

Universidad de Concepción
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía
Departamento de Geografía



**DESARROLLO DE UN INVENTARIO DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA
PARA LA CIUDAD DE PENCO. APORTES PARA CONSTRUIR MAPAS DE
SUSCEPTIBILIDAD FRENTE A FENÓMENOS GEODINÁMICOS.**

Memoria para optar al título de Geógrafa

Tesista:

Roxana Valeska Arévalo Domínguez

Profesora Guía:

Dra. Edilia Jaque Castillo

Concepción, 2023.

ÍNDICE

RESUMEN.....	5
1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. PROBLEMÁTICA.....	7
3. HIPÓTESIS.....	8
4. OBJETIVOS	9
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	9
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
5. MARCO TEÓRICO.....	10
5.1. REMOCIÓN EN MASA.....	10
5.2. FACTORES CONDICIONANTES.....	14
5.3. FACTORES DESENCADENANTES	16
6. REMOCIONES EN MASA EN CHILE	19
7. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD	22
8. METODOLOGÍA	24
8.1. ENFOQUE DEL ESTUDIO	24
8.2. ÁREA DE ESTUDIO.....	24
8.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS.....	26
9. RESULTADOS.....	34
9.1. INVENTARIO DE PROCESOS DE REMOCION EN MASA	34
9.2. ANALISIS DE FACTORES CONDICIONANTES	52
10. ZONIFICACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD FRENTE A PROCESOS DE REMOCION EN MASA.....	63
11. DISCUSIÓN.....	66
12. CONCLUSIONES.....	67
13. REFERENCIAS	69

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Deslizamiento de Tierra en Penco	7
Figura 2. Esquema de remoción en masa	10
Figura 3. Caída o Desprendimiento	11
Figura 4. Volcamiento	12
Figura 5. Deslizamientos	13
Figura 6. Extensiones Laterales.....	13
Figura 7. Flujos.....	13
Figura 8. Representacion del Ciclo Hidrológico	17
Figura 9. Flujo de detrito y barro en la Región de Antofagasta	20
Figura 10. Deslizamiento de tierra en Chiguayante.....	21
Figura 11. Mapa Área de Estudio de la ciudad de Penco.....	25
Figura 12. Esquema Metodológico	33
Figura 13. Mapa de eventos de remoción en masa	35
Figura 14. Mapa de Pendientes.....	52
Figura 15. Mapa de Exposición.....	55
Figura 16. Mapa de Unidades Litológicas	57
Figura 17. Mapa de Unidades Geomorfológicas	59
Figura 18. Superficie usos de suelo en la zona urbana de Penco.....	60
Figura 19. Cartografía de uso de suelo.....	61
Figura 20. Cartografía de Precipitaciones.....	62
Figura 21. Porcentaje de superficie según nivel de susceptibilidad.....	63
Figura 22. Mapa de Susceptibilidad de Remoción en Masa.....	64

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de Remociones en masa	11
Tabla 2. Efectos de la saturación por precipitaciones.....	18
Tabla 3. Reclasificación de Pendiente.....	28
Tabla 4. Reclasificación de Orientación	28
Tabla 5. Reclasificación de Unidades Litológicas.....	29
Tabla 6. Reclasificación de Unidades Geomorfológicas.....	30
Tabla 7. Reclasificación de Uso de Suelo	31

Tabla 8 . Matriz de Factores Ponderados.....	32
Tabla 9. Inventario de procesos de remoción en masa	34
Tabla 10. Distribución de rango de pendientes	53
Tabla 11. Distribución de Orientación.....	54
Tabla 12. Superficie de Unidades Geomorfológicas.....	58

RESUMEN

Se evaluó la susceptibilidad frente a procesos de remoción en masa en la zona urbana de la ciudad de Penco, comuna de Penco, región del Bio Bío, Chile. Se identificaron los procesos de remoción en masa ocurridos en la zona desde el año 2014 hasta el 2022, en la cual se analizaron los factores condicionantes y desencadenantes, para obtener la zonificación de las áreas más susceptibles a estos fenómenos geodinámicos.

Los eventos fueron identificados mediante el trabajo en terreno y recopilación de información en prensa, a través de la georreferenciación se procedió a elaborar un mapa de inventario, donde se localizaron quince procesos de remoción en masa, de los cuales en su totalidad fueron deslizamientos rotacionales y flujos de barro, generando daños a las viviendas y a la infraestructura vial.

Se analizaron los factores condicionantes de pendiente, exposición, unidades litológicas, unidades geomorfológicas, uso de suelo y el factor desencadenante que se tomó en consideración para este trabajo de investigación fueron las precipitaciones, a través de la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), en la cual se determinaron las ponderaciones para cada factor empleando la matriz para la elaboración de la cartografía de susceptibilidad, donde se llevó a cabo la evaluación multicriterio de los factores analizados.

Los resultados indicaron que un 69% de la superficie total estudiada, correspondiente a la zona urbana de la comuna de Penco se encuentra sumamente susceptible bajo el peligro latente de este fenómeno físico denominado proceso de remoción en masa, puesto que si se considera contar las dos mayores categorías que son la media y alta, se puede evidenciar que más de la mitad del territorio posee las condiciones ideales para que exista la ocurrencia de un proceso de remoción en masa.

Palabras Claves: remoción en masa, precipitación, susceptibilidad.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas los procesos de remoción en masa desencadenados por precipitaciones se han ido incrementando a nivel mundial, debido al crecimiento de la población y a las modificaciones antrópicas del medio ambiente (Elmes, 2015). Además, la variabilidad climática y el cambio climático global ha provocado fuertes variaciones en los patrones climáticos actuales, por lo que se han incrementado las catástrofes a nivel mundial, cuyo origen han sido principalmente por eventos hidrometeorológicos (Crozier 2010; Glade & Crozier 2005; IPCC 2007).

Los procesos de remoción en masa representan un problema para la población mundial, debido a que se encuentran ubicados como el quinto desastre natural que provoca más fallecimientos a escala mundial, puesto que se encuentra sobre las erupciones volcánicas y por debajo de los terremotos (Ayala - Carcedo y Olcina, 2002).

Dado el caso de nuestro país, donde los procesos de remoción en masa se dan a conocer como fenómenos comunes, ya que las condiciones geológicas, geomorfológicas y climáticas presentes en el país, originan un territorio propicio para el desenlace de estos eventos (Sepúlveda et al, 2009), por lo que durante décadas han provocado cuantiosos daños y pérdidas de vidas humanas (Hauser, 1985). Estudios realizados por Marín et al, (2018), indican que en los últimos 90 años han ocurrido 52 eventos de remoción en masa en el país, considerando solo los eventos que presentaron víctimas fatales, existiendo un total de 1010 víctimas fatales, donde se han registrado 882 fallecidos y 128 desaparecidos en el periodo de 1928 – 2017, donde los principales mecanismos de activación son los movimientos sísmicos y los eventos de precipitación, siendo estos últimos los más importantes y con mayor frecuencia.

Alarcón (1995), destaca que los procesos de remoción en masa se han ido incrementando en el tiempo, debido principalmente a la expansión de la población hacia los cerros, siendo la zona a estudiar un ejemplo claro de esto, dado que este problema se encuentra presente en la mayor parte de las ciudades chilenas, bajo este contexto Concepción presenta una serie de problemas urbanos producto de la rápida expansión de su área metropolitana (AMC), donde se ve representado la ocupación de sitios de bajo costo y de alto impacto ambiental (Vidal y Romero, 2006), siendo estos efectos los que conllevan a que la zona sur del país sea muy susceptible a sufrir eventos de remociones en masa, debido a que se conjugan los factores necesarios para que se produzcan estos eventos y donde el clima de la zona cuenta con una estación invernal lluviosa, donde las precipitaciones superan los 1000 mm al año, dejando a la Región del Biobío en constante peligro (Garrido, 2014).

Por lo que, en el presente estudio se propone desarrollar un inventario de procesos de remoción en masa (2014 - 2022) y evaluar la susceptibilidad ante estos fenómenos, en la ciudad costera de Penco, que forma parte del Área Metropolitana de Concepción.

2. PROBLEMÁTICA

Según Mardones y Rojas, (2012), en Concepción son recurrentes los procesos de remoción en masa, producto del clima que posee la región del Bio Bío y los factores geomorfológicos que presenta el territorio, de esta manera se identificaron registros de SERNAGEOMIN del 26 y 27 de Junio del 2005, donde ocurrieron procesos de remoción en masa, (deslizamientos, flujos de detritos y barro), en Concepción y en comunas aledañas, dejando a 5 personas fallecidas, 1.514 personas albergadas, 6.902 personas damnificadas, 11.331 viviendas afectadas y 781 viviendas destruidas, además del 9 al 11 de Julio del 2006 se registró deslizamientos, flujos de detritos y de barro en Concepción y comunas aledañas donde resultaron 10 personas fallecidas y cuantiosos daños en viviendas, caminos y vías férreas, durante ese mismo año el 11 y 12 de Agosto se produjeron deslizamientos en Villa Belén, perteneciente a la comuna de Penco, lo cual generó grandes daños a las viviendas, donde se reconoció como detonante principal la intensidad de lluvia y los factores geomorfológicos presentes en el territorio.

Figura 1. Deslizamiento de Tierra en Penco



Fuente: Cabrera M, (2019)

La información obtenida por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) dio a conocer que la comuna de Penco posee una población total de 50.125 habitantes, para el año 2023, en donde se identificó que durante el periodo 2017 al 2023 hubo una variación porcentual de la población de 5,8% para la comuna, por lo que deja en manifiesto que ha ido en constante aumento, producto de este crecimiento se han saturado los buenos sitios de fundación, por lo que la comuna se ha ido expandiendo hacia áreas que presentan cierta susceptibilidad, donde la población se ha ido expandiendo hacia las laderas que conforman los cerros de la comuna aumentando las condiciones de vulnerabilidad de las viviendas e infraestructuras, las cuales no tienen la capacidad para resistir con eficacia los efectos de estos fenómenos (Mardones y Vidal , 2001).

De esta manera nos preguntamos si existe una relación entre el incremento de la ocurrencia de eventos de remoción en masa provocados por precipitaciones en la ciudad de Penco, y con ello reconocer como esto interviene en las formas y procesos de expansión de la ciudad, desde la mirada de la gestión institucional, como agente activo en la conformación de un territorio bajo el peligro latente de remoción en masa.

3. HIPÓTESIS

- a) Las precipitaciones extremas han sido más recurrentes en los últimos años, siendo un factor determinante en la ocurrencia de los eventos de remoción en masa.
- b) La gestión urbana de la ciudad de Penco no ha logrado disminuir la exposición de la población frente a este tipo de fenómenos.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la susceptibilidad ante procesos de remoción en masa, a partir de un catastro de fenómenos de remoción en masa y confección de mapa de susceptibilidad actualizado de estos fenómenos, para la ciudad de Penco.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

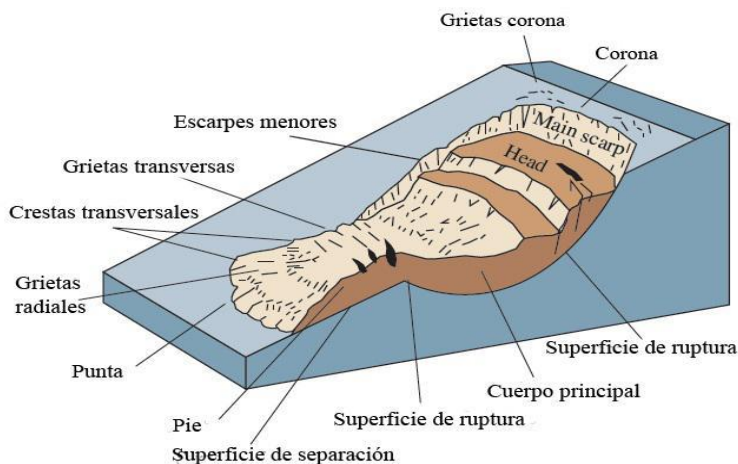
1. Identificar, clasificar y cartografiar los distintos procesos de remoción en masa desencadenados por precipitaciones durante el último tiempo en la ciudad de Penco.
2. Analizar los factores condicionantes de los procesos de remoción en masa asociados a las precipitaciones en la ciudad de Penco.
3. Evaluar y zonificar la susceptibilidad de remoción en masa presente en la zona urbana de la comuna de Penco.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. REMOCIÓN EN MASA

Como señala Young (1972), la mayor parte de la superficie terrestre está formada por laderas (Figura 2) y se identifica como uno de los componentes fundamentales del relieve, por lo que se reconoce que los movimientos de remoción en masa son los fenómenos geomorfológicos más frecuentes y extendidos en el mundo (McGuire et al., 2004). Existen numerosas definiciones de movimiento de remoción en masa, donde se describe como “slope movement” (Varnes, 1978) o “landslide” (Sharpe, 1938), se define como el movimiento de una masa de roca, suelo o derrubios, de una ladera en sentido descendente, su origen se debe a la combinación de variados factores físicos y a las actividades humanas (Cruden, 1991). Por su parte Corominas y Yague, (1997), lo definen como los movimientos del terreno o desplazamientos que afectan a los materiales en laderas o escarpes. Estos desplazamientos se producen hacia el exterior de las laderas y en sentido descendente como consecuencia de la fuerza de la gravedad.

Figura 2. Esquema de remoción en masa



Fuente: Cruden y Varnes (1996)

La clasificación de movimientos de remoción en masa más adecuada es la propuesta por Varnes en 1978, posteriormente revisado por Carrara et. al. en 1985 y por Cruden y Varnes en 1996. Según el enfoque adoptado por el proyecto EPOCH (*The Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community*) (1991-1993), en el que se efectúa la clasificación según el tipo de movimiento de la masa y la naturaleza del material transportado. Los movimientos se han subdividido en seis tipos diferentes (Varnes, 1978).

Tabla 1. Clasificación de Remociones en masa

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

Fuente: Varnes (1978)

5.1.1. Caídas o Desprendimientos

Varnes (1978), define las caídas de rocas como un tipo de movimiento de remoción en masa, donde uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie se genere desplazamiento cortante apreciable, donde el material desprendido se desplaza por caída libre, rebote o rodamiento. De esta forma el material en movimiento adquiere una alta energía cinética, abarcando una amplia franja de depósitos a los pies de la ladera,

También es definido como una masa generalmente de rocas que se desprende de un talud abrupto, mediante una superficie de corte normalmente pequeña (Ayala-Carcedo et al., 1987), en el que el movimiento puede ocurrir por caída libre, rebote o rodamiento, siendo influenciados por la gravedad, meteorización y por la presencia de las intensas precipitaciones.

Figura 3. Caída o Desprendimiento



Fuente: Varnes (1978)

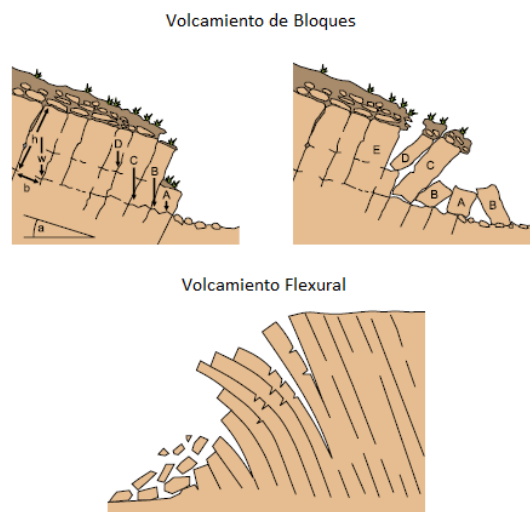
5.1.2. Volcamientos o Topplings

Se define como la rotación de una masa de suelo, detrito o roca, en torno a un eje determinado por su centro de gravedad, el movimiento es hacia adelante o hacia la

parte externa, por lo cual implica un colapso del material, por lo general ocurren en una o más superficies que poseen un sistema de discontinuidades, preferentemente como las diaclasas o grietas de tensión (Alcántara I, 2000).

Goodman & Gray (1976), diferencian dos tipos de volcamientos (Figura 4), identificando los volcamientos de bloques, el que involucra roca relativamente competente en donde el proceso ocurre por pérdida de la estabilidad y rotación de uno o varios bloques, generalmente está asociado a altas velocidades; el volcamiento flexural involucra rocas más frágiles y diaclasas, donde el proceso ocurre por el doblamiento de columnas de rocas delgadas.

Figura 4. Volcamiento



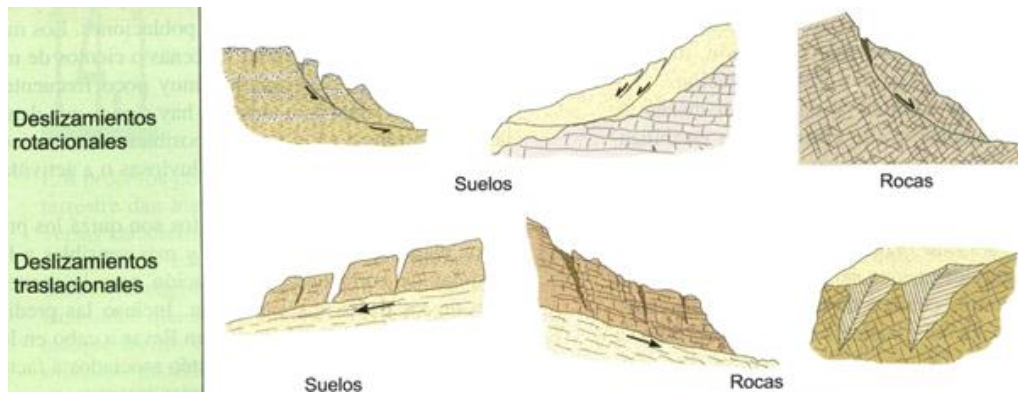
Fuente: Corominas & Yagué (1997)

5.1.3. Deslizamientos

Sepúlveda y Lara, (2008), definen los deslizamientos como un movimiento ladero abajo de masas de suelo o roca, a través de superficies de cizalle definidas, donde el movimiento no ocurre a lo largo de toda la superficie de ruptura, sino más bien comienza en zonas donde se generan fallas locales, las que a menudo son evidenciadas por grietas de tensión en la superficie original a lo largo de la cual se formará el escarpe principal del deslizamiento.

Los deslizamientos se clasifican según la forma de la superficie de falla, por donde se desplaza el material, existiendo dos tipos: los traslacionales son deslizamientos que se generan en una superficie de cizalle aproximadamente plana y los rotacionales son deslizamientos que ocurren a lo largo de superficies curvas y cóncavas (Lara, 2007).

Figura 5. Deslizamientos

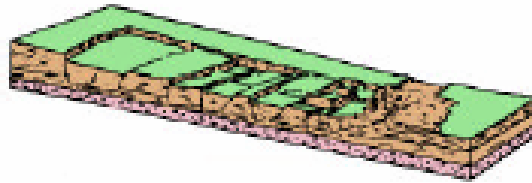


Fuente: Gonzáles de Vallejo, (2002).

5.1.4. Extensiones Laterales

Alcántara I., (2000), define estos movimientos como el resultado de la fracturación y expansión de suelos o masas de roca compactos, debido a la licuefacción o a fluidos del material subyacente, el cual ocurren cuando materiales gruesos están inmersos en una matriz de material más fino o que contiene arcilla, por lo que la superficie de cizallamiento no está bien definida, de esta forma la masa involucrada se mueve rápidamente.

