daños a la propiedad, alteración social y económica y/o alteración del ambiente de un área determinada en un cierto periodo de tiempo; Además, da cuenta que el estudio del peligro entrega las herramientas para identificar, analizar y dar seguimiento a estos fenómenos y así determinar su potencial, origen, características, comportamiento y exposición.

2.1.4 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad puede ser definida como aquellas condiciones que, determinadas por diversos factores tales como procesos físicos, sociales, institucionales, económicos o ambientales, aumentan la susceptibilidad de una persona, comunidad, bienes, infraestructuras o servicios a sufrir los efectos de la manifestación de una amenaza (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, 2021).

Dentro de los procesos mencionados, Wilches-Chaux (1989) clasificó 11 distintas vulnerabilidades a las que se puede ver expuesta una comunidad. En este estudio se analizará la vulnerabilidad física, también conocida como exposición. Expertos en el área coinciden en que la exposición es el tipo de vulnerabilidad que más pondera con respecto a los otros tipos de vulnerabilidades, por lo que incluso se ha llegado a analizar este factor como uno propio del riesgo, fuera del análisis de vulnerabilidad.

La exposición se define como la condición que tiene un asentamiento humano a ser afectado por estar en el área de influencia de un peligro (Blackie 1994 en Cardona, 2001); Wilches-Chaux (1989), por su parte, menciona que la principal razón de este emplazamiento se debe a la condición provocada por la falta de oportunidades para una ubicación de menor riesgo (Cardona, 2001). Además, la ONEMI (2002) señala que, para su análisis y descripción, se debe considerar, entre otros, el tiempo de exposición ante una o varias amenazas, siendo parte fundamental de la expresión del riesgo de desastres.

2.2 Gestión del Riesgo de Desastres

La Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) corresponde al proceso continuo de realizar acciones permanentes para lograr reducir los riesgos existentes, evitar generar nuevos riesgos de desastres y gestionar el riesgo residual. Este proceso, de carácter social, profesional, científico y técnico, considera todas las fases del ciclo del riesgo de desastres y lleva a la práctica acciones tales como la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de diversas políticas, planes, programas e instrumentos para el conocimiento y la reducción del riesgo de desastres (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, 2021).

Con la finalidad de realizar un análisis cuantitativo, la Organización de los Estados Americanos (OEA) proponen dos componentes que se deben ponderar para obtener el valor del riesgo (R): la amenaza (A) y vulnerabilidad (V), presentado en la Ecuación 1.

$$R = A * V \quad (1)$$

Este modelo plantea que, para lograr reducir el riesgo, se debe minimizar cualquiera de las componentes mencionadas, en donde la amenaza tiene relación con la probabilidad de ocurrencia de un peligro y la vulnerabilidad estima el nivel de afectación y pérdidas, considerando la ubicación geográfica de los elementos (Rojas y Martínez, 2011).

2.3 Procesos de remoción en masa

2.3.1 Definición y clasificación

Se entiende por proceso de remoción en masa (PRM) a todos aquellos movimientos a favor de la gravedad de una masa de roca, detritos o suelos (Cruden, 1991) hasta encontrar un punto de reposo, en donde el material logra un estado de equilibrio (Cruden y Fell, 1997). Este proceso, que además considera material agregado de una ladera, puede ser lento o rápido a través de un plano de deslizamiento (Hungry *et al.*, 2014) y se genera a partir de la combinación de diferentes factores condicionantes que pueden tener un origen geológico, geotécnico, morfológico, físico-químico, meteorológico, biológico y/o antrópico (Cruden y Varnes, 1996). Estos factores se desarrollan o se mantienen en un estado de latencia hasta que al menos uno de ellos actúa como factor detonante del movimiento. Debido a lo anterior, el estudio de estos fenómenos está asociado a factores condicionantes y factores desencadenantes. Los primeros determinan la susceptibilidad del suelo a sufrir PRM, mientras que los segundos son factores que incrementan ciertas fuerzas que terminan por desestabilizar el terreno (Marín-Sánchez y Osorio, 2017). Con respecto a estos últimos, los más comunes en Chile son las intensas precipitaciones, sismos y acción humana (Arias *et al.*, 2018).

Si bien existen diversas clasificaciones de procesos de remoción en masa, una de las más comúnmente aceptadas corresponde a la dada por Cruden y Varnes (1996), quienes propusieron clasificar de acuerdo con las características del tipo de movimiento y al material involucrado. El tipo de material puede ser roca, detritos o tierra, mientras que en el tipo de movimiento se distinguen caídas, volcamientos, deslizamientos, flujos y extensión lateral (Figura 2). La combinación de dos o más de los movimientos señalados deja como resultado un movimiento mixto o complejo (Curden y Varnes, 1996).

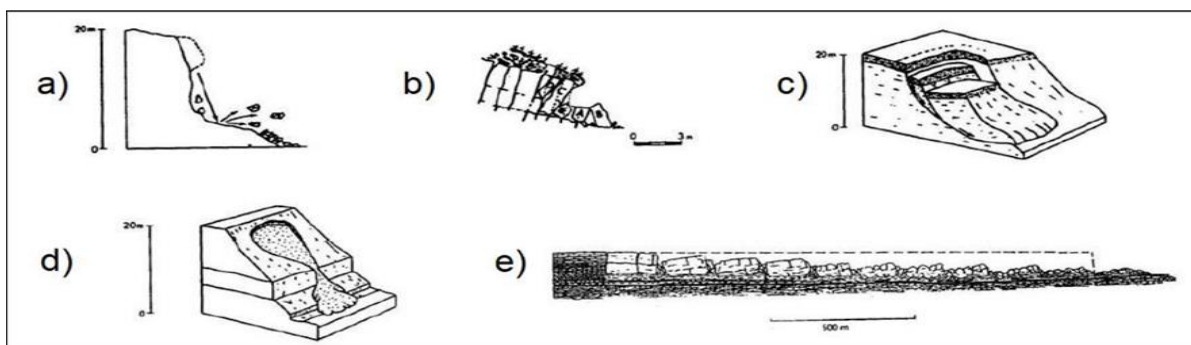


Figura 2: Clasificación de Remoción en masa según el tipo de movimiento a) Caída, b) Volcamiento, c) Deslizamiento, d) Flujo, e) Extensión lateral (Tomado de Cruden y Varnes, 1996).

2.4 Geología de la comuna de Santa Juana

Según los estudios elaborados por Ferraris (1981), López (2002), el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin, 2003) y Asenjo *et al.* (2018), en la zona de estudio se pueden encontrar cuatro tipos de litologías: Basamento Metamórfico, Batolito Costero, Formaci3n Santa Juana y Dep3sitos Cuaternarios, distribuidas según se presenta en el Mapa geol3gico de Santa Juana (Figura 3).

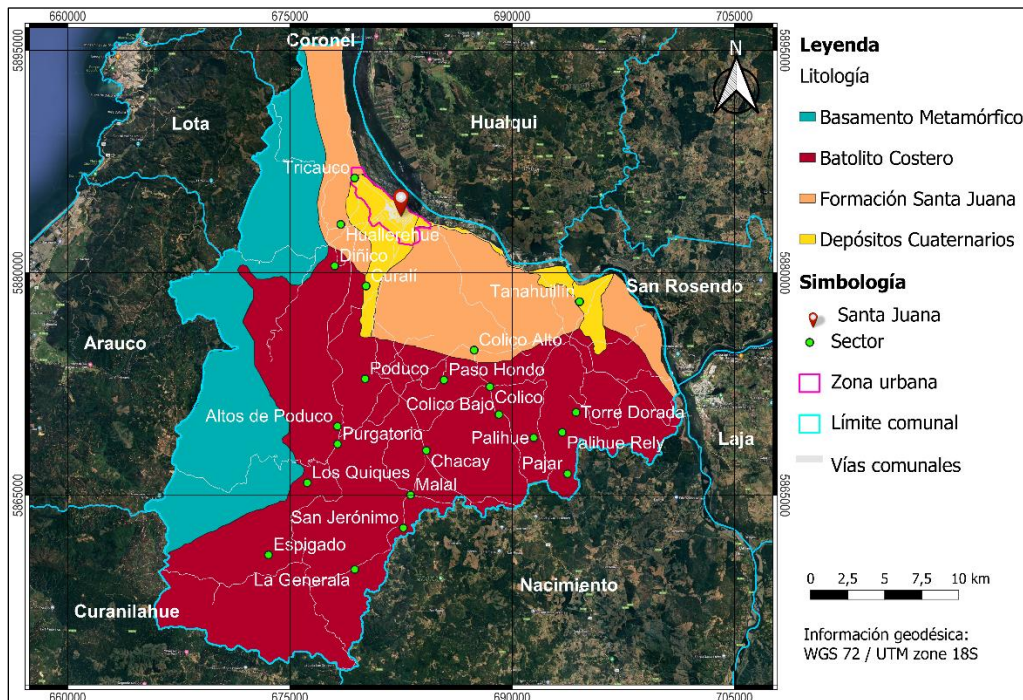


Figura 3: Mapa geol3gico de la comuna de Santa Juana (Modificado de López, 2002 y Sernageomin, 2003).

El Basamento Metamórfico (Silúrico-Carbonífero) se encuentra al oeste de Santa Juana y está compuesto por pizarras, filitas y metareniscas con metamorfismo de bajo gradiente del Carbonífero Temprano (Sernageomin, 2003). En esta zona, el Basamento Metamórfico presenta un intenso fracturamiento y fallamiento, entre los que también se han reconocido discordancias angulares (Ferraris, 1981). Además, las rocas de esta unidad son afectadas por metamorfismo de contacto relacionado con la intrusi3n del Batolito Costero, el que disminuye según la distancia al cuerpo intrusivo (Asenjo *et al.*, 2018).

