Universidad de Concepción

EULACHILE
CENTRO DE CIENCIAS AMBIENTALES

"CONSULTORÍA SOBRE INFRAESTRUCTURA ECOLÓGICA Y RIESGO DE DESASTRES EN UN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO, PARA LA PROVINCIA DE CONCEPCIÓN"

CAPÍTULO 2
COMPONENTE DE AMENAZAS Y RIESGOS DE DESASTRES

Concepción, 11 de abril 2025

CONTENIDO

1. ANTECEDENTES 1
2. MARCO METODOLÓGICO 2
3. RESULTADOS 8
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL Y SU EVOLUCIÓN FUTURA DE LAS AMENAZAS NATURALES Y ANTRÓPICAS. 8
I. Inundación por tsunami 8
II. Inundación por desborde de cauces 17
III. Remoción en masa 25
IV. Sequía 30
V. Erosión costera 35
VI. Transporte de carga peligrosa, actividades y materiales peligrosos 41
VII. Vertederos y Rellenos Sanitarios 64
VIII. Incendios forestales 72
3.2. CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS AMENAZAS 79
3.3. ELABORACIÓN DE MAPAS MULTI-AMENAZAS 84
3.4. ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD Y EXPOSICIÓN 87
4. CONCLUSIONES 108
5. BIBLIOGRAFÍA 109
6. ANEXOS 115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Nube de palabras principales amenazas en provincia de Concepción. 3
Figura 2. Diagrama de eventos asociado a su nivel de riesgo sobre el territorio de la provincia. 5
Figura 3. Mapas de amenaza de tsunami en Pingueral-Dichato-Coliumo. a) Carta de Inundación por tsunami del SHOA. b) Estudio SUBDERE- UBB. c) Mapa evacuación SENAPRED. 9
Figura 4. Mapas de amenaza de tsunami en zona Tomé centro y Bellavista. A) Carta de Inundación por tsunami del SHOA. b) Estudio SUBDERE- UBB. c) Mapa evacuación SENAPRED. 10
Figura 5. Mapas de amenaza de tsunami sectores Penco-Lirquén. a) Carta de Inundación por tsunami del SHOA. b) Estudio SUBDERE- UBB. c) Mapa de evacuación SENAPRED. 10
Figura 6. Mapas de amenaza de tsunami para las comunas de Concepción, Talcahuano y Hualpén. a) Carta de Inundación por tsunami del SHOA. b) Zona de amenaza de tsunami según SERNAGEOMIN. c) Estudio SUBDERE- UBB. d) Mapa de evacuación SENAPRED. 11
Figura 7. Mapas probabilísticos de inundación por tsunami para Talcahuano y Hualpén. a) Inundación asociada a una probabilidad de excedencia de 2% en 50 años (Periodo de Retorno de 2.575 años). b) Inundación asociada a una probabilidad de excedencia de 0.5% en años (Periodo de retorno de 9.975 años). 12

Figura 8. Mapas de amenaza de tsunami en San Pedro de la Paz. a) Carta de Inundación por tsunami del SHOA. b) Estudio SUBDERE- UBB. c) Mapa de Inundación por tsunami en la "Actualización del estudio de riesgos naturales y antrópicos San Pedro de la Paz". d) Mapa de evacuación SENAPRED. 13
Figura 9. Mapas de amenaza de tsunami en Coronel. a) Carta de Inundación por tsunami del SHOA. b) Estudio SUBDERE- UBB. c) Mapa de Inundación por tsunami en "Estudio Fundado de Riesgos, diagnóstico de peligros naturales en la comuna de Coronel". d) Mapa de peligro de tsunami SERNAGEOMIN. e) Mapa de evacuación por tsunami SENAPRED. 14
Figura 10. Mapas de amenaza de tsunami en Lota. a) Carta de Inundación por tsunami del SHOA. b) Estudio SUBDERE- UBB. c) Mapa de peligro de tsunami SERNAGEOMIN. d) Mapa de evacuación por tsunami SENAPRED. 15
Figura 11. Mapa provincial de amenaza por tsunami. 16
Figura 12. Profundidad, velocidad e intensidad de inundaciones por desborde del río Biobío ante caudales con T=10, 50, 100 y 500 años. 18
Figura 13. Amenaza de las inundaciones por desborde del río Biobío. 19
Figura 14. Ejemplo de sectores amenazados por inundaciones por desborde del río Biobío. 20
Figura 15. Profundidad, velocidad y peligrosidad de inundaciones por desborde del río Andalién ante caudales con T=10, 50, 100 y 500 años 21
Figura 16. Amenaza de las inundaciones por desborde del río Andalién. 22
Figura 17. Crecida registrada en junio de 2024 en río Andalién. Sector Bellavista. 22
Figura 18. Sectores amenazados por inundaciones por desborde del río Andalién. 23
Figura 19. Mapa provincial de amenaza por desborde de cauce. 24
Figura 20. Mapa provincial de amenaza por Remociones en masa. 29
Figura 21. Valores de SPI para Concepción. 32
Figura 22. Análisis espacial de los eventos de sequía meteorológica 1980-2020. A) Número de eventos de sequía, B) Magnitud máxima SPI para el área de estudio; C) Máxima duración en meses de eventos de sequía 33
Figura 23. Mapa provincial de amenaza por sequía meteorológica. 34
Figura 24. Localización de las playas analizadas en la provincia de Concepción. 36
Figura 25. Tasa de erosión (m/año) en playas de la provincia de Concepción. 39
Figura 26. Mapa provincial de amenaza por erosión costera. 40
Figura 27. Ubicación del almacenamiento de sustancias peligrosas en la provincia de Concepción. 42
Figura 28. Modelación fuga de peróxido de hidrogeno en condiciones atmosféricos del escenario 1. La modelación se ilustra en la localización Punto 1. 46
Figura 29. Modelación de derrame e incendio de (a) butano, (b) isooctano y (c) metanol en condiciones atmosféricos del Escenario 2 con una abertura de escape de la sustancia circular de 5 cm de diámetro y una altura de la abertura del estanque de un 10 %. 47
Figura 30. Modelación de Explosión BLEVE para butano en condiciones atmosféricas del Escenario 2. Estas modelaciones se ilustran en la localización (a) Punto 3 y (b) Punto 4. 49
Figura 31. Modelación de transporte de gas cloro en condiciones atmosféricos del (a) Escenario 1 y (b) del Escenario 2. Estas modelaciones se ilustran en la localización Punto 5. 50
Figura 32. Modelación de (a) derrame e incendio y (b) explosión BLEVE para transporte de isooctano en condiciones atmosféricas del Escenario 2 con una abertura de escape de la sustancia circular de 5 cm de diámetro. 51
Figura 33. Modelación de (a) fuga e incendio y (b) fuga y área inflamable de nube de vapor, para hidrógeno en condiciones atmosféricos del Escenario 2. 52
Figura 34. Modelación de fuga de ácido nítrico al 70 %, considerando un almacenamiento de 4,5 m3, con un charco de evaporación de 2 m^2 en condiciones atmosféricos del Escenario 1. 53

Figura 35. Modelación de fuga de cloro gas (fuente instantánea) considerando un almacenamiento de (a) 34,73 m^3 en condiciones atmosféricos del Escenario 1.....54
Figura 36. Modelación de fuga de amoniaco (fuente instantánea) considerando un almacenamiento de (a) 3 m^3 como líquido en condiciones atmosféricos del Escenario 1.....55
Figura 37. Distancias de seguimiento recomendadas para la planificación del uso del suelo sin conocimiento de los detalles.....58
Figura 38. Mapa provincial de amenaza por transporte de sustancia peligrosa por modelación de derrame e incendio de butano. A) Incluye zoom de la amenaza en la ruta 160.....61
Figura 39. Amenaza Rellenos Sanitarios en área de estudio (A) Cemarc y (B) Hidronor.....69
Figura 40. Amenaza Vertederos en área de estudio (A) vertedero Carriel Norte, (B) Vertedero Cosmito y (C) Playa Negra.....70
Figura 41. Mapa provincial de amenaza por vertederos y rellenos sanitarios.....71
Figura 42. Amenaza de incendios forestales sobre la base de datos de CONAF (2021).....74
Figura 43. Amenaza de incendios forestales sobre la base del ajuste de los datos de CONAF (2021), usando el registro de áreas incendiadas en los últimos 23 años (2001-2023).....75
Figura 44. Mapa provincial de amenaza por incendios forestales.....78
Figura 45. Distribución Multiamenazas.....85
Figura 46. Suma de niveles Muy alto y alto.....86
Figura 47. Gráfico de Habitantes y Viviendas provincia de Concepción.....87
Figura 48. Exposición de Habitantes.....88
Figura 49. Exposición de Viviendas.....89
Figura 50. Elementos Funcionales.....90
Figura 51. Exposición total, superficie en hectáreas.....91
Figura 52. Exposición Final.....92
Figura 53. Vulnerabilidad por tipo de vivienda.....93
Figura 54. Vulnerabilidad por materialidad de la pared.....94
Figura 55. Vulnerabilidad por materialidad del techo.....95
Figura 56. Vulnerabilidad por estado de la vivienda.....96
Figura 57. Vulnerabilidad Física.....97
Figura 58. Vulnerabilidad Total.....98
Figura 59. Vulnerabilidad Total.....99
Figura 60. Porcentaje de superficie para riesgos analizados.....100
Figura 61. Riesgo de Inundación por Tsunami.....101
Figura 62. Riesgo de Inundación por Desborde de Cauce.....102
Figura 63. Riesgo de Remoción en Masa.....103
Figura 64. Riesgo de Sequía.....104
Figura 65. Riesgo de Transporte de carga peligrosa.....105
Figura 66. Riesgo Vertederos y Rellenos Sanitarios.....106
Figura 67. Riesgo Incendio Forestal.....107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Amenazas naturales y antrópicas.....2
Tabla 2. ¿Cuáles son las principales desastres o amenazas en la provincia de Concepción?.....3
Tabla 3. Baremo probabilidad (P) y consecuencias (C) asociada a la evaluación cualitativa del riesgo.....4
Tabla 4. Priorización de amenazas realizadas por el equipo y actores claves con grado de acuerdo.....5
Tabla 5. Criterios y/o consideraciones en amenazas priorizadas para la Etapa 2.....6

Tabla 6. Niveles de amenaza y su descripción.....7
Tabla 7. Niveles de amenaza inundación por Tsunami. 15
Tabla 8. Caudales asociados a cada periodo de retorno.....17
Tabla 9. Criterios para asignar niveles de amenaza de inundación por desborde de cauces en función de la recurrencia modelada y la intensidad resultante del modelo. 17
Tabla 10. Factores de susceptibilidad para evaluación de la susceptibilidad de Remociones en Masa.....25
Tabla 11. Niveles de amenaza por remoción en masa. 28
Tabla 12. Categorización de índices SPI para el estudio. 31
Tabla 13. Cuenta de eventos de sequía para el área de estudio.....31
Tabla 14. Niveles de amenaza Erosión costera. 35
Tabla 15. Características morfométricas de las playas analizadas.....37
Tabla 16. Tasas de erosión en las playas analizadas, período 1980-2023/24. 39
Tabla 17. Tasas de erosión período en playas analizadas, período 1992-2017/18.....39
Tabla 18. Escenarios modelados de accidentes con sustancias peligrosas con el software ALOHA. 43
Tabla 19. Escenario de condiciones atmosféricas para la modelación de accidente de sustancias peligrosa. 44
Tabla 20. Niveles de amenaza que el software ALOHA dimensiona para cada modelación. 45
Tabla 21. Área de Impacto Potencial por Materiales Peligrosos. 57
Tabla 22. Distancias de aislamiento inicial y acciones de protección para derrames grandes para las sustancias Amoniaco Anhidro y Cloro. 57
Tabla 23. Ejemplos de distancias genéricas de separación entre industria y usos sensibles (EPA 2005).....59
Tabla 24. Niveles de amenaza para el transporte de sustancia peligrosa por modelación de derrame e incendio de butano.....60
Tabla 25. Caracterización áreas zona industrial, extracto de la memoria explicativa de la modificación plan regulador Metropolitano de Concepción (2017). 62
Tabla 26. Criterios para el establecimiento de niveles de amenaza para zonas/instalaciones que almacenan sustancias peligrosas. Fuente: Elaboración propia.....63
Tabla 27. Sitios de disposición de residuos sólidos considerados en el análisis. 64
Tabla 28. Criterios de niveles de amenaza.....68
Tabla 29. Reclasificación de las 6 categorías originales de CONAF en 4 categorías del estudio de riesgos del AMC. 72
Tabla 30. Amenaza original CONAF y su reclasificación. 73
Tabla 31. Reclasificación de amenaza, incorporando ocurrencia últimos 23 años, y su reclasificación.....74
Tabla 32. Grado de amenaza por incendios forestales en el Área Metropolitana de Concepción. 76
Tabla 33. Objetivo del proyecto, tipologías de ingreso al SEIA, impactos y riesgos en el contexto de cambio climático (Extraído de la Guía SEA 2023).....80
Tabla 34. Análisis preliminar de tendencias asociadas al comportamiento de amenazas exógenas para la provincia de Concepción. 83
Tabla 35. Resumen de Potenciales Impactos del Cambio Climático en los Sitios de Disposición de Residuos Sólidos Domiciliarios.....84
Tabla 36. Elementos expuestos en la provincia de Concepción.....87
Tabla 37. Superficie de Riesgos Analizados. 100

ANEXOS

Anexo 1. Ponderación de los Indicadores de Susceptibilidad. 115
Anexo 2. Tipos de Procesos de Remociones....116
Anexo 3. Distribución de los eventos por Pendiente. 116
Anexo 4. Distribución de los eventos por Serie de Suelo. 117
Anexo 5. Distribución de los eventos por Geología. 117
Anexo 6. Distribución de los eventos por Cobertura de Suelo. 118
Anexo 7. Distribución de los eventos por Distancia de Caminos. 119
Anexo 8. Distribución de los eventos por Distancia de Fallas. 119
Anexo 9. Indicadores de Susceptibilidad Normalizados: Pendiente. 120
Anexo 10. Indicadores de Susceptibilidad Normalizados: Orientación. 121
Anexo 11. Indicadores de Susceptibilidad Normalizados: Serie de Suelos....122
Anexo 12. Indicadores de Susceptibilidad Normalizados: Cobertura de Suelos. 123
Anexo 13. Indicadores de Susceptibilidad Normalizados: Geología....124
Anexo 14. Indicadores de Susceptibilidad Normalizados: Caminos....125
Anexo 15. Indicadores de Susceptibilidad Normalizados: Fallas Geológicas....126
Anexo 16. Susceptibilidad a Remociones en masa Provincia de Concepción. 127
Anexo 17. Valores de SPI para Chiguayante....129
Anexo 18. Valores de SPI para Coronel. 129
Anexo 19. Valores de SPI para Florida. 130
Anexo 20. Valores de SPI para Hualpén....130
Anexo 21. Valores de SPI para Hualqui. 131
Anexo 22. Valores de SPI para Lota. 131
Anexo 23. Valores de SPI para Penco....132
Anexo 24. Valores de SPI para San Pedro de la Paz. 132
Anexo 25. Valores de SPI para Santa Juana. 133
Anexo 26. Valores de SPI para Talcahuano. 133
Anexo 27. Valores de SPI para Tomé. 134

1. ANTECEDENTES

El territorio de la provincia de Concepción es diverso desde el punto de vista geográfico, se desarrolla a lo largo de un litoral de 60 km, con centro en la desembocadura del Biobío ocupando el margen occidental de la Cordillera de la Costa. La morfología fue modelada por cordilleras, cerros, lagunas y ríos; elementos estructurantes de los procesos de ocupación y expansión urbana ocupando valles y laderas con menor pendiente. La estructura urbana también ha sido orientada por la presencia de bahías y áreas de llanuras en la zona costera, un territorio expuesto a los riesgos de tsunami e inundación y que concentra el 60% de la población metropolitana. En la configuración territorial también se destaca la Cordillera de Nahuelbuta y cerros interiores, sistemas montañosos con pendientes pronunciadas, que dificultan la ocupación y se relacionan con las amenazas de remoción en masa.

Sin embargo, es relevante indicar que el desarrollo no armónico de los componentes físicos, sociales y económicos genera situaciones de riesgo y eventualmente desastres que dificultan el desarrollo en su sentido más amplio. Por ello se menciona que el riesgo es una construcción social, Rojas y Martínez (2012) lo definen como la probabilidad de ocurrencia de "cualquier fenómeno de origen natural o humano que signifique un cambio en el medio ambiente donde se localiza una comunidad determinada, que sea vulnerable a ese fenómeno". En concreto, para que el riesgo se materialice deben converger sobre un territorio los denominados factores del riesgo: amenaza, vulnerabilidad y exposición (Ayala-Carcedo y Olcina, 2002). Entonces cuando una amenaza se materializa con una magnitud o intensidad de relevancia puede generar un desastre (materialización del riesgo), siempre que existan condiciones exposición y vulnerabilidad del emplazamiento o actividades económicas.

En un territorio diverso desde el punto de vista de los sistemas naturales y con una concentración de actividades económicas relevante, podemos encontrar amenazas de origen natural y antrópicas con niveles de afectación comunales o intercomunales, cuyo desarrollo en términos de magnitud y frecuencia se encuentra condicionado por una serie de factores. Actualmente, se investigan como las condiciones del Cambio Climático pueden cambiar el patrón de comportamiento de las amenazas a medida que nos alejamos de las condiciones climáticas actuales. El último informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) es claro al señalar que se espera una modificación de las variables que definen las amenazas existentes como la magnitud, frecuencia, duración, tiempo o extensión espacial. También será posible observar nuevos tipos de eventos extremos resultantes del efecto combinado de las amenazas existentes.

Ante este escenario cobra especial relevancia el desarrollo y la construcción social de la vulnerabilidad, que se traduce en asentamientos en áreas susceptibles a las amenazas en niveles no aceptables, sin embargo, una parte importante del crecimiento histórico de las ciudades se realizó sin la visión del riesgo. Hoy en día el desafío debe centrarse en reducir las vulnerabilidades en áreas urbanas consolidadas e impedir la generación de nuevas condiciones de vulnerabilidad en áreas altamente expuestas a diferentes amenazas. Este desafío, cobra más relevancia ante la crisis habitacional que vive Chile, que se ha traducido en campamentos que muestran condiciones de asentamientos precarias y expuestos a múltiples amenazas como inundaciones, incendios y remociones en masa.

Es inundable que en las últimas dos décadas se ha avanzado en la consideración del riesgo en los instrumentos de Planificación Territorial, sin embargo, la efectividad en la reducción del riesgo continúa siendo discutida a nivel científico y técnico. Por ejemplo, un análisis de los

Planes Reguladores Comunales de la provincia mostró que existe una evidente disparidad en la forma de identificar y designar a las áreas de riesgo, en ocasiones se señalan como zonas de restricción por diferentes razones como existencia de canales o parques y en el mismo instrumento se indica una zona de protección de ladera. También se identifican zonas de protección ecológica y zonas protección de quebradas y cursos de agua no por constituir una amenaza sino por su condición de patrimonio paisajístico.

El presente capítulo avanza en la generación de información a escala provincial homologando los criterios para diferentes amenazas de origen natural y antrópico, caracterizando su situación actual y futura frente a escenarios de Cambio Climático. También contribuye a identificar vacíos de datos o brechas de información, para proponer estudios futuros que permitan profundizar en las amenazas y riesgos existentes para la planificación metropolitana.

El capítulo cuenta con un breve apartado metodológico que permite sentar las bases para el análisis de las amenazas consideradas a escala metropolitana. Posteriormente se presentan los resultados que incluyen una breve síntesis de la metodología expuesta y los principales productos asociados al análisis de las amenazas metropolitanas, el cambio climático en las amenazas y los análisis de vulnerabilidad y riesgo de desastres. Finalmente se exponen las principales conclusiones del informe en términos de los resultados y de las brechas identificadas. Los resultados aquí expuestos pueden sufrir modificaciones según las reuniones con los organismos técnicos de validación reconocidos por el Estado, proceso que actualmente se encuentra en desarrollo.

2. MARCO METODOLÓGICO

El presente estudio comenzó con un análisis de antecedentes y recurrencia histórica asociada a 15 amenazas de origen natural y antrópico (**Tabla 1**). Posteriormente se identificaron aquellas amenazas de importancia metropolitana, asociados a eventos que pueden impactar a dos o más comunas; ello implica que hay amenazas que tienen dimensiones o características locales que debieran planificarse a nivel comunal y distinguirlas de aquellas que presentan dimensiones intercomunales. Para ello se realizó una metodología mixta, que contó con: i) participación de actores claves, ii) evaluación técnica con antecedentes históricos.

Tabla 1. Amenazas naturales y antrópicas.

Categoría de amenaza	Amenaza específica
Inundaciones	Tsunami
	Desborde de cauces - Anegamientos
Gravitacional	Remociones en masa (Inestabilidad de laderas, Caída de material rocoso, Dispersiones laterales, Flujo de Detritos y Barro (Aluviones)
Sísmico	Falla Geológica
	Licuefacción
Otras amenazas	Temperaturas extremas
	Déficit hídrico
	Tornados
	Marejadas-Erosión costera
Antrópicas	Actividades y Transporte de sustancias peligrosas
	Sitios contaminados o con potencial presencia de contaminantes
	Vertederos y rellenos sanitarios Subsidencia
	Incendios forestales

Fuente: Elaboración propia.

Actores claves

52 actores participaron en un taller para definir las amenazas metropolitanas. En la **Figura 1** se observan las respuestas en la plataforma Mentimeter a una pregunta abierta, donde predominaron las amenazas de tipo natural (remociones en masa, inundaciones, tsunami), y a nivel antrópico los incendios forestales. La **Tabla 2** muestra los resultados filtrados (eliminado los riesgos en plural), se observa que los incendios forestales, inundaciones, remoción en masa y tsunami son las cuatro principales amenazas más percibidas por los actores.

Posteriormente, cada participante asignó el grado de importancia en escala de 1 a 5 a diversas amenazas desde un listado predefinido por el equipo, en concordancia con las amenazas incorporadas señaladas en la tabla anterior. Las amenazas más importantes (4-5) correspondieron a: Incendios forestales, tsunami, inundaciones por desborde de cauces y anegamientos, déficit hídrico, remociones en masa. En un segundo grupo (3,5-3,9) se encuentran: Sitios contaminados o inestables, licuefacción, temperaturas extremas, transporte de sustancias peligrosas, erosión costera, efecto sitio (sísmico). Finalmente, el trabajo fue complementado en mesas de discusión grupal, cuya síntesis se muestra en la **Tabla 4**.

Figura 1. Nube de palabras principales amenazas en provincia de Concepción.



Fuente: Plataforma Mentimenter.

Tabla 2. ¿Cuáles son las principales desastres o amenazas en la provincia de Concepción?.

Amenaza	Menciones
Incendio Forestal	39
Inundación	38
Remoción en masa	23
Tsunami	21
Anegamiento	3
Desertificación	1
Marejadas	1

Fuente: Elaboración propia a partir de respuestas en Mentimenter.

Evaluación técnica según antecedentes históricos

Para una segunda aproximación de priorización se realizó una evaluación interna sin considerar los antecedentes de los talleres de participación. Se aplicó la matriz de probabilidad por consecuencias (**Tabla 3**). Las probabilidades se asocian a la ocurrencia de amenaza

(SUBDERE, 2011), con el objeto de estandarizar la evaluación consideró un evento de una magnitud de mediana o alta intensidad. En el caso de las consecuencias se trabajó sobre los conceptos de efectos (Ej. viviendas, infraestructura crítica, fallecimientos, heridos, enfermedades, entre otros), mitigación y recuperación considerando el radio de acción de la amenaza.

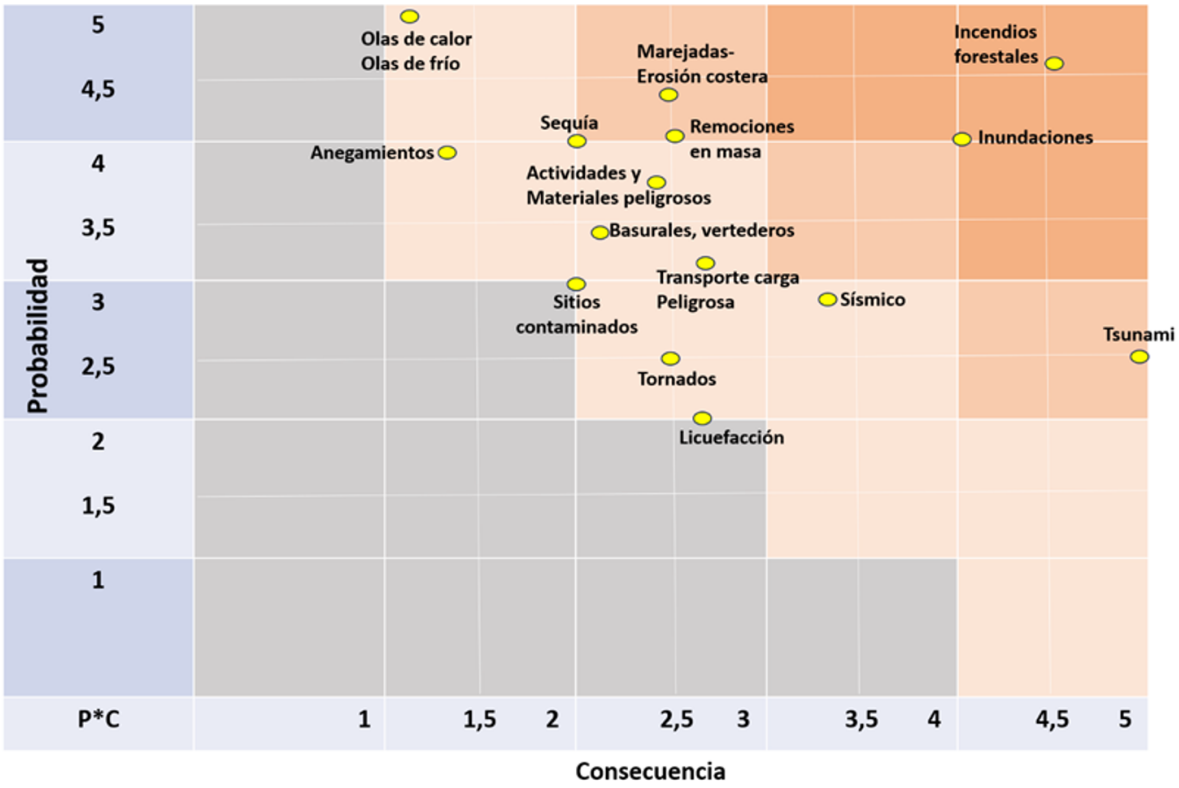
Tabla 3. Baremo probabilidad (P) y consecuencias (C) asociada a la evaluación cualitativa del riesgo.

P	Descripción	C	Descripción
5	Ocurre más de una vez por año	5	Las consecuencias de la amenaza serán muy perjudiciales y puede resultar difícil recuperarse. Radio de acción intercomunal
4	Ocurre una vez entre 1 y 10 años	4	Las consecuencias de la amenaza serán significativas y pueden causar daños a largo plazo. Radio de acción comunal.
3	Ocurre una vez entre 10 y 50 años	3	Las consecuencias de la amenaza tardarán en mitigarse. Radio de acción local-comunal
2	Ocurre una vez entre 50 y 100 años	2	Las consecuencias de la amenazase gestionarán con facilidad. Radio acción local
1	Ocurre cada 100 años y más	1	La amenaza generará pocas consecuencias si ocurriera. Radio de acción local

La **Figura 2** ilustra en un plano la relación entre probabilidad por consecuencia. Es posible observar el producto de dicha relación expresado en cuatro cuadrantes: gris (riesgo bajo), damasco suave (riesgo moderado), damasco medio (riesgo alto) y damasco intenso (riesgo muy alto). En la categoría muy alta se ubicaron incendios forestales e inundaciones por desborde de cauces, posteriormente destaca erosión costera, remociones en masa y tsunami como riesgos altos. Por último, el siguiente grupo de amenazas se ubicó en el cuadrante de moderado, con matices asociados a su mayor proximidad al área de alto riesgo (ej. Transporte de carga peligrosa) o bajo riesgo (ej. Anegamientos).

La **Tabla 4** resume la priorización realizada por el equipo técnico del estudio asociada a la matriz de probabilidad x consecuencia (P*C) y los actores claves. Cada amenaza fue clasificada en 3 niveles (alto, medio, bajo), los colores idénticos en una misma fila indican consenso respecto a la priorización. El resultado final se expresó en 5 categorías según la combinación de la prioridad asignada por cada grupo de actores, las amenazas más relevantes (categoría 5 con alto consenso) correspondieron a: incendios forestales, inundaciones por cauces, tsunami y remociones en masa. En un segundo grupo de importancia media alta se encuentran erosión costera, transporte de sustancias peligrosas y actividades-materiales peligrosos.

Figura 2. Diagrama de eventos asociado a su nivel de riesgo sobre el territorio de la provincia.



Fuente: Elaboración propia a partir de los antecedentes del informe.

Tabla 4. Priorización de amenazas realizadas por el equipo y actores claves con grado de acuerdo.

Amenazas	P*C	Equipo	Actores	Priorización	Acuerdo con Contraparte. (Estudio comunal/ Metropolitano)
Incendios forestales	18,4	Alto	Alto	5	
Inundaciones por cauces	16	Alto	Alto	5	
Tsunami	12	Alto	Alto	5	
Marejadas-erosión costera	10,56	Alto	Medio	4	
Remociones en masa	10,4	Alto	Alto	5	
Sísmico (efecto sitio)	9,52	Medio	Bajo	2	
Actividades y materiales peligrosos	9,12	Medio	Alto	4	
Transporte carga peligrosa	8,96	Medio	Alto	4	
Sequía (déficit hídrico)	8,8	Medio	Medio-alto	3	
Basurales, vertederos, rellenos	7,48	Medio	Medio	3	
Temperaturas (olas calor-olas de frio)	7	Bajo	Medio-Alto	2	
Sitios contaminados	6,6	Bajo	Medio	2	
Tornados	6,25	Bajo	Bajo	1	
Anegamientos	5,6	Bajo	Bajo	1	
Licuefacción	5,4	Bajo	Bajo	1	

Fuente: Elaboración propia. Nota combinación asociada a la priorización en 5 categorías: Alto-Alto (5); Alto-Medio (4); Medio-Medio (3); Bajo-Medio (2); Bajo-Bajo (1).

Criterios y observaciones para amenazas priorizadas

La aplicación de la metodología anteriormente descrita derivó en la consideración de 8 amenazas priorizadas en tres categorías más altas: media (3), media-alta (4), alta (5). Los análisis de amenazas típicamente son abordados con modelaciones numéricas o bien mediante analizas de susceptibilidad, el criterio depende de la disponibilidad y calidad de los datos, y de los recursos disponibles. Los modelos de susceptibilidad se asocian a la "la capacidad o potencialidad de una unidad geológica o geomorfológica de ser afectada o generar una amenaza. Representa la posibilidad espacial de ocurrencia y no establece relación alguna con la probabilidad temporal de que se produzca el proceso" (Sernageomin, sin fecha). Dichos modelos son aplicables en amenazas como incendios forestales, anegamientos entre otros. La **Tabla 5** resume algunos criterios y consideraciones de importancia para los análisis de las amenazas priorizadas.

Tabla 5. Criterios y/o consideraciones en amenazas priorizadas para la Etapa 2.

Prioridad	Amenaza	Información espacial disponible a escala provincial	Modelo a utilizar	Observaciones/ comentarios
5	Incendios forestales	Se actualizó	Susceptibilidad	Se consideró de base el modelo de CONAF.
5	Inundaciones por cauces	Se mejoró batimetría y topografía	Hidráulico	Se realizó modelación para cauces metropolitana: Andalién – Biobío.
5	Tsunami	Existe	No aplica	Se utilizó la información existente proveniente desde el SHOA.
5	Remociones en masa	Parcialmente, permitió validar modelos	Susceptibilidad	Se aplicó un modelo de susceptibilidad.
4	Marejadas-erosión costera	Parcialmente, la cobertura existe para la zona localizada al sur del Biobío.	Evolución histórica	Faltó cobertura de imágenes para la zona norte del Biobío.
4	Actividades y materiales peligrosos	Información de zonas industriales o de concentración de actividades	Modelación en estanques de almacenamiento	En industrias seleccionadas.
4	Transporte carga peligrosa	Información de sustancias transportadas	Modelación	Modelación evento/sustancia en casos seleccionados. Consideró la probabilidad de accidente/consecuencias y extrapola resultado en rutas con sustancia
3	Sequía	Datos de Arclim para sequía meteorológica	Amenazas de ARClim	Según SPI para sequía meteorológica.
3	Basurales, vertederos, rellenos	Información puntual de los sitios	Análisis por sitio	Criterios diferenciados para basurales y rellenos sanitarios.

Nota: Actividades y materiales peligrosos y transporte carga peligrosa se consideran en una misma categoría de amenaza.

Niveles de la amenaza

Las amenazas fueron analizadas procurando establecer 4 niveles (muy alto, alto, moderado y poco significativo), situación idéntica a la vulnerabilidad. Para el establecimiento de los niveles se consideraron las recomendaciones de la Guía Minvu "Guía metodológica para la elaboración de estudios de riesgo de los planes reguladores del nivel comunal e intercomunal" (versión preliminar) (**Tabla 6**).

Tabla 6. Niveles de amenaza y su descripción.

Nivel	Descripción
Muy Alto	Áreas donde los efectos de la amenaza no pueden considerarse mitigables porque no es posible desarrollar medidas para subsanar estos efectos a un nivel suficientemente seguro o bien, las medidas de mitigación podrían afectar a terceros. Áreas donde los factores que condicionan la ocurrencia de la amenaza hacen que la amenaza sea inminente. En comparación con el resto del territorio, en estas áreas la amenaza es más habitual. En caso de desencadenarse un escenario poco habitual (comparable a los mayores eventos del registro histórico), estas áreas sufrirían profundas modificaciones morfológicas, Se recomienda que en estas áreas quede contenido el mayor número de eventos del inventario, manteniendo, a la vez, el mínimo de superficie sobre el territorio. Es decir, este nivel debe tener los valores más altos de densidad de eventos del inventario, incluso si esta no es calculada.
Alto	Áreas donde, a pesar de que sí es posible desarrollar medidas que permitan mitigar los efectos de la amenaza hasta un nivel lo suficientemente seguro, sin que dichas medidas afecten a terceros, previamente sus efectos se consideran como críticos o no aceptables. Son áreas donde los factores que condicionan la ocurrencia de la amenaza hacen que esta sea probable, pero no inminente. Aun cuando los eventos más habituales de la amenaza no logran afectar estas áreas, existen registros históricos de eventos que sí las han afectado. En caso de desencadenarse un escenario poco habitual (es decir, comparable a los mayores eventos del registro histórico), estas áreas podrían sufrir modificaciones de consideración en las morfologías del lugar.
Moderado	Áreas que pueden ser afectadas por la amenaza, pero cuyos efectos se consideran aceptables. Si bien estas áreas no cuentan con registros históricos de eventos que la hayan afectado, los factores que condicionan su ocurrencia hacen que la amenaza sea posible, pero poco probable. En caso de desencadenarse un escenario poco habitual (es decir, comparable a los mayores eventos del registro histórico), estas áreas sufrirían algunos cambios en las morfologías del lugar, de poca consideración.
Poco significativo	Áreas donde la amenaza es poco probable y/o lo suficientemente poco intensa como para asumir que no es esperable su ocurrencia sobre el territorio. En un peor escenario, estas áreas sufrirían alteraciones menores o despreciables en la geomorfología del lugar.

Fuente: Guía metodológica para la elaboración de estudios de riesgo de los planes reguladores de nivel comunal e Intercomunal. Pág. 53. Versión preliminar.

A continuación, se describen los principales resultados del estudio acompañados de una breve síntesis metodológica.

3. RESULTADOS

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL Y SU EVOLUCIÓN FUTURA DE LAS AMENAZAS NATURALES Y ANTRÓPICAS.

I. Inundación por tsunami

Para la definición de los niveles de amenaza de tsunami se utilizó un enfoque de análisis de antecedentes cartográficos disponibles a partir de diversas fuentes, el que fue realizado por comuna del borde costero. Se consideró:

- Cartas de inundación por tsunami del SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile). Se elaboran utilizando modelos matemáticos y simulaciones numéricas que consideran diferentes factores, como la batimetría y la geomorfología costera. Proveen información sobre la altura que podría alcanzar el agua en diferentes puntos de la costa y la extensión de la inundación tierra adentro. Algunos de los escenarios usados por el SHOA se basan en eventos históricos y otros en eventos hipotéticos extremos más probables. Todas las localidades de interés poseen este tipo de cartas de inundación.

- Estudio SUBDERE- UBB: El año 2010, La Subsecretaria de Desarrollo Regional (SUBDERE) encargó a la Universidad del Biobío un "Estudio de riesgo de sismo y maremoto para comunas costeras de la Región del Biobío". Se usó una metodología similar a las cartas de inundación del SHOA, esto es, escenarios extremos basados en eventos históricos. Todas las localidades poseen mapas de inundación UBB/SUBDERE.

- Estudios SERNAGEOMIN: Representan áreas susceptibles de ser inundadas en base a la topografía. El principal criterio para identificar la zona de inundación es la cota 20m, es decir, los terrenos ubicados bajo esa cota son terrenos potencialmente inundables por un tsunami de gran intensidad. Así mismo, SERNAGEOMIN define las zonas de seguridad como aquellos terrenos ubicados en alturas por sobre los 20 m s.n.m., los que son considerados seguros frente al ingreso de un tsunami extremo. Casi todas las localidades, salvo Pingueral-Coliumo-Dichato poseen mapas de susceptibilidad.

- SENAPRED (ex ONEMI) ha desarrollado mapas de evacuación por tsunami para todas las comunas de interés, los cuales se basan en el criterio de la cota 30 m. Es decir, el terreno emplazado bajo la cota 30m debe evacuación en caso de tsunami hacia la zona segura. Estos mapas indican también las vías de evacuación y las zonas se seguridad.

- OTROS ESTUDIOS: Estudios fundados de riesgo comunales y publicaciones científicas que se analizaron para verificar la coherencia con los mapas de SHOA.

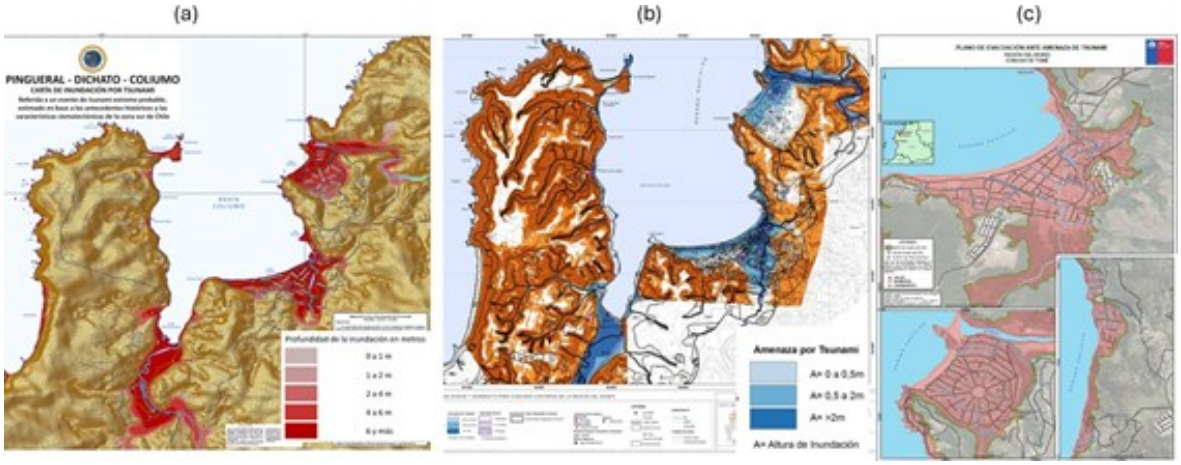
Tanto las cartas de inundación del SHOA como los mapas de inundación confeccionados en el estudio UBB/SUBDERE utilizaron un enfoque determinístico, esto es, un número reducido de escenarios para determinar el área de inundación. Recientemente se publicó un artículo que presenta mapas probabilísticos de inundación por tsunami, los cuales utilizan cientos de escenarios de magnitudes que varían entre 8.0 y 9.6. A continuación se presenta el análisis comparativo por comuna.

Análisis de la amenaza

Tomé

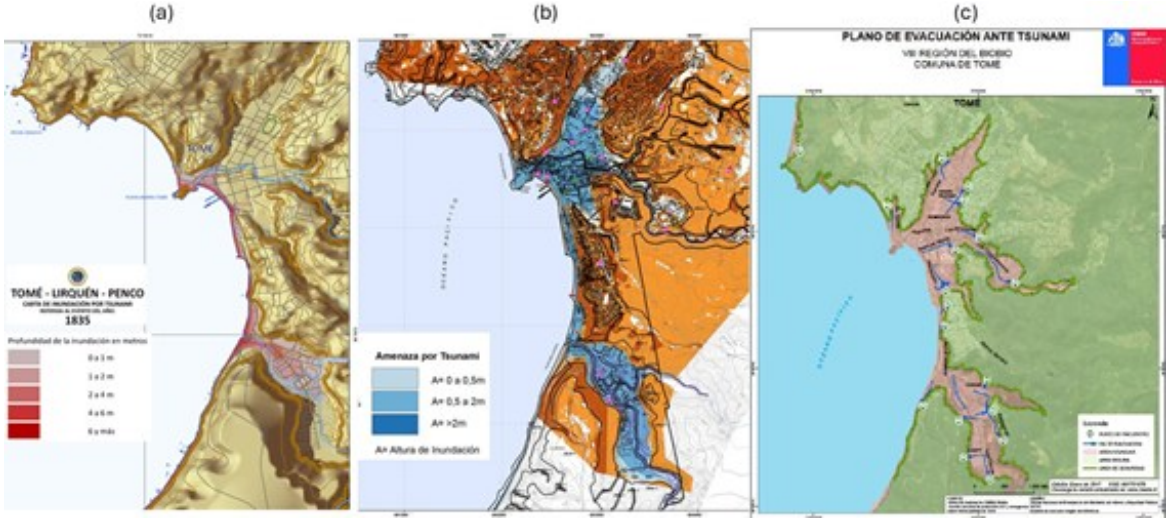
La comuna de Tomé se puede subdividir en varios sectores. En primer lugar, se podrían agrupar los sectores de Pingueral, Dichato y Coliumo. **Figura 3** muestra los mapas de amenaza de tsunami existentes en estas localidades. En general, las áreas y profundidades de inundación de los mapas del SHOA y UBB/SUBDERE son consistentes, aun cuando el primero presenta una mayor área de inundación en Pingueral. Por su parte, el mapa de evacuación de SENAPRED (**Figura 3**-c) evidencia una gran extensión del área que debe ser evacuada, dado que se basa en la cota 30m.

Figura 3. Mapas de amenaza de tsunami en Pingueral-Dichato-Coliumo. a) Carta de Inundación por tsunami del SHOA. b) Estudio SUBDERE- UBB. c) Mapa evacuación SENAPRED.



De manera similar, la **Figura 4** muestra los mapas de amenaza de tsunami disponibles en los sectores de Bellavista y centro cívico de Tomé. Se puede observar que el mapa de inundación de UBB/SUBDERE presenta mayores áreas de inundación que el mapa del SHOA, sobre todo en el sector del centro cívico. Sin embargo, y de acuerdo con el mapa de evacuación de SENAPRED, el área potencialmente inundable es más extensa, debido a que cubre toda la zona bajo la cota 30m.

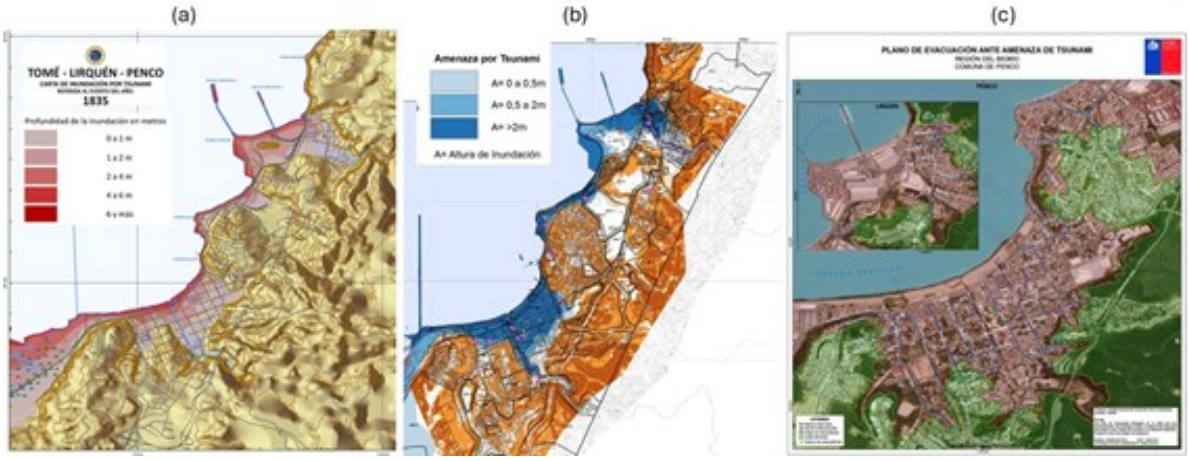
Figura 4. Mapas de amenaza de tsunami en zona Tomé centro y Bellavista. A) Carta de Inundación por tsunami del SHOA. b) Estudio SUBDERE- UBB. c) Mapa evacuación SENAPRED.



Penco

Para el análisis de esta comuna se considera el sector de Lirquén y el centro cívico de Penco. Tanto el mapa de inundación del SHOA como del estudio UBB/SUBDERE muestran áreas de inundación similares, tal como muestra la **Figura 4**. Similar al caso de Tomé, el área potencialmente inundable, y que debe evacuar frente a tsunami, es bastante más extensa, dado que considera toda la zona bajo la cota 30m (**Figura 5**).

Figura 5. Mapas de amenaza de tsunami sectores Penco-Lirquén. a) Carta de Inundación por tsunami del SHOA. b) Estudio SUBDERE- UBB. c) Mapa de evacuación SENAPRED.



Concepción-Talcahuano-Hualpén

Dado el emplazamiento de las comunas de Concepción, Talcahuano y Hualpén en la zona comprendida entre la bahía de Concepción, la bahía de San Vicente y la desembocadura del río Biobío, es que estas tres comunas se pueden analizar de manera conjunta (**Figura 6**). La comuna de Concepción se ve afectada muy levemente por el ingreso de agua por el río Andalién. El área de inundación del SHOA muestra una extensión similar al mapa de susceptibilidad del SERNAGEOMIN (**Figura 6**-b), el cual muestra en amarillo toda el área bajo la cota 20m. Este mapa muestra también él área de inundación del tsunami de 2010 con un achurado rojo. Es

posible observar que el área de inundación de ese evento es muy inferior a lo indicado por este mapa de susceptibilidad. Por su parte, el mapa de inundación por tsunami de UBB/SUBDERE es más similar al área de inundación del tsunami de 2010 mostrado en el mapa de susceptibilidad de SERNAGEMIN, con la diferencia que se muestra un área importante de inundación en la bahía de San Vicente. Por último, el mapa de evacuación SENAPRED también muestra un área potencialmente inundable bastante extensa, donde la línea verde indica el límite de los 30m. Cuando los mapas de inundación determinísticos (**Figura 6**-a y **Figura 6**-c) se comparan con mapas de inundación probabilísticos (**Figura 7**), es posible observar que el mapa de inundación del SHOA muestra un área de inundación más cercana a un mapa probabilístico con una probabilidad de excedencia de 0.5% en 50 años, o equivalente a un periodo de retorno de la inundación de 9.975 año.

Es importante mencionar que ese periodo de retorno no es del sismo que genera el tsunami, sino más bien de la inundación, la cual se obtiene a partir del análisis estadístico de esta variable obtenida de simulaciones numéricas de cientos de escenarios de tsunami. Se puede observar también que el mapa asociado a una probabilidad de excedencia de 2% en 50 años (**Figura 5**-a) muestra un área de inundación similar al área de inundación del tsunami de 2010, al menos en la zona de la Bahía de Concepción. Por lo tanto, del análisis anterior, se puede concluir que los mapas de inundación determinísticos representan escenarios bastante extremos con probabilidades bajas de ascendencia.

Figura 6. Mapas de amenaza de tsunami para las comunas de Concepción, Talcahuano y Hualpén. a) Carta de Inundación por tsunami del SHOA. b) Zona de amenaza de tsunami según SERNAGEOMIN. c) Estudio SUBDERE- UBB. d) Mapa de evacuación SENAPRED.

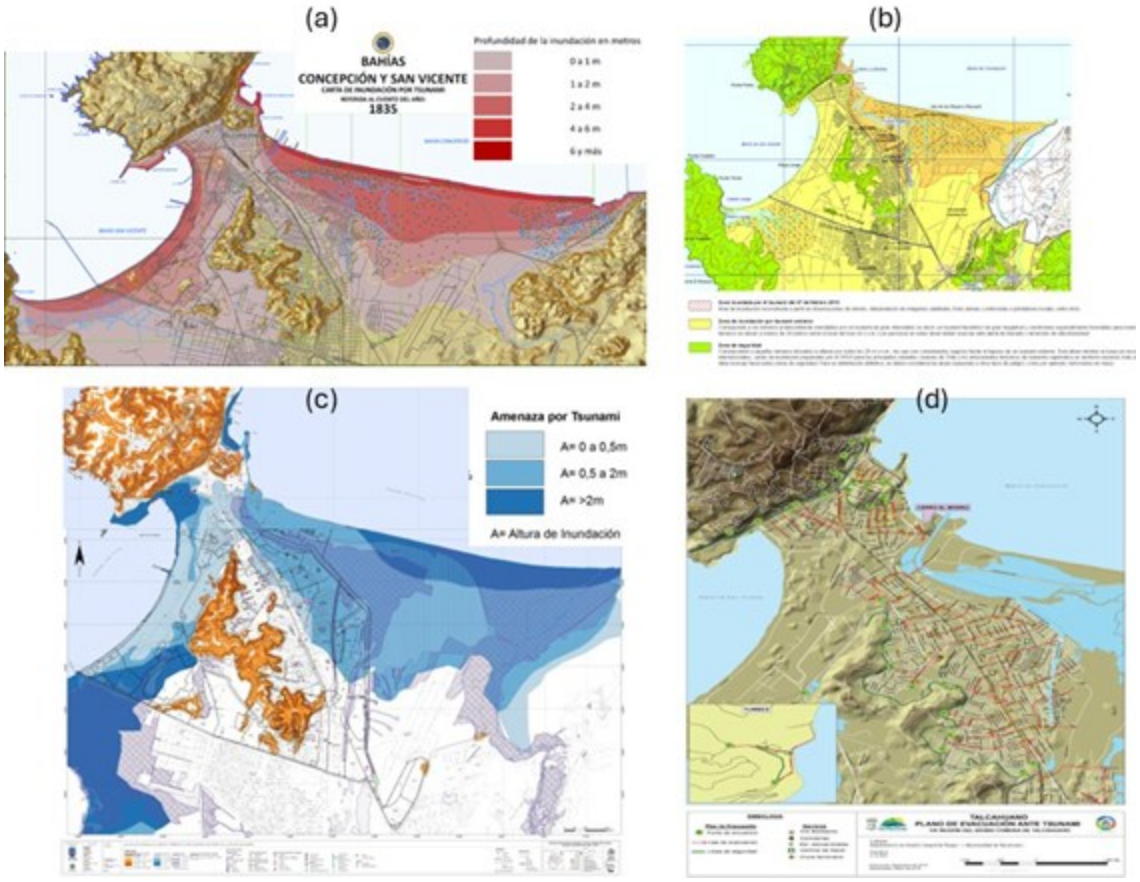
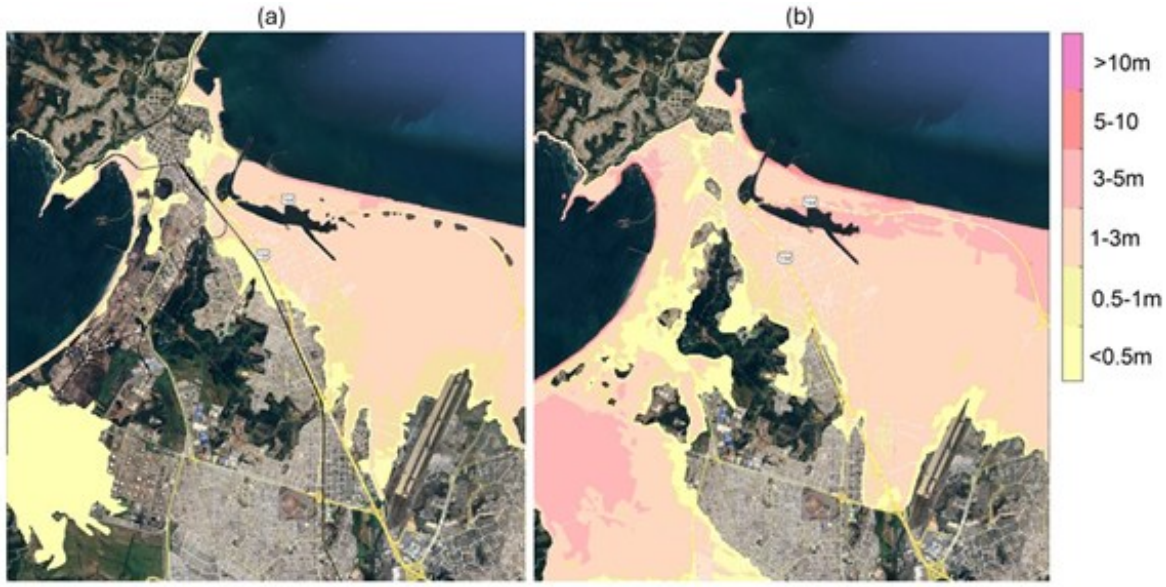


Figura 7. Mapas probabilísticos de inundación por tsunami para Talcahuano y Hualpén. a) Inundación asociada a una probabilidad de excedencia de 2% en 50 años (Periodo de Retorno de 2.575 años). b) Inundación asociada a una probabilidad de excedencia de 0.5% en años (Periodo de retorno de 9.975 años).

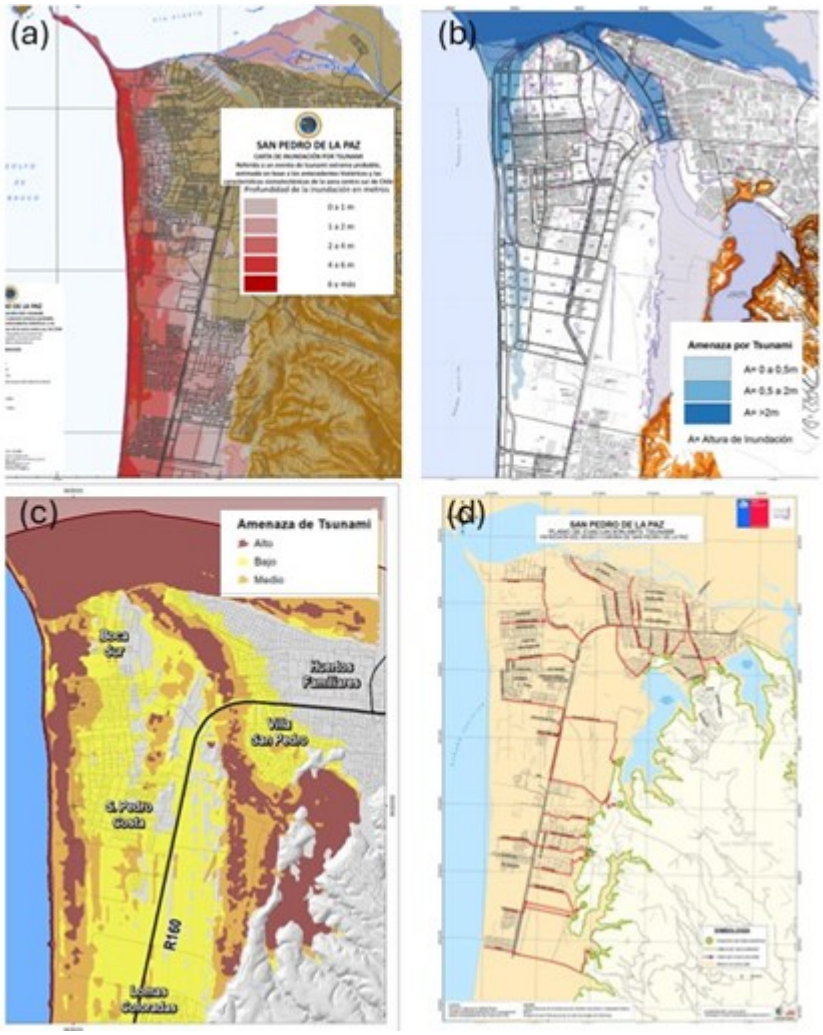


Fuente: Aránguiz et al., 2024

San Pedro de la Paz

La **Figura 8** muestra 4 tipos distintos de mapas de amenaza de tsunami para la comuna de San Pedro de la Paz, y todos evidencian resultados distintos. El área de inundación mayor se observa para el estudio de "Actualización del estudio de riesgos naturales y antrópicos San Pedro de la Paz" encargado por la Municipalidad de San Pedro al Centro EULA. La razón principal se debe a que este estudio consideró un terremoto de magnitud Mw 9.0 además de una marea alta de 1.2m. Por su parte, el estudio UBB/SUBDERE muestra la menor área de inundación, dado que se consideró un escenario similar al evento de 2010. Para el caso el escenario del SHOA (**Figura 8**-a), se observa que el agua ingresa por el estero los Batros y en el sector de la costa excede las dunas y sobrepasa incluso la ruta 160. Por otro lado, el mapa de evacuación de SENAPRED **Figura 8**-d) muestra una zona potencialmente inundable bastante grande y rutas de evacuación de gran extensión.