Figura 6. Extensiones Laterales

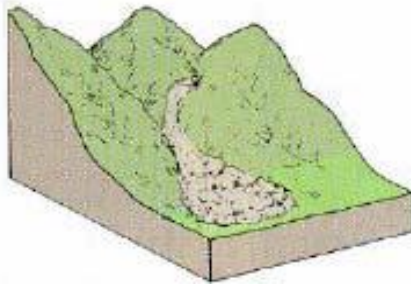


Fuente: Varnes (1978).

5.1.5. Flujos

González de Vallejo et al., (2002) define los flujos como movimientos de masas de suelo, derrubio o bloques rocosos con una abundante presencia de agua, donde la materia que lo conforma está disgregada y se comporta como un fluido, sufriendo deformaciones continuas, sin presentar superficies de rotura definidas. Estos procesos son continuos a la superficie de cizalla, comportándose en un fluido viscoso, impidiendo conservar la forma en su movimiento, adoptando formas lobuladas y desparramándose por la ladera o formando conos de deyección. Afectan principalmente a suelos arcillosos susceptibles que sufren una considerable pérdida de resistencia al ser movilizados.

Figura 7. Flujos



Fuente: Varnes (1978)

Se identificó que se necesita la interacción de factores condicionantes y factores desencadenantes para la materialización de los movimientos en masa.

5.2. FACTORES CONDICIONANTES

Se definen como aquellos factores que generan una condición potencialmente inestable en la ladera, aumentando la susceptibilidad al desprendimiento y desplazamiento de detritos (Lara, 2007). Por lo que puede generar una situación potencialmente peligrosa, de esta forma estos factores son fundamentales debido a que controlan la susceptibilidad de generar un evento.

Por otra parte, la concurrencia de los factores condicionantes facilita los desprendimientos y/o desplazamientos de materiales de las laderas, lo que conlleva a que los factores desencadenantes operen con mayor efectividad.

5.2.1. *Pendiente*

La pendiente se define como el ángulo existente entre el vector normal a la superficie en ese punto y la vertical, mientras aumenta el ángulo de la pendiente también incrementa la tensión del suelo o el material no consolidado (Cardozo, 2013). Este factor es uno de los más importantes e imprescindibles en el estudio de remociones en masa (Corominas, 1997). Las altas pendientes propician la generación de flujos, deslizamientos y derrumbes, por lo que entre mayor es la pendiente, mayor es la capacidad de transporte de energía cinética (Lara, 2007).

5.2.2. *Exposición*

La exposición se define como el ángulo existente entre el vector que señala el norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie de un punto, de esta forma influye en los efectos erosivos y la meteorización del material presente en el terreno, como también en las direcciones de flujos y respuesta a eventos

sísmicos, junto con ello la cantidad de luz solar que otorga a los suelos son un factor preponderante para eventos de remoción en masa (Cuevas, 2012).

5.2.3. Unidades Litológicas

La geología condiciona directamente las propiedades geotécnicas del material y la estructura interna de las laderas, propiedades como el tipo de depósito, el material que lo compone, su densidad, plasticidad, humedad, permeabilidad, litología, estructura y meteorización son parte de los factores de la geología (González de Vallejo, 2002).

El material adquiere relevancia al ser determinante en las propiedades de resistencia del depósito y su estabilidad en laderas, la plasticidad y humedad de un suelo influye directamente en el grado de cohesión. Entre más alta es la cohesión, la presencia de niveles de poco espesor podría generar superficies potenciales de deslizamientos para el material que lo sobreyace, a diferencia de un suelo arenoso, el cual presenta cohesión dependiendo de la humedad, variando sus propiedades de resistencia en función de esta condición (Lara, 2007).

La densidad del suelo es relevante para la determinación de la resistencia al cizalle del material, donde un suelo denso presentará resistencias mayores a las alcanzadas por los suelos sueltos (Lara, 2007).

5.2.4. Unidades Geomorfológicas

La geomorfología analiza las formas de la superficie terrestre, la cual se ha encargado de comprender el estudio sistemático de las formas del relieve, desde el punto de vista de su génesis, como de los procesos y de las formas resultantes (Ortiz, 2013)

Las distintas geoformas como las terrazas, abanicos aluviales, depósitos de remociones antiguos, escarpes de falla, quebradas, entre otras, permite apreciar cómo evoluciona el terreno. En quebradas encajonadas la susceptibilidad es mayor debido a las altas pendientes y la erosión que ha sufrido, como el comportamiento hidrogeológico de la misma, o los depósitos de remociones antiguos, que proporciona una mayor susceptibilidad debido a su poca compactación y cohesión de sus materiales (De Pedraza, 1996).

5.2.5. Uso de Suelo

Se define como la expresión dinámica de las actividades humanas sobre un espacio (Platt, 2004). La intervención antrópica ha ido modificando el estado natural de las laderas, por lo que en la mayoría de los casos toma un papel fundamental para la generación de eventos de remoción en masa. Dentro de este factor se considera la generación de obras de construcción, cortes, terraplenes, plataformas, excavaciones, deforestación, rellenos, acumulación de escombros y urbanización. Estas actividades generan una disminución gradual de la resistencia de los depósitos o macizos rocosos presentes, debido a la modificación de la pendiente de la ladera (Campos, 2014).

5.3 FACTORES DESENCADENANTES

Wieczorek (1996), lo define como factores externos que generan una respuesta, por lo que se generan eventos de remoción en masa, debido al incremento de esfuerzos o a la reducción de la resistencia del material que posee la ladera. Por su parte, González de Vallejo et al., (2002), señala que son factores que modifican la estabilidad del terreno, por lo que gatillan la ocurrencia de eventos de remoción en masa. De esta forma los factores desencadenantes son los encargados de detonar el movimiento de laderas.

Lara (2007), establece que los factores desencadenantes más comunes en los eventos de remoción en masa son principalmente las lluvias de gran intensidad y los sismos. Además, diversos autores establecen que los principales factores desencadenantes son las precipitaciones y la actividad sísmica (Hauser,2000; Blikra et al., 2006; Lacasse et al., 2008; Oppikofer et al., 2009; Sepúlveda et al., 2011; Albornoz ,2017).

5.3.1. *Sismicidad*

Los terremotos son vibraciones de la corteza terrestre, producidas por una rápida liberación de energía, la cual es propagada en forma de ondas desde el origen del terremoto, denominado foco o hipocentro, así la proyección del foco es propagada sobre la superficie de la tierra identificándose el epicentro (Santibáñez, 2006). Las vibraciones que se generan son producidas por la ruptura de rocas que han sido sometidas a esfuerzos, superando los límites de ruptura del material, debido al deslizamiento de la corteza terrestre a lo largo de una falla, donde el movimiento producido es explicado mediante la Teoría de la Tectónica de Placas.

Garrido (2014), señala que el marco geológico estructural del país ha sido producido esencialmente producto de las interacciones de la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana, las que convergen una dentro de la otra, dando origen a eventos telúricos de grandes magnitudes y actividad volcánica, desencadenando en ciertas ocasiones en movimientos gravitacionales.

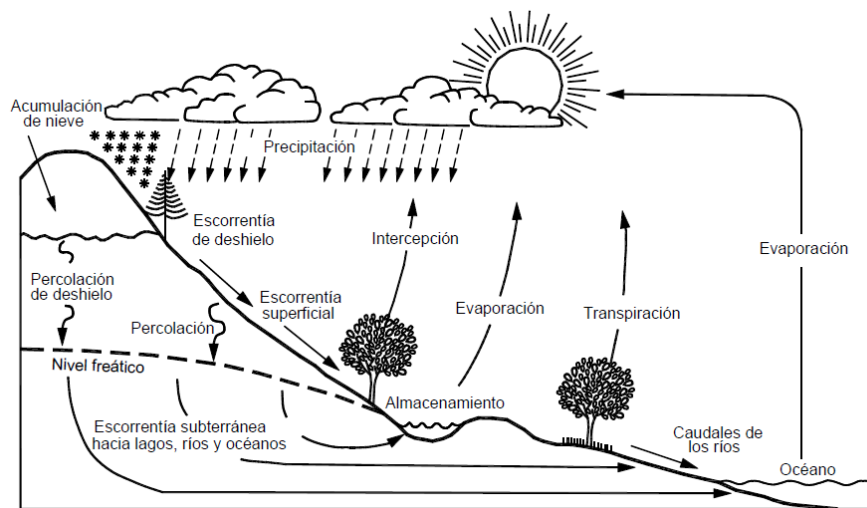
Sepúlveda & Lara (2008), establecen que la actividad sísmica es un factor desencadenante, debido a que las aceleraciones sísmicas generan cambios en las condiciones de esfuerzo interno que poseen las laderas, por lo que aumenta su inestabilidad, provocando eventos de remoción en masa, cabe señalar que la importancia del factor sísmico es relativa en función del contexto morfoestructural.

5.3.2. *Precipitación*

Las precipitaciones son el mecanismo primario de transporte de agua desde la atmosfera hasta la superficie terrestre (Vera & Camilloni, 2006). Donde el vapor de agua almacenado en la atmósfera puede condensarse e incorporarse a la superficie de la tierra, a través del proceso de precipitación pluvial o nival, que posteriormente cae sobre los océanos, ríos, lagos, vegetación, montañas y superficie del suelo. Las precipitaciones

que caen sobre la superficie del suelo pueden escurrir superficialmente hasta incorporarse a los ríos y lagos, y de allí, eventualmente llegar al mar, o bien, quedan almacenadas en las depresiones superficiales del terreno, otra parte de las precipitaciones se infiltra quedando retenida en la zona de las raíces de las plantas o bien percolar e incorporarse a las napas subterráneas o escurrir, a través de las grietas presentes en los estratos profundos de rocas. De esta forma, estas aguas infiltradas pueden a su vez escurrirse e incorporarse a lagos, ríos y océanos. Finalmente, se observan los procesos de evaporación de agua, que son incorporados a la atmosfera, transformándose así el ciclo hidrológico.

Figura 8. Representación del Ciclo Hidrológico



Fuente: Chow et al, (1994)

Las precipitaciones son un factor gatillante para posibles eventos de remoción en masa, estando relacionadas con su intensidad, duración y distribución (González et al., 2002). Algunos autores como Zaruba & Mencl (1982) en Jaque (1995), establecen una relación entre movimientos de laderas y precipitación, siendo aceptado como causante de deslizamientos y cuya magnitud estaría determinada por condiciones climáticas, topográficas, geológicas, edafológicas, etc.

La presencia de precipitaciones de poca intensidad en periodos de tiempo prolongado y precipitaciones de gran intensidad en periodos de tiempo cortos, es posible que desencadenen eventos de remoción en masa, donde el escenario sea favorable para ello. De esta forma las precipitaciones cortas e intensas serían más susceptibles a originar eventos superficiales, en cambio precipitaciones de prolongados periodos de tiempo, provocarían eventos de remoción en masa más profundas (Aleotti 2004; Kim et al., 2004 en Lara 2007). Asimismo, las precipitaciones intensas generan escorrentías superficiales, las que favorecen los procesos de erosión, de esta manera aumenta la probabilidad de ocurrencia de un evento de remoción en masa (Molina, 2016). A continuación, se presentan los efectos de la saturación por precipitaciones establecido

por Prieto (1985), en el que se describen los posibles efectos que provocan las precipitaciones en la inestabilidad de laderas.

Tabla 2. Efectos de la saturación por precipitaciones

Efectos asociados	Consecuencias	Inestabilidades producidas
Lluvias intensas -Infiltración-	Elevación del nivel freático	Deslizamientos (planos) de suelo sobre roca
		Deslizamientos circulares por empuje
	Carga de fisuras	Deslizamiento de taludes en suelo o en roca blanda
		Vuelco de masas rocosas
	Saturación	Movilización de taludes en equilibrio estricto. Reptaciones
		Hundimiento. Desplazamiento de bloques
Inundación de la base del talud	Disminución de resistencia en zonas críticas	Deslizamiento por falta de resistencia
	Efectos de desembalse	Deslizamientos por tracción de pie
	Arrastres superficiales	Flujos sólidos en torrentes
Erosión de laderas	Acumulaciones en pie de conos de deyección	Deflación del cono
	Erosión interna	Hundimientos generalizados
Socavación	Eliminación de zonas resistentes	Deslizamientos progresivos desde el pie
		Vuelco de comisas
Disolución	Creación de cavernas y túneles	Hundimientos en la cima
		Retroceso de cantiles

Fuente: Prieto (1985) en Lara (2007).

Lacasse et al., (2008), señala que el agua es un componente esencial en el desencadenamiento de procesos gravitacionales, esto se debe a la disminución en la cohesión de los materiales y al aumento de la presión al interior de las fallas, de esta manera contribuye al desgaste de material mediante procesos de meteorización mecánica y química. Por lo que, el agua es un importante agente de remoción en masa, fundamentalmente como precipitación, pues al caer sobre terrenos sin vegetación desprende partículas que son arrastradas y depositadas en tierras bajas (CONAMA, 1994). Además, un 56% de los eventos de remociones en masa son causados por lluvias críticas y el 37% por lluvias intensas de corta duración y un 7 % es por eventos extremos (Castellanos, 1996 en Mayorga, 2003).

Hauser (2000), establece que las precipitaciones disminuyen la capacidad de infiltración, saturando parcialmente los materiales, de esta forma aumenta la presión de los poros del suelo, por lo que los vuelve más inestables, es por ello que son reconocidos como una condición importante para que se desencadenen deslizamientos y flujos. Además, en estudios presentados por Mardones (2004) y Peña *et al.*, (1993) consideran que un umbral crítico de 150 mm y 80 mm en 24 hrs respectivamente, genera potenciales

eventos de remoción en masa, donde se considera la intensidad diaria como factor principal.

Por otra parte, Cassale & Margottini (2000), señalan que el régimen pluviométrico alterado por el cambio climático global concentra las lluvias en un período más corto al presentado en años anteriores, lo cual es un factor determinante en el incremento de deslizamientos y otros procesos gravitacionales.

6. REMOCIONES EN MASA EN CHILE

En el territorio chileno se presentan los fenómenos gravitacionales de remoción masa, fundamentalmente asociados a los rasgos geomorfológicos de nuestro país, el cual está compuesto en un 80% por cerros y montañas (Garrido, 2014).

El territorio chileno se ha visto marcado por grandes catástrofes, cuyo origen son eventos o fenómenos naturales extremos de origen geológico e hidrometeorológicos, siendo potenciados por las formas de ocupación y uso del territorio (Camus et al, 2016). Cabe destacar que, dadas las condiciones geológicas, geomorfológicas y climáticas presentes en el país, originan un territorio propicio para el constante peligro de los eventos de remoción en masa (Sepúlveda et al, 2009). En este contexto, el último informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), señala que las ciudades recibirán un mayor impacto, con respecto a desastres naturales, debido a que se presentarán fenómenos extremos, tales como el aumento de precipitaciones extremas e incremento de eventos de remoción en masa abruptos.

Mayorga (2003), señala que en Chile los eventos de remoción en masa son desencadenados en su mayoría por dos procesos, los tectónicos y los eventos pluviales, siendo este último el que se genera con mayor periodo de recurrencia.

Estudios realizados por Marín et al, (2018), indican que en los últimos 90 años han ocurrido 52 eventos de remoción en masa en el país, considerando solo los eventos que presentaron víctimas fatales, existiendo un total de 1010 víctimas fatales provocados por remociones en masa, correspondientes a 882 fallecidos y 128 desaparecidos en el periodo de 1928 - 2017. Además, indica que en el año 1965 se registró mayor cantidad de víctimas fatales por eventos remoción en masa en Chile, correspondiente a 268 fallecidos, luego el año 1991 con 110 fallecidos y finalmente el año 2015 con 94 fallecidos. Por otra parte, el hecho de que ocurran este tipo de eventos trae consigo un impacto socioeconómico a nivel país, debido a los daños materiales causados por el alcance de las remociones en masa. Los resultados obtenidos en el estudio demostraron que el principal factor detonante de las remociones en masa en Chile fue producto de las precipitaciones con un 93%, seguido de los sismos (7%).

Uno de los desastres naturales más violentos que ha experimentado el país, es el que tuvo lugar en la Región de Antofagasta el 18 de Junio de 1991, producto de una serie de intensas precipitaciones entre 17 y 42 mm en un periodo de tres horas, provocando flujos de detritos y de barro voluminoso, con gran poder destructivo de hasta 15 km/hora, en torno a varios sectores de la ciudad de Antofagasta, ocasionando 91 víctimas fatales, 19 cuerpos desaparecidos, 700 viviendas con destrucción total, 4.000 viviendas con daños severos y 20.000 personas damnificadas, con daños materiales totales estimados en US\$ 71.000.000 (SERNAGEOMIN, 2017).

Figura 9. Flujo de detrito y barro en la Región de Antofagasta



Fuente: SERNAGEOMIN, (2015)

Garrido (2014), establece que a medida que se baja en latitud las precipitaciones se vuelven el factor más importante a la hora de desencadenar eventos de remoción en masa, es por ello que la zona sur del país es muy susceptible a sufrir eventos de remoción en masa, debido a que se conjugan cuatro elementos que son detonantes como lo son la topografía, sismicidad, erosión y precipitaciones intensas (Benedictino, 2006).

Como es el caso de la región del Bio Bío, siendo afectada por estos eventos en periodos invernales, como fue el caso del temporal de precipitaciones que afectó los días 26 y 27 de junio de 2005, el que impactó con particular intensidad en la parte occidental de la Provincia de Concepción, en donde diversos sectores se produjeron eventos de remoción en masa, debido a las fuertes precipitaciones, correspondientes a un peak de 162,4 mm, teniendo grandes consecuencias en la población, donde hubo 5 personas fallecidas, 1.514 albergadas, 6.902 damnificadas, 758 viviendas destruidas, 781 viviendas con daños mayores y 9.792 viviendas con daños menores (SERNAGEOMIN, 2017). Además, la región ha presentado destacados eventos señalados por Naranjo et al, (2006), como los ocurridos en noviembre de 1986 (161,0 mm, máxima histórica previa de la estación Carriel Sur), en julio de 1988 (124,4 mm), mayo de 1992 (104,4 mm), abril de 1997 (148,7 mm) y el evento del 9 al 11 de julio del 2006, en el que se presentaron

deslizamientos, flujo de detritos y de barro en toda la Provincia de Concepción, producto de las altas precipitaciones, superiores a 140 mm en tres días, resultando 10 víctimas fatales y cuantiosos daños en viviendas, caminos y vías férreas (SERNAGEOMIN, 2017), donde todos estos eventos de remoción en masa han generado grandes impactos en la población, debido a que los buenos sitios de fundación han sido tempranamente saturados, por lo que la expansión de la población de la clase social más baja, se ha ido estableciendo en sectores poco aptos para ser habitados, siendo expuestos a fuertes índices de equipamientos e infraestructura, de esta forma, todas estas variables contribuyen al aumento de la vulnerabilidad de la población frente a este tipo de amenaza natural (Mardones et al 2004).

Figura 10. Deslizamiento de tierra en Chiguayante



Fuente: Diario Concepción, (2019)

Yacoob (1985), señalaba que la descontrolada expansión de la superficie física de las ciudades, a través de áreas residenciales en lugares no adecuados lleva consigo a una pérdida de la superficie terrestre y a la transformación del paisaje natural; esto se puede observar también en las ciudades que componen el Área Metropolitana de Concepción, donde la interacción entre componentes naturales y sociales se ha convertido en un escenario de situaciones de riesgo y vulnerabilidad social.