El Batolito Costero (Carbonífero) es definido como una gran masa de roca intrusiva formada a partir del enfriamiento del magma, encontrándose expuesto en la superficie producto del levantamiento continental y la posterior erosi3n de macizos rocosos metamórficos y sedimentarios que lo sobreyac an, a lo que también se debe añadir la acci3n provocada por el ser humano realizando cortes de cerros, excavaciones y extracci3n de rocas en canteras (Rodríguez, 2015). La unidad está constituida por granitos, tonalitas, granodioritas y dioritas, (Hervé, 1977). Las rocas aflorantes del Batolito Costero pueden ser encontradas en diversos estados de meteorizaci3n, desde roca sana hasta “maicillo”, un suelo residual areno-arcilloso común y abundante en la zona centro sur de Chile (Rodríguez, 2015). Debido a sus características geomecánicas, es frecuente la ocurrencia de procesos de remoci3n en masa en el maicillo, asociados comúnmente a una sobrecarga arb3rea, saturaci3n del suelo e intervenci3n antr3pica (Sernageomin, 2019).

La Formaci3n Santa Juana (Triásico Superior) fue propuesta por Ferraris (1981) para aquellas rocas sedimentarias (rocas clásticas continentales y en parte marinas) dispuestas a lo largo del río Biobío. Consiste en conglomerados, areniscas, arcosas, lutitas y fangolitas con contenido fosilífero. Esta unidad presenta pliegues relacionados,

principalmente, a la aplicación de esfuerzos a estratos de distinta competencia, en donde los estratos con mayor competencia permanecen frágiles y las capas incompetentes se deforman (Asenjo *et al.*, 2018).

Finalmente, los Depósitos Cuaternarios (Pleistoceno-Holoceno) se emplazan sobre la Formación Santa Juana y corresponden a depósitos de gravas y arenas en niveles de terrazas. Están compuestos por clastos redondeados y subredondeados con promedios entre 8 a 30 cm y fracciones variables de arena y limo, alcanzando espesores máximos de 20 m (Aquaterra, 2011). Por otra parte, Sernageomin (2003) señala que también pueden estar compuestos por depósitos de remoción en masa.

2.5 Efectos de las precipitaciones sobre una cobertura de suelo afectada por incendio forestal

Las precipitaciones regulan el crecimiento de la vegetación, siendo ésta un elemento fundamental para determinar la composición de lluvia efectiva que llega a la superficie debido a su capacidad de intercepción (López-Lambráño *et al.*, 2017). La intercepción puede ser definida como la cantidad de agua que retienen las hojas, ramas, troncos y/o residuos vegetales sobre la superficie del suelo, la cual termina por evaporarse y regresar a la atmósfera, junto con el agua transpirada por las plantas y la evaporada por el suelo (López-Lambráño *et al.*, 2017).

El factor desencadenante de procesos de remoción en masa más común en Chile son las precipitaciones (Arias *et al.*, 2018). Si bien se deben dar condiciones específicas de saturación del suelo para lo anterior, durante intensos periodos de lluvia en poco tiempo o la acumulación debido a precipitaciones continuas aumenta considerablemente la probabilidad de ocurrencia de estos procesos (Basso *et al.*, 2015). Cabe mencionar que estas condiciones específicas son propias de cada sitio, no obstante, Alarcón (1995) señala que un evento de precipitación de 100 mm en tres días puede ser fundamental para desencadenar procesos de remoción en masa en la Provincia de Concepción; Dicho estudio es referido principalmente a remociones en masa relacionadas al maicillo del Batolito Costero (Basso *et al.*, 2015), unidad aflorante en el área de estudio. Por su parte, Pradenas (2014), determinó un umbral máximo de precipitaciones para generar remociones en masa de 100 mm en menos de 72 horas, basándose en datos estadísticos en taludes de las rutas 152 (Autopista del Itata) y 156 (Ruta de la Madera); Además, el mismo autor observa que la acumulación de 50 mm en un mes vuelve susceptible el terreno a estos movimientos.

En su estudio, Marín-Sánchez y Osorio (2017) analizan la influencia de la vegetación en la estabilidad de laderas, denotando como un mecanismo beneficioso la intercepción de la precipitación, pues favorece la evaporación y reduce el agua disponible para la infiltración. Asimismo, el anclaje de las raíces en los estratos más estables proporciona un refuerzo al suelo, aumentando la resistencia del terreno y aportando a la estabilidad (Marín-Sánchez y Osorio, 2017); Sin embargo, en determinados casos, el peso de los árboles favorece la inestabilidad así como también el efecto de las cargas dinámicas transmitidas por el viento desde las ramas hacia las raíces (Marín-Sánchez y Osorio, 2017). Lo anterior puede tener un efecto significativo en suelos meteorizados y/o fracturados, por lo que se hace necesario estudiar la litología del terreno y el tipo de efecto de la vegetación.

La vegetación se ve particularmente amenazada por los incendios forestales, un tipo de perturbación capaz de modificar gravemente las comunidades, ecosistemas y paisajes (Becerra *et al.*, 2022). La desaparición de la vegetación producto de un incendio forestal puede tener consecuencias directas en la estabilidad estructural del suelo, las que dependerán de la intensidad y duración del fuego (Iglesias *et al.*, 1993; Ubeda y Sala, 1996).

Cuando supera los 450 °C, el fuego es capaz de provocar una disminución de los valores de materia orgánica (Martínez *et al.*, 1991), siendo este último un factor estabilizador de la estructura del suelo, puesto que ayuda a mantener unidas las partículas minerales frente a las fuerzas desestabilizadoras como el impacto de la lluvia (Shepherd *et al.*, 2001). Además, el efecto del impacto de las gotas de lluvia se ve incrementado debido a la reducción de la vegetación, provocando un aumento de escorrentía y erosión (Osorio y Rosero, 2013; Ubeda y Sala, 1996).

Con respecto a la influencia en procesos de remoción en masa, Fuenzalida (2015), comparando las condiciones de susceptibilidad del terreno pre y post incendio de Valparaíso de 2014, da cuenta de un aumento en la probabilidad de ocurrencia tanto en deslizamientos como en flujos, siendo el incremento moderadamente mayor en estos últimos, ya que la intensidad del fuego, además de reducir la vegetación, también afecta la permeabilidad del suelo.

Debido a que los valores de umbrales críticos capaces de provocar remociones en masa fueron estimados considerando las condiciones habituales del suelo en la región y sin establecer alguna variación debido a la alteración de algún factor como es el caso de la reducción de vegetación -fundamental en la estabilidad de laderas y en la ocurrencia de estos fenómenos- luego de ser afectada por un incendio forestal, se debe tomar en cuenta que muy probablemente estos umbrales sean considerablemente más bajos, siendo menor la cantidad de precipitación requerida para aumentar la probabilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa.

2.6 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada e Índice de Área Quemada Normalizada

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) es el índice de vegetación más utilizado debido a que se han podido determinar relaciones significativas entre este indicador y aspectos fundamentales de la estructura y funcionalidad de los ecosistemas, como el contenido de biomasa o la cobertura vegetal (Gaitán *et al.*, 2015; Toribio, 2019; Tucker *et al.*, 1985).

El NDVI da cuenta del estado de salud de la vegetación a través de la biomasa fotosintéticamente activa (Toribio, 2019) y su funcionamiento se basa en la comparación de la cantidad de la luz roja visible que absorbe la vegetación y la luz infrarroja que esta misma refleja (Toribio, 2019). Es decir, una mayor absorción de luz roja visible o una mayor reflectancia de la luz infrarroja por parte de la vegetación indicará que la planta es más sana (Toribio, 2019). Lo anterior es muy útil para realizar análisis de monitoreos de la vegetación y la detección inmediata de cambios en la cobertura del suelo o el seguimiento de fenómenos como la sequía, entre otros (Gaitán *et al.*, 2015).

La Plataforma de las Naciones Unidas de información obtenida desde el espacio para la gestión de desastres y respuesta de emergencias (ONU-SPIDER) define el Índice de Área Quemada Normalizada (NBR, por sus siglas en inglés) como un indicador diseñado para resaltar áreas quemadas en extensas zonas de incendio (ONU-SPIDER, 2020). Este índice muestra la severidad del incendio de una manera similar al NDVI, con la diferencia de que el NBR no utiliza la luz roja visible sino la luz infrarroja de onda corta.

La severidad del incendio puede ser descrita como el nivel de afectación y/o alteración que ha provocado la intensidad del fuego en el funcionamiento de un ecosistema; y ésta, por su parte, se define como la energía de materia orgánica liberada durante el proceso de combustión, es decir, mientras el fuego está activo (Keeley, 2009).

2.7 Modelo conceptual

El modelo conceptual de un proceso de remoción en masa corresponde a un análisis descriptivo de una serie de factores, los cuales pueden ser condicionantes o desencadenantes, y que contribuyan al deslizamiento de una ladera o talud generando una situación potencialmente inestable (Arias *et al.*, 2018).

Dentro de esta serie de factores, en este estudio se considerarán los aspectos geológicos para lograr una caracterización adecuada de la litología. La geomorfología proporcionará información relacionada con la topografía del terreno relacionada a las pendientes de los taludes y/o laderas, además de su orientación. El factor meteorológico, referido específicamente a periodos de lluvias torrenciales, actúa como factor detonante y/o precursor de los procesos de remoción en masa debido a que aumentan las fuerzas desestabilizadoras y reducen la resistencia del suelo frente al deslizamiento (Pradenas, 2014). Es necesario mencionar que el análisis de este factor debe ser realizado tomando en cuenta no sólo la intensidad de la precipitación, sino también el volumen y distribución de las precipitaciones con su respectivo régimen climático (González de Vallejo, 2002).

La vegetación es otro factor que se debe analizar, puesto que tiene la capacidad de reducir el agua disponible para la infiltración y los niveles de humedad del suelo mediante el proceso de intercepción. Sin embargo, también puede provocar un efecto negativo a la estabilidad del talud debido al peso que provocan los árboles aumentando las componentes de fuerza normal y paralelos a la ladera, lo que favorece la inestabilidad, así como sucede con las fuerzas dinámicas transmitidas por el viento a través del tronco de los árboles (Marín-Sánchez y Osorio, 2017).

El efecto provocado por la actividad humana modifica la distribución de las fuerzas debido a las sobrecargas estáticas y cargas dinámicas, lo que propicia un escenario de inestabilidad y desequilibrio. Dentro de las principales actividades antrópicas se encuentran las excavaciones, rellenos, el peso de estructuras, la deforestación, los efectos del cambio climático y la vibración provocada por el paso de vehículos pesados (González de Vallejo, 2002).