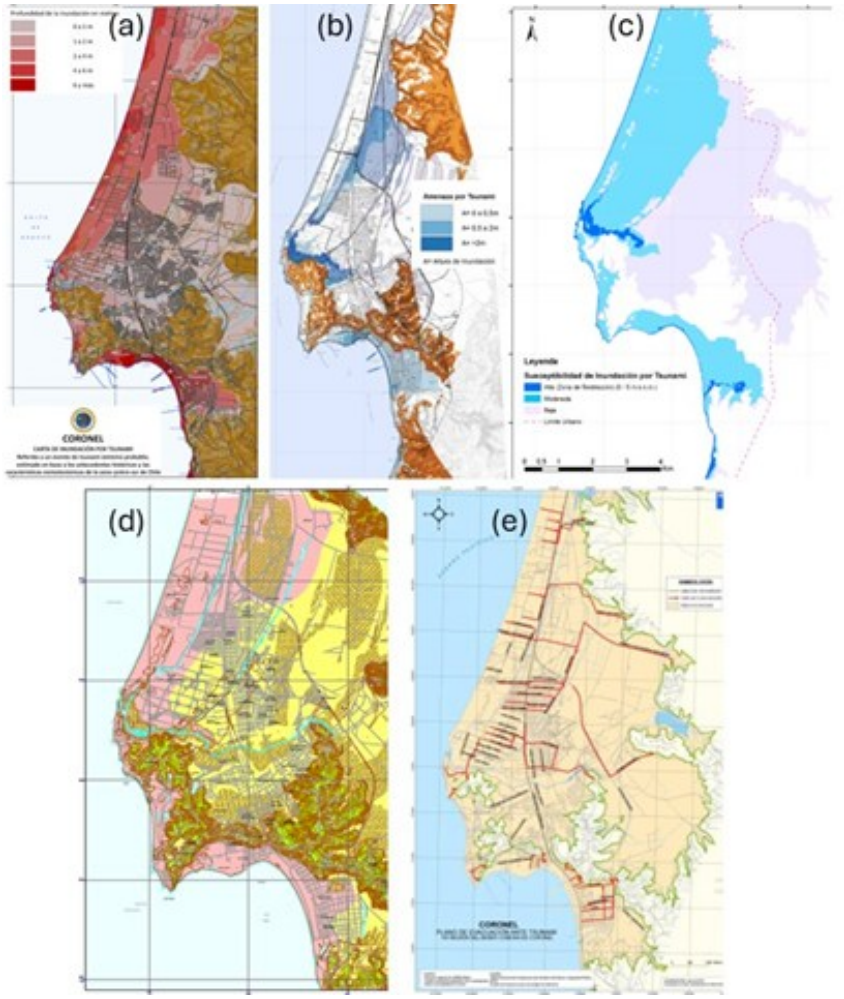
Figura 8. Mapas de amenaza de tsunami en San Pedro de la Paz. a) Carta de Inundación por tsunami del SHOA. b) Estudio SUBDERE- UBB. c) Mapa de Inundación por tsunami en la "Actualización del estudio de riesgos naturales y antrópicos San Pedro de la Paz". d) Mapa de evacuación SENAPRED.



Coronel

La comuna de Coronel es la que presenta la mayor cantidad de mapas de inundación disponibles de distintas fuentes, tal como se observa en la **Figura 9**. Esta comuna, posee una gran extensión de terrenos bajos susceptibles de inundación, principalmente Escuadrón y el centro cívico. En todos los mapas se observa que el centro cívico, así como Lo Rojas experimentan inundación por tsunami. En el caso de Escuadrón, hay diferencias significativas entre un mapa y otro, donde la mayor inundación está dada por el escenario del SHOA (**Figura 9**).

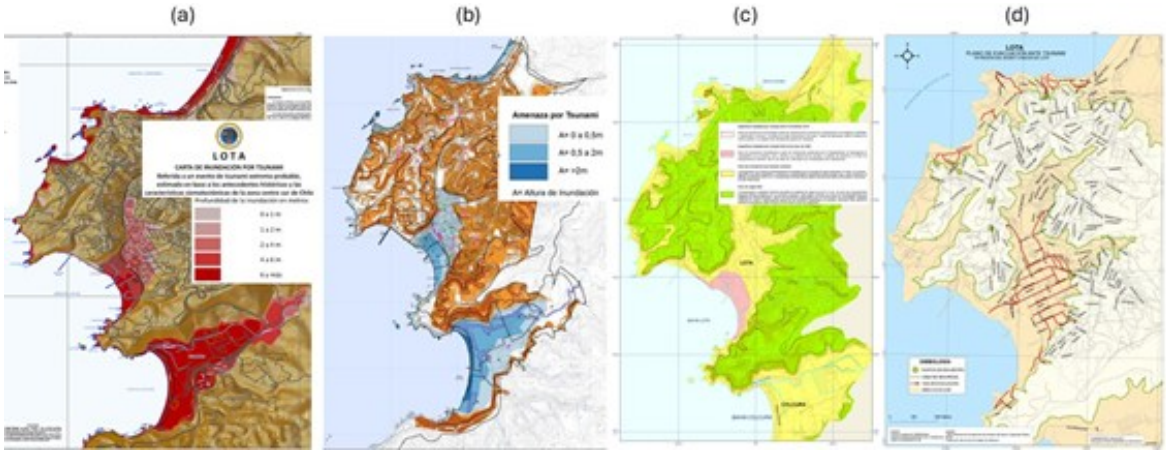
Figura 9. Mapas de amenaza de tsunami en Coronel. a) Carta de Inundación por tsunami del SHOA. b) Estudio SUBDERE- UBB. c) Mapa de Inundación por tsunami en "Estudio Fundado de Riesgos, diagnóstico de peligros naturales en la comuna de Coronel". d) Mapa de peligro de tsunami SERNAGEOMIN. e) Mapa de evacuación por tsunami SENAPRED.



Lota

La comuna de Lota se podría separar en 3 sectores, uno al sur de la bahía de Coronel, otro en la playa de Lota Bajo y el otro en la playa de Colcura. La **Figura 10** muestra cuatro tipos distintos de mapas de peligro de tsunami. El mapa de inundación del SHOA muestra un área de inundación mayor al mapa elaborado en el estudio UBB/SUBDERE. Sin embargo, en ambos casos los sectores de Lota Bajo y Colcura presentan una gran área de inundación que alcanza varios kilómetros tierra adentro, sobre todo en Colcura. De todos modos, estas áreas de inundación son menores a las zonas delimitadas por la cota 20 y 30m según los mapas de SERNAGEOMIN y SENAPRED, respectivamente.

Figura 10. Mapas de amenaza de tsunami en Lota. a) Carta de Inundación por tsunami del SHOA. b) Estudio SUBDERE- UBB. c) Mapa de peligro de tsunami SERNAGEOMIN. d) Mapa de evacuación por tsunami SENAPRED.



Definición de áreas amenaza por tsunami

Luego del análisis anterior, se puede observar que los mapas de inundación por tsunami del SHOA se han elaborado para todas las áreas de interés. Además, los escenarios modelados representan casos extremos que concuerdan con probabilidades de excedencias muy bajas, tal como se observa en el caso de Talcahuano y Hualpén. Por ello, en el análisis que sigue, se considerarán una zona de inundación que está representada por el área calculada por el SHOA, tal como se muestra en la **Figura 11**.

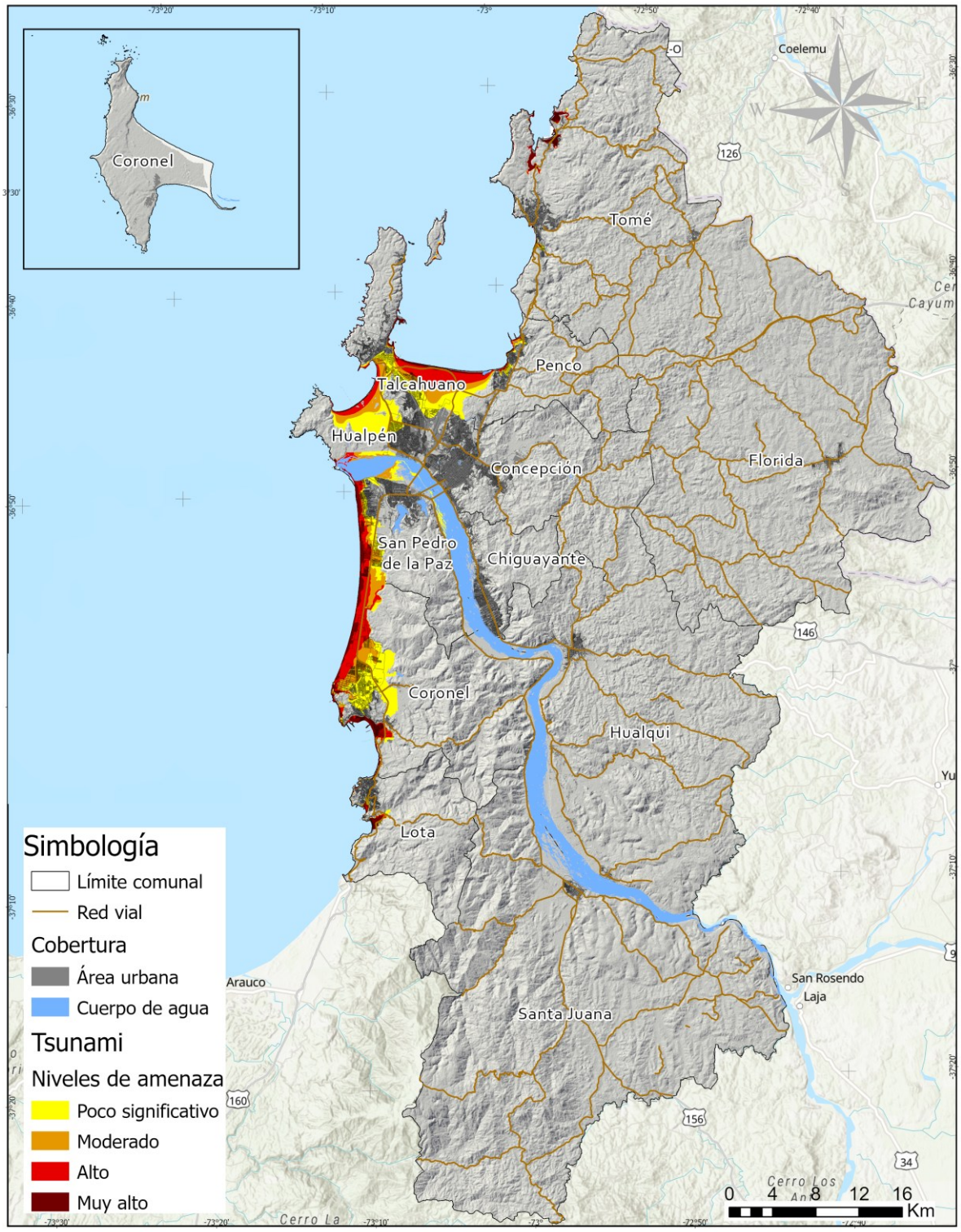
En la **Tabla 7** se expresa la clasificación de los niveles de amenaza para inundación por tsunami donde se señala la reclasificación de la profundidad de inundación y su correspondiente nivel asociado.

Tabla 7. Niveles de amenaza inundación por Tsunami.

Clasificación SHOA	Reclasificación	Niveles de amenaza
Profundidad inundación 0 a 1 m	Profundidad inundación 0 a 1 m	Poco significativo
Profundidad inundación 1 a 2 m	Profundidad inundación 1 a 2 m	Moderado
Profundidad inundación 2 a 4 m	Profundidad inundación 2 a 4 m	Alto
Profundidad inundación 4 a 6 m	Profundidad superior a 4 m	Muy alto
Profundidad inundación 6 y más m	-	-

Fuente: Elaboración propia en base a SHOA.

Figura 11. Mapa provincial de amenaza por tsunami.



Fuente: Elaboración propia.

II. Inundación por desborde de cauces

El análisis de amenaza por cursos hídricos superficiales se abordó mediante modelación hidráulica para los ríos de mayor jerarquía a nivel provincial, correspondientes a los sistemas fluviales Biobío y Andalién.

El paso de la crecida por el área metropolitana de Concepción fue simulado numéricamente con el modelo hidráulico 2D no permanente IBER (Bladé et al., 2014). Se utilizaron datos topográficos y batimétricos provenientes de vuelos LiDAR, instituciones públicas y datos de terreno para elaborar los modelos digitales de elevación. El modelo consideró el nivel del mar medido en la estación Talcahuano del Servicio hidrográfico y Oceánico de la Armada (SHOA) como condición de contorno de salida a lo largo de la costa y las desembocaduras de los ríos, específicamente para una marea de sicigia como condición más desfavorable. Los caudales utilizados para la simulación asociados a los periodos de retorno de 10, 50, 100 y 500 años correspondieron a los siguientes:

Tabla 8. Caudales asociados a cada periodo de retorno.

Río Biobío		**Río Andalién**	
Periodo de retorno	**Caudal (m^3/s)**	**Periodo de retorno**	**Caudal (m^3/s)**
Q(T=10)	11.677	**Q(T=10)**	230
Q(T=50)	16.677	**Q(T=50)**	343
Q(T=100)	18.791	**Q(T=100)**	394
Q(T=500)	23.676	**Q(T=500)**	519

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de los niveles de amenaza se realizó integrando la peligrosidad (profundidad y velocidad) y el período de retorno. Dado que las mayores peligrosidades ocurren con frecuencias más bajas, es muy pertinente realizar una evaluación cuantitativa de la velocidad y profundidad del escurrimiento correspondiente a distintos caudales para calcular la amenaza de una crecida. No es claro que una crecida de mayor magnitud (e.g. T = 500 años) genere una amenaza y por ende un riesgo más elevado que una crecida pequeña (e.g. T = 50 años). El **Tabla 9** muestra la amenaza clasificada en 4 niveles, para distintas combinaciones de magnitud y frecuencia.

Tabla 9. Criterios para asignar niveles de amenaza de inundación por desborde de cauces en función de la recurrencia modelada y la intensidad resultante del modelo.

		Periodo de Retorno			
		< 10 años	10 - 50 años	50 - 100 años	≥ 100 años
Peligrosidad	Alta	Muy Alta	Muy Alta	Alta	Alta
	Media	Muy Alta	Alta	Moderada	Moderada
	Baja	Alta	Moderada	Moderada	Poco significativa
	Muy baja	Moderada	Poco significativa	Poco significativa	Poco significativa
	Despreciable	Poco significativa	Poco significativa	Poco significativa	Poco significativa

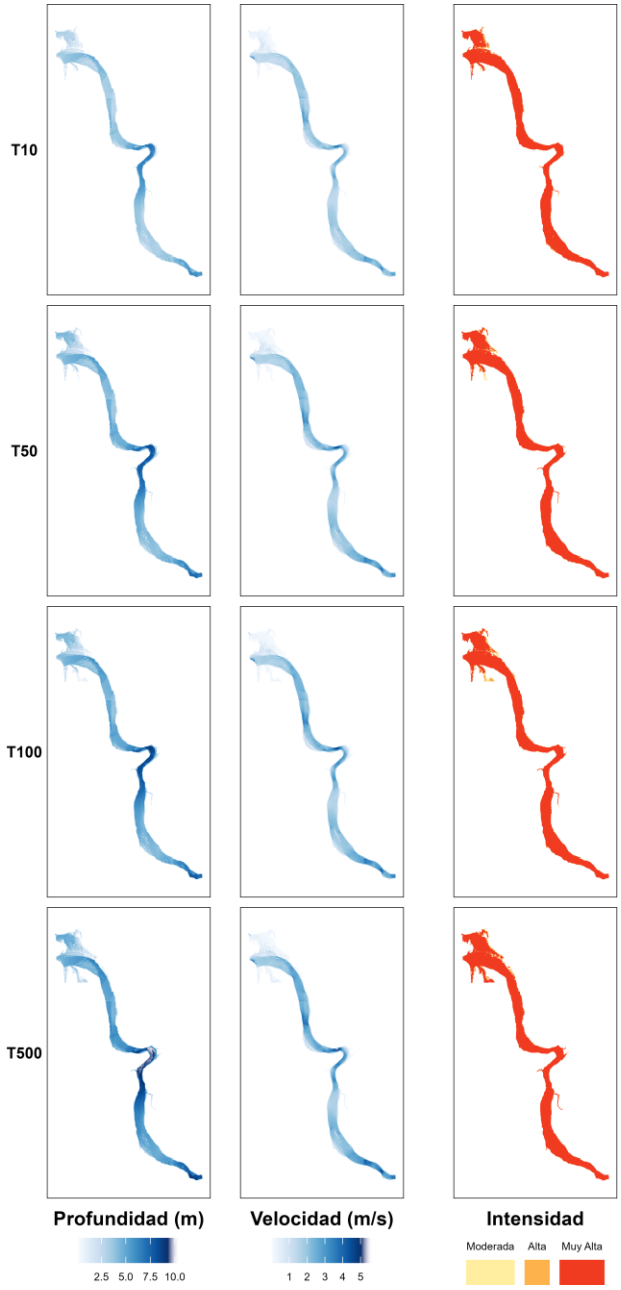
Fuente: Minvu, 2023.

Análisis de la amenaza

Los resultados muestran los cálculos parciales que permiten obtener la amenaza de inundaciones por desborde de cauce. Se presentan primero los resultados para el río Biobío y luego para el río Andalién.

Para el río Biobío, la **Figura 12** muestra la profundidad, velocidad e intensidad de inundaciones por desborde del río Biobío para caudales con 10, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno. Se observa que la intensidad se mantiene en muy altos a lo largo del eje longitudinal del cauce.

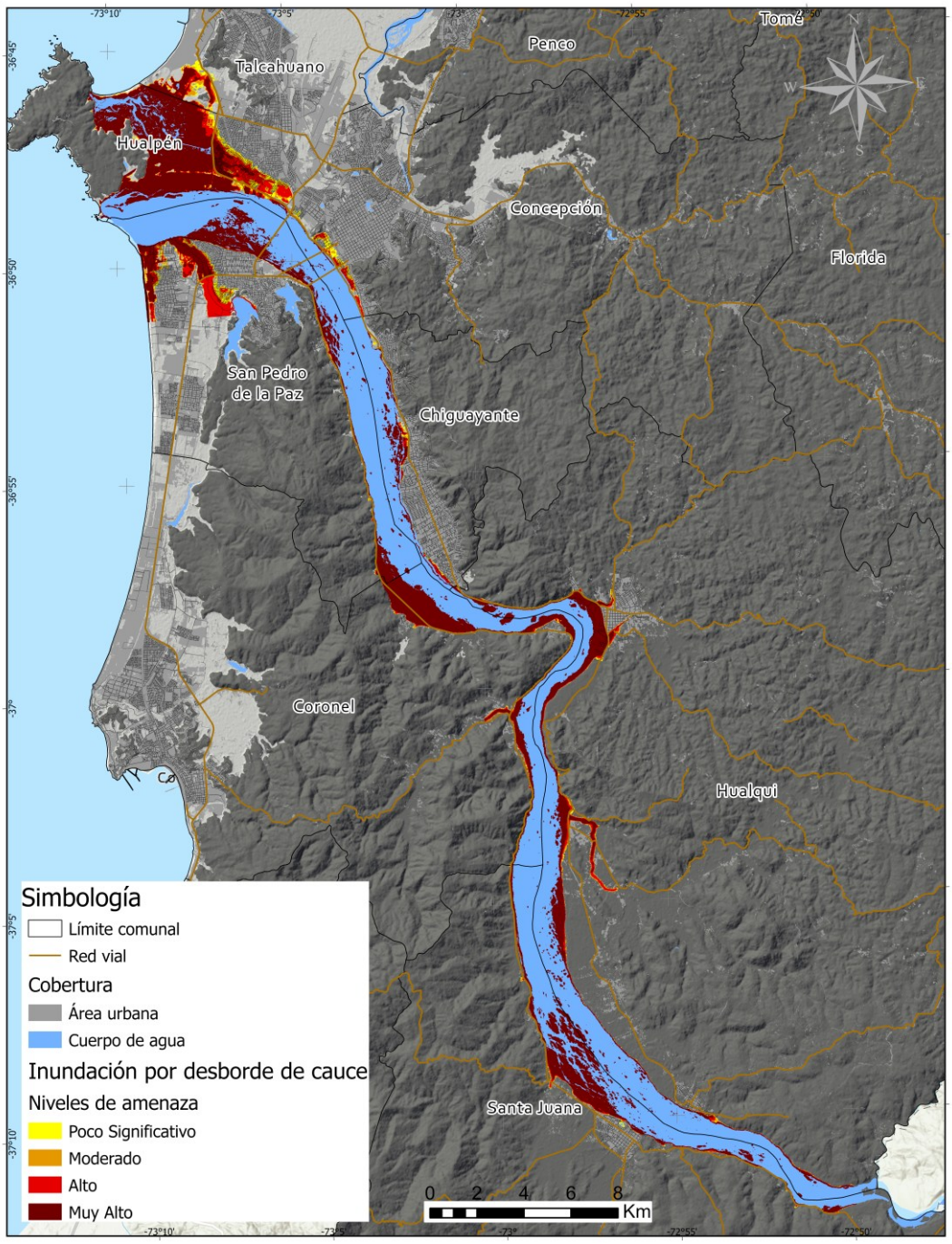
Figura 12. Profundidad, velocidad e intensidad de inundaciones por desborde del río Biobío ante caudales con T=10, 50, 100 y 500 años.



Fuente: Elaboración propia.

Evidentemente, la profundidad del río Biobío es muy grande y por lo tanto controla también la peligrosidad en el curso de agua. La **Figura 13** muestra los niveles de amenaza por desborde del río Biobío. En general se observó que las áreas de inundación se concentraron en los sectores más próximos al lecho menor, con afectaciones en todas las comunas ribereñas. Sin embargo, los mayores problemas se visualizan en Hualqui, San Pedro de la Paz, Concepción y Hualpén asociados a la exposición personas e infraestructura **Figura 14**.

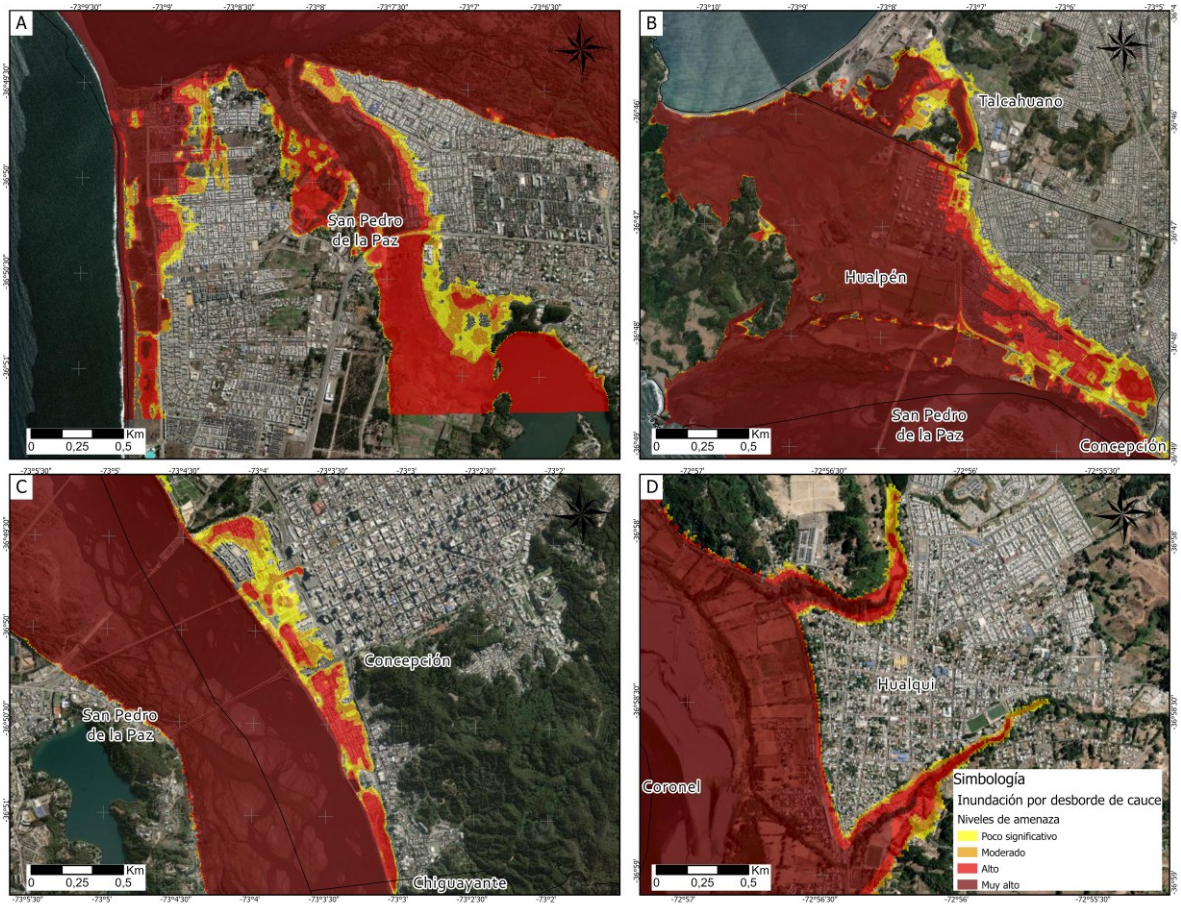
Figura 13. Amenaza de las inundaciones por desborde del río Biobío.



Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 14** muestra ejemplos de las comunas mencionadas en el párrafo precedente. El primer caso muestra a la comuna de San Pedro de La Paz, donde la inundación se concentra en áreas aledañas al estero Los Batros y las áreas urbanas localizadas próximas a borde costero. Respecto a la comuna de Hualpén, el río ocupa un área extensa asociada a su antiguo lecho mayor de inundación, el nivel de amenaza mayor corresponde al área es ocupada principalmente por humedales y praderas, mientras que los niveles altos y moderados se asocian mayormente con sectores urbanos. Para la comuna de Concepción el modelo muestra que la inundación en niveles altos y moderados se asocia a zonas urbanizadas localizadas al sur de la línea férrea. Por último, en el caso de Hualqui los niveles de amenaza se concentran en niveles muy altos y altos.

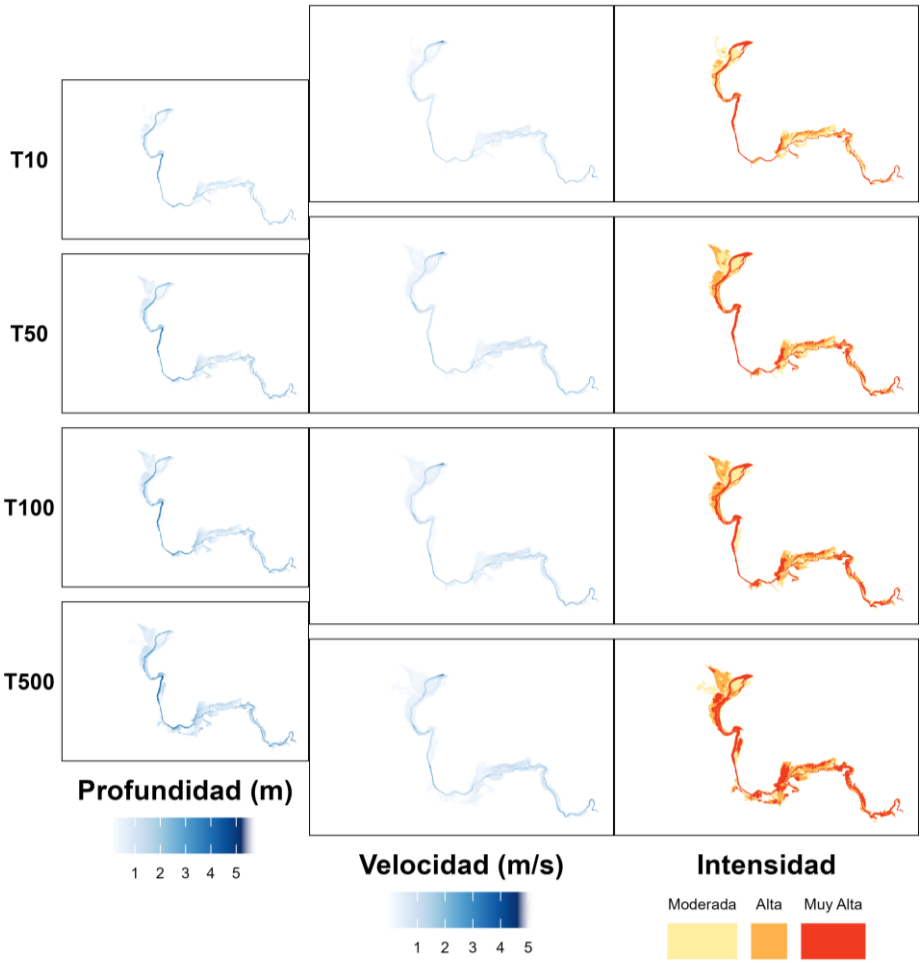
Figura 14. Ejemplo de sectores amenazados por inundaciones por desborde del río Biobío.



Fuente: Elaboración propia.

El segundo cauce analizado correspondió al río Andalién. La **Figura 15** muestra la profundidad, velocidad y peligrosidad de inundaciones para caudales con 10, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno. Se observa una mayor variabilidad respecto a la intensidad de los procesos de desborde el tramo de estudio en comparación con el río Biobío.

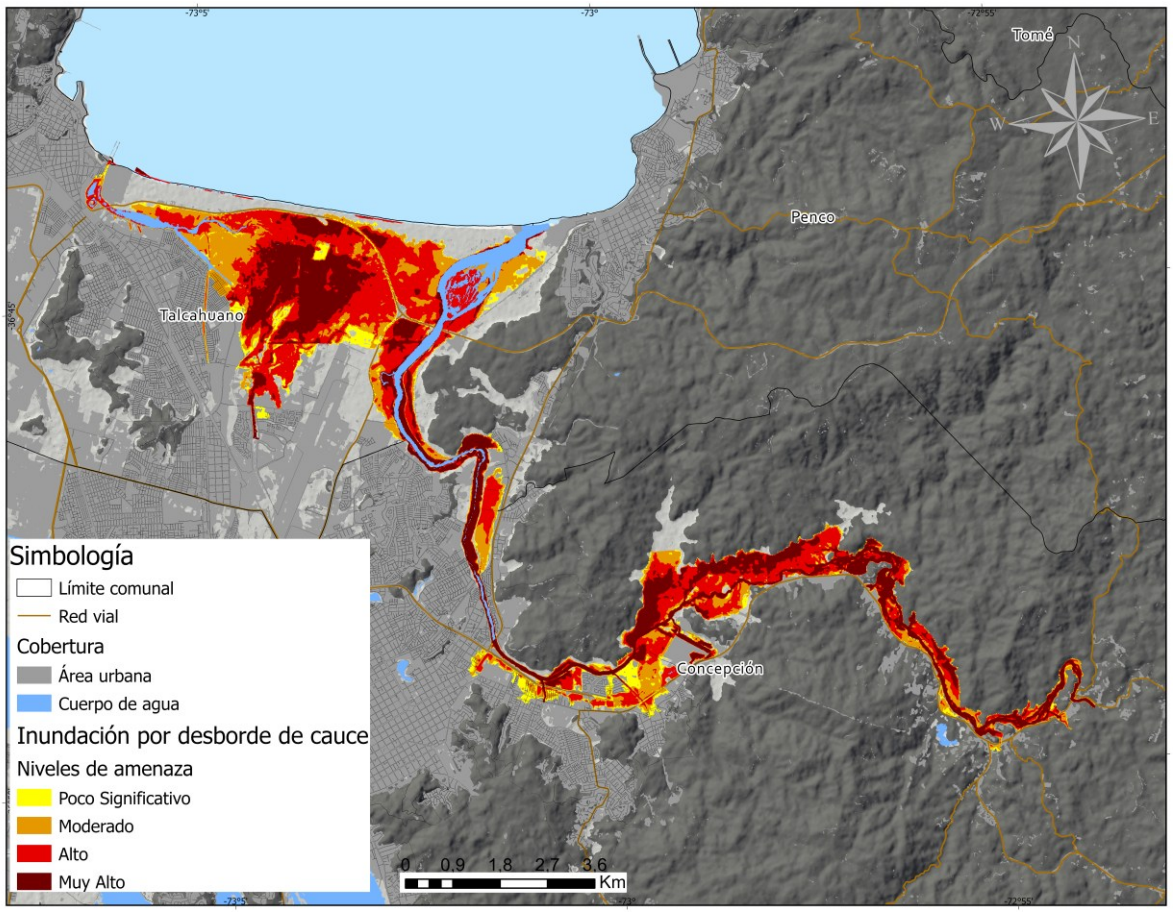
Figura 15. Profundidad, velocidad y peligrosidad de inundaciones por desborde del río Andalién ante caudales con T=10, 50, 100 y 500 años.



Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 16** muestra la amenaza de inundaciones por desborde del río Andalién. Las áreas de desborde se concentran en sectores alejados del área urbana consolidada, aguas arriba del sector de Valle Noble y aguas debajo de la curva de Cosmito que corresponden a praderas y humedales. Por otro lado, en la comuna de Concepción se aprecia una reducción de las zonas de inundación, cuyo efecto es atribuible a las obras hidráulicas ejecutadas (**Figura 17**). Adicionalmente, se aprecia que en algunas zonas ribereñas y especialmente en la zona del estuario, la intensidad es moderada y siempre sensible a la magnitud del caudal. En este sentido, es importante la conservación y protección de dichas áreas pues actúan almacenando agua y/o disminuyendo la velocidad del flujo atenuando el impacto de la crecida.

Figura 16. Amenaza de las inundaciones por desborde del río Andalién.



Fuente: Elaboración propia.

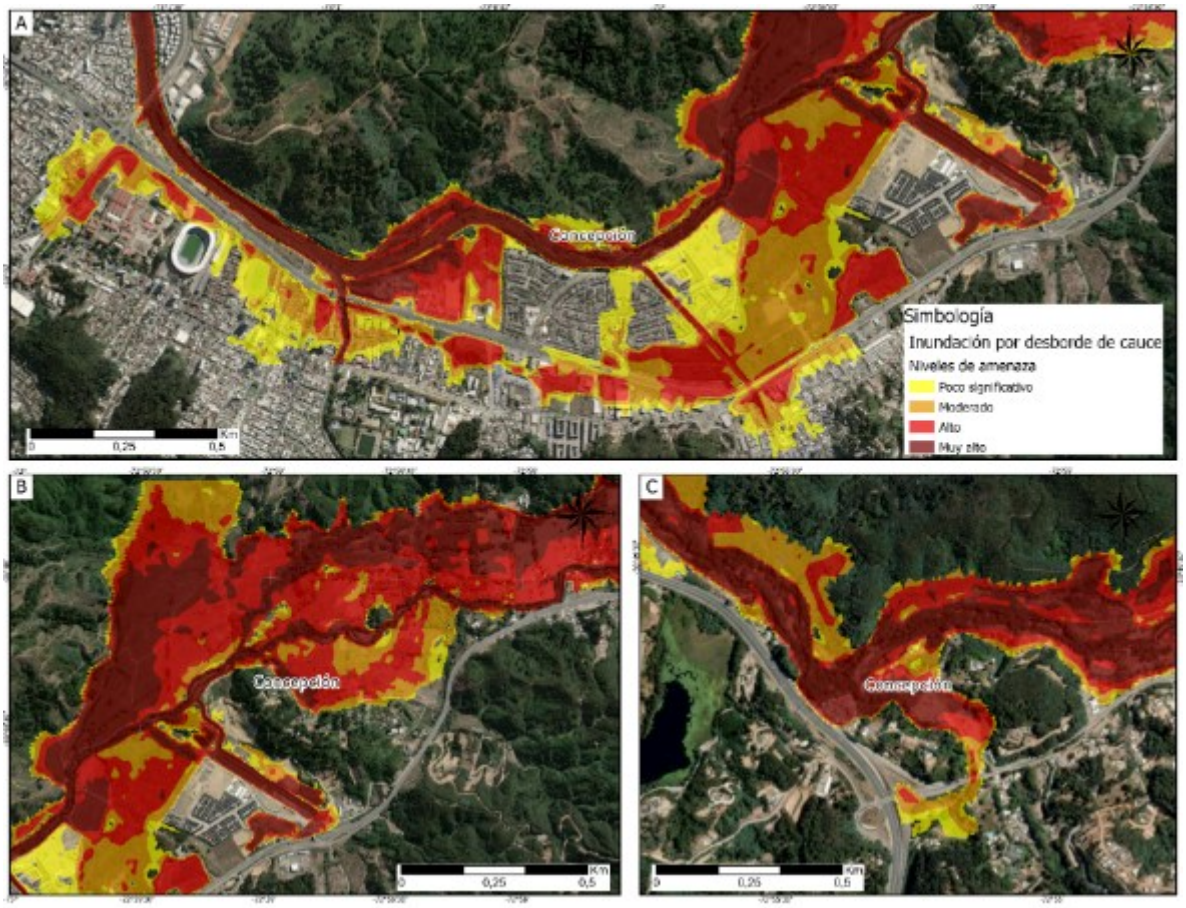
Figura 17. Crecida registrada en junio de 2024 en río Andalién. Sector Bellavista.



Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 18** muestra con mayor detalle los niveles de amenaza en algunos sectores de interés cercanos al río Andalién, en Concepción, población Santa Rita y sector Puente 1. Es importante mencionar que dichos sectores fueron afectados durante las inundaciones acaecidas en el mes de julio 2024, derivando en procesos de evacuación y afectación de viviendas.

Figura 18. Sectores amenazados por inundaciones por desborde del río Andalién.

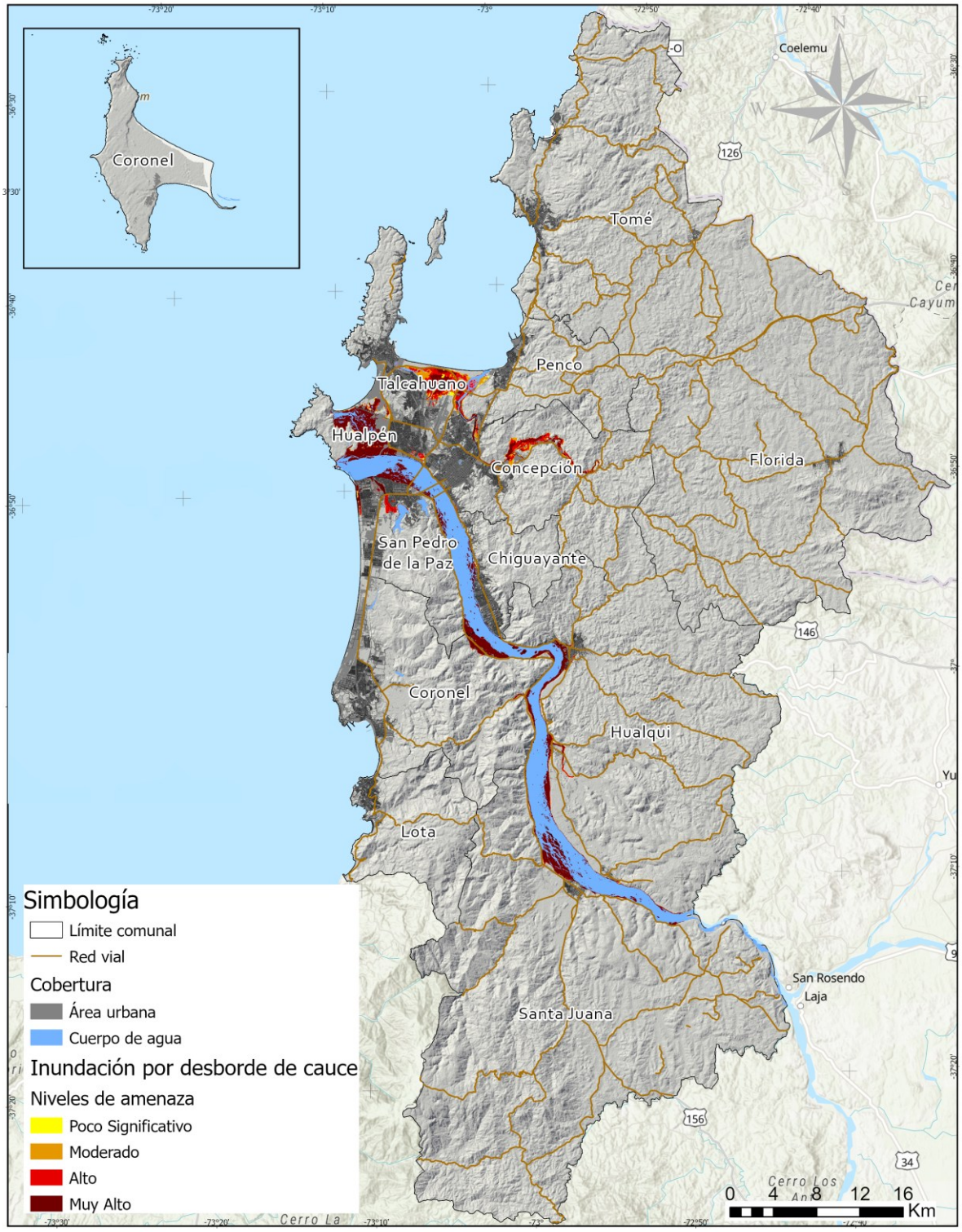


Fuente: Elaboración propia.

Definición de áreas amenaza por inundación por desborde de cauces

La **Figura 19** sintetiza la amenaza de inundación por desborde de cauce para el área metropolitana de Concepción que considera los ríos Biobío y Andalién.

Figura 19. Mapa provincial de amenaza por desborde de cauce.



Fuente: Elaboración propia.

III. Remoción en masa

Para elaborar la cartografía de susceptibilidad a remociones en masa se utilizó Evaluación Multicriterio construida a partir de indicadores ponderados de factores de susceptibilidad. Esta técnica muy útil para enfrentar problemas prácticos relacionados a diferentes escalas de datos (Cascini, 2008). El resultado obtenido fue validado por inventario de remociones en masa obtenido por el Servicio Nacional de Geología y Minería, como también criterio experto (proporcionada por ingenieros y geólogos) (Saboya, 2006).

Un levantamiento bibliográfico permitió elegir los factores más usados como entrada del modelo, se definieron siete factores **Tabla 10**. La ponderación de cada factor permitió la evaluación de las áreas susceptibles a remociones en masa. Cada factor fue individualmente reclasificado en susceptibilidad poco significativa, moderada, alta y muy alta **Anexo 1**.

Tabla 10. Factores de susceptibilidad para evaluación de la susceptibilidad de Remociones en Masa.

Factores	Descripción	Fuente de Información
Pendiente	Producto cartográfico obtenido a partir del procesamiento del Modelo Digital de Elevación (MDE). Resolución Espacial 12,5 x 12,5m. Sensor Alos Palsar	Infraestructura de datos espaciales (IDE) Chile.
Orientación	Producto cartográfico obtenido a partir del procesamiento del Modelo Digital de Elevación (MDE). Resolución Espacial 12,5 x 12,5m. Sensor Alos Palsar	Infraestructura de datos espaciales (IDE) Chile.
Fallas Geológicas	Capa vectorial de fallas geológicas elaboradas a nivel nacional.	Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Subdirección Geología.
Distancia a Caminos	Capa Vectorial de vialidad	Ministerio de Obras Públicas, año 2020
Uso y Cobertura de Suelo	Análisis de Imágenes Multiespectrales del sensor Sentinel 2.	Elaboradas por el equipo de Infraestructura ecológica de esta licitación. Año 2023.
Geología	Clasificación litológica nacional	Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Subdirección Geología. Escala 1:1.000.000, año 2003.
Litología	Serie de Suelos	Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Año 1996.

Fuente: Elaboración propia.

Los análisis se validaron a partir del Inventario de Remociones en Masa, publicado por el Castrato Nacional del Servicio Nacional de Geología y Minería Subdirección Geología (SERNAGEOMIN - (https://portalgeomin.sernageomin.cl/), y registros de remociones en masa del Atlas de Riesgo de Riesgos de San Pedro de la Paz (2018). De esta forma, fue posible observar la distribución de los registros de remociones en masa, en función de la de cada factor condicionante ponderado (Días et al., 2021).

Análisis de la amenaza

Factores condicionantes

En primer lugar, se discuten los factores condicionantes utilizados en el modelo. La pendiente y la orientación de laderas actúan como agentes de alta relevancia, ya que determinan diversas tipologías de procesos de remoción en masa (Días et al., 2021). La pendiente, resolución espacial de 12,5 x 12,5m, fue clasificada a partir de una adaptación de Tesfa (2022), del Atlas de Riesgo de Riesgos de San Pedro de la Paz (2018) y Pedraza (1996). En la provincia de Concepción, las pendientes entre 5-10°, ocupan 26% del territorio, clasificadas como susceptibilidad poco significativa (**Anexo 1**). Se encontró un predominio de pendientes entre 10-20°, correspondiente a un porcentaje de 39% de la superficie, definida como susceptibilidad moderada (**Anexo 1**). Las superficies clasificadas como alta (20-25°) y muy alta (> 25°) ocupan 7,5% y 4,2% respectivamente (**Anexo 1**). Se aplicó un criterio de exclusión (rango 0-5°), estas representan un 23,3% de la superficie (**Anexo 1**; **Anexo 9**).

La orientación (resolución espacial de 12,5 x 12,5m), se clasificó en función de la investigación de López (2013). Los resultados muestran para este factor, que el sentido S, se encuentra en menor proporción en el territorio con un 10,6% de extensión clasificada como susceptibilidad poco significativa. El predominio de los sentidos E, SE, O y SO, susceptibilidad moderada, ocupando un 48,7% de la superficie. Las superficies clasificadas como susceptibilidad alta (NE - NO) y muy alta (N) ocupan 24,6% y 11,6% respectivamente. Las áreas planas no fueron consideradas para el cálculo.

La Serie de Suelos se clasificó a partir de las Descripciones de Suelos y Materiales y Símbolos (1992), en función del material que representa cada tipo de suelo (**Anexo 1**). Los resultados muestran que los suelos con susceptibilidad poco significativa presentan un 6,8% de extensión, y están clasificados en Parral (Tobas de composición mixta, principalmente andesíticas), Arenales (arenoso grueso a areno franco), NR (rio y lagos), urbano (área urbana) y Dunas (siglas PRR - ARN- NR – URB - DU). Para susceptibilidad moderada se encontró una extensión de 11,1%, compuesto de suelo Nahuelbuta (franco arcilloso) (sigla NA). Se encontró un total de 23,7% para suelos de alta susceptibilidad, compuestos de Constitución (franco arcillo arenoso) y Curanipe (franco arcilloso) (siglas KT-CPE) (**Anexo 1**). Se encontró un total de 58% de superficie, para suelos clasificados como muy alta susceptibilidad, clasificados en Cauquenes (Arcilloso) y San Estaban (Franco arcillo arenoso) (Siglas CQN-ET) (**Anexo 1**; **Anexo 11**). A nivel histórico, los suelos Curanipe y San Esteban concentran 34 y 32 eventos de remoción en masa, respectivamente.

La capa de cobertura de suelo fue clasificada en función del criterio experto en apoyo del equipo responsable por la investigación de incendios forestales (**Anexo 1**; **Anexo 12**). Los resultados apuntan las áreas de susceptibilidad poco significativa está compuesta de Bosque Nativo, Cuerpos de Agua y Vegetación de Humedal, con 10,7% de superficie. Se encontró que las áreas con susceptibilidad moderada, está compuesta de Área Agrícola, Matorral Quemado, Área Agrícola Quemada, Matorral esclerófilo, Matorral aromo, Matorral aromo, Matorral quila, Matorral siempreverde y Plantación con exóticas asilvestradas, ocupan un 18,7% de la superficie. Las superficies de alta susceptibilidad presentan un 9,4% de extensión, compuesta de Bosque Nativo Quemado y Área Urbana. Para este indicador la prevalencia de 61% de la superficie, está clasificada como susceptibilidad muy alta, agrupada en: Pradera, Plantación adulta Eucalyptus glóbulos, Plantación adulta Eucalyptus nitens, Plantación adulta Acacia melanoxylon, Plantación adulta Pinus radiata, Plantación joven Eucalyptus globulus, Plantación

joven Pinus radiata, Suelo Descubierto Agrícola, Suelo Descubierto, Tala Rasa, Plantación Quemada (**Anexo 1**).

La geología fue clasificada en función de criterio experto a partir de la descripción de cada material, detallado por la Geología del Millón (2002) y ubicación de los eventos de remociones en masa del catastro nacional (**Anexo 1**; **Anexo 13**). Se encontró que 10% de la superficie, está compuesta de secuencias sedimentarias del Plestoceno-Holoceno (Q1, Qf - Qm), clasificadas como susceptibilidad poco significativa (**Anexo 1**). Un total de 76,7% de la superficie, está compuestas de rocas metamórficas e intrusivas, del Silúrico-Carbonifero, Carbonífero-Pérmico (328-235 Ma), Jurásico Inferior (Pz4a - Pz4b - CPg – Jig), clasificados como susceptibilidad moderada (**Anexo 1**). Las áreas clasificadas como susceptibilidad alta están conformadas de secuencias sedimentarias del Cretácico Inferior (Neocomiano), Paleoceno y Triásico Superior (Ks1m - P1m - Tr1c), con 10,4% de la superficie. Las áreas clasificadas como susceptibilidad muy alta alcanzan a 2,8%, compuestas de secuencias sedimentarias del Eoceno y Paleoceno-Eoceno (E1c - PE1).

La distancia a caminos se obtuvo de la clasificación de El Jazouli et al. (2019). La superficie predominante es de > 750m, alcanzando un total de 43,7% con susceptibilidad poco significativa (**Anexo 1**). Las distancias entre 750-500 metros, clasificadas como susceptibilidad moderada, representan 14,4% de la superficie (**Anexo 1**). En el caso de distancias entre 500-250 metros, ocupan una extensión de 18,5%, siendo estas clasificadas como susceptibilidad alta (**Anexo 1**). En el caso de las distancias <250, representan alta susceptibilidad, representando 23,4% de extensión (**Anexo 1**; **Anexo 14**).

La distancia a fallas fue clasificada a partir de la clasificación de Moharrami et al. (2020). Se encontró para este indicador, las áreas > 4500m alcanzan un 67,1% de la superficie clasificada como susceptibilidad poco significativa (**Anexo 1**). Las áreas que representan una susceptibilidad moderada, 4500-3000m, ocupan una extensión de 10,4% **Anexo 1**). En el caso de las áreas clasificadas en susceptibilidad alta y muy alta, poseen una extensión de 11,5% y 11,0% respectivamente (**Anexo 1**; **Anexo 15**).

Definición de áreas amenaza por remociones en masa

De acuerdo con el rol de los factores evaluados se determinaron cuatro niveles de susceptibilidad. Estos corresponden a susceptibilidad poco significativa, moderada, alta y muy alta. El área de susceptibilidad poco significativa corresponde a un 2,5 % de la provincia (**Anexo 16**), aquí de acuerdo con el inventario de procesos se han registrado 4 eventos. El área de susceptibilidad moderada corresponde a un 45,8% de la superficie con predominio de pendientes mayores a 10°, es el área de mayor extensión en la provincia (**Anexo 16**), y registra 41 eventos históricos de remociones en masa.

Por su parte la susceptibilidad alta corresponde a un 26,5 % de la superficie de susceptibilidad para la provincia (**Anexo 16**), configurándose como la mayor magnitud. Se asocia con pendientes de mayores a 20° y con el registro de 26 procesos históricos. Finalmente, el área de susceptibilidad muy alta corresponde a un 1,7 % de la superficie total (**Anexo 16**), asociada a pendientes mayores a 25°, principalmente en parte de las comunas Coronel, Santa Juana, Hualqui y Tomé; no obstante, registra solo 4 eventos de remociones en masa, lo que se explica por la forma de localizar los puntos históricos en las áreas distales con respecto a la generación del proceso.

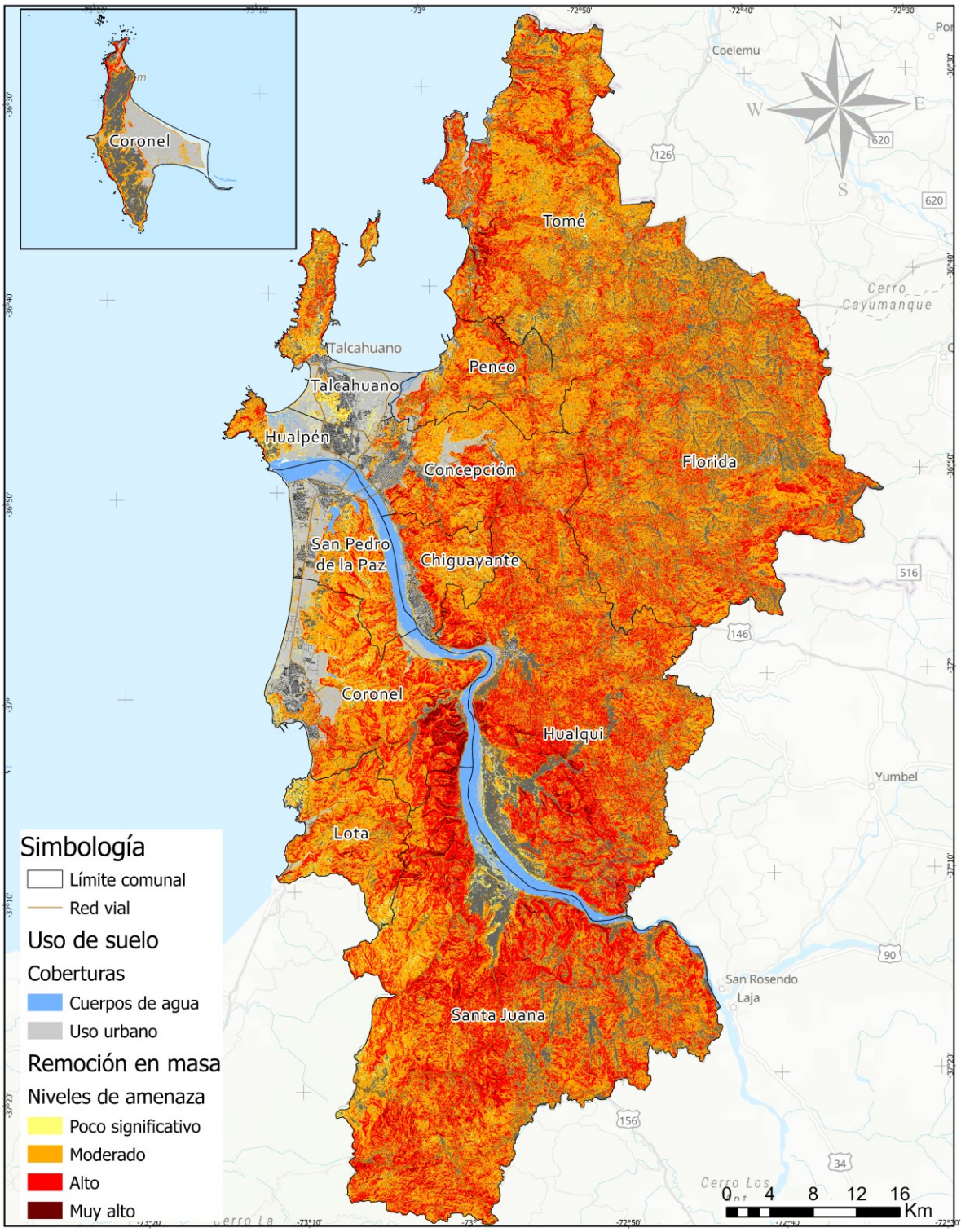
Tabla 11. Niveles de amenaza por remoción en masa.

Niveles de amenaza	Descriptor
Poco significativo	Ambiente en condiciones poco favorables para remociones en masa. Predominio de pendientes entre 5 - 10°, con orientación sur (S), caracterizados generalmente por suelos arenosos y mixtos.
Moderado	Ambiente en condiciones moderadas para remociones en masa. Predominio de pendientes entre 10 - 20°, con orientaciones este, sureste, oeste y suroeste (E, SE, O, SO), caracterizados por suelos franco arcilloso.
Alto	Ambiente con alta predisposición a remociones en masa. Predominio de pendientes entre 20 – 25°, con orientación noreste y noroeste (NE, NO). Los suelos de este sector están mayormente caracterizados por franco arcillo arenoso y franco arcilloso.
Muy alto	Ambiente muy altamente favorable procesos de remoción en masa. Caracterizados por pendientes > 25 °, con orientación norte (N), compuestos generalmente de suelos arcillosos y franco arcillo arenosos.

La **Figura 20** muestra la amenaza de remociones en masa para la provincia de Concepción según los 4 niveles de susceptibilidad indicados anteriormente. De acuerdo con el análisis efectuado se recomienda agrupar el nivel muy alto y alto con los mayores niveles de restricción.

Del análisis realizado, se desprenden una serie de elementos en términos de limitaciones y brechas que deben ser considerados a futuro. En primer lugar, el inventario de Remociones en masa (catastro nacional), fue un gran aporte para el ajuste metodológico, sin embargo, en algunos casos, la coordenada del evento es aproximada y no representa el punto de inicio del evento (en función de accesibilidad u otro), aspecto que debe ser abordada para la validación de los factores condicionantes. En segundo lugar, el Mapa Geológico de Chile y cartografía de fallas geológicas consideran una escala generalista (1:1000000), sumado a ello la obtención de modelos digitales de elevación con mayor precisión (ej. LiDAR), podrían incidir de forma positiva para mejorar los resultados de los modelos. Finalmente, se sugiere considerar la realización de estudios geotécnicos que indican la estabilidad del terreno (parámetros de resistencia como cohesión, Angulo de fricción y peso específico). Los costos de este tipo de análisis no son aplicables para la dimensión del área de estudio.

Figura 20. Mapa provincial de amenaza por Remociones en masa.



Fuente: Elaboración propia.

IV. Sequía

La sequía meteorológica es el evento más temprano y explícito en el proceso de ocurrencia y progresión de las condiciones de sequía. La precipitación es el factor principal de la sequía meteorológica. A nivel mundial, el índice más comúnmente utilizado es el SPI (McKee et al., 1993). El cálculo del índice consiste en ajustar los datos de precipitación a una distribución gamma, y luego normalizarlos para obtener un promedio de 0 y una desviación estándar de 1. Según McKee et al., (1993), el umbral que define el inicio de una sequía ocurre cuando el valor del SPI baja a -1 y termina cuando supera -1. Los valores positivos del SPI reflejan condiciones húmedas, mientras que los valores negativos indican una sequía meteorológica.

En este estudio se utilizará el producto grillado para el territorio nacional CR2MET, desarrollado por El Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, en su versión 2.0. donde se tienen datos que comprenden el periodo 1979-2020. Este producto consta de una grilla rectangular de 0.05° de latitud x 0.05° de longitud, lo cual es aproximadamente 5 km x 5 km. Que contiene precipitación y temperatura (máxima, mínima y media).