Como señala Romero (1985), el principal factor de la susceptibilidad de remoción en masa, son los climas mediterráneos, donde las precipitaciones estacionales funcionan como factor principal que detona los procesos de remoción en masa (Mardones, 2010). De esta forma, la principal problemática que se presenta son las intensas precipitaciones invernales, siendo eventos hidrometeorológicos de gran intensidad y baja frecuencia temporal, por lo que tiene una distribución irregular. De hecho, Mardones (2004), ha propuesto como un umbral de precipitación cercano a los 150 mm en 24 horas, seguidas de varios días de intensas lluvias, desencadenarían procesos de remoción en masa, para el Área Metropolitana de Concepción

7. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD

La susceptibilidad es la evaluación cualitativa o cuantitativa de la clasificación, área y distribución espacial de los procesos que existen o que potencialmente puedan ocurrir en un área determinada (Fell et al., 2008; Cascini, 2008). Dada la definición descrita anterior, proviene de un intento por identificar donde pueden ocurrir estos procesos y el poder esclarecer un conjunto de factores naturales que son relevantes para la inestabilidad de laderas (Carrara et al., 1991; Guzzetti et al., 1999).

Por otra parte, la susceptibilidad se define como la posibilidad que una zona se vea afectada por un determinado proceso, el cual es expresado en grados cualitativos y relativos, en donde dependerá de los factores que condicionan la ocurrencia de los procesos, que pueden ser intrínsecos o externos (González de Vallejo, 2002). De acuerdo con Tarolli et al., (2011), la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra es descrita como la propensión de un área para generar eventos de remoción en masa, dado por un conjunto de condiciones geo-ambientales.

Durante las últimas décadas muchos investigadores han intentado evaluar la susceptibilidad, a través de mapas que retraten la distribución espacial de las zonas susceptibles a este tipo de procesos (Guzzetti et al., 1999; Süzen & Doyuran, 2004; Brenning, 2005; Goetz et al., 2015). Las técnicas y métodos empleados se han orientado a identificar las áreas que son susceptibles a futuros procesos, basándose en el conocimiento de eventos pasados y atributos locales del terreno que están directa o indirectamente relacionados con la inestabilidad de laderas (Fell et al., 2008; Cascini, 2008).

6.1.1. Métodos de Evaluación de Susceptibilidad

Existen dos métodos para evaluar la susceptibilidad, siendo el método cualitativo y método cuantitativo (Yalcin et al; 2011). El método cualitativo retrata los grados de susceptibilidad en términos descriptivos, donde se destaca el enfoque heurístico, basándose en el conocimiento previo de los factores que condicionan la inestabilidad de laderas (Guzzetti et al, 1999; Aleotti & Chowdhury, 1999). La que es definida, mediante una evaluación exhaustiva de un experto combinada al trabajo de campo, evaluando el comportamiento geomorfológico que dan origen a estos procesos e identificando los factores que condicionan a la inestabilidad de laderas, estableciendo la importancia de cada factor en el desarrollo de estos fenómenos gravitacionales (Kavzoglu et al, 2014). Para la evaluación de este método recientemente se ha empleado el uso y la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), el cual tiene la capacidad de combinar distintas funciones que permiten modelar la susceptibilidad bajo la perspectiva de los factores a analizar, esto se debe a que se integra la opinión del experto con el Método de Evaluación Multicriterio, donde se le asigna una ponderación a los diferentes factores condicionantes, para ello el enfoque más utilizado que permite determinar las

ponderaciones es el Analytical Hierarchy Process (AHP), el cual determinar una ponderación a cada factor, analizando su importancia relativa (Saaty, 1977 en Gómez & Barredo, 2005). También se puede utilizar el método Weighted Linear Combination (WLC), el cual produce mapas de susceptibilidad, donde cada factor ponderado determina el grado de susceptibilidad espacial que posee un lugar determinado (Ahmed, 2015).

Por otra parte, se encuentra el método cuantitativo, el cual establece una relación numérica entre los factores que condicionan la inestabilidad y el registro de procesos antiguos y actuales. En el último tiempo, se han propuestos diferentes métodos para modelar la susceptibilidad, destacando los métodos estadísticos y los métodos ingenieriles con enfoques geotécnicos (Aleotti & Chowdhury, 1999). El primer método, analiza la relación entre procesos de remoción en masa y los factores condicionantes, mediante la aplicación de modelos bivariados y multivariados (Nandi & Shakoor, 2009). El segundo método, posee un enfoque determinístico, el cual analiza mediante métodos geotécnicos y matemáticos los factores que determinan la inestabilidad de laderas (Yalcin et al., 2011). Dentro de los métodos de predicción espacial más utilizados destacan el método estadístico bivariado y multivariado, siendo uno de los procedimientos con mejores resultados (Vorpahl et al., 2012).

La susceptibilidad se puede estimar considerando el inventario de los fenómenos registrados y la superposición de los factores que los condicionan, mediante una sumatoria de factores que favorezcan la generación de los eventos (González de Vallejo, 2002).

- Zonas de susceptibilidad alta: aquellas zonas donde la posibilidad de ocurrencia de eventos es máxima y donde ya han ocurrido eventos anteriores, además de tener las condiciones necesarias para que se presente el suceso.
- Zonas de susceptibilidad media: sectores donde existen condiciones para que se presenten los eventos, pero cuya posibilidad es menor por las características del terreno.
- Zonas de susceptibilidad baja: sectores que solo serían afectadas en eventos de gran magnitud y poca frecuencia, con pendientes casi nulas y rocas sin fracturar.

8. METODOLOGÍA

8.1. ENFOQUE DEL ESTUDIO

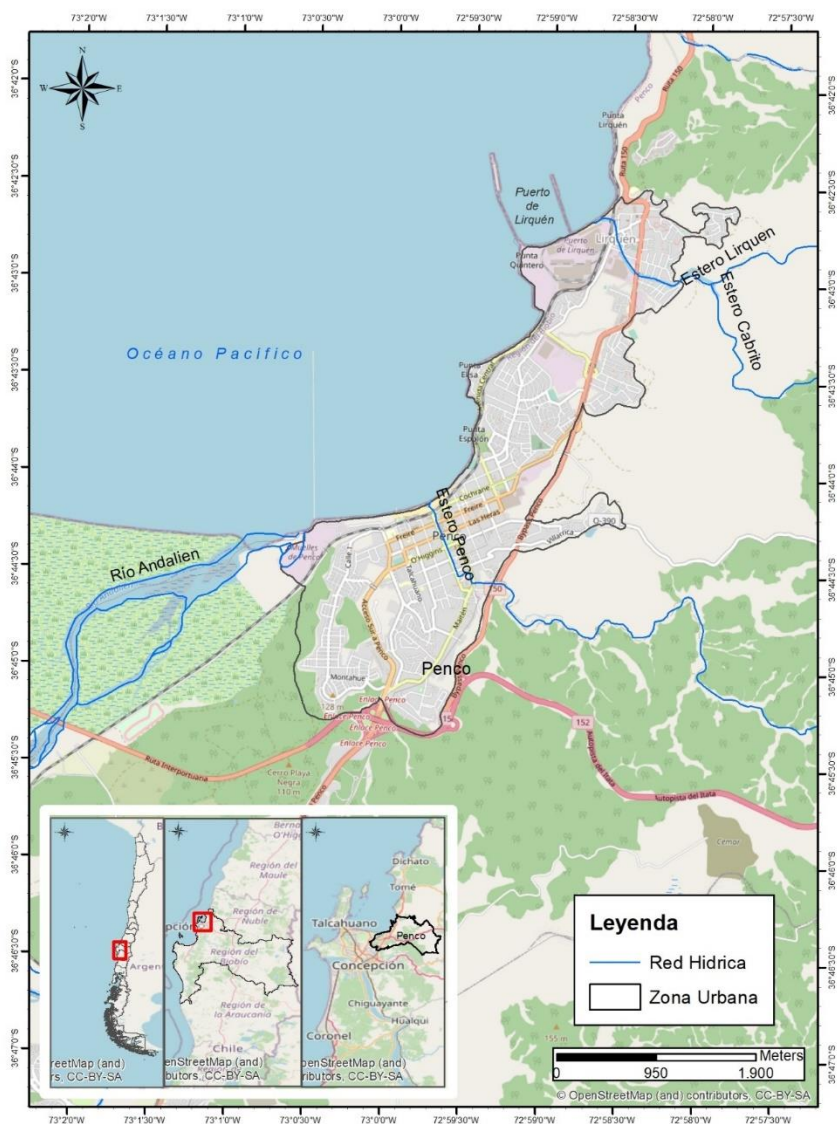
Se usara un enfoque cuantitativo toda vez que la zonificación de la susceptibilidad ante procesos de remoción en masa, requiere de datos de campo espacializados a partir de cartografías, que serán elaboradas mediante procesos de Evaluación Espacial Multicriterio (EEM), como método de operaciones espaciales que analiza todas las variables que intervienen y orientan en los procesos de toma de decisiones, mediante la descripción, ordenación, jerarquización y selección de las variables a considerar en esta investigación, para de esta forma ser integrado a una base de datos cartográficos en un Sistema de Información Geográfica (SIG), los que serán manejados por el programa Arcgis 10.5, desde la geografía aplicada proponemos trabajar en un territorio específico de la zona urbana de la comuna de Penco.

8.2. ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Penco se ubica en el borde costero de la VIII Región, en la Provincia de Concepción, se emplaza geográficamente a una latitud sur de 36° 44' y a una longitud oeste de 72° 59', distante de la capital regional por 12 Km, esta se extiende en una superficie de 107,6 km² y la cual posee una población de 50.125 habitantes (INE, 2023) y se determinó un crecimiento poblacional de un 5,8% (INE, 2023). Es una de las treinta tres comunas que integra la Región del Biobío, la cual limita al norte con la comuna de Tomé y el Océano Pacífico, al oeste con las comunas de Hualpén y Talcahuano, al sur con la comuna de Concepción y al este con la Comuna de la Florida.

Las características geológicas que se presenta son en primera instancia los depósitos fluviales ubicados en el borde costero, estos corresponden a depósitos no consolidados, siendo arenas y cuarzo feldespáticas transportadas por el Rio Andalién. Luego se encuentran los depósitos litorales siendo ubicados en el área urbana de Penco, los cuales son depósitos de playa acumulados en litorales paralelos a la línea de la costa (Ramírez y otros, 2012), estos depósitos comprenden sedimentos arenosos negros y claros. También posee rocas estratificadas de la Formación Cosmito, representando una secuencia sedimentaria marina-continental, descritas como un conjunto de capas inclinadas de lutitas, areniscas, conglomerados y mantos de carbón (Galli, 1967). Hacia el este de la comuna, se encuentran rocas intrusivas del Batolito Costero del Sur, las cuales corresponden un conjunto de cuerpos plutónicos que afloran en la cordillera de la costa, las que incluyen tonalitas y granodioritas de biotita y en menor concentración granitos y dioritas (Creixell, 2001).

Figura 11. Mapa Área de Estudio de la ciudad de Penco



Fuente: Elaboración propia

Dentro de su geomorfología, destaca la presencia de dos macroformas del relieve chileno, en donde se encuentra la planicie litoral, determinada como una faja costera constituida por planicies de abrasión, que fueron moldeadas por la abrasión destructora del mar sobre las rocas y la sedimentación marina o fluvio-marina, siendo formada por efectos de depósito de material de origen tectónico, extendiéndose hasta la desembocadura del rio Andalién y la cordillera de la costa, siendo principalmente cordones montañosos que se encuentra fuertemente meteorizada, presentando alturas máximas de hasta 200 metros.

La comuna presenta el estero Penco que se encuentra en la zona centro urbano de la comuna, el cual posee una longitud aproximada de 6 km y el estero Lirquén que posee una longitud aproximada de 4km, con una altura de 15 metros, ambos esteros han permitido evitar inundaciones en periodo invernal. Además, se presenta el río Andalién, siendo un sistema fluvial de gran importancia para la zona, que nace en la Cordillera de la Costa, por lo que desemboca en playa Negra, la cual pertenece a la comuna de Penco.

La vegetación predominante en la comuna se debe a plantaciones forestales privadas de pino y eucalipto, cuya biomasa existente es destinada a la producción de madera y celulosa. Además, se presentan el bosque nativo y el matorral arbustivo, pero en menor proporción.

Dada su localización geográfica, la comuna presenta un clima mediterráneo y templado húmedo que predomina hacia el sur, por lo que identifica una estación húmeda promedio de 8 meses de duración y una estación seca promedio de 5 meses, teniendo la influencia de la cordillera de la costa, que actúa como barrera climática en la repartición de las temperaturas y precipitaciones, por lo que las precipitaciones en promedio llegan a los 1.250 mm.

8.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS

Para la obtención de los resultados, se planteó un esquema metodológico de tres etapas (Figura 12), el cual inicio con una investigación en terreno, donde se identificó y georreferenciaron eventos de remoción en masa, para de esta forma crear un inventario de estos procesos, el que será representado en una cartografía. En segunda instancia se desarrolló un análisis de los factores que condicionan los procesos de remoción en masa en relación con el objetivo planteado en el trabajo de investigación, siendo consideradas las unidades litológicas, las pendientes del terreno, la orientación, las unidades geomorfológicas y el uso de suelo, los cuales fueron identificados mediante fotointerpretación, recopilación bibliográfica y trabajo de gabinete, estos datos fueron trabajados en distintos programas y se representaron en cartografías de cada factor. La última etapa consistió en la zonificación de la susceptibilidad donde los factores condicionantes fueron ponderados según el grado de importancia para crear el algebra de mapas.

El análisis de los factores condicionantes se trabajó en Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales son un conjunto de hardware y software organizados para capturar, almacenar, consultar, analizar y presentar todo tipo de información que pueda tener una referencia geográfica. Estos softwares trabajan con dos formatos de almacenamiento de datos, vectorial y ráster, en donde el primero representa la información discreta de la realidad, generando una expresión espacial definida, a través de puntos y polígonos, en cambio el formato ráster representa la realidad de forma continua, sin poseer una expresión espacial claramente definida, ya que trabaja con

celdas con valores. De esta forma, las metodologías utilizadas para el estudio de susceptibilidad a procesos de remoción en masa han sido ampliamente beneficiosos, logrando buenos resultados en la zonificación de amenazas, vulnerabilidad y riesgos (Garrido B, 2014).

8.3.1. Inventario de Remociones en Masa

El inventario de procesos de remoción en masa se realizó, mediante previa investigación con imágenes de Google Earth Pro y recopilación de información en prensa. Luego, se llevó a cabo una visita a terreno el día 4 de febrero del año 2022, en donde se registró la posición de cada evento ocurrido en la zona urbana de la ciudad de Penco. Posteriormente, los datos fueron recopilados y tabulados, mediante GPS, como se muestra en la tabla, con información de su localización general, localización geográfica con proyección UTM, el tipo de remoción en masa descritos anteriormente por Cruden y Varnes (1996) y el estado de actividad de cada evento (activo, reactivo o inactivo).

La elaboración del mapa de inventario se obtuvo, mediante el proceso de extracción de datos del GPS al programa Arcgis 10.5, en el cual se superpone la imagen aérea georreferenciada y los puntos localizados de la zona estudiada, para luego crear el mapa donde se concentran los eventos de remoción en masa, de esta forma se obtiene una distribución espacial de los eventos, en el que se ven las zonas potencialmente peligrosas a investigar. Cabe señalar que el inventario realizado se hizo en función de cumplir los objetivos de este trabajo de investigación, por lo que todos los eventos identificados fueron originados por las precipitaciones.

8.3.2. Variables

Los factores condicionantes que fueron analizados en esta investigación corresponden a la pendiente, exposición, unidades litológicas, geomorfología y uso de suelo. Donde se llevaron a cabo dos etapas para el análisis de los factores, en primera instancia se recopiló la información de cada uno de ellos, la cual fue extraída de imágenes aéreas, en donde se utilizó el software ArcGis 10.5, en segunda instancia se realizó una reclasificación de los valores, la cual se ponderó dependiendo de la importancia de cada factor para la ocurrencia de procesos de remoción en masa.

- Pendiente

Los datos de pendientes se trabajaron en base a un Modelo de Elevación Digital (DEM), generado en el software Arcgis 10.5, el cual fue extraído de Jaque E. (2020) y se obtuvo en base al geoproceso de contour, generando de esta manera las curvas de nivel de la comuna de Penco cada 10 metros necesarias para la escala de trabajo, para luego generar una superficie de terreno en 3D (TIN) y transformar el archivo a formato ráster,

para finalizar se realizó el geoprocso slope, obteniendo de esta manera la variable pendiente en grados.

Finalmente se distribuyeron los valores de susceptibilidad, a partir de la reclasificación de Pedraza (1997) modificada en López (2013) para las pendientes, representadas en tres categorías, siendo bajo - medio – alto.

Tabla 3. Reclasificación de Pendiente

Pendientes	Nivel de Susceptibilidad	Valor
0° - 6°	Bajo	1
6° – 10° 10° - 15°	Medio	2
15° - 20° >20°	Alto	3

Fuente: Elaboración Propia

- Exposición

Para la obtención de la exposición se utilizó las curvas de nivel cada 10 metros, para generar una superficie de terreno en 3D (TIN), para luego transformar el archivo a formato ráster y realizar el geoprocso aspect para la obtención de la variable exposición.

La variable se encuentra categorizada en nueve rangos, establecidos de acuerdo a la clasificación según Bignardello (1997), en donde una orientación plana, este, sureste, suroeste o sur, se consideran de baja susceptibilidad porque se ven menos expuestas a los agentes erosivos de las lluvias que provienen desde esa dirección, en cambio el tener una orientación norte, noreste, noroeste u oeste representa un alto nivel de exposición de la ladera para desencadenar un evento de gran magnitud, debido a que presenta una fuerte erosión del suelo, significando una mayor susceptibilidad.

Se clasificaron los valores de susceptibilidad, a partir de la reclasificación según Bignardello (1997) para la orientación, representadas en tres categorías, siendo bajo - medio – alto.

Tabla 4. Reclasificación de Orientación

Orientación	Nivel de Susceptibilidad	Reclasificación
Plano	Bajo	1
Este Sureste Suroeste Sur	Medio	2

Norte Noreste Noroeste Oeste	Alto	3
---------------------------------------	------	---

Fuente: Elaboración Propia

- Unidades Litológicas

Para realizar la variable geológica se procedió a recolectar información, a través del mapa geológico de la Región del Bio Bio con una escala de 1:300000, debido a que la información a nivel local no se encuentra disponible, se tuvo que definir de mejor manera la variable a estudiar, por lo que se contó con el apoyo del Dr. Jorge Quezada, Geólogo del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Concepción y se compararon con los mapas litológicos realizados por Castillo M., (2021) y Baeza J., (2019), para la obtención de un mapa litológico actualizado de la zona a estudiar, en la cual se identificaron cinco unidades litológicas en el área de estudio, las cuales se digitalizaron en el programa Arcgis 10.5 para crear el shape de geología en formato vectorial, para luego convertirlo a formato ráster y poder reclasificarlo.

Se clasificaron los valores de susceptibilidad, a partir de la reclasificación según Castillo M., (2021) y Baeza J., (2019) para las Unidades Litológicas, representadas en tres categorías, siendo bajo - medio - alto.