La caracterización de estos factores en el modelo conceptual permite el desarrollo de un análisis multivariado del peligro, es decir, un análisis discriminante que analice la interacción y dependencia de los factores concurrentes (por ejemplo, pendiente, litología, orientación, cubrimiento vegetal, entre otras variables) en su conjunto, sobre la generación de remociones en masa (Londoño, 2017). Esto permitirá caracterizar apropiadamente no sólo el nivel de peligro, sino también sus causas y su comportamiento esperable en el futuro (Gorsevski, 2000).

2.8 Proceso de Análisis Jerárquico

El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés, *Analytic Hierarchy Process*), propuesto por Saaty (1980; 1990), es un método científico que utiliza el álgebra matricial para establecer prioridades entre los elementos a analizar, y fue diseñado para poder evaluar alternativas cuando se tienen en consideración una variedad de criterios (Osorio y Orejuela, 2008).

El proceso consiste en tres etapas de metodología: (i) modelación, (ii) valoración y (iii) priorización y síntesis. En la primera etapa se debe construir un modelo en el que estén representados todos los aspectos relevantes a considerar (Moreno, 2002); Además, Osorio y Orejuela (2008) señalan que en esta etapa el problema inicial se descompone en subproblemas, y que, al lograr solucionar los subproblemas, se consigue la solución del problema inicial. En la segunda etapa se incorporan, mediante un juicio, las preferencias del autor a través de matrices de comparación, para lo que se establece una escala verbal y numérica que representa las intensidad de los juicios (Tabla 1) (Moreno, 2002); Si bien el autor describe la escala en números impares de 1 a 9, no se excluye la posibilidad de utilizar números pares (Osorio y Orejuela, 2008). La última etapa, a pesar de que las decisiones son analizadas mediante una descomposición jerárquica, se enfoca en el sistema en general, es decir, es un enfoque totalmente sistémico que no pierde de vista el objetivo general, por lo que la solución a presentar es para la totalidad (Osorio y Orejuela, 2008).

Tabla 1. Escala fundamental de intensidad de los juicios (Modificado de Moreno, 2002).

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen de la misma manera al criterio
3	Moderadamente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia favorece a un elemento frente a otro
5	Fuertemente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia favorece fuertemente a un elemento frente a otro
7	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la de otro	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en práctica
9	Importancia extrema de un elemento frente a otro	Un elemento domina a otro con el mayor orden de magnitud posible

Una matriz de comparación corresponde a una matriz cuadrada (de dimensiones $n \times n$) que contiene las comparaciones pareadas de alternativas o criterios (elementos a_{ij}) (Toskano, 2005). Los elementos a_{ij} , en donde $i = 1, 2, \dots, n$, y $j = 1, 2, \dots, n$, expresan la comparación de criterios. En caso de que i sea igual al j , el valor de a_{ij} será 1, debido a que está comparando una alternativa o criterio consigo mismo (Toskano, 2005). El primer paso para poder sintetizar juicios es sumar los valores en cada columna de la matriz de comparación, tal como se aprecia en la Ecuación 2 (Toskano, 2005).

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Y, como se cumple que $a_{ij} = a_{ji} = 1$, se tiene la siguiente matriz normalizada (Ecuación 3), resultado de la división de cada elemento de la matriz entre el total de su columna.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Con la finalidad de calcular la prioridad de cada criterio comparado, se realiza el cálculo del promedio simple de cada fila para obtener los valores y vectores característicos. Este proceso se denomina sintetización y entrega como resultado el vector de prioridades, expresado en la Ecuación 4.

$$P = \begin{pmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ \vdots \\ P'_m \end{pmatrix} \quad (4)$$

Donde m es la cantidad de criterios comparados y P'_i corresponde a la prioridad del criterio i en relación con la meta global (Toskano, 2005).

La calidad de la decisión puede ser evaluada en términos de consistencia del juicio realizado. Si bien alcanzar una consistencia perfecta es poco probable de lograr, se debe lograr un grado de consistencia aceptable para continuar el proceso de decisión, de lo contrario se deben reconsiderar y modificar los juicios realizados acerca de las comparaciones. Para poder cuantificar la consistencia del juicio es necesario calcular la razón de consistencia (RC), la cual se obtiene como resultado del cociente entre el índice de consistencia de A (IC) y el índice de consistencia aleatorio (IA), tal como se muestra en la Ecuación 5.

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (5)$$

Para obtener el índice de consistencia (IC) se utiliza la Ecuación 6.

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (6)$$

Donde $\lambda_{m\acute{a}x}$ corresponde al máximo valor propio, el cual se determina sumando las columnas de la matriz normalizada y multiplicando el vector resultante por el vector de prioridades; mientras que n corresponde al tamaño de la matriz de decisión. En caso de que el índice de consistencia sea igual a cero, la consistencia es completa.

El índice de consistencia aleatorio (IA) depende de la cantidad de criterios que se estén comparando y consiste en un índice de consistencia asociado a una matriz de comparación generada de manera aleatoria. En búsqueda de encontrar los valores que puede tomar el IA, Aguarón *et al.*, (2001) simularon 100.000 matrices de comparación aleatorias y obtuvieron los resultados expuestos en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores del índice de consistencia aleatorio según el número de criterios comparados mediante la simulación de 100.000 matrices (Modificado de Aguarón *et al.*, 2001).

Cantidad de criterios	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de consistencia aleatorio	0,53	0,88	1,12	1,25	1,34	1,40	1,45	1,48

Una vez calculada la razón de consistencia, esta será aceptada siempre y cuando no sea mayor a un 10% o a los valores indicados en la Tabla 3, dependientes del tamaño de la matriz; De lo contrario, se deberá revisar el juicio realizado (Bolloju, 2001).

Tabla 3. Valor límite de la razón de consistencia según el tamaño de la matriz (Modificado de Saaty, 1980).

Tamaño de la matriz	Razón de consistencia (RC)
3	5%
4	9%
5 o más	10%

3. METODOLOGÍA

3.1 Investigación y caracterización del área de estudio

Para el presente estudio, la metodología de investigación utilizada corresponde a la de tipo cualitativa, aunque también se utilizó en parte una metodología de tipo cuantitativo. Con respecto a esta última, se analizaron los resultados obtenidos por distintos actores del mundo científico, basándose en la recopilación de información a partir de tesis, revistas científicas, actas de simposios, congresos, libros y principalmente mapas entre los que destacan el complemento de los estudios geológicos realizados por Ferraris (1981), Sernageomin (2003) y Asenjo *et al.* (2018), el Atlas Agroclimático de Chile (2017), el Índice Normalizado de Vegetación Diferenciada (NDVI, por sus siglas en inglés) y el Índice Normalizado de Área Quemada (NBR, por sus siglas en inglés). Por otra parte, para la obtención de los resultados de este estudio se utilizó una evaluación cualitativa de cada factor analizado al otorgar pesos relativos en base a sus efectos en un proceso de remoción en masa, lo cual, además de estar fundamentado en cada apartado, fue observado mediante salidas a terreno celebradas durante febrero de 2023, pudiendo observar los efectos inmediatos del incendio.

3.2 Modelación mediante *software*

Para la realización del mapa de peligro, se analizaron los factores de geología, orientación de laderas, geomorfología, vegetación, severidad del incendio y precipitaciones en la zona de estudio y la influencia de éstos en un proceso de remoción en masa a través de un modelo conceptual, otorgando un nivel de peligro (muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto) asociado a su peso relativo (1, 2, 3, 4 y 5), tal como se aprecia en la Tabla 4. Luego, mediante el Proceso de Análisis Jerárquico, se estableció la ponderación de cada factor utilizando el programa Microsoft Excel. Una vez realizado lo anterior, cada mapa de los factores mencionados es modelado en el software QGIS Desktop 3.22.12 y posteriormente ponderado a través de la herramienta calculadora ráster.

Tabla 4. Peso Relativo de los factores y nivel de peligro asociado (Elaboración propia, 2023).

Peso Relativo	Nivel de Peligro
1	Muy bajo
2	Bajo
3	Moderado
4	Alto
5	Muy alto

Para la elaboración del mapa de calor, se utilizaron los datos del precenso de 2016 del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), los cuales fueron modelados utilizando la herramienta “estimación de densidad de núcleo” del software QGIS Desktop 3.22.12.

Finalmente, utilizando QGIS, los mapas de peligro y vulnerabilidad son ponderados a través de la herramienta calculadora ráster, dando como resultado el mapa de riesgo de procesos de remoción en masa en la comuna de Santa Juana posterior al incendio forestal.

4. RESULTADOS

4.1 Modelo conceptual

4.1.1 Geología

Santa Juana posee un extenso historial de procesos de remoción en masa registrados y otra parte importante no registrada debido a la difícil geografía de la comuna y realidad territorial. No obstante, según lo comunicado oralmente por el Jefe del Departamento de Gestión del Riesgo de Desastres, la mayoría de los procesos de remoción en masa ocurridos en la comuna corresponden a deslizamientos que se concentran en los sectores de Ruta de la Madera, Camino a Tanahuillín, Tricauco y Curalí, además de flujos de detritos en Purgatorio y sectores aledaños (E. Fonseca, comunicación personal).

Al cruzar lo señalado con la geología de la zona de estudio, se logra dar cuenta que en todas las litologías ocurren procesos de remoción en masa. En el caso de Curalí, se encuentra la intersección de tres litologías: Depósitos Cuaternarios, Formación Santa Juana y Batolito Costero. Según Sernageomin (2003), los Depósitos Cuaternarios están compuestos por depósitos de remoción en masa, entre otros, dando cuenta de que los PRM han sido un importante factor modelador del terreno en la comuna durante el Cuaternario; Estos depósitos se distribuyen en los sectores planos del área de estudio, por lo cual se asume que en su mayoría son depósitos estabilizados, representando un peligro moderado. Por otra parte, la Ruta de la Madera se ve frecuentemente afectada por cortes debido a remociones en masa, lo que encuentra explicación en la litología del suelo, pudiendo encontrarse un fracturado Basamento Metamórfico y una arcillosa Formación Santa Juana. En esta última se produce un aumento de peso debido a la saturación de este tipo de suelo, el que termina por ceder. Esto mismo ocurre en el camino a Tanahuillín y, en parte, en el sector Tricauco; Por ello se cataloga a esta unidad con peligro muy alto. También es posible encontrar Basamento Metamórfico y el inicio de la cordillera de Nahuelbuta, además de intrusiones del Batolito Costero y evidencias de remociones en masa. Finalmente, los flujos de detritos en Purgatorio y sectores aledaños dan señales de un suelo suelto, coincidente con la descripción de un suelo residual (maicillo) producto de la meteorización del Batolito Costero, por lo que a esta unidad se le otorga un peligro muy alto.