Para obtener valores de SPI (*Standard Precipitation Index*) para las diferentes comunas de la Provincia de Concepción, el primer paso fue hallar una serie de precipitación representativa para cada comuna. Esto se logra, geolocalizando cada una y obteniendo las precipitaciones históricas correspondientes a través del producto grillado del CR2 met. Con estas precipitaciones para cada comuna, el cálculo del SPI para cada mes se llevó a cabo con el software SPI *generator* en su versión1.7.6 que es desarrollado por *National Drought Mitigation Center, University of Nebraska-Lincoln.*

El output de este programa es un registro mensual, con valores de SPI, que abarca desde 1980 hasta 2020. Diversos análisis se pueden llevar a cabo con estos resultados, como por ejemplo una mirada mensual de la situación de sequía para cada comuna, interpretando cada mes con su respectivo SPI.

En el estudio de Bobadilla et al., (2024), se caracterizan 3 cuencas de la zona centro sur de nuestro país y posteriormente se evalúa la sequía meteorológica en el periodo 1979-2020, para esto, se creó una metodología en base a el valor mensual del *Standard Precipitation Index*. Dicha metodología consiste en que, para cuando un valor mensual de SPI baja del valor de -1, que es descrito como el umbral de sequía en el estudio de (McKee et al., 1993), se considera ese mes como un evento de sequía. Dicho evento, se da por terminado, cuando el valor de este coeficiente SPI en los meses subsiguiente súper el umbral de sequía.

Seguidamente, se puede obtener la duración del evento de sequía, y más importante aún su magnitud, de acuerdo con Bobadilla et al., (2024), la sumatoria de los índices SPI en los meses que se consideran sequía serán igual a la magnitud del evento.

Análisis de la amenaza

En primer lugar, se describen los resultados para el índice SPI. Para el caso de este estudio, se sigue la recomendación del artículo de McKee et al. (1993), que divide los valores probables del coeficiente SPI en cuatro categorías, las cuales fueron modificadas y renombradas de acuerdo con categorías de amenaza **Tabla 12.**

Tabla 12. Categorización de índices SPI para el estudio.

Rango de valores SPI	Categoría amenaza
SPI > -1	Poco significativa
-1.5 < SPI < -1	Moderada
-1.5 < SPI < -2	Alta
SPI < -2	Muy alta

Fuente: Elaboración propia.

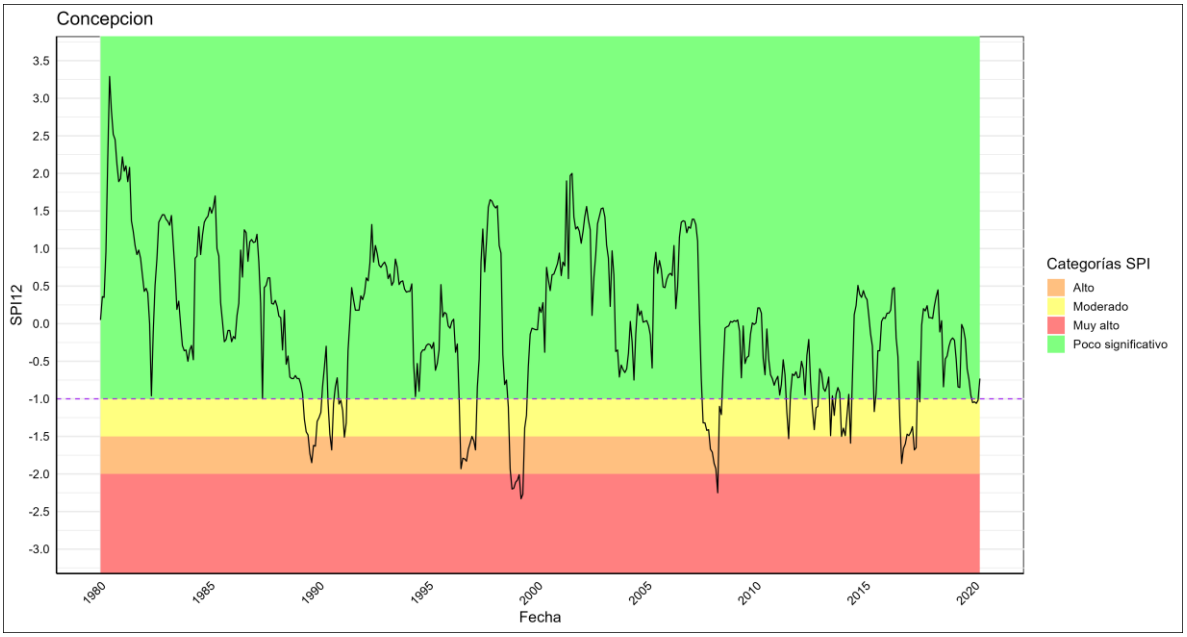
Aplicando las metodologías, para el periodo histórico obtenido a partir del producto grillado del CR2met 2.0 se obtuvieron los eventos de sequía asociados a los puntos centrales administrativos de cada comuna de la provincia. Se observa que los eventos se concentran en el rango de poco significativo, mientras que las comunas con mayor número eventos de muy alta intensidad (mayor a 10) se han localizado en las comunas de Coronel, Florida, Lota, Penco y Tomé **Tabla 13**.

Tabla 13. Cuenta de eventos de sequía para el área de estudio.

Comuna	n° de eventos de riesgo poco significativos	n° de eventos de riesgo moderado	n° de eventos de riesgo alto	n° de eventos de riesgo muy alto
Chiguayante	401	45	31	7
Concepción	403	45	28	8
Coronel	404	39	29	12
Florida	408	40	26	10
Hualpén	399	46	32	7
Hualqui	400	45	31	8
Lota	397	42	32	13
Penco	407	41	25	11
San Pedro de la Paz	403	41	32	8
Santa Juana	396	47	32	9
Talcahuano	406	43	28	7
Tomé	406	43	24	11

El siguiente gráfico es un ejemplo para el periodo histórico en la comuna de Concepción, en donde se indica de forma gráfica las diferentes categorías para los valores de SPI que se tienen a escala mensualmente en la comuna.

Figura 21. Valores de SPI para Concepción.



Fuente: Elaboración propia.

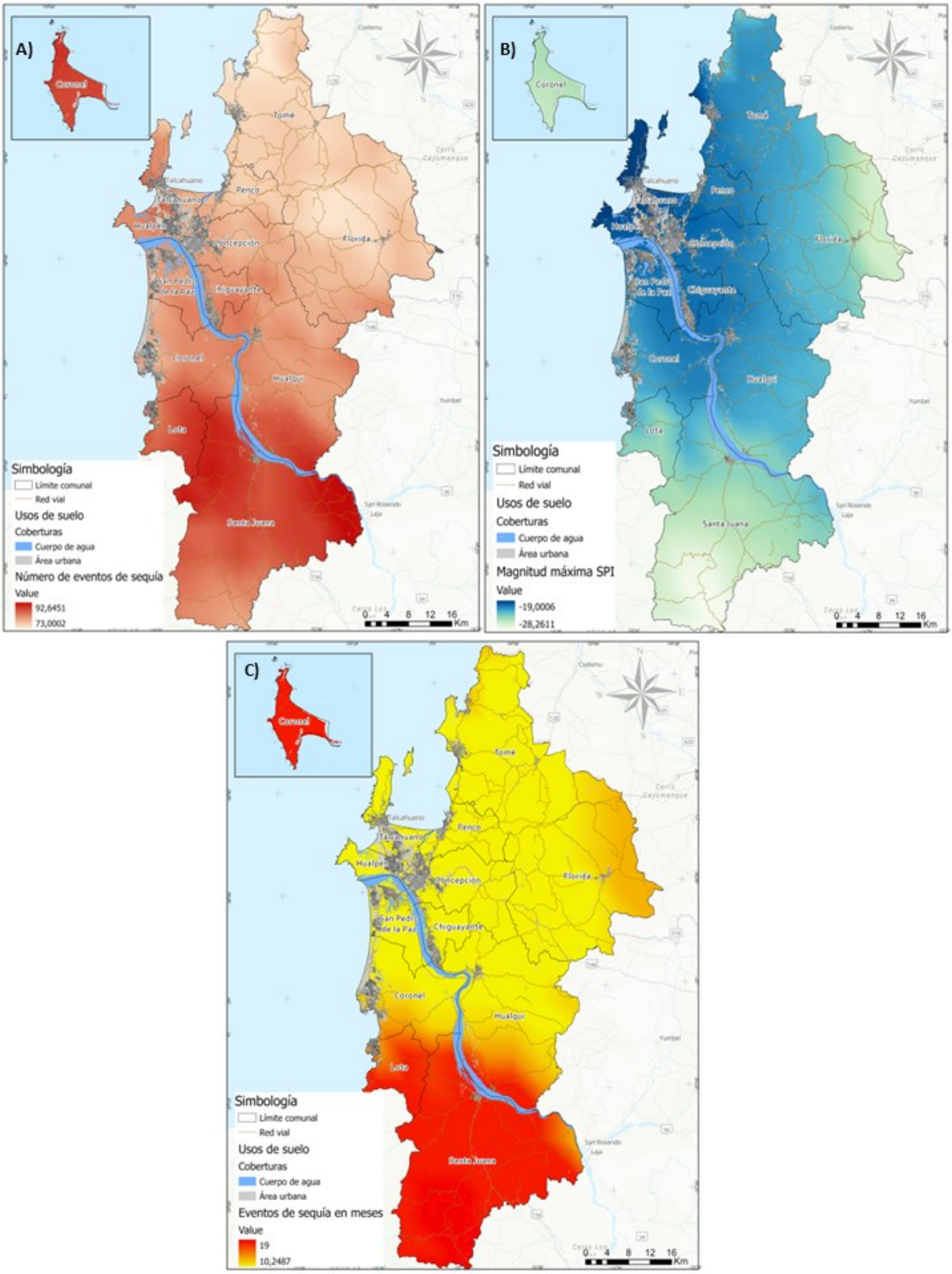
Definición de áreas amenaza por sequía meteorológica

Posteriormente, se obtuvo para cada punto del producto grillado del CR2met 2.0 los valores de SPI mensuales especializados a 5 km en el periodo 1979 a 2020. Para calcular magnitud, duraciones y número de eventos se siguió el procedimiento utilizado en Bobadilla et al., (2024). Donde indica que los eventos de sequía serán aquellos con un valor de SPI menor a -1, la magnitud de un evento es la suma de los valores SPI desde que un mes cae en un evento de sequía hasta que posteriormente se supera dicho umbral y por último la duración será la cuenta de meses que se estuvo en la condición de sequía.

Estos valores posteriormente fueron interpolados en GIS, para así obtener mapas del tipo ráster que se presentan en la **Figura 22**, que corresponden a: A) número de eventos de sequía; B) la mayor magnitud de SPI; y C) la duración máxima que presentan los eventos.

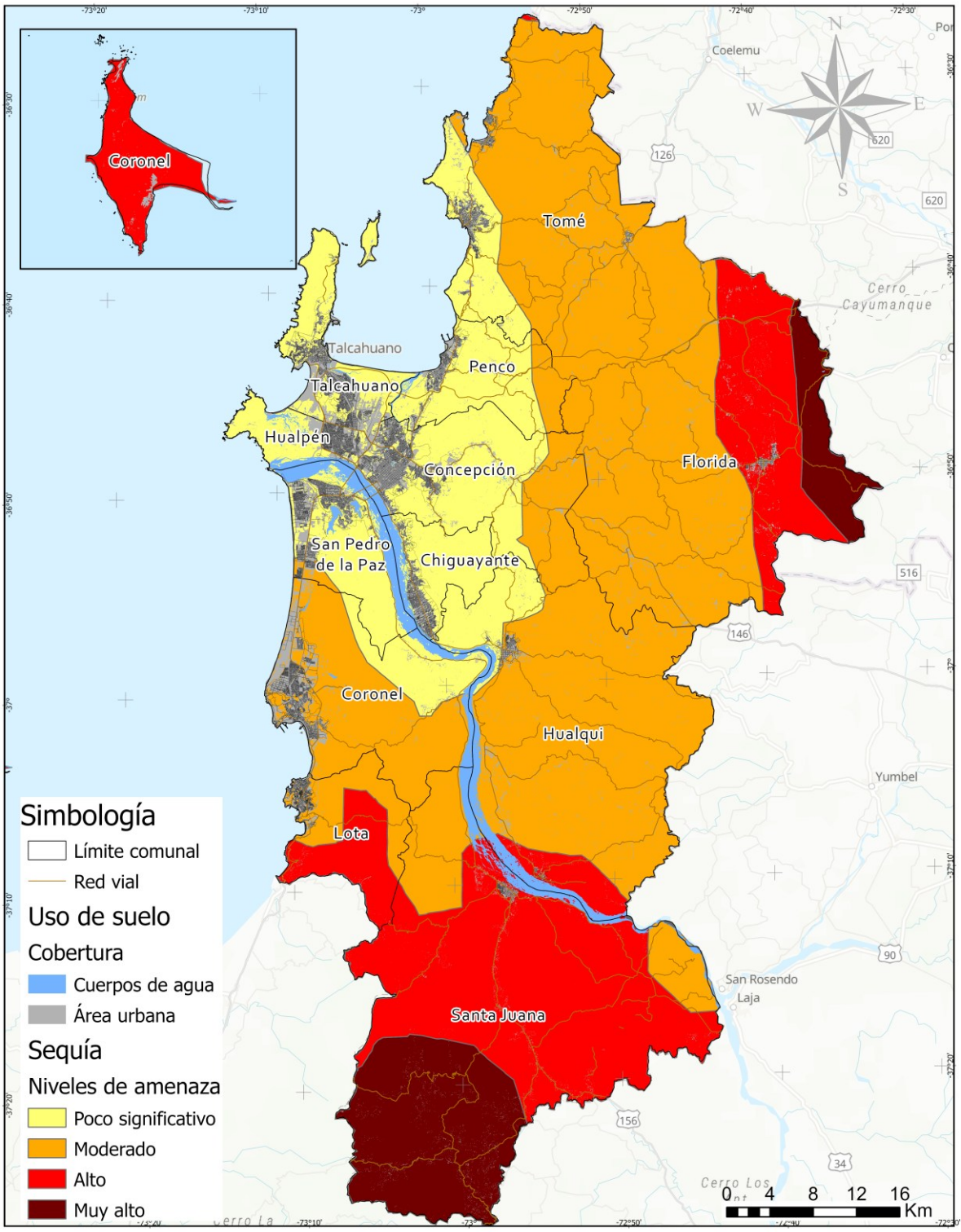
En la **Figura 23** se presenta la amenaza de sequía en la provincia de Concepción, se observa que los mayores niveles de amenaza (alto y muy alto) se concentran en las comunas localizadas al interior en la zona cordillera costera, específicamente Hualqui, Santa Juana y Florida, correspondiendo a estas últimas las áreas con mayor nivel potencial de afectación.

Figura 22. Análisis espacial de los eventos de sequía meteorológica 1980-2020. A) Número de eventos de sequía, B) Magnitud máxima SPI para el área de estudio; C) Máxima duración en meses de eventos de sequía.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 23. Mapa provincial de amenaza por sequía meteorológica.



Fuente: Elaboración propia. Elaborado de acuerdo con la magnitud máxima SPI para el área de estudio (1980-2020).

V. Erosión costera

El análisis de la erosión costera fue abordado de acuerdo con 4 pasos metodológicos: revisión bibliográfica, trabajo de terreno, trabajo de gabinete y determinación de las tasas de cambio. La revisión bibliográfica recolectó datos bibliográficos para sistematizar información sobre las características geológicas, geomorfológicas y morfodinámicas de influencia en la erosión costera, principalmente en litorales arenosos excluyéndose aquellos donde predominan sectores rocosos. Adicionalmente se realizó un trabajo de terreno para verificar el estado de conservación de las geoformas, en especial aquellas que evidencian erosión y que no están incluidas en el estudio de MMA (2019).

Posteriormente se analizaron serie histórica de imágenes satelitales o fotografías aéreas para un período de al menos 10 años, considerando la información disponible por parte del equipo. A partir de los resultados de las tasas de cambio, se elaboraron las cartas temáticas de erosión, utilizando plataforma SIG.

Las tasas de cambio se asocian con los cambios en la posición relativa de la línea litoral determinados con el software "Digital Shoreline Analysis System" (DSAS) v5.1 del USGS (Himmelstoss et al., 2021; Thieler et al., 2009). Se utilizó el descriptor estadístico *Linear Regression Rate* (LRR), el cual ajusta una línea de regresión de mínimos cuadrados a todos los puntos de la línea litoral en cada transecto determinado, minimizando la suma de los residuos al cuadrado, evitando la compensación de valores por defecto y por exceso. A partir del cálculo del LRR se obtuvo el LIC (*standard Error of the slope with confidence interval*) con la tendencia para los años analizados. Estos valores fueron reclasificados para obtener una escala de erosión, con la cual se elabora la carta de erosión costera en m/año. La tasa de erosión (m/año) se clasificó de acuerdo con las 4 categorías de Rangel et al., (2016):

- > -1.5 m/año : Erosión alta
- -0.2 y -1.5 m/año : Erosión
- -0.2 y +0.2 m/año : Estado estable
- > +0.2 m/año : Acreción

Respecto a los niveles de amenaza, en la **Tabla 14** se señalan los niveles de amenaza con su correspondiente descriptor.

Tabla 14. Niveles de amenaza Erosión costera.

Niveles de amenaza	Descriptor
Poco significativo	*Se presenta una tendencia hacia el estado estable o a la acreción, es decir con poca sensibilidad a la erosión.*
Moderado	Se presenta una tendencia al estado estable, sin embargo, la playa tiene sensibilidad al cambio.
Alto	Se presenta una erosión alta con tasas de cambio entre -0,2 y -1,5 m/año. Predomina la pérdida de arena y degradación de la playa.
Muy alto	Se presenta una erosión muy alta, con tasas de cambio superiores a -1,5m/año. Predomina la pérdida de arena, con degradación importante de la playa.

Fuente: Elaboración propia.

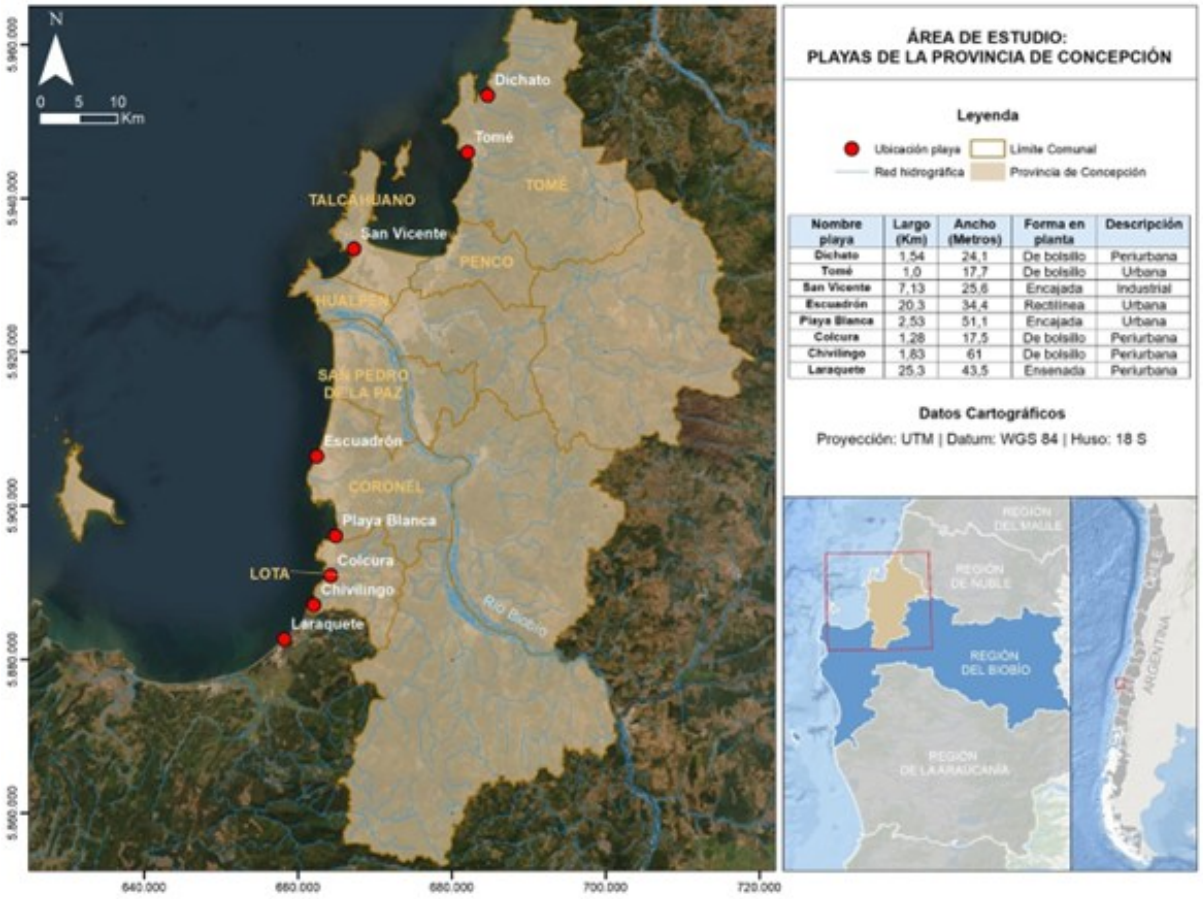
Análisis de la amenaza

En primer lugar, se presentan los antecedentes para las playas de la provincia y posteriormente el análisis de las tasas de erosión que sustentan el mapa de amenaza.

Playas analizadas

Se estableció que en la provincia de Concepción las playas más representativas corresponden a las siguientes: Dichato, Tomé, San Vicente, Escuadrón, playa Blanca, Colcura, Chivilingo y Laraquete (**Figura 24**). El contexto geomorfológico de estas playas es que se insertan en un grupo de bahías cerradas que se extienden entre Dichato y Laraquete, caracterizadas por presentar una tectónica de fallas del terciario que ha originado una estructura de bloques y fosas, favoreciendo la formación de paleocanales marinos antepuestos y paralelos a la costa (Mendoza, 2001).

Figura 24. Localización de las playas analizadas en la provincia de Concepción.



Fuente: Elaboración propia.

La costa de la provincia de Concepción está influida por el desarrollo de una cuenca tectónica generada por fallas normales desarrolladas por una tectónica tensional iniciada o reactivada durante el Plioceno superior o Pleistoceno inferior (Galli, 1967). Estos sectores deprimidos fueron rellenados posteriormente con depósitos sedimentarios de origen fluvio-deltaico, estuarial-marino y continental-marino, de acuerdo con los procesos prevalecientes, formando un gran delta que progradó hacia el mar, para luego quedar emergido debido a procesos

tectónicos. Estos sedimentos corresponden a arenas de diferente origen, limo eólico y coluvio de laderas (Galli, 1967; García, 2004 en Martínez et al., 2018).

Tabla 15. Características morfométricas de las playas analizadas.

Nombre playa	Largo	Ancho	Forma en planta	Descripción
Dichato	1,54	24,1	De bolsillo	Periurbana
Tomé	1,0	17,7	De bolsillo	Urbana
San Vicente	7,13	25,6	Encajada	Industrial
Escuadrón	20,3	34,4	Rectilínea	Urbana
Playa Blanca	1,80	54,7	Encajada	Urbana
Colcura	1,28	17,5	De bolsillo	Periurbana
Chivilingo	1,83	61	De bolsillo	Periurbana
Laraquete*	25,3	43,5	Ensenada	Periurbana

*Nota: Fuera del área de estudio.

Dichato

Esta playa de bolsillo presenta 1,5 km de largo, localizada al interior de una bahía cerrada. Se enmarca dentro de la formación Curanilahue (paleoceno), caracterizada por una litología de bancos de areniscas azulejas, masiva con mantos de carbón y arenisca arcillosa fina, desarrollada en un ambiente continental marino. Presenta una secuencia de sedimentos continentales con intercalaciones marinas.

Los estratos de la formación Curanilahue se apoyan, discordantemente sobre las rocas ígneas del paleozoico al noreste de Tomé. Los afloramientos se distribuyen longitudinalmente al oeste de los afloramientos del basamento metamórfico. Posteriormente estas depresiones han sido rellenadas por sedimentos, emergidas y luego regularizadas por la acción de mareas y corrientes litorales, mientras que las penínsulas constituidas por los horts o bloques son objeto de una intensa abrasión (IGM, 2001; Mendoza, 2001). La playa ha sido intervenida con infraestructura costera, en especial obras de mitigación post tsunami de 2010, como parte del proceso de reconstrucción. Las fuentes de abastecimiento sedimentario dada la naturaleza geológica del área, son locales, influidos por la formación Curanilahue.

Tomé

Esta playa presenta una extensión de 1 km y se clasifica como playa de bolsillo y urbana. Según Araya-Vergara (1984) la geomorfología en esta zona presenta acantilados vivos de roca granítica y otros de formaciones blandas. Esta zona también posee la secuencia sedimentaria del Pleistoceno-Holoceno (Qm), formada por depósitos litorales: arenas y gravas de playas actuales, principalmente en la playa de Punta de Parra. La costa de Tomé presenta drenaje importante, lo cual se relaciona con los sedimentos que aportan a los reducidos sectores arenosos que se intercalan con sectores rocosos.

San Vicente

La playa de la bahía de San Vicente es extensa, de unos 7 km de extensión y su forma en planta es de playa encajada, influida por uso industrial. Desde el punto de vista geológico, el área presenta depósitos litorales, arenas y gravas de playas actuales. Su formación está entre las épocas Pleistoceno-Holoceno y se relaciona fuertemente con la dinámica sedimentaria del antiguo delta del Biobío.

Escuadrón

La playa Escuadrón es una de las más importantes de la provincia, presenta una forma rectilínea con unos 20 km de largo. Se inscribe en la denominada "llanura de San Pedro" (Ilabaca, 1989), una antigua planicie litoral desarrollada durante el Cuaternario, donde actualmente se emplazan las comunas de San Pedro de la Paz y Parte de su conurbación con Coronel. Es un área de desarrollo por excelencia de humedales costeros, pantanos y marismas, pero presionada por la urbanización que comprende las comunas de San Pedro de La Paz por el norte y Coronel por el sur. Está compuesta por depósitos litorales provenientes principalmente de la Formación Huachipato, es decir por arenas volcánicas (basálticas) provenientes del valle del río Laja, las cuales forman la mayor potencia sedimentaria (Galli, 1967). Los materiales que forman la planicie litoral presentan granulometría fina, moderadamente seleccionada, la mayor parte de los granos son fragmentos de roca (basáltica de forma irregular), de magnetita, plagioclasa, hematita y vidrio volcánico, otros constituyentes menores son mica, olivino y cuarzo (Galli, 1967 en Martínez et al., 2016). En el sector norte de la llanura de San Pedro, se desarrolló hasta los años setenta un extenso campo dunar, con alturas de hasta 30 m (Ilabaca, 1979 en Martínez et al., 2016). Se identificaron dos tipos de dunas en el área: las dunas antiguas o paleodunas y las antedunas o dunas primarias vegetadas.

Playas Blanca, Colcura, Chivilingo y Laraquete

Estas playas se encuentran insertas en el Golfo de Arauco, el cual se emplaza sobre secuencias sedimentarias, rocas metamórficas del paleozoico y rocas intrusivas (Sernageomin, 2003). En este sector, Pineda (1983) identifica entre Punta Lavapié y Carampangue, el Cuaternario antiguo compuesto por terrazas marinas y superficies de sedimentación, y el Cuaternario reciente (Holoceno) con sedimentos fluviales y de playas.

De acuerdo con Ramírez (2017), los sedimentos de playa del Golfo de Arauco tienen variaciones latitudinales en cuanto a su composición, y por tanto, en su coloración: las arenas negras de las localidades septentrionales tienen un predominio de líticos volcánicos (50 a 90%), provenientes de las rocas resultantes de la erupción del Volcán Antuco I, transportadas a la región por el río Biobío; mientras que desde Playa Blanca hacia el sur, las arenas blancas tienen un predominio de cuarzo (22 a 74%) y feldespatos (1 a 12%) que proceden de la erosión de las rocas intrusivas y metamórficas de la Cordillera de la Costa, cuyo principal aporte proviene de los ríos Laraquete, Carampangue y Tubul-Raqui. Es por esta razón que el origen de los sedimentos del Golfo de Arauco se considera de origen mixto: procedentes de la erosión de las rocas de la zona costera (partículas autóctonas), y aquellos transportados por los cauces fluviales aledaños (alóctonas).

Definición de áreas amenaza por erosión costera

A partir de los resultados obtenidos utilizando una serie histórica de fotografías aéreas y trabajo en terreno, se han determinado las tasas de cambio de la línea litoral indicadas en la **Tabla 16**. Estas se han comparado con las obtenidas del Proyecto Costas, realizado por el MMA en 2019 (**Tabla 17**). De acuerdo con esto, las playas que pueden compararse han aumentado las tasas de erosión en más de 1 m/año en relación a 2019.

De acuerdo con la **Figura 26**, las playas con mayor tasa de erosión son las de Dichato, Tomé y Laraquete, las cuales retroceden más de 3 m/año para los últimos 40 y 30 años respectivamente, lo cual representa el 62,5% de las playas analizadas. Se destaca especialmente que la totalidad de las playas analizadas se encuentran con erosión con magnitudes superiores a -0,98 m/año.

Tabla 16. Tasas de erosión en las playas analizadas, período 1980-2023/24.

Playa	Período	Nº años	Tasa de cambio (m/año)	Estado
Dichato	1980-2023	43	**-4.92**	Erosión alta
Tomé	1980-2023	43	**-3.93**	Erosión alta
Bahía San Vicente	1992-2023	31	-0.98	Erosión
Escuadrón	1992-2023	31	-1.55	Erosión alta
Playa Blanca	2009-2024	15	-1.57	Erosión alta
Colcura	2009-2024	15	-1.48	Erosión
Chivilingo	2009-2024	15	-1.22	Erosión
Laraquete	1992-2023	31	**-3.79**	Erosión alta

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Tasas de erosión período en playas analizadas, período 1992-2017/18.

Playa	Período	Nº años	Tasa de cambio (m/año)	Estado
Escuadrón	1992-2017	25	-0.32	erosión
Bahía de San Vicente	1992-2018	26	-0.22	erosión
Bahía de Coronel (playa Blanca)	1982-2017	35	-0.49	erosión
Arauco - Laraquete	1992-2017	25	-1.11	erosión

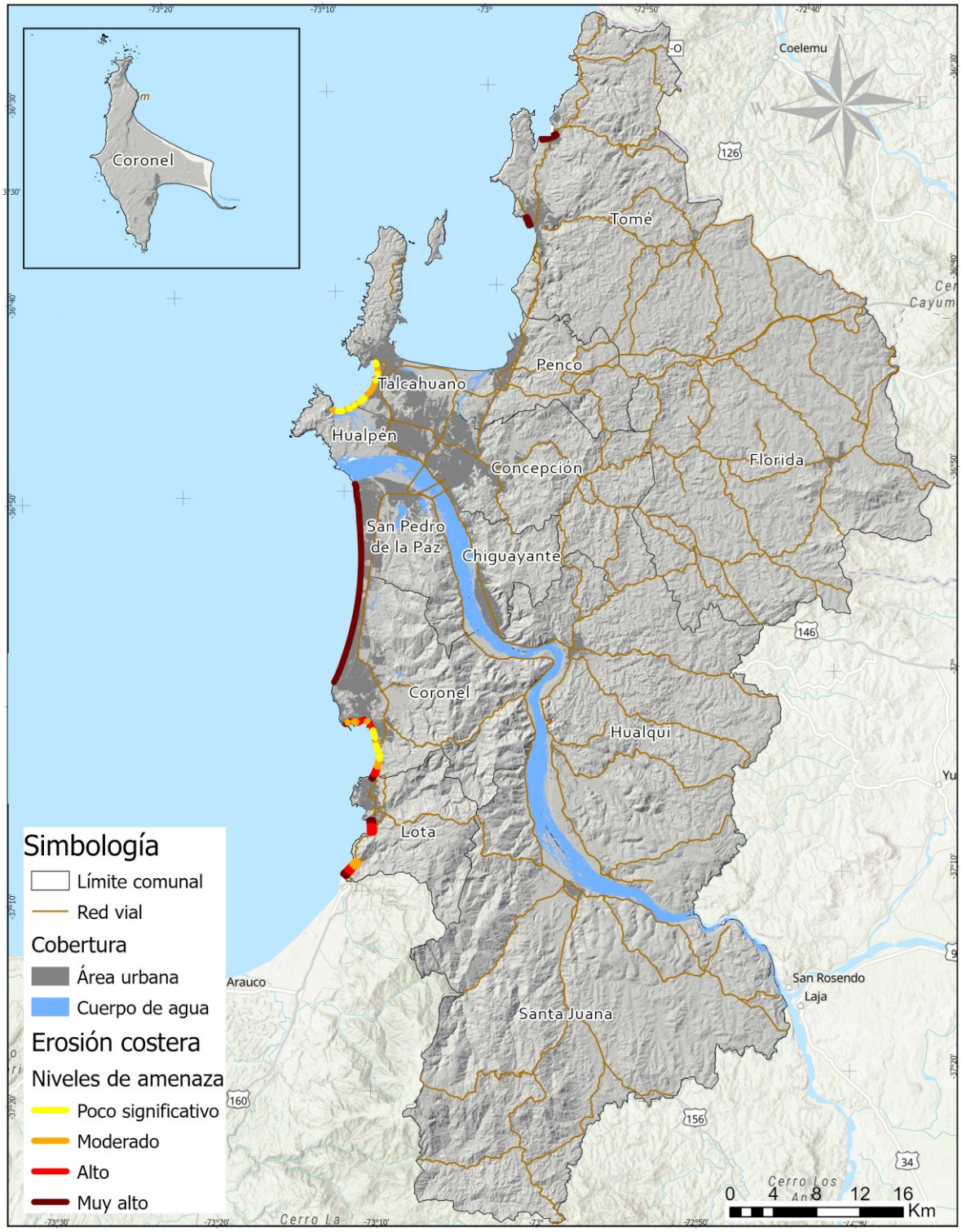
Fuente: "Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile" (proyecto CCostas, MMA, 2019).

Figura 25. Tasa de erosión (m/año) en playas de la provincia de Concepción.



La **Figura 26** representa el mapa de amenaza por erosión costera, donde destacan las playas de las comunas de Tomé, Coronel y Lota con los niveles de erosión más preocupantes. Sin embargo, se debe recordar que varias playas localizadas al norte del Biobío no fueron analizadas por ausencia de datos disponibles.

Figura 26. Mapa provincial de amenaza por erosión costera.



Fuente: Elaboración propia.

VI. Transporte de carga peligrosa, actividades y materiales peligrosos

A partir de la información recolectada se utilizó el análisis de amenaza considerando las probabilidades de ocurrencia y áreas susceptibles. Se considera como referencia la Guía metodológica de evaluación de riesgo ambiental del uso de sustancias químicas en actividades económicas de producción y servicios (MMA, 2015). En el caso del transporte de carga peligrosa también se referencia la guía para la descripción de la acción del transporte terrestre en el SEIA (SEA 2017) y a la Guía de Respuesta a Emergencias 2020 (GRE2020). Se revisó la literatura internacional para identificar recomendaciones de distancia de amortiguamiento o buffer entre actividades industriales/productivas que utilizan, producen y/o almacenan sustancias químicas peligrosas. Se revisaron los siguientes países referentes: Alemania, Australia y Canadá.

Además, se generó un numero acotado (máximo 10-según disponibilidad de información) de posibles escenarios de emergencias y/o accidentes con sustancias peligrosas. Con la contraparte técnica se discute las emergencias a modelar: sustancia, localización, transporte y/o almacenamiento, tipo de emergencia (liberación de sustancias químicas, nubes de gas tóxico, BLEVE (Expansión explosiva del vapor de un líquido en ebullición), jet-fires (Dardo o lengua de fuego), explosiones de nubes de vapor e incendios de charcos/derrames (pool fires). Para el almacenamiento de sustancias peligrosas se consultan los registros de la SEREMI de Salud Región del Biobío. Específicamente para el transporte se sugiere una priorización de las sustancias peligrosas a simular presentes en la vialidad estructurante considerando la frecuencia, el tipo de sustancia peligrosa y los volúmenes transportados (Ministerio de Transportes-SECTRA y el Portal SEIA).

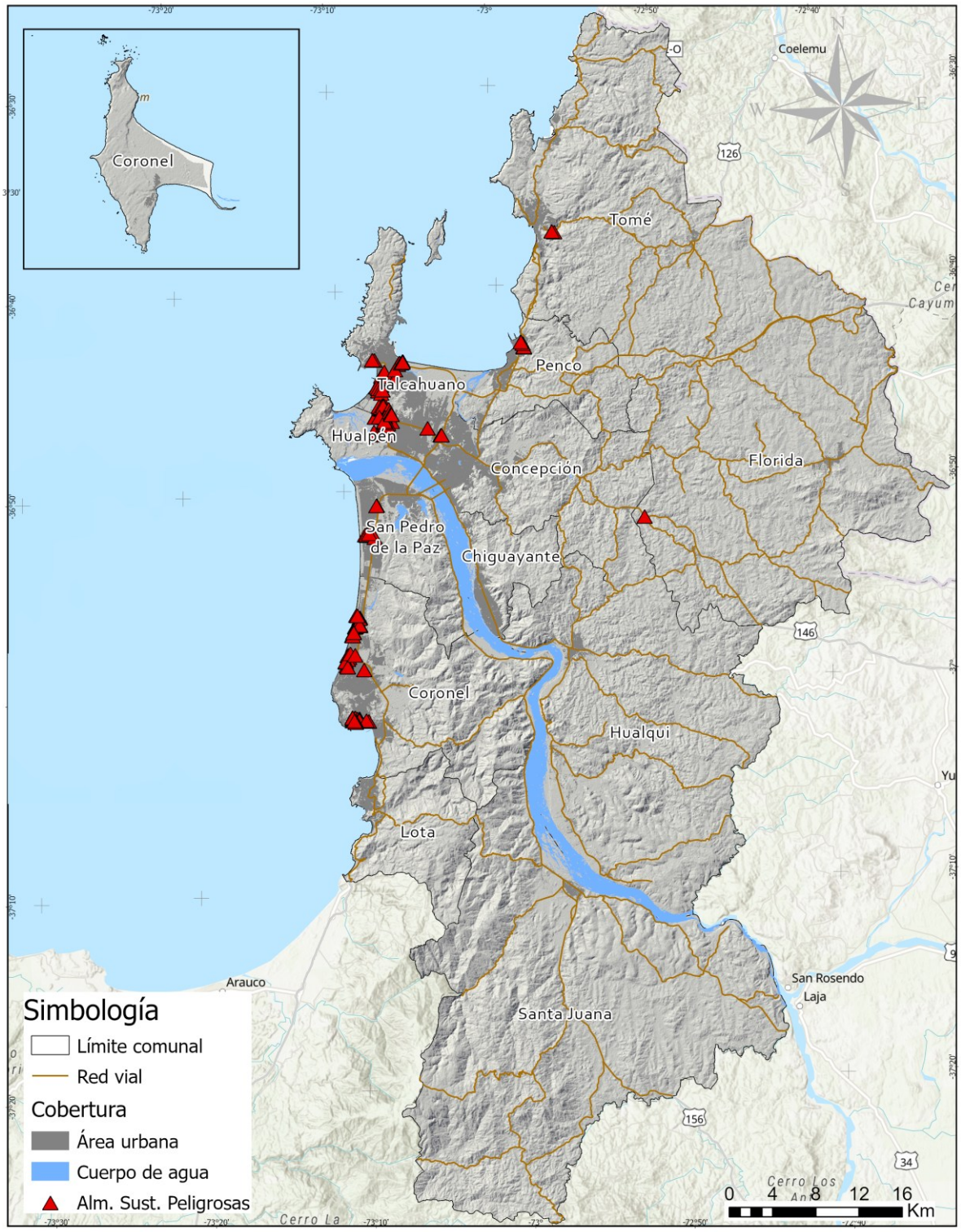
Para la modelación se utilizó el software ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres), (https://www.epa.gov/cameo/aloha-software) de libre acceso. Las estimaciones de la zona de amenaza se muestran en una cuadrícula en ALOHA, y estos se pueden representar en mapas en Google Earth generando una variedad de resultados específicos de los escenarios seleccionados, incluidas imágenes de zona de amenaza, amenazas en ubicaciones específicas y gráficos de intensidad de fuente. ALOHA es parte del paquete de software CAMEO®, desarrollado conjuntamente por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y el U.S. Environmental Protection Agency (EPA). El resultado de la simulación muestra una zona de amenaza, esta zona de amenaza es un área donde un peligro (como la toxicidad o la radiación térmica) ha excedido el nivel de preocupación especificado por el usuario (LOC: Level of concern).

Los criterios para el análisis de los niveles de amenaza se discuten el apartado *Definición de áreas amenaza*, considerando las recomendaciones internacionales y directrices existentes a nivel nacional.

Análisis de la amenaza

Se obtuvo el registro de las instalaciones con almacenamiento de sustancias peligrosas autorizadas por la autoridad sanitaria en el territorio en estudio. El registro permite identificar la sustancia, el volumen almacenado y lo localización del almacenamiento. La **Figura 27** ilustra la ubicación de estas instalaciones, concentradas fundamentalmente en la costa. De las sustancias en el registro se destacan hidrogeno, nitrógeno, oxígeno soda caustica, formalina, trementina, metanol, ácido fórmico, ácido nítrico, ácido clorhídrico, hidróxido de sodio, clorato de sodio, hipoclorito de sodio, dióxido de cloro, peróxido de hidrógeno, amoniaco.

Figura 27. Ubicación del almacenamiento de sustancias peligrosas en la provincia de Concepción.



Fuente: Elaboración propia con datos de SEREMI de Salud Región del Biobío, 2024.

Simulación de escenarios de accidentes de transporte y almacenamiento de sustancias peligrosas.

Los tipos de materiales difieren en sus propiedades físicas, químicas y toxicológicas. Estas propiedades, junto con las condiciones de almacenamiento y liberación de temperatura y presión, determinan en gran medida la posibilidad de que el material explote, se incendie, formar una poza o una nube de vapor y se dispersa como un gas. El resultado de la simulación en el software ALOHA muestra una zona de amenaza, esta zona de amenaza es un área donde un peligro (como la inflamabilidad, toxicidad o la radiación térmica) ha excedido el nivel de preocupación especificado por el usuario (LOC: Level of concern), para este estudio se utilizarán los LOC predefinidos en el software ALOHA por la U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Según la información recolectada en este estudio se seleccionaron ciertas situaciones para modelar accidentes de transporte (puntos 1 – 7) y de almacenamiento (punto 8 -10) según lo descrito en la **Tabla 18**. En la **Tabla 19** se describe las condiciones atmosféricas utilizadas en las modelaciones realizadas.

Tabla 18. Escenarios modelados de accidentes con sustancias peligrosas con el software ALOHA.

Localización	Ruta	Latitud y Longitud	Sustancia a Modelar	Escenario a modelar*
Punto 1	160	36°55'25.89"S 73° 8'57.09"O	Peróxido de Hidrogeno	
Punto 2	160	36°50'19.54"S 73° 5'46.68"O	Metanol Gas Licuado (Butano) Combustible (Isooctano)	2 – Catm2 1 – Catm2 2 – Catm2
Punto 3	154	36°47'19.34"S 73° 4'19.84"O	Gas Licuado (Butano)	3 – Catm2
Punto 4	146	36°49'5.03"S 72°59'23.51"O	Gas Licuado (Butano)	3 – Catm2
Punto 5	Esquina Av. Golondrinas con Gran Bretaña	36°46'34.73"S 73° 6'47.52"O	Gas Cloro	4– Catm1 4– Catm2
Punto 6	152	36°45'8.37"S 72°55'31.72"O	Combustible (Isooctano)	2 – Catm2 3 – Catm2
Punto 7	150	36°43'10.33"S 72°58'29.19"O	Hidrógeno	1 – Catm2 4 – Catm2
Punto 8	Almacenamiento	37° 1'30.35"S 73° 9'4.08"O	Ácido nítrico (70% - simulación permitida en ALOHA)	5 – Catm2
Punto 9		36°45'45.07"S 73° 7'22.79"O	Cloro Gas	5 – Catm1 5 – Catm2
Punto 10		36°43'44.14"S 73° 6'17.67"O	Amoniaco	5 – Catm1 5 – Catm2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Escenario de condiciones atmosféricas para la modelación de accidente de sustancias peligrosa.

Escenario condiciones atmosféricas	**Escenario 1**	**Escenario 2**
Viento (m/s)	2	10
Dirección del Viento	SW	N
altura de medición sobre el suelo (m)	10	
Rugosidad del terreno	Urbano/Forestal (Considerando rugosidad generada por fricción, como por ejemplo árboles o pequeños edificios).	
Cobertura de nubes	Claro (valor 0)	Nublado (valor 7)
Temperatura (°C)	22	12 (sobre el flash point del metanol)
	No Inversión	
Humedad relativa (%)	50	98

Nota: Para cada escenario y sustancia a modelar se consideró:

- Para el transporte de peróxido de hidrógeno la modelación realizada fue en un estanque simplificado cilíndrico de 24 m^3, con un largo de 10 m y una ocupación de un 90% del volumen.
- Para el transporte de la mezcla Gas licuado GLP (70% butano y 30% propano) ya que el programa de modelación ALOHA no incluye en su base de datos químicos de esta mezcla, se modeló solamente la sustancia butano. La modelación realizada fue en un estanque cilíndrico de gas licuado simplificado de 55 m^3, con un largo de 12 m y una ocupación de un 80% del volumen.
- Para el transporte de metanol la modelación fue en un estanque cisterna simplificado de 36 m^3, con un largo de 10,5 m y una ocupación de un 90% del volumen.
- El programa de simulación ALOHA no incluye en su base de datos química los componentes de combustible como la gasolina regular. Se utiliza el compuesto químico de isooctano por su similitud en propiedades fisicoquímicas con la finalidad de lograr tener una aproximación de las zonas de amenaza por derrame e incendio de hidrocarburos. La modelación fue realizada en un estanque cisterna simplificado a un estanque cilíndrico de 32 m^3, con un largo de 10,3 m y una ocupación de un 90% del volumen.
- Para el transporte de cloro se modeló la fuga de 250 kg de cloro gas. Se consideró que el estanque transportado se daña durante la colisión y al mismo tiempo libera su contenido. Se simula una liberación instantánea considerando que los 250 kg de cloro se liberan simultáneamente como una sola liberación.
- Para el transporte de hidrogeno la modelación fue realizada en un estanque simplificado de 43 m^3, con un largo de 12 m y una masa transportado de 720 kg.
- Para el almacenamiento de ácido nítrico se consideró para la modelación un volumen de 45 m^3, un área de charco de la fuga de 2 m^2, y que el ácido se encuentra a una concentración del 70 % (mayor al valor indicado en el registro de almacenamiento obtenido dese la SEREMI de Salud Región del Biobío de un 12%, esto se debe a las limitaciones del software ALOHA que permite para esta sustancia modelar solamente a concentraciones sobre el 69%).
- Para el almacenamiento de cloro gas se modelaron dos situaciones de almacenamiento, un estanque de 3,26 m^3 y uno 34,73 m^3, la información de estos volúmenes fue obtenida de los registros de almacenamiento de sustancias peligrosa de la SEREMI de Salud Región del Biobío.
- Para el almacenamiento de amoniaco se modeló un almacenamiento de 3 m^3 almacenado considerando su forma líquida y gas. Este volumen fue obtenido de los registros de almacenamiento de sustancias peligrosa de la SEREMI de Salud Región del Biobío.
- Para la modelación de accidentes de transporte de sustancias peligrosa se utilizó (a) un valor de abertura de 5 cm de diámetro, el cual fue utilizado por Bariha et al., (2016) considerando una grieta formada en el tanque debido al vuelco de este y su colisión con el separador de la carretera; (b) la altura de la abertura del estanque (% por encima del fondo del tanque) fuera de un 10%, este valor permite la fuga o derrame de la mayoría del volumen de la sustancia contenida en el estanque.

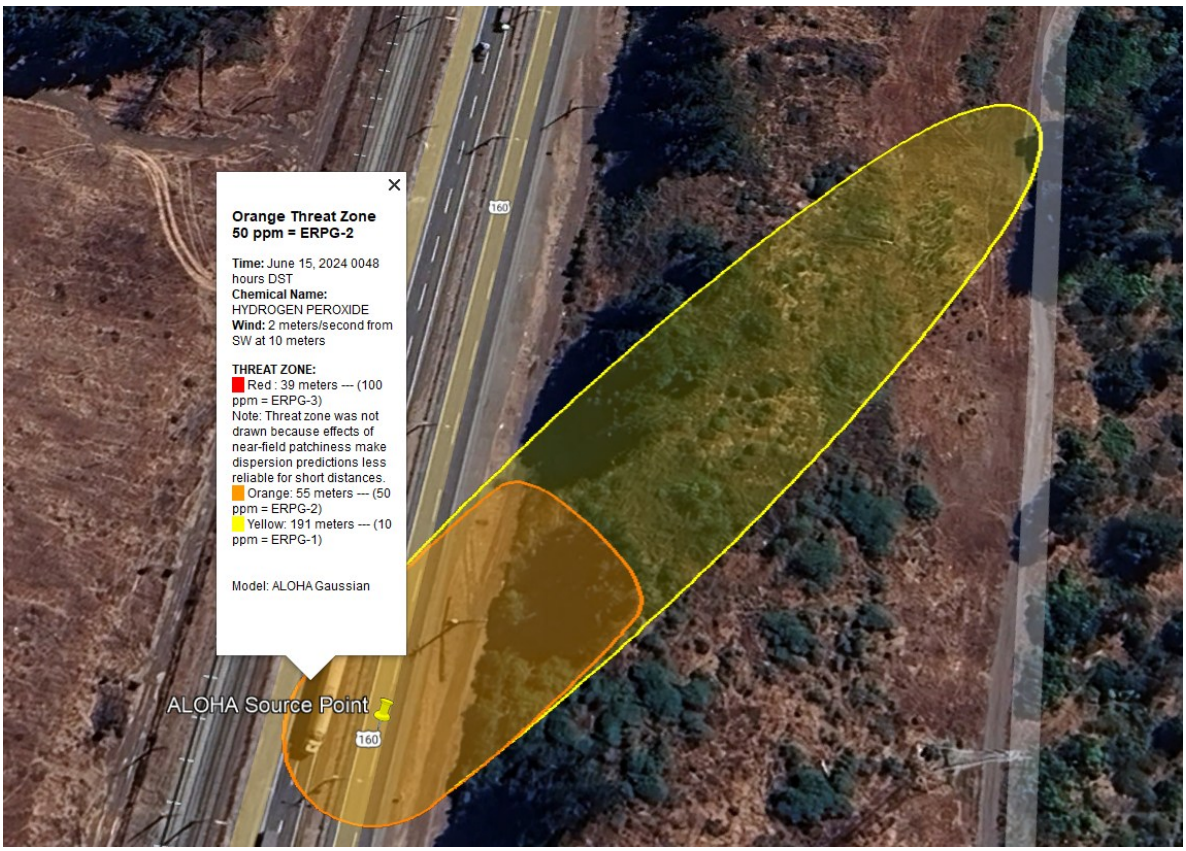
Los resultados de las modelaciones se presentan en la **Figura 28** a la **Figura 36**. Las figuras muestran la ubicación de donde se produce el accidente (ALOHA Source Point, color amarillo) y las distancias críticas dependiendo del escenario a modelar. En la **Tabla 20** se explican los niveles o zonas de amenaza que el software ALOHA dimensiona para cada modelación.

Tabla 20. Niveles de amenaza que el software ALOHA dimensiona para cada modelación.

Derrame/Fuga formando un Jetfire; un incendio de charco y explosión BLEVE, zonas dependientes de la exposición a radiación térmica. La zona de amenaza roja representa el peor nivel de peligro (potencialmente letal), y las zonas de amenaza naranja y amarilla representan áreas de peligro decreciente, siendo estas zonas indicadas como posibles de "producir quemadura de 2° grado" y "dolor al individuo expuesto", respectivamente.
Fuga y área tóxica de la nube de vapor, zonas dependientes de la dispersión de gases tóxicos. Los AEGL(s) son el Lineamiento de Niveles de Exposición Aguda, los AEGLs representan los límites de exposición para el público en general después de una única y rara exposición en la vida. ALOHA utiliza AEGL de 60 minutos. Los valores AEGL (En inglés: Acute Exposure Guideline Levels): AEGL - 1: es la concentración de una sustancia química en el aire (expresada en ppm o mg/m^3) por encima de la cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles, podría experimentar molestias notables, irritación o ciertos efectos asintomáticos. Estos efectos son transitorios, no incapacitantes y reversibles una vez que cesa el periodo de exposición. AEGL – 2: Es la concentración de una sustancia química en el aire (expresada en ppm o mg/m^3) por encima de la cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles, podría experimentar efectos duraderos serios o irreversibles o ver impedida su capacidad para escapar. AEGL – 3: Es la concentración de una sustancia química en el aire (expresada en ppm o mg/m^3) por encima de la cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles, podría experimentar efectos amenazantes para la vida o incluso provocar la muerte.
Fuga y área inflamable de nube de vapor, zonas dependientes de la dispersión de gases inflamables. LEL (Lower Explosive Limits: Nivel inferior Explosivo). Algunos experimentos han demostrado que las bolsas de llamas pueden ocurrir en lugares donde la concentración promedio es superior al 60% del LEL. ALOHA usa el 60% de LEL como el LOC inflamable predeterminado para la zona de amenaza roja. La zona de amenaza roja representa el área inflamable estimada por lo que podría ocurrir un incendio repentino o una explosión de nube de vapor en algún momento después de que comience la liberación. La zona de amenaza amarilla representa el área estimada donde la concentración alcanzada supera el 10% de LEL un nivel que los operadores de emergencias suelen utilizar.

Fuente: Jones et al., 2013 Manual de ALOHA.

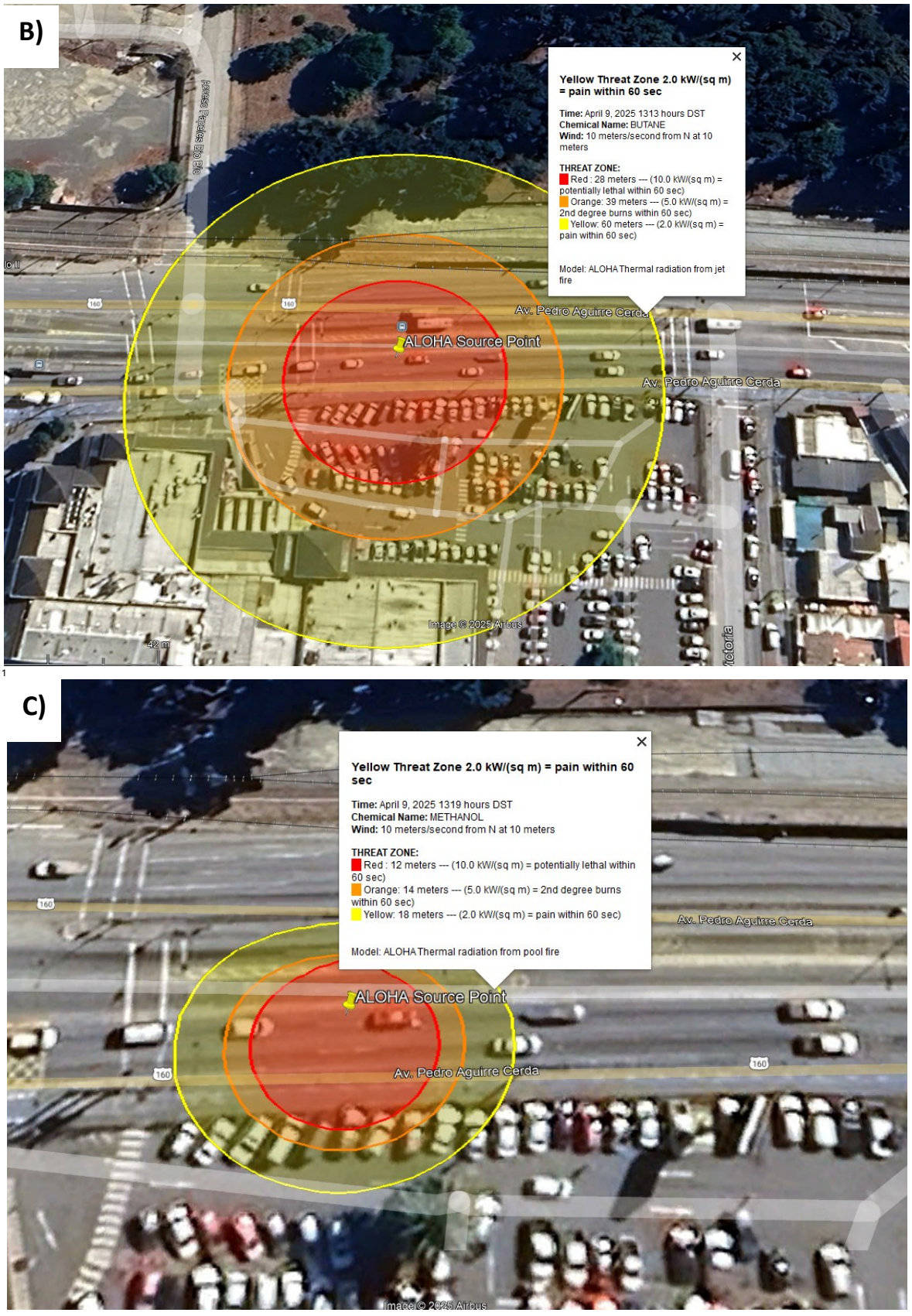
Figura 28. Modelación fuga de peróxido de hidrogeno en condiciones atmosféricos del escenario 1. La modelación se ilustra en la localización Punto 1.



Fuente: Elaboración propia (Resultado de modelación en ALOHA).