Tabla 5. Reclasificación de Unidades Litológicas

Unidades Litológicas	Nivel de Susceptibilidad	Reclasificación
Depósitos Litorales Depósitos Fluviales	Bajo	1
Formación Cosmito	Medio	2
Batolito Costero del Sur Basamento Metamórfico (Serie Oriental)	Alto	3

Fuente: Elaboración Propia

- Unidades Geomorfológicas

El estudio se llevó a cabo por medio de la metodología Tricart J. (1965 y 1978), el cual consiste en la interpretación de fotografías aéreas, en conjunto con el análisis en terreno. La clasificación se obtuvo mediante la actualización y modificación de la carta geomorfológica realizada por Jaque E. (1994), la cual se digitalizó en el programa ArcGIS 10.5 para crear el shape de geomorfología en formato vectorial, para posteriormente ponderar los valores para cada geoforma.

Se clasificaron los valores de susceptibilidad, a partir de la reclasificación según Flores D., (2017) para las unidades geomorfológicas, donde los relieves de erosión son los que presentan una mayor susceptibilidad para que ocurra un evento de remoción en masa, debido a que estos relieves erosionan la superficie, generando mayores repercusiones en el terreno, en cambio los relieves de acumulación no afectan tanto en el terreno, de esta forma representan un bajo nivel de susceptibilidad para el estudio.

Tabla 6. Reclasificación de Unidades Geomorfológicas

Geomorfología	Nivel de Susceptibilidad	Reclasificación
Playas de arena cuarcíferas Terrazas de llanuras fluviales locales	Bajo	1
Acantilado marino estabilizado Cordones litorales Plataformas de abrasión marina nivel 3 (<50mts) Plataformas de abrasión marina nivel 2 (50-100mts) Plataformas de abrasión marina nivel 1 (>100mts) Extracción de arcilla para loza Relleno artificial Marismas (pantanos litorales)	Medio	2
Acantilado marino inactivo Cordones en roca sedimentaria de edad terciaria Cordones en roca granítica de edad paleozoica	Alto	3

Fuente: Elaboración Propia

- Uso de Suelo

Para determinar esta variable se utilizó el mapa de uso de suelo de CONAF (2017) e imágenes satelitales actualizadas de Google Earth, luego se procedió a realizar la clasificación supervisada, donde se utilizó el programa Arcgis 10.5

Se clasificaron los valores de susceptibilidad, a partir de la reclasificación según Flores D., (2017) para el uso de suelo, representadas en tres categorías, siendo bajo - medio – alto.

Tabla 7. Reclasificación de Uso de Suelo

Uso de Suelo	Nivel de Susceptibilidad	Reclasificación
Praderas Naturales Cuerpos de Agua Plantaciones Forestales Humedales	Bajo	1
Urbano	Medio	2
Suelos Desnudos	Alto	3

Fuente: Elaboración Propia

- Precipitaciones

Como se expresó al principio de esta investigación, el principal factor desencadenante en climas mediterráneos son las precipitaciones, las que concentradas en distintos periodos de tiempo e intensidad actúan de diferente manera en el territorio (Garrido B, 2014). Por lo tanto, se realizó el análisis de umbrales de precipitaciones, donde los datos fueron extraídos de las estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile, donde se consideró la estación Carriel Sur de Concepción y los datos entregados por medios de comunicación como Diario El Sur y Radio Biobío, para lograr los objetivos de esta investigación. Los eventos registrados fueron producidos en periodo invernal, en los meses de junio, julio y agosto, producto de los sistemas frontales que azotaron a la ciudad en los diferentes años.

8.3.3. Susceptibilidad

Para la evaluación de la susceptibilidad en este trabajo de investigación, se debió considerar el inventario de los fenómenos registrados de la zona a estudiar y establecer la superposición de los factores que condicionan dicha zona, donde no se considera la variable temporal ni el cálculo de la probabilidad de ocurrencia, por lo que solo se realiza mediante la sumatoria de factores favorables para la generación del fenómeno (González de Vallejo, 2002).

Teniendo los factores reclasificados y en formato ráster, se procede a crear la zonificación de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa para la zona urbana de Penco, mediante la determinación de las ponderaciones para cada factor empleando la matriz de Garrido B (2014), donde se llevó a cabo la evaluación multicriterio de los factores analizados, mediante la operación Weighted Overlay en Arcgis 10.5, donde cada variable presenta un peso distinto representado en porcentaje, de esta manera los valores cercanos al 0 son menos representativos y los más cercanos al 100 son los

valores más altos, dado que la variable posee una mayor influencia para la probabilidad de ocurrencia de un evento de remoción en masa.

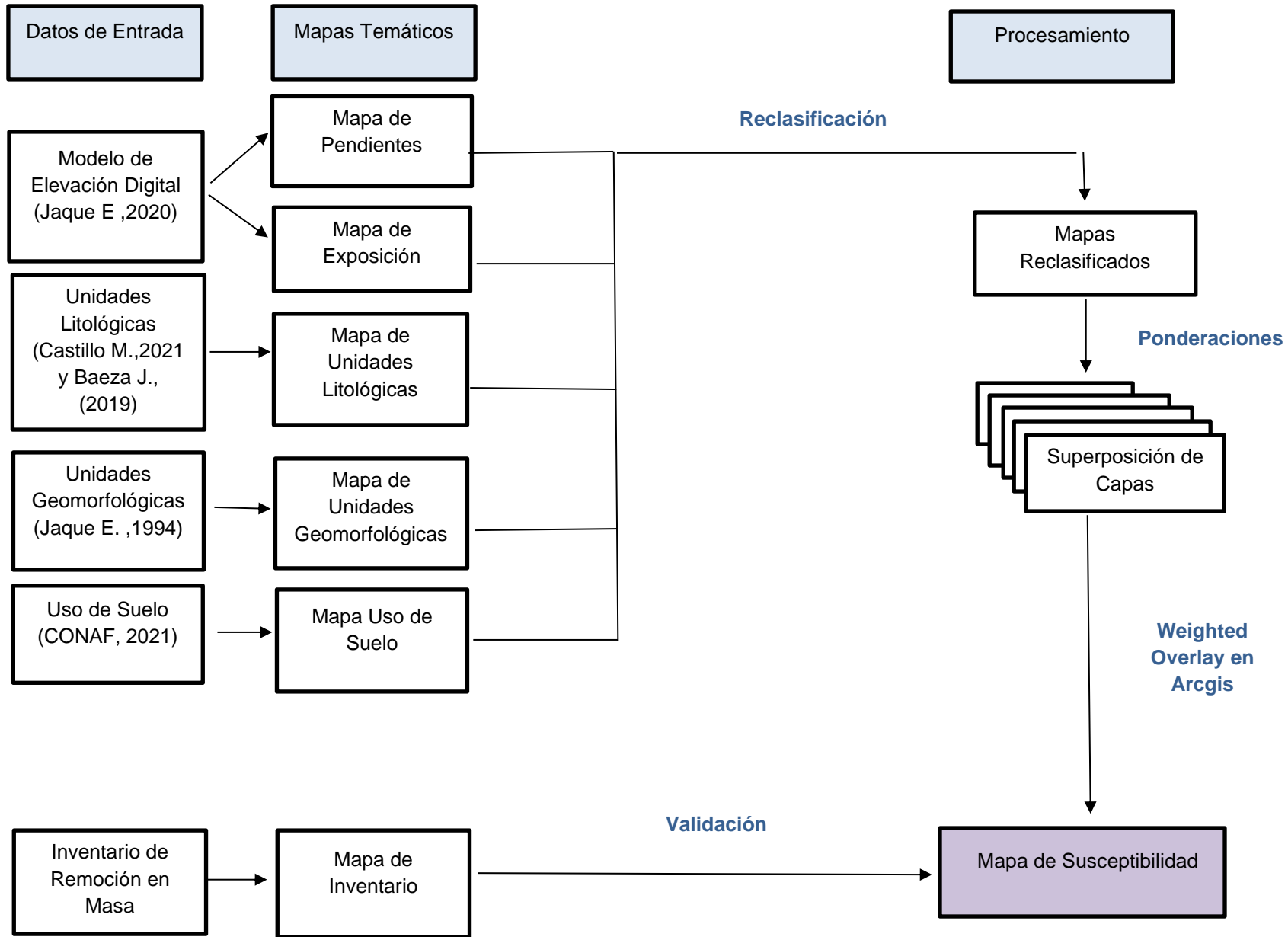
Tabla 8 . Matriz de Factores Ponderados

Factores	Ponderaciones (%)
Pendiente	30%
Orientación	5%
Unidades Litológicas	25%
Unidades Geomorfológicas	25%
Uso de Suelo	15%

Fuente: Elaboración propia en base a Garrido B. (2014)

La metodología empleada para la obtención de la amenaza en este trabajo de investigación, se identificó primordialmente con Garrido B (2014), dado que su trabajo investigativo posee la misma estructura geomorfológica que la comuna de Penco.

Figura 12. Esquema Metodológico



Fuente: Elaboración Propia, en base a Garrido B. (2014)

9. RESULTADOS

9.1. INVENTARIO DE PROCESOS DE REMOCION EN MASA

Durante la visita a terreno se localizaron quince procesos de remoción en masa dentro de la zona urbana de la comuna de Penco, en donde la totalidad de las laderas observadas fueron deslizamientos rotacionales, flujo de barro y derrumbe. La distribución espacial de estos eventos se concentró en sectores fuertemente urbanizados siendo los sectores de Villa Montahue, Población Forjadores de Chile, Villa Penco, Villa Italia y Población Miramar, siendo zonas que se caracterizaron por tener laderas con exposición directa hacia elevadas pendientes, también se identificó un evento en la ruta 150, camino que conduce hacia el acceso sur de la comuna de Penco, obstruyendo la avenida principal del acceso a la comuna, siendo una grave amenaza para los transeúntes.

La mayor actividad registrada en el inventario se identificó en periodo invernal, primordialmente en los meses de mayo, junio, julio y agosto, debidos en su mayoría a sistemas frontales, donde se producen las fuertes precipitaciones en periodos cortos de tiempo, generando una mayor actividad de movimientos en masa en este periodo del año.

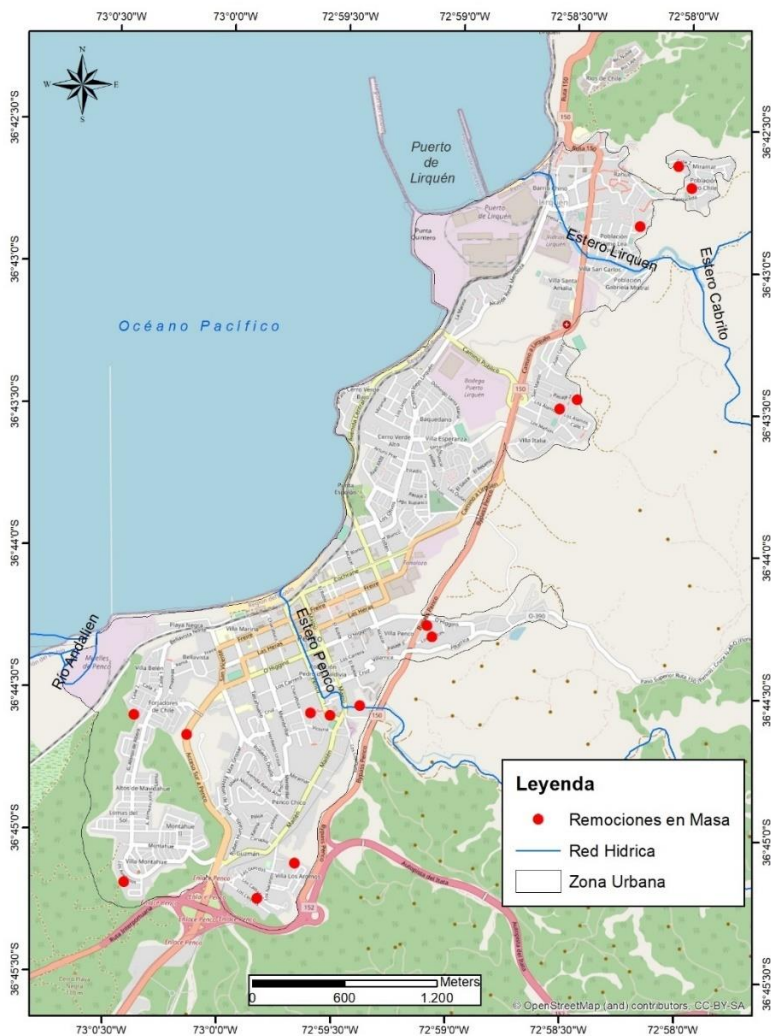
Tabla 9. Inventario de procesos de remoción en masa

N° de Evento	Lugar	Coordenada		Tipo de Movimiento	Estado de Actividad
		Latitud	Longitud		
1	Los Avellanos #393	36°45'11.03"S	73° 0'25.03"O	Deslizamiento Rotacional	Activo
2	Benjamin Vicuña Mackena #51	36°44'35.71"S	73° 0'23.25"O	Deslizamiento Rotacional	Reactivo
3	Penco #601	36°44'35.07"S	72°59'31.83"O	Deslizamiento Rotacional	Activo
4	Los Alerces #852	36°44'18.03"S	72°59'5.49"O	Deslizamiento Rotacional	Reactivo
5	Los Cerezos #199	36°45'14.00"S	72°59'49.99"O	Deslizamiento Rotacional	Reactivo
6	Los Guindos #21	36°45'6.40"S	72°59'40.33"O	Deslizamiento Rotacional	Reactivo
7	La Concepción #102	36°44'34.63"S	72°59'36.95"O	Deslizamiento Rotacional	Reactivo
8	Esterio Penco detrás de SAR Penco	36°44'32.89"S	72°59'24.09"O	Deslizamiento Rotacional	Activo
9	Los Alerces #200	36°44'15.66"S	72°59'6.89"O	Deslizamiento Rotacional	Inactivo
10	Km 8, Ruta 150 Acceso a Penco	36°44'38.77"S	73° 0'8.89"O	Derrumbe	Reactivo
11	Los Alamos #599	36°43'29.38"S	72°58'33.21"O	Deslizamiento Rotacional	Inactivo
12	Pasaje 3 #699	36°43'27.32"S	72°58'28.76"O	Deslizamiento Rotacional	Reactivo
13	Los Castaños	36°42'50.50"S	72°58'13.16"O	Deslizamiento Rotacional	Inactivo
14	La Tosca #50	36°42'42.28"S	72°57'59.78"O	Deslizamiento Rotacional	Reactivo
15	C.2	36°42'37.66"S	72°58'3.46"O	Deslizamiento Rotacional	Activo

Fuente: Elaboración propia

Como se expresa en el inventario se registraron quince eventos de remoción en masa para la zona urbana de Penco, las cuales trece fueron deslizamiento rotacional, un flujo de barro y un derrumbe. Además, se apreciaron cuatro localidades en un estado de actividad activo, donde los deslizamientos se dan a lo largo de todo el año en estos sectores, ya sea con mayor o menor intensidad. Por otra parte, se reconocieron ocho localidades donde el estado de actividad era reactivo, debido a que se manifestaban producto de las intensas precipitaciones y se vivían con mayor intensidad si se presentaban sistemas frontales en estas localidades, por lo que estos eventos se manifiestan cuando existe el factor desencadenante para que ocurra el evento. Por último, se identificaron tres localidades que poseen un estado de actividad inactivo, ya que en estos lugares no se han generado mayores eventos en el último tiempo, debido a que en algunos casos el talud se ha ido depositando como parte de la vivienda, formando parte del techo de las casas.

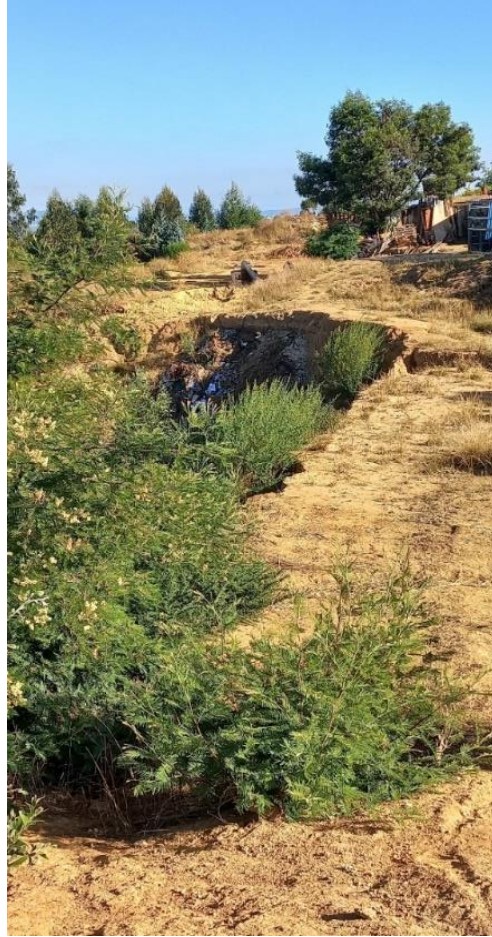
Figura 13. Mapa de eventos de remoción en masa



Fuente: Elaboración propia

8.1.1. Fichas de los eventos de Remoción en Masa.

N° de Evento	Lugar	Coordenadas		Tipo de Movimiento	Estado de Actividad
		Latitud	Longitud		
1	Los Avellanos #393	36°45'11.03"S	73° 0'25.03"O	Deslizamiento Rotacional	Activo



Fuente: Archivo Fotográfico del Proyecto.

Observaciones:

Durante las precipitaciones caídas en el año 2014, en los meses de Junio (266,4 mm) y Julio (223,8 mm) ocurrió el primer indicio de este gran evento de remoción en masa, en donde la población Villa Montahue se encontraba en sus primeras etapas de construcción de viviendas, con el paso de los años la población se ha ido expandiendo hacia las laderas, en donde los patios traseros de las viviendas colindan con las laderas, siendo un peligro latente para la población.

Cabe señalar que las pendientes presentes en el territorio son mayores a 25°, presentando elevaciones de 102 metros, por lo que está dentro de los parámetros de presentar a futuro un gran evento de remoción en masa, repercutiendo en la vida de las personas que habitan todo este sector.

N° de Evento	Lugar	Coordenadas		Tipo de Movimiento	Estado de Actividad
		Latitud	Longitud		
2	Benjamín Vicuña Mackena #51	36°44'35.71"S	73° 0'23.25"O	Deslizamiento Rotacional	Reactivo



Fuente: Archivo Fotográfico

Observaciones

Durante el año 2017, se presentaron grandes precipitaciones en el mes de agosto (277,4 mm), fue en ese mes que ocurrió este deslizamiento rotacional, en el que se puede apreciar que el árbol está desviado en relación a la superficie del terreno.

Actualmente se encuentra aledaño a patios de viviendas de la población Forjadores de Chile, cabe señalar que cerca de este evento se encuentra un desagüe de gran envergadura, para drenar las precipitaciones que se forman en las calles de este sector en periodos de lluvia.

N° de Evento	Lugar	Coordenadas		Tipo de Movimiento	Estado de Actividad
		Latitud	Longitud		
3	Penco #601	36°44'35.07"S	72°59'31.83"O	Deslizamiento Rotacional	Activo



Fuente: Archivo Fotográfico

Observaciones

Durante los años 2019 este sector en la Población Miraflores, ha tenido eventos de deslizamientos producto de las precipitaciones ocurridas en el 2014, debido a que los meses de Junio (266,4mm) y Julio (223,8mm) se presentó un sistema frontal en la región del Bio Bio, a partir de ese año en adelante se han manifestado deslizamientos en las laderas aledañas que se encuentran cercanas a establecimientos educacionales, como se aprecia en la imagen existen panderetas cercanas a la ladera, generando mayor peso al talud, siendo un factor determinante en la ocurrencia de un evento de remoción en masa.