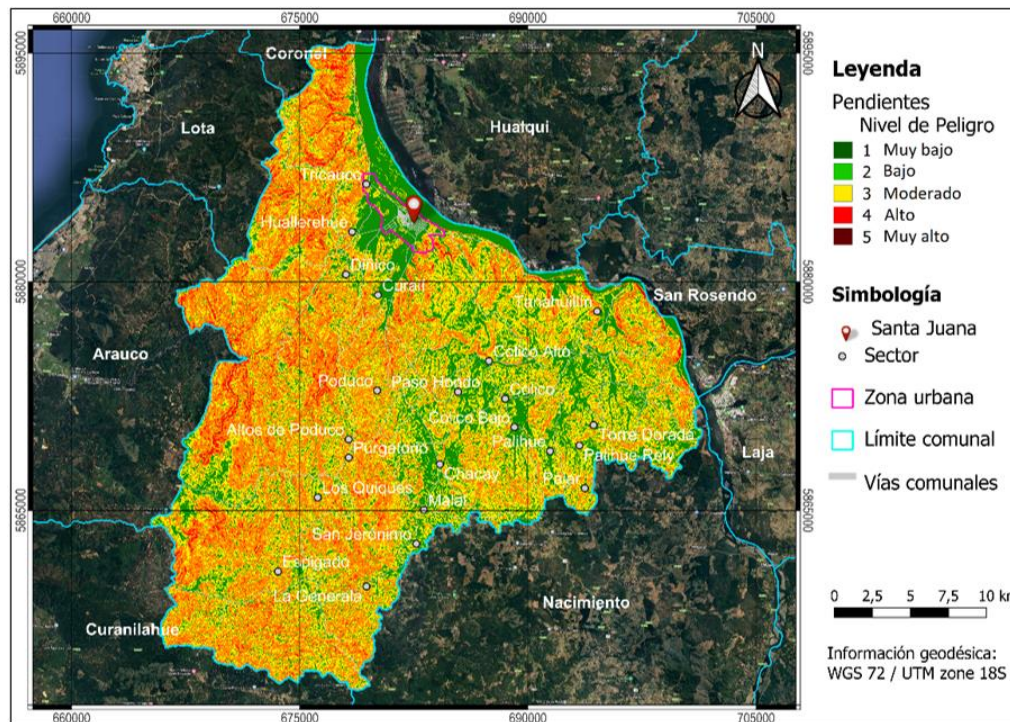
En base a lo expuesto, se proponen los siguientes pesos relativos para las litologías descritas en la Tabla 5.

Tabla 5. Peso relativo para la litología de la zona de estudio (Elaboración propia, 2023)

Geología	Peso Relativo
-	1
-	2
Depósitos Cuaternarios	3
Basamento Metamórfico	4
Formación Santa Juana y Batolito Costero	5

4.1.2 Geomorfología

La geomorfología del área de estudio está marcada por el inicio de las pendientes de la cordillera de Nahuelbuta en la Región del Biobío. Estas pendientes fueron analizadas por Asenjo *et al.*, (2018), en donde estableció un rango porcentual para poder caracterizarlas y determinó que en la zona de estudio dominan las pendientes moderadamente empinadas (entre 12 a 25% \approx 7 a 15°) y empinadas (de 25 a 50% \approx 15 a 27°), También es posible encontrar zonas con pendientes nulas o a nivel (0 a 5% \approx 0 a 3°), otras ligeramente inclinadas (5 a 12% \approx 3 a 7°) e incluso extremadamente empinadas (>70% \approx >35°), lo que puede ser apreciado en la Figura 4.


Figura 4: Mapa de pendientes de Santa Juana (Elaboración propia, 2023).

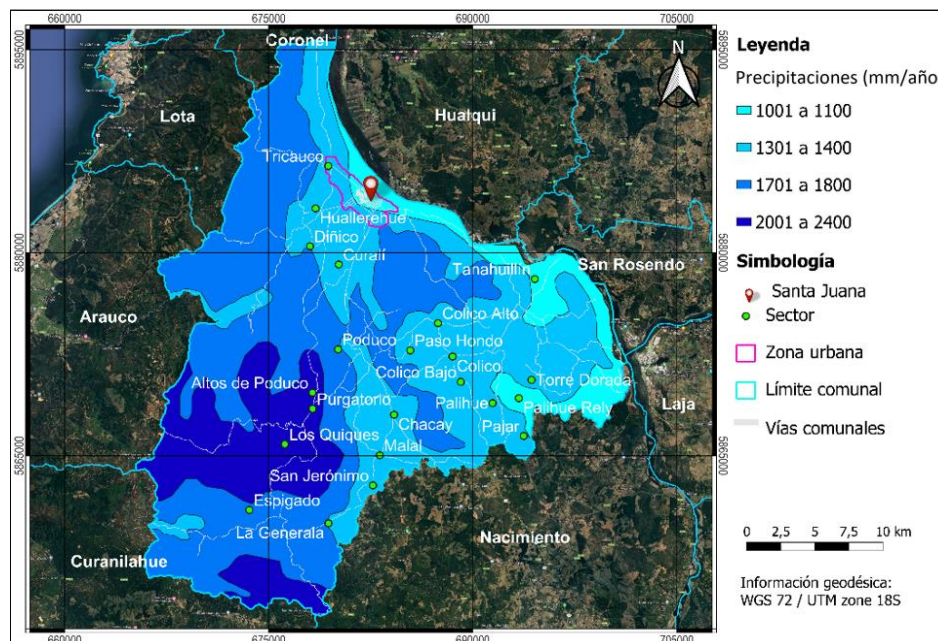
La pendiente influye en gran medida en la ocurrencia de remociones en masa, al ser éstos procesos gravitacionales, dando una relación directamente proporcional entre el grado de la pendiente y la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa, por lo que se proponen los pesos relativos según el ángulo de pendiente de la Tabla 6, en base a la clasificación de Asenjo *et al.*, (2018).

Tabla 6. Peso relativo para el ángulo de pendiente (Elaboración propia, 2023).

Ángulo pendiente	Peso Relativo
0 a 7°	1
8 a 15°	2
16 a 27°	3
28 a 45°	4
>45°	5

4.1.3 Precipitaciones

En Santa Juana la precipitación varía considerablemente según su geografía, pudiendo presentar sectores con 1000 mm de precipitaciones anuales y otros con promedios que sobrepasan los 2000 mm al año, ubicados en la cordillera de Nahuelbuta. Lo anterior da como resultado un promedio de precipitación anual de 1587 mm y promedio de precipitación mensual de 132,3 mm considerando datos de precipitaciones entre 1980 a 2015. La Figura 5 muestra la distribución de la precipitación en Santa Juana (Atlas Agroclimático de Chile (AGRIMED), 2017).


Figura 5: Mapa de precipitación media anual en Santa Juana. (Elaboración propia a partir del Atlas Agroclimático de Chile, 2017).

Según lo señalado por Pradenas (2014), el umbral de precipitaciones para generar remociones en masa en la provincia de Concepción es de 50 mm en un mes. Por lo anterior, se proponen los pesos relativos de la Tabla 7.

Tabla 7. Peso relativo para la cantidad de precipitaciones en la zona de estudio (Elaboración propia, 2023)

Precipitación media mensual	Peso Relativo
0 a 25 mm	1
25 a 50 mm	2
50 a 100 mm	3
100 a 150 mm	4
> 150 mm	5

4.1.4 Orientación laderas

La orientación de las laderas determina la acción de agentes erosivos como el viento y lluvia (los que dificultan el proceso de compactación natural del suelo), y la exposición del suelo a la luz solar, influyente en los procesos de meteorización y presencia de vegetación (Lara y Sepúlveda, 2008; Centro de Ciencias Ambientales EULA, 2009).

Las laderas de Santa Juana (Figura 6) orientadas en dirección noroeste presentan suelos más descubiertos debido a que reciben con mayor intensidad la acción del viento y lluvias; De la misma manera, pero en menor medida, se encuentran laderas con orientación leve hacia el noreste y marcada hacia el suroeste. En las laderas que tienen una definida dirección hacia el noreste y ligera orientación al suroeste, el efecto erosivo del viento y lluvias ya no es tan importante, consolidando más el suelo con presencia de vegetación y comenzando a tomar más fuerza la temprana exposición a la luz solar y los procesos de meteorización. En las laderas orientadas hacia el sureste el efecto erosivo del viento es considerablemente menor y el efecto provocado por la exposición solar es mayor, por lo que es posible encontrar las zonas con mayor densidad de vegetación en la comuna.

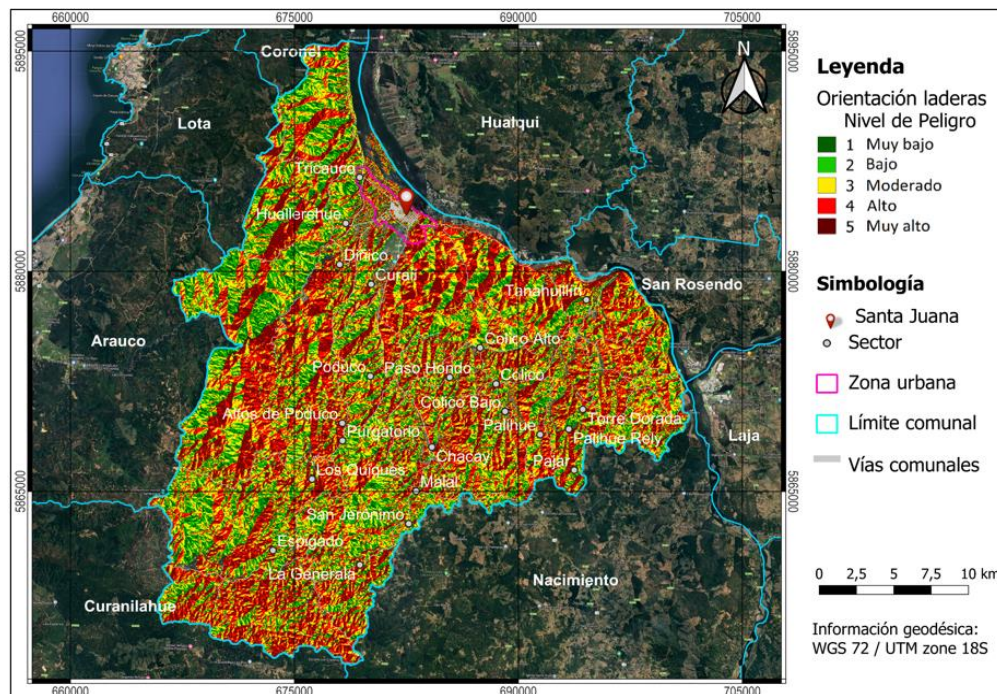


Figura 6: Mapa de orientación de laderas de Santa Juana (Elaboración propia, 2023).