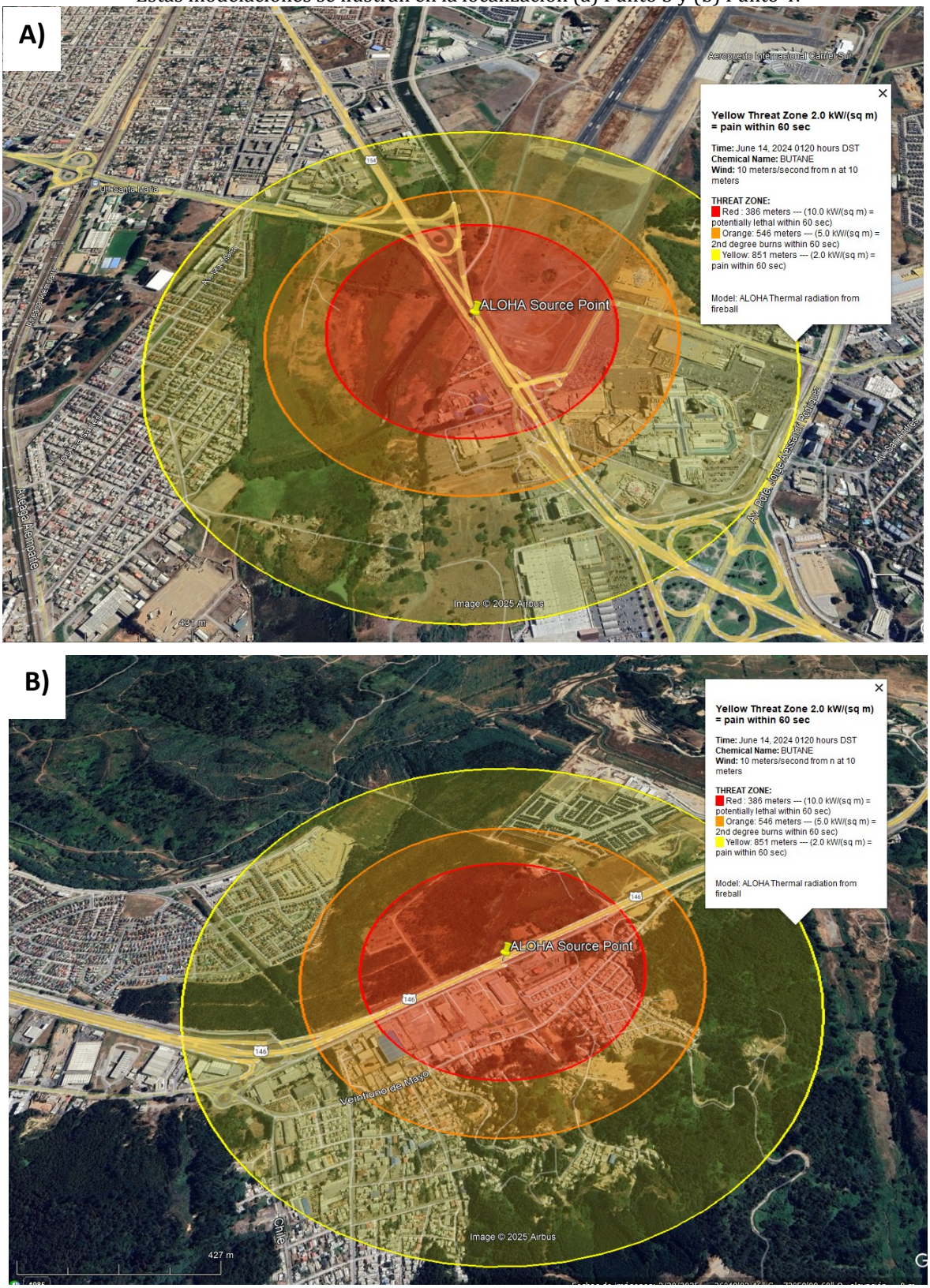
Figura 29. Modelación de derrame e incendio de (a) butano, (b) isooctano y (c) metanol en condiciones atmosféricos del Escenario 2 con una abertura de escape de la sustancia circular de 5 cm de diámetro y una altura de la abertura del estanque de un 10 %.





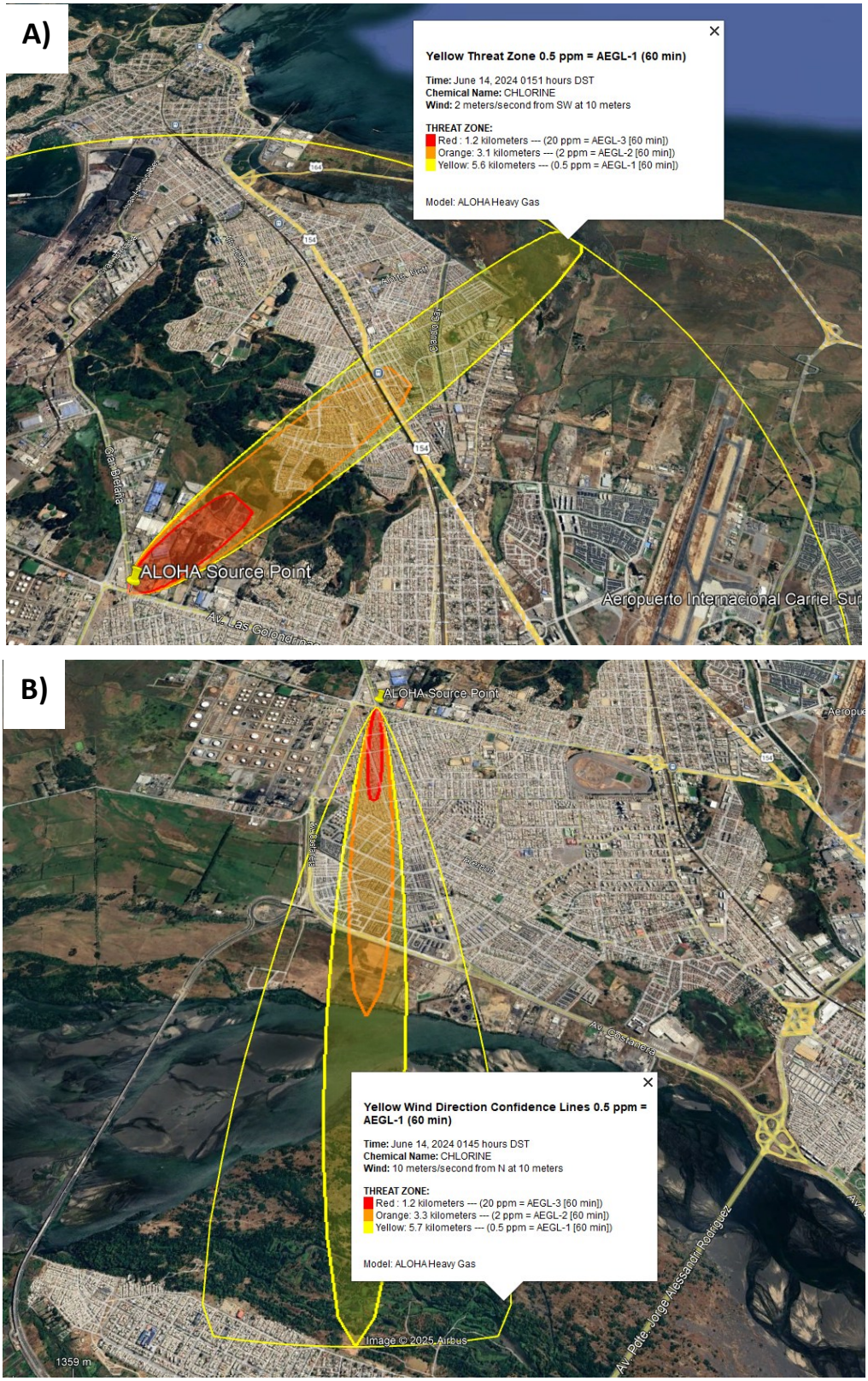
Fuente: Elaboración propia (Resultado de modelación en ALOHA).

Figura 30. Modelación de Explosión BLEVE para butano en condiciones atmosféricas del Escenario 2. Estas modelaciones se ilustran en la localización (a) Punto 3 y (b) Punto 4.



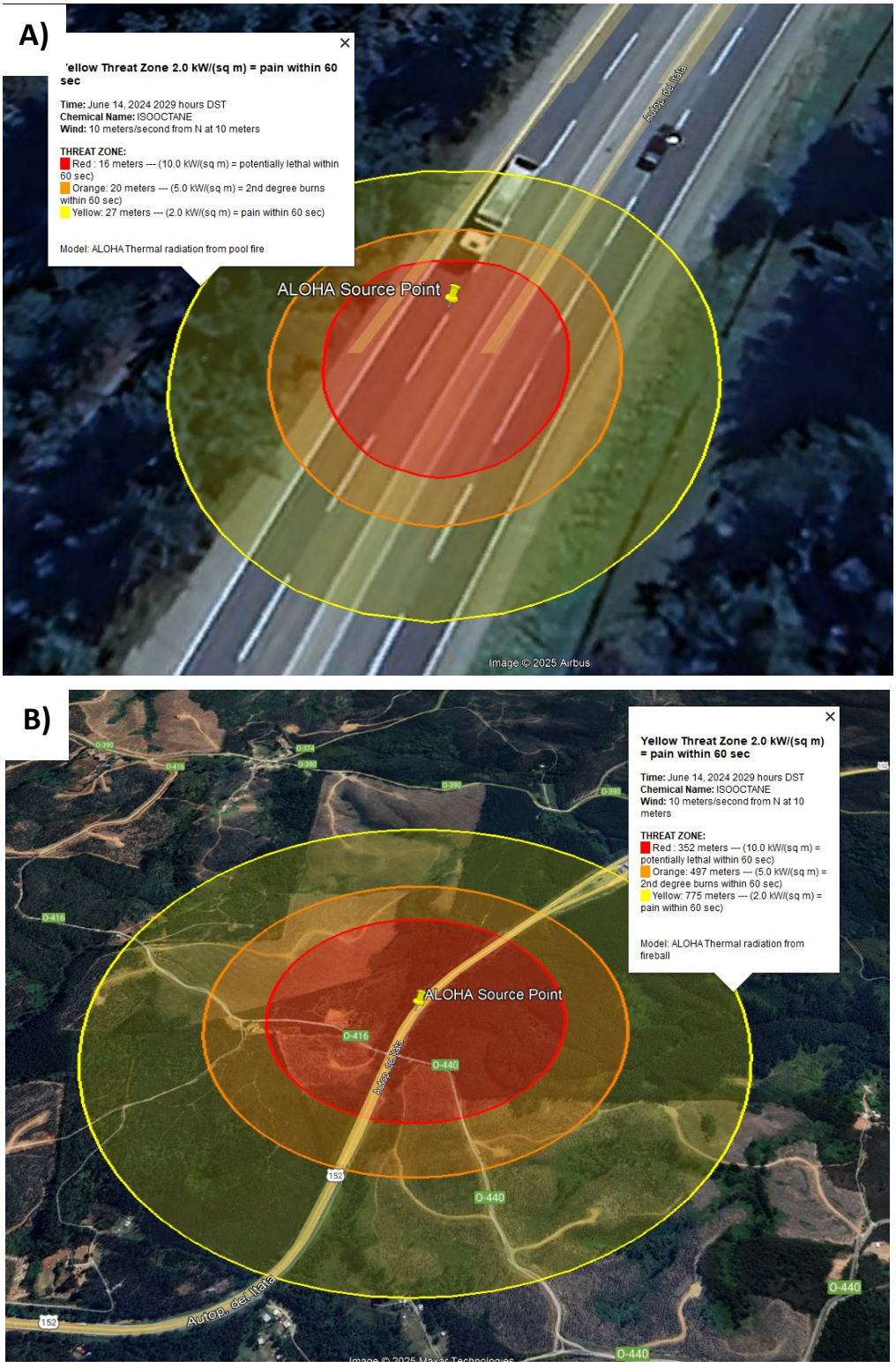
Fuente: Elaboración propia (Resultado de modelación en ALOHA).

Figura 31. Modelación de transporte de gas cloro en condiciones atmosféricos del (a) Escenario 1 y (b) del Escenario 2. Estas modelaciones se ilustran en la localización Punto 5.



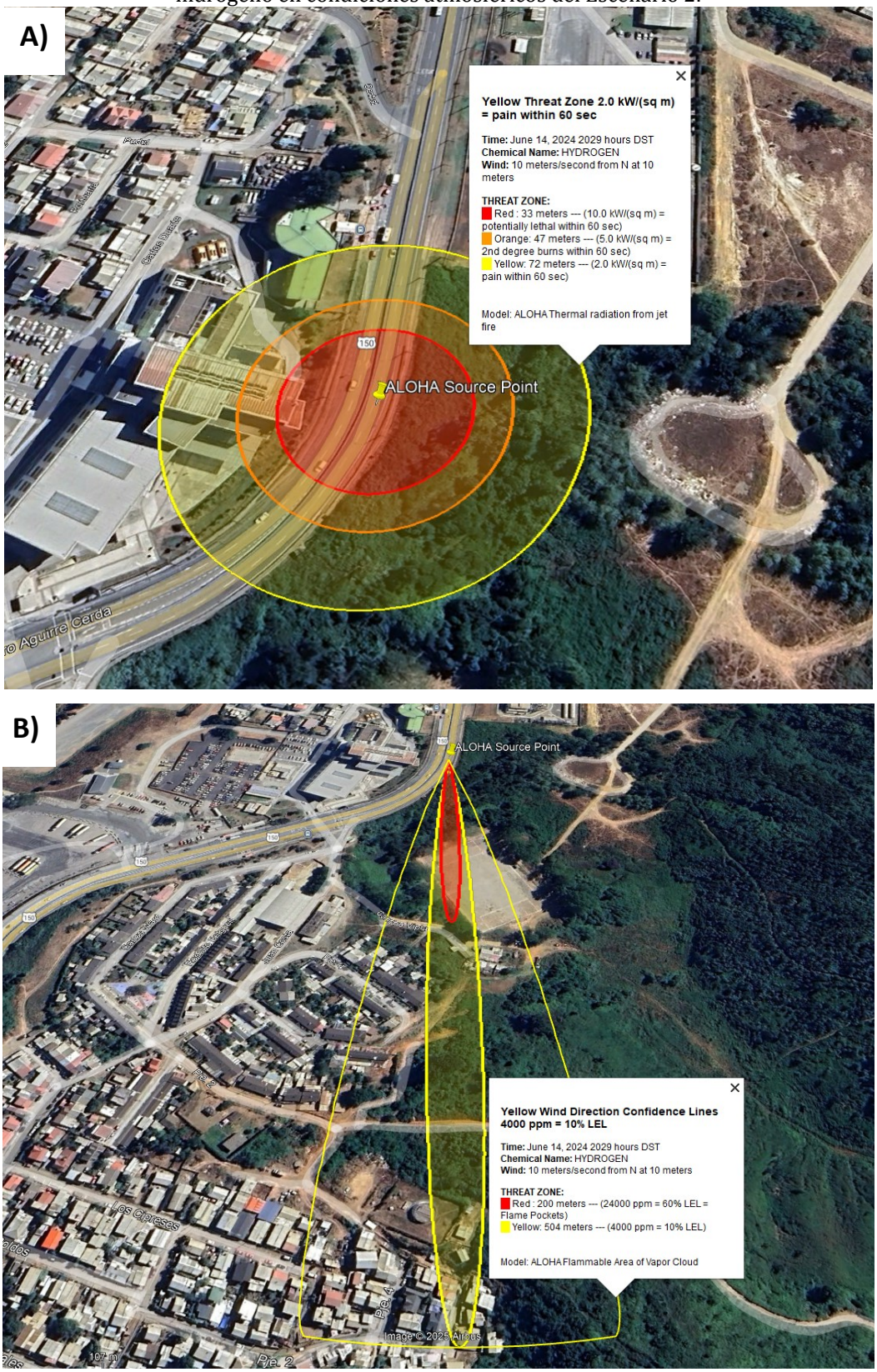
Fuente: Elaboración propia (Resultado de modelación en ALOHA).

Figura 32. Modelación de (a) derrame e incendio y (b) explosión BLEVE para transporte de isooctano en condiciones atmosféricas del Escenario 2 con una abertura de escape de la sustancia circular de 5 cm de diámetro.



Fuente: Elaboración propia (Resultado de modelación en ALOHA).

Figura 33. Modelación de (a) fuga e incendio y (b) fuga y área inflamable de nube de vapor, para hidrógeno en condiciones atmosféricos del Escenario 2.



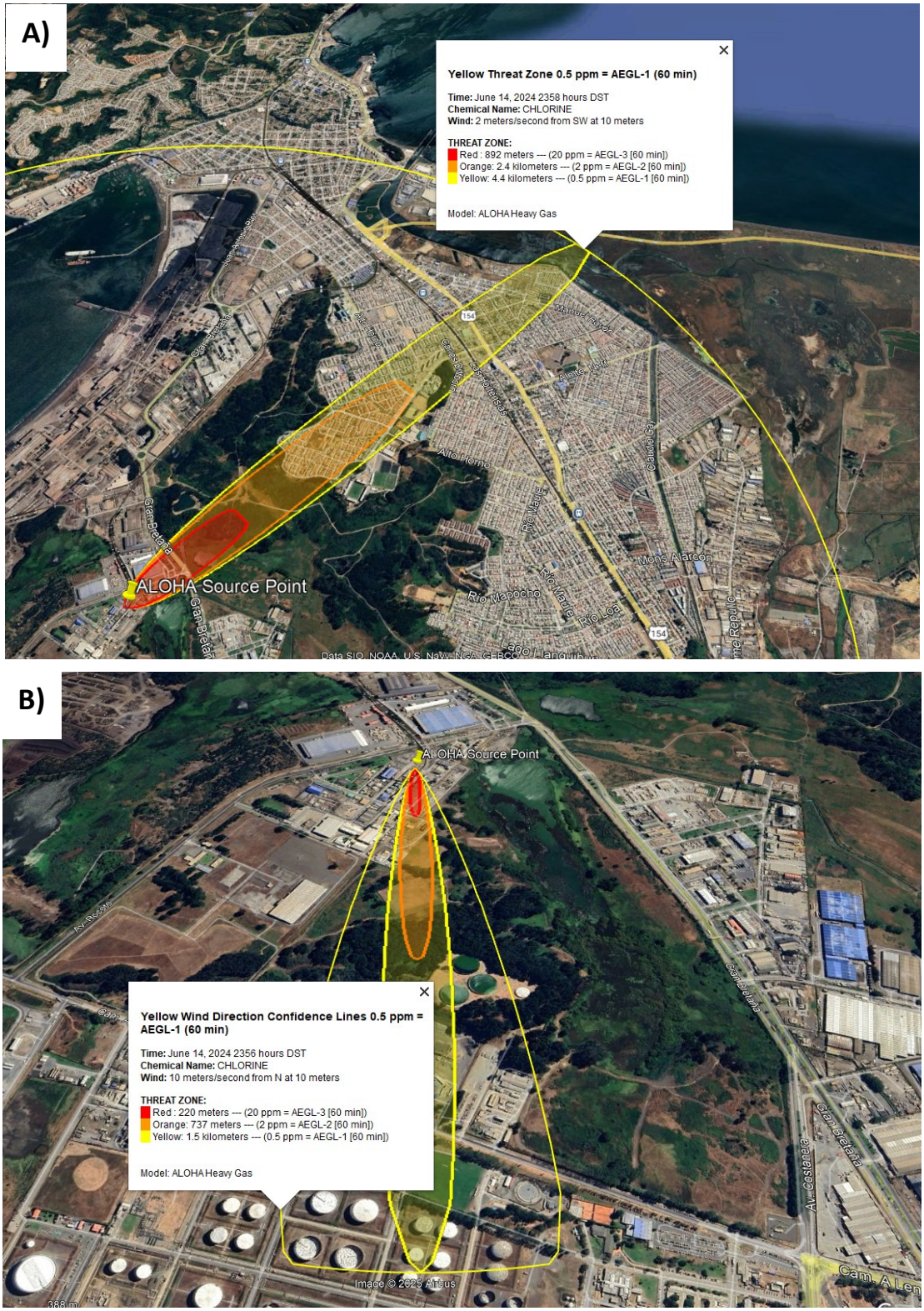
Fuente: Elaboración propia (Resultado de modelación en ALOHA).

Figura 34. Modelación de fuga de ácido nítrico al 70 %, considerando un almacenamiento de 4,5 m3, con un charco de evaporación de 2 m^2 en condiciones atmosféricos del Escenario 1.



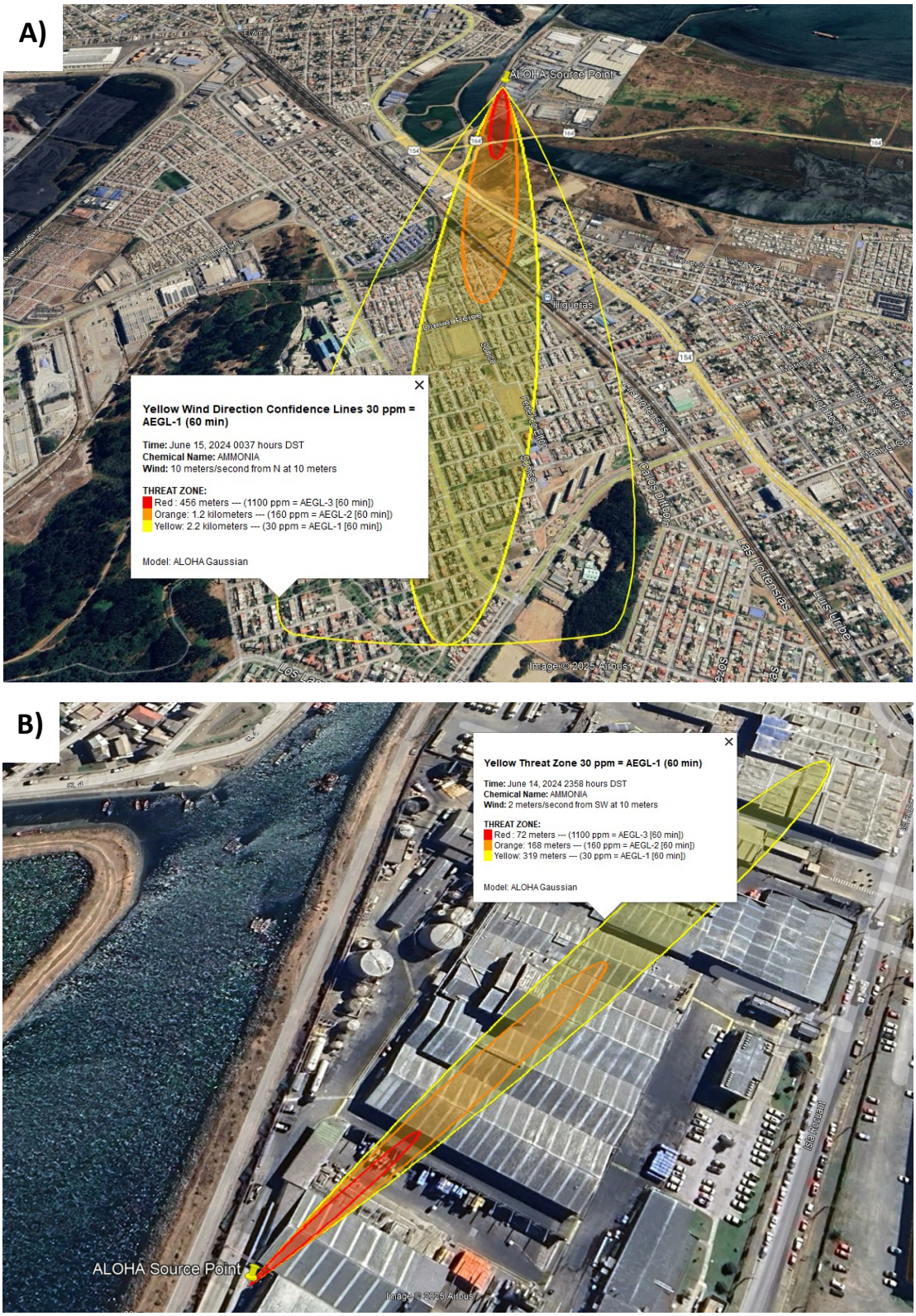
Fuente: Elaboración propia (Resultado de modelación en ALOHA).

Figura 35. Modelación de fuga de cloro gas (fuente instantánea) considerando un almacenamiento de (a) 34,73 m³ en condiciones atmosféricos del Escenario 1 y (b) 3,26 m³ en condiciones atmosféricos del Escenario 2



Fuente: Elaboración propia (Resultado de modelación en ALOHA).

Figura 36. Modelación de fuga de amoniaco (fuente instantánea) considerando un almacenamiento de (a) 3 m^3 como líquido en condiciones atmosféricos del Escenario 2 y (b) 3 m3 como gas en condiciones atmosféricos del Escenario 1.



Fuente: Elaboración propia (Resultado de modelación en ALOHA).

Las modelaciones con el ALOHA integrada a herramientas de información geográficas son de gran utilidad para evaluar geo-espacialmente como la infraestructura, sectores con alta vulnerabilidad y la población en general es afectada en un accidente de sustancias peligrosas. Se observa de las simulaciones realizadas que los escenarios a considerar son numerosos y que dependen de los factores que se ingresen a la modelación del accidente: sustancia química, condiciones atmosféricas, diferentes tipos de peligros (dependiendo del escenario de liberación: toxicidad, inflamabilidad, radiación térmica y sobrepresión, la dispersión atmosférica de derrames), el volumen derramado o fugado en el accidente, entre otros.

Aunque, el software ALOHA fue diseñado específicamente para planificar, entrenar personal y responder ante situaciones de emergencias, estas modelaciones permiten visualizar la complejidad de planificar el territorio cuando hay transporte o se emplazan establecimientos industriales que manejan, producen y/o almacenan sustancias químicas peligrosas. La amenaza que presentan estas sustancias, en el transporte o establecimientos productivos, se mitiga y minimiza estableciendo múltiples medidas preventivas, normas de seguridad, y de control (de gestión y tecnológica) por parte de quienes son los responsables del manejo de las sustancias. Por consiguiente, el establecer una zona única de buffer de protección es muy complejo y se debe realizar un análisis de riesgo "caso a caso" para determinar la distancia entre la actividad productiva/industrial y otros usos (como el de infraestructura habitacional), tal como lo indica el DS43/2016 que Aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Sustancias Peligrosas y los Permisos Ambientales Sectoriales (PAS) pertinentes según se encuentra en el Título VII del Reglamento del SEIA.

Al existir un movimiento de las sustancias de transporte o que el área de afectación/influencia de una emergencia química involucra a varias comunas, se sugiere que las comunas de Concepción Metropolitano realice un estudio en conjunto con la metodología denominada Proceso APELL (*Awareness and preparedness for Emergencies at Local Leve* / Concientización para Emergencias a Nivel Local) (PNUMA 2015), tal como fue realizado en la comuna de Coronel y que presentó su informe final publicado en septiembre del 2017.

Además, aunque el DS 298/1994 en su Artículo 17° indica que "Los vehículos que transporten sustancias peligrosas deberán evitar el uso de vías en áreas densamente pobladas y no podrán circular por túneles cuya longitud sea superior a 500 m, cuando éstos tengan una vía alternativa segura, como es el caso de Lo Prado, Zapata y Chacabuco. La autoridad podrá fijar restricciones al uso de las vías, señalizando los tramos restringidos y asegurando la ruta alternativa correspondiente. Igualmente podrá establecer restricciones respecto de los lugares y horarios de estacionamiento, carga y descarga de los vehículos que transporten sustancias peligrosas. El itinerario deberá programarse de forma de evitar la presencia del vehículo transportando sustancias peligrosas en vías de gran flujo de tránsito, en los horarios de mayor intensidad de tráfico. es relevante que exista"; se sugiere que se establezca un registro de las sustancias químicas transportadas por la autoridad pertinente (en concordancia con quienes deben responder a una emergencia) utilizando los beneficios de utilizar el rastreo GPS para el transporte, teniendo en consideración la historia y vocación productiva del área en estudio.

Definición de áreas amenaza transporte y almacenamiento de sustancias peligrosas

Por las características del presente estudio se complementan las modelaciones con información bibliográfica que establecen:

(i) Distancias de aislamiento inicial y acciones de protección ante derrames. Según las sustancias peligrosas identificadas que son transportados o almacenadas en las comunas en estudio se presenta la **Tabla 21** que describe el área de impacto de diversas clases de materiales peligrosos posibles de encontrar en un tráfico terrestre por camiones o ferrocarriles; y la **Tabla 22**, que fue extraída de la información de la Guía de Respuesta a Emergencias 2024 (GRE 2024) que indica las distancias de aislamiento inicial y acciones de protección para derrames grandes (más de 208 litros) para diferentes tipos de contenderos de transporte del amoníaco anhidro y el cloro.

Tabla 21. Área de Impacto Potencial por Materiales Peligrosos.

Clase de Materiales Peligrosos	Área de impacto
Explosivos	1,0 millas (1,6 km) todas las direcciones
Gas inflamable	0,5 millas (0,8 km) todas las direcciones
Gas venenoso	5,0 millas (8,0 km) todas las direcciones
Inflamable / Líquido Combustible	0,5 millas (0,8 km) todas las direcciones
Sólido inflamable; Espontáneamente Combustible; Peligroso cuando esta Mojado	0,5 millas (0,8 km) todas las direcciones
Oxidante / Peróxido Orgánico	0,5 millas (0,8 km) todas las direcciones
Venenoso, no gas	5,0 millas (8,0 km) todas las direcciones
Material corrosivo	0,5 millas (0,8 km) todas las direcciones

Fuente: National Highway Institute (U.S.), 1996.

Tabla 22. Distancias de aislamiento inicial y acciones de protección para derrames grandes para las sustancias Amoniaco Anhidro y Cloro.

	Primero **AISLAR** a la Redonda		Luego, **PROTEJA** a las Personas en la Dirección del Viento Durante									
			DÍA						**NOCHE**			
			Viento Leve (< 6 mph = < 10 km/h)		Viento Moderado (6 - 12 mph = 10 - 20 km/h)		Viento Fuerte (> 12 mph = > 20 km/h)		Viento Leve (< 6 mph = < 10 km/h)		Viento Moderado (6 - 12 mph = 10 - 20 km/h)		Viento Fuerte (> 12 mph = > 20 km/h)	
	Metros	(Pies)	Kilómetros	(Millas)	Kilómetros	(Millas)	Kilómetros	(Millas)	Kilómetros	(Millas)	Kilómetros	(Millas)	Kilómetros	(Millas)
CONTENEDOR DE TRANSPORTE	**UN1005 Amoniaco, anhidro: Derrames Grandes**													
Carrotanque de ferrocarril	300	(1000)	1.9	(1.2)	1.5	(0.9)	1.1	(0.6)	4.5	(2.8)	2.5	(1.5)	1.4	(0.9)
Autotanque o remolque	150	(500)	0.9	(0.6)	0.5	(0.3)	0.4	(0.3)	2.0	(1.3)	0.8	(0.5)	0.6	(0.4)
Tanque de agricultura	60	(200)	0.5	(0.3)	0.3	(0.2)	0.3	(0.2)	1.4	(0.9)	0.3	(0.2)	0.3	(0.2)
Múltiples cilindros pequeños	30	(100)	0.3	(0.2)	0.2	(0.1)	0.1	(0.1)	0.7	(0.5)	0.3	(0.2)	0.2	(0.1)
CONTENEDOR DE TRANSPORTE	**UN1017 Cloro: Derrames Grandes**													
Carrotanque de ferrocarril	1000	(3000)	10.1	(6.3)	6.8	(4.2)	5.3	(3.3)	11.0+	(7.0+)	9.2	(5.7)	6.9	(4.3)
Autotanque o remolque	600	(2000)	5.8	(3.6)	3.4	(2.1)	2.9	(1.8)	6.7	(4.3)	5.0	(3.1)	4.1	(2.5)
Múltiples cilindros tones	300	(1000)	2.1	(1.3)	1.3	(0.8)	1.0	(0.6)	4.0	(2.5)	2.4	(1.5)	1.3	(0.8)
Múltiples cilindros pequeños o un cilindro ton	150	(500)	1.5	(0.9)	0.8	(0.5)	0.5	(0.3)	2.9	(1.8)	1.3	(0.8)	0.6	(0.4)

Fuente: Guía de Respuesta en caso de Emergencias (GRE) 2024.

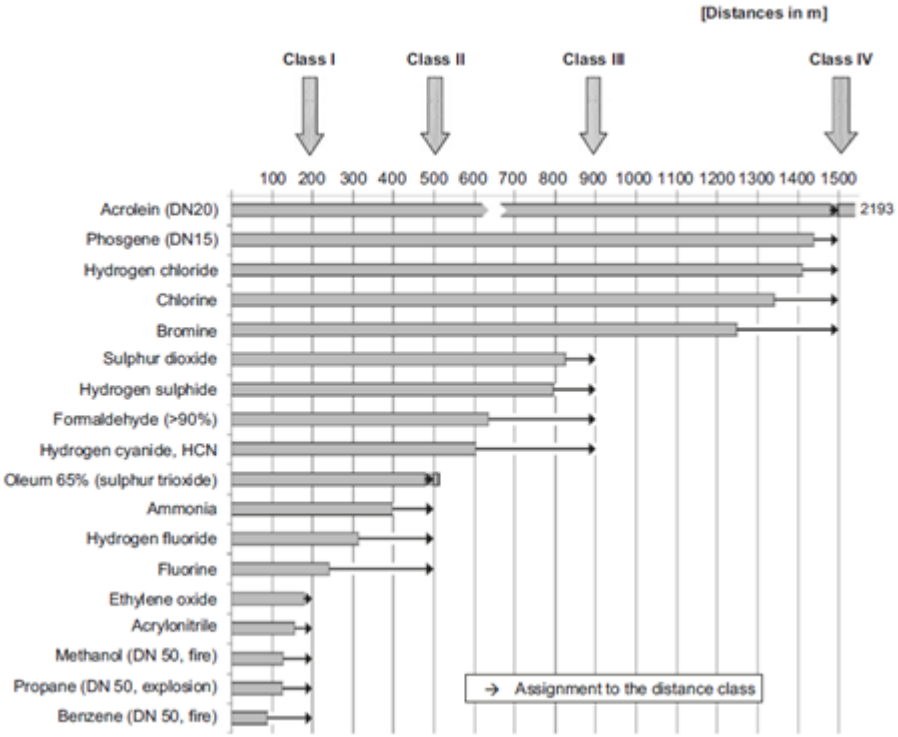
(i) Distancias de amortiguamiento o buffer recomendadas para la planificación del uso del territorio. Para un análisis de distancia de amortiguamiento o buffer entre

actividades industriales/productivas que utilizan, producen y/o almacenan sustancias químicas peligrosas se revisaron los siguientes países referentes: Alemania, Australia y Canadá.

Alemania: Hauptmanns, U. (2020) realiza un análisis de las directrices alemanas donde se determinan las distancias de seguridad adecuadas y que proporcionan recomendaciones sobre las distancias que son apropiadas para la planificación sin conocimiento de detalles, es decir, sin conocimiento del tipo de infraestructura que se construirán allí en el futuro. Por ejemplo, de la ubicación de un nuevo establecimiento industrial, modificaciones de un establecimiento existente, nuevos desarrollos en infraestructura que incluyan: rutas de transporte, ubicaciones de zonas residenciales en las proximidades de establecimientos, entre otros; y que puede aumentar el riesgo o las consecuencias de un accidente mayor. Se indica en esta referencia que puede haber desviaciones de las distancias recomendadas si existen situaciones especiales en el ordenamiento territorial.

La **Figura 37** muestra las distancias recomendadas para una serie de sustancias utilizadas frecuentemente en la industria de procesos. Para facilitar la aplicación, las distancias se asignan en cuatro clases. Por ejemplo, para la sustancia metanol se propone una distancia apropiada de 100 -200 m, mientras que para la sustancia cloro se propone una distancia apropiada de 1300 – 1500 m. Hauptmanns, U. (2020) también señala que, si se conocen los detalles de la instalación a evaluar, se abordaría el caso individualmente en un contexto de planificación del territorio con conocimiento de los detalles.

Figura 37. Distancias de seguimiento recomendadas para la planificación del uso del suelo sin conocimiento de los detalles.



Fuente: Hauptmanns, U., 2020; esquematizando lo obtenido de las directrices alemanas.

Australia: La guía de la Environmental Protection Authority (EPA) australiana (2005) titulada de la "Separation Distances between Industrial and Sensitive Land Uses" define los tipos de usos sensibles del suelo como "los usos del suelo que se consideran potencialmente sensibles a las emisiones de la industria y la infraestructura, que incluyen desarrollos residenciales, hospitales, hoteles, moteles, hostales, parques de caravanas, escuelas, residencias de ancianos, guarderías, centros comerciales, parques infantiles y algunos edificios públicos. Algunos usos del suelo comerciales, institucionales e industriales que requieren altos niveles de comodidades o son sensibles a emisiones particulares también pueden considerarse usos del suelo sensibles. Los ejemplos incluyen algunos puntos de venta minorista, oficinas y centros de capacitación, y algunos tipos de instalaciones de almacenamiento y fabricación". Las distancias de separación genéricas propuestas en esta guía son una herramienta para apoyar en la determinación de distancias adecuadas entre la industria y los usos sensibles del suelo donde la industria puede tener el potencial de afectar. Esta guía, además, señala que "cuando la distancia de separación es menor que la distancia genérica propuesta, se debe presentar un estudio científico basado en información específica del sitio y de la industria para demostrar que una distancia menor no resultará en impactos inaceptables". La **Tabla 23** presenta algunos ejemplos de distancias genéricas de separación entre industria y usos sensibles, la guía indica que estas pautas genéricas no tienen en cuenta: impactos acumulativos; emisiones atípicas; la protección de los recursos naturales y elementos significativos del entorno natural; y posibles impactos sobre la salud derivados de las emisiones. La **Tabla 23** presenta las industrias que incluyen almacenamiento de combustible, el proceso cloro-alkali y fabricación de resinas, las cuales se asemejan a las existentes en las comunas de Concepción Metropolitano.

Tabla 23. Ejemplos de distancias genéricas de separación entre industria y usos sensibles (EPA 2005).

Industria	Descripción	Distancia de Buffer (amortiguación) en metros y notas de calificación.
Almacenamiento de combustible: petróleo crudo y productos derivados del petróleo en tanques o recipientes con una capacidad superior a 2000 toneladas	Techos fijos	300-500, según el tipo de combustible almacenado y el tamaño
	Techos flotantes	200-1000, dependiendo del combustible almacenado y del tamaño
Proceso cloro-alkali	Fabricación de soda cáustica y cloro.	2000 -3000
Fabricación de resinas	Fabricación de caucho y resinas sintéticas	1000

Fuente: Elaboración propia, en base a EPA, 2005.

Canadá: Por ejemplo, en Canadá el condado de Strathcona en Alberta, el Plan Municipal General y el Reglamento de uso del territorio establecieron una distancia de separación de 3 km entre la industria pesada existente y el futuro desarrollo residencial a menos que se determine lo contrario mediante una evaluación de impacto ambiental que una distancia menor está garantizada, en ningún caso menos de 1,5 km. Identifica como industrias pesadas: refinerías de petróleo, plantas petroquímicas y otros que tienen o podrían tener un efecto perjudicial significativo sobre la seguridad, el uso, la calidad de vida o el disfrute de sitios adyacentes o cercanos debido a la apariencia, el ruido, el olor, la emisión de contaminantes, riesgos de incendio o explosivos, o mercancías peligrosas. Además, se señala que la distancia de separación se medirá desde el límite más cercano del área residencial hasta el edificio o estructura más cercana que sea parte de dicho uso industrial. Al designar terrenos, se medirá

la distancia hasta el límite de la propiedad en la que se podrán permitir dichos usos industriales (MIACC, 1995).

Criterios para el establecimiento de niveles de amenaza.

Los criterios definidos se establecen en base a los antecedentes presentados en los apartados precedentes, que incluyen las modelaciones realizadas con el software ALOHA, revisión bibliográfica de referentes internacionales. Además, se analiza lo señalado en el DS43/2016 que Aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Sustancias Peligrosas. Se distinguirán tres categorías de efecto a saber:

- **Muy Alto y Alto**, restricciones para uso de infraestructura crítica y habitacional.
- **Moderado,** restricciones para el uso de infraestructura critica, en esta zona pudiera establecerse para uso habitacional, previa identificación de las sustancias almacenadas en el establecimiento cercano y monitoreo de las medidas de control, mitigación y emergencia considerando la sustancia almacenada posible escenarios de accidentes con estas sustancias o emisiones de la actividad productiva.
- **Poco Significativo,** efectos directos en la calidad de vida de las personas por olores molestos, ruidos y posibles impactos paisajísticos. Se debe implementar medidas de control y mitigación para mejorar la calidad de vida de las personas.

Para el **transporte de sustancias peligrosas** se seleccionó la modelación de transporte de la mezcla Gas licuado GLP en un escenario de derrame e incendio de butano. Este escenario fue seleccionado tomando en consideración que esta sustancia tiene una mayor frecuencia de transporte que las otras sustancias simuladas y, además, tienen un área de afectación mayor que isooctano, la sustancias que representa el transporte de combustible de hidrocarburos. Además, se tomó en consideración que en la Guía metodológica de evaluación de riesgo ambiental del uso de sustancias químicas en actividades económicas de producción y servicios (MMA, 2015) en su tabla de criterios para estimación de la probabilidad de ocurrencia de un potencial accidente relacionado con sustancias peligrosas entrega la categoría de MUY ALTA a los líquidos inflamables (Clase 3) y ALTA a las sustancias corrosivas (Clase 8) y gases (Clase 2).

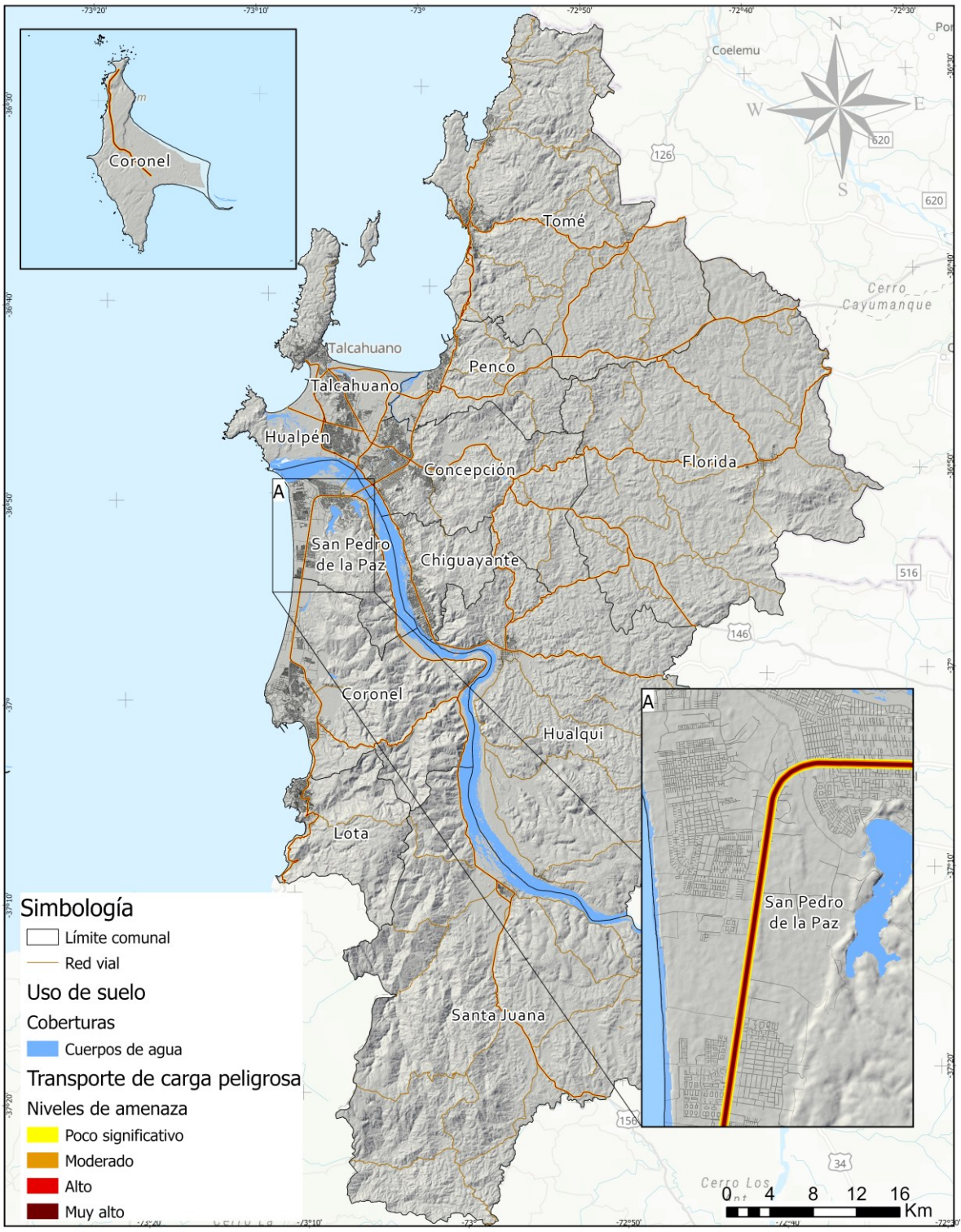
En la **Tabla 24** se presentan los niveles de amenaza para el transporte de sustancia peligrosa y la justificación asociada a dichos criterios. En relación con estos criterios se elaboró la cartografía (**Figura 38**).

Tabla 24. Niveles de amenaza para el transporte de sustancia peligrosa por modelación de derrame e incendio de butano.

Criterio	Radio desde el accidente (m)	Justificación. Daño a la salud humana por la exposición a radiación térmica según accidente modelado.
Muy Alto	28	La zona de amenaza roja representa el peor nivel de peligro (potencialmente letal),
Alto	39	la zona de amenaza naranja como posibles de "producir quemadura de 2° grado"
Moderado	60	Amarillo como posible de causar "dolor al individuo expuesto",
Poco Significativo	80	Libre de afectación

Fuente: Elaboración propia.

Figura 38. Mapa provincial de amenaza por transporte de sustancia peligrosa por modelación de derrame e incendio de butano. A) Incluye zoom de la amenaza en la ruta 160.



Fuente: Elaboración propia.

Para el **almacenamiento de sustancias peligrosas** se identifica en la "Memoria explicativa de la modificación plan regulador Metropolitano de Concepción" (MINVU 2017) un análisis de las áreas consideradas de carácter industrial donde el 58,1% de éstas se encuentran consolidadas al año 2017 (**Tabla 25**). Además, se indica en esta memoria que se consolidan dos polos industriales las cuales son Coronel, en Parque Industrial Escuadrón y Talcahuano en Parque Industrial Talcahuano- San Vicente. Estos dos polos industriales abarcan el 40% de toda la superficie regulada como zona industrial. En este contexto, la diversidad de actividades productivas que conllevan la zona industrial consolidada muestra la variedad de sustancias químicas se utilizan, producen y almacenan, dificultando un análisis único de la zona buffer requerida para minimizar el impacto de esta amenaza.

Atendiendo a la revisión realizada del cuerpo normativo nacional y experiencias internacionales en la **Tabla 26** se presenta presentan una propuesta de los niveles de amenaza para los establecimientos que manejan sustancias peligrosas y se presenta la justificación asociada a dichos criterios.

Tabla 25. Caracterización áreas zona industrial, extracto de la memoria explicativa de la modificación plan regulador Metropolitano de Concepción (2017).

Sigla	Comuna	Nombre	Has	% consolidado	% disponible
ZI-1	Tomé	Collen	13,4	29,8	69,3
ZI-2	Tomé	Bellavista	5,7	83,6	13,9
ZI-3	Penco	Lirquén 1	5,8	95,3	3,4
ZI-4	Penco	Lirquén 2	8,0	58,8	40
ZI-5	Penco	Penco 1	3,0	86,8	10
ZI-6	Penco	Penco 2	19,4	50,4	48,8
ZI-7	Talcahuano	Isla Rocuant	84,9	40,8	59,1
ZI-8	Talcahuano	San Vicente	1048,6	70,8	29,6
ZI-9	Talcahuano	Huertos Obreros	154,8	65,6	34,5
ZI-10	Talcahuano	Camino Las Industrias	342,3	57,8	42
ZI-11	San Pedro de la Paz	Lomas Coloradas	199,5	44,2	55,8
ZI-12	Coronel	Escuadrón	733,6	47,3	52,6
ZI-13	Coronel	Coronel	46,0	95	4,9
ZI-14	Coronel	Schwager	100,2	64,2	35,9
ZI-15	Coronel	Manco Poniente	17,6	35,8	63,6
ZI-16	Lota	Colcura	122,5	25,3	74,2
		TOTAL	2912	58,1	42

Fuente: Memoria explicativa PRMC, 2017.

Tabla 26. Criterios para el establecimiento de niveles de amenaza para zonas/instalaciones que almacenan sustancias peligrosas. Fuente: Elaboración propia.

Criterio			Justificación
Muy Alto	En el sitio asociado al establecimiento con almacenamiento de sustancias peligrosas La amenaza no es mitigable.		De acuerdo con lo establecido en el art. 10 del DS43/2016- Aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Sustancias Peligrosas. "En el caso que dentro del mismo sitio en que se encuentra una instalación de almacenamiento de sustancias peligrosas, exista casa habitación, ésta sólo podrá ser usada por trabajadores de la empresa y deberá estar separada por una barrera física de la o las instalaciones de almacenamiento y a una distancia no menor a 15 m.".
Alto	100 – 200 m del polígono del área con establecimientos con almacenamiento de sustancias peligrosas (área industrial) *Establecimiento Industrial Menor* <u>Tipo de Sustancia:</u> 200 m para sustancias como metanol y propano (referencia alemana)	100 – 600 m polígono del área con establecimientos con almacenamiento de sustancias peligrosas (área industrial) *Establecimiento Industrial Mayor* <u>Tipo de Sustancia:</u> 600 m valor promedio considerando el almacenamiento de combustible (referencia australiana)	De acuerdo con lo establecido en el art. 10 del DS43/2016 "Las instalaciones de almacenamiento de sustancias peligrosas no podrán emplazarse en sitios donde existan salas cunas o jardines infantiles " y "En predios agrícolas y forestales, que cuenten con instalaciones de almacenamiento de sustancias peligrosas, podrá existir casas habitación siempre y cuando la distancia sea mayor a **100 m**, en caso contrario deberá aplicar análisis de consecuencia y demostrar que cumple con los límites indicados en el artículo 44 del presente reglamento". Ambos niveles tienen relación con el - Tamaño del establecimiento y cantidad almacenada. El art. 5 del DS43/2016 indica que "Toda instalación de almacenamiento de sustancias peligrosas sobre 10 toneladas (t) de sustancias inflamables o 30 t de otras clases de sustancias peligrosas requerirá de Autorización Sanitaria para su funcionamiento". - Sustancia peligrosa; según lo revisión realizada para obtener distancias de amortiguamiento o buffer recomendadas para la planificación del uso del territorio.
Moderado	Área Buffer entre 600 – 1500 m del área del polígono del área con establecimientos con almacenamiento de sustancias peligrosas (área industrial)		Debido a la diversidad de sustancias que son almacenadas en los diferentes establecimientos industriales se consultaron las referencias analizadas en los apartados precedentes. En función de lo reportado en esta literatura, lo recomendado es contar con una zona buffer entre 600 -1500 m. Esta zona está destinada a la protección de la salud y calidad de vida de las personas, pero esto es variable según la sustancia peligrosa almacenada. **1500 m** según lo indicado en referencia (a) alemana para sustancias como cloro, (b) en Canadá, condado de Strathcona en Alberta, que cuando se emplaza una "industria pesada" mediante una evaluación de impacto ambiental favorable puede existir una distancia de separación menor de 3000 m pero en ningún caso menos de 1500 m.
Poco Significativo	≥1500		Este criterio considera sustancias con la mayor área de impacto en el caso de accidentes. 1500 m, cuando una evaluación de riesgo lo indique pertinente. Esta distancia podría aumentar si la autoridad pertinente los estime a 3000 m en casos de industria mayores (refinerías de petróleo, petroquímica, similares) (referencia canadiense)

VII. Vertederos y Rellenos Sanitarios

En Chile, mayoritariamente los residuos sólidos domiciliarios y asimilables a domiciliarios se disponen en basurales, vertederos y rellenos sanitarios. Un *vertedero* es un lugar de disposición final de residuos que fue planificado para ese uso y que fue autorizado sanitariamente mediante Resolución Exenta del MINSAL, N°2444/1980(no vigente actualmente). Un *relleno sanitario* es una instalación de eliminación de residuos sólidos en la cual se disponen residuos sólidos domiciliarios y asimilables, diseñada, construida y operada para minimizar molestias y riesgos para la salud y la seguridad de la población y daños para el medio ambiente, la cual cuenta con Resolución de Calificación Ambiental y Autorización Sanitaria cumpliendo lo establecido por Decreto Supremo N°189/2008 del MINSAL que aprueba Reglamento sobre condiciones Sanitarias y de Seguridad básica en Rellenos Sanitarios (Vivanco, 2023).

Para el análisis de la amenaza asociada a sitios de disposición de residuos sólidos se considera aquellos que por su envergadura y características territoriales podrían generar efectos a escala metropolitana (**Tabla 27**). En este contexto, los basurales no serán considerado en el análisis de esta amenaza, pues son sitios que surgen y desaparecen espontáneamente, además, no cuentan con ningún tipo de autorización y en general su efecto es de naturaleza local.

Tabla 27. Sitios de disposición de residuos sólidos considerados en el análisis.

Sitio de Disposición	Comuna	Años de Operación
Vertedero Carriel Norte	Talcahuano	1989-2003
Vertedero Cosmito	Talcahuano	1990-2002
Vertedero Playa Negra	Coronel	1990-2006
Relleno Sanitario Cemarc	Penco	2010
Relleno Sanitario Hidronor	Florida	2000-2023

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la amenaza se realiza por sitio a partir de información histórica recopilada en documentos de fuentes públicas. Además, se utilizó información sitio-específica, considerando tamaño, antigüedad del sitio, tipos de residuos almacenados y cercanías a cuerpos de agua. En el caso de los rellenos sanitarios se analiza también los principales incumplimientos, identificando los aspectos y componentes ambientales involucrados y los potenciales impactos generados. Finalmente, para la determinación de los niveles de amenaza, los criterios utilizados consideraron lo establecido por el DS.189/2005 del MINSAL, lo reportado en la evaluación de los proyectos en el SEIA y revisión bibliográfica.

Análisis de la Amenaza

A continuación, se presentan los antecedentes asociados a vertederos y rellenos sanitarios considerados en el análisis.

Vertedero Carriel Norte

El vertedero Carriel Norte operó entre 1989 y 2003, recibiendo alrededor de 900.000 m^3 de residuos domiciliarios, 200.000 m^3 de industriales, 200.000 m^3 de cenizas y 600 m^3 de residuos peligrosos (aceite, baterías y solventes) de las comunas de Talcahuano y Hualqui (IASA 2006), en una superficie de 10 ha. Además, existía una laguna de 6.000 m^3 de capacidad para recepción de residuos líquidos y lodos, sin impermeabilización para protección de suelo y napa subterránea. El suelo donde se emplaza estas instalaciones está formado principalmente por

arena y una pequeña cantidad de arcilla y la napa tiene una profundidad de 1-1,5 m. (MIDEPLAN-BID, 1997). La operación se realizó en dos niveles de celdas alcanzando una altura de 4 m.

Más aún, este vertedero no contaba con canalización de aguas lluvias; sistemas de captación y tratamientos de los líquidos percolados y sistemas de captación y recuperación o quema de biogás, ni pretiles de contención. Además, durante la operación en las excavaciones existió afloramientos de aguas subterránea (MIDEPLAN-BID, 1997).

Vertedero Cosmito

Este vertedero operó entre 1990 y 2002, recibiendo alrededor de 216.000 ton/año de residuos de origen domiciliario, comercial e industrial de las comunas de Concepción, Chiguayante, San Pedro de la Paz, Penco, Tomé, Talcahuano y Hualqui, ocupando una superficie de 12 ha. Esta instalación se encuentra a 2 Km del río Andalién, en suelos constituidos principalmente por arcilla y roca meteorizada con una profundidad de napa subterránea de 1 a 2 m (IASA, 2006).

Es importante mencionar que este vertedero no contaba con sistemas de captación de aguas lluvias, sistemas de captación y tratamiento de líquido lixiviado y sistemas de recuperación y quema de biogás, Además, no existían pretiles de contención de lixiviado, impermeabilización de fondo, muro de protección antideslizamiento de la masa de residuos depositados en la quebrada. Los residuos se depositaban directamente en el suelo y el sistema de operación era en altura alcanzando un máximo de 25 metros. (MIDEPLAN-BID, 1997).

Vertedero Playa Negra

El Vertedero Playa Negra operó entre los años 1990 y 2006, reabierto el 2010 por causa del terremoto, cerrando el 2013. Durante este tiempo recibió 25.000 ton/año de origen domiciliario, áreas verdes y de comercio de las comunas de Coronel, Lota, San Pedro, ocupando una superficie de 10 ha. El sitio de emplazamiento está constituido por suelo limo arcilloso y la profundidad a la napa subterránea es mayor a 5 m.

Además, no cuenta con impermeabilización basal, sistemas de captación de aguas lluvias, recolección y tratamiento de líquidos lixiviados y sistemas de captación y quema de gases (IASA, 2006).

Relleno Sanitario Hidronor

El relleno sanitario Hidronor se encuentra localizado sector Copiulemu, en la comuna de Florida y sus operaciones iniciaron el año 2000 hasta el 30 de abril del 2023, fecha en la cual terminó su vida útil con volumen de residuos cercanos a los 3,2 millones de toneladas. Este sitio de disposición cuenta con sistemas de impermeabilización basal, sistemas de captación de aguas lluvias captación y tratamiento de líquidos lixiviado y sistema de captación y conducción de biogás para generación de electricidad mediante planta térmica existente en las instalaciones. Durante este tiempo recibió alrededor de 120.000 ton/año, provenientes de las comunas de Florida, Hualpén, Lota, Cabrero y Talcahuano (SEREMI Salud, 2023).

Se debe recalcar, que dado que esta instalación cuenta con autorización sanitaria y ambiental era esperable que las molestias y riesgos para la salud y la seguridad de la población y daños para el medio ambiente fuesen nulos o mínimos. No obstante, de acuerdo con lo reportado en Informe Técnico de Fiscalización el relleno ha tenido eventos críticos de escurrimientos de lixiviado fuera de las instalaciones, como el ocurrido 2019 Y 2023, llegando en ambos casos al

estero Curapalihue. Más aun, el incidente de 2023 provocó muerte de peces tanto introducidos como nativos en categoría de conservación. (SNIFA, 2024).

Por otro lado, es importante mencionar que este relleno no pudo continuar sus operaciones pues el proyecto de "Continuidad Operativa relleno sanitario Hidronor Zona Sur" fue rechazado por el Servicio de Evaluación Ambiental.