N° de Evento	Lugar	Coordenadas		Tipo de Movimiento	Estado de Actividad
		Latitud	Longitud		
4	Los Alerces #852	36°44'18.03"S	72°59'5.49"O	Deslizamiento Rotacional	Reactivo



Fuente: Archivo Fotográfico

Observaciones

En agosto del año 2017 se vivió uno de los sistemas frontales de gran magnitud para la población, producto de las fuertes precipitaciones (277,4mm) y vientos de hasta 109 kilómetros por hora afectaron a toda la Provincia de Concepción, de esta forma ocurrió este deslizamiento rotacional en Villa Penco. Cabe señalar, que dueños del sitio colocaron muro de alambre, para contener esta ladera.

N° de Evento	Lugar	Coordenadas		Tipo de Movimiento	Estado de Actividad
		Latitud	Longitud		
5	Los Cerezos #199	36°45'14.00"S	72°59'49.99"O	Deslizamiento Rotacional	Reactivo



Fuente: Archivo Fotográfico de Baeza J. (2019)

Observaciones

Este deslizamiento rotacional ocurrido en el mes de Julio del año 2019, donde las precipitaciones para ese mes fueron de 105,4 mm, en donde un gran muro de 2.5 metros fue derribado, producto de este deslizamiento que tuvo una altura aproximada de 3 metros, removiendo gran cantidad de suelo y vegetación, quedando depositado en el patio de la vivienda. Actualmente se tiene un muro de contención de cemento.

N° de Evento	Lugar	Coordenadas		Tipo de Movimiento	Estado de Actividad
		Latitud	Longitud		
6	Los Guindos #21	36°45'6.40"S	72°59'40.33"O	Deslizamiento Rotacional	Reactivo



Fuente: Archivo Fotográfico de Baeza J. (2019)

Observaciones

El evento ocurrió el mes de junio del año 2019, donde se produjeron lluvias intensas en ese periodo de 251,2 mm, provocando el deslizamiento de una ladera de aproximadamente 4.5 metros de altura, que tenía un ángulo de elevación de 45°, este derribo un muro de hormigón de 1.5 metros, afortunadamente no hubo mayores consecuencias ni grandes daños a la propiedad.

N° de Evento	Lugar	Coordenadas		Tipo de Movimiento	Estado de Actividad
		Latitud	Longitud		
7	La Concepción #102	36°44'34.63"S	72°59'36.95"O	Deslizamiento Rotacional y Flujos de barro	Reactivo



Fuente: Archivo Fotográfico de Baeza J. (2019)

Observaciones

Se generó un deslizamiento rotacional, producto de las fuertes precipitaciones (31.8 mm) el día 16 de agosto del año 2019, en donde el deslizamiento poseía una altura del talud de 8.5 metros, con un ángulo de elevación de 44°, destruyó un muro de hormigón de un metro de altura, cubriendo por completo los patios traseros de las viviendas con barro, esto se debió a una saturación del suelo producto del aumento excesivo del peso del talud erosionado por la precipitación directa sobre el escarpe, además de la escorrentía superficial proveniente de las viviendas asentadas en la corona de la ladera, resultando en un deslizamiento rotacional con flujo de barro.

Las familias afectadas fueron evacuadas, producto del barro ingresado a sus viviendas.

N° de Evento	Lugar	Coordenadas		Tipo de Movimiento	Estado de Actividad
		Latitud	Longitud		
8	Estero Penco detrás de SAR Penco	36°44'32.89"S	72°59'24.09"O	Deslizamiento Rotacional	Activo



Fuente: Archivo Fotográfico

Observaciones

El evento se produjo en mayo del año 2021, producto de las precipitaciones (74.8 mm en 24 horas) y la vegetación arbustiva presente provocaron un deslizamiento rotacional, cerca del evento se encuentran nuevas viviendas habitacionales, las cuales se encuentran cercanas a un muro de hormigón.

N° de Evento	Lugar	Coordenadas		Tipo de Movimiento	Estado de Actividad
		Latitud	Longitud		
9	Los Alerces #200	36°44'15.66"S	72°59'6.89"O	Deslizamiento Rotacional	Inactivo



Fuente: Archivo Fotográfico

Observaciones

Este deslizamiento ocurrió en julio del año 2016, producto de un sistema frontal que repercutió en toda la Provincia de Concepción con fuertes precipitaciones (189,4 mm), provocando que parte del talud fuera depositado encima de la vivienda. Actualmente el talud forma parte del techo de la vivienda.

N° de Evento	Lugar	Coordenadas		Tipo de Movimiento	Estado de Actividad
		Latitud	Longitud		
10	Km 8, Ruta 150 Acceso a Penco	36°44'38.77"S	73° 0'8.89"O	Derrumbe	Reactivo



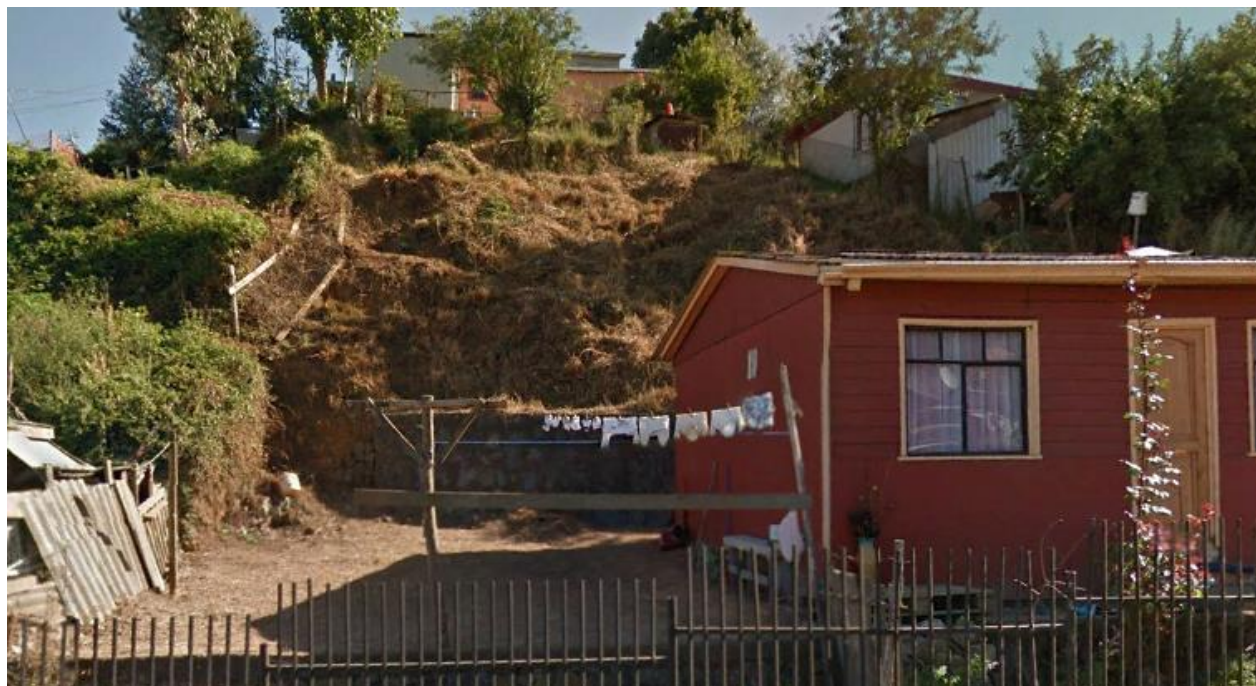
Fuente: Noticias Biobío Chile (2019).

Observaciones

El presente evento, presenta un derrumbe de gran envergadura, producto de las fuertes precipitaciones (251,2mm) en junio del año 2019, bloqueando el acceso a Penco por la ruta 150, el talud presentaba un ángulo de elevación de 38° y una altura de 8 metros, siendo un peligro para los automovilistas que transitaban por la ruta.

Al día de hoy aun no presenta soluciones o medidas de contención de gran envergadura en la ruta.

N° de Evento	Lugar	Coordenadas		Tipo de Movimiento	Estado de Actividad
		Latitud	Longitud		
11	Los Alamos #599	36°43'29.38"S	72°58'33.21"O	Deslizamiento Rotacional	Inactivo



Fuente: Archivo Fotográfico

Observaciones

Durante el mes de agosto en el año 2017 se dio este deslizamiento rotacional, producto de las precipitaciones (277,4mm), donde el flujo de barro ingreso al patio trasero de la vivienda, por lo que quedaron escarpes en el talud sobre el pequeño muro de rocas que se realizó.

N° de Evento	Lugar	Coordenadas		Tipo de Movimiento	Estado de Actividad
		Latitud	Longitud		
12	Pasaje 3 #699	36°43'27.32"S	72°58'28.76"O	Deslizamiento Rotacional	Reactivo



Fuente: Archivo Fotográfico

Observaciones

Este evento se produjo en agosto en el año 2017, producto de las intensas precipitaciones (277,4mm), donde el talud cercano a la vivienda quedo depositado sobre la vivienda, las personas dejaron el hogar, porque siempre sucedía lo mismo cuando había precipitaciones, la casa quedaba bajo los depósitos de barro.

Actualmente nadie habita la vivienda y vecinos de la población Villa Valparaíso comentaban que en el lugar siempre suceden estos eventos de remoción en masa, producto de la altura, pero que autoridades no ha hecho nada al respecto.

N° de Evento	Lugar	Coordenadas		Tipo de Movimiento	Estado de Actividad
		Latitud	Longitud		
13	Los Castaños	36°42'50.50"S	72°58'13.16"O	Deslizamiento Rotacional	Inactivo



Fuente: Archivo Fotográfico

Observaciones

Este evento sucedió en junio del año 2017 en la Población Jaime Lea Plaza, producto de las fuertes precipitaciones (156,8 mm), ocurre un deslizamiento rotacional, el cual estaba saturado por la vegetación.

Actualmente no se ha realizado nada al respecto, ya que se encuentra en un sitio baldío.

N° de Evento	Lugar	Coordenadas		Tipo de Movimiento	Estado de Actividad
		Latitud	Longitud		
14	La Tosca #50	36°42'42.28"S	72°57'59.78"O	Deslizamiento Rotacional	Reactivo



Fuente: Archivo Fotográfico

Observaciones

Durante el mes de junio bajo un sistema frontal es que hubo periodos fuertes de precipitaciones (251,2 mm) en el año 2019, provocando este deslizamiento rotacional, donde se identificó el deslizamiento del talud y la formación de barro en el sector.

No se registraron mayores daños.

N° de Evento	Lugar	Coordenadas		Tipo de Movimiento	Estado de Actividad
		Latitud	Longitud		
15	C.2	36°42'37.66"S	72°58'3.46"O	Deslizamiento Rotacional	Activo



Fuente: Archivo Fotográfico

Observaciones

Este evento ocurrió en el año 2019, producto de las fuertes precipitaciones de ese año, donde el mes de mayo (135,4mm), junio (251,1mm) y julio (105,4mm) se identificó un sistema frontal en toda la Región del Bio Bío.

En la imagen se puede observar un talud de gran envergadura, donde se presentan escarpes con desprendimiento de suelo, cárcavas y surquillos. Cabe señalar, que los patios traseros de las viviendas están cercanas al borde del talud, producto de la expansión urbana que ha tenido esta población, donde familias fueron reubicadas en este sector producto del terremoto del año 2010.

Las remociones en masa que se identificaron en el inventario, las cuales en su mayoría están situadas en la zona Norte y Sur de la comuna, situadas en Población Forjadores de Chile y Población Villa Valparaíso, donde se identificó que para el desenlace de un evento se debió tener principalmente en cuenta las precipitaciones, para el cual en la mayoría de los casos investigados fue producto de los sistemas frontales que repercutieron en toda la Provincia de Concepción, donde se registraron fuertes precipitaciones, las cuales en la mayoría de los casos sobrepasaron los 100mm (Bio Bio Chile, 2019).

En toda la zona norte y sur de la comuna se presentaron pendientes mayores a 25°, las cuales tenían elevaciones de 102 metros, siendo uno de los puntos más críticos que presenta el territorio, ya que posee los parámetros necesarios para ser a futuro un gran evento de remoción en masa, repercutiendo en la vida de las personas que habitan en todo este sector, siendo la zona sur de la comuna denominada como la población Forjadores de Chile y población Montahue II, donde estas poblaciones nacieron para dar solución a familias que habían perdido sus hogares a causa del terremoto y posterior tsunami del 27 de febrero del año 2010. La idea fue reubicarlas lo antes posible en zonas más alejadas de la costa, en este caso desde el borde costero hacia los cerros, ya que el 80% de las familias habían perdido su hogar por daños del terremoto y tsunami y el 20% restante fue por pérdida de sus viviendas debido al terremoto, para lo cual se debió expandir la zona urbana de la comuna con la construcción de nuevas viviendas sociales en estos sitios que anteriormente eran de plantación forestal y praderas naturales. Las familias afectadas que viven en la primera etapa de la población son 450, lo que se materializa en 450 viviendas, 3 juntas de vecinos, pequeños espacios dedicados a aéreas verdes y un jardín infantil JUNJI. Las viviendas fueron diseñadas y presentadas en 2011 para posteriormente ser entregadas en agosto del 2013, de la misma manera ocurrió en la zona norte de la comuna con la construcción de la nueva población llamada Villa Valparaíso (Municipalidad de Penco, 2016)

Otro caso muy peculiar es el que se evidencio el día 16 de agosto del año 2019, donde se rectificó que cayeron 31.8 mm de fuertes e intensas precipitaciones y la elevación del terreno era de 44° de pendiente, de esta manera se evidencio uno de los casos más dramáticos, debido a que el suelo se saturó producto del aumento excesivo del peso del talud erosionado por la precipitación directa sobre el escarpe, además de la escorrentía superficial proveniente de las viviendas asentadas en la corona de la ladera, resultó ser uno de los grandes deslizamientos rotacionales con flujo de barro en la comuna, donde las familias afectadas fueron evacuadas, producto del barro ingresado a sus viviendas.

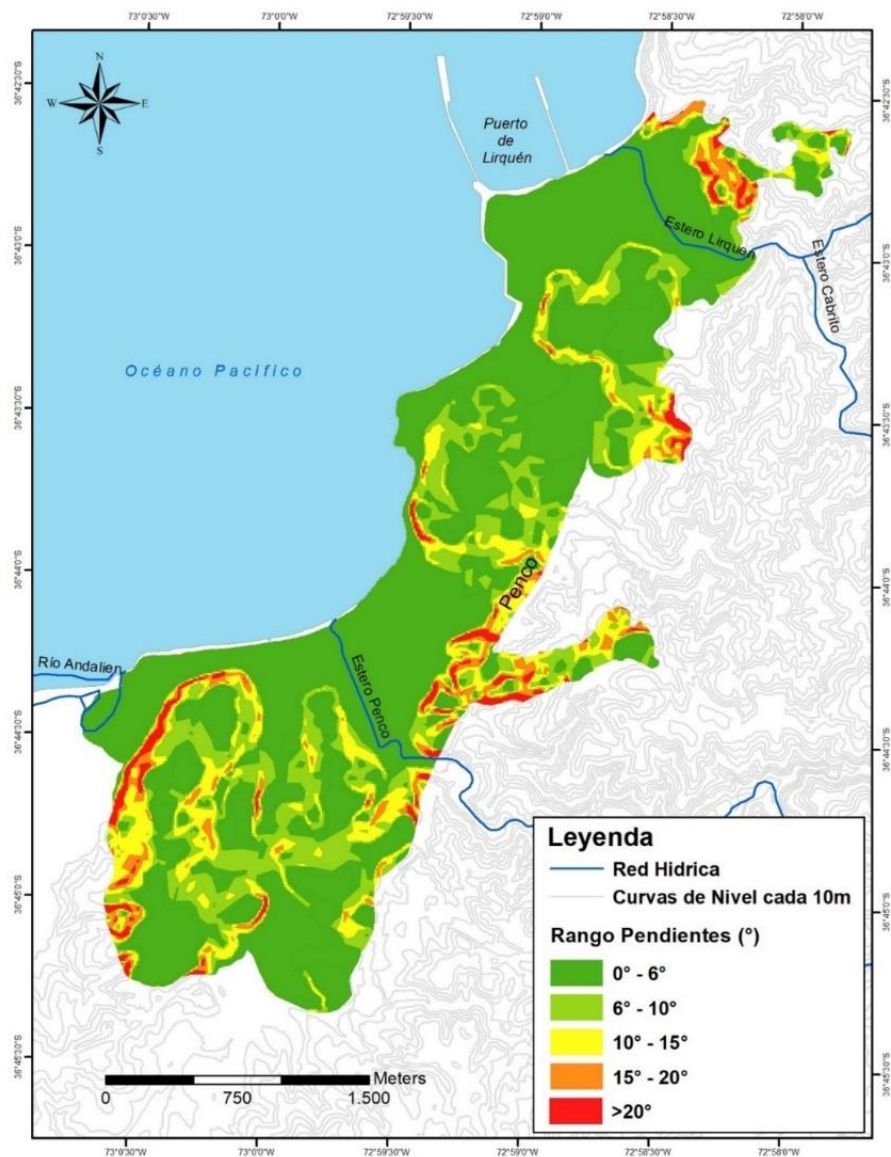
9.2. ANALISIS DE FACTORES CONDICIONANTES

9.1.2. Análisis de factores condicionantes

9.1.2.1. Pendiente

Como resultado se ve en la Figura 14, las pendientes obtenidas en grados para la zona urbana de la comuna de Penco, donde es posible encontrar zonas con mayores pendientes, correspondientes a cerros que poseen elevaciones que van desde los 25 metros hasta los 135 metros, donde se pueden apreciar hacia la zona este de la comuna y más acentuadas en la zona sur, debido a la ubicación geográfica que posee la comuna al ubicarse en una zona de desembocadura que esta próxima a la costa.

Figura 14. Mapa de Pendientes



Fuente: Elaboración Propia, en base a Jaque E. (1995).

La topografía irregular de la zona urbana de Penco, presenta valores elevados de pendiente en todas sus laderas y quebradas. Las terrazas y planicies costeras presentan bajos niveles de pendiente representado por un 65% y 17% de la superficie total de la zona urbana, teniendo una baja susceptibilidad para desencadenar eventos de remoción en masa. Por otra parte, las plataformas y cordones poseen un alto nivel de pendiente con un 18% de la superficie total urbana, las que poseen rangos de pendientes sobre los 10°, representando una alta susceptibilidad para desencadenar un evento de remoción en masa, siendo sectores que han sido urbanizados en los últimos años, mediante la creación de las poblaciones Montahue I, Montahue II y Forjadores de Chile, por lo que gran cantidad de casas se ubican en estos sectores (Municipalidad de Penco, 2016).

El nivel más alto de pendientes mayor a 20° se registró con 16,9 ha, representando un 2% del área de estudio. Existe un total de 128 hectáreas que se encuentra sobre los 10° de pendiente, las cuales pertenecen a una media y alta susceptibilidad de remoción en masa, correspondiente a un 18% de pendientes que favorecen a la posible ocurrencia de un evento de remoción en masa, distribuidas en su mayoría en laderas donde se han construido las ultimas poblaciones de la comuna.

Tabla 10. Distribución de rango de pendientes

Pendientes	Área (ha)	Porcentaje (%)
0° - 6°	461,320961	65%
6° - 10°	121,839199	17%
10° - 15°	78,950033	11%
15° - 20°	32,242642	5%
>20°	16,92815	2%

Fuente: Elaboración Propia

Es posible señalar que la presencia de altas pendientes se encuentra en su mayoría en toda la zona urbana de la comuna, con mayor predominancia bordeando la zona centro de la comuna, donde estas zonas se ven enfrentadas a la componente de vegetación, donde destacan las plantaciones forestales y matorrales, repercutiendo de esta manera en la probabilidad de ocurrencia de un evento de remoción en masa en ciertos sectores.

9.2.1.2. Exposición

Se puede apreciar que todas las zonas con altas pendientes poseen una orientación norte, noreste, noroeste u oeste, debido a la topografía irregular y escarpada de la comuna. Además, se puede identificar que existen grandes zonas con exposición plana en la comuna, correspondiente a 280,4 hectáreas significando un 39% de la superficie total, esto deja al descubierto que este tipo de orientación posee una mayor proporción en la comuna, pero no quiere decir que en estas zonas que poseen esta orientación no ocurran eventos de remoción en masa, sino más bien debe existir la presencia de otros factores para que se produzca un evento como se vio reflejado en el inventario, donde si hubo un evento en este sector, a pesar de tener una orientación plana, estas zonas también presentan otros factores condicionantes para que ocurra un evento de esta magnitud. La exposición modifica las condiciones de la superficie terrestre, debido a la variación en las condiciones de la humedad que entrega o el aporte de los rayos solares que puede aportar al suelo, por lo que puede ocasionar una rápida saturación del suelo producto de las precipitaciones y al desarrollo de la cobertura vegetal que regula la permeabilidad del suelo (López P, 2013).

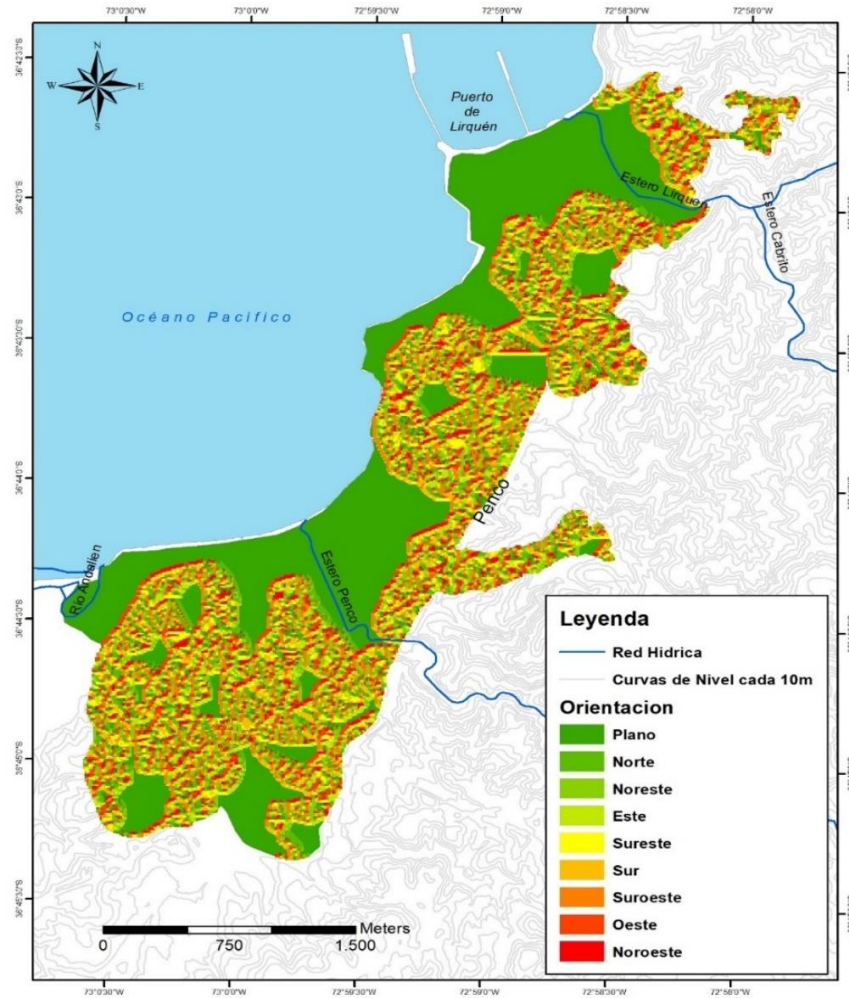
El segundo mayor porcentaje de exposición se vio dirigido a taludes de solana, donde se concentran mayoritariamente vegetación de tipo matorral y plantaciones forestales, como se aprecia en la tabla 13 donde se ve representado en hectáreas toda la zona estudiada, registrando con mayor significancia los taludes de solana con 223 hectáreas representando un 32% de la zona urbana de Penco, se debe destacar que gran parte de las remociones en masa registradas poseían este tipo de orientación, donde se observa el suelo erosionado por los rayos de sol, debido a que presenta mayor insolación, por lo tanto recibe una mayor evapotranspiración la superficie (Vidal A, 2017).

Tabla 11. Distribución de Orientación

Orientación	Área (ha)	Porcentaje %
Plano	280,453185	39%
Este, Sureste, Suroeste, Sur	206,961602	29%
Norte, Noreste, Noroeste, Oeste	223,591697	32%

Fuente: Elaboración Propia

Figura 15. Mapa de Exposición



Fuente: Elaboración Propia, en base a Jaque E. (1995).

En última instancia, se encuentra en menor porcentaje la exposición de tipo umbría, siendo el Este, Sureste, Suroeste y Sur con un 29%, representando 206 hectáreas de la superficie total, donde las quebradas y laderas presentes en el terreno poseen mayor humedad al ser zonas donde no abundan los rayos del sol, debido a que la orientación de las laderas influye en las condiciones de humedad de cada vertiente, ocasionando una rápida saturación del suelo, producto de las precipitaciones y permitiendo el desarrollo de cobertura vegetal que regula la permeabilización del suelo (López, 2013).

9.2.1.3. Unidades Litológicas

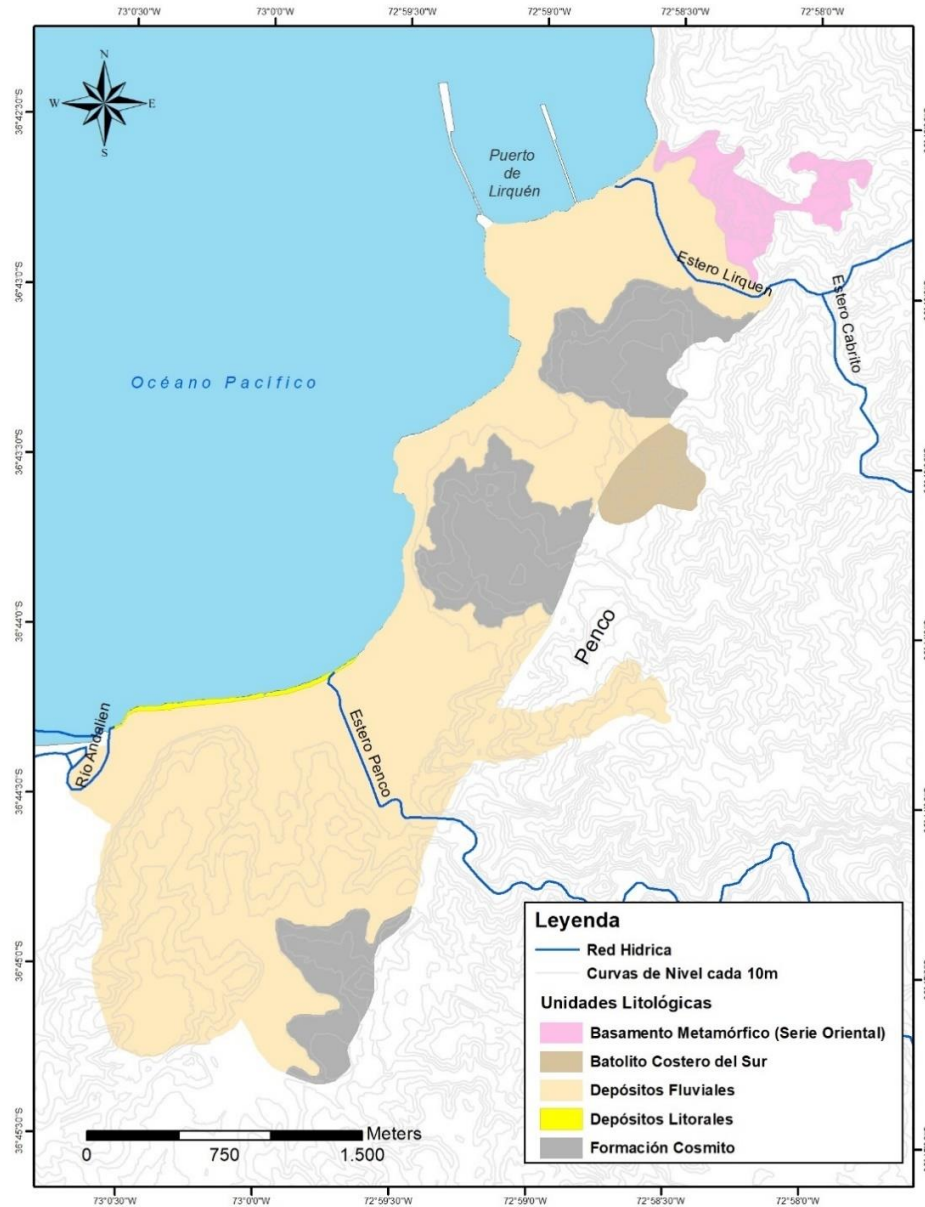
Se identificaron cinco unidades litológicas en toda la zona urbana, encontrándose en primera instancia los depósitos fluviales ubicados en el borde costero, estos corresponden a depósitos no consolidados a semiconsolidados, formados a partir de la meteorización, erosión y transporte de rocas preexistentes por medio de agentes fluviales y/o la acción del mar, siendo depósitos constituidos por arenas cuarzo-feldespáticas transportadas por el río Andalién los cuales son correlacionables con la unidad informal Arena Andalién (Galli, 1967).

Luego, se encuentran los depósitos litorales que fueron identificados en gran parte del área urbana de Penco, siendo depósitos de playa acumulados en litorales paralelos a la línea de costa o como acumulaciones en el interior de ensenadas pequeñas que bordean las bahías de Concepción, San Vicente y Coliumo (Ramírez y otros, 2012). El grueso de estos depósitos lo comprenden sedimentos arenosos negros y claros, en conjunto con bioclastos. Además, se identificaron rocas estratificadas de la Formación Cosmito, la que representa una secuencia sedimentaria marina-continental cuya localidad fue definida 5 km al norte de Concepción en el sector de Cosmito, la que aflora en las localidades de Coliumo, Cocholgüe, Penco y en los cerros isla de Concepción y Talcahuano. También descrita como un conjunto de capas levemente inclinadas de lutitas, areniscas, conglomerados y mantos de carbón (Galli, 1967). Hacia el este de la comuna, se encuentran rocas intrusivas, denominadas Batolito Costero del Sur, las que corresponden a un conjunto de cuerpos plutónicos que afloran en la Cordillera de la Costa, incluyendo tonalitas y granodioritas de biotita, y en menor medida granitos y dioritas (Creixell, 2001).

Por último, se identificó basamento metamórfico de Serie Oriental al límite norte de la comuna, siendo compuesta principalmente por esquistos, filitas, gneises y metareniscas, cuyo grado de metamorfismo varía entre las facies esquistos verdes y granulita (alto gradiente presión/temperatura), y se caracterizan por la aparición sucesiva de biotitas, andalucitas y sillimanitas (MOP, 2011) (Aguirre et al., 1972).

Las Unidades Litológicas que presentaron mayor concentración, fueron los Depósitos Fluviales con un 73% y Formación Cosmito con 20% respectivamente, en donde las primeras unidades se distribuyen en todos los relieves de acumulación presentes y la Formación Cosmito se localiza adentrándose al este de la comuna de Penco, donde existe la presencia de plataformas de abrasión marina, mientras que el Basamento Metamórfico de Serie Oriental (4%), Batolito Costero del Sur (3%) y los Depósitos Litorales (0,5%) abarcan en menor superficie el área de estudio.

Figura 16. Mapa de Unidades Litológicas



Fuente: Elaboración propia, en base a Castillo M. (2021).

9.2.1.4. Unidades Geomorfológicas

En la zona urbana de Penco se identificaron once unidades geomorfológicas principales, las cuales se dividen en dos categorías, siendo los relieves de acumulación y relieves de erosión. El relieve de erosión comprende el desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales de suelo o roca por acción de la fuerza de un fluido en movimiento; puede ser generada tanto por el agua como por el viento (Suárez J,1998). En cambio, los relieves de acumulación corresponden a la acumulación de sedimento,

que ha sido transportado y depositado por los cursos de agua y el mar (Peña-Cortés et al, 2014).

Con respecto a los relieves de acumulación, se destacan las playas de arenas cuarcíferas, relleno artificial, terrazas de llanuras fluviales locales, cordones litorales y marismas. Por otra parte, los relieves de erosión identificados son el acantilado marino estabilizado, acantilado marino inactivo, cordones en roca granítica de edad paleozoica, cordones en roca sedimentaria de edad terciaria, extracción de arcilla para loza y plataformas de abrasión marina.

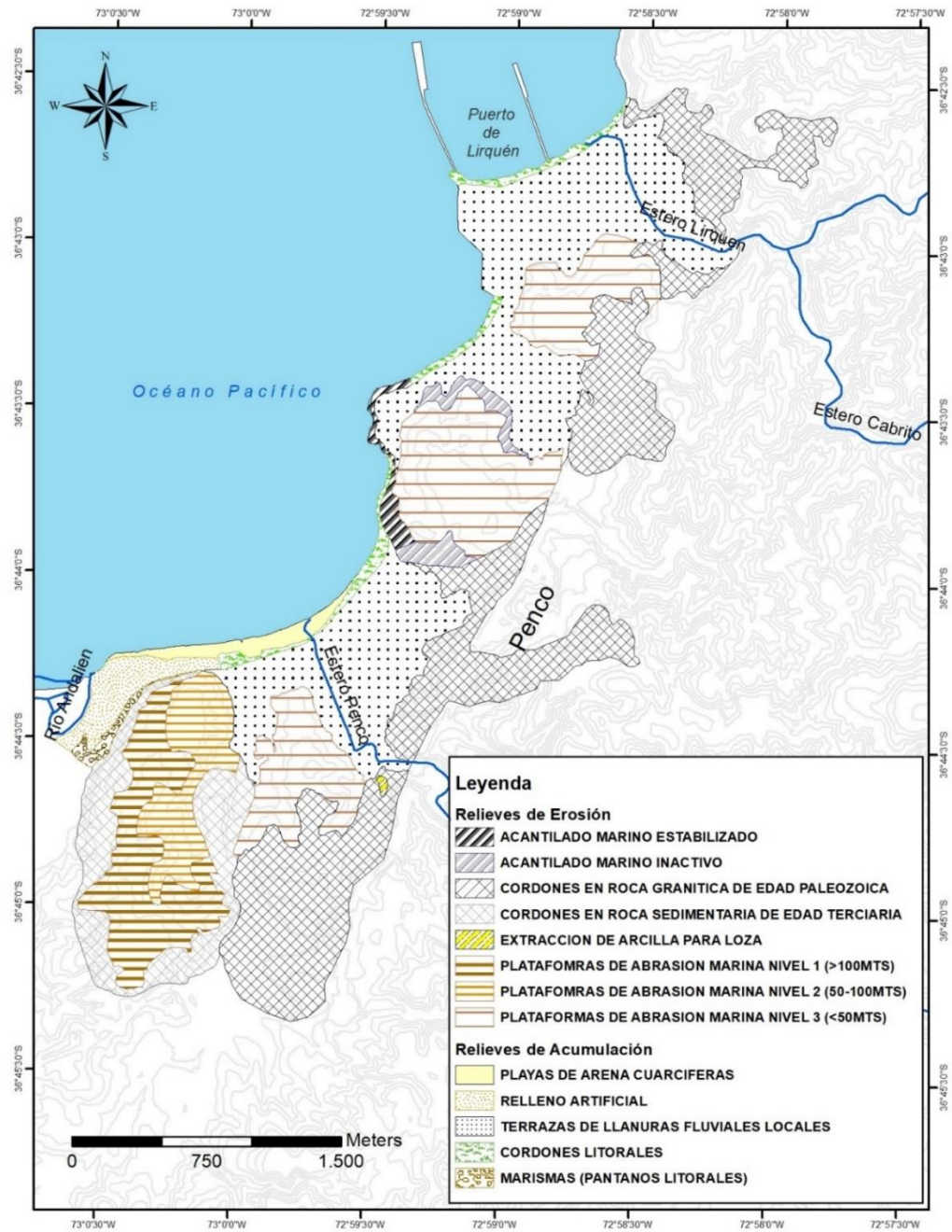
Las Unidades Geomorfológicas que presentaron mayor concentración en el área de estudio, de acuerdo a la información actualizada del presente año, donde se muestra claramente una predominancia de los Relieves de Erosión con un 66%, correspondiente a 476 hectáreas, siendo localizadas en los Cordones en Roca Granítica de Edad Paleozoica (28,4%), las Plataformas de Abrasión Marina (28,7%), los Cordones en Roca Sedimentaria de Edad Terciaria (7,1%), Acantilado Marino Inactivo (1,4%), Acantilado Marino Estabilizado (0,8%) y Extracción de Arcilla para Loza (0,06%), ubicadas en su mayoría en sectores donde existen altas elevaciones del terreno. Luego, están los Relieves de Acumulación identificados, los cuales presentaron un 33,6%, correspondiente a 240 hectáreas, las cuales fueron representadas en su mayoría a las Terrazas de Llanuras Fluviales locales con un 27,8%, equivalente a 199 hectáreas, continuando con el Relleno Artificial (2,2%), los Cordones Litorales (1,8%), las Playas de Arenas Cuarcíferas (1,3%) y los Marismas (0,5%) de la zona urbana de la comuna de Penco.

Tabla 12. Superficie de Unidades Geomorfológicas

Unidades Geomorfológicas	Área (ha)	Porcentaje (%)
Relieves de Erosión		
Acantilado Marino Estabilizado	5,845524	0,8%
Acantilado Marino Inactivo	10,284975	1,4%
Cordones en Roca Granítica de Edad Paleozoica	203,631186	28,4%
Cordones en Roca Sedimentaria de Edad Terciaria	50,580715	7,1%
Extracción de Arcilla para Loza	0,464137	0,06%
Plataformas de Abrasión Marina Nivel 1 (>100 mts)	52,243606	7,3%
Plataformas de Abrasión Marina Nivel 2 (50-100 mts)	32,833064	4,6%
Plataformas de Abrasión Marina Nivel 3 (<50 mts)	120,124793	16,8%
Relieves de Acumulación		
Playas de Arenas Cuarcíferas	9,29763	1,3%
Relleno Artificial	15,466016	2,2%
Terrazas de Llanuras Fluviales Locales	199,044296	27,8%
Cordones Litorales	12,647464	1,8%
Marismas (Pantanos Litorales)	3,525468	0,5%

Fuente: Elaboración Propia

Figura 17. Mapa de Unidades Geomorfológicas



Fuente: Elaboración Propia, en base a Jaque E. (1994)

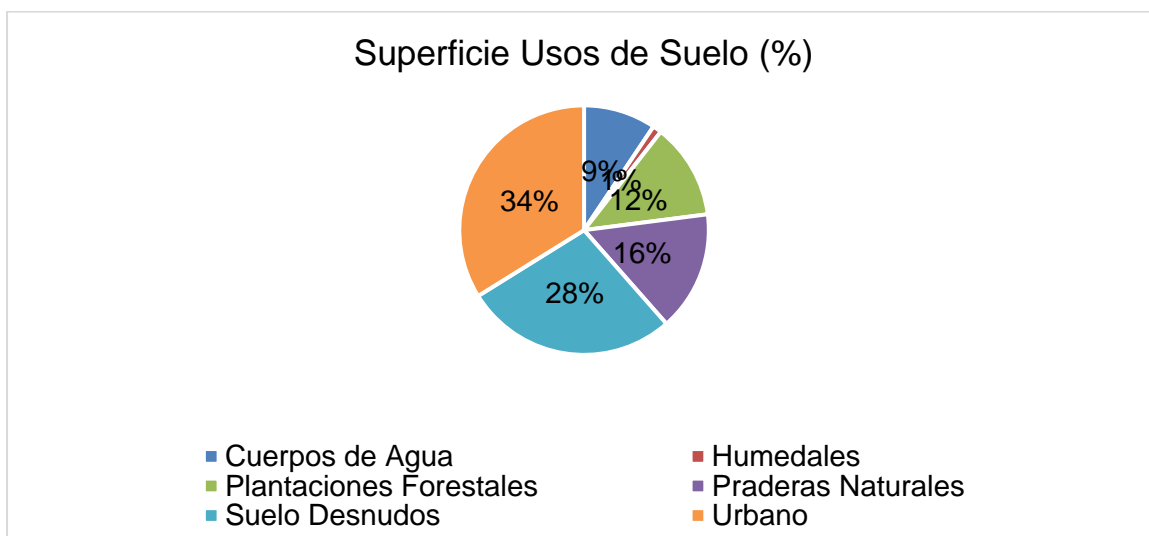
9.2.1.5. Uso de Suelo

Se reconocen un total de seis usos de suelo en la superficie estudiada. El primero corresponde a cuerpos de agua presentes en la superficie terrestre o en el subsuelo. Luego se encuentran los humedales entendiéndose como ecosistemas saturados de agua en forma temporal o permanente, en los que existe y se desarrolla biota acuática (BCN, 2017). Continúan las plantaciones forestales, encontrándose dos tipos de especies siendo el Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) y el Pino (*Pinus radiata*).

Además, se identificaron praderas naturales siendo ecosistemas donde predomina la vegetación herbácea, arbustiva y boscosa. Por otra parte, se encontraron suelos desnudos los que corresponden a suelos donde no se presenta ningún indicio de vegetación. Finalmente, el último uso de suelo corresponde a áreas urbanas, el cual engloba todos aquellos lugares caracterizados por construcciones, calles y ocupaciones humanas.

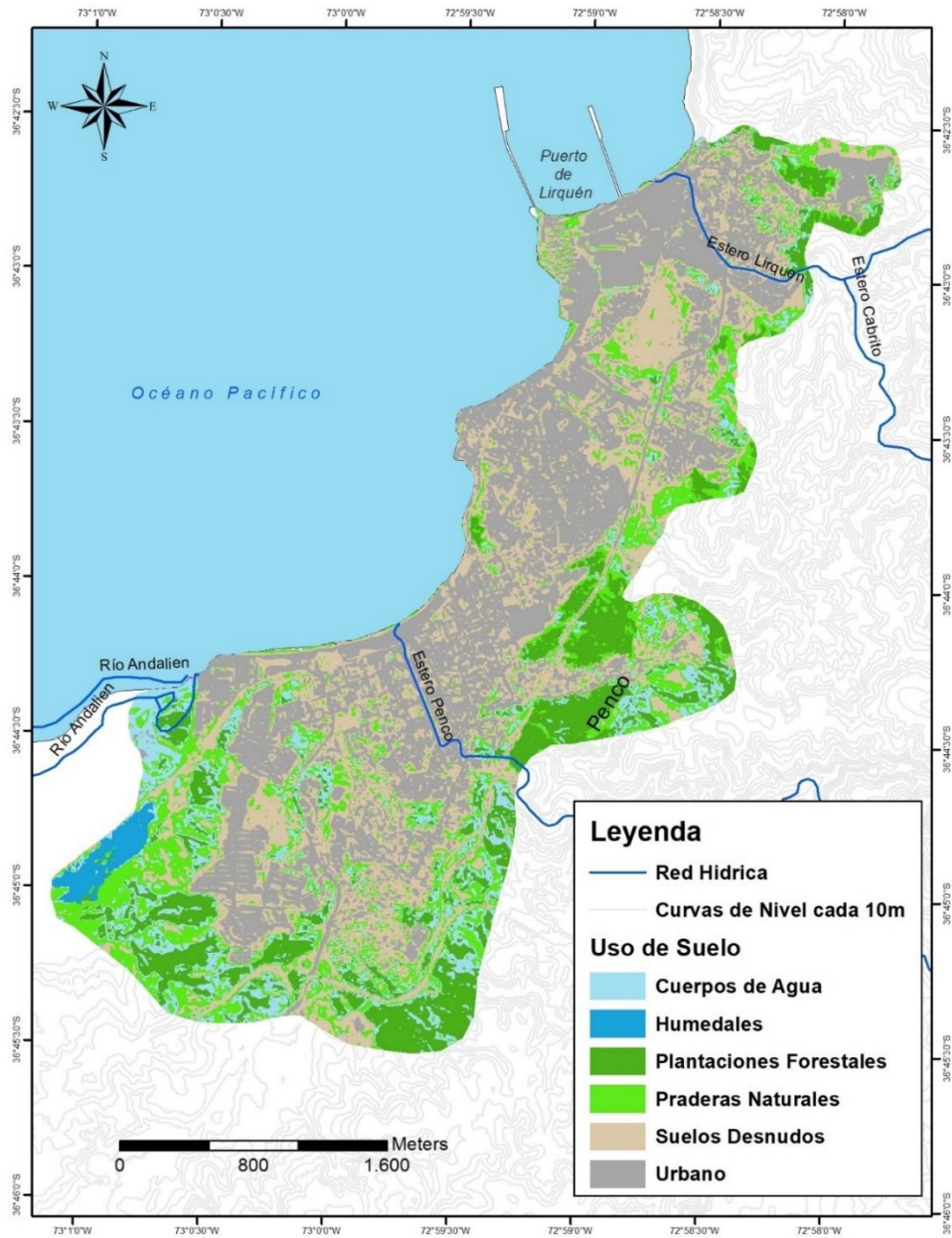
Como se observa en la figura 18, el uso de suelo con mayor superficie en el área de estudio fue urbano identificándose un 34%, correspondientes a 352 hectáreas de la superficie total, esto se debe a la constante expansión urbana y al aumento en su densidad poblacional (INE, 2022), seguidamente se identificaron los suelos desnudos con un 28%, correspondiente a 287 hectáreas, las praderas naturales representaron un 16% abarcando 162 hectáreas, seguida de las plantaciones forestales con un 12%, correspondientes a 129 hectáreas, las cuales disminuyeron producto de uno de los mayores incendios forestales de su historia durante el año 2017, por otra parte se encontró en menor proporción los cuerpos de agua (9%) y humedales (1%), debido a los esteros presentes en la zona de estudio y a la desembocadura del Río Andalien.

Figura 18. Superficie usos de suelo en la zona urbana de Penco



Fuente: Elaboración Propia

Figura 19. Cartografía de uso de suelo



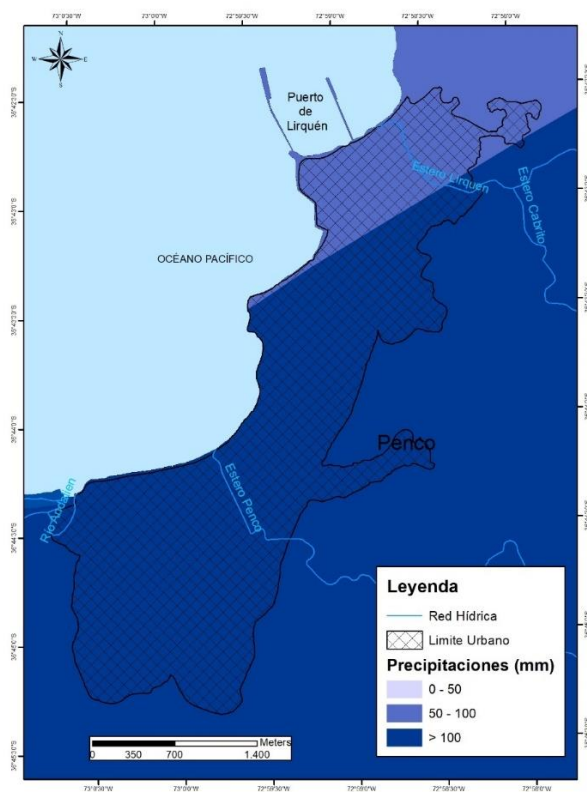
Fuente: Elaboración Propia, en base a imágenes de CONAF (2021)

9.2.2. Análisis de Precipitaciones

Las precipitaciones fueron el factor desencadenante en esta investigación, debido a que ejerce una energía detonante para la generación de una remoción en masa en la localidad, como fue el caso de estudio, donde todos los eventos estudiados anteriormente en la zona fueron detonados por las precipitaciones en periodo invernal, durante los meses de mayo, junio, julio y agosto, esto se debió en gran medida por los sistemas frontales que azotaron a la región del Bio Bío cada año, según información recopilada de fuentes de comunicación, a través de diario El Sur, Radio Bio Bio, Teletrece y Canal 9.

Como resultado se muestra la figura 20, donde se identificó que existe una gran concentración de precipitaciones hacia la zona sur de la comuna de Penco, la cual se encuentra más próxima a la costa, por lo que se puede expresar que posee un aumento en el régimen pluvial hacia estas zonas más cercanas a la comuna de Talcahuano y Concepción. Además, es posible señalar que la concentración de las precipitaciones correspondientes a los últimos años tiene relación directa con el aumento de las remociones en masa en sectores que fueron identificados en el inventario, correspondientes a la zona sur de la comuna, donde se puede rescatar que las precipitaciones en estas zonas oscilan entre los 50mm y los 100mm al día.

Figura 20. Cartografía de Precipitaciones



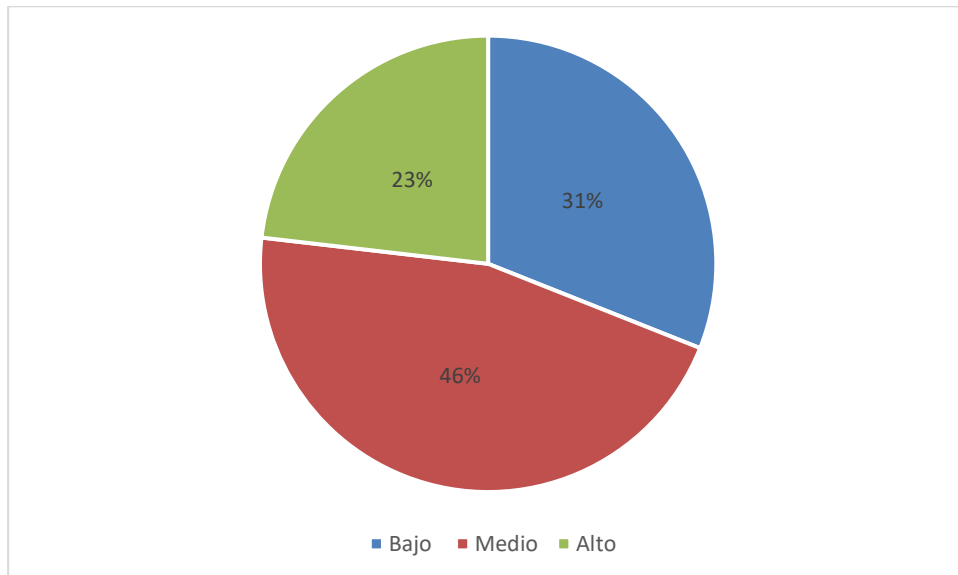
Fuente: Elaboración Propia, en base a Estación Meteorológica Carriel Sur (2021)

10. ZONIFICACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD FRENTE A PROCESOS DE REMOCION EN MASA

La susceptibilidad por remoción en masa en la zona urbana de Penco arrojo los mayores niveles de susceptibilidad en zonas de altas pendientes, donde no existe la presencia de mucha vegetación, encontrándose suelos desnudos y praderas, esto permite que al suscitarse un evento de precipitaciones intensas, el suelo no pueda infiltrar en su totalidad la lluvia caída, aumentando la escorrentía superficial en el territorio, lo que conlleva a que estas zonas presenten un peligro latente para la población, además se puede apreciar que los datos recopilados en el inventario se encuentran efectivamente en las zonas más susceptibles a procesos de remoción en masa.

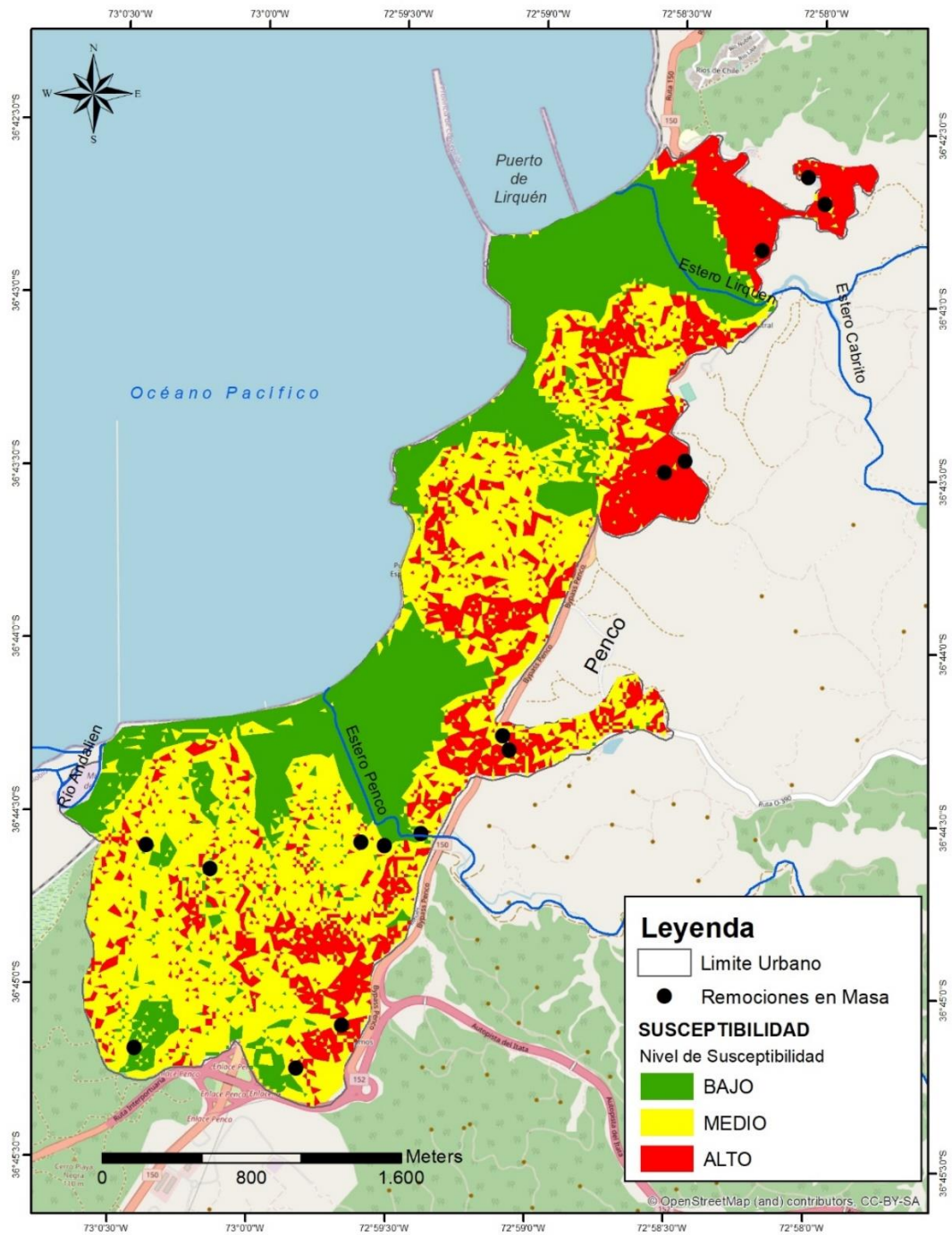
Los resultados indicaron que un 31% presento una categoría baja de susceptibilidad, identificándose en todos los relieves de acumulación y pendientes menores a los 10°. Por otra parte, la susceptibilidad de categoría media arrojo un total de 319,8 hectáreas equivalentes a un 46% del total de la superficie urbana. Y finalmente, la susceptibilidad por remoción en masa de categoría alta arrojo un total de 161,7 hectáreas equivalente a un 23% de la superficie total estudiada. La utilización del modelo aplicado, nos dio una evaluación espacial del cual se pudo sostener que un 69% de la superficie total estudiada se encuentra susceptible y presenta las condiciones físicas ideales para que se efectúen los procesos de remoción en masa en la zona urbana de Penco.

Figura 21. Porcentaje de superficie según nivel de susceptibilidad



Fuente: Elaboración Propia

Figura 22. Mapa de Susceptibilidad de Remoción en Masa



Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la figura 22, los resultados indicaron que la categoría de baja susceptibilidad contiene una superficie correspondiente a un 31% de la superficie total de la zona urbana de Penco, las cuales están distribuidas en terrazas de llanuras fluviales y en laderas de bajas pendientes. En segunda categoría se encuentra el nivel medio de susceptibilidad con un 46%, las cuales están presentes en las plataformas de abrasión marina y acantilados marinos identificados en la geomorfología del territorio, en la cual destaca la presencia de laderas con pendientes sobre los 10° hasta los 20° e identificándose una exposición este y sur, demostrando que existen las condiciones óptimas en el territorio.

Además, se identificó que un 23% de la superficie total obtuvo un nivel alto de susceptibilidad, las cuales están compuestas por plataformas de abrasión marina de nivel 1 (>100 metros), cordones en roca granítica y en roca sedimentaria, junto con ello la presencia de laderas con pendientes mayores a los 20° y registrar una exposición norte.

La utilización del modelo aplicado, nos dio una evaluación espacial del cual se pudo sostener que un 69% de la superficie total estudiada, correspondiente a la zona urbana de la comuna de Penco se encuentra sumamente susceptible bajo el peligro latente de este fenómeno físico denominado proceso de remoción en masa, puesto que si se considera contar las dos mayores categorías que son la media y alta, se puede evidenciar que más de la mitad del territorio posee las condiciones ideales para que exista la ocurrencia de un proceso de remoción en masa distribuidas en su zona urbana, transformándose en una situación bastante preocupante considerando el área de expansión urbana que ha tenido la comuna de Penco durante los últimos años.

Cabe señalar, que todos los eventos registrados en el inventario de procesos de remoción en masa se encuentran en niveles de amenaza Media y Alta como muestra la figura 22, validando de esta manera el modelo creado para la zonificación de susceptibilidad.

11. DISCUSIÓN

La evaluación de la susceptibilidad por remoción en masa, se llevó a cabo mediante la zona urbana que posee la comuna de Penco. Dado que, posterior al terremoto que azotó a la región del Bio Bio el año 2010, en la comuna de Penco se debió reubicar a la población más afectada en zonas de alta susceptibilidad dando inicio a nuevas poblaciones para la comuna como lo son Forjadores de Chile, Villa Valparaíso, Montahue I y Montahue II, generando un aumento en la expansión urbana de la ciudad de Penco en el último tiempo, siendo un factor significativo para generar mayores niveles de susceptibilidad para la población que habita dicho territorio, ya que la ciudad ha tenido que expandir su límite urbano a zonas calificadas como no edificables, debido al aumento en su población y a la falta de espacio edificable en la ciudad, de esta forma se transforma en un territorio calificado de alta susceptibilidad para la población, bajo el cual se encuentra rodeado de altas pendientes y quebradas abruptas para transformar estos sitios en zonas residenciales.

La evaluación de la susceptibilidad por remoción en masa debe incluir el estudio de inventario y los factores condicionantes, para que ocurra un evento en el que pueda dejar expuesta a la población frente a un desastre. En este sentido, un fenómeno natural se vuelve peligroso fundamentalmente por el medio natural dadas las condiciones que presenta el entorno, provocando daños físicos, sociales y económicos para la población.

En la evaluación de la susceptibilidad por remoción en masa para la zona urbana de Penco se estableció que un total de 698 hectáreas se encuentran bajo este peligro, de las cuales 216 hectáreas se encuentran con una susceptibilidad de categoría baja, luego 319 hectáreas se encuentran con una susceptibilidad de categoría media y por último 161 hectáreas se encuentran con una susceptibilidad de categoría alta. Por otra parte, el registro del inventario de remociones en masa para la localidad fue de suma importancia para corroborar las zonas que han sido afectadas por este fenómeno, dejando un registro evidente de las zonas que han sido susceptibles frente a los procesos de remoción en masa

Dentro del modelo se incluyó la variable usos de suelo, ya que se consideró que la modificación de este factor ha cambiado durante los últimos años, por lo tanto, se demuestra que la susceptibilidad no es netamente de origen natural, sino que es socio-natural, donde convergen distintos factores que incrementan la susceptibilidad para la población expuesta en un determinado lugar. Por otra parte, algunas de las variables mencionadas presentaron ciertas limitaciones durante el transcurso de esta investigación, ya que la información geológica y geomorfológica de Penco era escasa y se encontraba en una escala de trabajo muy amplia, de igual forma se obtuvo la información de todas las variables mencionadas a lo largo de la investigación, dando como resultado las zonas susceptibles en tres categorías alta, media y baja por remoción en masa en la zona urbana de Penco.

12. CONCLUSIONES

En el presente estudio de evaluación de procesos de remoción en masa realizado para la zona urbana de la comuna de Penco, que involucro un total de 107,6 km², donde un total de 47.367 personas habitan (INE, 2017). Es posible señalar que la comuna ha tenido un crecimiento poblacional en los últimos años, debido a la creación de nuevas poblaciones para la comuna, las cuales se han ido expandiendo en los últimos años, debido a su crecimiento poblacional de un 5,27% (INE, 2020). De esta forma, la zona urbana de Penco se ha tenido que expandir hacia zonas de elevadas pendientes, las cuales son potencialmente susceptibles al proceso de remoción en masa, por lo cual en la evaluación realizada se pudo evidenciar que más de la mitad del territorio posee las condiciones ideales para que exista la ocurrencia de un proceso de remoción en masa distribuidas en su zona urbana, transformándose en una situación bastante preocupante considerando el área de expansión urbana que ha tenido la comuna de Penco durante los últimos años, por lo que la gestión urbana de la ciudad de Penco no ha logrado disminuir la exposición de la población frente a este tipo de fenómenos, más bien a generado mayores niveles de susceptibilidad para la población que habita dicho territorio, debido a dos problemáticas fundamentales que son el aumento de la población, lo que ha llevado a la necesidad de expandir su límite urbano hacia zonas calificadas como no edificables, y en segundo lugar la falta de espacio edificable, lo cual ha obligado a la ciudad a expandir sus zonas de edificación hacia territorios que se encuentran susceptibles y en peligro latente frente al proceso de remoción en masa, bajo lo cual se pudo evidenciar que más de la mitad del territorio posee las condiciones ideales para que exista la ocurrencia de un proceso de remoción en masa, de esta manera se debe llevar a cabo un buen manejo de las posibles áreas edificables a futuro en la comuna, a través del Plan de Desarrollo Comunal.

Se identificaron 15 eventos de remoción en masa dentro de la zona urbana de la comuna de Penco, en donde la totalidad de las laderas observadas fueron deslizamientos rotacionales, flujo de barro y derrumbe, concentrados principalmente en sectores fuertemente urbanizados encontrándose Villa Montahue, población Forjadores de Chile, Villa Penco, Villa Italia, población Miramar y población Montahue II, en donde todos los eventos estudiados se registraron durante el periodo invernal, principalmente en los meses de mayo, junio, julio y agosto, debidos en su mayoría a sistemas frontales, generando precipitaciones extremas en periodos cortos de tiempo, por lo que se concluye que la investigación dio una correcta correlación entre las precipitaciones y los eventos de remoción en masa ocurridos en la zona urbana de Penco, ya que todos los eventos ocurridos fueron desencadenados por las precipitaciones, por lo que se concluye que las precipitaciones favorecen la generación de procesos de remoción en masa para la zona estudiada, ya que presenta las condiciones físicas ideales para que se efectúen.

La utilización del modelo aplicado, nos dio una evaluación espacial del cual se pudo sostener que un 69% de la superficie total estudiada se encuentra sumamente susceptible a procesos de remoción en masa, por lo que su población está altamente

expuesta, por lo que los resultados obtenidos en esta investigación pueden ser utilizados como herramienta para orientar la planificación territorial de la comuna de Penco, teniendo en cuenta que la población está expuesta a otros tipos de peligros naturales que pueden traer consecuencias a futuro.

La evaluación de la susceptibilidad por medio de la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las técnicas de evaluación multicriterio resultaron ser herramientas óptimas para llevar a cabo los resultados en la obtención de los mapas y poder analizarlos en profundidad, por lo que posee un importante potencial para la toma de decisiones a nivel territorial, ya que es de fácil interpretación para la población y es una herramienta eficiente para orientar la planificación territorial y llevar a cabo una óptima gestión del riesgo para la zona urbana de Penco.

13. REFERENCIAS

- Alcántara, I, (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. Investigaciones Geográficas.
- Aneas de Castro, S. (2000). Riesgos y Peligros una visión desde la Geografía.
- Ayala-Carcedo, F. (1993). "Estrategias para la reducción de desastres naturales", Investigación y Ciencia.
- Ayala-Carcedo, F. y Olcina, J. (2002). Riesgos Naturales.
- Baeza, C. B., & de Rurange Espinoza, J. (2018). Modelo de susceptibilidad a procesos de remociones en masa en rutas cordilleranas de Chile Central: Ruta 115 CH, Paso Pehuenche, Región del Maule. Investigaciones Geográficas
- Bollin, C. (2010). Incorporar la gestión del riesgo en la planificación territorial: orientaciones para el nivel municipal. Primera edición, diciembre 2010. https://www.researchgate.net/publication/287200126_Incorporar_le_gestion_del_riesgo_en_la_planificacion_territorial_Orientaciones_para_el_nivel_municipal.
- Bonachea J. (2006). Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos. (Tesis para optar al grado de Doctor, Universidad de Cantabria, España). Recuperada de <https://www.tdx.cat/handle/10803/10610>.
- Borja, J. (2012). Evaluación del riesgo por movimientos en masa y generación de medidas de mitigación en la vía Ambato- Puyo. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Facultad de Ciencias Humanas. Escuela de Ciencias Geograficas.Quito.
- Camus et al, (2016). Visión histórica de la respuesta a las amenazas naturales en Chile y oportunidades de gestión del riesgo de desastre. Revista de geografía Norte Grande.
- Chardon, A, (2002). Un enfoque geográfico de la vulnerabilidad en zonas expuestas a amenazas naturales.
- Cigiden, (2019). A 28 años del desastre por aluvión en Antofagasta nuevos estudios advierten que persisten territorios vulnerables. Disponible en: <https://www.cigiden.cl/a-28-anos-del-desastre-por-aluvion-en-antofagasta-nuevos-estudios-advierten-que-persisten-territorios-vulnerables/>.
- Cunill, P, (1970). Geografía de Chile, 5° Edición, Ed. Universitaria, Santiago, Chile.
- Cruden, D. (1991). A simple definition of a Landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. No. 43, p. 27-29.

- Cruden, D. & Varnes, D. (1996). Landslides types and processes In: Landslides investigation and mitigations. Transportation Research Board Special Report 24 (Turner and Schuster Eds).
- Devynck, J. (1970). "Contribución al estudio de la circulación atmosférica en Chile y el clima de la VIII Región", Concepción: Universidad de Concepción.
- Delgado, H. y Navarro, M. (2002). Mapas de amenaza volcánica.
- Elmes M. (2015). Amenaza debido a eventos de precipitación máxima entre los 21° y 34° latitud sur de Chile Continental: Análisis de umbrales hidrometeorológicos, gatillante de remoción en masa por flujos en la cuenca del río Copiapó. Universidad de Chile. Facultad de arquitectura y urbanismo. Escuela de postgrado. Magister en Geografía. [Archivo PDF].
- Fell, R. (1994). Landslide Risk Assessment and Acceptable Risk. Canadian Geotechnical Journal, vol. 31, no. 2, pp. 261-272 DOI <https://doi.org/10.1139/t94-031>.
- Garrido B. (2014). Susceptibilidad a deslizamientos en laderas urbanizadas de caleta Tumbes, comuna de Talcahuano. Universidad de Concepción. [Archivo PDF].
- Giner, J. & Molina, S. (2001). Sismicidad y Riesgo Sísmico en la C.A.V [Libro electrónico]. Editorial Club Universitario. España. <https://web.ua.es/es/urs/documentos/libros/sismicidad-y-riesgo-sismico-en-la-c-a-v-jose-giner-c.pdf>.
- González de Vallejo et al, (2002). Ingeniería Geológica. Prentice-Hall, Madrid, 715 pp.
- Guiñez, F. (2016). Estratificación y zonificación de los suelos de la comuna de Penco mediante la aplicación de sig. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Facultad de Ingeniería. Universidad del Bío Bío. [Archivo PDF]. http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/2238/1/Guinez_Contreras_Felipe_Benjzmin.pdf.
- Hauser, A. (1991). Aluviones que afectaron a la ciudad de Antofagasta. II Región, el día 18 de junio de 1991. SERNAGEOMIN, 89 p.
- Hauser, A. (2000). Remociones en masa en Chile (versión actualizada). SERNAGEOMIN. Santiago, Chile. Henríquez Messing, E. A. (2019). Análisis de susceptibilidad a remociones en masa en la comuna de Corral, al norte de los 39° 54' S, Región de los Ríos, Chile.
- Hidalgo C, & Pacheco A. (2011). Metodología para evaluación preliminar de riesgo en carreteras por deslizamientos detonados por lluvia. Universidad de Medellín, 10.
- Inostroza et al, (2017). Aplicación del modelo conceptual para procesos de remoción en masa a un talud de la ruta CH-160, Lota, Región del Bío Bío. Simposio de Habilitación Profesional. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Católica

de la Santísima Concepción. [Archivo PDF].
<http://repositoriodigital.ucsc.cl/bitstream/handle/25022009/1401/Inostroza%20H%2C%20Daniela.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

IUGS, (1997). Quantitative risk assessment for slopes and landslides — the state of the art. In: Cruden, D., Fell, R. (Eds.), *Landslide Risk Assessment*. Balkema, Rotterdam.

Jaque et al, (2017). Fortaleciendo el uso de los instrumentos de planificación urbana, para la gestión de riesgos. Ciudad de coronel, Re Biobío. *Revista INVI*, 32 (90), 107124.

Lara, M. (2007). Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Universidad de Chile. [Archivo PDF].

Lavell, A. (2001). Sobre la Gestión del Riesgo: Apuntes hacia una Definición [versión electrónica]. Disponible en:
<http://www.ceprode.org.sv/staticpages/pdf/spa/doc15036/doc15036.htm>.

Lavell, A. (2003). La gestión Local del Riesgo. Nociones y precisiones entorno al concepto y la práctica. [Libro en línea] Cepredenac- PNUD.
<http://www.desenredando.org/guion/publicx/libro>.

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”, en *Revista Latinoamericana de Estudios Urbanos y Regionales (EURE)*, vol. 27, No. 81, pp. 97 -122. <https://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612001008100006>.

Mardones et al, (2004). Una contribución al estudio de los desastres naturales en Chile Centro Sur: efectos ambientales de las precipitaciones del 26 de junio del 2005 en el área Metropolitana de Concepción. *Invest. Geogr. Chile*, 38. [Archivo PDF].

Mardones, M. (2010). Procesos de remoción en masa asociados al sismo de 8.8 mw del 27/F 2010 en el litoral de Concepción, Chile. *Sociedad Hoy*.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=902/90223044003>.

Mardones, M. & Rojas, J. (2012). Procesos de remoción en masa inducidos por el terremoto del 27F de 2010 en la franja costera de la Región del Biobío, Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, (53), 57-74. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022012000300004>.

Martínez et al, (2017). Geomorfología de la llanura de San Pedro, San Pedro de la Paz. Libro Urbanización Humedal Los Batros. Obtenido de:
<https://www.urbancost.cl/2020/08/30/libroubanizacion-en-humedal-los-batros/>
Mergili, M., Marchant Santiago, C. I., & Moreiras, S. M. (2015). Causas,

características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, 24(2), 113-131.

Moncayo y Muñoz (2001). Elementos conceptuales generales. Evaluación de riesgos por fenómenos de remoción en masa: Guía Metodológica. (pp. 14-28). Santa Fe de Bogotá, Colombia: INGEOMINAS/Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca/Escuela Colombiana de Ingeniería.

Mora et al, (2002). Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: Resultados Obtenidos para la península de Papagayo mediante la modificación del método MoraVahrson. III Curso Internacional sobre microzonificación y su aplicación en la mitigación de desastres. [En Línea]. San José, Universidad de Costa Rica. Disponible en: <http://www.eird.org/deslizamientos/pdf/spa/doc15359/dosc15359-a.pdf>.

Mujica, S. & Pacheco, H. (2013). Metodología para la generación de un modelo de zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa, en la cuenca del río Camurí Grande, estado Vargas, Venezuela. Revista de Investigación, 37(80), 215-243. ISSN: 0798-0329. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=3761/376140395009>.

Muñoz, J. (1993). Geomorfología general. Espacios y sociedades. Serie General n°4. Editorial Síntesis España. <https://onggem.files.wordpress.com/2011/01/muc3b1oz-1995-la-biblia.pdf>.

Naranjo, J. (2018). Víctimas fatales causadas por remociones en masa en Chile 1928-2017. XV Congreso Geológico Chileno. Universidad de Concepción. Concepción. Chile. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/329370691_Victimas_fatales_causadas_por_remociones_en_masa_en_Chile_1928-2017.

ONU, (1991). Mitigation of Natural Disasters: Phenomena, Effects, and Options. A Manual for Policy Makers and Planners. New York: UNDRO.

Ortiz J. et al, (2016). Estimación de la Variabilidad Espacial de Eventos de Precipitación usando métodos geoestadísticos. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. XVII Congreso Chileno de Hidráulica. Extraído de https://www.researchgate.net/publication/311830827_Estimacion_de_la_variabilidad_espacial_de_eventos_de_precipitacion_usando_metodos_geoestadisticos

Rodríguez, C. (2000). Geomorfología. Instituto Minero Metalúrgico. Facultad de Geología y Minas. Departamento de Geología. [Archivo PDF]. <http://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1661/RodriguezG.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

- Rojas, O. & Martínez, C. (2011). Riesgos naturales: evolución y modelos conceptuales. *Revista Universitaria de Geografía*, 20, 83-116. ISSN: 0326-8373. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=3832/383239103004>.
- Román, J. (2018). Más frecuentes y más al norte: los temporales en el Chile del siglo XXI. Disponible en: <https://www.pauta.cl/ciencia-y-tecnologia/mas-frecuentes-y-mas-al-norte-los-temporales-en-el-chile-del-siglo-xxi>
- Romero, H. (1985). "Geografía de los climas", Instituto Geográfico Militar, Colección Geografía de Chile. Tomo XI. Santiago: Instituto Geográfico Militar.
- Rubio, E. (2015). Evaluación del riesgo por remoción en masa en el sector sur occidente de la comuna 18 de Santiago de Cali. Universidad del Valle. Facultad de humanidades. Departamento de Geografía. Santiago de Cali.
- Servicio Nacional de Geología y Minería, (2017). Principales desastres ocurridos desde 1980 en Chile. [Archivo PDF]. <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Primer-Catastro-Nacional-Desastres-Naturales.pdf>.
- SERNAGEOMIN, (1980 – 2015). Registro de los principales desastres de origen geológico en Chile y efectos sobre la población y bienes públicos y privados. [Archivo PDF].
- Sepúlveda et al, (2009). Susceptibilidad de Remoción en Masa en la zona cordillerana de Santiago mediante métodos estadístico multivariados. XII Congreso Geológico Chileno. Santiago 22- 26 noviembre 2009. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. [Archivo PDF]. https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/12993_v1_S3_021.pdf.
- Sepúlveda et al, (2006). Landslide hazards in Santiago, Chile.
- Sidle, R.C. & Ochiai, H. (2006). Landslides: processes, prediction, and land use. *Water Resources Monograph*; 18. American Geophysical Union, Washington DC.
- Strahler, A. (1986). *Geografía Física*. Ediciones Omega. Barcelona.
- Tarolli, et al, (2011). Modeling shallow landsliding susceptibility by incorporating heavy rainfall statistical properties. *Geomorphology*.
- Thomas, G. & Crozier, M. (2005). "The Nature of Landslide Hazard Impact". En *Landslide Hazard and Risk*, editado por Thomas Glade, Malcom Anderson y Michael J. Crozier, 43-74. Chichester: Wiley.
- UNDRO, (1979). Natural disasters and vulnerability analysis. Informe de reunión del Grupo de expertos. Ginebra, Oficina Coordinadora de las Naciones Unidas para el Socorro en Caso de Desastre.

- Vargas et al, (2000). Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. Revista geológica de Chile, 27(2), 157-176. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.4067/S0716-02082000000200002>.
- Varnes, D. (1978). SLOPE MOVEMENTS, TYPE AND PROCESSES. In: Schuster R.L. & Krizek R.J. (Eds.), Landslides analysis and control. Washington Transportation Research Board, Special Report 176. National Academy of Sciences, WA , 11-33.
- Varnes, D. (1984). Landslide Hazard Zonation: a review of principles and practice. International Association of Engineering Geology Commission on Landslide and other Mass Movements on Slopes, UNESCO, Natural Hazards N°3: 61.
- Vidal, C. y Romero, H. (2006). Efectos geomorfológicos e hidrográficos de la expansión urbana del gran concepción y su relación con el incremento de riesgos naturales entre 1955 y 2006. Congreso de Geografía. Universidad de Concepción. [Archivo PDF].
- Yacoob, A, (1985). Repensando la ciudad del tercer mundo. Informe del encuentro de Estocolmo: Suecia. Buenos Aires. Grupo editor Latinoamericano. [Archivo PDF].