Teniendo en consideración lo señalado anteriormente, se proponen los pesos relativos de la Tabla 8.

Tabla 8. Peso relativo para la orientación de laderas (Elaboración propia, 2023).

Orientación ladera	Peso Relativo
120° a 150°	1
90° a 120° y 150° a 180°	2
45° a 90° y 180° a 225°	3
0° a 45° y 225° a 270°	4
270° a 360°	5

4.1.5 Vegetación

Según el VIII Censo Nacional Agropecuario y Forestal (2022), 37.223 ha de la superficie de Santa Juana estaban cubiertas por plantaciones forestales, correspondientes a un 50,9% de la superficie de la comuna. Por otro lado, 11.070 ha de suelo estaban ocupadas por bosque nativo, es decir, un 15,1% del área total, mientras que la superficie cubierta por praderas y matorrales era de 1.105 ha (1,5%) y 990 ha (1,35%), respectivamente.

Sin embargo, se debe considerar el incendio forestal que afectó aproximadamente el 60% de la superficie comunal, provocando los mayores daños en la zona rural. Esta vegetación cumplía un rol fundamental en la estructura del suelo, generalmente otorgando mayor estabilidad al utilizar sus raíces como una especie de anclaje. No obstante, estas raíces también pueden acentuar la separación de suelos fracturados, lo cual, en el estado actual, requiere un detallado estudio capaz de analizar y determinar el efecto provocado. Por lo anterior, se ha decidido utilizar el NDVI, a fin de estimar la calidad y distribución de la vegetación actual en la comuna, contrastando con lo existente antes al incendio, lo que se presenta en la Figura 7.

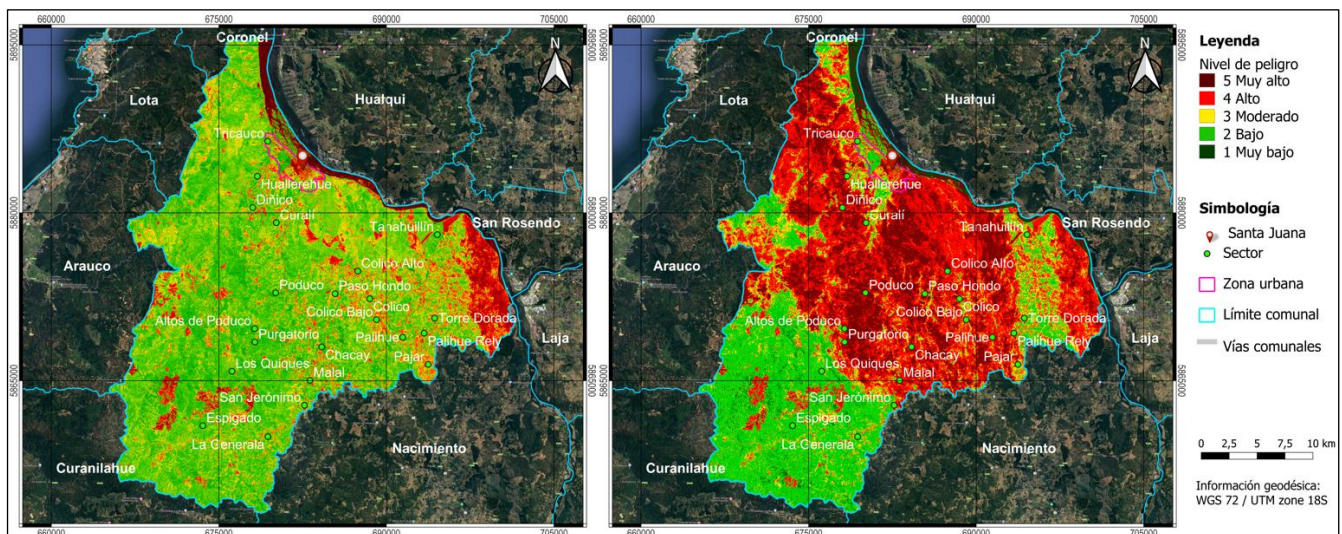


Figura 7: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada anterior (izquierda) y posterior (derecha) al incendio forestal (Elaboración propia, 2023).

Se otorgan los niveles de peligro en base a lo propuesto por Rouse *et al.* (1974), mostrados en la Tabla 9.

Tabla 9. Peso relativo según el NDVI en la zona de estudio (Elaboración propia, 2023)

Vegetación (NDVI)	Peso Relativo
1 a 0,6	1
0,6 a 0,2	2
0,2 a -0,2	3
-0,2 a -0,6	4
-0,6 a -1	5

4.1.6 Severidad del incendio

Debido a la reducción de vegetación que provoca un incendio forestal de esta magnitud, lo que se puede ver gráficamente en el apartado 4.1.5 de vegetación, sumado a su relación con las precipitaciones y procesos de

remoción en masa explicados en el apartado 2.5, se proponen los siguientes pesos relativos en base a lo estipulado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) señalados en la Tabla 10.

Tabla 10. Peso relativo según el NBR en la zona de estudio (Elaboración propia, 2023)

Severidad del incendio (NBR)	Peso Relativo
-500 a -101	1
-250 a 99	2
100 a 269	3
270 a 659	4
660 a 1300	5

4.2 Proceso de análisis jerárquico

Una vez presentado el modelo conceptual, se realiza la matriz de comparación (Tabla 11), la cual contrasta las variables utilizadas en función de su grado de importancia. Es importante destacar que esta matriz tiene una relación de consistencia de aproximadamente un 9%, lo cual cumple con los criterios establecidos.

Tabla 11. Matriz de comparación de factores (Elaboración propia, 2023)

Variable	Precipitación	Pendiente	Severidad del incendio	Vegetación	Litología	Orientación de laderas
Precipitación	1	2	3	3	5	5
Pendiente	0,50	1	5	5	5	5
Severidad del incendio	0,33	0,20	1	2	3	3
Vegetación	0,33	0,20	0,50	1	2	3
Litología	0,20	0,20	0,33	0,33	1	5
Orientación de laderas	0,20	0,20	0,33	0,33	0,20	1

Luego de realizada la matriz de comparación, los resultados expuestos en la Tabla 12 muestran que las precipitaciones son el factor desencadenante más significativo en un proceso de remoción en masa, seguidas por las pronunciadas pendientes que predominan en el área, superando los 27 grados. En tercer lugar, aunque con un peso considerablemente menor en comparación a los anteriores, la severidad del incendio destaca debido a su gran afectación y extensión. De manera similar, la vegetación presenta una importante ponderación. Más adelante, la litología de la zona de estudio ocupa el quinto lugar en términos de ponderación. Por último, la orientación de las laderas del área de estudio es el factor de menor relevancia en comparación con las otras variables.

Tabla 12. Valores propios y peso ponderado de cada factor (Elaboración propia, 2023)

Variable	Valor propio	Valor propio normalizado	Peso ponderado (%)
Precipitación	2,77	0,34	34
Pendiente	2,61	0,32	32
Severidad del incendio	1,03	0,13	13
Vegetación	0,76	0,1	10
Litología	0,57	0,07	7
Orientación	0,31	0,04	4

4.3 Peligro

Luego de realizado el análisis de los factores a través del modelo conceptual y el proceso de análisis jerárquico de la matriz de comparación, los factores son ponderados mediante el *software* QGIS, dando como resultado el mapa de peligro a procesos de remoción en masa en Santa Juana (Figura 8).