Relleno Sanitario CEMARC (Centro de Manejo de Residuos Concepción)
El Relleno Sanitario Cemarc se encuentra ubicado a 4 Km de la ciudad de Penco, sus operaciones iniciaron el 2010. Sin embargo, al año 2023 ya se encontraba a dos años de alcanzar su cuota límite de 2.300.000 m^3. (SEA, 2024). No obstante, el 4 de diciembre 2023 fue aprobado el proyecto "Continuidad Operacional Centro de Manejo de Residuos Concepción" lo que amplía la capacidad de recepción de 5.580.000 m^3. (SEA, 2024) Este sitio está recibiendo 329.765 ton/año proveniente de las comunas de Concepción, Chiguayante, San Pedro de la Paz, Santa Juana, Penco, Tomé, Coronel, Hualqui, Lota, Lebu y Los Álamos. (SUBDERE, 2024). Cabe señalar, que este es el único relleno sanitario en operación en la Provincia de Concepción.

Esta instalación, cuenta con autorización sanitaria y ambiental, por lo que las molestias y riesgos para la salud y la seguridad de la población y daños para el medio ambiente deberían ser mínimos. Sin embargo, el año 2017 se formula cargos a la empresa por una serie de incumplimientos constatados en fiscalizaciones realizadas los años 2014 y 2015, incluyendo derrame de líquidos lixiviados, fuera de la zona estanca del relleno sanitario, superación del caudal máximo de diseño del sistema de tratamiento de lixiviado y aguas lluvias en contacto con residuos sin tratamiento, acciones que podrían, en caso de existir una población cercana, generar un riesgo a la salud y seguridad. (SMA, 2017).

Impactos ambientales asociados a los vertederos y rellenos sanitarios: la importancia de su consideración en la planificación territorial
Los residuos sólidos domiciliarios están compuestos principalmente de materia orgánica que sufre procesos de degradación físico-química y biológica durante su permanencia en los sitios de disposición. Estos procesos generan un residuo sólido de creciente estabilidad, pero también se forman subproductos gaseosos (biogás) y líquidos (lixiviados) que pueden generar impactos negativos en el ecosistema local y la salud humana si escapan al medio externo.

Al respecto, es importante mencionar que las principales fuentes de contaminación de los vertederos y los rellenos sanitarios son los líquidos lixiviados que, de acuerdo con la naturaleza del material dispuesto, contienen contaminantes orgánicos e inorgánicos que pueden afectar negativamente la calidad de los suelos y de los cuerpos de agua superficiales y subterráneas, impactando directa o indirectamente la salud humana. Con el tiempo, a medida que el residuo sólido se va estabilizando, se reduce la tasa de generación de estos subproductos; sin embargo, se ha comprobado que la generación de estos subproductos persiste en el tiempo durante varios años después del fin de la vida útil de estos sitios (Tuani et al., 2024; Butt et al., 2014; Lee et al., 1995). Es por ello que en la legislación chilena se establece que el Plan de Cierre menciona que por un período de al menos 20 años se deberá mantener un seguimiento del sistema de control de lixiviados y de biogás, (artículo 55 del DS. 189/2005, Minsal).

Diversos estudios han demostrado que varias décadas después del cierre de estos sitios de disposición, los lixiviados que aún se generan contienen concentraciones significativas de sustancias orgánicas solubles y de baja biodegradabilidad, tales como compuestos fenólicos,

esteres, órgano fosfato, endulzantes y productos farmacéuticos (Propp et al., 2021; Afolagboye et al., 2020).

Similar situación ocurre con los metales pesados (ej. As, Cd, Cr, Pb, Ni, entre otros), que permanecen por mucho tiempo debido a su naturaleza no biodegradable. Los suelos y aguas subterráneas alrededor de vertederos cerrados pueden contener altas concentraciones de metales pesados generando un gran impacto en el ecosistema y potencialmente en la salud humana. En particular, existe evidencia empírica de que la migración de estos contaminantes presentes en los lixiviados es un proceso de larga duración que puede continuar varias décadas después del cierre del vertedero (Cerar et al., 2022; Makuleke et al., 2020; Simangunsong et al., 2024).

En Chile, existen muy pocos estudios que analicen los riesgos de los sitios de disposición, Uno de ellos es el realizado en 3 vertederos abandonados de las comunas de Temuco, Villarrica y Lonquimay, donde se analizó los riesgos asociados a la presencia de metales pesados (As, BA, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, V, Zn). Ente los resultados encontrados se plantea que existe riesgo para la salud humana, siendo mayor para los niños por vía de ingestión la principal fuente de riesgo. Además, en los tres sitios estudiados se encontró presencia de Cd, lo que indicaba una cierta probabilidad de que los niños pudieran desarrollaran cáncer por dicho contaminante (Tume et al., 2023).

Por lo tanto, al momento de realizar una planificación del territorio se debe tener como antecedentes la ubicación de estos sitios de disposición de residuos sólidos, así como establecer zonas de amortiguación que permitan minimizar los riesgos a la población. Es pertinente mencionar uno de los casos emblemáticos ocurrido en la década de los años 90, donde se construyó, por parte del Estado, un conjunto habitacional de viviendas sociales en el sector denominado "La Cañamera" donde previamente existía un vertedero. Se estima que entre 1972 y 1978, dicho vertedero recibió casi 2 millones de toneladas de residuos correspondientes a 900 mil habitantes. Sin embargo, desde el año 1995 dicho sitio comenzó a ser utilizado como basural; además, el lugar no tenía iluminación, de manera que existía un riesgo para los vecinos, razón por la cual en el año 2002 éstos recurrieron a la Autoridad Sanitaria. Al realizar las investigaciones dicha Autoridad pudo corroborar que en el lugar existía un depósito ilegal de basuras y escombros. Se comprobó que la población expuesta había presentado síntomas como hemorragias nasales, metrorragia en las mujeres, dolor de huesos, manchas en la piel y, además, existían cinco casos confirmados de Síndrome de Gillián Barré (neuritis periférica sensitivo-motriz). Como resultado de esta situación, el Estado de Chile tuvo que indemnizar y erradicar a las personas afectadas. En la actualidad, en el sitio La Cañamera existe un parque para disfrute público (Saavedra, 2017).

Rehabilitación de vertederos y rellenos sanitarios

Los terrenos donde se encuentran los vertederos y rellenos sanitarios que han llegado al fin de su vida útil no pueden ser utilizados para construcción de infraestructura ni desarrollos comerciales, debido a su inherente naturaleza inestable y otros riesgos relacionados con la generación de contaminantes líquidos y gaseosos. Existe una amplia experiencia internacional en la rehabilitación de los sitios de disposición de residuos domiciliaros una vez que éstos llegan al fin de su vida útil. En la mayoría de los casos, se utilizan técnicas basadas en recubrimiento del sitio con material arcilloso compactado y/o con membranas geosintéticos impermeables, junto a una capa superior de suelo que permite el establecimiento de cobertura de pastizales, arbustos y, en general, de vegetación con poca capacidad de enraizamiento. De este modo, estos sitios restaurados se pueden destinar a parques recreativos, campos deportivos o incluso como

tierras agrícolas que requieren sólo una fina capa superior de suelo. Se tiende a limitar de manera estricta el crecimiento de árboles de raíz profunda, debido a su potencial impacto sobre la estabilidad del sitio (Chulliparambil et al., 2024; De Sousa, 2002; Forster et al., 2022; Rigillo et al., 2007; Simmons, 1999).

Definición de áreas amenaza vertederos y rellenos sanitarios

En base a los antecedentes presentados en los apartados precedentes se establecen los siguientes niveles de amenazas con diferentes alcances para vertederos y rellenos sanitarios. Las categorías obedecen a restricciones para uso de infraestructura habitacional (Muy Alto y Alto), integridad de los cuerpos de agua (Moderado) y efectos directos en la calidad de vida de las personas por olores molestos (Poco Significativo).

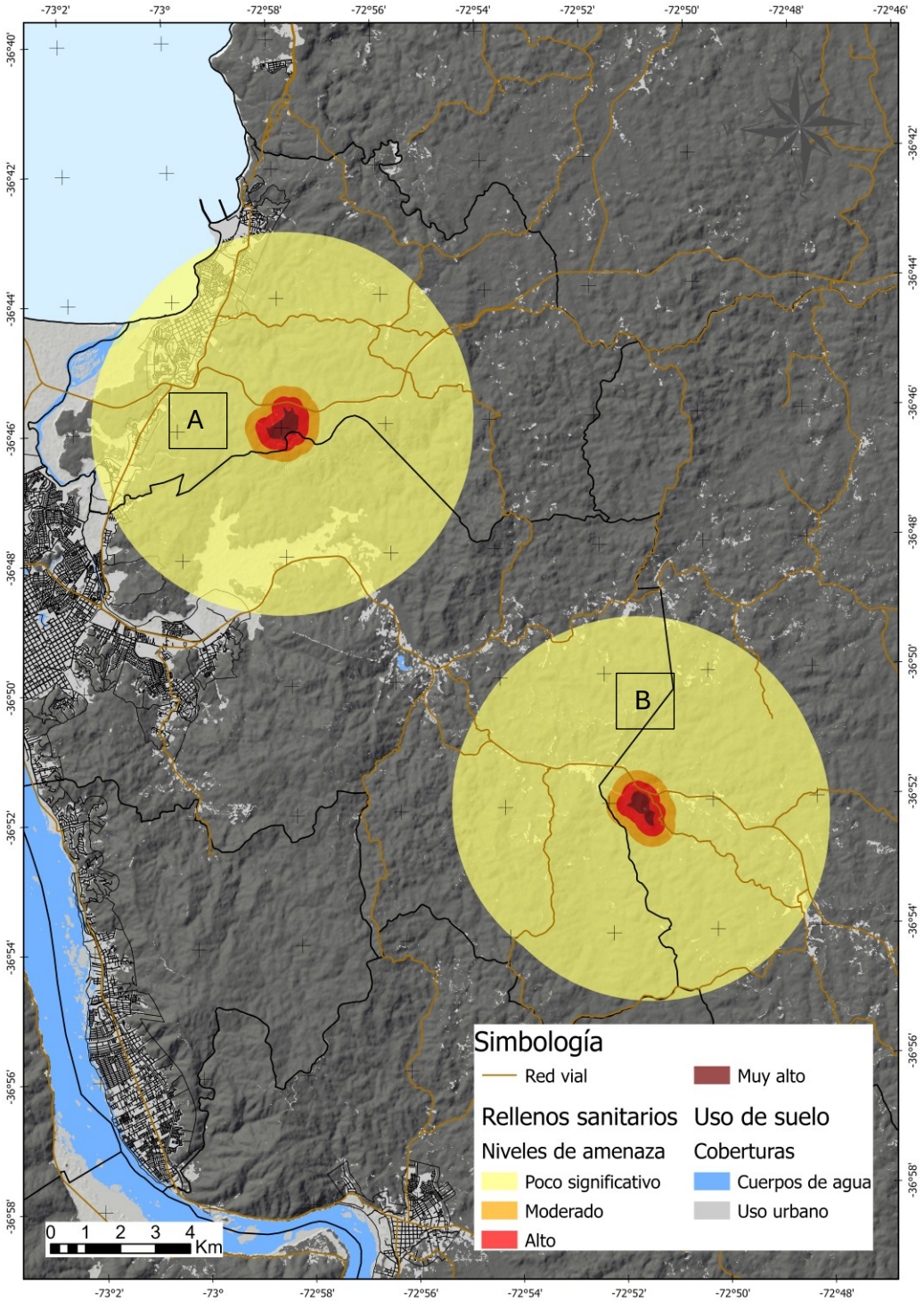
En relación con estos criterios se elaboraron las cartografías sitio-específicas para la amenaza; en la **Tabla 28** siguiente se presenta la justificación asociada a dichos criterios.

Tabla 28. Criterios de niveles de amenaza.

Criterio	Vertedero	Relleno Sanitario	Justificación
Muy Alto	Polígono del sitio de disposición	Polígono del sitio de disposición	Debido a los antecedentes detallados en la sección de impactos ambientales de vertederos y rellenos sanitarios
Alto	150 metros del polígono del área de disposición de residuos	300 metros del polígono del área de disposición de residuos	De acuerdo con lo establecido en el art. 9 del DS189/2005 "El proyecto del Relleno Sanitario deberá asegurar una zona de protección de **300 metros al interior del sitio,** en la que durante la vida útil y el cierre de la instalación no se podrá construir edificios para uso habitacional ni de servicios". "Sin perjuicio de lo anterior, se podrá solicitar justificadamente a la Secretaría Regional Ministerial la aprobación de distancias inferiores cuando existan barreras naturales o artificiales que permitan controlar dichos efectos, en todo caso dicho distanciamiento no podrá ser **inferior a 150 metros".**
Moderado	Área Buffer entre 150-600 metros del área de disposición de residuos.	Área Buffer entre 300 - 600 metros del área de disposición de residuos.	En función a lo presentado en ítem de impactos ambientales de los sitios de disposición y lo reportados en literatura, lo recomendado es contar con una zona buffer entre 500-1000 metros (Rezaeisabzevar et al., 2020). Esta zona está destinada a la protección de los cuerpos de aguas superficiales, de los potenciales impactos de los lixiviados generados en los rellenos sanitarios. Además, el art. 10 del DS189/2005 establece que El sitio donde se pretenda emplazar un Relleno Sanitario, **deberá ubicarse a más de 600 metros de toda captación de agua existente, y a más de 60 metros de todo curso o masa de agua superficial**, considerando dicho distanciamiento desde la ribera generada por la máxima crecida en un período de retorno de 100 años.
Poco Significativo	1000 metros	5000 metros	Se recomienda que los sitios de disposición se encuentren se encuentren a una distancia de 1000 m. de asentamientos humanos en el sector rural y 5000 m. en el área urbana. (Rezaeisabzevar et al., 2020). Estos criterios consideran factores como ruido, olores, impactos paisajísticos, reducción del valor de propiedad.

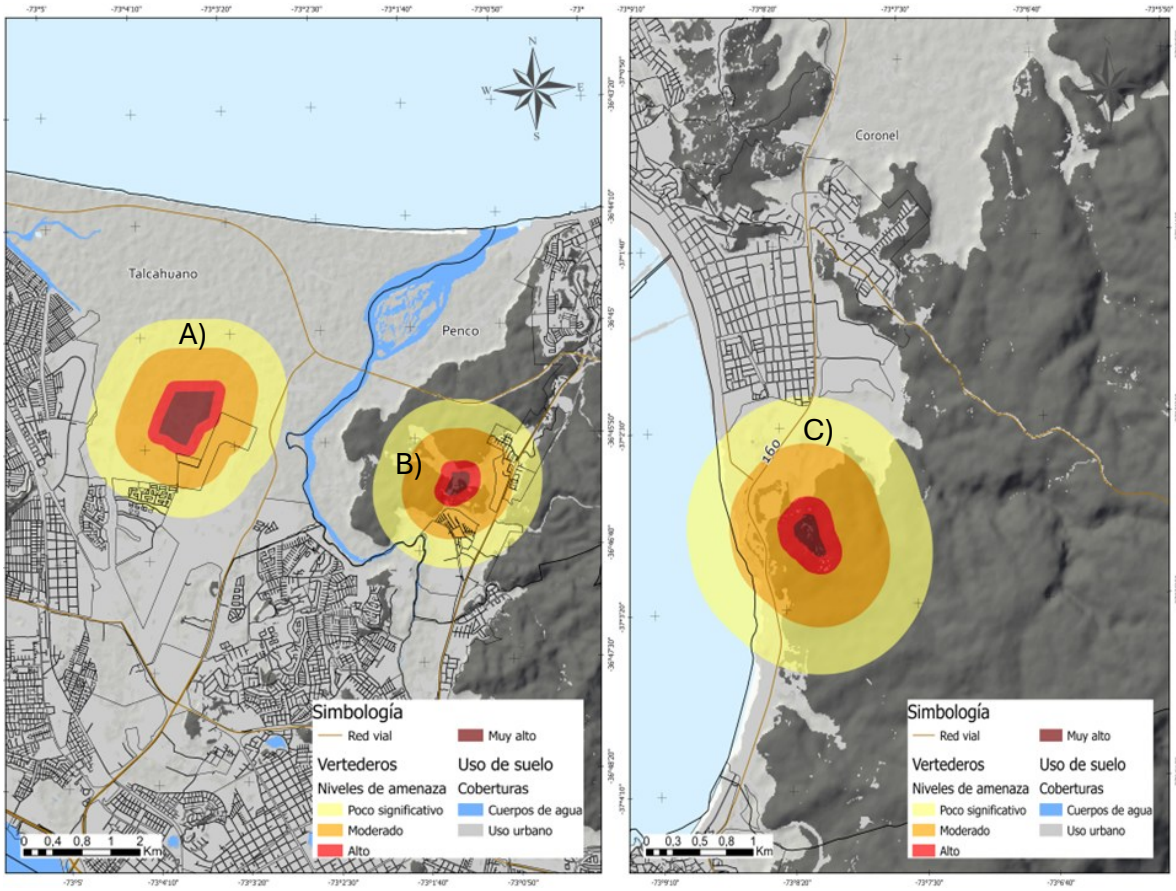
La **Figura 39** y **Figura 40** muestran la zonificación de la amenaza para los rellenos sanitarios y vertederos respectivamente. La **Figura 41** expresa la amenaza integrada para el área metropolitana de Concepción.

Figura 39. Amenaza Rellenos Sanitarios en área de estudio (A) Cemarc y (B) Hidronor.



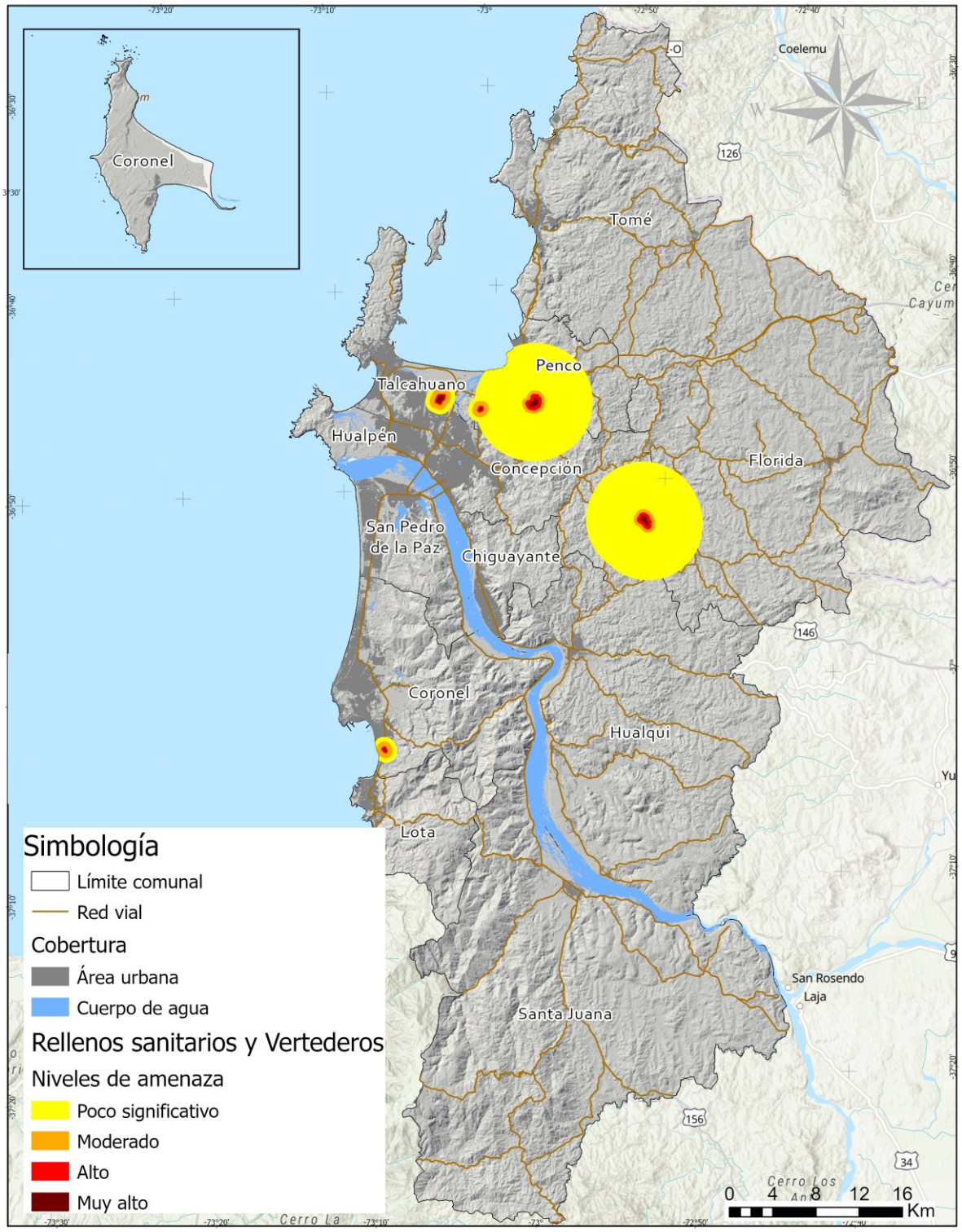
Fuente: Elaboración propia.

Figura 40. Amenaza Vertederos en área de estudio (A) vertedero Carriel Norte, (B) Vertedero Cosmito y (C) Playa Negra.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 41. Mapa provincial de amenaza por vertederos y rellenos sanitarios.



Fuente: Elaboración propia.

VIII. Incendios forestales

CONAF cuenta con una metodología para calcular el riesgo por incendios forestales a nivel nacional, entre las regiones de Atacama y Magallanes, con una resolución de píxel de 10 m. Para su elaboración analiza, por una parte, la amenaza y, por otra, la vulnerabilidad. La amenaza se calcula según los siguientes criterios: peligro estadístico de incendios, peligro estructural y elementos de amenaza antrópica.

La representación de la amenaza se basó en la metodología CONAF. Los 6 niveles de amenaza calculados por CONAF fueron reclasificados a los cuatro niveles utilizados en este estudio de riesgos. Para ello se agruparon los 3 grados de amenaza más bajos (nulo, muy bajo y bajo) Haciéndolos equivalentes al grado de amenaza "poco significativo". Los otros grados de amenaza fueron conservados (medio o moderado, alto y muy alto; ver **Tabla 29**).

Tabla 29. Reclasificación de las 6 categorías originales de CONAF en 4 categorías del estudio de riesgos del AMC.

Valor original	Grado amenaza original	Valor reclasificado	Grado de amenaza reclasificado
0	Nulo	1	Poco significativo
1	Muy bajo		
2	Bajo		
3	Medio	2	Moderado
4	Alto	3	Alto
5	Muy alto	4	Muy alto

Fuente: Elaboración propia a partir de información CONAF.

Con la finalidad de incorporar la expresión espacial de los incendios forestales ocurridos en las últimas dos décadas se utilizó información del satélite MODIS que indica áreas en las cuales ocurrieron incendios con resolución temporal diaria y una resolución espacial de 1000 m. Esta información fue incorporada a los píxeles de 10 m bajo una situación de presencia o ausencia de incendios en los últimos 23 años.

Con esta información se ponderó el valor de la amenaza calculada por CONAF con la ocurrencia o no ocurrencia de incendios en los últimos 23 años (2001 a 2023). Se asignó una ponderación de 0,6 al valor de amenazas de CONAF y 0,4 a la presencia o ausencia de incendios en este periodo integrándose a través de una suma ponderada donde,

*Amenaza incendios = Amenaza CONAF * 0,6 + Ocurrencia incendio últimos 23 años * 0,4*

Los valores de amenaza que van de 0 a 5 son sumados con este otro valor, en una lógica de 0 a 5 donde 5 significa "sí hubo un incendio en los últimos 23 años" y 0 "no hubo incendio en los últimos 23 años. En base a los productos obtenidos de los dos resultados anteriores, se construyó un mapa final de amenaza que considera el máximo valor de amenaza obtenido para cada píxel.

Análisis de la amenaza

Los resultados de la amenaza de incendios forestales calculadas con CONAF indica que el 13% del Área Metropolitana de Concepción tiene un grado de amenaza poco significativo, el 48% un grado moderado y un 39% un grado alto o muy alto (**Tabla 30**).

Tabla 30. Amenaza original CONAF y su reclasificación.

Valor original	Grado amenaza original	%	Grado de amenaza reclasificado	%
0	Nulo	0%	Poco significativo	13%
1	Muy bajo	2%		
2	Bajo	11%		
3	Medio	48%	Moderado	48%
4	Alto	32%	Alto	32%
5	Muy alto	7%	Muy alto	7%

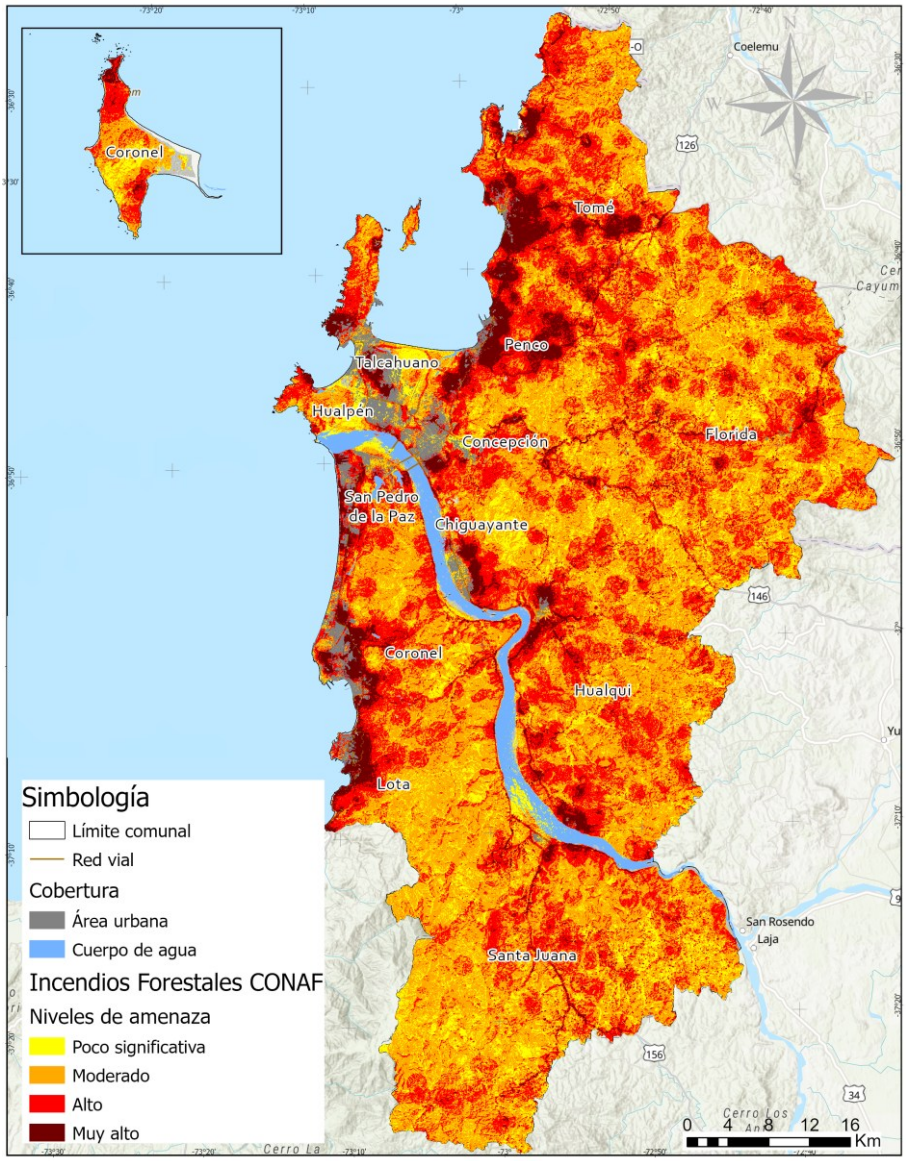
Fuente: Elaboración propia a partir de información CONAF.

La cartografía de la amenaza por incendios forestales de acuerdo a la metodología de CONAF **(Figura 42)** muestra una concentración de valores de amenaza muy alto en el interfaz urbano forestal de cada uno de los centros poblados, destacando el caso de Penco y Tomé, al norte del AMC, los cerros de Talcahuano (ej. Macera y La Unión), y Coronel y Lota en el sur del AMC. En todos estos casos el grado de amenaza muy alto y alto se proyecta a través de ejes lineales. A su vez, el grado de amenaza alto muestra un patrón homogéneo en el territorio, pero demarcado por núcleos asociados a los focos de ignición, fuertemente influenciados por la variable frecuencia de incendios. Estos resultados subestiman el potencial de incendios en comunas frecuentemente impactadas por incendios, algunos de gran magnitud, como Tomé, Penco y Florida —fuertemente afectados en los últimos 10 años (ej. 2017, 2022 y 2023)—, Hualqui, y Santa Juana. Esta última experimentó un mega incendio el verano del año 2023, con un foco iniciado en la vecina comuna de Nacimiento.

Los sitios con una amenaza moderada son escasos, y están representados fragmentos pequeños y aislados entre sí dentro del AMC. Finalmente, los sitios con amenaza poco significativa se concentran en los centros poblados.

Por otra parte, el cálculo ajustado de la amenaza de incendios, que incluye los incendios de los últimos 23 años, aumenta la superficie del AMC con un grado de amenaza poco significativo de 13 a 39%, disminuye el grado de amenaza moderado de 48 a 11%, y aumenta el grado de amenaza alto y muy alto a 50% (**Tabla 31).**

Figura 42. Amenaza de incendios forestales sobre la base de datos de CONAF (2021).



Fuente: Elaboración propia en base a Conaf.

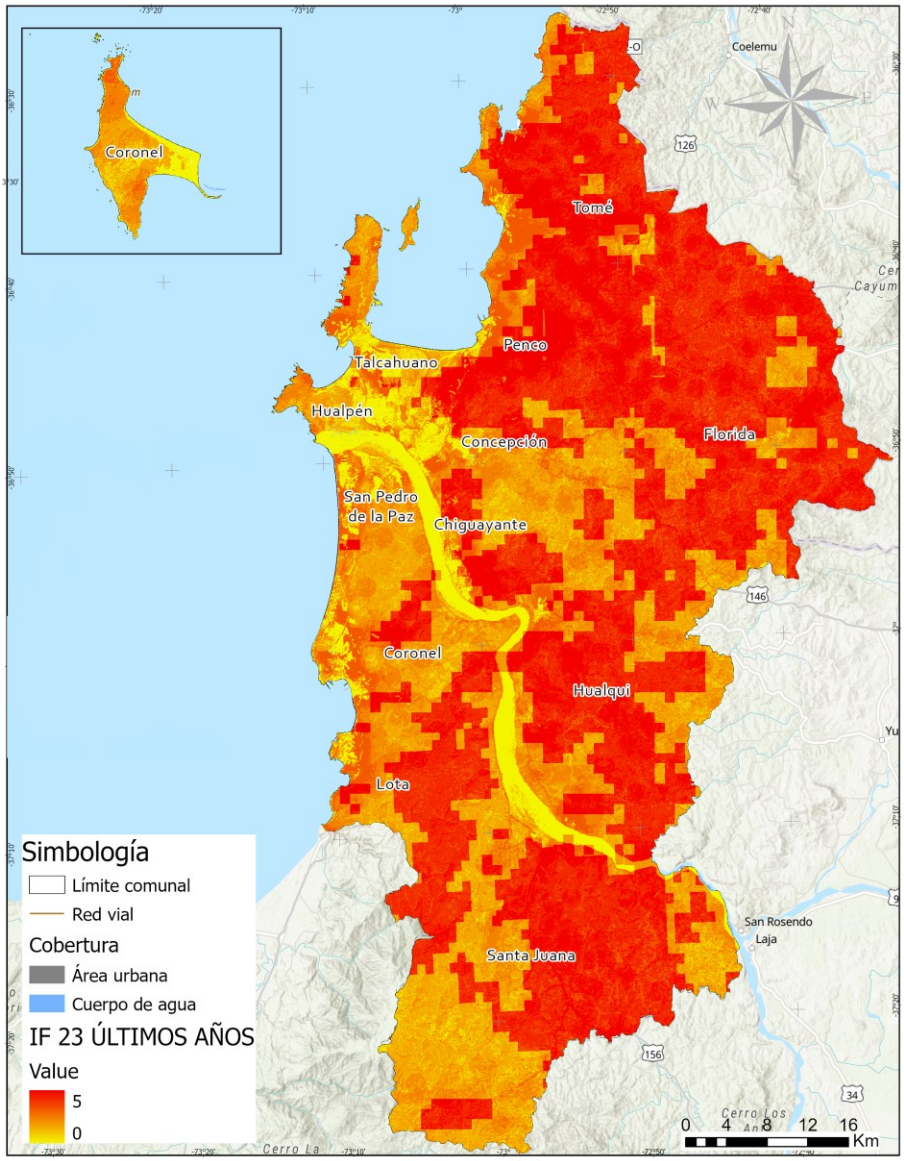
Tabla 31. Reclasificación de amenaza, incorporando ocurrencia últimos 23 años, y su reclasificación.

Valor original	Grado amenaza original	%	Grado de amenaza reclasificado	%
0	Nulo	0%	Poco significativo	39%
1	Muy bajo	6%		
2	Bajo	33%		
3	Medio	11%	Moderado	11%
4	Alto	47%	Alto	47%
5	Muy alto	3%	Muy alto	3%

Fuente: Elaboración propia a partir de información CONAF.

El cálculo ajustado del grado de amenaza reconoce los sitios que se han quemado en los últimos 23 años y presenta un patrón espacial que eleva la condición de amenaza a un grado alto a prácticamente todos aquellos sitios que se han quemado alguna vez en los últimos 23 años (**Figura 43**)**.** Este ajuste logra destacar la amenaza de incendios en las comunas de Tomé, Penco, Florida, Hualqui y Santa Juana. Asimismo, disminuye la amenaza en sectores cercanos a centros poblados donde no han ocurrido incendios en las últimas décadas. Cabe destacar que la menor resolución espacial de la fuente de datos de áreas incendiadas se evidencia en un resultado con bordes menos definidos y una menor precisión territorial (**Figura 43**).

Figura 43. Amenaza de incendios forestales sobre la base del ajuste de los datos de CONAF (2021), usando el registro de áreas incendiadas en los últimos 23 años (2001-2023).



Fuente: Elaboración propia.

Definición de áreas amenaza por incendios forestales

La integración del cálculo de amenaza de CONAF con el cálculo ajustado que incorpora el área afectada en las últimas dos décadas muestra un grado de amenaza muy alto en las zonas de interfaz urbano forestal en todas las comunas, así como también un grado de amenaza alto en zonas actualmente rurales de las comunas de Tomé, Penco, Florida, Hualqui y Santa Juana, incorporando áreas de alta amenaza en todas las otras comunas (**Figura 44**). En comparación al valor inicial de CONAF, el grado de amenaza poco significativo disminuye de 13% a 11%, el grado moderado disminuye de 48% a 25%, el grado alto aumenta de 32% a 57% y el grado de amenaza muy alto se conserva en 7% (**Tabla 32**)**.**

En síntesis, el 64% de la provincia de Concepción tiene una amenaza por incendios forestales alta o muy alta, siendo un 7% muy alta. El grado de amenaza muy alto está asociado a zonas de interfaz urbano forestal, donde se concentran los elementos de amenaza antrópica.

Tabla 32. Grado de amenaza por incendios forestales en el Área Metropolitana de Concepción.

Grado de amenaza por incendios forestales para el AMC	%
Poco significativo	11%
Moderado	25%
Alto	57%
Muy alto	7%

Fuente: Elaboración propia.

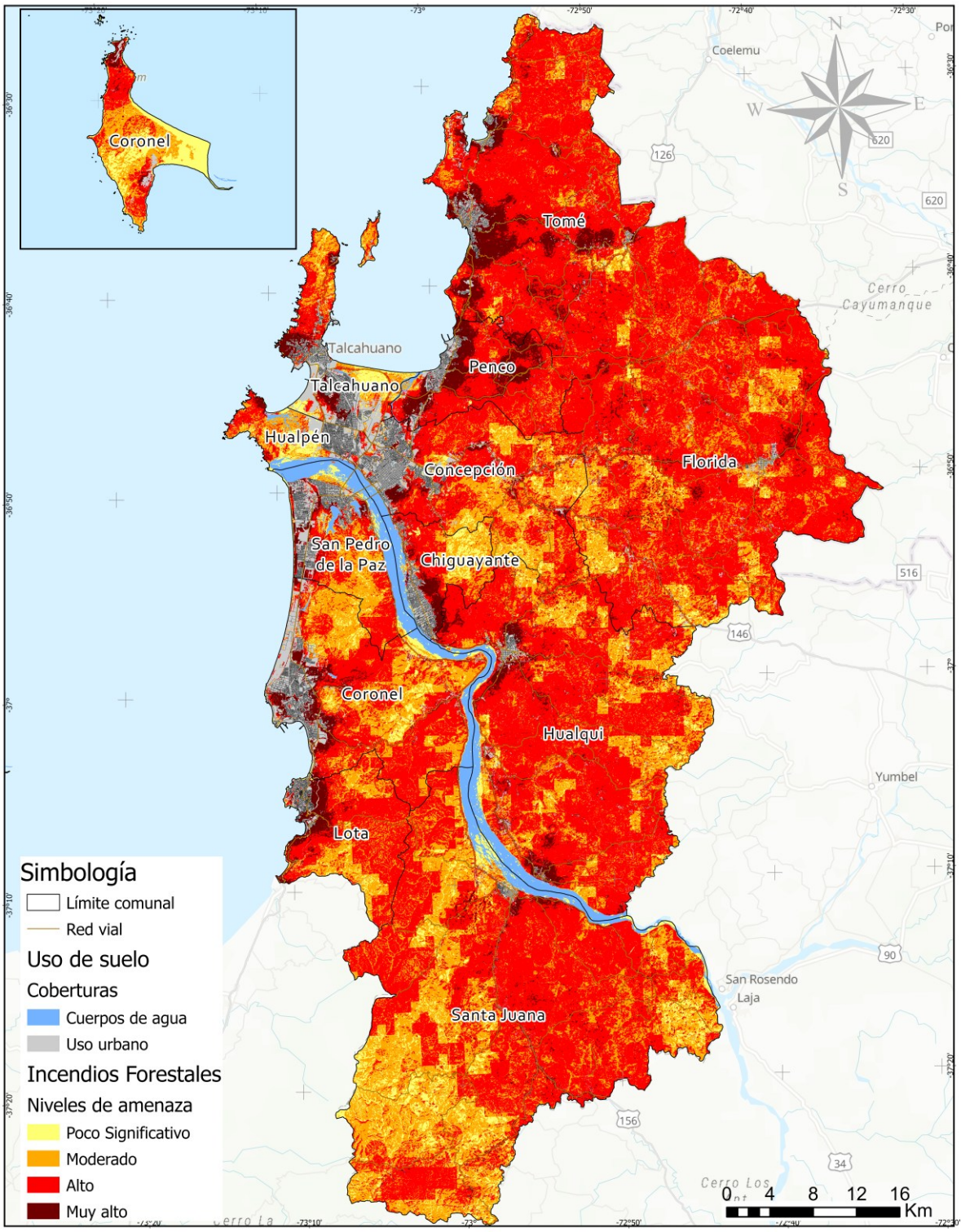
En términos de discusión, CONAF tiene una metodología nacional revisada y discutida en reuniones ampliadas con la contraparte técnica y con otros servicios asociados. Si bien se trata de un producto de una muy alta resolución espacial que integra diversas variables adecuadamente validadas, también tiene algunas debilidades dónde dos de las más relevantes son: 1) no incorporar el área efectivamente afectada por incendios y 2) la antigüedad de la cobertura del suelo, utilizada como modelo de combustible.

La primera de estas debilidades se trató incorporando información MODIS, que tiene una resolución espacial menor (1000 m). Existen otras fuentes de datos como por ejemplo cicatrices de incendios actualizadas hasta el 2018 (Miranda et al. 2022) que, dado los eventos recientes de grandes incendios (ej. 2019, 2022 y 2023), son incompletas para poder ser incorporadas en la evaluación. Otra alternativa es directamente hacer el cálculo de áreas afectadas por incendios a partir de imágenes Landsat (ej. 2010-2024) o Sentinel (2016-2024), lo cual requiere de mayor tiempo y recursos. El incorporar este tipo de información para modificar la base de datos aportada por CONAF es un aspecto que requiere de discusión debido a que no se trata de información oficial del servicio público responsable de la amenaza de incendios forestales. Las reuniones sostenidas hasta la fecha no permiten dar por válido este método por lo que es un aspecto a revisar.

Otro aspecto relevante para la planificación territorial, y que representa una complejidad adicional, es que el combustible de los incendios lo constituye vegetación. Esta vegetación está tanto en ecosistemas naturales, como en ecosistemas manejados por el ser humano, tales como plantaciones forestales o zonas agrícolas. Dado que la vegetación no es estática en el tiempo, sino altamente dinámica, y puede cambiar de manera relevante por ejemplo por procesos de gestión forestal, o por dinámicas naturales (ej. sucesión ecológica), el cálculo de la amenaza de incendios forestales puede sufrir modificaciones periódicas. A modo de ejemplo, en un plazo de

8-18 años un predio puede pasar de no tener vegetación, producto de una tala forestal, hasta tener una plantación joven o adulta lista para su cosecha. En este periodo de 8 a 18 años el combustible habrá cambiado de manera notable y por lo tanto también la amenaza de incendios en este predio. Si bien este aspecto es difícilmente manejable en un proceso de planificación territorial, lo ideal es contar con una clasificación de las coberturas del suelo que sean lo más reciente posible. En las conversaciones sostenidas con CONAF y servicios asociados se ha indicado que es posible que se actualice la cobertura de suelos realizada y con ello el cálculo de la variable de amenaza por incendios forestales. Esto es un aspecto aún en discusión en el marco del proyecto de evaluación de riesgos del AMC.

Figura 44. Mapa provincial de amenaza por incendios forestales.



Fuente: Elaboración propia.

3.2. CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS AMENAZAS

Se trabajó en un análisis cualitativo para las amenazas de origen exógeno que se asocien directamente a factores climáticos o hidrológicos. La **Tabla 34** presenta las diferentes amenazas consideradas en el estudio con su grado de asociación (directo/ indirecto) y fuerza del vínculo con el grado de cambio de las variables asociadas al cambio climático. Con dichos antecedentes se efectuó el análisis cualitativo que expresa los posibles grados de cambio en el comportamiento de la amenaza (frecuencia, magnitud, estacionalidad) en tres niveles (fuerte, moderado y débil), en conjunto con la hipótesis de dirección de cambio esperada: aumento (+), disminución (-), similar (≈), difuso (+/).

Por ejemplo, se espera un cambio fuerte y positivo (de aumento) en la frecuencia, magnitud y estacionalidad de los **incendios forestales, sequía y olas de calor**. En el caso de las **inundaciones** se espera un cambio moderado asociado a una disminución de su frecuencia y estacionalidad debido al aumento de los días secos y a una disminución en la precipitación intensa y muy intensa, sin embargo, el comportamiento de los ríos atmosféricos no permite diferenciar los cambios en intensidad, aunque se espera que aumenten en ríos andinos como el Biobío y disminuyan en las cuencas costeras.

En el ámbito de los **tsunamis**, se debe considerar que el cambio climático no afecta directamente la ocurrencia de sismos, y por consiguiente a la generación de tsunamis, pero otras variables sí se verán afectabas por el cambio climático y podrían afectar a la inundación por tsunami, tales como el aumento del nivel del mar y el retroceso de la línea de costa. Investigaciones científicas recientes han determinado que el aumento del nivel del mar en las costas de Chile podría varían entre 0.34 y 0.52 m para el escenario RCP 4.5, y entre 0.46 y 0.76 m para el escenario RCP 8.5. Por lo tanto, la incorporación de esta variable en la inundación por tsunami sería de gran interés, sobre todo en sectores planos, como la bahía de Concepción. Para analizar la influencia de esta variable, se podrían realizar simulaciones numéricas representativas en un sector de interés donde se simulen 3 escenarios de cambio climático: Sin variación de nivel del mar, aumento de nivel según RCP 4.5, y aumento de nivel según RCP 8.5.

Por otro lado, estudios recientes han demostrado que el cambio climático se puede manifestar también en un retroceso de la línea de costa. Se podrían identificar las zonas de la provincia de Concepción que más se podrían ver afectadas, y en conjunto con el aumento del nivel el mar, se podrían realizar simulaciones numéricas representativas que tanto para cada variable por separada como para coexistencia simultánea. Con esta información se podría estimar de manera general cuánto aumentaría el área de inundación y la profundidad de inundación bajo escenarios de cambio climático.

Este último aspecto se vincula con la **erosión costera**. En los últimos años, la erosión costera se ha agravado debido a la mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos tales como tifones, huracanes, ciclones tropicales y tormentas los cuales se han asociado a la variabilidad climática y al cambio ambiental global. Tanto en la costa Atlántica como del Pacífico, la erosión ha sido mucho mayor en aquellos lugares afectados por oleajes anormales o marejadas, que generan un aumento del nivel del mar y respuestas complejas en la costa (Masselink et al., 2015). Los modelos de predicción desarrollados como medio de prevención de los riesgos en el litoral utilizan los componentes físicos de las marejadas en su interacción con la topografía y geometría de la costa, así como la duración de la tormenta, lo cual ha derivado en el concepto de umbral o altura de ola crítica que induce una inundación en la costa por marejada (Jiménez et al., 2009; Del Río et al., 2012). Aspecto que recoge el estudio "Determinación del riesgo de los

impactos del Cambio Climático en las costas de Chile" (MMA, 2019), el cual considera proyecciones de la erosión para una escala de tiempo de 45 años (escenario de emisiones 8.5 IPCC).

Para el **transporte y almacenamiento de sustancias peligrosas,** la Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA (SEA 2023) realiza un análisis respecto proyectos que son susceptibles a los efectos del cambio climático y a eventos climáticos extremos. **Tabla 33** presenta un extracto respecto de los objetivos de proyectos, su tipología de ingreso al SEIA, y ejemplos de riesgos e impactos de los proyectos que podrían agravarse en el contexto de la crisis climática.

Por su parte, el Plan de adaptación y mitigación de los servicios de infraestructura al cambio climático (2017-2022) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) señala la implicancia de los fenómenos climáticos extremos y vinculación con la infraestructura MOP. Asociado con el transporte y la infraestructura de sustancia peligrosas se destacan los factores climáticos de (a) el aumento de la velocidad media del viento (posible formación de trombas marinas) y el cambio en la altura de la ola significativa pueden afectar las actividades productivas que se desarrollan en torno al borde costero y producir una pérdida de conectividad; (b) la presencia de exceso de agua (aluviones e inundaciones) afecta obras viales (caminos y puentes) generando una pérdida de conectividad, (c) el incremento de número de días de calor y olas de calor provoca una restricción en la operación de la infraestructura debido a consideraciones de seguridad y salud de los operadores.

La Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos señala que los peligros naturales, incluidos los exacerbados por el cambio climático, pueden provocar liberaciones accidentales de sustancias químicas de diversas maneras y pueden conducir desastres que causan múltiples y simultáneas liberaciones de estas sustancias en áreas extensas. Por ejemplo, se pueden inundar tanques y tuberías, provocando corrosión y rotura de las tuberías y conexiones; los incendios forestales pueden provocar cortes de energía que podrían afectar la seguridad operacional de las instalaciones. Además, específicamente, en el caso del transporte la EPA señala que el aumento del nivel del mar, los cambios en las precipitaciones, el clima extremo y el calor pueden afectar el rendimiento, la seguridad y la confiabilidad del sistema de transporte, por ejemplo, el aumento de las inundaciones y deslizamientos de tierra pueden afectar carreteras, puentes, túneles y ferrocarriles, debilitando los materiales constructivos de ellos. Por otro lado, la sequía combinada con el calor extremo aumenta el riesgo de incendios forestales los cuales logra dañar las vías de transporte y afectar la visibilidad de los conductores.

Tabla 33. Objetivo del proyecto, tipologías de ingreso al SEIA, impactos y riesgos en el contexto de cambio climático (Extraído de la Guía SEA 2023).

OBJETIVO DEL PROYECTO	TIPOLOGÍA DE INGRESO SEGÚN EL ARTÍCULO 10 DE LA LEY N°19.300 Y ARTÍCULO 3° DEL REGLAMENTO DEL SEIA	IMPACTOS (I) / RIESGOS (R)
Servicios de logística, abastecimiento y transporte vía marítima.	f.1. Puertos. f.2 Vías de navegación. f.3 Astilleros. f.4 Terminal marítima. p. Proyectos en áreas bajo protección oficial.	(R) Pérdida de infraestructura por aumento del nivel del mar y marejadas. (R) Riesgo por aumento del nivel del mar y marejadas. (R) Derrame de sustancias y residuos peligrosos a causa de marejadas.

OBJETIVO DEL PROYECTO	TIPOLOGÍA DE INGRESO SEGÚN EL ARTÍCULO 10 DE LA LEY N°19.300 Y ARTÍCULO 3° DEL REGLAMENTO DEL SEIA	IMPACTOS (I) / RIESGOS (R)
	s. Proyectos que impactan humedales urbanos	(I) Alteración de sistemas de vida y costumbres de grupos humanos (SVCGH) relacionados a la pesca. (I) Intrusión salina en napas de agua dulce.
Servicio industrial o inmobiliario.	h. Proyectos industriales o inmobiliarios. s. Proyectos que impactan humedales urbanos.	(R) Inundaciones de zonas urbanas (crecidas de cauces o marejadas). (I) Pérdida de biodiversidad. (I) Pérdida de cantidad de agua por consumo humano. (I) Pérdida de calidad de agua por efluentes. (I) Alteración de cauces y riberas. (I) intervención o restricción de recursos naturales usados por los grupos humanos.
Transporte de sustancias	j. Oleoductos u otros análogos. p. Proyectos en áreas bajo protección oficial. s. Proyectos que impactan humedales urbanos.	(I) Alteración de la biodiversidad.
Gestión de sustancias o generación de productos.	ñ. Producción, disposición, reutilización, transporte, almacenamiento de sustancias tóxicas, explosivas, inflamables, corrosivas, reactivas o radioactivas.	(R) Incendios. (R) Inundaciones. (I) Pérdida de suelos.

Fuente: Elaboración propia en base a Art. 10 ley 19.300.

La OMS (2019) en su informe "Emisiones de sustancias químicas causadas por eventos de peligros y desastres naturales" realiza un análisis sobre la liberación de sustancias químicas resultantes de eventos de amenazas naturales que son exacerbada con la crisis climática. Dentro de este análisis incluye los siguientes ejemplos de eventos causantes y consecuencias en la industria de procesos químicos: "los rayos pueden encender materiales inflamables en tanques de almacenamiento y provocar incendios, los daños al suministro de energía pueden causar alteraciones en el proceso o en el monitoreo de parámetros de operación y válvulas de control, daño a ferrocarriles y carreteras puede provocar el descarrilamiento y/o el derrame de sustancias químicas, las inundaciones pueden causar la contaminación directa de las fuentes de agua mediante la liberación de sustancias químicas almacenadas, las temperaturas muy bajas o los períodos prolongados de frío intenso pueden causar que las tuberías se congelen y luego exploten a medida que se expande el contenido químico de fusión, las altas temperaturas crean condiciones que aumentan el riesgo de ignición de sustancias almacenadas en el exterior y también hacen que las sustancias químicas dentro de los recipientes de almacenamiento cerrados (por ejemplo, cilindros y vagones) se expandan, lo que provoca la apertura de las válvulas de alivio de presión y la ventilación de la sustancia química".

Según todos los antecedentes presentados en este apartado, es imperativo que los establecimientos industriales, la industria de procesos químicos y el transporte de sustancias peligrosas incorporen la variable de la crisis climática dentro de las evaluaciones de riesgos de sus operaciones para proteger a los ciudadanos y al medio ambiente.

También el cambio climático podría tener un impacto significativo en el futuro desarrollo y operación de los sitios de **disposición de residuos sólidos domiciliarios**. En efecto, el cambio climático implica modificaciones en los patrones temporales y espaciales de temperatura, precipitaciones, nivel del mar, entre otros factores. La escala temporal del cambio climático es coincidente con la de los rellenos sanitarios, ya que éstos se diseñan para estar operativos durante decenas de años y siguen activos durante décadas después de su cierre.

Existen varios estudios en literatura que abordan los potenciales efectos del cambio climático sobre la operación de los rellenos sanitarios, debido a los cambios en los patrones de temperatura, precipitaciones y nivel del mar, principalmente. Al respecto, se constata pleno consenso de que los principales riesgos que el cambio climático impondrá a los rellenos sanitarios están asociados a condiciones climáticas extremas (temperatura y precipitaciones), con potenciales efectos sobre la integridad estructural de los rellenos sanitarios y sobre la generación de lixiviados y de olores molestos. La **Tabla 35** resume los potenciales impactos del cambio climático en los sitios de disposición de residuos sólidos domiciliarios (Brand, 2024; Gichamo, 2019; Nnaji, 2012; Bebb, 2003).

Estos riesgos de largo plazo deben ser tomados en consideración en la planificación territorial para la definición de los niveles de amenaza asociados a los sitios de disposición de residuos sólidos. Es importante, que se detecten anticipadamente los potenciales impactos sitio-específicos que puedan estar a asociados a eventos climáticos extremos que se podrían manifestar en el largo plazo. Más aún, es importante que la ubicación y diseño de nuevos rellenos sanitarios debería considerar criterios de largo plazo vinculados al cambio climático, para prevenir impactos no deseados.

Tabla 34. Análisis preliminar de tendencias asociadas al comportamiento de amenazas exógenas para la provincia de Concepción.

Amenaza	Grado de asociación con el Cambio climático* (considera efecto cascada)	Variables asociadas a escala provincial (frecuencia: > mayor; < menor; ≈ similar)	Hipótesis de cambio		
			Frecuencia	Magnitud	Estacionalidad
Incendios forestales	Directa/ fuerte	> Días secos consecutivos > Frecuencia de sequía > Evapotranspiración Potencial > Días de verano (> 25ºC) M; calurosos (>30ºC)	+	+	+
Inundaciones	Directa/ fuerte	> Días secos consecutivos < Precipitación intensa y muy intensa > ríos atmosféricos *	-	+/-	-
Anegamientos	Directa/ fuerte	> Días secos consecutivos ≈ Precipitación máxima diaria	-	≈	-
Tsunami	Indirecta/ media	> Nivel medio del mar	n/a	+	n/a
Marejadas-erosión costera	Directa/ fuerte	> Viento máximo diario ≈ Viento medio diario > Nivel medio del mar	+	+	+/-
Actividades y materiales peligrosos	Indirecta/ Moderada	> Viento máximo diario ≈ Viento medio diario > Días cálidos > Nivel medio del mar	n/a	+	n/a
Transporte carga peligrosa	Indirecta/ débil	> Viento máximo diario ≈ Viento medio diario > Días cálidos	n/a	+	n/a
Sequía (déficit hídrico)	Directa/ fuerte	> Días secos consecutivos > Frecuencia de sequía > Evapotranspiración Potencial < Precipitación acumulada	+	+	+
Basurales, vertederos, rellenos	Directa/ media	> Días de verano (> 25ºC) M; calurosos (>30ºC) > Días cálidos < Precipitación intensa y muy intensa ≈ Precipitación máxima diaria > Nivel medio del mar	+	+	n/a
Olas calor-	Directa/ fuerte	> Días secos consecutivos > Días de verano (> 25ºC) M; calurosos (>30ºC) > Días cálidos	+	+	+
Olas de frio	Directa/ fuerte	< Duración de episodios fríos (> 6 días) < Días fríos	-	-	-
Sitios contaminados	Directa/ media	> Días de verano (> 25ºC) M; calurosos (>30ºC) < Precipitación acumulada	+/-	+/-	n/a
Licuefacción	Indirecta/ débil	> Días secos consecutivos < Precipitación acumulada	n/a	-	n/a

Fuente: Elaboración propia. Posible cambio fuerte (rojo), posible cambio moderado (naranjo), posible cambio débil (verde), no aplica. En el caso de los ríos atmosféricos existe evidencia del aumento se su frecuencia en el hemisferio norte, y se hipotetiza el mismo efecto en el hemisferio sur; sus efectos se asocian más directamente en las cuencas andinas (ej. Río Biobío).

Tabla 35. Resumen de Potenciales Impactos del Cambio Climático en los Sitios de Disposición de Residuos Sólidos Domiciliarios.