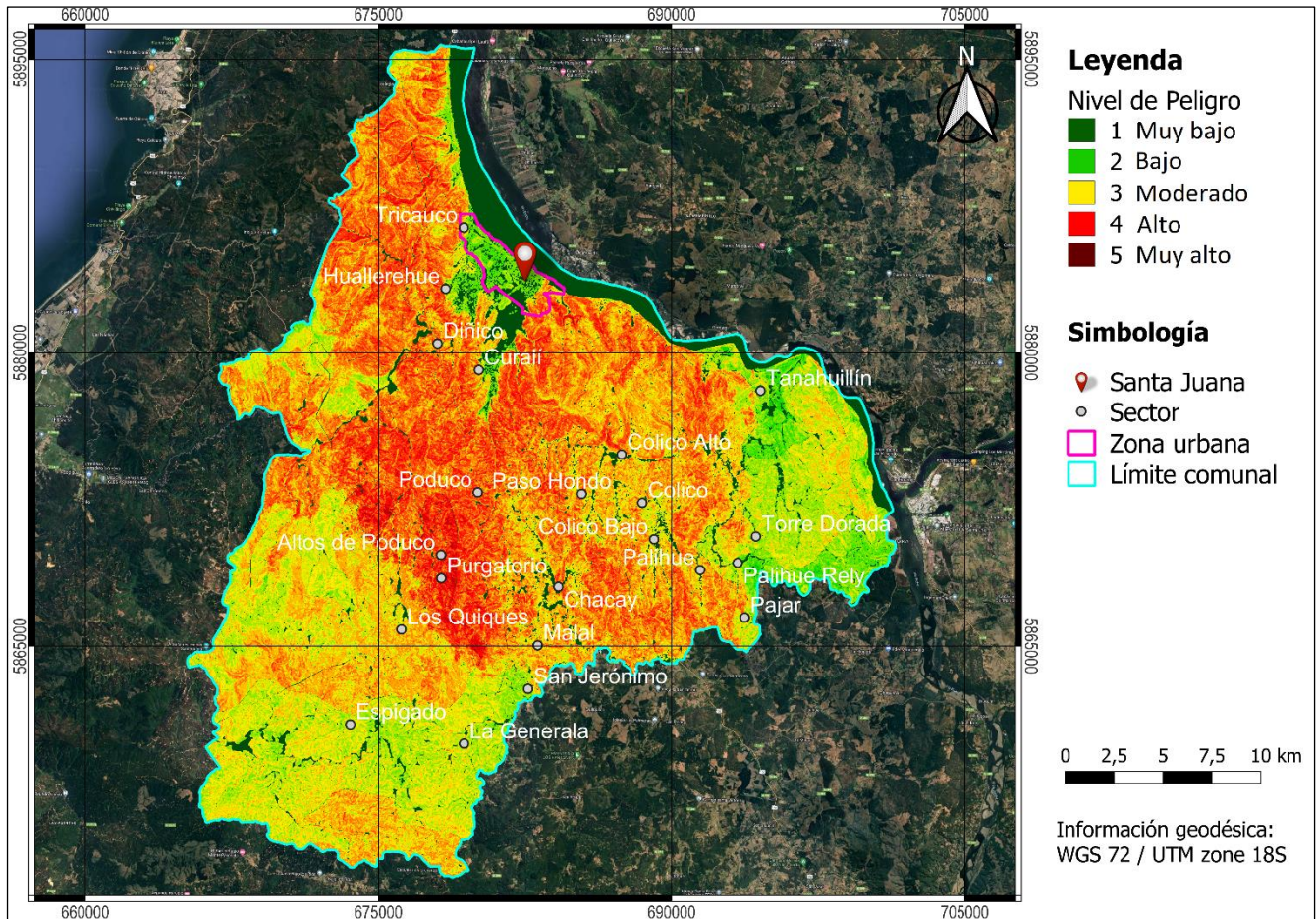


Figura 8: Mapa de peligro a procesos de remoción en masa en Santa Juana (Elaboración propia, 2023).

El mapa muestra niveles de peligro entre muy bajo a alto, siendo fuertemente influenciado por las precipitaciones, pendientes, severidad del incendio y la vegetación. La zona urbana de la comuna presenta un peligro bajo, debido a (entre otros factores) que su ubicación geográfica coincide con la zona menos lluviosa de la comuna (al borde del río Biobío), además de presentar pendientes casi a nivel y de prácticamente no haber sido afectada por el incendio forestal. En contraste, la zona rural ubicada en áreas de mayor pendiente, principalmente debido a la cordillera de Nahuelbuta, en donde también se presenta una mayor cantidad de precipitación, se vio fuertemente afectada por la severidad del incendio, provocando una importante reducción de vegetación y, con esto, una reducción en la estabilidad del suelo, por lo que el peligro resultante es alto. En sectores que no se vieron afectados por el incendio y están ubicados en lugares de pendientes ligera y moderadamente inclinadas, la cantidad de lluvia que cae mensualmente es el factor que más influye en el delicado paso de un peligro bajo a uno moderado, y de uno moderado a uno alto.

4.4 Vulnerabilidad

En la Figura 9 se presenta el mapa de vulnerabilidad, el cual se centra en un análisis exclusivo de la exposición de la población de Santa Juana. Como se mencionó anteriormente, la vulnerabilidad física es la más preponderante, ya que existe una relación directamente proporcional entre el valor del riesgo y el de la exposición a una amenaza.

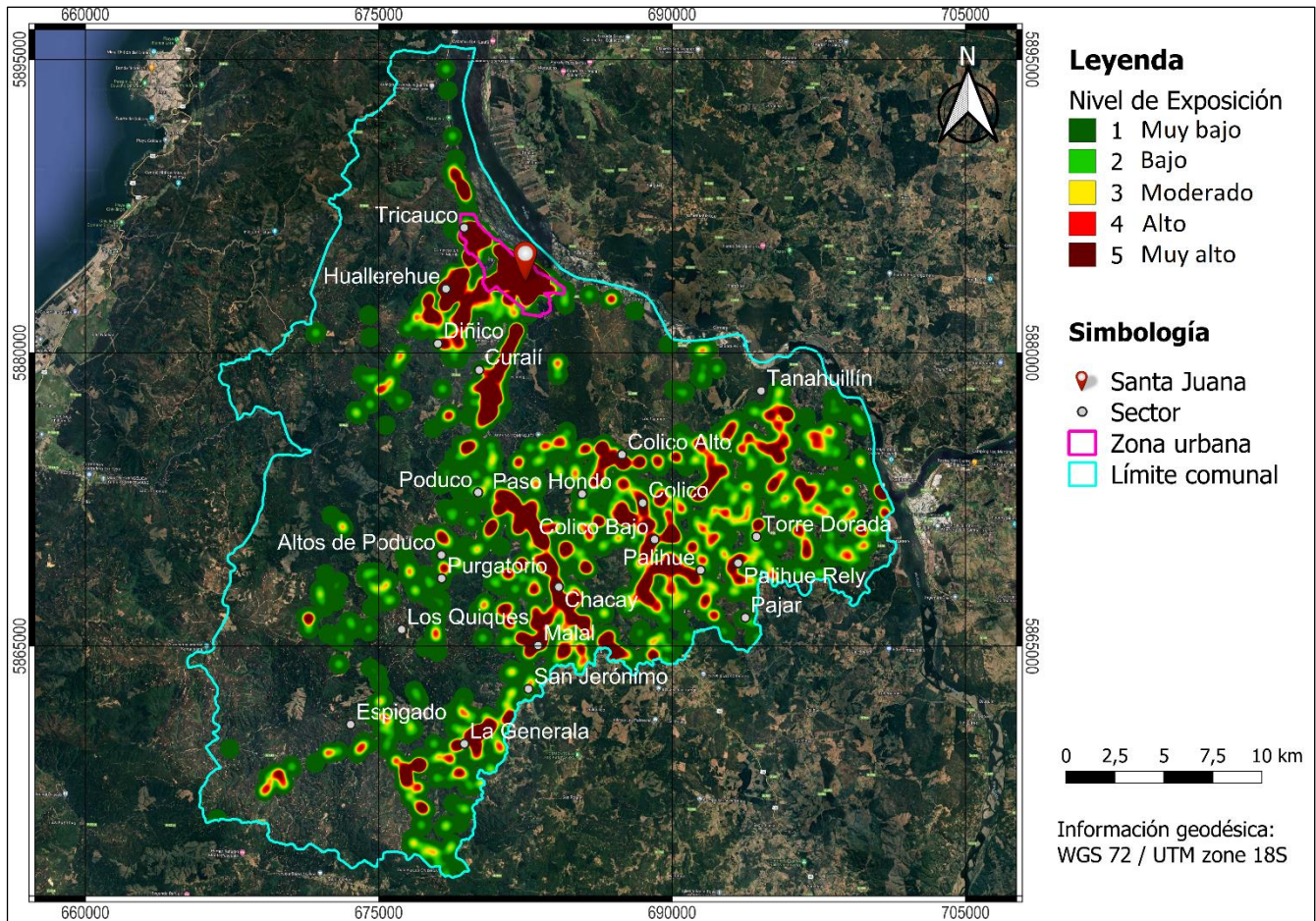


Figura 9: Mapa de exposición de la población en Santa Juana (Elaboración propia, 2023).

El resultado de este mapa muestra sectores con una muy alta vulnerabilidad, señalada con tonalidades rojas principalmente en dos zonas de Santa Juana: La primera corresponde al área urbana de la comuna y en las inmediaciones de esta misma tales como Curalí, Tricauco y Huallerehue, coincidente con lo expuesto por el INE a través del Censo de Población y Vivienda, señalando que el 70% de la población (9.594) de Santa Juana vive en la zona urbana. La segunda zona está centrada en la parte este (noreste, este y sureste) de la comuna, principalmente en los sectores de Chacay, Colico, Palihue, Poduco y Tanahuillín. La zona rural de Santa Juana concentra el 30% de la población total (4.155 habitantes). En los sectores aledaños a la cordillera de Nahuelbuta, coincidentes con las cotas más altas y pendientes más empinadas de la comuna, casi no se presentan viviendas. Finalmente, en la zona sur de Santa Juana la vulnerabilidad predominante varía entre muy baja (color verde oscuro) a baja (color verde), y focalizados sectores con vulnerabilidad moderada (en amarillo) en donde se acumula más población.

4.5 Riesgo

Al ponderar el mapa de peligro a remoción en masa con el de vulnerabilidad (exposición), se obtiene como resultado el mapa de riesgo a procesos de remoción en masa en la comuna de Santa Juana (Figura 10).

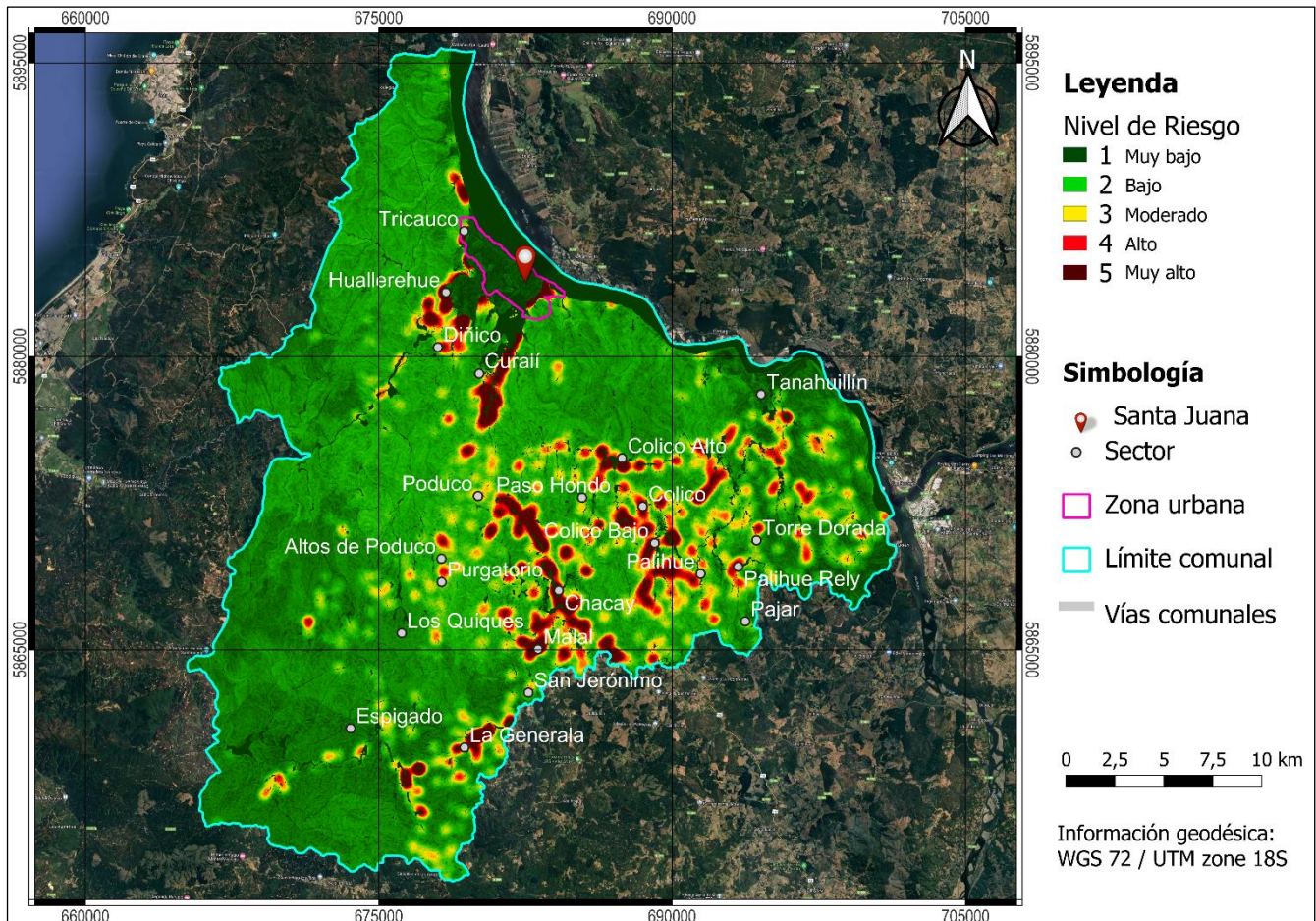


Figura 10: Mapa de riesgo a procesos de remoción en masa en Santa Juana (Elaboración propia, 2023).

El mapa demuestra que el mayor riesgo de sufrir procesos de remoción en masa en la comuna está en los sectores con mayor acumulación de población expuesta al peligro, es decir, en la zona inmediatamente contigua a la urbana, como los sectores Curalí, Diñico, Huallerehue y Tricauco, y en toda la zona rural al centro y sureste de la comuna, en los sectores de Chacay, Colico, Malal y Palihue.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para poder realizar una correcta gestión del riesgo, es necesario conocer los peligros a los que se puede enfrentar la población, siendo uno muy recurrente los procesos de remoción en masa que ocurren año a año con distintos niveles de afectación. Estos movimientos tienen como principal factor desencadenante las precipitaciones, sobre todo en los sectores con mayor altitud en la comuna, cercanos a la cordillera de Nahuelbuta, en donde también se ven muy condicionados por las empinadas pendientes. Otro importante factor que se debe tener en consideración es la severidad del incendio y su gran impacto en la reducción de vegetación, la cual en su mayoría aportaba estabilidad a la estructura del suelo, por lo que su análisis requiere de estudios más detallados y específicos de cada sitio, teniendo en cuenta todos los procesos propios que intervienen en esta relación.

Santa Juana es un claro ejemplo de la dificultad de acceso a la información, debido a que es escasa o inexistente. Para lograr obtener resultados más precisos, es urgente contar con datos acordes a las tecnologías actuales en Chile. La realidad rural ha quedado rezagada en lo que respecta a los avances tecnológicos implementados por instituciones públicas y privadas. En cuanto al riesgo de remoción en masa, en la comuna anualmente ocurren

eventos que afectan directa o indirectamente a las personas. Estos eventos interrumpen accesos, contaminan las fuentes de agua, aíslan durante días a la población y, en el peor de los casos, pueden llegar a costar la vida de las personas. Teniendo en consideración que las precipitaciones son el principal factor desencadenante de estos procesos, es de vital importancia contar con instrumentos que permitan registrar con precisión la cantidad de precipitación caída a nivel mensual, semanal, diario e incluso cada cierta cantidad de horas cuando sea necesario. Además, estos también deben considerar la relación con otros factores como la litología propia de cada sector.

Actualmente, un extenso territorio de Santa Juana posee un alto peligro a sufrir procesos de remoción en masa, tal como se puede apreciar en el mapa de peligro, viéndose amenazados principalmente los sectores aledaños a Diñico, Poduco y Purgatorio, en donde la combinación de los efectos de las precipitaciones, pendientes, severidad del incendio y vegetación presentan características favorables al movimiento. En los sectores de Tanahuillín, Torre Dorada, Espigado y La Generala el peligro varía entre moderado a bajo, puesto que los factores antes mencionados presentan o presentaron un comportamiento que, en mayor o menor medida, promueve la estabilidad. Con respecto a la zona urbana de la comuna, las precipitaciones que ocurren corresponden a las más bajas del área de estudio, las pendientes están a nivel y el incendio prácticamente no afectó, razón por la que el peligro a sufrir procesos de remoción en masa varía entre bajo a muy bajo.

La distribución de la población en Santa Juana se divide principalmente en dos sectores: la zona urbana y el sector este de la comuna. Casi el 70% de la población se localiza en la zona urbana, pero ésta presenta un bajo peligro a remociones en masa, mientras que en la zona oriente de la comuna es posible encontrar asentamientos con distintos niveles de densidad pero con un alto peligro a remociones en masa. Por lo anterior, en esta última zona se presenta una alta exposición a procesos de remoción en masa, específicamente en los sectores de Chacay, Colico y Palihue. En la zona centro sur, la exposición varía de moderada a baja en los sectores Espigado, Los Quiques y Poduco.

El riesgo de sufrir procesos de remoción en masa en Santa Juana obtiene su fundamento al realizar la ponderación entre la probabilidad de sufrir remociones en masa y la exposición de las personas a estos eventos. El mapa de riesgo identifica las áreas de mayor exposición ante estos fenómenos y, en las zonas donde no hay asentamientos humanos, el riesgo se reduce al mínimo. En las primeras, es fundamental implementar medidas que abarquen todas las etapas de la gestión del riesgo y, de esta manera, lograr una efectiva reducción del riesgo de desastres. Dentro de la comuna, los sectores con mayor riesgo se encuentran en los alrededores de la zona urbana, como Curalí, Diñico, Huallerehue y Tricauco, mientras que en la zona rural los sectores con más riesgo se encuentran en Chacay, Colico, Malal y Palihue, por lo que se recomienda realizar estudios específicos en estas zonas, pudiendo establecerse como puntos críticos en base a los factores analizados.

Como se mencionó anteriormente, el riesgo puede ser expresado como la ponderación entre la amenaza y la vulnerabilidad. Por lo tanto, para lograr reducir el valor del riesgo, es necesario reducir al menos uno de estos dos factores. La amenaza siempre estará presente, ya sea un sismo, incendios forestales, inundaciones o remociones en masa; Sin embargo, la vulnerabilidad es un aspecto en el que se puede trabajar para disminuir el riesgo. Para lo anterior, se debe tener claro el objetivo y utilizar una metodología adecuada para comprender las vulnerabilidades de la población, las cuales abarcan aspectos sociales, educativos, económicos y físicos. En relación con esta última, lograr reducir la exposición a un peligro conlleva una disminución inmediata del riesgo, por lo que actividades que pueden ir desde brindar charlas educativas en juntas de vecinos para informar sobre los riesgos a los que están expuestos o declarar zonas de alta pendiente como inhabitables en sus documentos de regulación comunal son ejemplos de acciones que contemplan reducir el riesgo de desastres.

Por último, se recomienda que la Municipalidad implemente diversas estrategias para consolidar estudios de vulnerabilidad, peligro y riesgos naturales, antrópicos y biológicos, con la finalidad mayor de salvaguardar a sus vecinos. Para lograr esto, es importante que las instituciones especializadas en la materia descentralicen sus estudios y se interesen más en la ruralidad de nuestro país, no solo después de ocurrida una catástrofe como el incendio Santa Ana, sino con el propósito de prevenir futuros desastres o catástrofes de esta magnitud.

6. REFERENCIAS

- Alarcón, G. F.** (1995). “Evaluación de los riesgos naturales en el área metropolitana de Concepción, a través de la información de diario El Sur”. Proyecto de título. Universidad de Concepción.
- Aquaterra Ingenieros Ltda.** (2011). "Estudio hidrogeológico cuencas Bío Bío e Itata" (S.I.T N° 258; p. 44). Dirección General de Aguas.
- Arias, C., King, R., & Montenegro, C.** (2018). “Modelo conceptual del movimiento en masa del talud ubicado en PK 28+400, Ruta 160, Comuna de Lota”. Proyecto de habilitación profesional. Universidad Católica de la Santísima Concepción, Facultad de Ingeniería.
- Asenjo, C., Beltrán, J., Hernández, C., & Muñoz, J.** (2018). “Geología de la transecta Isla Santa María- Lota-Santa Juana, Región del BioBío, Chile”. Tesis, Universidad Nacional Andrés Bello.
- Basso, M., Martínez, X., Rodríguez, R., Oróstegui, P., & García, A.** (2015). “Una mirada interdisciplinaria: Proceso de remoción en masa en el cerro La Virgen, Concepción, Chile”. *Congreso Geológico Chileno, 14, La Serena, Chile, 4 - 8 Octubre 2015*.
- Becerra, P. I., Figueroa, C., Meza, A., Becerra, P. I., Figueroa, C., & Meza, A.** (2022). “Dinámica post-incendio de la vegetación en la localidad de Rastrojos, Chile central”. *Gayana. Botánica*, 79(1), 10-26.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.** (2021a). *Relieve Región del Bio Bío*. Bcn.cl. <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region8/relieve.htm>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.** (2021b). *Reporte Comunal Santa Juana 2020*. Bcn.cl. https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2020&idcom=8109
- Bolloju, N.** (2001). “Aggregation of analytic hierarchy process models based on similarities in decision makers’ preferences”. *European Journal of Operational Research*, 128(3), 499-508.
- Cardona, O. D.** (2001). “Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos”. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. En *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*.
- Centro de Ciencias Ambientales EULA – Chile.** (2009). “Elaboración del Expediente Técnico, Plan de Gestión y Administración del Área Marina Costera Protegida Península de Hualpén”. Centro de Ciencias Ambientales EULA – Chile.
- Corporación Nacional Forestal, CONAF.** (2016). “Incendios Forestales en Chile”. <https://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/>
- Corporación Nacional Forestal, CONAF.** (2023). “Incendio Santa Ana”. <https://www.conaf.cl/en-las-botas-del-brigadista-de-santa-ana/1-incendio-de-santa-ana/>