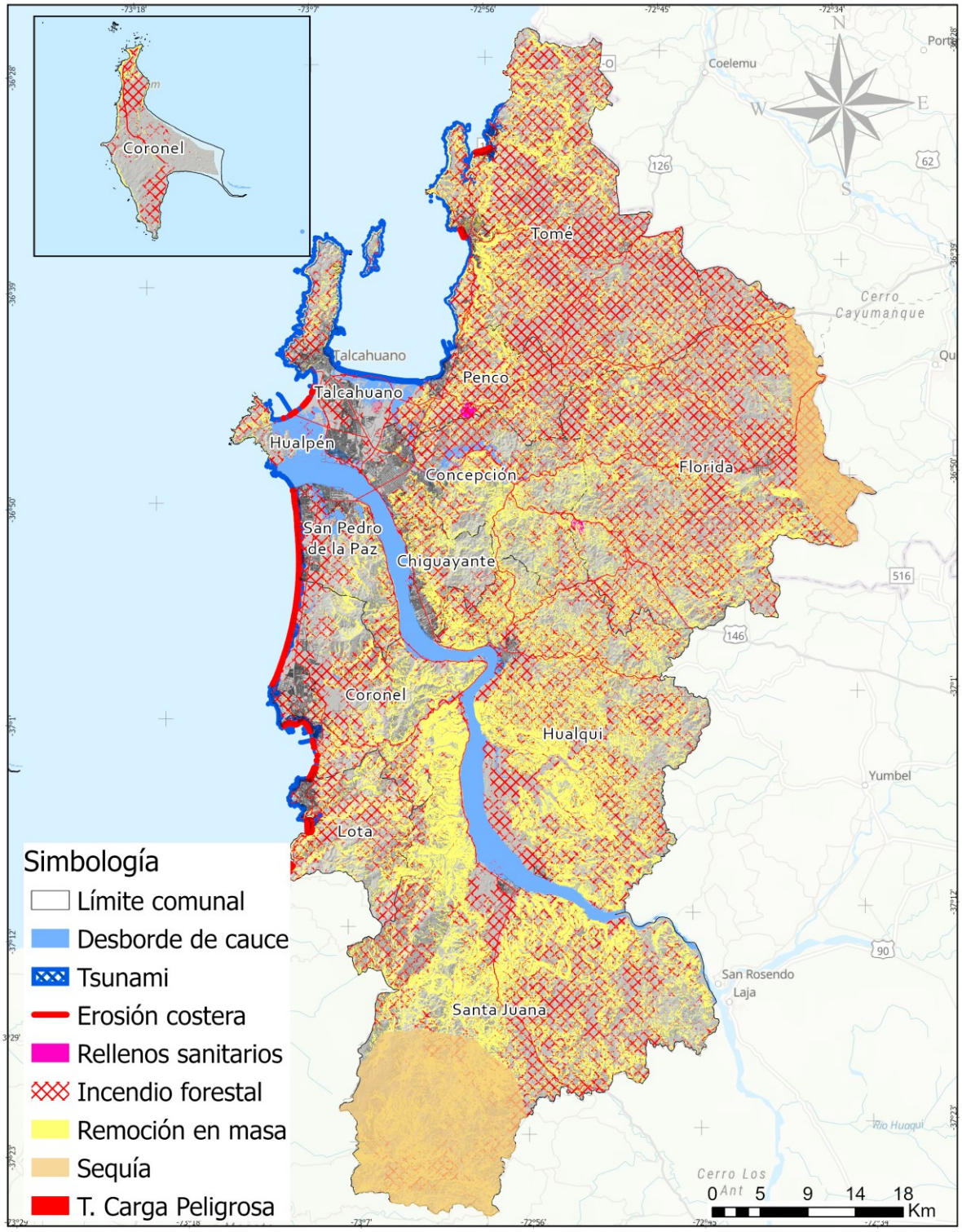
Variable climática	Potencial cambio de la variable climática	Potenciales impactos en rellenos y vertederos
Temperatura	Incremento de la temperatura en la zona del sitio.	Pérdida de humedad del sitio. Incremento de concentración de lixiviados debido a evaporación del agua. Incremento de la actividad biológica y de las emisiones gaseosas, pudiendo generar impactos odoríferos.
	Incremento de temperatura cordillerana en períodos de invierno, generando aumento de caudal de ríos nivales.	Inundación los sitios de disposición. Posible pérdida de estabilidad estructural de los sitios y exposición al medio de contaminantes odoríferos y líquidos. Erosión severa que puede afectar a sitios expuestos a la lluvia e inundaciones.
Precipitaciones	Incremento de las precipitaciones.	Aumento de tasa de generación de lixiviados. Derrame de lixiviados por inundación de lagunas/estanques. Posible pérdida de estabilidad estructural de los sitios y exposición al medio de contaminantes odoríferos y líquidos. Erosión severa que puede afectar a sitios expuestos a la lluvia e inundaciones.
	Reducción de las precipitaciones.	Reducción de la tasa de generación de lixiviados. Pérdida de humedad podría acelerar procesos erosivos y/o afectar la estabilidad estructural de los sitios, con exposición al medio de contaminantes odoríferos y líquidos.
Nivel del mar	Incremento del nivel del mar en las zonas costeras.	Erosión severa que puede afectar a sitios ubicados en zonas de inundación marina, y exposición al medio de residuos sólidos, y contaminantes odoríferos y líquidos. Inundación de los sitios de disposición.

Fuente: Elaboración propia.

3.3. ELABORACIÓN DE MAPAS MULTI-AMENAZAS

Como resultado del análisis de amenazas se obtuvieron dos insumos clave para la planificación territorial. Por un lado, en la **Figura 45** se puede visualizar la distribución de las distintas amenazas priorizadas en la etapa 1 de este estudio, cada amenaza está categorizada en sus niveles muy alto y alto. Dentro de las amenazas con una mayor distribución se encuentra Incendios Forestales, el cual está presente en gran parte del territorio de la provincia de Concepción, del mismo modo, la presencia de remociones en masa en inmediaciones cercanas a las vías estructurales plantea un desafío hacia donde se proyectará el crecimiento urbano del área de estudio.

Figura 45. Distribución Multiamenazas.

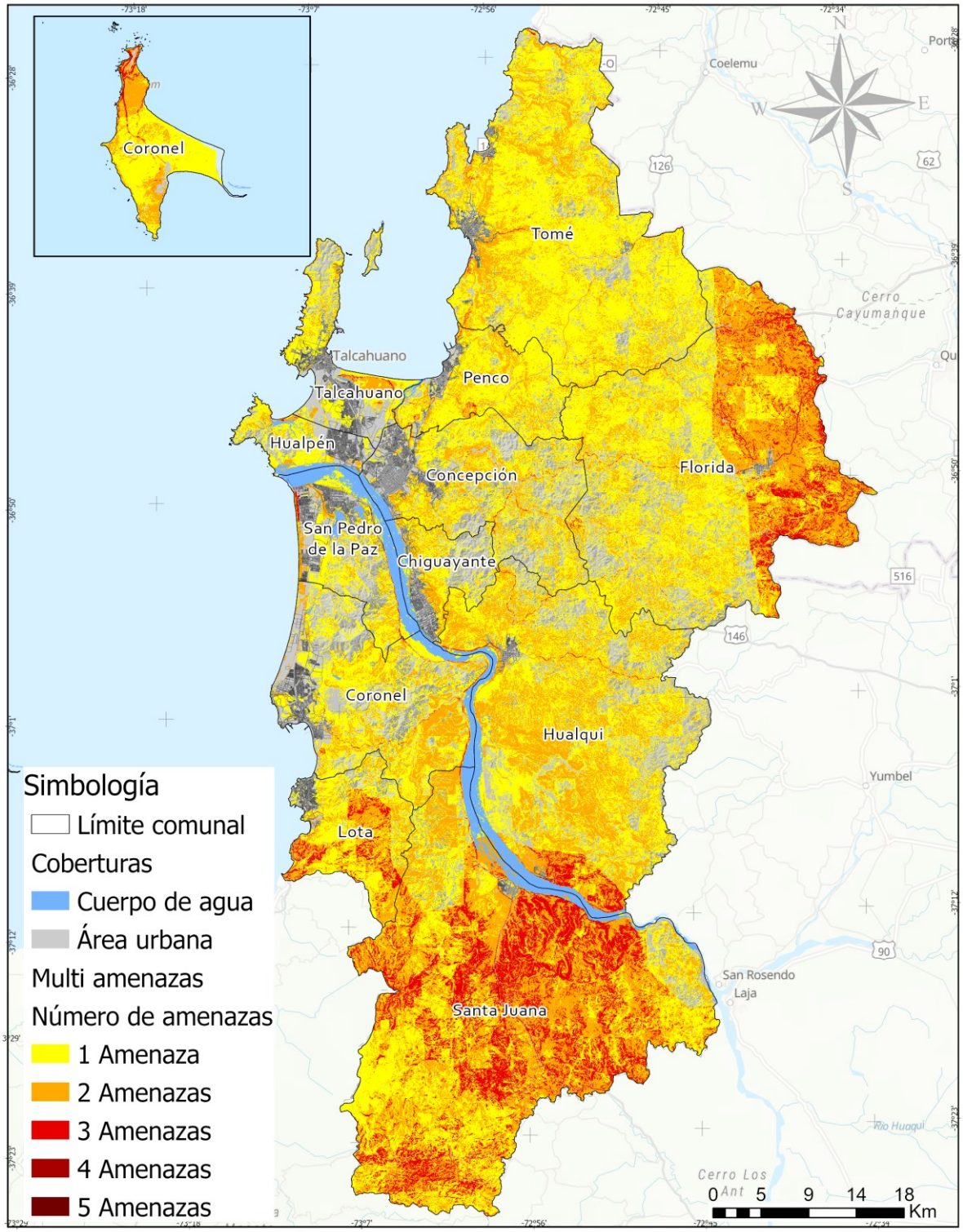


Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 46** se puede distinguir la síntesis hecha en base a la suma de los valores Muy alto y alto de cada amenaza y a su vez, la confluencia de las mismas, denotando así los territorios en los que se superponen dos o más amenazas. Se aprecia que existe una tendencia hacia el sector

al sur del río Biobío de presentar una mayor concentración de amenazas en un solo sector, lo que se puede explicar por la confluencia tanto de plantaciones forestales, una amplia costa y terrenos propensos a sufrir remociones en masa.

Figura 46. Suma de niveles Muy alto y alto.



Fuente: Elaboración propia.

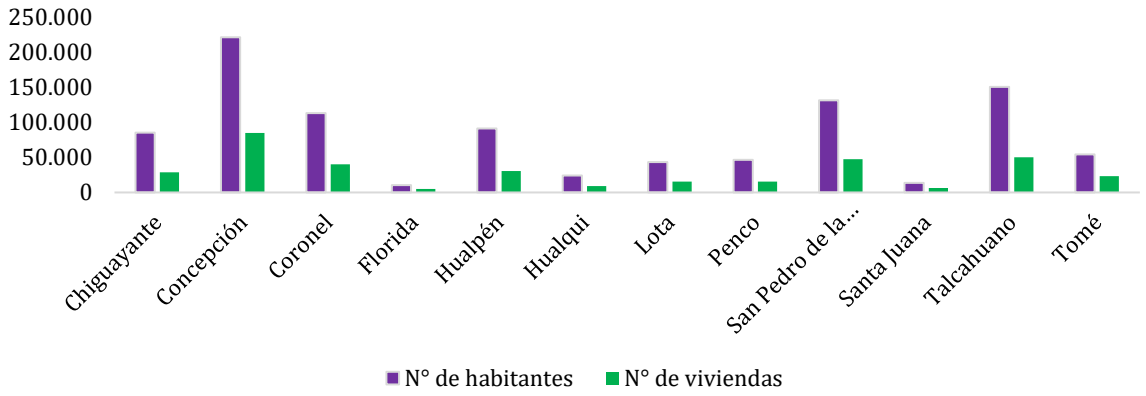
3.4. ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD Y EXPOSICIÓN

A) Exposición

Elementos expuestos:

El análisis de elementos expuestos contempla los datos de total personas y total viviendas por manzana censal / entidad rural de los microdatos del Censo 2017, en la provincia de Concepción residen 989.921 habitantes y se han establecido 357.731 viviendas. Concepción es la comuna con la mayor cantidad de habitantes y viviendas, alcanzando 222.052 (22,5%) y 85.128 (23,8%) respectivamente, seguidas por Talcahuano (15% habitantes, 14% viviendas), San Pedro de la Paz (13% habitantes, 13% viviendas) y Coronel (11,5% habitantes, 11% viviendas). Por otra parte, Santa Juana y Florida son las comunas menos pobladas con 13.704 (1,4%) y 10.589 (1,1%) habitantes (**Figura 47**).

Figura 47. Gráfico de Habitantes y Viviendas provincia de Concepción.



Fuente: Datos de INE (2017).

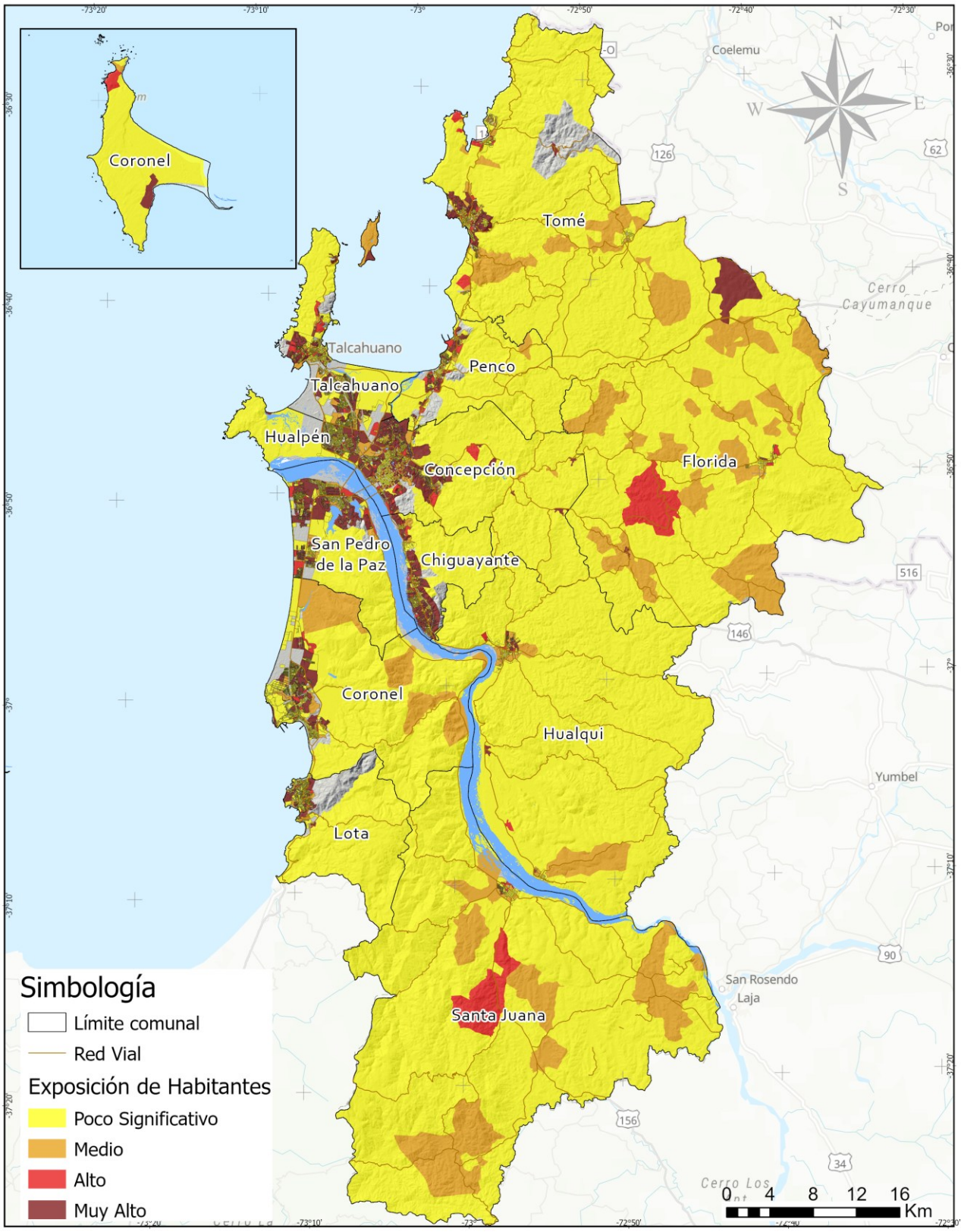
Los resultados destacan la prevalencia de áreas con niveles poco significativos de exposición para elementos expuestos, tanto desde el indicador habitantes (79% de la superficie provincial) como desde el indicador de viviendas (85% de la superficie provincial), ver **Tabla 36**. Estas áreas abarcan principalmente las áreas rurales y extensas de la provincia como son las comunas de Tomé, Florida, Hualqui y Santa Juana (**Figura 48** y **Figura 49**). Los niveles de exposición alto y muy alto coinciden con las zonas más urbanizadas en las que se evidencia mayor densidad tanto de habitantes como de viviendas, aunque en superficie solo alcancen 4,5% y 2,6% respectivamente.

Tabla 36. Elementos expuestos en la provincia de Concepción.

Nivel de Exposición	Exposición de Habitantes		Exposición de Viviendas	
	Superficie (Ha)	%	Superficie (Ha)	%
Poco Significativo	274.557	79,0	295.952	85,1
Medio	39.527	11,4	24.677	7,1
Alto	7.022	2,0	5.818	1,7
Muy Alto	8.543	2,5	3.202	0,9
Total Provincia	**347.607**	**95**	**347.607**	**95**

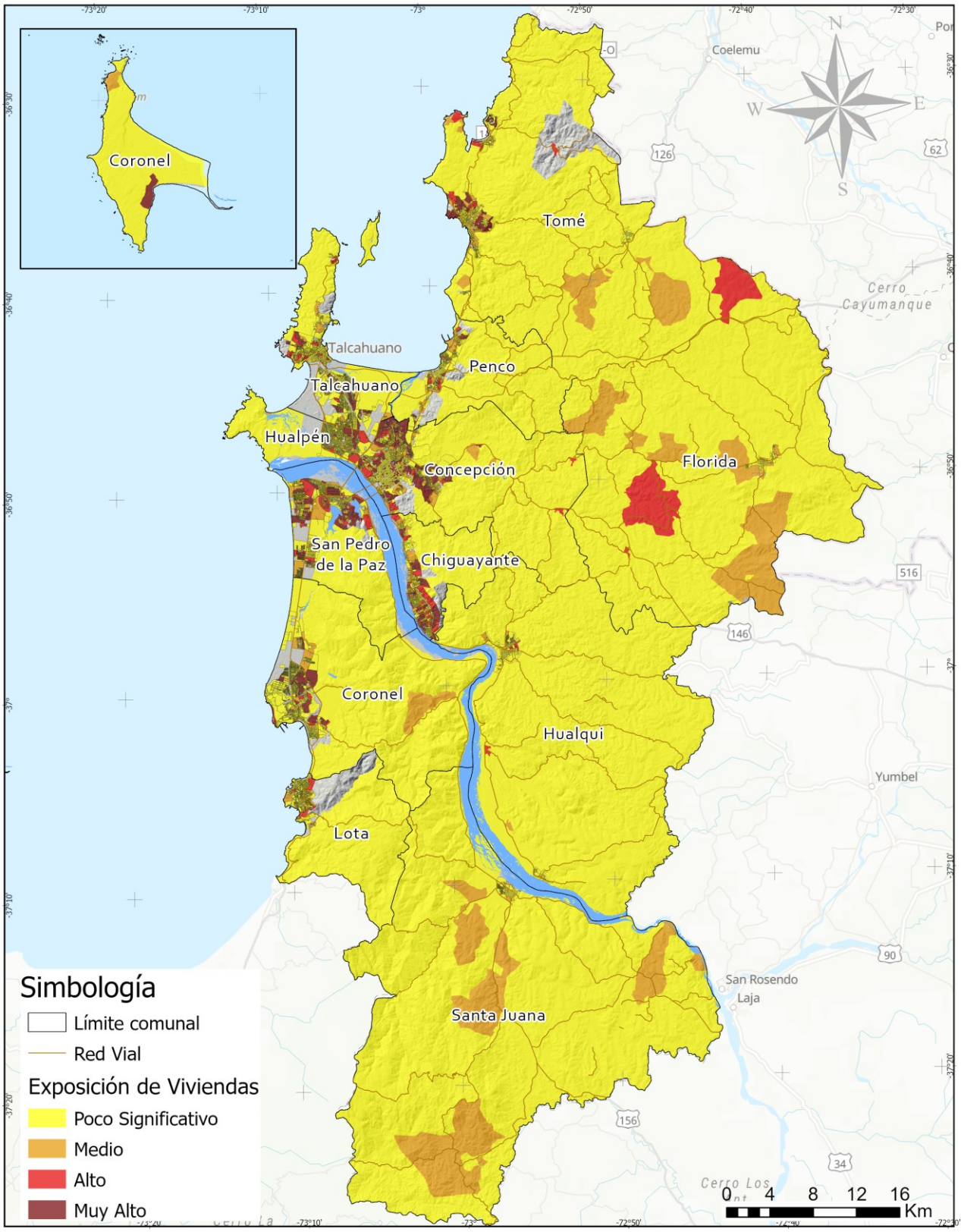
Fuente: Elaboración propia.

Figura 48. Exposición de Habitantes.



Fuente: Elaboración propia con datos de INE (2017).

Figura 49. Exposición de Viviendas.

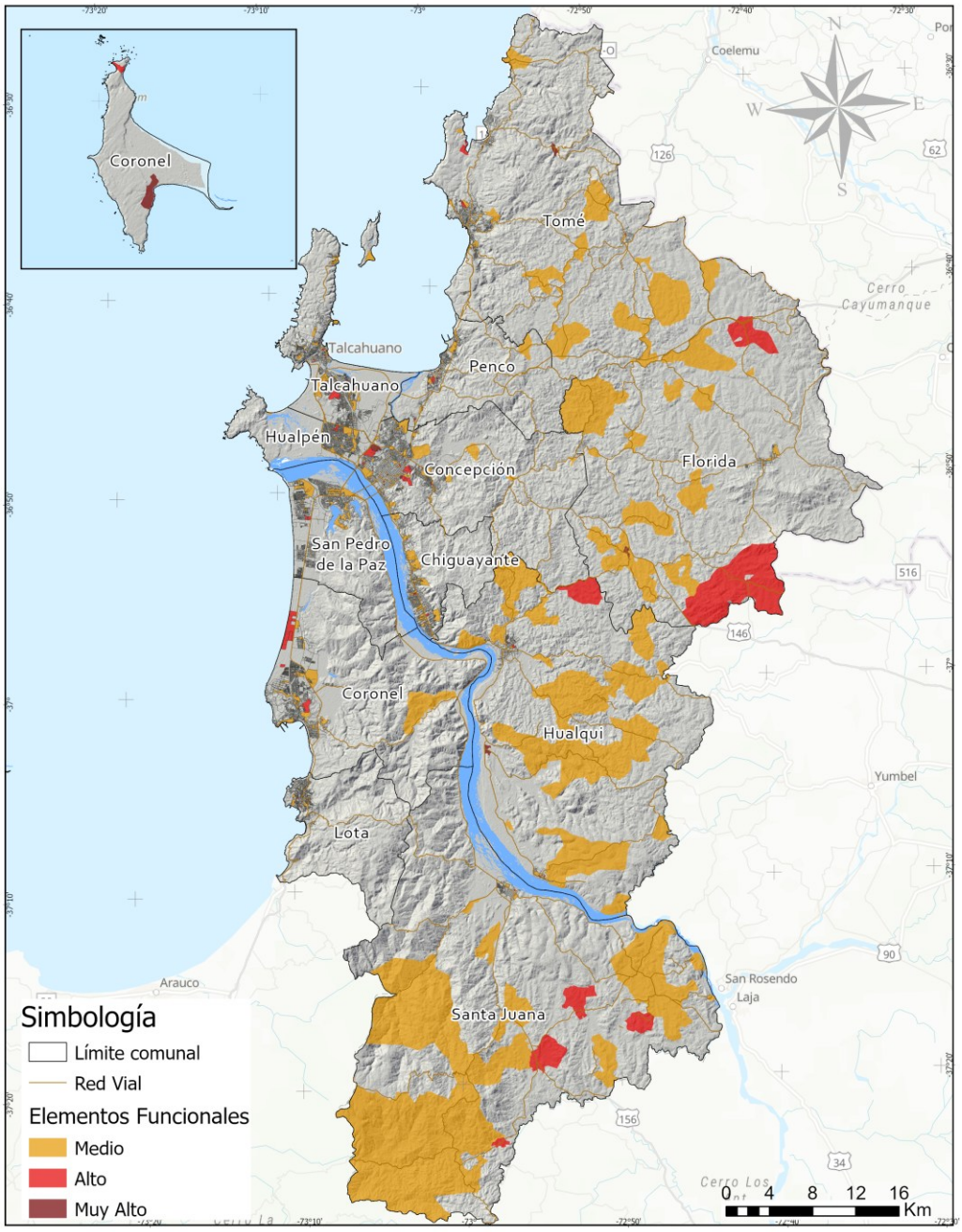


Fuente: Elaboración propia con datos de INE (2017).

Elementos funcionales:

La **Figura 50** muestra la concentración de elementos funcionales en la provincia de Concepción, la presencia de al menos uno de los elementos identificados como infraestructura crítica sube la exposición de la manzana censal / entidad rural al menos a un nivel medio. En cuanto a superficie, la exposición media en este apartado alcanza las 60.565 hectáreas, lo que corresponde al 17,4% de la superficie provincial. El nivel alto con 8.028 hectáreas y 2,3%, mientras que el nivel muy alto solo abarca 290 hectáreas o 0,08% de la superficie provincial.

Figura 50. Elementos Funcionales.

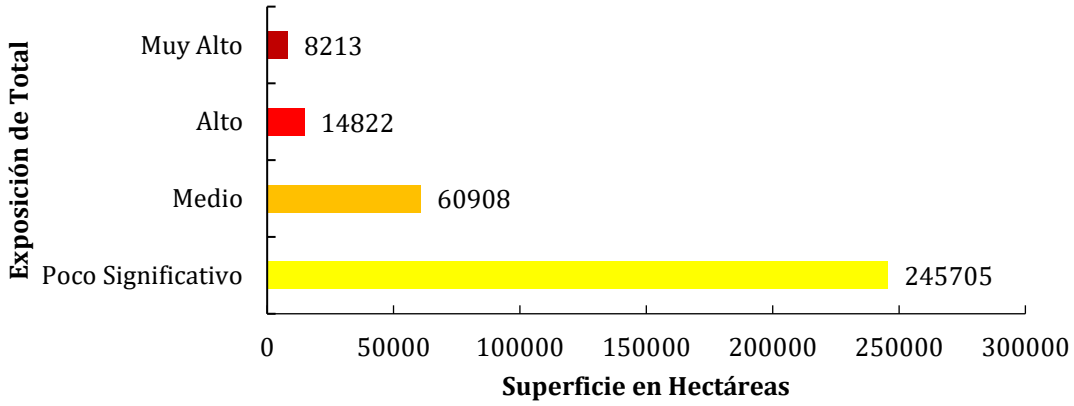


Fuente: Elaboración propia.

Exposición Final:

Los resultados de exposición final se grafican en la **Figura 51**. A diferencia de la exposición de habitantes y viviendas, la exposición final incrementa la superficie en niveles medio y superiores debido a la integración con los elementos funcionales. Los resultados demuestran que 245.705 hectáreas (70,68% de la superficie provincial) se considera con un nivel de exposición poco significativo, mientras que 60.908 (17,5%) se encuentra en nivel medio. Los mayores aportes de superficie en estas categorías los aportan las entidades rurales de las comunas de Tomé, Florida, Hualqui y Santa Juana como se observa en la **Figura 51** y **Figura 52**.

Figura 51. Exposición total, superficie en hectáreas.

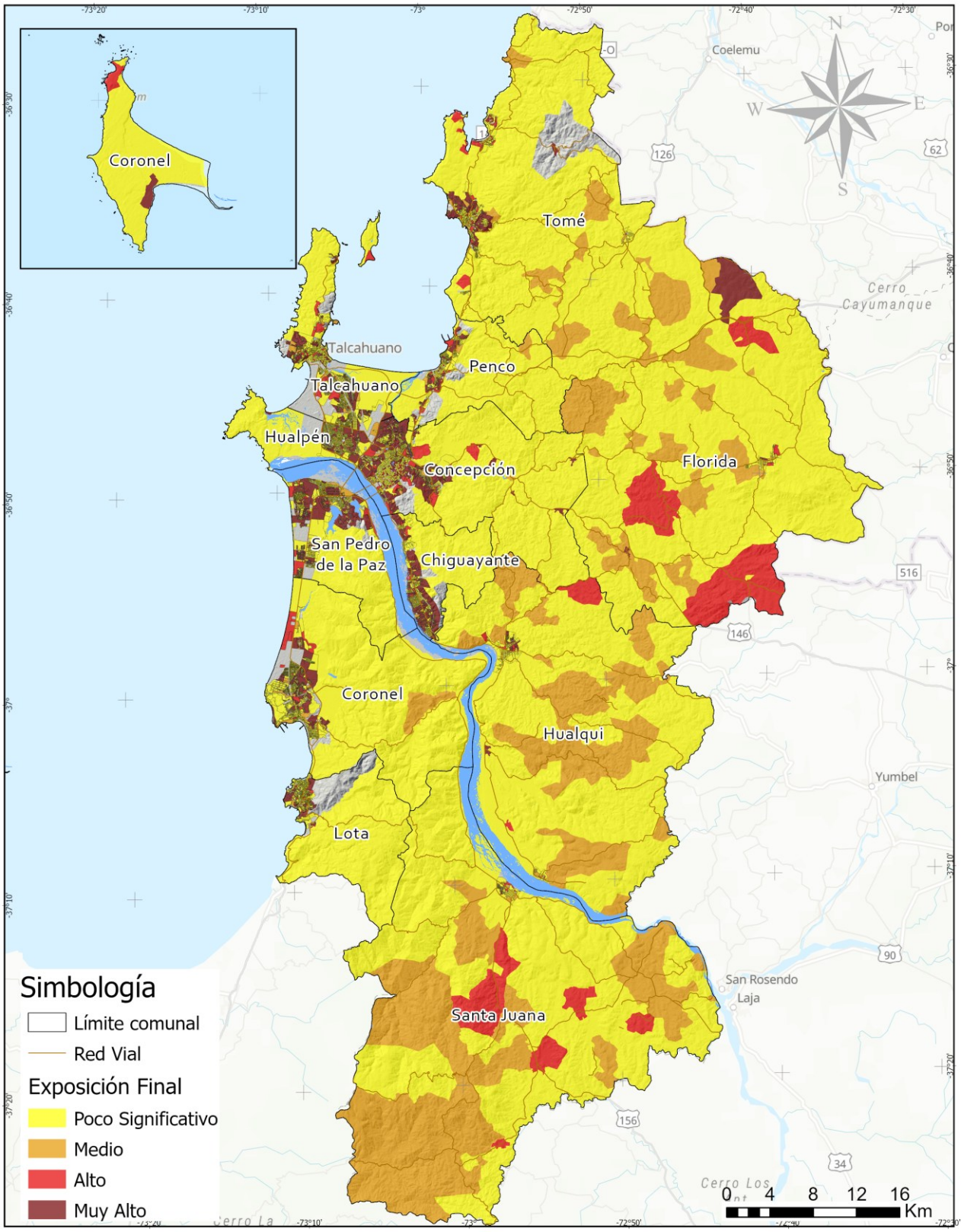


Fuente: Elaboración propia.

En el nivel alto se encuentran no solo manzanas densamente pobladas, sino también algunas entidades rurales que cumplen con los criterios de población y vivienda debido a que abarcan amplias zonas para cumplir con los criterios de limitación que establece el Instituto Nacional de Estadísticas. En total, 14.822 hectáreas equivalentes a un 4,2% de la superficie provincial se clasifican en exposición alta (**Figura 51** y **Figura 52**).

Los niveles de exposición muy alto se encuentran en la zona alta densidad urbana, especialmente en Concepción, San Pedro de la Paz, Talcahuano, Chiguayante, Coronel y Tomé. En total, 8.213 hectáreas (2,4%) presentan un nivel de exposición muy alto a nivel provincial, más del 90% de esta superficie se encuentra un tramo inferior a 20 km de la costa.

Figura 52. Exposición Final.

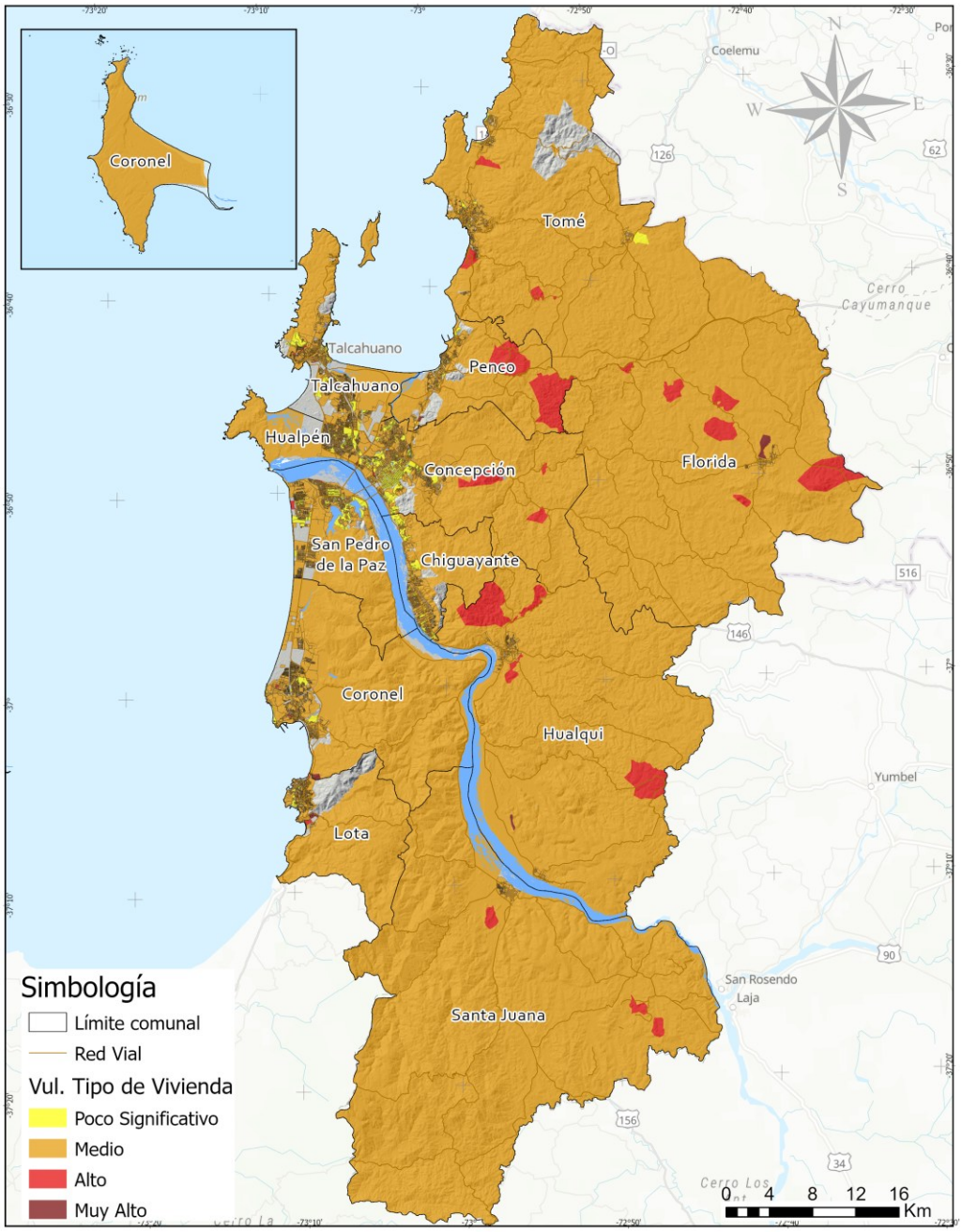


Fuente: Elaboración propia.

B) Vulnerabilidad

El análisis de vulnerabilidad física toma la información del censo 2017 a nivel de vivienda, el primer indicador analizado corresponde al nivel de vulnerabilidad en función del tipo de vivienda. El resultado muestra una amplia distribución del nivel medio alcanzando un 91% de la superficie provincial, lo que se explica por el predominio de viviendas tipo casa en gran parte del territorio analizado. Seguido se encuentra el nivel alto, pero que solo alcanza un 3% asociado a manzanas en Concepción, San Pedro de la Paz, Hualpén y Talcahuano. (**Figura 53**).

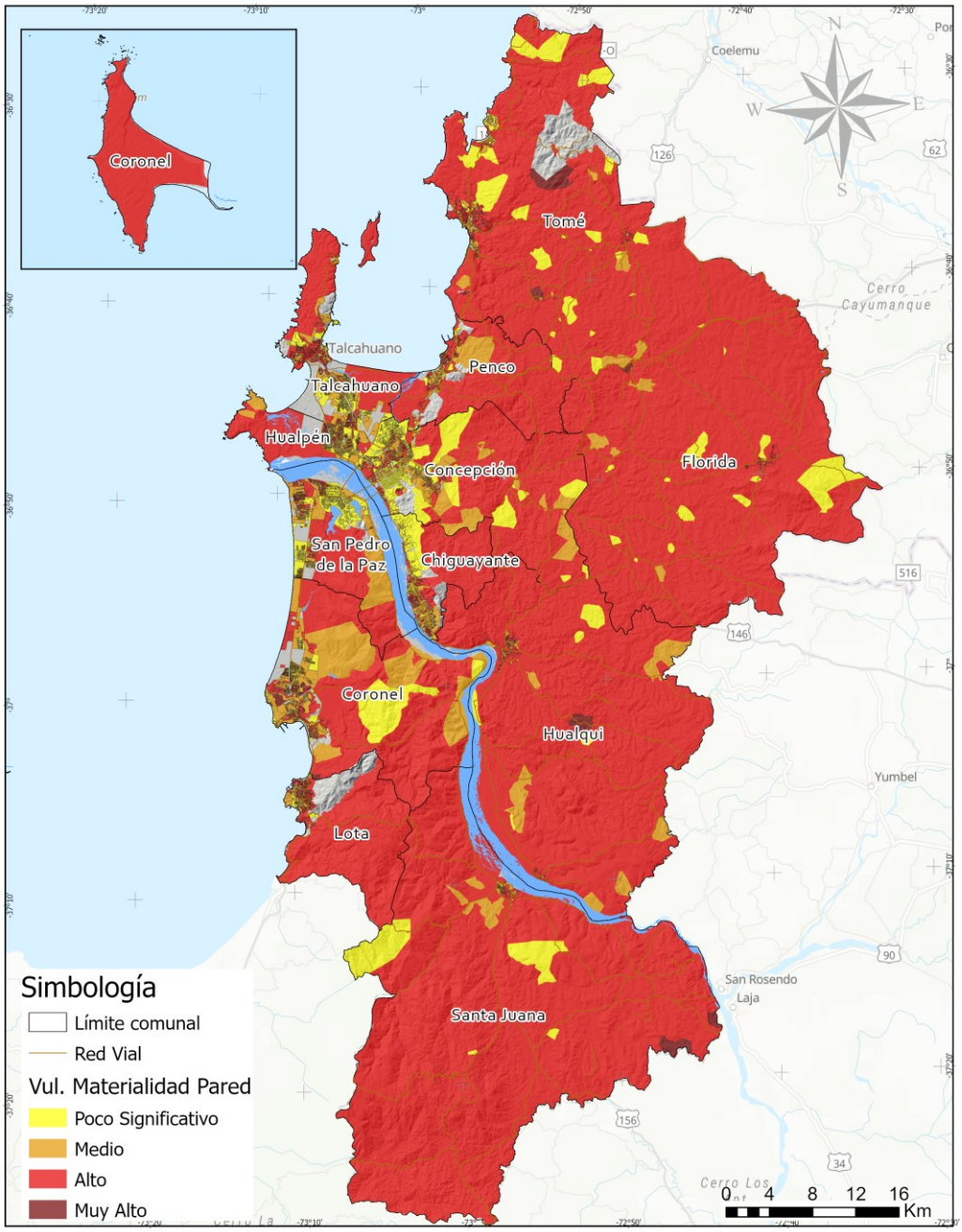
Figura 53. Vulnerabilidad por tipo de vivienda.



Fuente: Elaboración propia.

La variable "Vulnerabilidad por Tipo de Pared" se grafica en la **Figura 54**. Solo un 6% de la superficie provincial se clasifica en el nivel poco significativo, este corresponde a áreas en las que predominan las construcciones de hormigón armado ubicados principalmente en Concepción y en algunas entidades rurales. En cambio, un 83% se clasifica con vulnerabilidad alta y corresponde a todas las áreas con predominio de construcciones de tabiques con y sin forro. El 6% restante corresponde a zonas con predominio de albañilería, las que representan vulnerabilidad media (**Figura 54**).

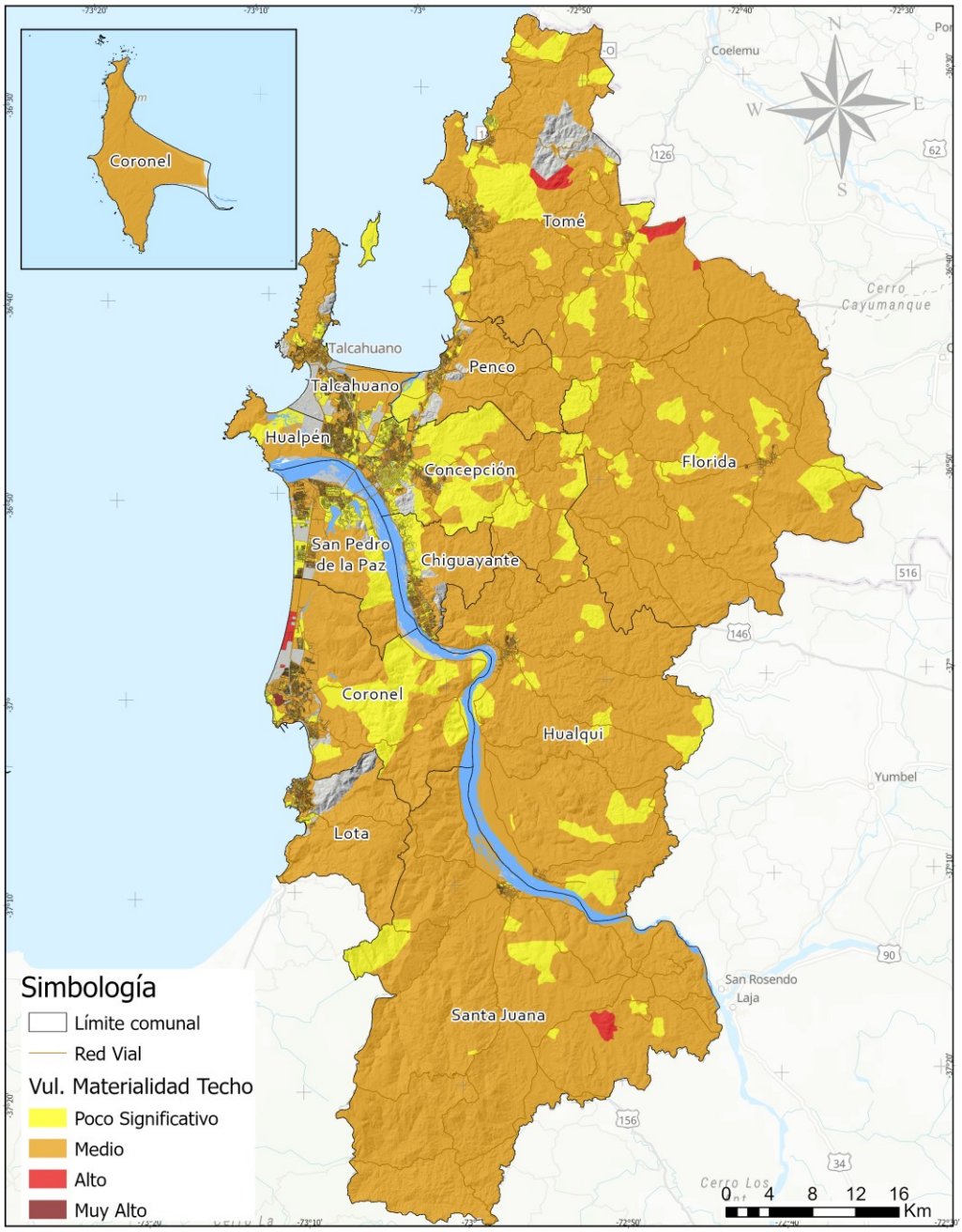
Figura 54. Vulnerabilidad por materialidad de la pared.



Fuente: Elaboración propia.

La vulnerabilidad por tipo de techo clasifica un 14% de la superficie provincial en nivel poco significativo, corresponde a zonas con predominio de techos de lozas de hormigón y tejas, en este nivel destacan entidades rurales de toda la provincia. Por otro lado, 279.386 hectáreas que corresponden al 80% de la superficie provincial se clasifican con vulnerabilidad media, estas son áreas en las que predominan los techos en planchas metálicas como el Zinc. Los niveles de vulnerabilidad alta y muy alta para este indicador alcanzan en conjunto el 0,5% (**Figura 55**).

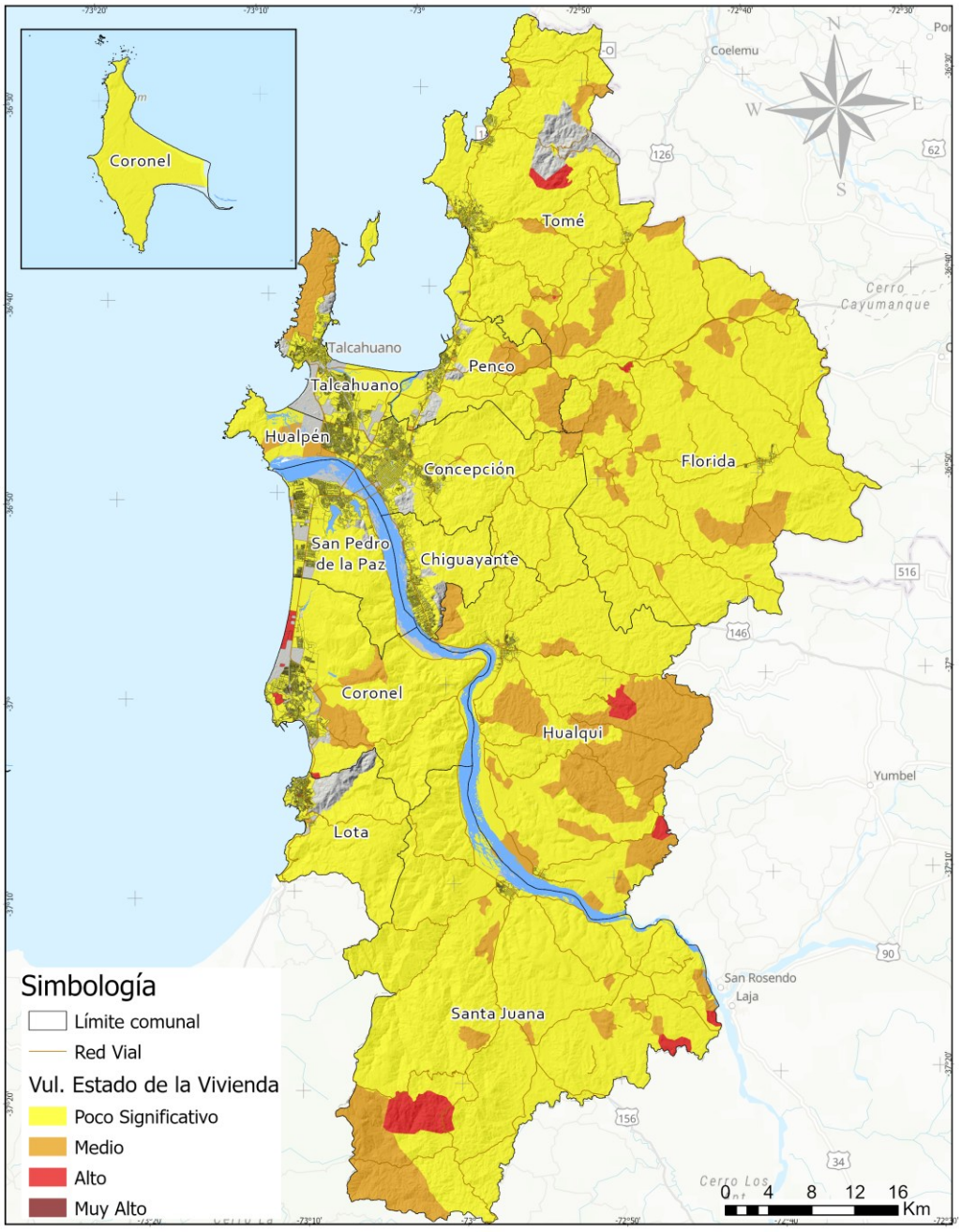
Figura 55. Vulnerabilidad por materialidad del techo.



Fuente: Elaboración propia.

La vulnerabilidad por Estado de la vivienda, referido al estado de conservación de los materiales de construcción, demuestra que gran parte de estas se consideran en estado "aceptable" según el criterio de definición INE. Esto implica que un 80% de la superficie provincial. De la superficie restante un 13% se encuentra en vulnerabilidad media y un 1% en vulnerabilidad alta (**Figura 56**).

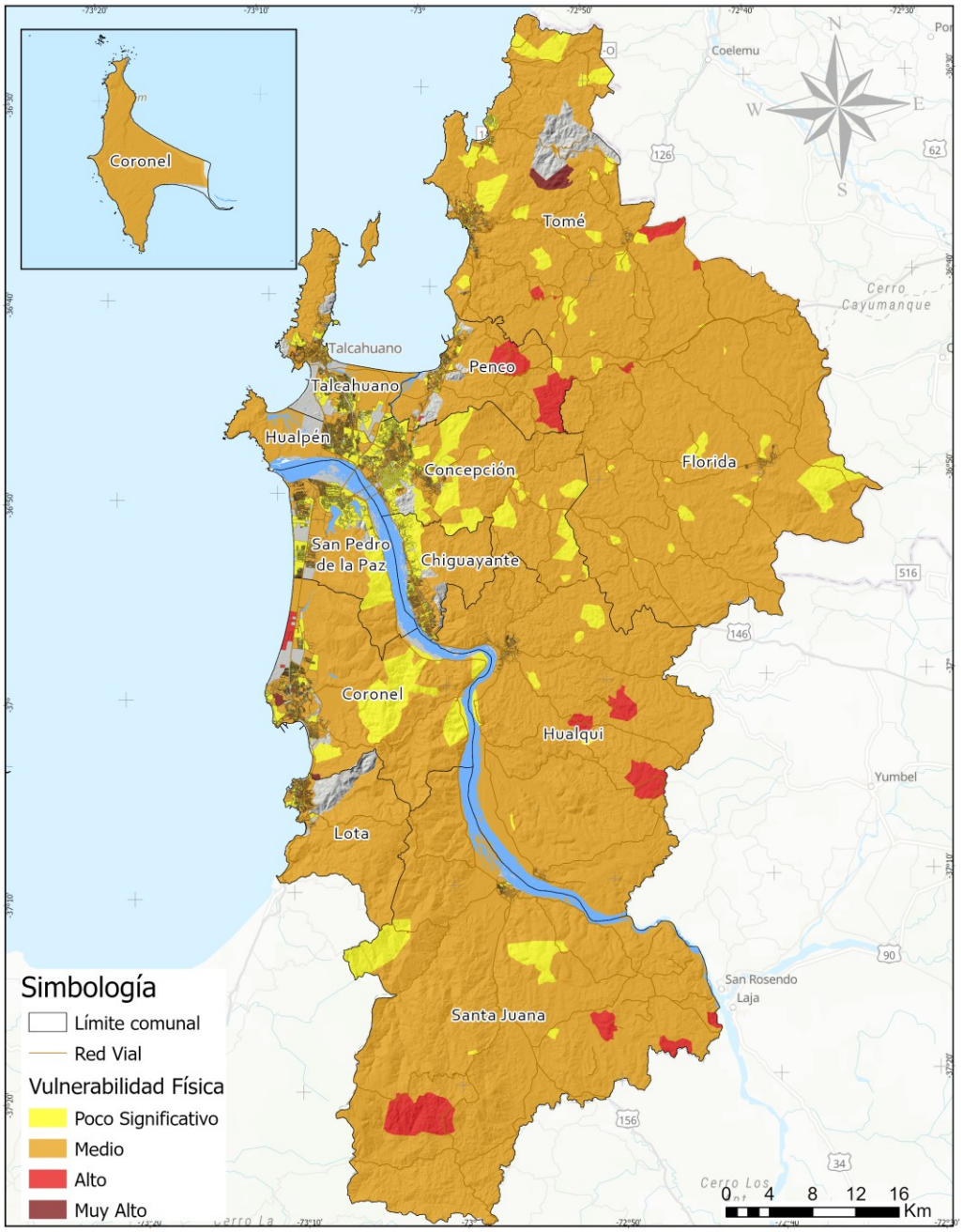
Figura 56. Vulnerabilidad por estado de la vivienda.



Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 57** muestra vulnerabilidad física, combinación de los resultados de vulnerabilidad por tipo de vivienda, materialidad de la pared, materialidad del techo y estado de la vivienda. Un 8% de la superficie analizada se clasifica en vulnerabilidad poco significativa, un 84% en vulnerabilidad media y un 2% en vulnerabilidad alta. Solo un 0,02% presenta un nivel de vulnerabilidad física muy alta según los criterios analizados.

Figura 57. Vulnerabilidad Física.

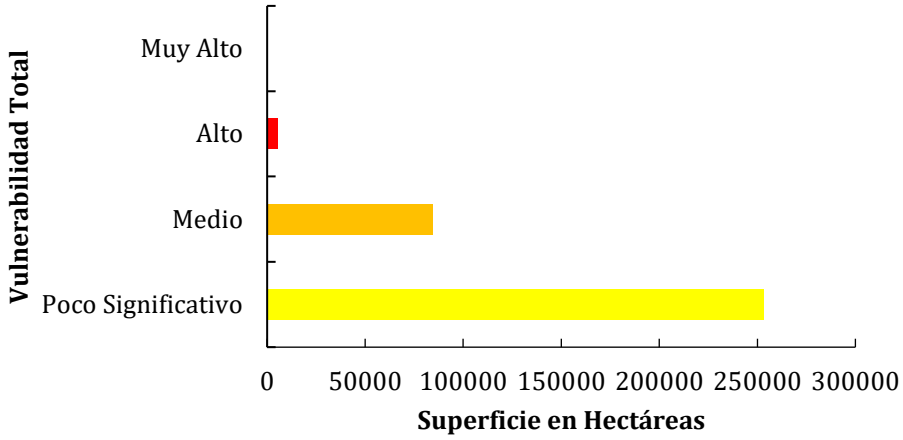


Fuente: Elaboración propia.

Vulnerabilidad Total:

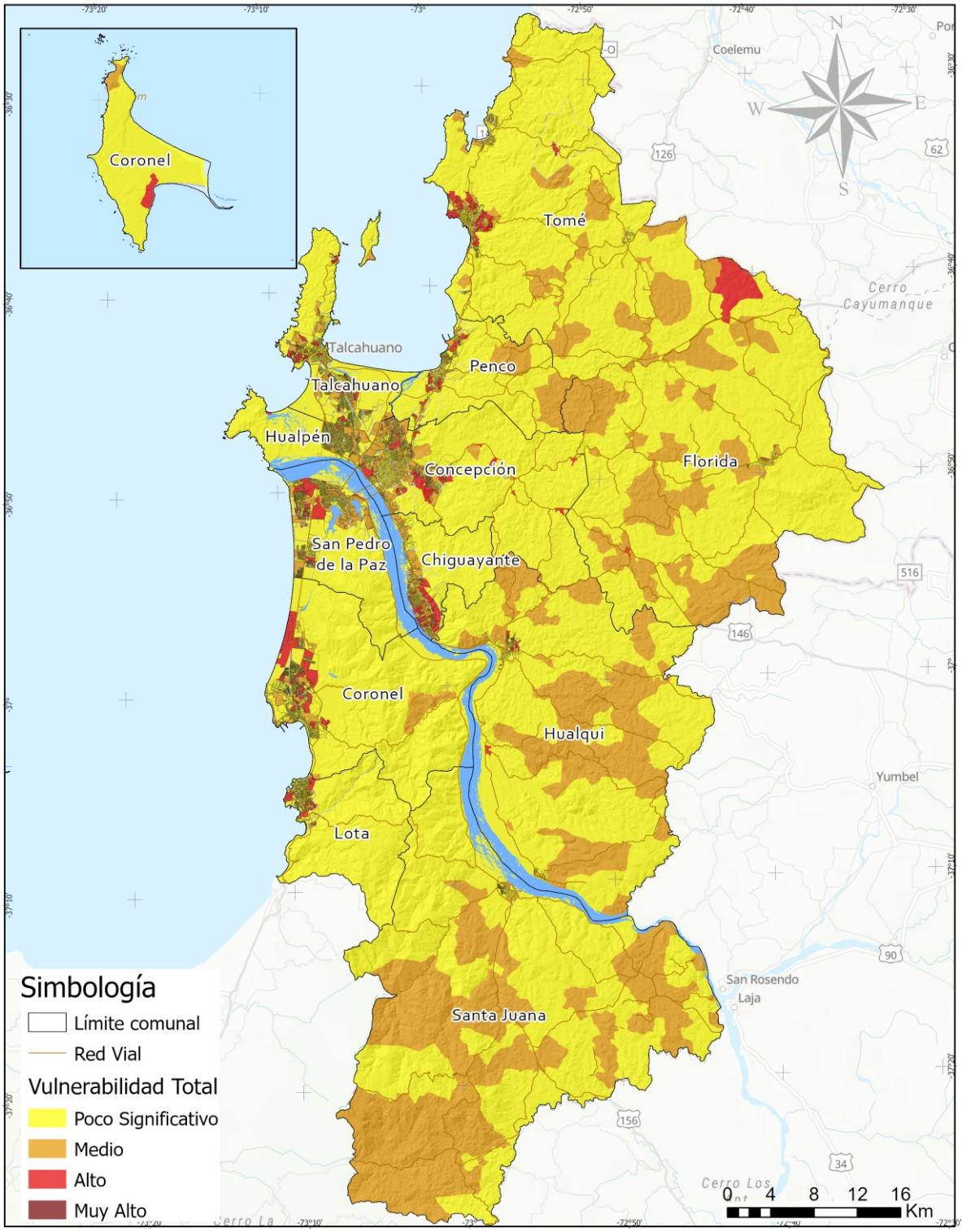
El análisis final de vulnerabilidad, que combina los resultados de exposición final y vulnerabilidad física, es la cobertura utilizada para la obtención de las áreas de riesgo. Representa la unión de los indicadores demográficos, sociales y estructurales para graficar las características que hacen susceptibles de daño al área de estudio. Bajo esta concepción, son 252.975 hectáreas, es decir un 73% de la superficie provincial en vulnerabilidad poco significativa, estas zonas corresponden principalmente a entidades rurales de baja densidad poblacional. Un 24%, 84.276 hectáreas se clasifican en vulnerabilidad media, gran parte de la superficie corresponde a entidades rurales que alojan al menos un equipamiento crítico en la cobertura de elementos funcionales. Finalmente, 5.501 hectáreas (2%) corresponden a vulnerabilidad alta (**Figura 58**).

Figura 58. Vulnerabilidad Total.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 59. Vulnerabilidad Total.



Fuente: Elaboración propia.

C) Análisis del riesgo

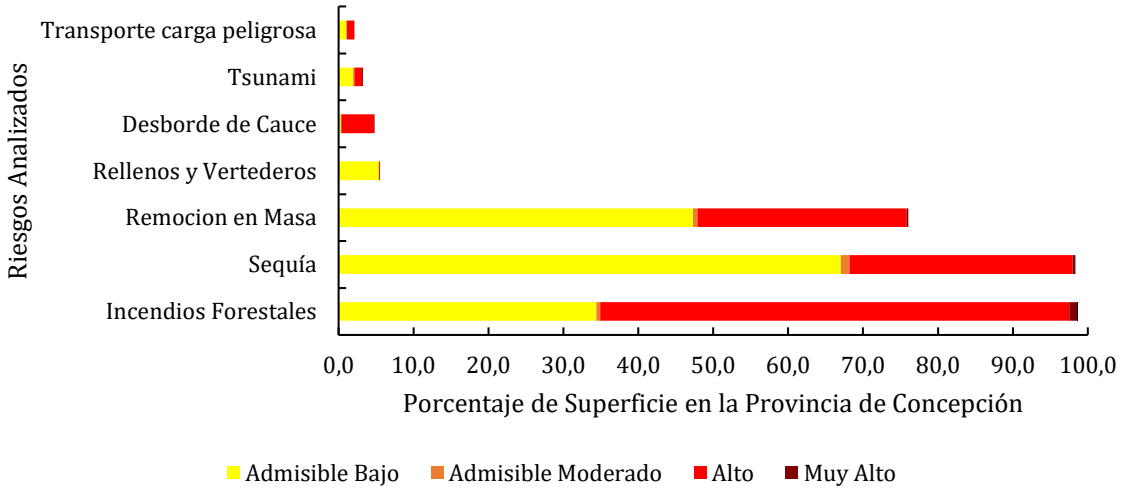
El cálculo final del riesgo de las amenazas zonificables se realizó en forma independiente, la **Tabla 37** expresa los resultados en superficie (ha) de los diferentes riesgos considerados y el **Figura 60** presenta la comparativa en porcentaje sobre el área de estudio.

Tabla 37. Superficie de Riesgos Analizados.

Tipo de Riesgo	Nivel de Riesgo (Superficie en Hectáreas)				Total
	Admisible Bajo	Admisible Moderado	Alto	Muy Alto	
Tsunami	6.702	607	3.609	497	11.416
Desborde de cauce	1.229	41	15.194	227	16.691
Remoción en masa	164.455	2.034	97.036	820	264.345
Sequía	232.955	4.033	103.447	1.427	341.862
Trans. carga peligrosa	3.699	156	3.358	116	7.328
Rellenos y vertederos	18.604	231	465	0	19.300
Incendios forestales	119.566	1.740	217.744	3.762	342.813

Fuente: Elaboración propia.

Figura 60. Porcentaje de superficie para riesgos analizados.



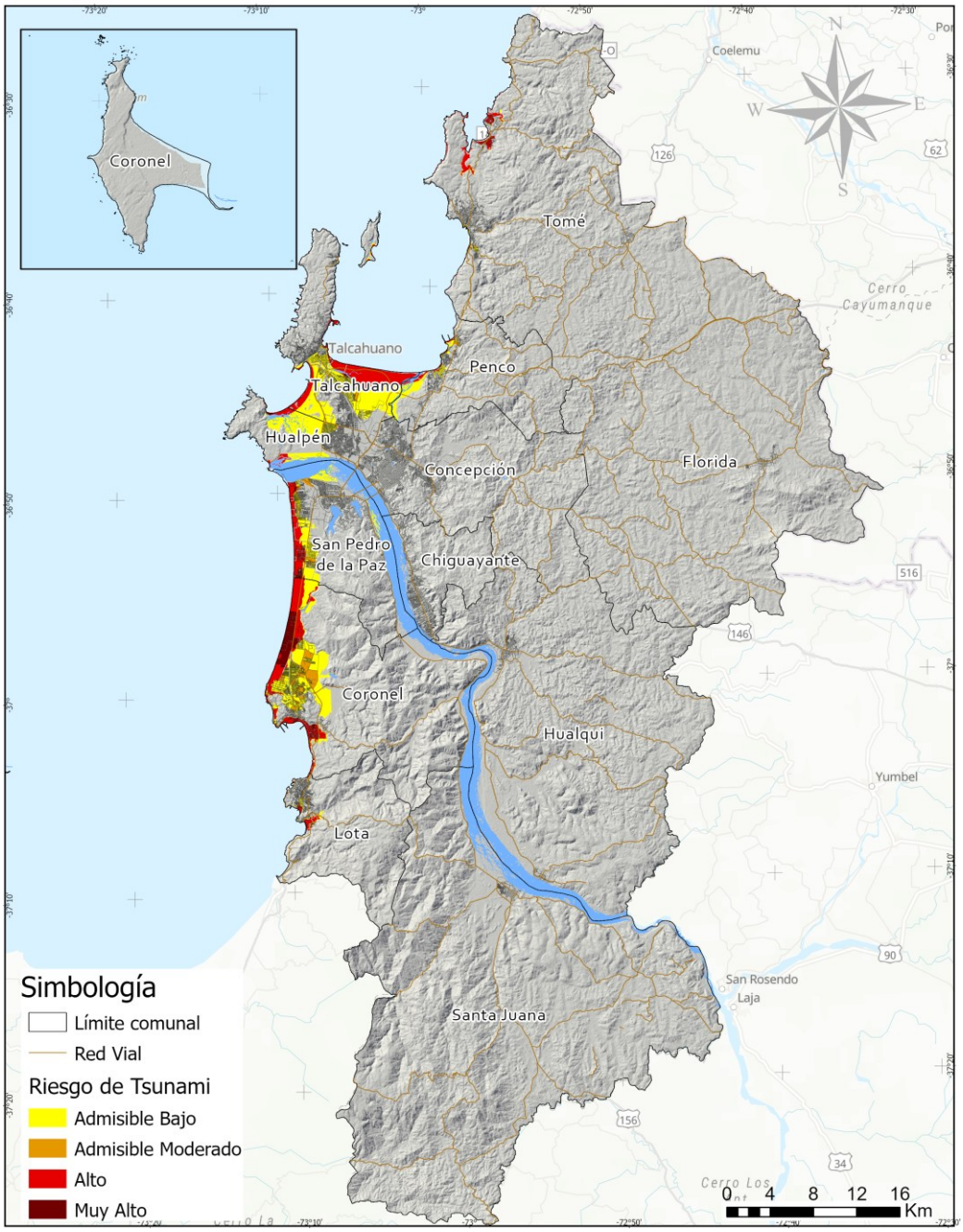
Fuente: Elaboración propia.

De todos los riesgos analizados y zonificables, el de Incendio Forestal y el de Sequía son los que presentan las mayores superficies, alcanzando más de 340.000 hectáreas correspondientes al 99 y 98% de la superficie provincial. Les sigue el riesgo de remoción en masa, con 264.345 hectáreas o 76% del área de estudio. A continuación, se presentan los resultados por tipo de riesgo.

Riesgo de Inundación por Tsunami:

El riesgo de Inundación por tsunami abarca gran parte de la costa, especialmente las planicies litorales más desarrolladas en Talcahuano, Hualpén, San Pedro de la Paz y Coronel. Aunque solo un 3% del área de estudio presenta algún nivel de riesgo, estas abarcan una superficie con 100.234 viviendas y 280.571 habitantes. Destacan las áreas de riesgo admisible bajo con 6.702 hectáreas y las áreas de riesgo alto con 3.609 hectáreas, estas últimas se emplazan en una superficie que podría afectar a 24.776 viviendas y 62.644 habitantes (**Figura 61**).

Figura 61. Riesgo de Inundación por Tsunami.

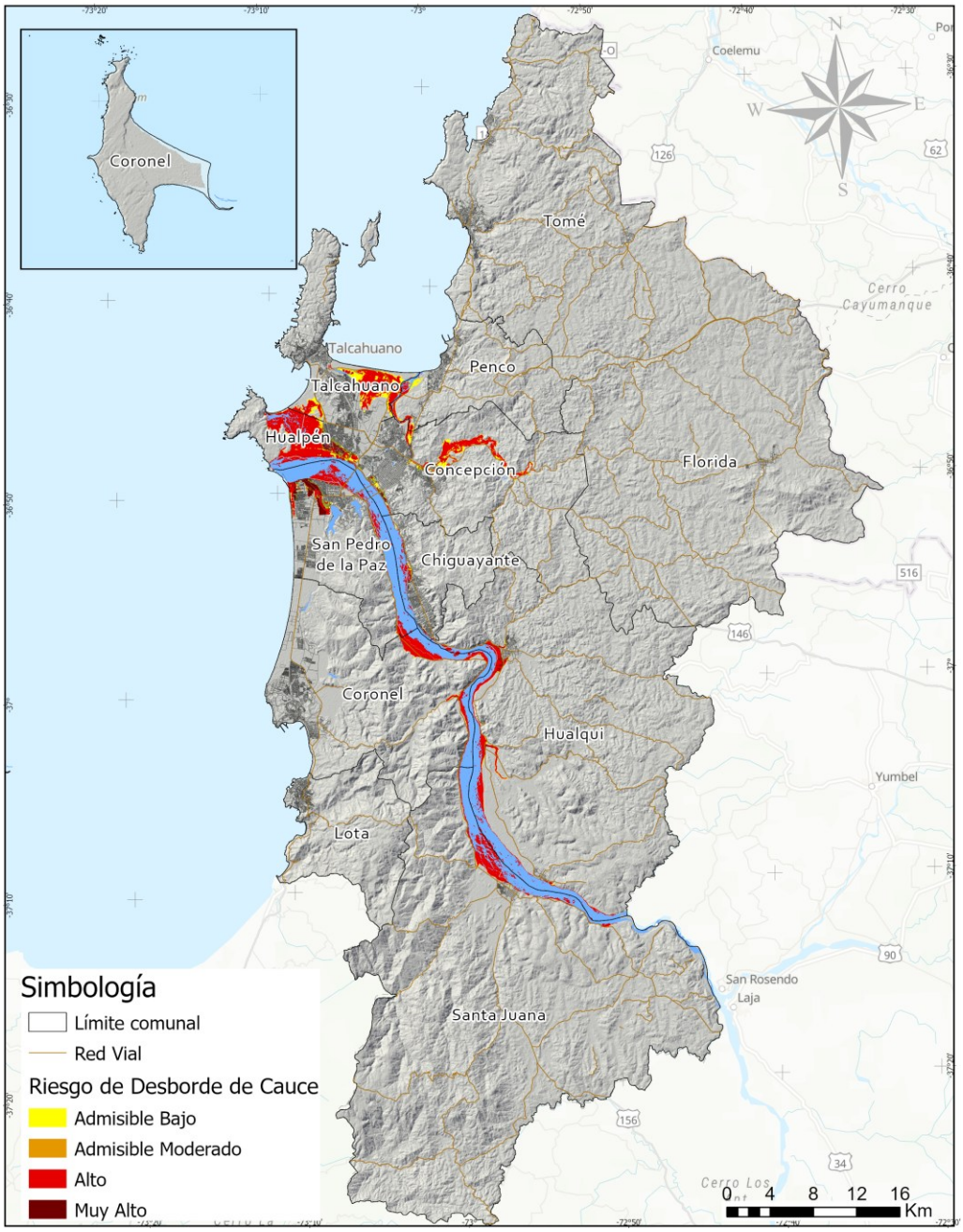


Fuente: Elaboración propia.

Riesgo de Inundación por Desborde de Cauce:

El riesgo de Inundación por desborde de cauce se expresa para los principales cursos fluviales en la provincia de Concepción, el río Bío Bío y el río Andalién. En riesgo admisible bajo se computan 1.229 hectáreas, pero las que destacan son las superficies en riesgo alto con 15.194 hectáreas, emplazadas principalmente en la caja del río Bío Bío en los límites de la comuna de Hualqui con Coronel y Santa Juana, pero también en la comuna de Hualpén y Humedal Rocuant – Andalién. (Ver **Figura 62**).

Figura 62. Riesgo de Inundación por Desborde de Cauce.

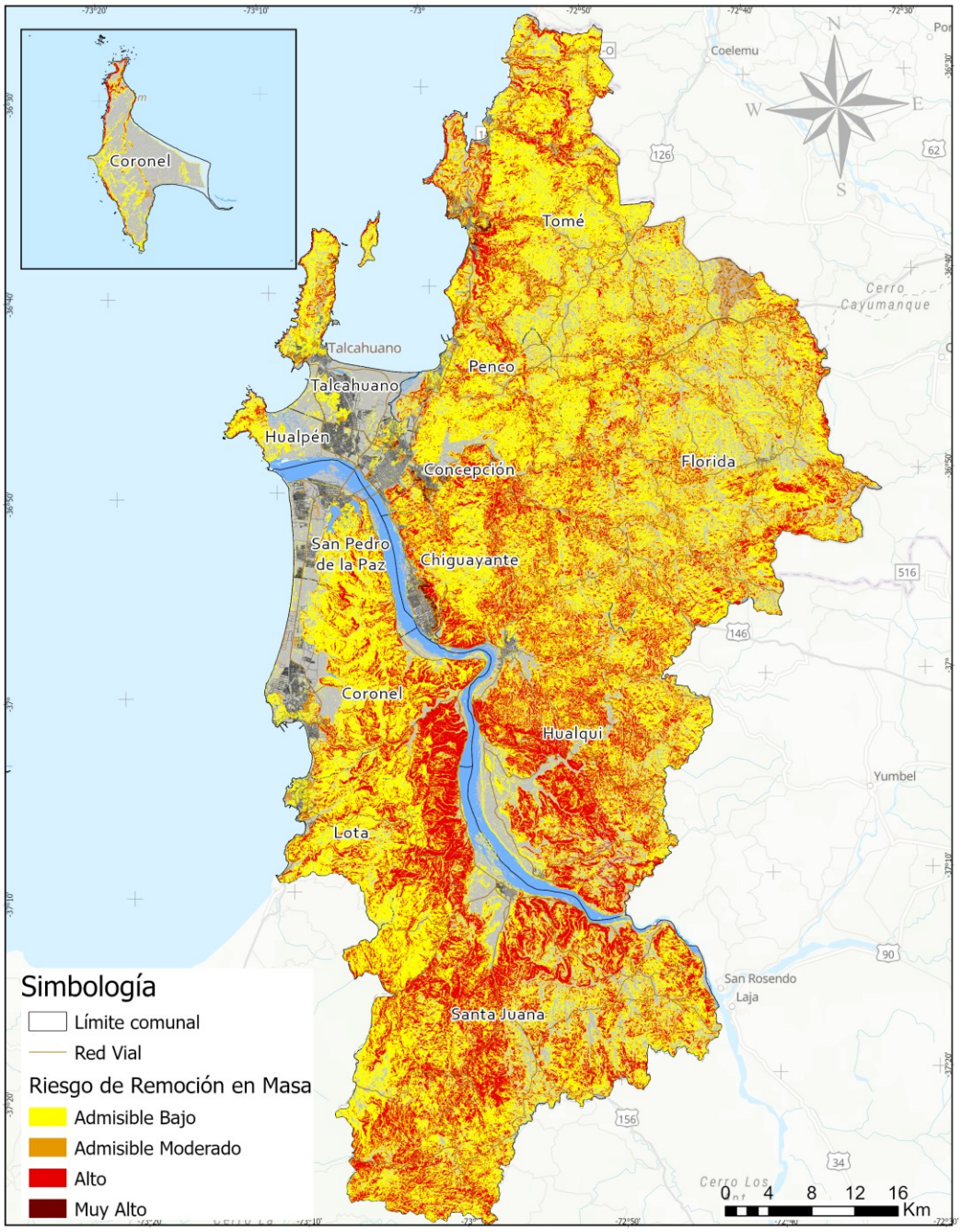


Fuente: Elaboración propia.

Riesgo de Remoción en Masa:

Uno de los riesgos que abarca la mayor superficie a escala provincial, presenta 164.455 hectáreas en riesgo admisible bajo (47%) y 97.036 hectáreas en riesgo alto (28%), estas últimas con las mayores expresiones en Coronel, Lota, Santa Juana y Hualqui. (Ver **Figura 63**).

Figura 63. Riesgo de Remoción en Masa.

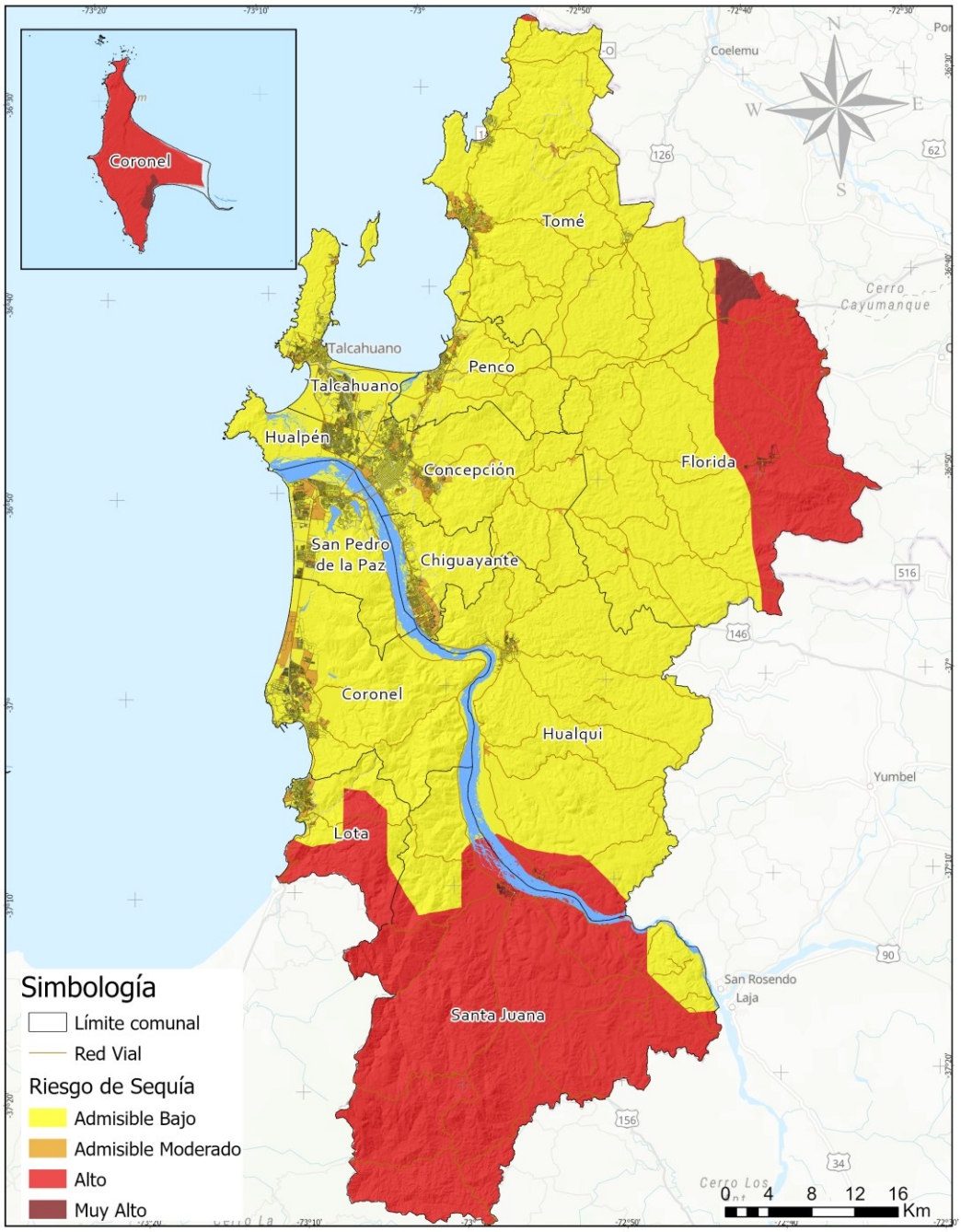


Fuente: Elaboración propia.

Sequía:

Por la naturaleza de la amenaza de Sequía, su expresión espacial del riesgo abarca gran parte del territorio provincial con 341.862 hectáreas correspondientes al 99% de la superficie total provincial. La distribución de los distintos niveles muestra un dominio del riesgo admisible bajo (67%) en el área central, sin embargo, en la zona más cercana al interior en Florida y en la parte sur de la provincia (Lota y Santa Juana), destacan las superficies de riesgo alto que abarcan un 30% del total provincial (**Figura 64**).

Figura 64. Riesgo de Sequía.



Fuente: Elaboración propia.

Transporte de Carga Peligrosa:

El riesgo de transporte de carga peligrosa se expresa principalmente en la red vial principal. Presenta solo 116 hectáreas (0,03) en muy alto riesgo, 3.358 hectáreas en riesgo alto, 156 hectáreas en riesgo admisible moderado y 3.699 hectáreas en riesgo admisible bajo, este último a un rango máximo de 80 metros desde el interior de las rutas de transporte (**Figura 65**).

Figura 65. Riesgo de Transporte de carga peligrosa.

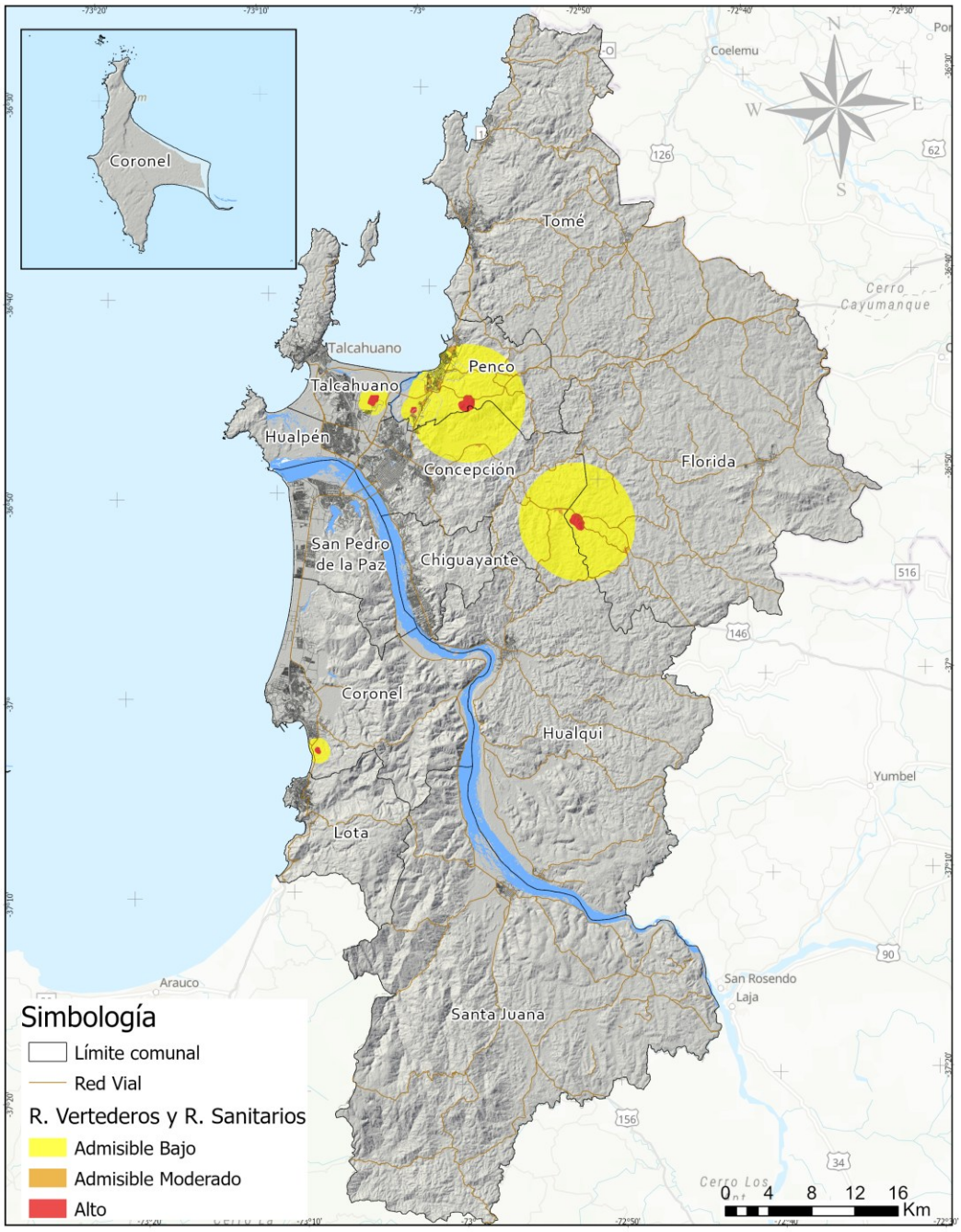


Fuente: Elaboración propia.

Vertederos y Rellenos Sanitarios:

Abarca un 6% de la superficie provincial, con 19.300 hectáreas en total de las cuales 18.604 corresponden a riesgo admisible bajo. Aun así, esta cobertura de riesgo tiene un potencial de afectación sobre 53.67 habitantes y 17.933 viviendas (**Figura 66**).

Figura 66. Riesgo Vertederos y Rellenos Sanitarios.

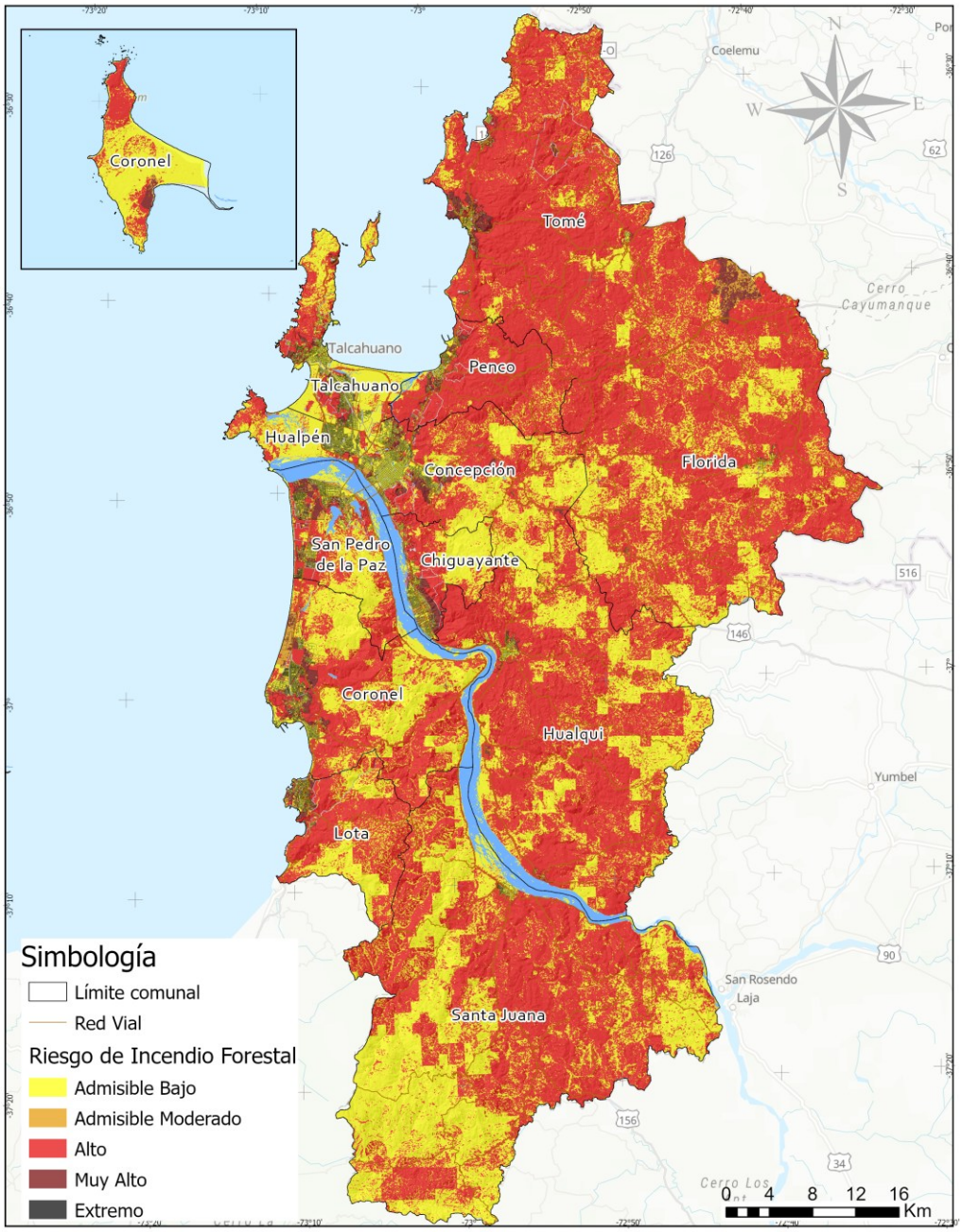


Fuente: Elaboración propia.

Incendio Forestal:

Los incendios forestales presentan una extensión de riesgo que abarca un 99% de la superficie provincial y es el único cuya expresión del riesgo alto supera a los niveles admisibles bajo y moderado, abarcando 217.744 hectáreas (63%) emplazados principalmente en las áreas de uso forestal del área de estudio, pero también es el único con áreas de riesgo extremo, aunque en una expresión poco significativa (1,6 hectáreas – 0,0005% del territorio provincial) (**Figura 67**).

Figura 67. Riesgo Incendio Forestal.



Fuente: Elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

El presente estudio identificó 9 amenazas relevantes para la planificación territorial metropolitana, que en orden de importancia corresponden a: Incendios forestales, inundaciones por desborde de cauces, tsunamis, remoción en masa, erosión costera, actividades y transporte de carga peligrosa, sequía, vertederos y rellenos sanitarios. Se espera que el cambio climático incida fuertemente en la magnitud, frecuencia y estacionalidad de las amenazas, el efecto será más acentuado en incendios forestales, sequía, olas de calor, olas de frío y marejadas-erosión costera.

Cada amenaza fue analizada en cuatro niveles, correspondientes a: poco significativo, moderado, alto y muy alto. De acuerdo con el análisis realizado se recomienda considerar los niveles alto y muy alto como áreas de mayor restricción al desarrollo urbano.

En términos de superficie provincial potencialmente afectada por las diferentes amenazas en sus niveles alto y muy alto (de mayor intensidad y preocupación) destacaron los incendios forestales (64,3%), remociones en masa (28,1%), sequía (8,5%), inundación por desborde de cauces (4,6%). También resulta relevante el 15,6% de la extensión de la borde costero que se encuentra sometido a niveles preocupantes de erosión. Las amenazas con menor extensión correspondieron a tsunami (0,5%), transporte de carga peligrosa (1,1%) y vertederos y rellenos sanitarios (0,1%).

El análisis multiamenazas reveló que un 84% de la provincia de Concepción se encuentra expuesto a amenazas en niveles de alto impacto potencial (alto y muy alto amenaza). De este porcentaje el 46,1% son áreas donde se desarrolla una amenaza, el 31,2% sectores con dos amenazas potenciales y el 7% de la provincia se encuentra afecto a la acción de tres o más amenazas. El proceso de planificación debería evitar el desarrollo urbano en áreas donde existe el potencial del desarrollo de dos o más amenazas.

Los eventos que concentran los niveles más altos de exposición asociada al número de personas (mayores a 50.000 habitantes), según el CENSO 2017, corresponden a los incendios forestales, remociones en masa, transporte de sustancias peligrosas, inundación por desborde de cauces y tsunami. En términos de las superficies provinciales en riesgo, esto es considerando el producto de los factores de amenaza, vulnerabilidad y exposición, destacan a nivel provincial los incendios forestales (63%), sequía (30%), remociones en masa (28%) e inundación por desborde de cauces (2,8%). Dichas superficies representan sectores urbanizados, por lo que las medidas deberían apuntar fuertemente a reducir la vulnerabilidad y la exposición.

Por motivos de alcance de objetivos, metodológicos y presupuestales el presente estudio, no fue posible abordar todos los aspectos a cabalidad en materia del riesgo provincial, por lo que en futuras instancias se recomienda: i) incorporar topografía LiDAR a nivel provincial para mejorar los análisis de remociones en masa, incendios forestales e inundaciones fluviales, ii) realizar el análisis de la amenaza de erosión costera en el litoral arenoso ubicado al norte del río Biobío, iii) avanzar en estudio que incorpore la amenaza por desborde de cauces en otros ríos y esteros, debido a la importancia que reviste la amenaza para la provincia, iv) contar con un estudio probabilístico de la amenaza de tsunami a nivel provincial.

5. BIBLIOGRAFÍA

Afolagboye, L. O., Ojo, A. A., & Talabi, A. O. (2020). Evaluation of soil contamination status around a municipal waste dumpsite using contamination indices, soil-quality guidelines, and multivariate statistical analysis. SN Applied Sciences, 2(11), 1864.

Araujo R, Silva G, Freitas D and Klein A (2009) Georreferenciamiento de fotografías aéreas e análise da variação da linha de costa. In: Alcántara-Carrió, J., Correa, I., Isla, F., Alvarado, M.

Araya-Vergara, J. 1984. Bases geomorfológicas para una división de las costas de Chile.

Atlas de Riesgo de San Pedro de la Paz (2018). Municipalidad de San Pedro de la Paz. Centro Eula, facultad de ciencias ambientales, Universidad de Concepción.

Bahrami, Y., Hassani, H. & Maghsoudi, A. Landslide susceptibility mapping using AHP and fuzzy methods in the Gilan province, Iran. GeoJournal 86, 1797–1816 (2021). https://doi.org/10.1007/s10708-020-10162-y

Bariha, N.; Mani Misha, I y Chandra, V. (2016). "Fire and explosion hazard analysis during surface transport of liquefied petroleum gas (LPG): A case study of LPG truck tanker accident in Kannur, Kerala, India". Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 40: 449-460.

Bebb, J.; Kersey, J. (2003). Potential impacts of climate change on waste management. Entec UK Limited. Environmentl Agency, Bristol, United Kingdom. ISBN 1-844-32221-1

Bello, M., Castillo, M., Maturana, J., Valenzuela, C., Barbieri, M. 2004. Featuring Enso 1997-2000 in Central Chile. Gayana (Concepción), 68(2, Supl. TIProc), 48-53.

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., … Coll, A. (2014). IBER: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 30(1), 1–10. https://doi.org/10.1016/j.rimni. 2012.07.004

Bobadilla, A., Stehr, A., & Toro, N. (2024). Evaluation of climate-change impacts on the temporal and spatial behaviour of drought in South-Central Chile. Hydrological Sciences Journal, 69(2), 165-184.

Brabb, E.E., Pampeyan, E.H., Bonilla, M.G., 1972. Landslide susceptibility in San Mateo County, California. U.S. Geol. Surv., Misc. Field Studies. Map MF-360, Scale 1:62,500.

Brand, J.H.; Spencer, K.L. (2024). Potential pollution risks of historic landfills in England: Further análisis of climate change impacts. WIREsWater. 11:e1706. 1-14.

Butt T.E.; Gouda H.M.; Baloch M.I.; Paul P.; Javadi A.A.; Alam A. (2014). Literature review of baseline study for risk análisis – The Landfill leachate case. Environment International 63, 149-162

Cascini, L. (2008). Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. Engineering Geology, 102(3-4), 164-177.

Cerar, S., Serianz, L., Koren, K., Prestor, J. y Mali, N. (2022) Synoptic Risk Assessment of Groundwater Contamination from Landfills. Energías, 15 (14), 5150.

Chowdhury, M. S. (2023). A review on landslide susceptibility mapping research in Bangladesh. Heliyon.

Chulliparambil, V.R.; Shearer, H.; Cortes-Ramirez, J.; Matthews, T.; Michael, R.N. (2024). "Identifying the potential for ecological rehabilitation of landfills in Queensland: A spatial analysis". Australasian Journal of Environmental Management, 31(1). 64-82.

CONAF (2015) Catastro de Uso del Suelo y Vegetación Región de Biobío Actualización 2015. https://sit.conaf.cl/

CONAF, 2021. Resumen Ejecutivo. Riesgo Incendios Forestales. Departamento de Desarrollo e Investigación, Gerencia de Protección contra Incendios Forestales, Corporación Nacional Forestal, Enero 2021

De Sousa, C. A. (2002). "Brownfield Redevelopment in Toronto: An Examination of Past Trends and Future Prospects." Land Use Policy 19: 297–309.

Del Río, L., Plomaritis, T., Benavente, J., Valladares, M., Ribera, P., 2012. Establishing storm thresholds for the Spanish Gulf of Cádiz coast. Geomorphology 143-144: 13–23.

Descripciones de suelos y materiales y símbolos (1992). Estudio de Suelos de Secano VIII Región. Centro de Información de Recursos Naturales, CIREN.

Dias, H.C.; Hölbling, D.; Grohmann, C.H. Landslide Susceptibility Mapping in Brazil: A Review. Geosciences 2021, 11, 425. https://doi.org/10.3390/geosciences11100425.

DS. 189/2005, Aprueba Reglamento sobre condiciones Sanitarias y de Seguridad Básicas en los Rellenos Sanitarios. MINSAL

El Jazouli, A., Barakat, A., & Khellouk, R. (2019). GIS-multicriteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco). Geoenvironmental Disasters 6 (1): 1–12.

Environmental Protection Agency, EPA (2017) "Climate Change Impacts" en https://www.epa.gov/climateimpacts ("recuperado 1 junio 2024").

Environmental Protection Authority, EPA Western Australia (2005) Guidance for the Assessment of Environmental Factors No. 3, Separation Distances between Industrial and Sensitive LAnd Uses.

Forster, M. A.; Kim, T. D. H.; Kunz, S.; Abuseif, M.; Chulliparambil, V. R.; Srichandra, J.; Michael, R. N. (2022). "Phenology and Canopy Conductance Limit the Accuracy of 20 Evapotranspiration Models in Predicting Transpiration." Agricultural and Forest Meteorology. 315. 108824.

Galli, C. 1967. Geología urbana y suelo de fundación de Concepción y Talcahuano, Chile. Informe final del proyecto de investigación Nº 75 de la Comisión de Investigación Científica de la Universidad de Concepción.

Gichamo, T.; Gökçekuş, H. (2019). Interrelation between Climate Change and Solid Waste. Journal of Environmental Pollution and Control. 2(1). 104 ISSN: 2639-9288

Habiterra, (2020). Guía Metodológica Para la Elaboración de Estudios de Riesgos de los planes Reguladores del Nivel Comunal e Intercomunal. Edición preliminar.

Hauptmanns, U. (2020). Determination of Appropriate Distances Between Industry and Residential Areas. In: Process and Plant Safety. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61484-6_12.

Himmelstoss, Emily A, Rachel E Henderson, Meredith G Kratzmann, and Amy S Farris. 2021. Open-File Report Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.1 User Guide. Reston, VA. http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20211091.

IASA, Ingeniería Alemana S.A. (2006) "Programa Manejo de Residuos Sólidos Domiciliarios Región del Bío "(Código BIP. 20146452-0, Asignación Presupuestaria 05-68-02-31-94-088)

Ilabaca, P. 1979. Transgresión marina reciente en el litoral de Concepción. Antecedentes morfológicos. Seminario sobre desarrollo e investigación de los recursos marinos de la VIII Región (Chile). V.A. Gallardo (ed.), Universidad de Concepción, p. 31-45.

IPCC, 2013: Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Jones, R., W. Lehr, D. Simecek-Beatty, R. Michael Reynolds. 2013. ALOHA® (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4: Technical Documentation. U. S. Dept. of Commerce, NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 43. Seattle, WA: Emergency Response Division, NOAA. 96pp

Klein, A., Cabrera, J., Barlow, R., Eds. "Métodos en teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el litoral, 123-138 p.

Kohno, M.; Higuchi, Y. Landslide Susceptibility Assessment in the Japanese Archipelago Based on a Landslide Distribution Map. ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2023, 12, 37. https://doi.org/10.3390/ijgi12020037.

Lee, GF y Jones-Lee, A. (octubre de 1995). Descripción general de los problemas posteriores al cierre de los vertederos. En la sesión de la Convención de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles dedicada a "Cierres de vertederos: protección ambiental y recuperación de tierras", San Diego, CA.

Link O, Brox-Escudero LM, González J, Aguayo M, Torrejón F, Montalva G & Eguibar-Galán MA (2019) "A paleo-hydro-geomorphological perspective on urban flood risk assessment". Hydrological Processes. 33:3169–3183. DOI: 10.1002/hyp.13590

López, P. (2013). Evaluación de peligrosidad por proceso de remoción en masa en los cerros de la Unión y Zaror. Comuna de Talcahuano, Región del Biobío (Chile). Revista Geográfica Del Sur, 4(6), 59–83.

Luzio L., Walter. Casanova Pinto, Manuel Antonio. Seguel Seguel, Óscar Rodrigo. Universidad de Chile. 2010. Suelos de Chile. Maval. https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/21767.

Major Industrial Accidents Council of Canada, MIACC, (1995) Risk-Based Land Use Planning Guidelines. Canada.

Makuleke, P. y Ngole-Jeme, VM (2020). Soil Heavy Metal Distribution with Depth around a Closed Landfill and Their Uptake by Datura stramonium. Applied and Environmental Soil Science 2020 (1), 8872475.

Martínez et al., 2016. "Crecimiento Urbano Sobre Geoformas Costeras De La Llanura De San Pedro, Área Metropolitana De Concepción." En Las Costas Del Neoliberalismo: 287–312.

Martínez, C., Briceño, I. 2022. La erosión costera en Chile: Problemas actuales y desafíos futuros. En: Martínez, C., Cienfuegos, R., Barragán, J., Navarrete, S., Hidalgo, R., Arenas, F., Fuentes, L. (editores). 2022. Hacia una Ley de Costas en Chile: bases para una Gestión integrada de Áreas Litorales. Pp. 177-204. Serie GEOLIBRO, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago. 560 pp.

Masselink, G., Castelle, B., Scott, T., Dodet, G., Suanez, S., Jackson, D., Floc'h, F. 2015. Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the Atlantic coast of Europe. Geophysical Research Letters, 10.1002/2015GL067492.

McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. (1993) The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, 17-22 January 1993, 179-184.

Mendoza, J. 2001. Distribución, caracterización, génesis y características tectónicas de los yacimientos de arenas silicias del área costera de la octava región entre Coliumo y Los

Álamos", Tesis para optar al título de Geólogo UDEC.

MIDEPLAN-BID (1997). Residuos sólidos Estudios y planes de manejo

Ministerio de Medio Ambiente, MMA (2015) Guía metodológica de evaluación de riesgo ambiental del uso de sustancias químicas en actividades económicas de producción y servicios. Primera edición, Santiago, Chile.

Ministerio de Medio Ambiente, MMA (2022) Guía de Evaluación Ambiental Estratégica para incorporar el cambio climático en los instrumentos de Ordenamiento y Planificación Territorial. Primera edición, Santiago, Chile.

Ministerio de Obras Públicas, MOP (2017) Plan de adaptación y mitigación de los servicios de infraestructura al cambio climático. Santiago, Chile.

Ministerio de Transporte de Canadá (TC), el Departamento de Transporte de los Estados Unidos (DOT), la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México (SCT), y la cooperación del Centro de Información Química para Emergencias (CIQUIME) de Argentina. (2024) Guía de Respuesta en caso de Emergencias (GRE).

Ministerio del Medio Ambiente. 2019. 4 "Determinación Del Riesgo de Los Impactos Del Cambio Climático En Las Costas de Chile." eds. C.; Mora Winckler, P.; Contreras-López, M.; Vicuña, S.; Larraguibel, O.; J.; Esparza, C.; Salcedo, J.; Gelcich, S.; Fariña, J. M.; Martínez, C.; Agredano, R.; Melo, and A Bambach, N.; Morales, D., Marinkovic, C.; Pica. Santiago, Chile.

MINVU (2012) Imágenes digitales y cartografía Base para el área metropolitana de Concepción. Concepción.

Miranda, A., Mentler, R., Moletto-Lobos, Í., Alfaro, G., Aliaga, L., Balbontín, D., Barraza, M., Baumbach, S., Calderón, P., Cárdenas, F., Castillo, I., Contreras, G., de la Barra, F., Galleguillos, M., González, M. E., Hormazábal, C., Lara, A., Mancilla, I., Muñoz, F., Oyarce, C., Pantoja, F., Ramírez, R., and Urrutia, V.: The Landscape Fire Scars Database: mapping historical burned area and fire severity in Chile, Earth Syst. Sci. Data, 14, 3599–3613, https://doi.org/10.5194/essd-14-3599-2022, 2022.

Moharrami, M., Naboureh, A., Gudiyangada Nachappa, T., Ghorbanzadeh, O., Guan, X., & Blaschke, T. (2020). National-scale landslide susceptibility mapping in Austria using fuzzy best-worst multi-criteria decision-making. ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(6), 393.

Nath, N.K., Gautam, V.K., Pande, C.B. et al. Development of landslide susceptibility maps of Tripura, India using GIS and analytical hierarchy process (AHP). Environ Sci Pollut Res 31, 7481–7497 (2024). https://doi.org/10.1007/s11356-023-31486-5.

National Highway Institute (U.S.), 1996, "Highway routing of hazardous materials: guidelines for applying criteria,"

Nnaji, C.C.; Utsev, J.T. (2012). Climate change and waste management: a balanced assessment. Journal of Sustainable Development in Africa. 13(7). 17-34 ISSN: 1520-5509

Organización Mundial de la Salud, OMS (2019). Emisiones de sustancias químicas causadas por eventos de peligros y desastres naturales. Ginebra: Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Pedraza, J. (1996). Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones. (1ª. Ed.). Madrid, España. Editorial Rueda. 414 p.

Pineda, V. 1983. Evolución paleogeográfica de la Península de Arauco durante el Cretácico superior-Terciario. Memoria para optar al título de Geólogo. Depto. De Geología y Geofísica, Fac. de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, PNUMA (2015). Manual para la Concientización y Preparación para Emergencias a Nivel Local, Segunda edición.

Propp, VR, De Silva, AO, Spencer, C., Brown, SJ, Catingan, SD, Smith, JE y Roy, JW (2021). Organic contaminants of emerging concern in leachate of historic municipal landfills. Environmental Pollution, 276, 116474.

Ramírez, C. 2017. Análisis geomorfológico y Sedimentológico de la planicie Costera del golfo de Arauco y su Relación con procesos tectónicos del holoceno. Departamento Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción. Tesis para optar al título de geólogo.

Rangel-Buitrago, N., Anfuso, G., Williams, A. 2016. Coastal erosion problems along the Caribbean Coast of Colombia. Ocean & Coastal Management, 114: 120-144.

Rezaeisabzevar, Y.; Bazargan A.; Zohourian B. (2020) Landfill site selection using multi criteria decision making: Influential factors for comparing locations. Journal of Environmental Sciences. 93, 170–184.

Rigillo, M., M. Iacoviello, F. Canonic, and G. Milite. (2007). "Model Strategy For Redevelopment Of Closed Landfill." xi International Waste Management and Landfill Symposium.Sardinia, Italy.1-5 October.

Roe, P. L. (1986). Discrete models for the numerical analysis of timedependent multidimensional gas dynamics. Journal of Computational Physics, 63(2), 458–476. https://doi.org/10.1016/0021-9991(86)90204-4.

Saaty TL (2008) Decision making with the analytic hierarchy process. Int J Serv Sci 1:83–98.

Saavedra-Meléndez, V. F. (2017). Gestión de residuos y segregación urbana: Villa estaciones ferroviarias de Puente Alto, Santiago de Chile (1985-2015). Urbano, 42-53.

Saboya, F.; da Glória Alves, M.; Pinto, W.D. Assessment of failure susceptibility of soil slopes using fuzzy logic. Eng. Geol. 2006,86, 211–224. https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013795206001475.

SEA (2024) EIA Centro Manejo de Residuos Concepción: Capítulo 1: Descripción del Proyecto, Sistema de Evaluación Impacto Ambiental, https://seia.sea.gob.cl/expediente/ficha/fichaPrincipal.php?modo=normal&id_expediente=6278 ("recuperado 1 de junio 2024).

SEA (2024) EIA Continuidad Operacional Centro de Manejo de Residuos Concepción: Capitulo 1: Descripción Proyecto, Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental https://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=2153787305 (" recuperado 1 de junio 2024).

Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo Región del Biobío, MINVU (2017) Memoria Explicativa Modificación Plan Regulador Metropolitano de Concepción

SEREMI de Salud Región del Biobío, (2024). Registro Industrias SUSPEL.

SEREMI SALUD (2023) Informe Programa de Residuos.

Servicio de Evaluación Ambiental, SEA (2017) Guía para la descripción de la acción del transporte terrestre en el SEIA. Primera edición, Santiago, Chile.

Servicio de Evaluación Ambiental, SEA (2023) Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA. Primera edición, Santiago, Chile.

Servicio Nacional de Geología y Minería (2002). Mapa Geológico de Chile. Servicio Nacional de Geología y Volcanismo, escala 1:1.000.000.

Short A. 1999. Handbook of Beach and Shoreface Morphodinamics. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, England. 379 pp.

Silva, L. D. J. (2023) Remociones en masa en ciudades costeras de Chile Central bajo eventos de precipitación y dinámica sísmica. Tesis doctoral, Universidad de Concepción.

Simangunsong, T.L. y Salami, I.R.S. (2024). Environmental risk assessment of landfill. En E3S

Web de Conferencias (Vol. 495, p. 03009). Ciencias EDP.

Simmons, E. (1999). "Restoration of Landfill Sites for Ecological Diversity." Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy 17: 511–519.

SMA (2017) Superintendencia Medio Ambiente, Formulación de Cargo que indica a CEMARC S.A, Res. EX N°1 ROL D-086-2017.

SNIFA (2024) Expediente DFZ-2021-596-VIII-RCA Relleno Sanitario Copiulemu Florida Region Bio Bio. Sistema Nacional de Fiscalización Ambiental https://snifa.sma.gob.cl/Fiscalizacion/Ficha/1049860 ("recuperado 6 de junio 2024).

SUBDERE (2024) "Diagnostico y Catastro Regional de Residuos Domiciliarios Región del Biobio" https://proactiva.subdere.gov.cl/handle/123456789/635 ("recuperado 1 junio 2024").

Tesfa C, Woldearegay K (2021) Characteristics and susceptibility zonation of landslides in Wabe Shebelle Gorge, south eastern Ethiopia. J Afr Earth Sc 182:104275.

Thieler, E Robert, Emily A Himmelstoss, Jessica L Zichichi, and Ayhan Ergul. 2009. Open-File Report The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 - An ArcGIS Extension for Calculating Shoreline Change. Reston, VA.

Tume, P., Cornejo, Ó., Rubio, C., Sepúlveda, B., Roca, N., & Bech, J. (2023). Analysis and Evaluation of Concentrations of Potentially Toxic Elements in Landfills in the Araucanía Region,Chile. Minerals, 13(8), 1033. Universidad de Chile, pp 19.

Vivanco E. (2023) Disposición final de residuos sólidos: Rellenos sanitarios, vertederos y basurales Asesoría Técnica Parlamentaria BCN N° SUP: 137824 https://atp.bcn.cl.

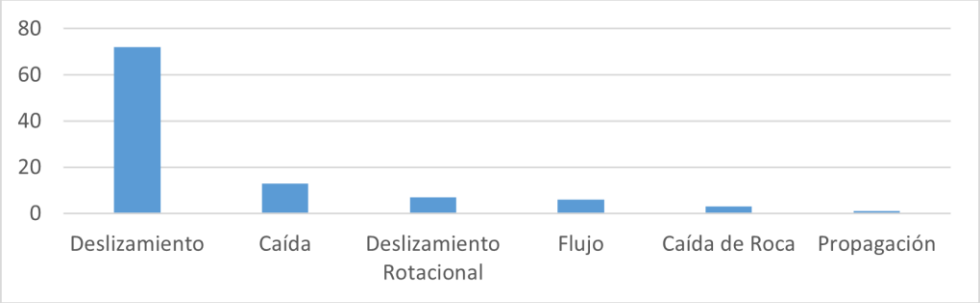
6. ANEXOS

Anexo 1. Ponderación de los Indicadores de Susceptibilidad.

INDICADOR	PESO MODELO	NIVEL	CODIGO	RANGOS	Author	SUPERFICIE EN HA	PORCENTAJE
Exclusión				**0-5°**	Adaptado de Tesfa (2022), Pedraza (1996) y Atlas de Riesgo San Pedro de la Paz (2018)		23,3
Pendiente	40	Poco Significativo	1	5 - 10°		90011,51563	26,0
		Moderado	2	10 - 20°		135031,4219	39,0
		Alto	3	20 - 25		25996,51563	7,5
		Muy Alto	4	> 25 °		14640,25	4,2
Orientación	9	Poco Significativo	1	S	López (2013)	36671,95313	10,6
		Moderado	2	E - SE - O - SO		168755,4375	48,7
		Alto	3	NE - NO		85206,95313	24,6
		Muy Alto	4	N		40315,15625	11,6
Serie de Suelo	16	Poco Significativo	1	PRR - ARN- NR - URB -DU	Estudio de Suelos de Secano VIII Region (1992)	23532,64063	6,8
		Moderado	2	NA		38317,9375	11,1
		Alto	3	KT - CPE		82303,53125	23,7
		Muy Alto	4	CQN - ET		201828,25	58,2
Cobertura de Suelo	12	Poco Significativo	1	Bosque Nativo - Cuerpos de Agua - Vegetación de Humedal	Criterio Experto equipo Incendios Forestales	36930,46875	10,7
		Moderado	2	Area Agticola -Matorral Quemado - Area Agricola Quemada - Matorral esclerofilo - Matorral aromo - Matorral aromo - Matorral quila - Matorral siempreverde - Plantacion con exoticas asilvestradas		64709,04688	18,7
		Alto	3	Bosque Nativo Quemado - Area Urbana		32441,98438	9,4
		Muy Alto	4	Pradera - Plantacion adulta Eucalyptus globulus - Plantacion adulta Eucalyptus nitens - Plantacion adulta Acacia melanoxylon - Plantacion adulta Pinus radiata -Plantacion joven Eucalyptus globulus - Plantacion joven Pinus radiata - Suelo Descubierto Agricola -Suelo		213200	61,5
Geología	12	Poco Significativo	1	Q1 - Qf - Qm	Criterio Experto, Inventario Remociones.	34658,51563	10,0
		Moderado	2	Pz4a - Pz4b - CPg - Jig		265881,9688	76,7
		Alto	3	Ks1m - P1m - Tr1c		36090,79688	10,4
		Muy Alto	4	E1c - PE1		9693,984375	2,8
Distancia a Caminos	8	Poco Significativo	1	> 750	El Jazouli et al. (2019)	151336	43,7
		Moderado	2	750 - 500		49986,82813	14,4
		Alto	3	500 - 250		64069,51563	18,5
		Muy Alto	4	< 250		81192,57813	23,4
Distancia a Fallas	3	Poco Significativo	1	> 4500	Moharrami et al. (2020)	232649,6875	67,1
		Moderado	2	4500 - 3000		35938,75	10,4
		Alto	3	3000 - 1500		39793,53125	11,5
		Muy Alto	4	< 1500		38202,95313	11,0

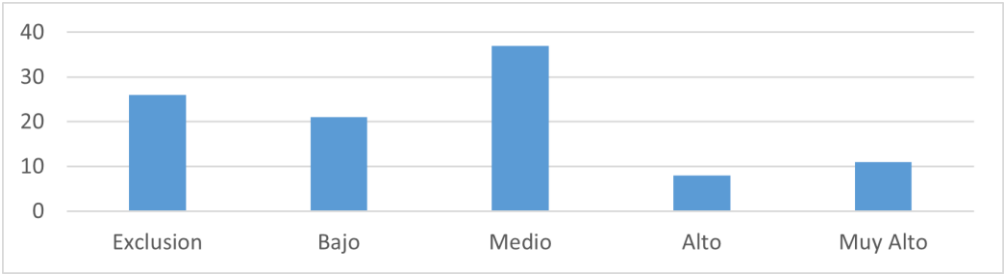
Anexo 2. Tipos de Procesos de Remociones.

Tipo de Proceso	
Deslizamiento	72
Caída	13
Deslizamiento Rotacional	7
Flujo	6
Caída de Roca	3
Propagación	1
Total	102



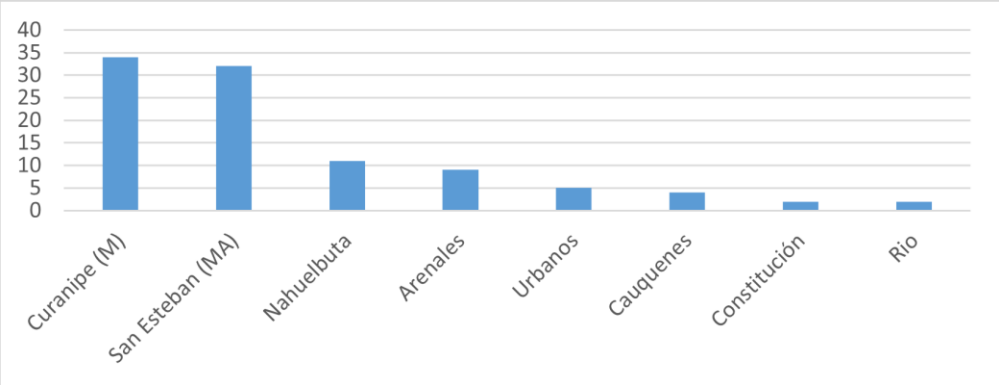
Anexo 3. Distribución de los eventos por Pendiente.

Pendiente	
Exclusión	25
Bajo	21
Medio	37
Alto	8
Muy Alto	11
Total	102



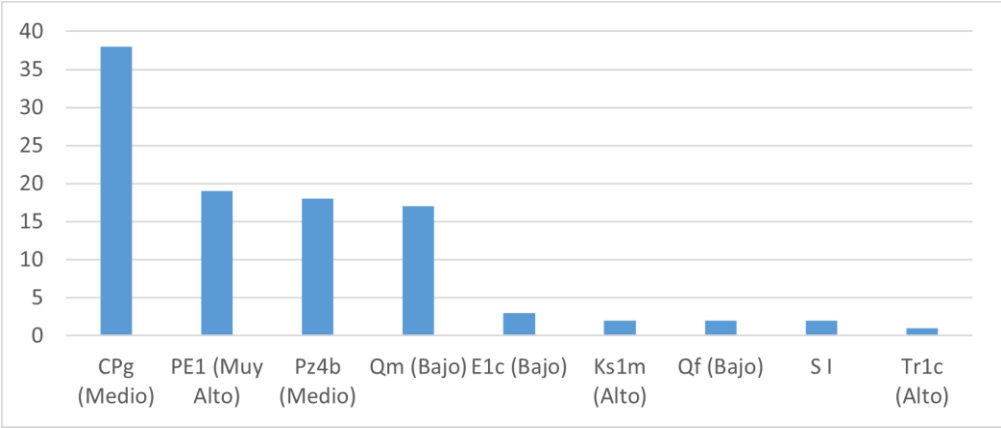
Anexo 4. Distribución de los eventos por Serie de Suelo.

Serie de Suelo	
Curanipe (M)	34
San Esteban (MA)	32
Nahuelbuta	11
Arenales	9
Urbanos	5
Cauquenes	4
Constitución	2
Rio	2
Total	99



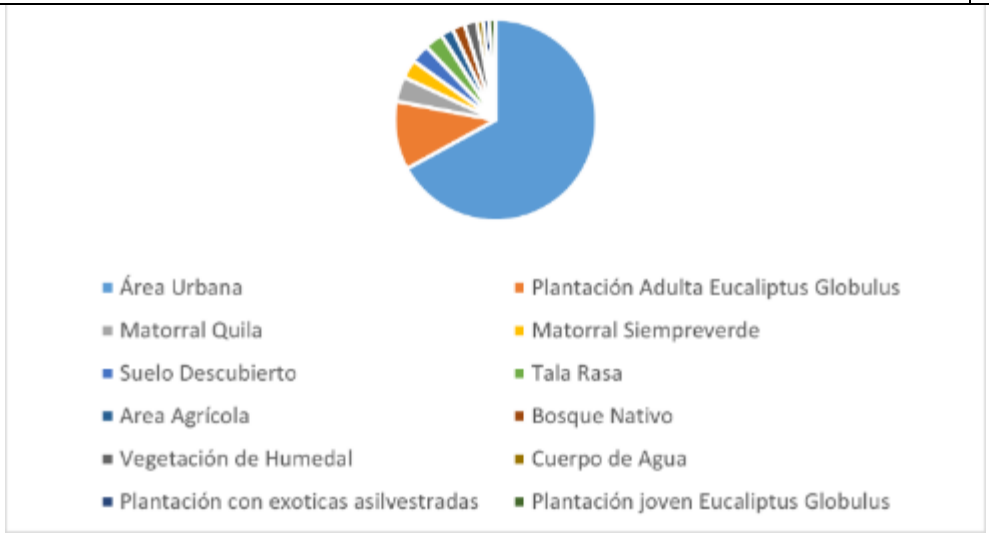
Anexo 5. Distribución de los eventos por Geología.

Geología	
CPg (Medio)	38
PE1 (Muy Alto)	19
Pz4b (Medio)	18
Qm (Bajo)	17
E1c (Bajo)	3
Ks1m (Alto)	2
Qf (Bajo)	2
S I	2
Tr1c (Alto)	1
Total	102



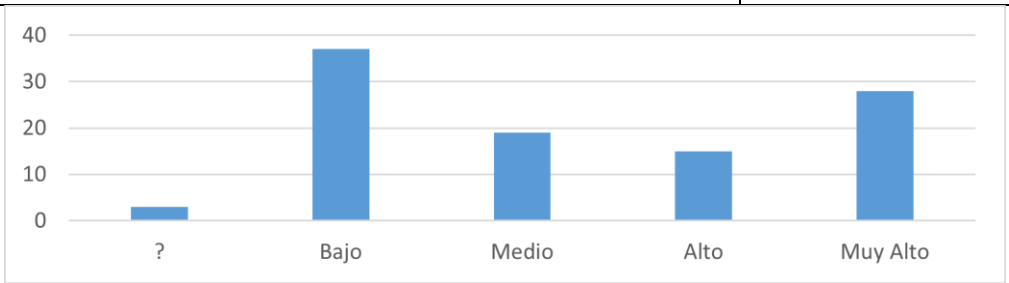
Anexo 6. Distribución de los eventos por Cobertura de Suelo.

Cobertura	
Área Urbana	67
Plantación Adulta Eucaliptus Globulus	11
Matorral Quila	4
Matorral Siempreverde	3
Suelo Descubierto	3
Tala Rasa	3
Área Agrícola	2
Bosque Nativo	2
Vegetación de Humedal	2
Cuerpo de Agua	1
Plantación con exóticas asilvestradas	1
Plantación joven Eucaliptus Globulus	1
Total	100



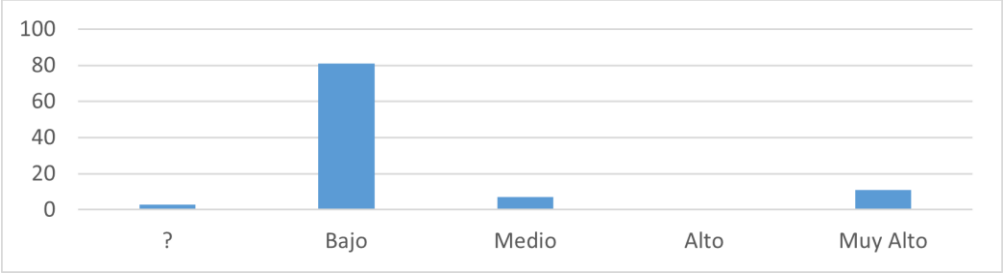
Anexo 7. Distribución de los eventos por Distancia de Caminos.

Caminos	
?	3
Bajo	37
Medio	19
Alto	15
Muy Alto	28
Total	102

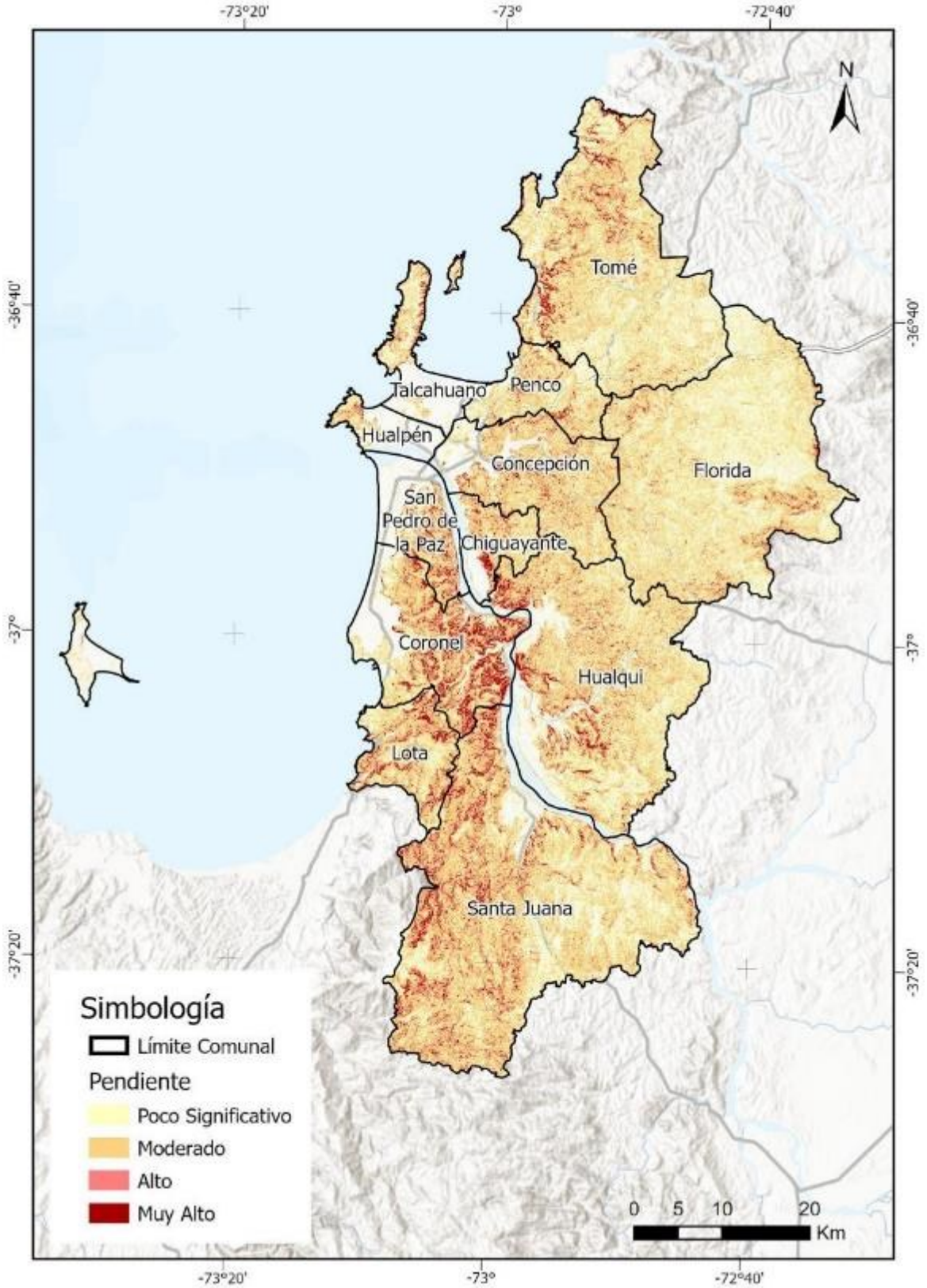


Anexo 8. Distribución de los eventos por Distancia de Fallas.

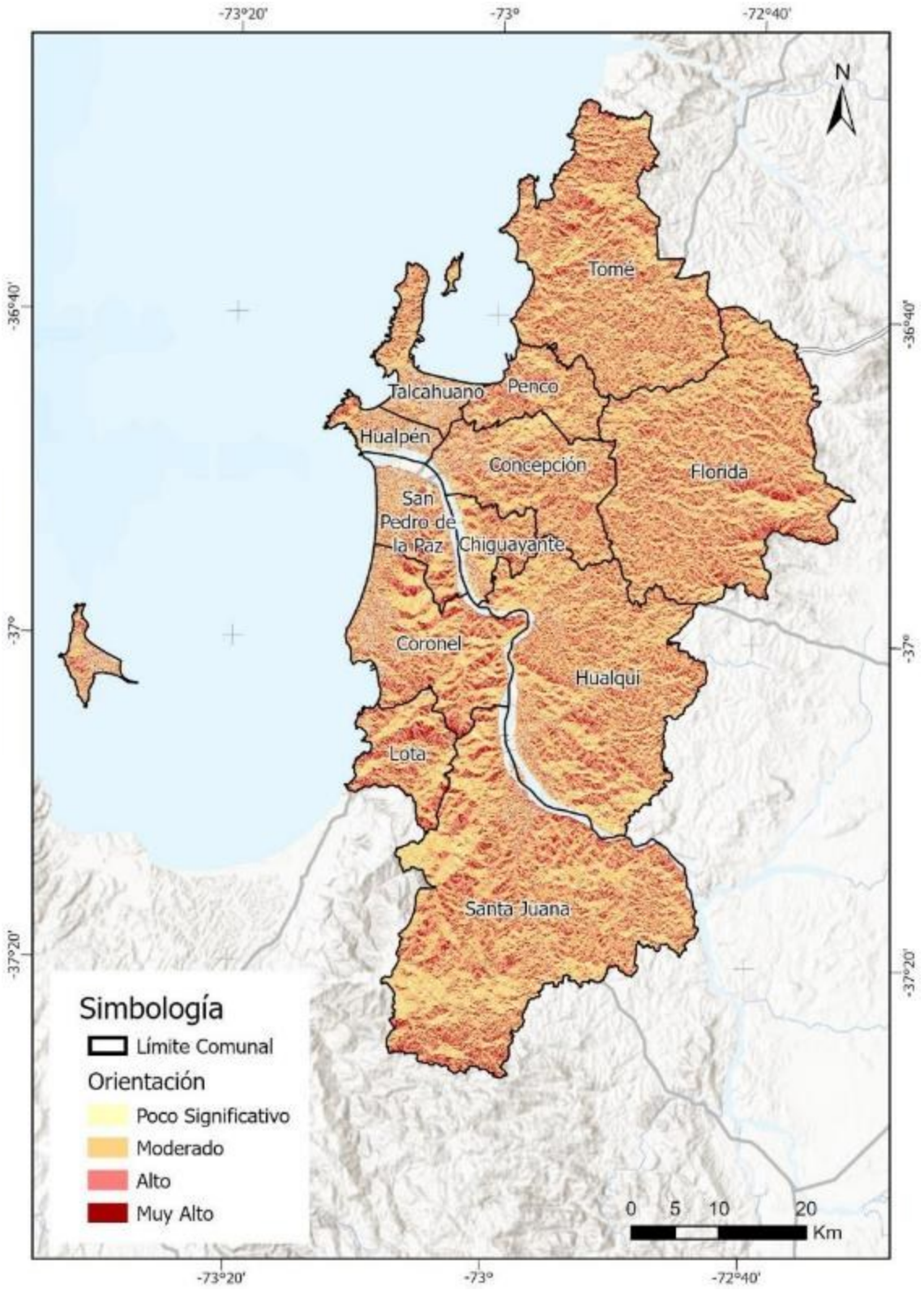
Fallas	
?	3
Bajo	81
Medio	7
Alto	0
Muy Alto	11
Total	102



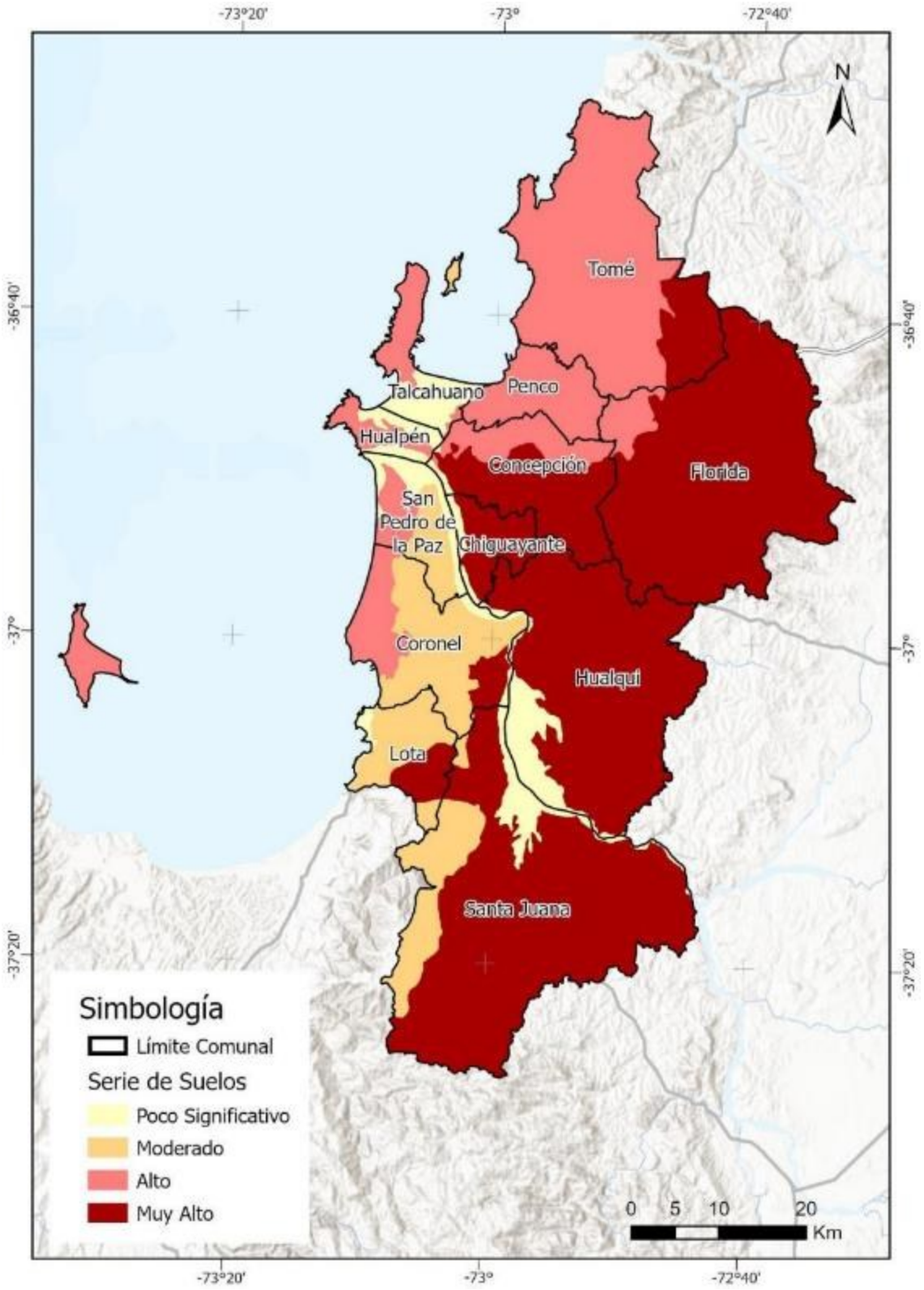
Anexo 9. Indicadores de Susceptibilidad Normalizados: Pendiente.



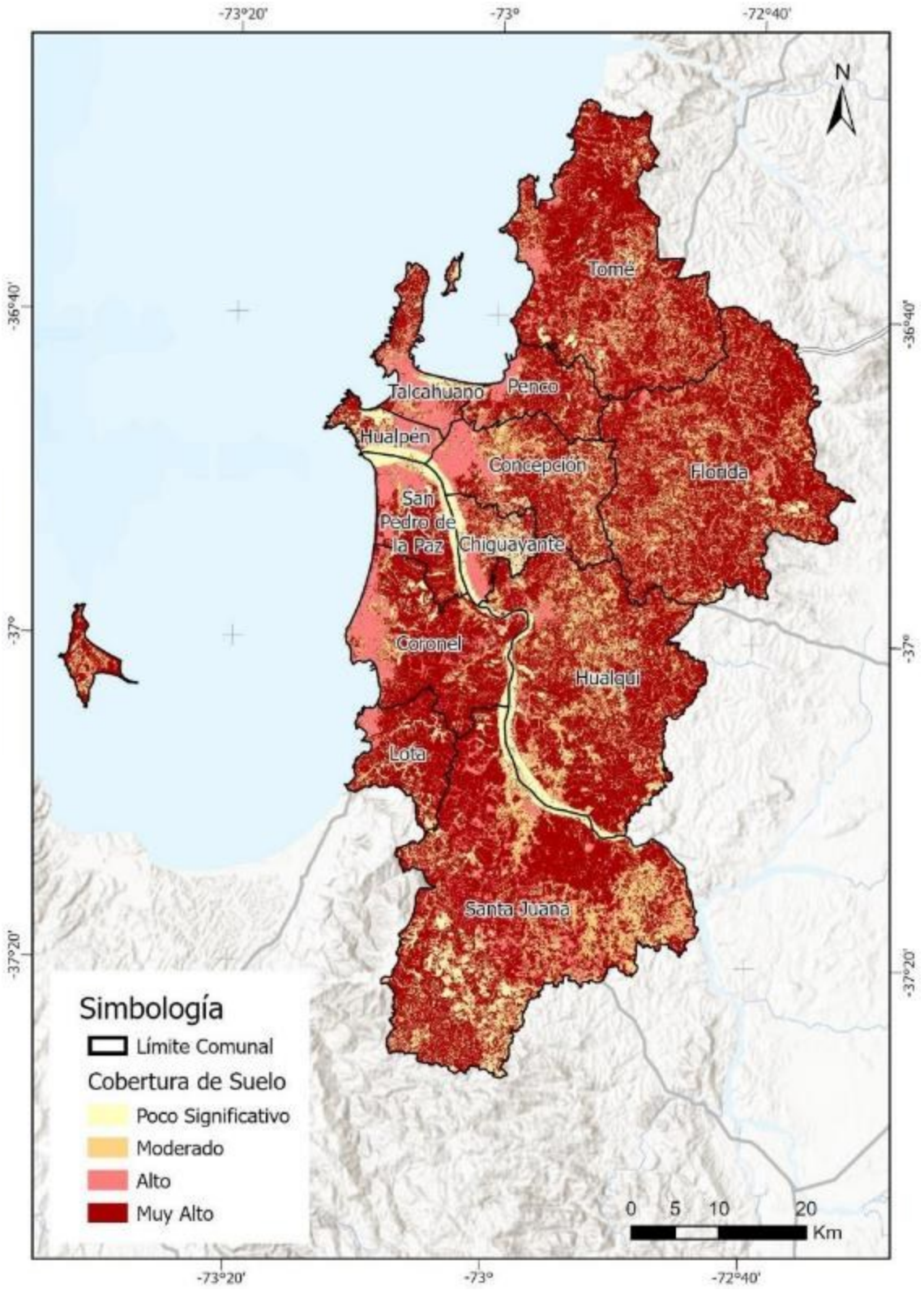
Anexo 10. Indicadores de Susceptibilidad Normalizados: Orientación.



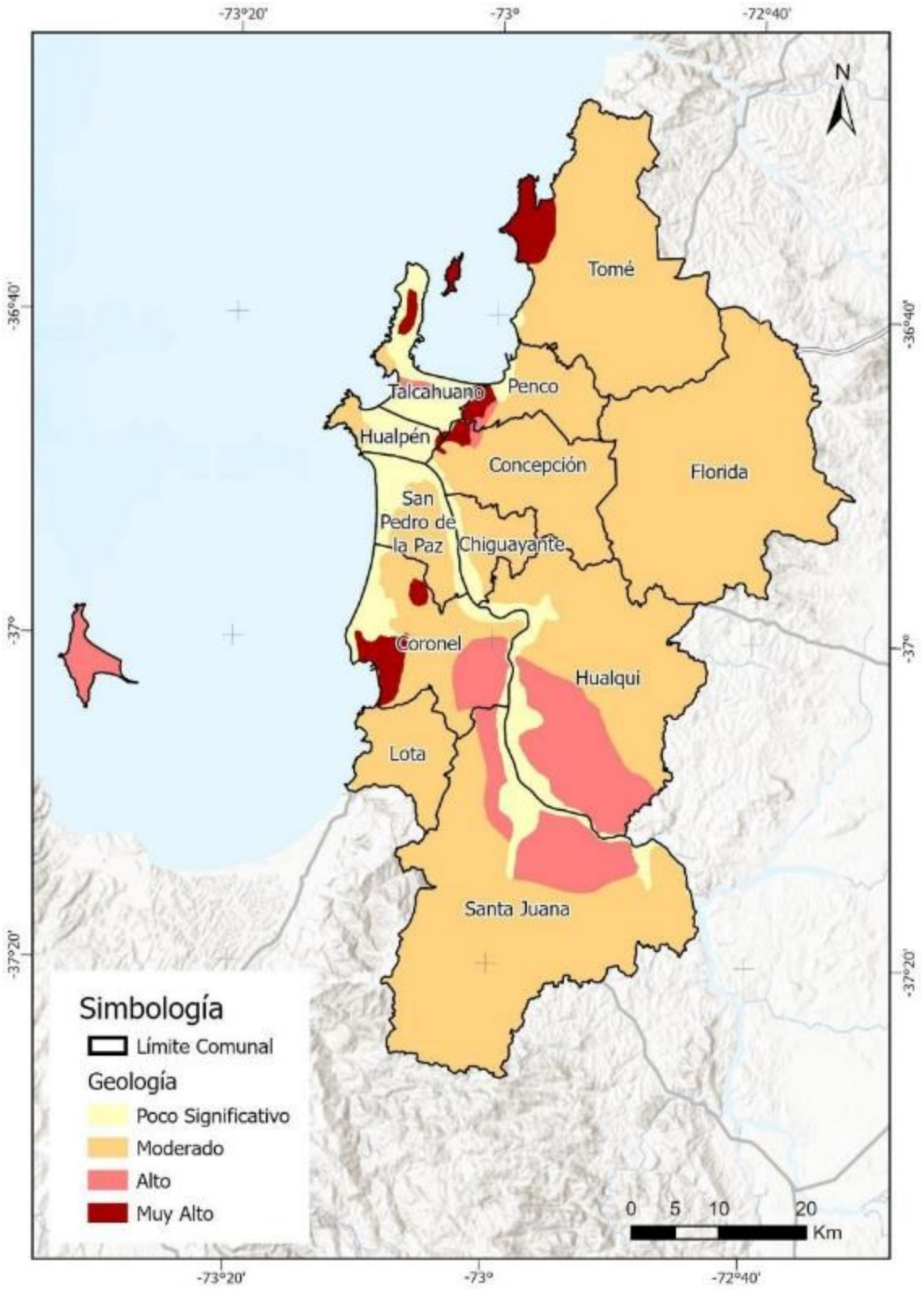
Anexo 11. Indicadores de Susceptibilidad Normalizados: Serie de Suelos.



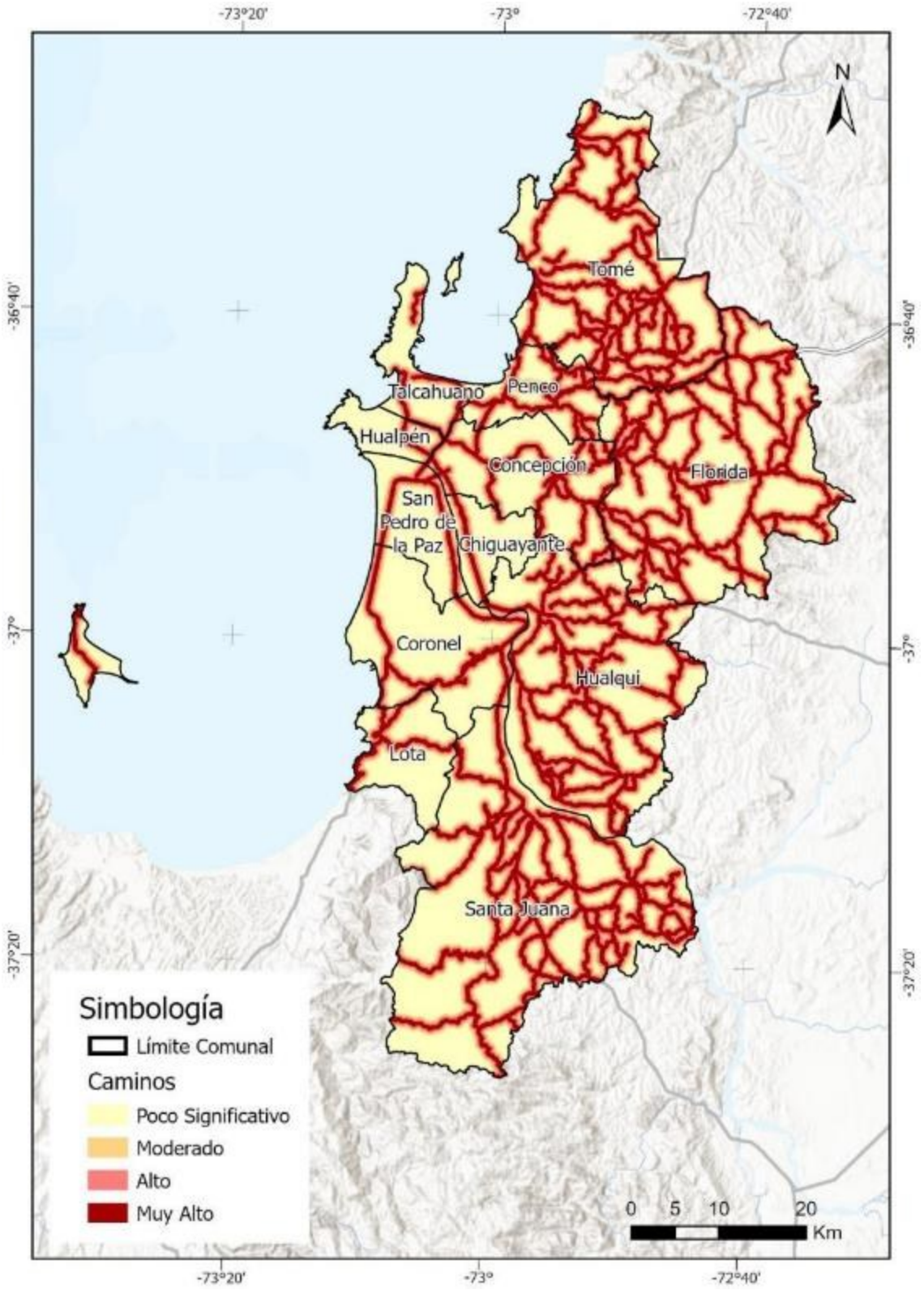
Anexo 12. Indicadores de Susceptibilidad Normalizados: Cobertura de Suelos.



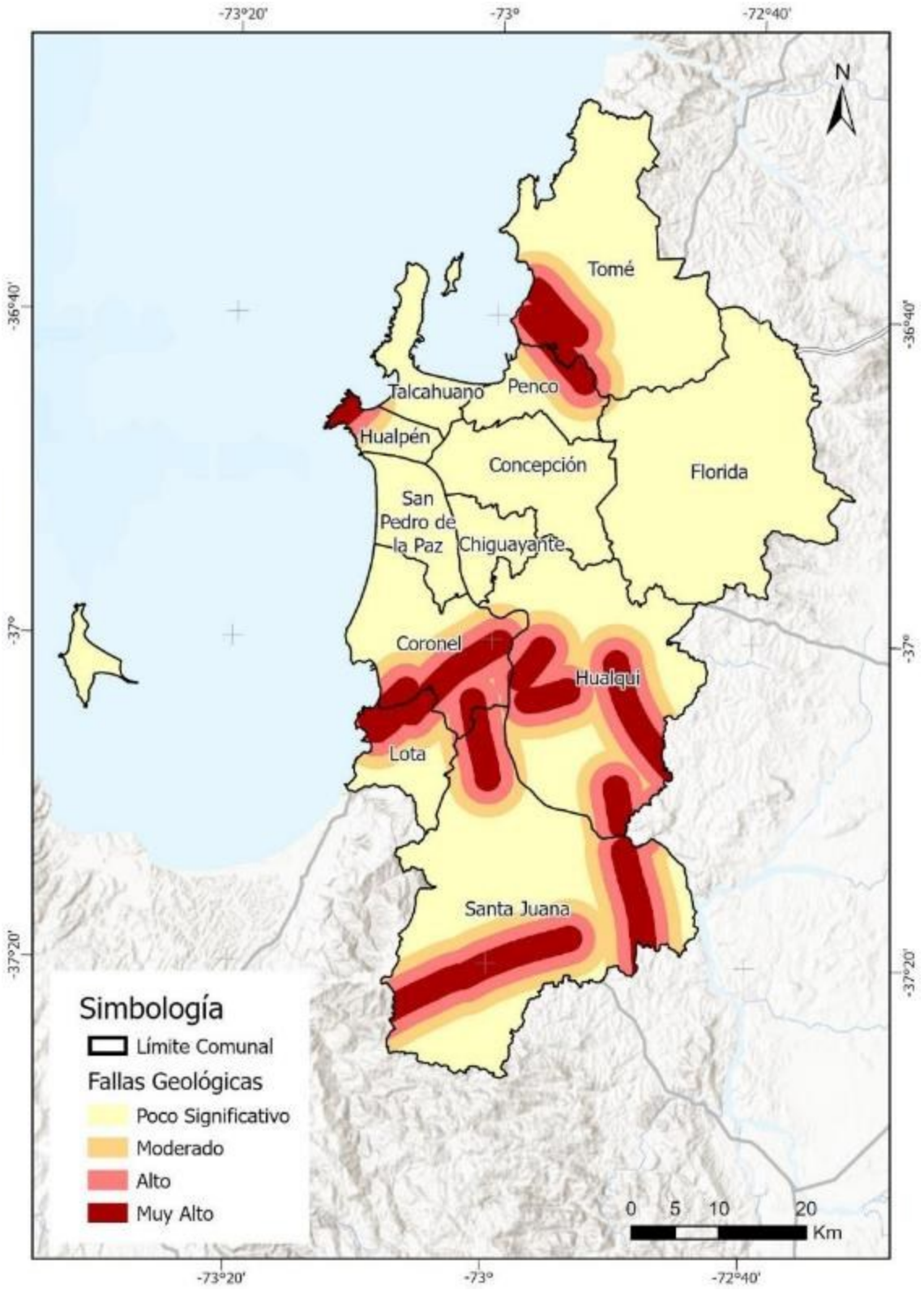
Anexo 13. Indicadores de Susceptibilidad Normalizados: Geología.



Anexo 14. Indicadores de Susceptibilidad Normalizados: Caminos.



Anexo 15. Indicadores de Susceptibilidad Normalizados: Fallas Geológicas.



Anexo 16. Susceptibilidad a Remociones en masa Provincia de Concepción.

Susceptibilidad Remoción		Bajo	1	8702.85938	2.5
		Medio	2	158765.297	45.8
		Alto	3	91944.1563	26.5
		Muy Alto	4	6049.79688	1.7
Chiguayante		Bajo	1	316.533542	4.2
		Medio	2	3204.71284	42.8
		Alto	3	1493.43275	19.9
		Muy Alto	4	89.018362	1.2
Concepción		Bajo	1	515.390625	2.4
		Medio	2	10672.7724	48.7
		Alto	3	6256.90625	28.6
		Muy Alto	4	293.203125	1.3
Coronel		Bajo	1	1104.54621	4.0
		Medio	2	10526.6296	38.0
		Alto	3	6017.34017	21.7
		Muy Alto	4	911.04939	3.3
Florida		Bajo	1	510.009124	0.8
		Medio	2	32855.6025	54.2
		Alto	3	13834.4519	22.8
		Muy Alto	4	239.822654	0.4
Hualqui		Bajo	1	709.622078	1.3
		Medio	2	20613.7438	38.2
		Alto	3	18903.0415	35.0
		Muy Alto	4	1348.6847	2.5
Lota		Bajo	1	721.491762	6.3
		Medio	2	6563.85506	57.4
		Alto	3	2767.84556	24.2
		Muy Alto	4	129.238623	1.1
San Pedro de la Paz		Bajo	1	697.320283	6,3
		Medio	2	3610.94489	32,4
		Alto	3	1295.24416	11,6
		Muy Alto	4	23.125	0,2

Santa Juana		Bajo	1	1498.39463	1.9
		Medio	2	33343.7294	43.0
		Alto	3	28210.1851	36.4
		Muy Alto	4	2179.19125	2.8

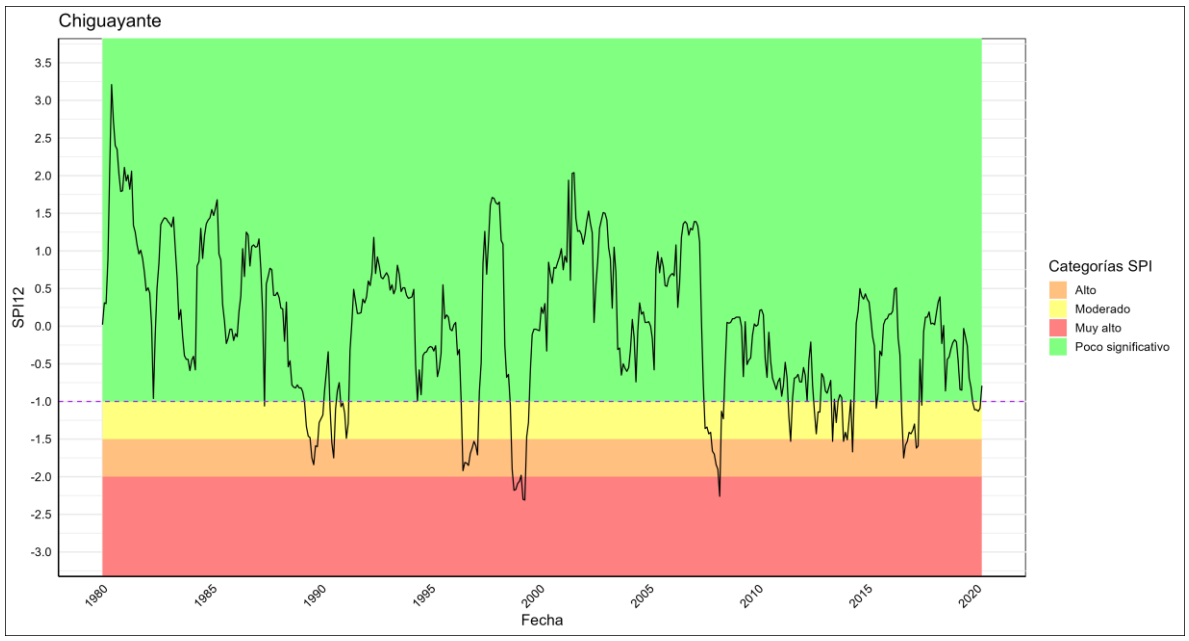
Hualpén		Bajo	1	401.417626	7.6
		Medio	2	1038.64144	19.6
		Alto	3	226.347644	4.3
		Muy Alto	4	15.624741	0.3

Talcahuano		Bajo	1	907.392334	9.9
		Medio	2	2396.15657	26.0
		Alto	3	713.030923	7.7
		Muy Alto	4	25.171875	0.3

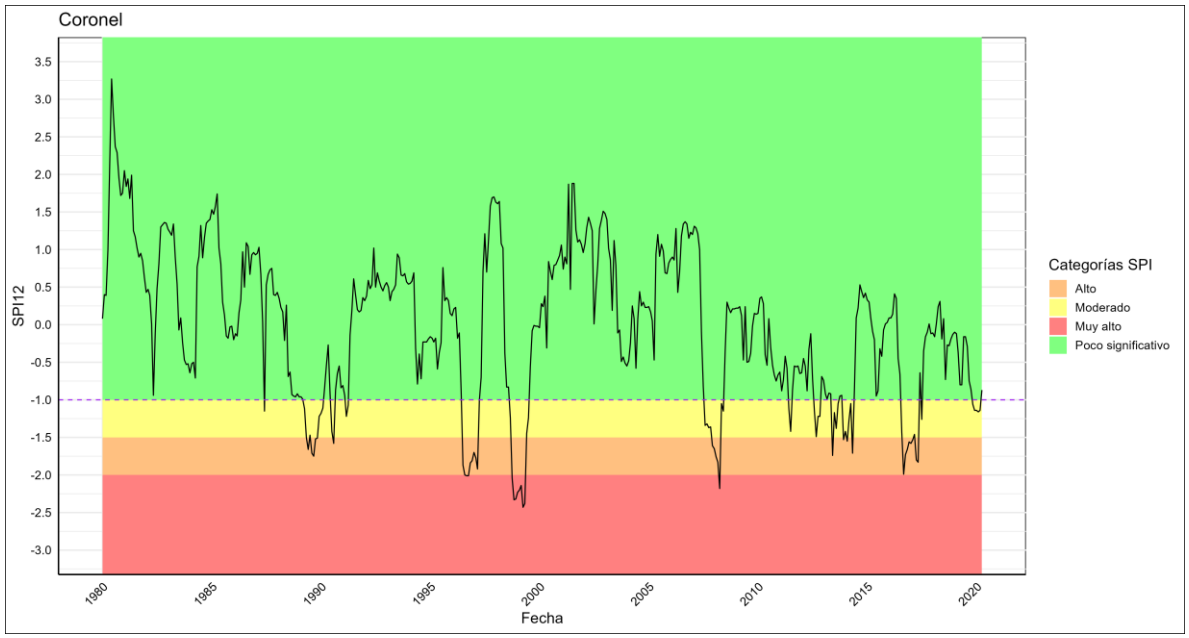
Penco		Bajo	1	269.859713	2.5
		Medio	2	5859.87812	54.5
		Alto	3	2328.7718	21.6
		Muy Alto	4	111.371783	1.0

Tomé		Bajo	1	1060.18923	2.1
		Medio	2	28078.2459	56.8
		Alto	3	10600.6142	21.4
		Muy Alto	4	684.531554	1.4

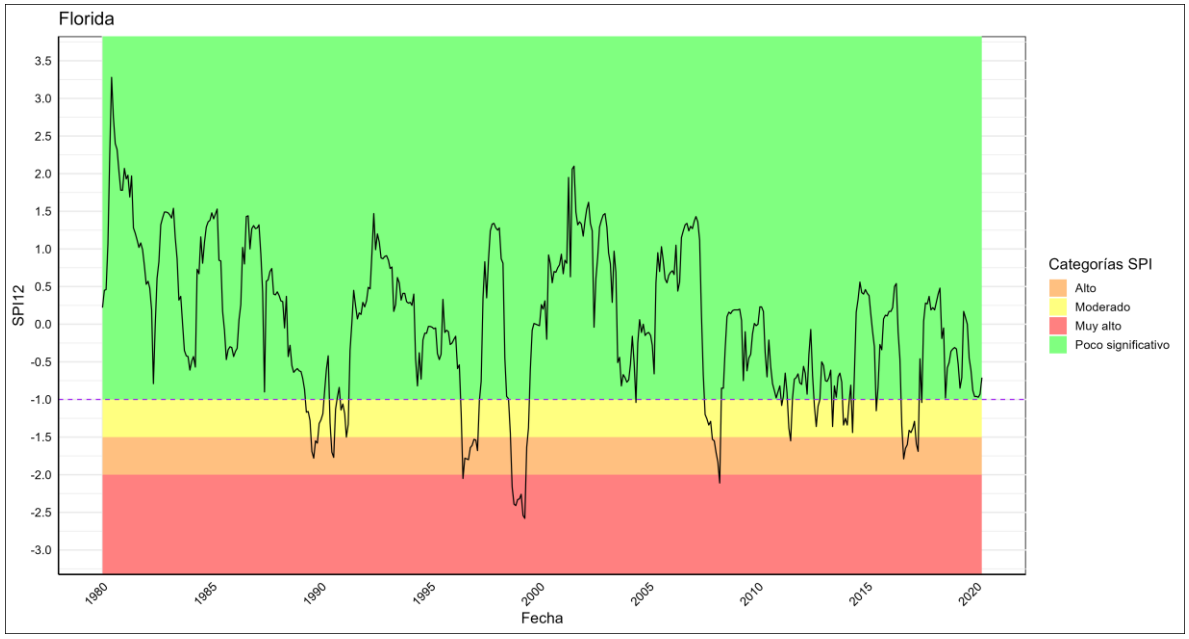
Anexo 17. Valores de SPI para Chiguayante.



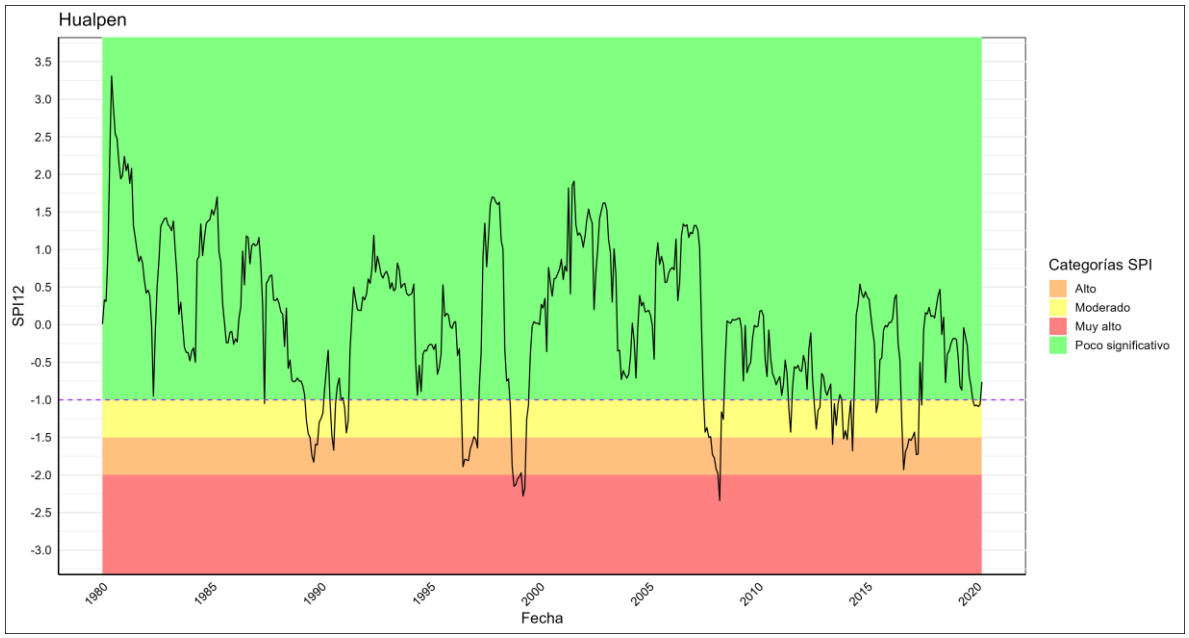
Anexo 18. Valores de SPI para Coronel.



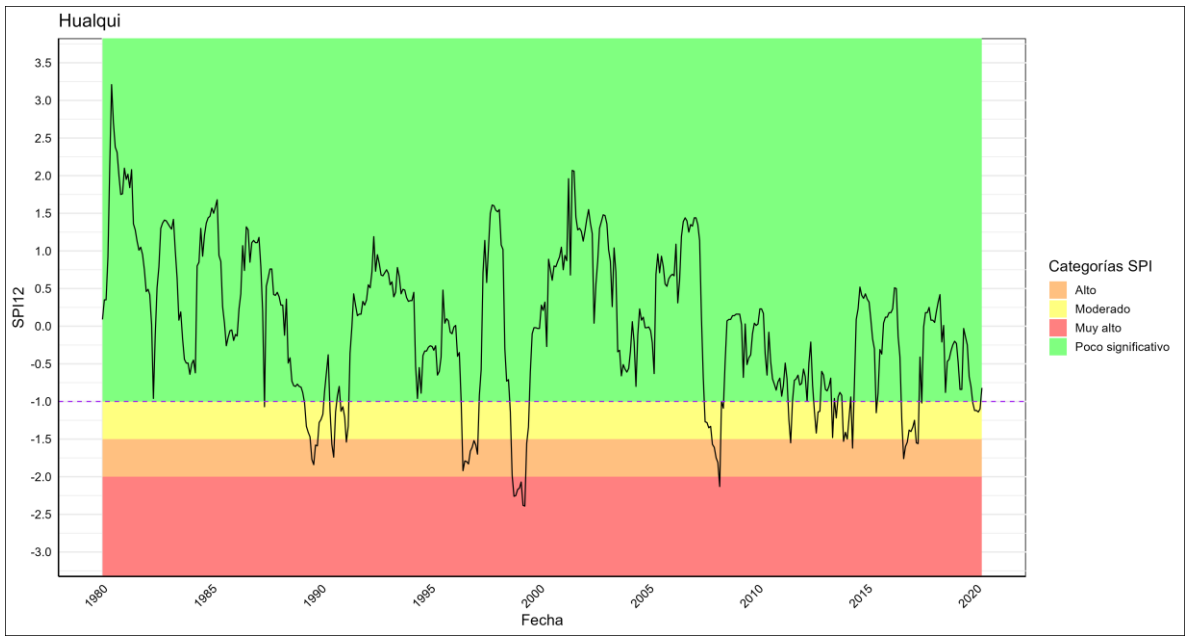
Anexo 19. Valores de SPI para Florida.



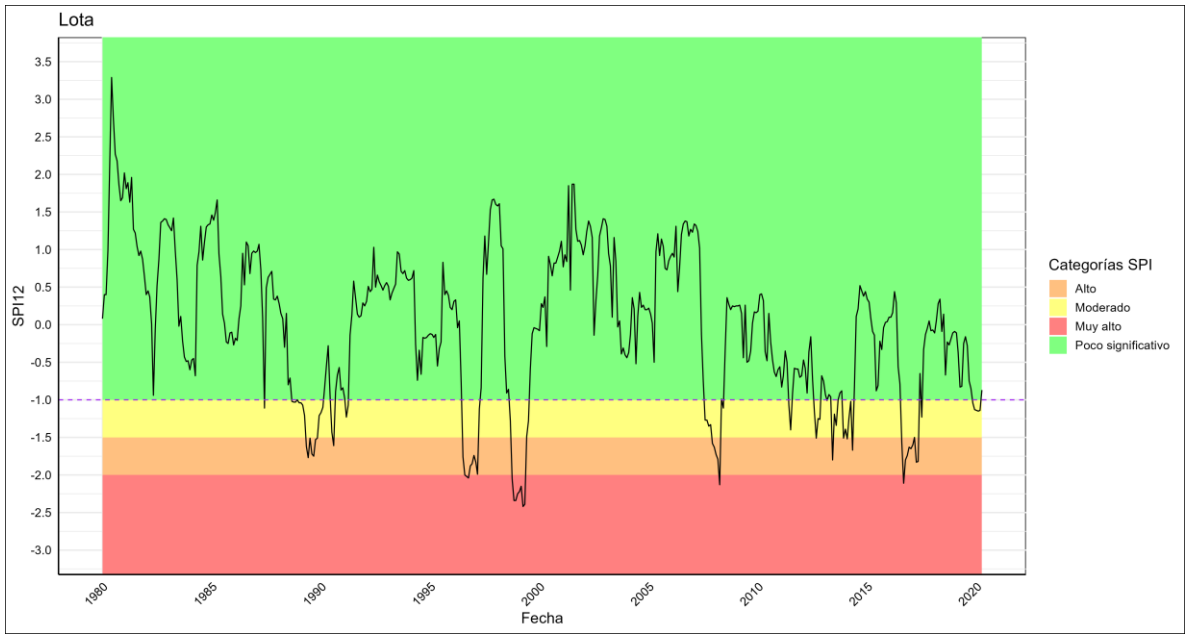
Anexo 20. Valores de SPI para Hualpén.



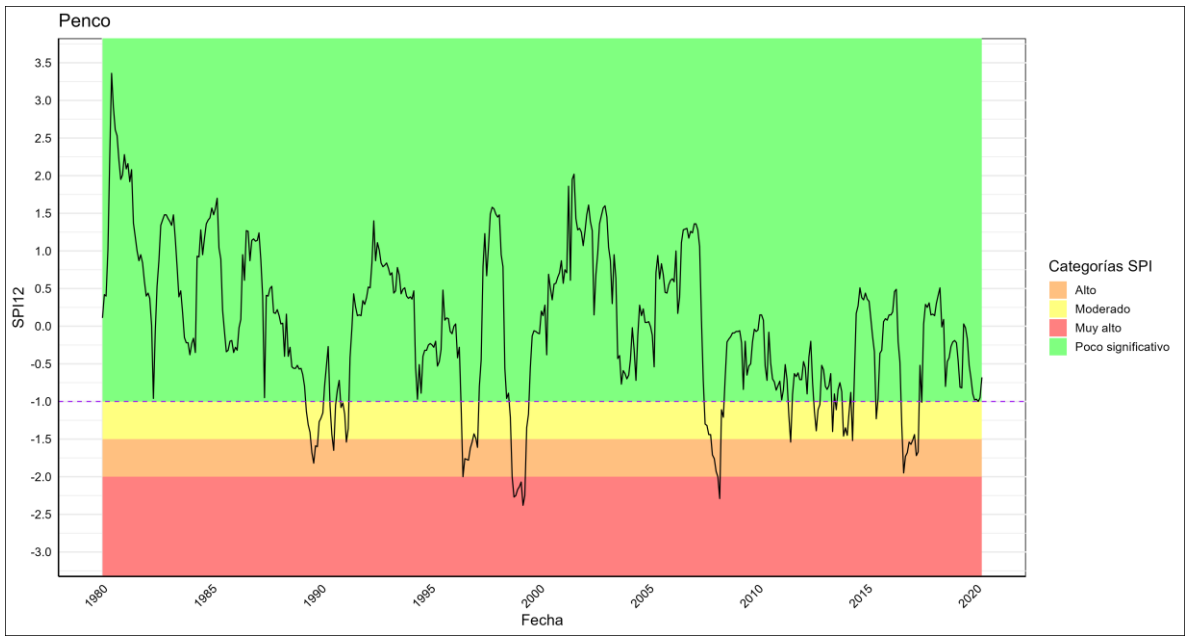
Anexo 21. Valores de SPI para Hualqui.



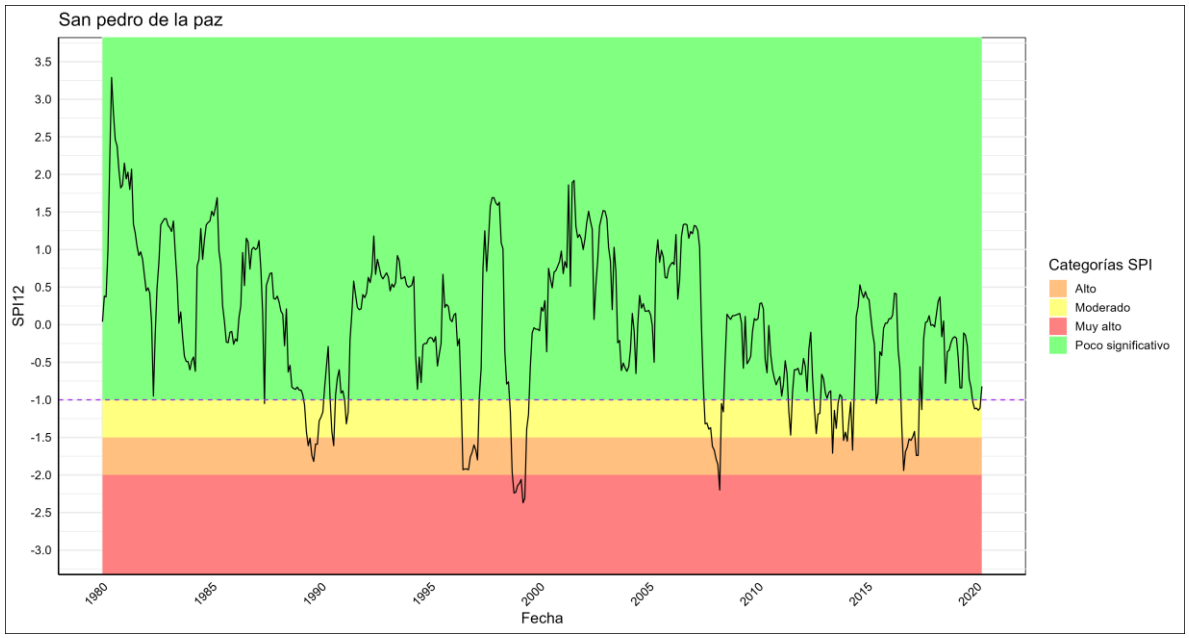
Anexo 22. Valores de SPI para Lota.



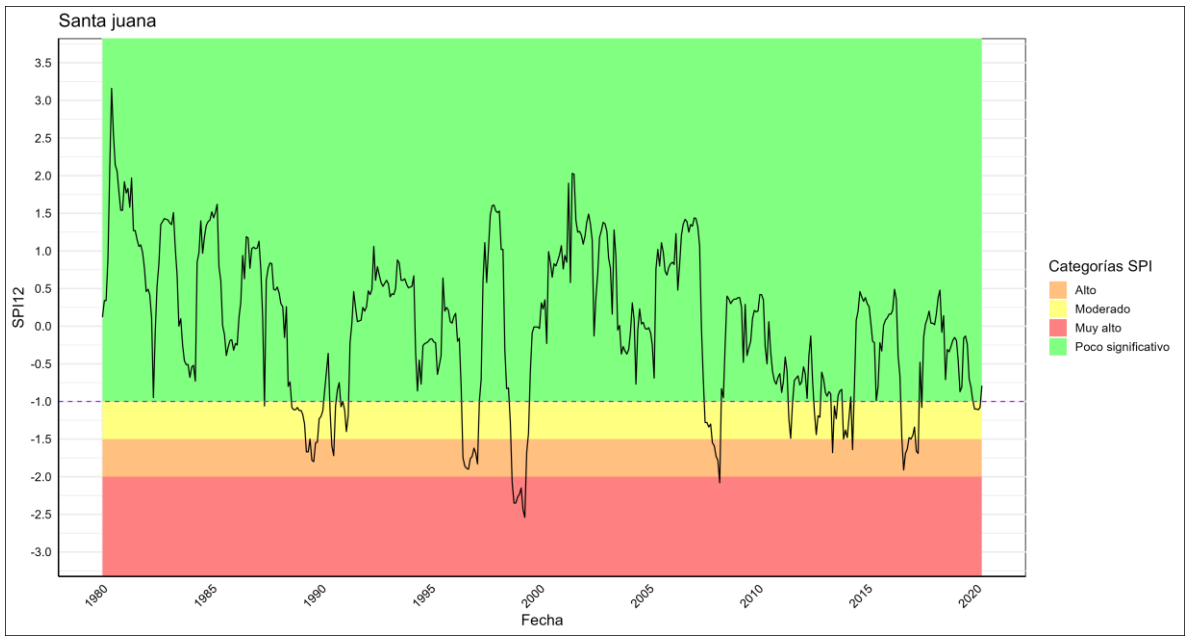
Anexo 23. Valores de SPI para Penco.



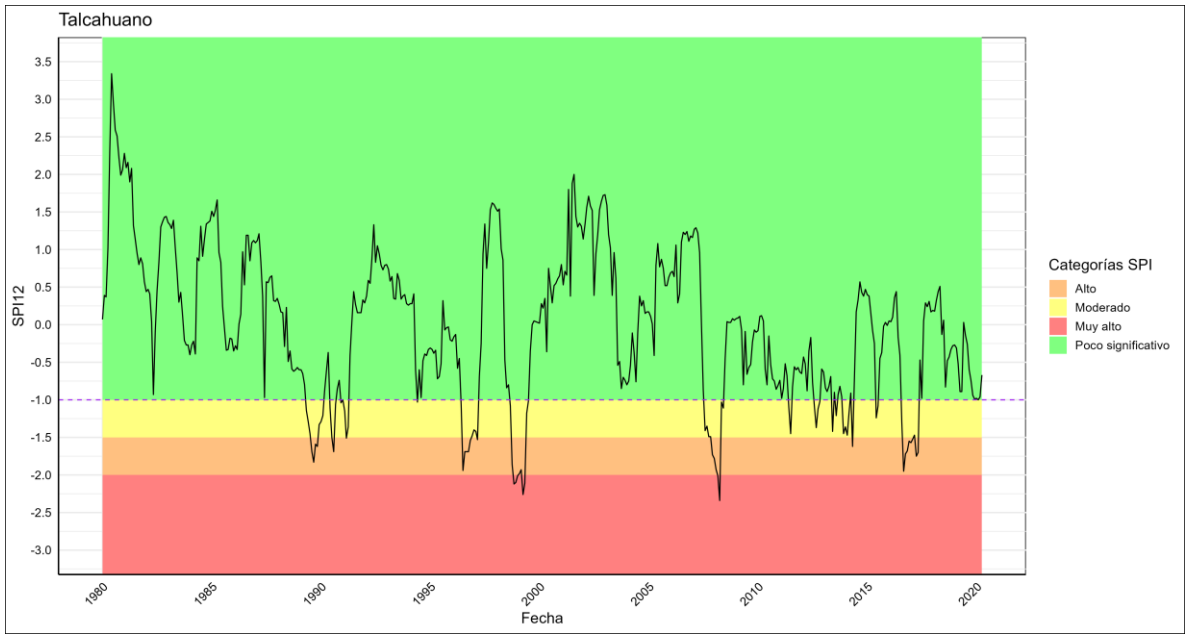
Anexo 24. Valores de SPI para San Pedro de la Paz.



Anexo 25. Valores de SPI para Santa Juana.



Anexo 26. Valores de SPI para Talcahuano.



Anexo 27. Valores de SPI para Tomé.