- Cruden, D.** (1991). "A simple definition of a landslide". *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 43.
- Cruden, D., & Fell, R.** (1997). *Landslide Risk Assessment*. Routledge.
- Cruden, D., & Varnes, D.** (1996). "Landslide Types and Processes". *Special Report - Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board*, 247, 36-75.
- Cuesta, J., & Giraldo, I.** (2013). "Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. Estado del arte". *Cuaderno activa*, 5, 59-67.
- DeBano, L. F., Neary, D. G., & Ffolliott, P. F.** (1998). *Fire Effects on Ecosystems*. John Wiley & Sons.
- Fernández, C., & Vega, J.** (2011). "Erosión después de incendios forestales". *Boletín informativo CIDEU*.
- Ferraris, F.** (1981). "Avance Geológico Hoja Los Ángeles-Angol región del Bío-Bío". Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Fonseca, E.** Comunicación personal, 07 de mayo de 2023.
- Fuenzalida, F. A.** (2015). "Susceptibilidad de remociones en masa en cuenca Las Zorras, afectada por catástrofe incendiaria, comuna de Valparaíso, abril 2014". Proyecto de título. Universidad del Bío-Bío.
- Gaitán, J. J., Donaldo Bran, D. E., & Azcona, C.** (2015). "Tendencia del NDVI en el período 2000-2014 como indicador de la degradación de tierras en Argentina: Ventajas y limitaciones". *Agriscientia*, 32(2), 83-93.
- García, V.** (2005). "El riesgo como construcción social y la construcción social de riesgos". *Desacatos*, 19, 11-24.
- González de Vallejo, L. I.** (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.
- Gorsevski, P. V., Gessler, P., & Foltz, R. B.** (2000). "Spatial prediction of landslide hazard using discriminant analysis and GIS". In: *GIS in the Rockies 2000 Conference and Workshop: Applications for the 21st Century, Denver, Colorado, September 25 - 27, 2000*.
- Hernández, D. I., King, R., & Montenegro, J.** (2017). "Aplicación del modelo conceptual para procesos de remoción en masa a un talud de la ruta ch-160, Lota, Región del BioBío". Proyecto de habilitación profesional. Universidad Católica de la Santísima Concepción, Facultad de Ingeniería.
- Hervé, F.** (1977). "Petrology of the crystalline basement of the Nahuelbuta Mountains, southcentral Chile". *Comparative Studies on the Geology of the Circum Pacific Orogenic Belt in Japan and Chile*, 1-51.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L.** (2014). "The Varnes classification of landslide types, an update". *Landslides*, 11(2), 167-194.
- Hyndman, D., & Hyndman, D.** (2010). *Natural Hazards and Disasters*. Cengage Learning.

- Iglesias, M. T. I., Bermejo, M. C. F., & Parra, J. G.** (1993). “Acción del fuego sobre el ecosistema edáfico en un medio forestal”. *Congreso Forestal Español*.
- Keeley, J. E.** (2009). “Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage”. En *International Journal of Wildland Fire* (Vol. 18, Número 1, p. 11).
- Keller, E. A., & Blodgett, R. H.** (2004). *Riesgos naturales: Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes*. Pearson Prentice Hall.
- Lara, M. & Sepúlveda, S.** (2008). “Remociones en Masa. Apuntes del curso”. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 63 pp. Santiago.
- Lépez, L.** (2002). "Análisis Estructural del Triásico de Santa Juana al sur y occidente del Río Bío Bío, VIII Región, Chile". Tesis, Universidad de Concepción.
- Ley 21.364** de 2021. Ley que establece el Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres. 27 de julio de 2021. Diario Oficial de la República de Chile Núm. 43.022.
- Londoño-Linares, J. P.** (2017). “Cálculo de susceptibilidad a deslizamientos mediante análisis discriminante. Aplicación a escala regional”. *DYNA*, 84(201), 278-289.
- López-Lambraño, A., Carrillo-Yee, E., Fuentes, C., López-Ramos, A., & López-Lambraño, M.** (2017). “Una revisión de los métodos para estimar el exponente de Hurst y la dimensión fractal en series de precipitación y temperatura”. *Revista Mexicana de Física*, 63(3), 244-267.
- Mardones, M., & Vidal, C.** (2001). “La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: Un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción”. *EURE (Santiago)*, 27(81), 97-122.
- Marín-Sánchez, R., & Osorio, J.** (2017). “Efectos de la vegetación en la estabilidad de laderas: Una revisión”. *Revista Politécnica*, 13(24), 113-126.
- Martínez, J., De las Heras, J. & Herranz, J.** (1991). "Impacto ecológico de los incendios forestales". Al-Basit: *Revista de estudios albacetenses*, 29, 105-117.
- Moreno, J. M.** (2002). “El Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Fundamentos, Metodología y Aplicaciones”. *Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, 1(Extra 1), 28-77.
- Moreno-Jiménez, J. M., Aguarón, J., & Escobar, M.** (2001). “Metodología científica en valoración y selección ambiental”. *Pesquisa Operacional*, 21.
- Ocola, L.** (2005). “Peligro, vulnerabilidad, riesgo y la posibilidad de desastres sísmicos en el Perú”. *Revista Geofísica*, 61, Article 61.
- Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública, ONEMI.** (2002). *Plan Nacional de Protección Civil*.

- Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública, ONEMI.** (2017). *Plan Nacional de Emergencia*.
- Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública, ONEMI.** (2018). *Plan Nacional Específico de Emergencia por Variable de Riesgo—Remoción en Masa*.
- Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública– ONEMI.** (2021). Glosario – Gestión del Riesgo de Desastres. *ONEMI, Primera Edición*, 90.
- ONU-SPIDER.** (2020). *Índice Normalizado de Área Quemada (NBR)*. <https://un-spider.org/es/node/10959>
- Osorio, J. C., & Orejuela, J. P.** (2008). “El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación”. *Scientia et Technica*, 2(39), Article 39.
- Pausas, J. G.** (2020). *Incendios forestales*. Los Libros De La Catarata.
- Pradenas, M.** (2014). “Umbral empírico de deslizamiento por precipitación, para la Provincia de Concepción”. Proyecto de título. Universidad del Bío-Bío.
- Rodríguez, P.** (2015). “Caracterización geomecánica y mineralógica del Maicillo en la cordillera de Nahuelbuta”. Tesis, Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Rojas Vilches, O., & Martínez Reyes, C.** (2011). “Riesgos naturales: Evolución y modelos conceptuales”. *Revista Universitaria de Geografía*, 20(1), 83-116.
- Rosero, J., & Osorio, I.** (2013). “Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. Estado del arte”. *Cuaderno activa*, 5, 59-67.
- Rouse, J. W., Jr., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W.** (1974). “Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS”. *NASA Special Publication*, 351, 309.
- Rulli, M. C., Offeddu, L., & Santini, M.** (2013). “Modeling post-fire water erosion mitigation strategies”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(6), 2323-2337.
- Saaty, T. L.** (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. New York; London: McGraw-Hill International Book Co.
- Saaty, T. L.** (1990). “How to make a decision: The analytic hierarchy process”. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26.
- Santibáñez Q., F.** (2017). *Atlas agroclimático de Chile. Estado actual y tendencias del clima. Tomo IV: Regiones del Biobío y de La Araucanía*.
- Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN.** (2003). *Mapa Geológico de Chile: Versión digital* (004 ed.). SERNAGEOMIN.

Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN. (2019). “Informe técnico por peligro de remociones en masa, sector Valle La Piedra, comuna de Chiguayante, Región del BioBío” (INF-BIOBÍO.01-2019; p. 13).

Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, SENAPRED. (2023). “Resumen Ejecutivo Regional de Incendio Forestales”. Informe de Incidente o Emergencia N.º 027-DB; p. 10. SENAPRED BIOBÍO.

Shakesby, R., & Doerr, S. (2006). “Wildfire as a hydrological and geomorphological agent”. *Earth-Science Reviews*, 74, 269-307

Shepherd, T. G., Saggarr, S., Ross, C. W., Dando, J. L., & Newman, R. H. (2001). “Tillage-induced changes to soil structure and organic carbon fractions in New Zealand soils”. *Australian Journal of Soil Research*, 39(3), 465-489.

Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo. (2021). “Santa Juana”. Recuperado 28 de mayo de 2023, de <https://www.subdere.gov.cl/divisi%C3%B3n-administrativa-de-chile/gobierno-regional-del-bioB%C3%ADo/provincia-de-concepci%C3%B3n/santa-juana>

Tapia, B., Cáceres, L., & Rojas, C. (2022). “Análisis de los resultados del VIII Censo Agropecuario y Forestal”. Conjunto de datos. <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/articulos/analisis-de-los-resultados-del-viii-censo-agropecuario-y-forestal>

Toribio, G. (2019). “NDVI, ¿qué es y para qué sirve?”. <https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>

Toskano, G. (2005). “El Proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores”. Tesis, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Tucker, C. J., Vanpraet, C. L., Sharman, M. J., & Van Ittersum, G. (1985). “Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the senegalese sahel: 1980–1984”. *Remote Sensing of Environment*, 17(3), 233-249.

Úbeda, X., & Sala, M. (1996). “Cambios en la física del suelo e incremento de la escorrentía y la erosión tras un incendio forestal”. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe: Revista de xeoloxía galega e do hercínico peninsular*, 21, 559-572.

Wilches-Chaux, G. (1989). *Desastres, ecologismo y formación profesional: Herramientas para la crisis*. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA.