

Estimación de la recarga en la **Región de Magallanes** a través del **Modelo WetSpass**

Septiembre 2024



ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN LA REGIÓN DE MAGALLANES A TRAVÉS DEL MODELO WETSPASS

Autores:

WaterWays, Portugal

Preparado por:

Nuno Barreiras, Ingeniero Geólogo; João Palma Nascimento,
Ingeniero de Recursos Hídricos; Francisco Peixoto, Geólogo

Apoyo Técnico en Chile:

Equipo EH2030

- Ulrike Broschek
- Paola Matus
- Valentina Cárdenas

Equipo Centro de Ecología Aplicada

- Manuel Contreras
- Alejandro Aguado
- Javiera Cáceres

Diseño y Diagramación:

Verónica Zurita

Publicación

Septiembre de 2024


ESCENARIOS
HÍDRICOS
2030
CHILE

FCh
FUNDACIÓN CHILE.

Resumen ejecutivo	4
1. Introducción	13
2. Insumos	14
2.1 Enfoque metodológico	14
2.2 Pendiente del terreno	17
2.3 Uso del suelo	20
2.4 Textura del suelo	25
2.5 Precipitación	30
2.6 Temperatura	32
2.7 Evapotranspiración potencial	34
2.8 Velocidad del viento	37
2.9 Profundidad del nivel piezométrico	38
3. Modelo WetSpass	40
3.1 Suposiciones del modelo	40
3.2 Calibración	41
4. Discusión de resultados	42
4.1 Impacto por cambio en el uso del suelo	42
4.1.1 Recarga	42
4.1.2 Evaluación del riesgo de contaminación	48
4.2 Brechas de información	53
4.3 Definición de medidas de protección y gestión de las aguas subterráneas	55
4.3.1 Introducción	55
4.3.2 Evolución de la piezometría y del riesgo de contaminación en la Región de Magallanes	55
4.3.3 Propuestas de medidas para la Región de Magallanes	56
4.4 Análisis de sostenibilidad de uso de aguas subterráneas	57
5. Conclusiones	61
6. Referencias	63
Anexo	64

El presente documento corresponde al resumen ejecutivo del Informe General, de la Región de Magallanes, en el cual se han determinado las áreas de mayor infiltración, se han delimitado las zonas principales de recarga y se ha evaluado el riesgo de contaminación del agua subterránea.

Este trabajo se enmarca en la iniciativa **Escenarios Hídricos 2030, Fase III**, desarrollada por Fundación Chile, que pretende generar un análisis hídrico base como insumo clave para una planificación de desarrollo territorial sustentable que considere el componente hídrico de la región, contribuyendo así a garantizar su seguridad hídrica futura.

El área estudiada tiene una superficie aproximada de 119 124 km² e integra centros urbanos de Puerto Natales, Punta Arenas, Puerto Williams, entre otros. La delimitación del área de estudio corresponde a toda la Región de Magallanes y Antártica.

Para el estudio de la recarga y el riesgo de contaminación, se consideraron varios enfoques metodológicos. Para el estudio de la recarga y del riesgo de contaminación, se aplicó el modelo Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere (WetSpass) y el Índice de Susceptibilidad (IS). Ambos modelos generan resultados distribuidos en el espacio. Con la información generada por el cálculo de recarga, se realizó un análisis de la capacidad de uso de aguas subterráneas en la región.

Para la aplicación de la metodología propuesta, fue necesario un trabajo de compilación y tratamiento de variables geográficas, pedológicas, geológicas, geomorfológicas, climáticas, uso del suelo y de recursos hídricos para construir la base de datos con los insumos para los modelos mencionados (Figura 1).

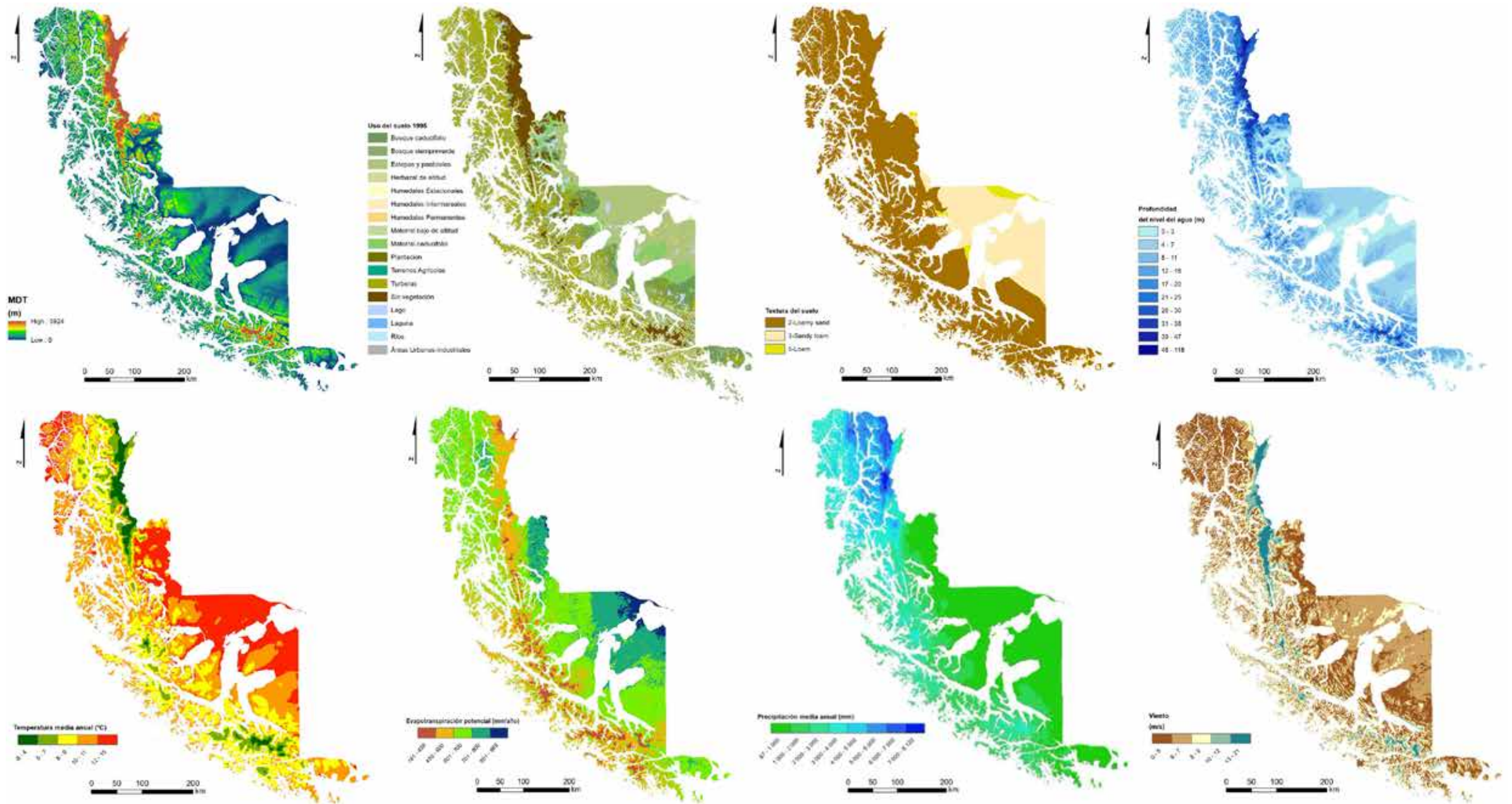


Figura 1: Variables de entrada de los modelos. Arriba, de izquierda a derecha: topografía, uso del suelo, textura del suelo, profundidad del agua. Abajo, de izquierda a derecha: temperatura, evapotranspiración potencial, precipitación, velocidad del viento.

Respecto al procesamiento de la información base, se destaca lo siguiente:

- Las pendientes predominantes en el territorio presentan valores entre 0 y 5 grados, ubicados esencialmente en la XII Región de Magallanes, que incluyen las cuencas 1) Vertiente del Atlántico, 2) Costeras e Islas entre R. Hollemberg, Golfo Almirante, Laguna Blanca, 3) Costeras entre Laguna Blanca, Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes y 4) Tierra del Fuego.
- Las áreas asociadas a turberas son la clase más representativa en cuanto al uso del suelo. Sin embargo, también se destacan las Estepas y pastizales/Herbazales, y Bosque siempreverde;
- La cuenca presenta, esencialmente, suelos relativamente francos, de composición volcánica o vulcano-sedimentaria (sandy loam), suelos arcillo-arenosos (loamy sand), y suelo compuesto principalmente de arena y limos (Loam);
- El estudio de la precipitación se basa en las series de precipitación registradas en las estaciones del Explorador Climático (CR)2, lo que permite trasladar un mapa de precipitación mensual para todo el país. Utilizando estos datos se obtuvo un mapa de precipitación mensual para toda la Región de Magallanes, con base en datos observados entre 1940 y 2022. Existe un incremento de la precipitación promedio anual hacia el norte, donde se presentan las áreas más elevadas. En esta zona, la precipitación alcanza valores superiores a 8000 mm. En la zona de Tierra del Fuego, región con mayor densidad poblacional, y donde se ha observado un aumento de áreas agrícolas e industriales en los últimos años, existen clases con valores de precipitación más bajos, en el rango de 87 a 2009 mm/año;
- En cuanto a la temperatura, los promedios anuales son más elevados en la zona central de la región, en la Vertiente Continental, Punta Arenas y Tierra del Fuego, con valores del orden de los 12 a 15°C, mientras que los valores más bajos se encuentran en las zonas más altas, al noreste de la región, con valores del orden de los -6 a 4°C;
- El mapa de evapotranspiración potencial (ETP) elaborado indica que el rango de valores que presenta mayor recurrencia corresponde al intervalo de 600 a 700 mm/año, con mayor presencia en la zona centro y norte. Sin embargo, cabe señalar que, en general, los valores de evapotranspiración potencial son moderadamente bajos y con gran representatividad en toda la cuenca;
- Las clases más recurrentes de velocidad del viento son las dos que tienen velocidad del viento entre 5 a 7 m/s, asociadas a las zonas centro de la cuenca. La clase con mayores clases de viento se encuentran en las zonas más altas de la región;
- Para el cálculo de la piezometría se consideraron datos de 158 pozos de la Dirección General de Aguas (DGA, 2016). En un primer análisis de la información se observó una relación entre el nivel del agua y la topografía en las zonas donde se dispone de datos, con el fin de extrapolar los valores del nivel del agua para las zonas restantes.

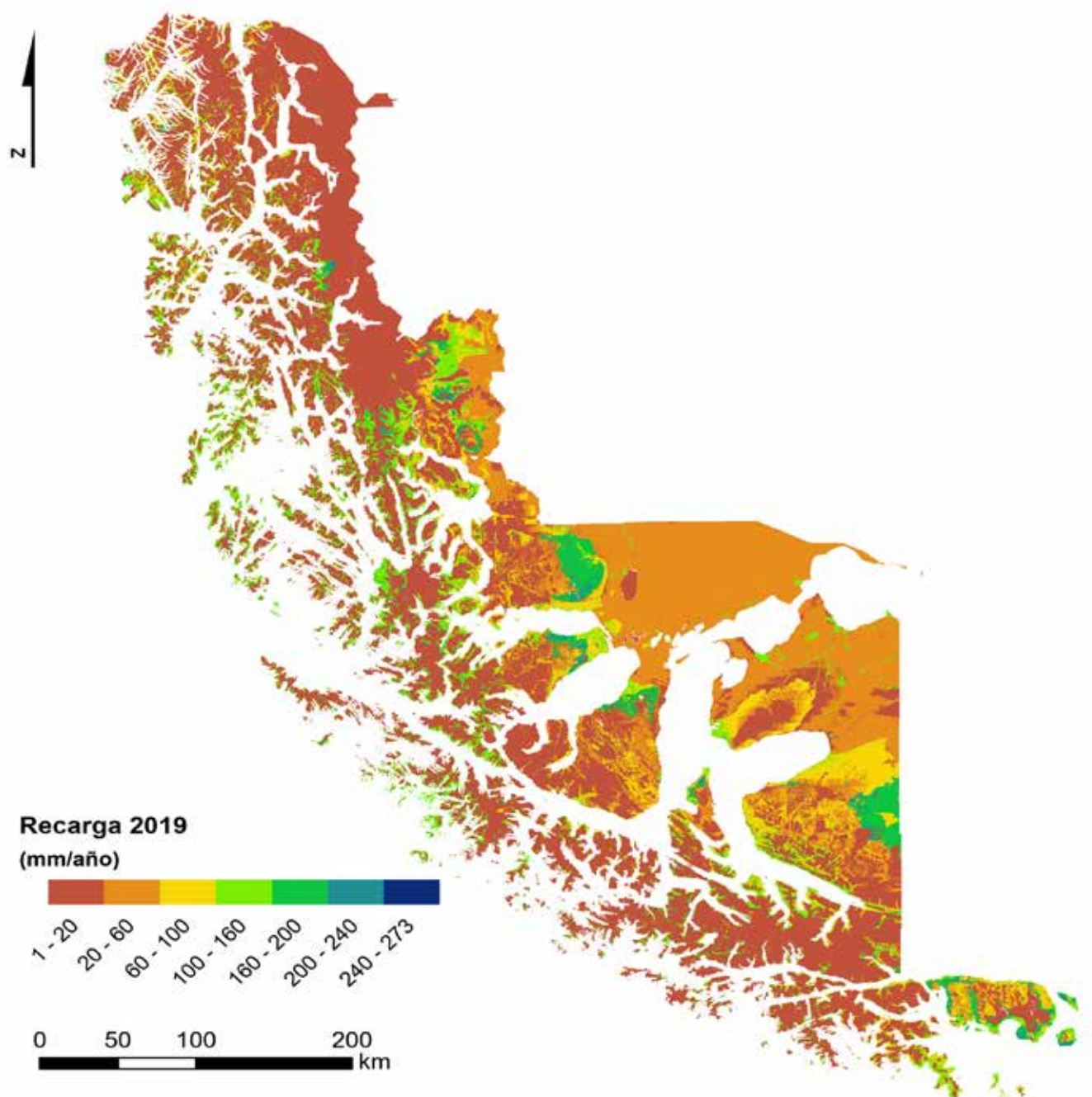


Figura 2: Valores de recarga en la Región de Magallanes.

Después de la implementación y calibración del modelo WetSpass, se confirmó que las áreas con mayor recarga se encuentran asociadas a zonas de bosques caducifolios, siempre verdes y matorrales. Las zonas donde no se produce recarga están especialmente relacionadas con los pendientes y el uso del suelo, más precisamente zonas urbanas e industriales. En el área metropolitana de Porvenir y Punta Arenas se ve una pequeña zona donde la recarga es bastante baja. Esto se debe a la mala permeabilización de los suelos metropolitanos. Las zonas del sur y norte tienen valores de recarga bajos, ya que la pendiente es bastante alta y hay nieve en la zona (cordillera de los Andes). Los valores de recarga oscilan entre 0 y 273 mm/año, con un valor promedio para toda la cuenca cercano a los 36,8 mm/año, para el año de 2019 (Figura 2).

A partir de los valores presentados se logró identificar las principales zonas de recarga de la región. La delimitación de estas áreas se basó en la cartografía de uso del suelo de 2019 (Pliscoff, 2023). Se consideró que las principales zonas de recarga corresponden al 25% de celdas con mayores valores de recarga. Se considera que estas zonas deberían ser objeto de una gestión territorial más limitativa, una vez que son áreas de especial interés para la gestión de la recarga de los acuíferos de la región. Las estadísticas muestran que esta área contribuye con un 39% de la recarga total (valores promedios de 36 mm/año, o 435 hm³/año), mientras ocupa solamente el 25% de la superficie total (12.086 km²).

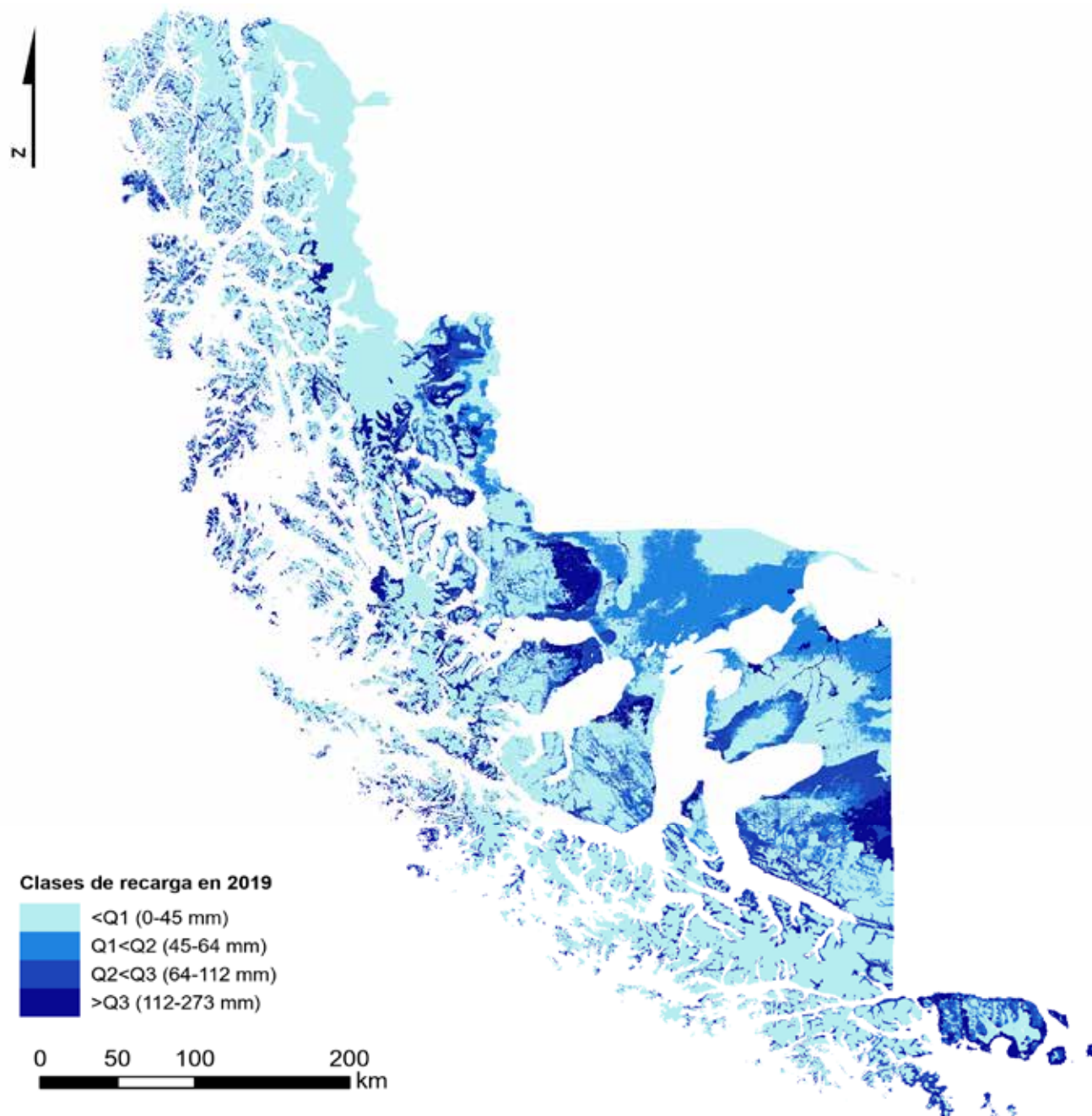
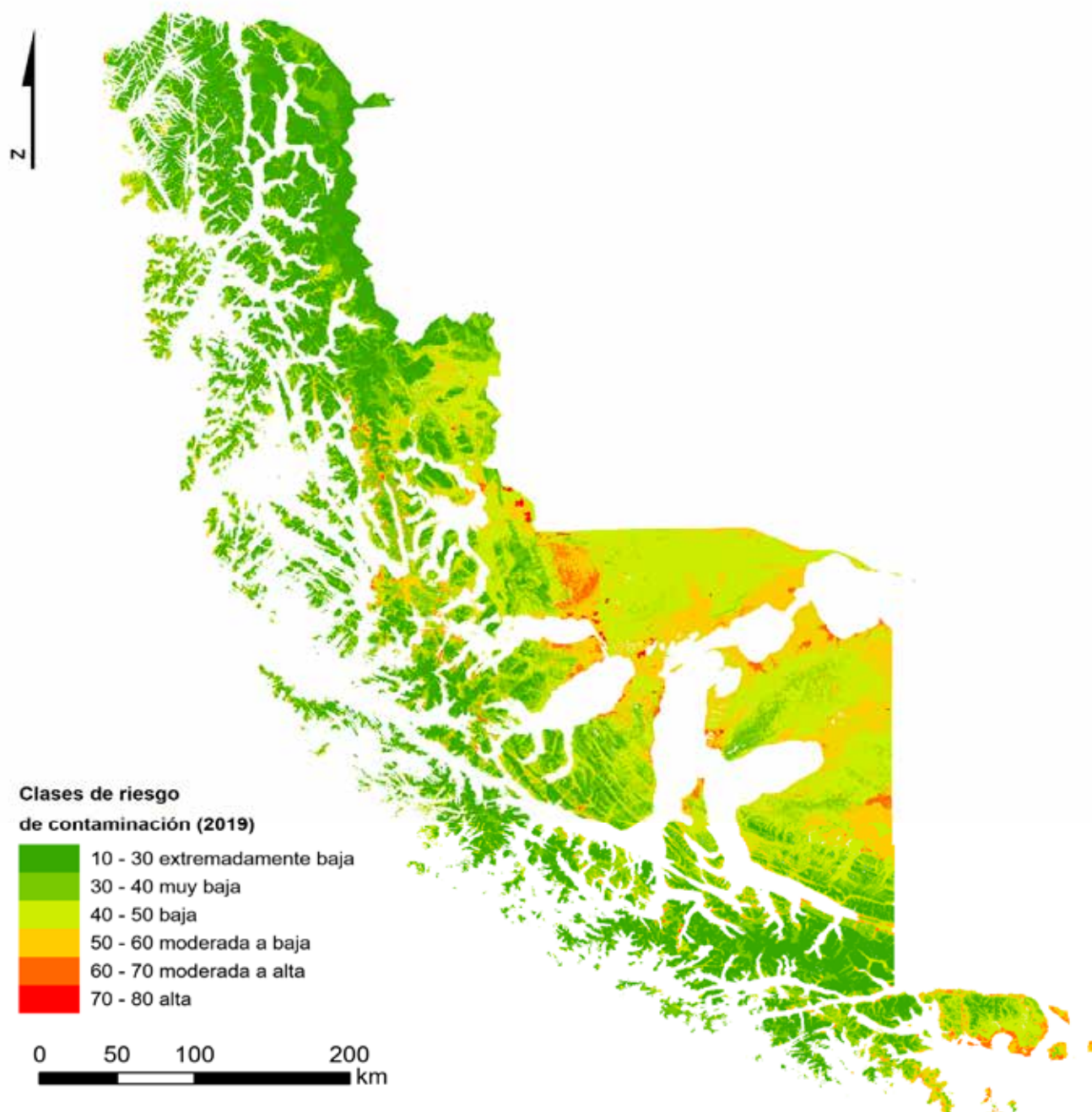


Figura 3: Identificación de las áreas principales de recarga.

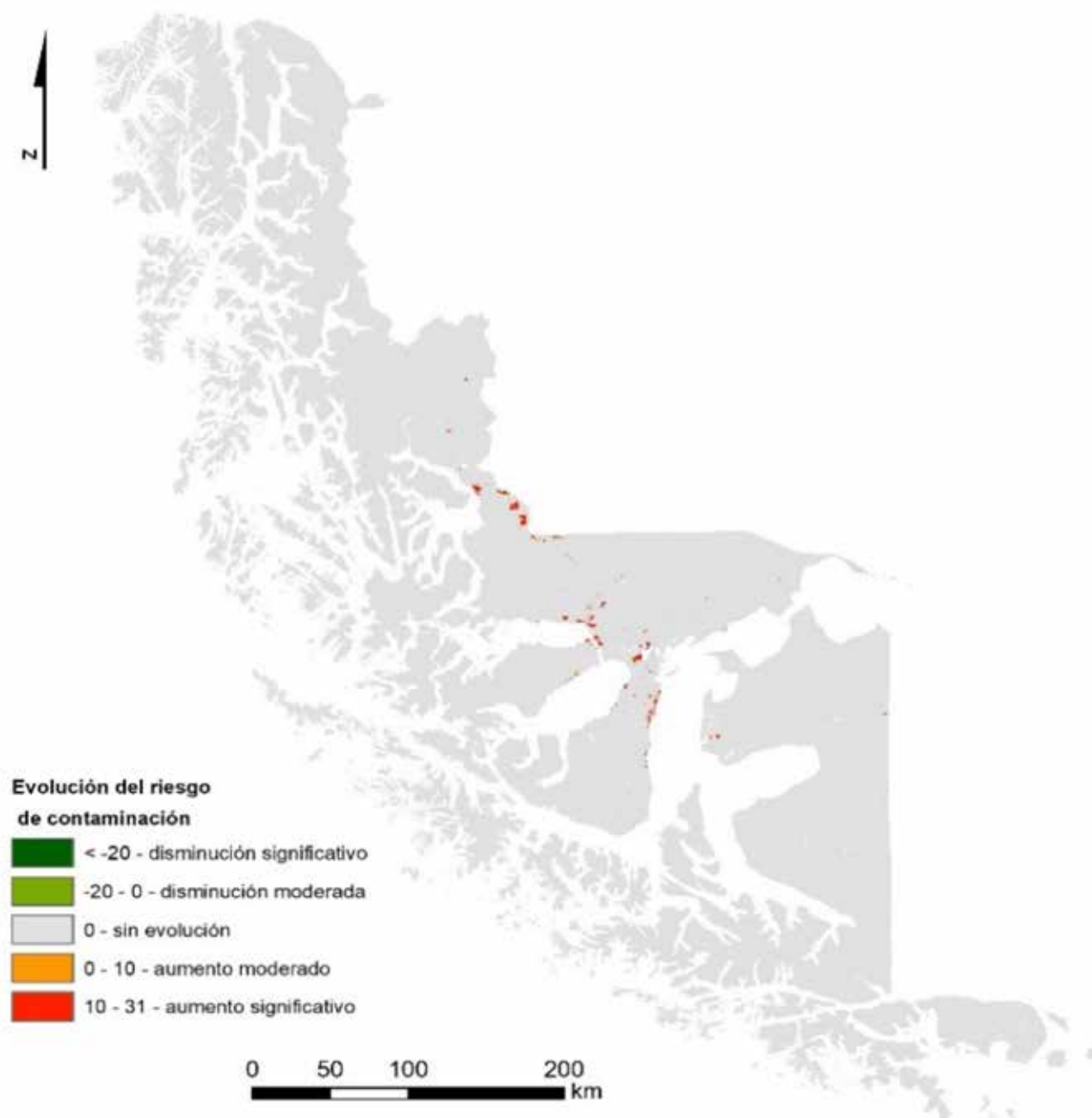
La Figura 3 muestra que las áreas de recarga preferenciales ($> Q3 = 112-273$ mm) se sitúan en el área central y suroeste de la cuenca, coincidiendo con el área de pendientes más bajas, y en tipos de uso del suelo específicos como matorrales y bosques. Sin embargo, debido a la importancia del recurso para la zona y debido a la escasez de agua presente en gran parte de la región, también se deben tener en cuenta las áreas de recarga asociadas a la clase de valores 64 a 112 mm.

Los altos valores de recarga observados en la zona andina se deben a la alta precipitación y baja evapotranspiración en la zona. Sin embargo, la contribución de las precipitaciones a la recarga es menor en esta zona que en las zonas central y suroeste, ya que el porcentaje de precipitación que se infiltra en el suelo es mucho menor en las zonas inclinadas y con suelos poco desarrollados.



El método del índice de susceptibilidad (IS) permite evaluar el riesgo de contaminación del agua subterránea, teniendo en cuenta la relación entre las características naturales de la cuenca, la recarga y el uso del suelo. El resultado de la aplicación de esta metodología para el escenario del año de 2019 (Pliscoff, 2023), muestra que el área de estudio se divide en dos zonas: una con riesgo mayor (pero no significativo) en el área central y otra con riesgo menor hacia el este y norte (Figura 4). Las clases de riesgo mayores están asociadas a las prácticas agrícolas en terrenos poco inclinados, en un suelo con un componente arenoso significativo donde, además, la profundidad del nivel piezométrico oscila entre 0 y 7 m. Sin embargo, las zonas urbanas presentan un riesgo “Moderado a alto”, debido a la proximidad de los niveles de agua a la superficie.

Figura 4: Impacto del uso del suelo en el riesgo de contaminación del agua subterránea.



Se elaboró un mapa con la diferencia de valor del riesgo de contaminación entre 1995 y 2019, en base a los cambios en el uso del suelo (Figura 5). Se puede concluir, de manera general, que el riesgo de contaminación en esta cuenca es similar entre los años 1995 y 2019. De una manera general, hay un incremento de riesgo en nuevas zonas agrícolas o industriales.

Figura 5: Impacto del uso del suelo en el riesgo de contaminación del agua subterránea.

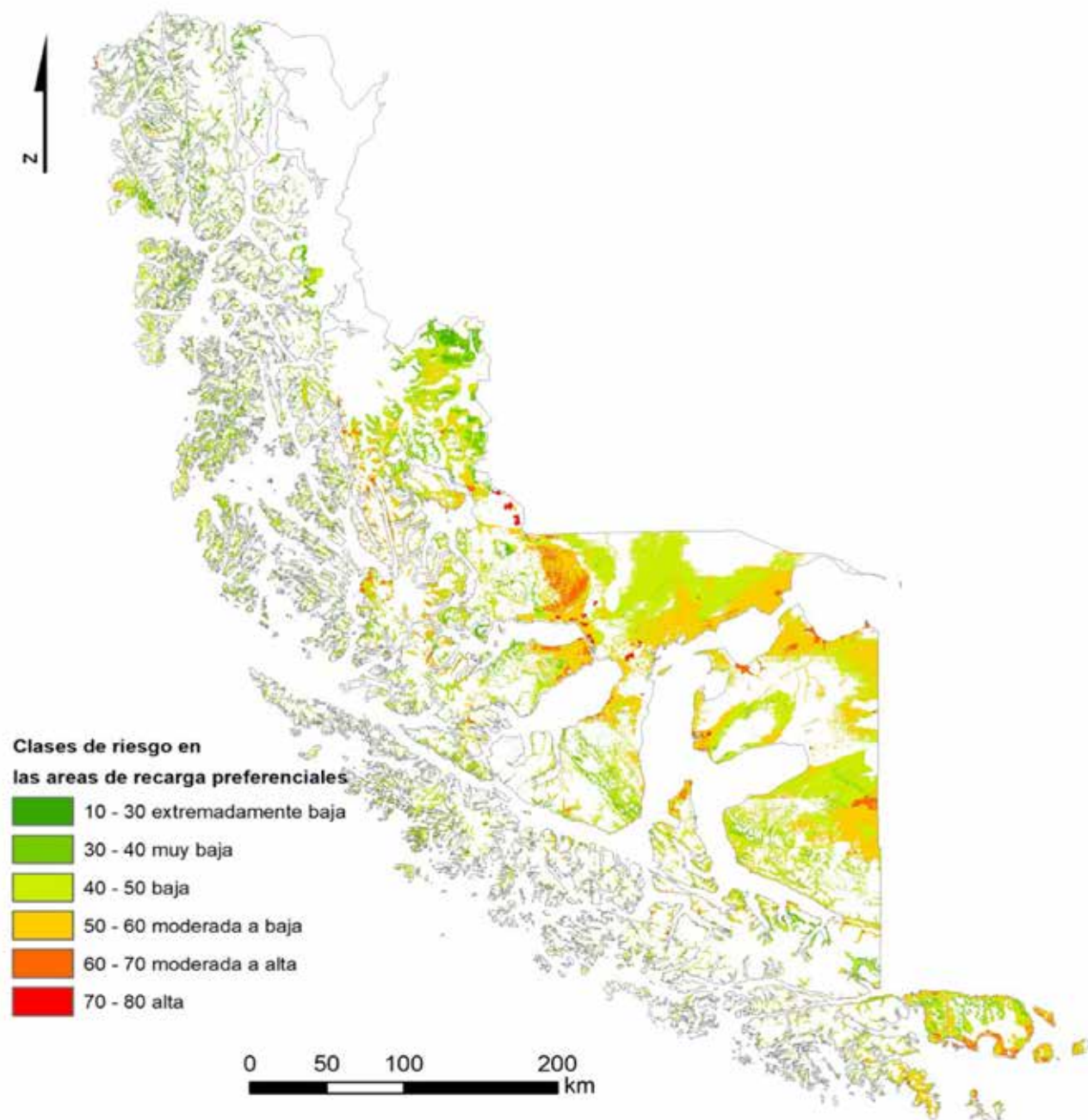


Figura 6 : Impacto del uso del suelo en el riesgo de contaminación del agua subterránea.

La Figura 6 muestra la intercepción entre las zonas preferenciales de recarga y las clases de mayor riesgo de contaminación. Como se observa, la mayor parte de la zona principal de recarga presenta un riesgo de contaminación moderado. Este hecho se debe abordar con una visión holística, mediante la consideración adecuada de las consecuencias que podrían derivar de los diferentes escenarios de gestión posibles, tanto para la cantidad como para la calidad del agua subterránea. Al final, se deberán tomar medidas que optimicen el interés económico de los acuíferos, la salud pública y el medio ambiente.

Para el análisis de capacidad de uso de aguas subterráneas, se tuvo en cuenta los datos disponibles en el explorador CAMELS-CL es decir, los derechos consuntivos subterráneos, organizados por cuencas (Alvarez-Garretón et al, 2018; Barría et al., 2021). Los porcentajes de uso de agua subterránea, en relación con la recarga promedio de cada subcuenca, se muestran en la Figura 7.

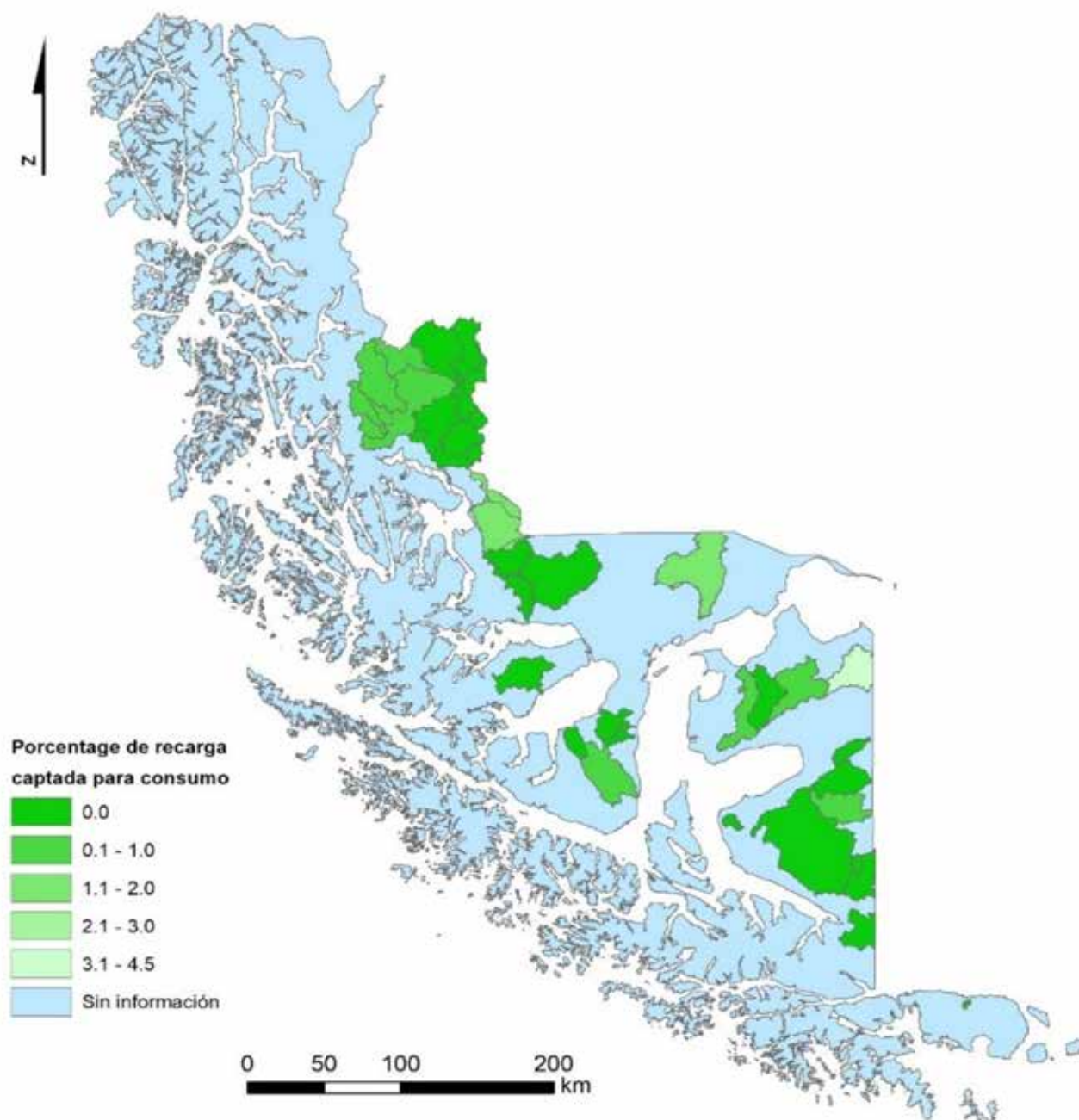


Figura 7: Impacto del uso del suelo en el riesgo de contaminación del agua subterránea.

La ausencia de una red de monitoreo del nivel piezométrico no permite realizar una evaluación del régimen de explotación de los acuíferos de la región. Por este motivo, se propone como primera medida de gestión del agua subterránea de esta región, la implementación de una red de monitoreo de vigilancia de cantidad y calidad del agua.

El presente trabajo se enmarca en la iniciativa “Escenarios Hídricos 2030, Fase III”, desarrollada por Fundación Chile. La visión de “Escenarios Hídricos 2030” es generar un análisis hídrico base como insumo clave para una planificación de desarrollo territorial sustentable que considere el componente hídrico de la región, contribuyendo así a garantizar su seguridad hídrica futura.

Objetivos específicos:

- 1) Identificar zonas hídricas críticas que aportan a la conservación del ciclo del agua, levantando oportunidades para las soluciones basadas en la naturaleza y de reparación hidrológica en la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena;
- 2) Desarrollar un Índice de Seguridad Hídrica en tres cuencas estratégicas de la región, que permitan establecer la brecha hídrica territorial base histórica y proyectada al 2050, considerando componentes de uso de agua ecosistémicos, productivos y ambientales.

Este componente, que será realizado a través de la presente consultoría corresponde a la determinación de Recarga de los Acuíferos en la región, que es: parte de los objetivos específicos descritos anteriormente. El desafío es determinar a través del modelo WetSpass (Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere), la recarga existente en los acuíferos de las distintas cuencas trabajadas en la iniciativa y determinar las zonas de recarga natural actuales.

Este informe corresponde a las actividades de trabajo desarrolladas para el Informe General sobre la estimación de la recarga en la Región de Magallanes, a través del modelo WetSpass, que resume los resultados y análisis establecidos. Las metodologías, productos y resultados obtenidos, quedarán disponibles para quien desee replicar la experiencia en otras cuencas de Chile y LAC (América Latina y el Caribe).

De acuerdo con lo dispuesto en los términos de referencia, en este documento se presentan los resultados obtenidos para toda la Región de Magallanes, incluyendo los mapas con las zonas de recarga natural existentes en la actualidad y las que se han perdido con el cambio del uso del suelo, así como el análisis de los resultados.

2.1 Enfoque metodológico

El modelo Wetspass, considerado para el cálculo de la recarga en el presente estudio, requiere un conjunto de variables cuya complejidad de preparación para el modelo depende de la facilidad de obtención de esta información, su representatividad espacial y la precisión con la que se recolectaron estos datos.

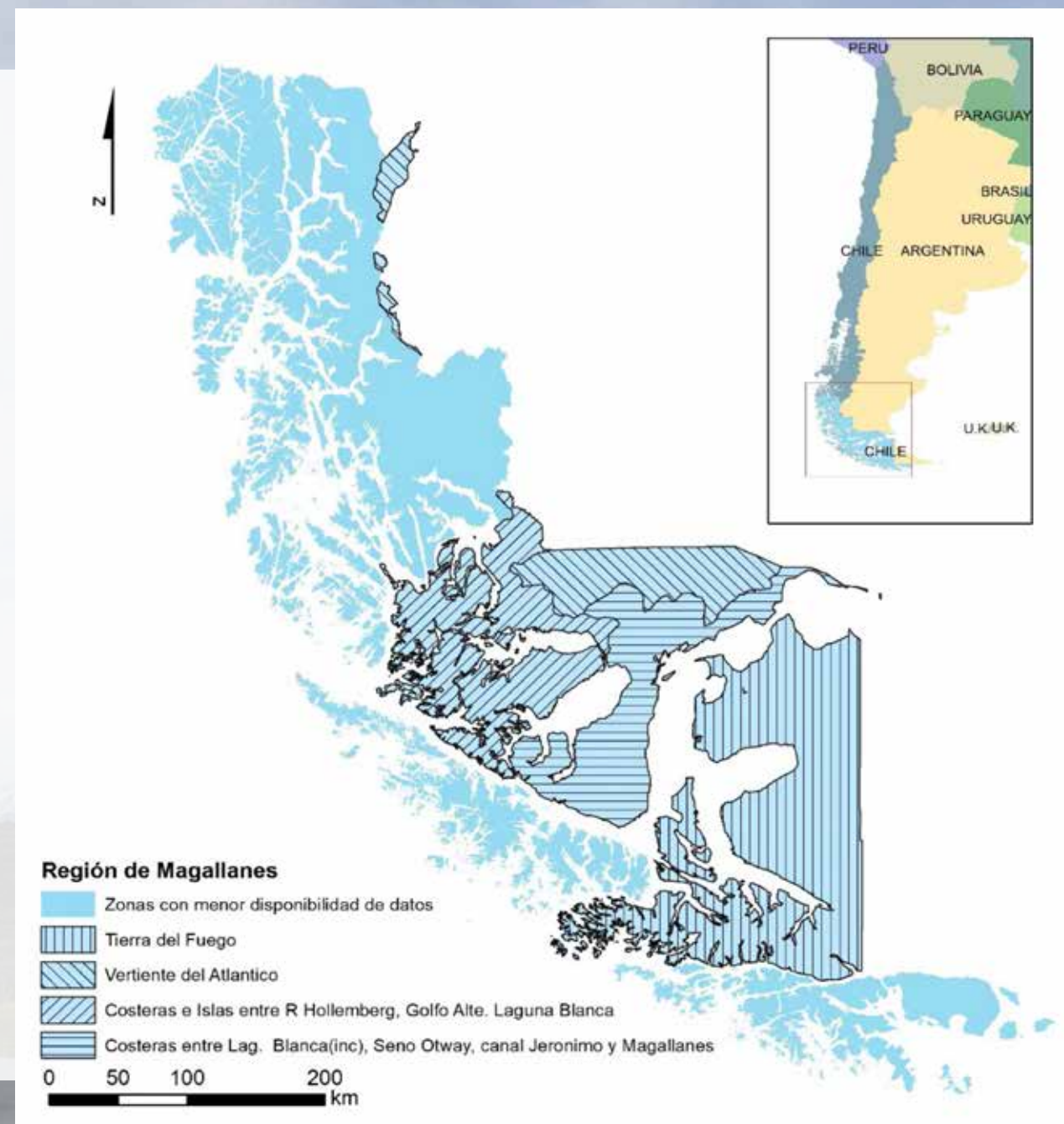
La Región de Magallanes es una zona muy vasta, con grandes áreas donde hay desconocimiento de algunas variables necesarias para el cálculo de la recarga. Este hecho obligó a aplicar metodologías que permitieran minimizar esta brecha.

Las zonas con más datos, informaciones y trabajos desarrollados se ubican en los sectores definidos en los estudios de la DGA (1991, 2016) además de Isla Riesco. Específicamente, estos sectores se ubican en las cuencas: Vertiente del Atlántico, Costeras e Islas entre R. Hollemberg, Golfo Almirante, Laguna Blanca, Costeras entre Laguna Blanca, Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes y Tierra del Fuego.

En la Figura 8 se presenta el área de estudio del trabajo de DGA (2016), incorporando las distintas cuencas a ser analizadas, cuyo principal objetivo fue la modelación hidrológica de los acuíferos de la Región de Magallanes y Antártida.

En las áreas restantes, el conocimiento y la información disponibles son mucho menores, especialmente en la parte más septentrional de la región de estudio.

Figura 8 – Región de Magallanes. Indicación de zonas con diferentes niveles de conocimiento.



Por ello, se decidió dividir el cálculo de recarga en varias fases, para obtener los mejores resultados posibles. En una primera fase, se calculó la recarga para la zona estudiada por la DGA, considerada la zona con más información disponible para la aplicación del Wetspass. Con la información disponible en esta área, fue posible calibrar el modelo Wetspass y obtener resultados para comparar con los datos observados. De esta forma, se realizó un análisis de sensibilidad de los resultados a los parámetros de calibración, cuantificando y reduciendo el error de simulación.

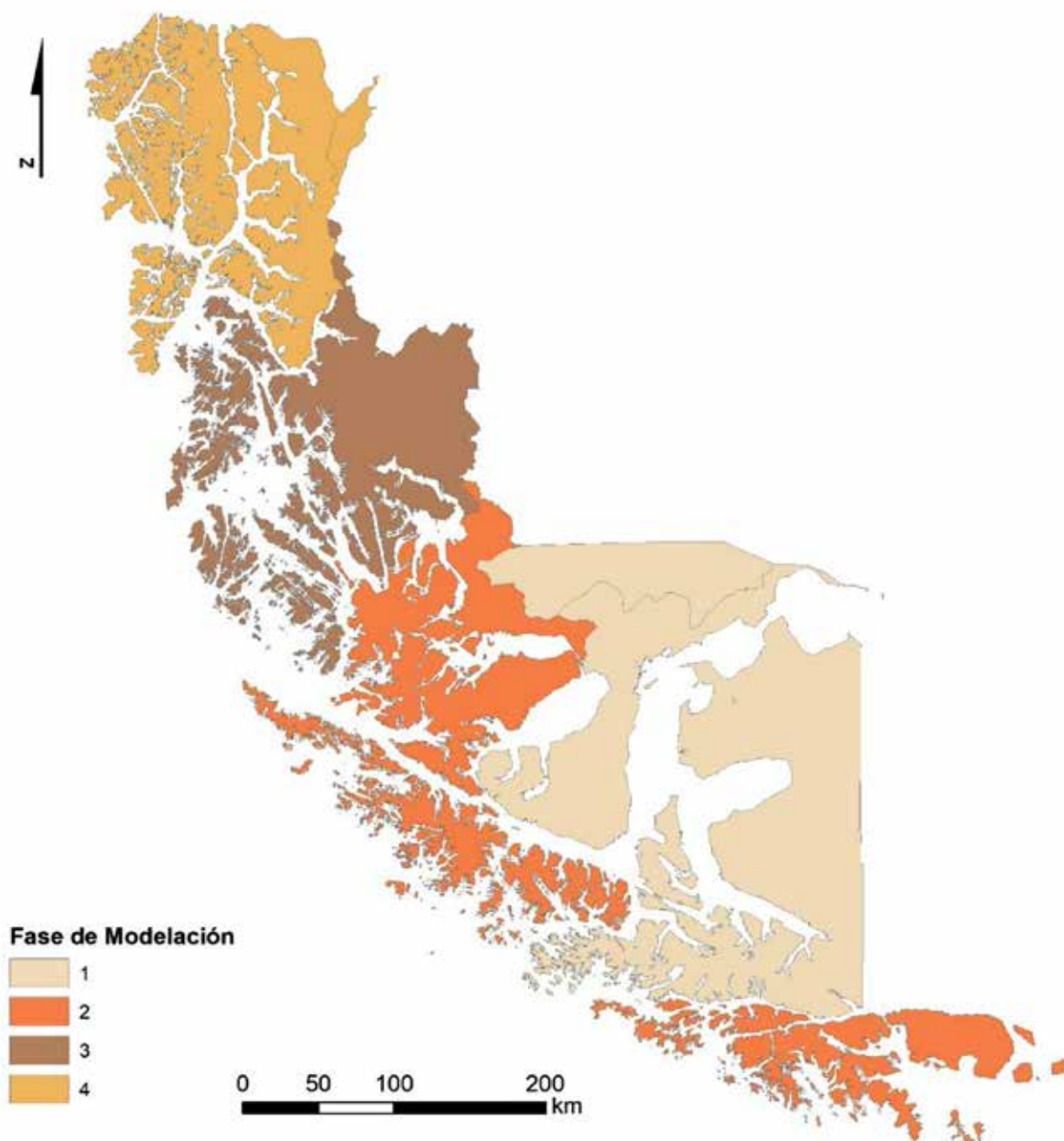
Para replicar el cálculo en las áreas restantes, se tuvieron en cuenta varias variables para comprobar la similitud de las cuencas restantes con las cuencas modeladas, y así asignarles el mismo conjunto de calibración al Wetspass.

Así, se consideraron 4 fases de modelación, que consideran 3 cuencas cada una (Tabla 1).

Después de la modelación, el trabajo incluyó las siguientes fases: Fase 5: Impacto en la recarga por cambios de uso del suelo, Fase 6: Evaluación del riesgo de contaminación, Fase 7: Definición de medidas de protección y gestión de las aguas subterráneas, y Fase 8: elaboración del informe.

Tabla 1 – Fases del trabajo

Tarea	Fase	Cod Cuenca	Enfoque	Set de calibración
Modelación de la recarga	1	125	Costeras entre Lag. Blanca (inc), Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes	125
		126	Vertiente del Atlántico: Continental Norte	125
		128	Tierras del Fuego	128
Modelación de la recarga	2	129	Islas al sur del Canal Beagle y Territorio Antártico	128
		127	Islas al sur Estrecho de Magallanes	128
		124	Costeras e Islas entre R Hollemberg, Golfo Alte. Laguna Blanca	125
Modelación de la recarga	3	123	Islas entre Canales Concepción, Sarmiento y E. de Magallanes	125
		122	Costeras entre Seno Andrew y R. Hollemberg e islas al oriente	125
		126.2	Vertiente del Atlántico 1	125
Modelación de la recarga	4	120	Costeras entre Límite región y Seno Andrew	125
		121	Islas entre Límite región y Canal Ancho y Estrecho de la Concepción	125
		126.3	Vertiente del Atlántico 2	125
Aplicación de usos del suelo	5	Todas	Impacto en la recarga por cambios en el uso del suelo	
Aplicación del IS	6		Evaluación del riesgo de contaminación	
Evaluación de la gestión de recarga	7		Definición de medidas de protección y gestión de las aguas subterráneas	
Finalización del informe	8		Informe final	



La Figura 9 representa espacialmente las diferentes fases del cálculo de la recarga.

En los siguientes capítulos se presentan las variables de entrada del modelo es decir, el origen de la información, el procesamiento necesario para su uso y la configuración para entrada en el modelo.

Figura 9 – Cuencas de cada fase de cálculo de la recarga.

2.2 Pendiente del terreno

Para la creación del mapa de pendiente del terreno se utilizaron los modelos digitales del terreno (MDT) proporcionados y compilados en un mapa de toda la Región de Magallanes (Figura 10).

La Región de Magallanes y Antártica Chileno se encuentran en la parte más austral de Chile y comparten algunas similitudes en su topografía debido a su proximidad a la punta sur de América del Sur y a la presencia de la Cordillera de los Andes. Sin embargo, también presentan características geográficas distintivas.

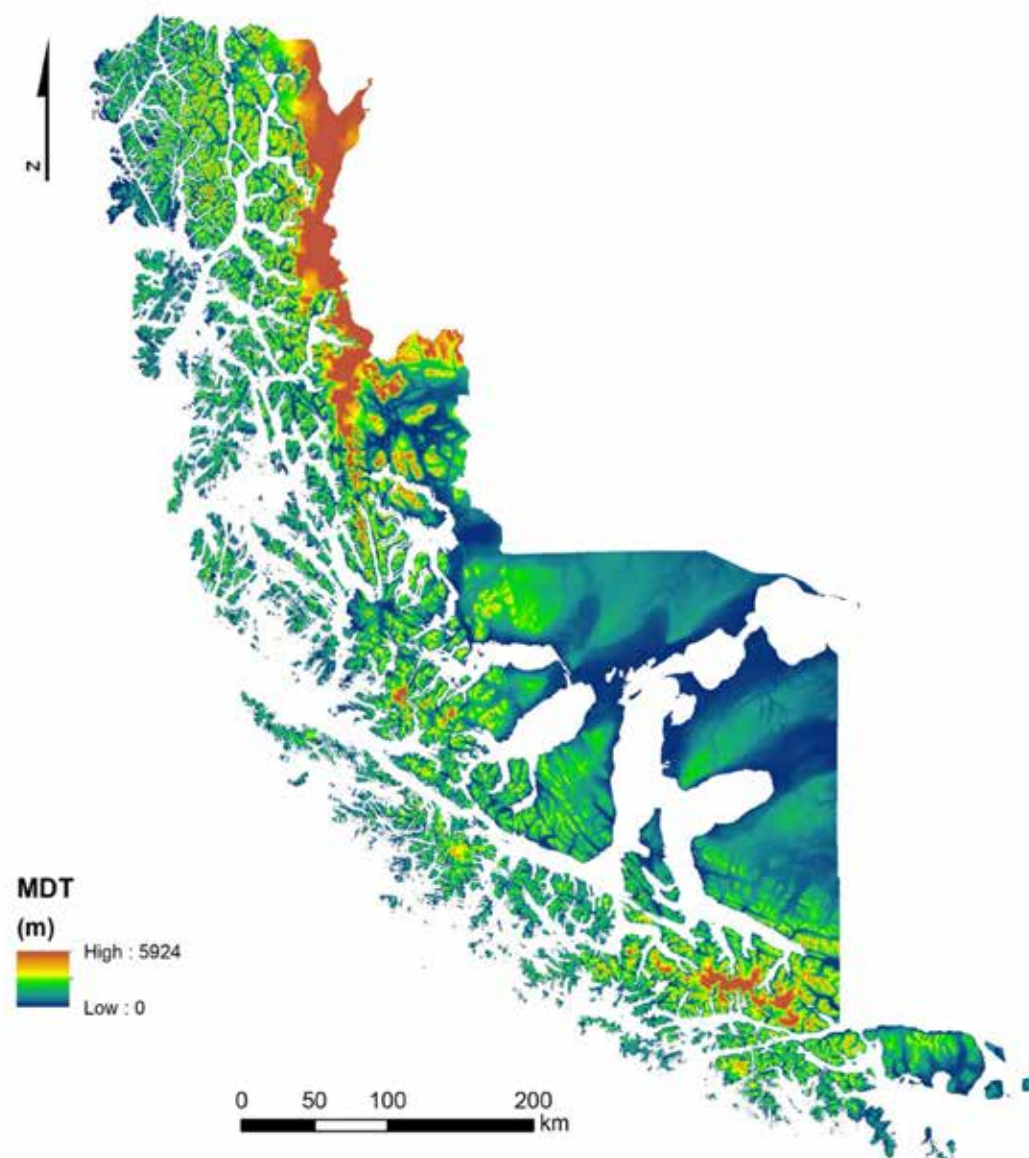


Figura 10 – Modelo digital del terreno.

Geomorfológicamente, la Región de Magallanes se caracteriza por un terreno accidentado y montañoso, especialmente en la parte occidental. Forma parte de la cordillera de los Andes, que se extiende hasta la punta sur de América del Sur. Estas montañas están cubiertas de bosques densos y cuentan con numerosos fiordos y canales profundos que las atraviesan. La región es también conocida por su intrincada red de fiordos, canales y estrechos. Algunos de los más destacados incluyen el Estrecho de Magallanes, el Canal de Beagle y varios fiordos, como los fiordos Sarmiento, Peel y Eyre. Estas vías fluviales son esenciales para la navegación y contribuyen a los impresionantes paisajes costeros de la región.

También en la Región de Magallanes se encuentran numerosos glaciares, especialmente en las partes más al sur, cerca del Campo de Hielo Patagónico Sur. El glaciar más famoso de la región es el Glaciar Pío XI, uno de los más grandes de América del Sur.

La región incluye aún varias islas, como Tierra del Fuego, la Isla Navarino y el Archipiélago de Wollaston. Estas islas forman parte de la topografía única de la región, que consta de un archipiélago.

En la parte oriental de la región, se pueden encontrar vastas extensiones de estepas y campos, caracterizadas por una vegetación baja y escasa población.

De una forma general, la Antártica Chilena está cubierta de hielo y nieve, lo que la convierte en una de las regiones más remotas e inhóspitas de la Tierra. Es un vasto desierto congelado con extensas capas de hielo y glaciares. Aunque no son visibles de inmediato, debido a la capa de hielo, el Territorio Antártico Chileno cuenta con cordilleras subyacentes. La Península Antártica, por ejemplo, tiene una espina dorsal montañosa con picos que se elevan sobre el hielo.

Otro aspecto característico de la región es la costa de la Antártica Chilena, que se caracteriza por altos acantilados de hielo y plataformas de hielo flotantes. La región está rodeada por el Océano Antártico, y las frías aguas desempeñan un papel importante en la formación de la geografía local.

En resumen, la Región de Magallanes se caracteriza por una combinación de montañas accidentadas, fiordos, canales y glaciares, mientras que la Antártica Chilena es predominantemente un paisaje congelado con capas de hielo y con montañas dominantes.

En la Figura 11 se representa el mapa de pendiente para toda la Región de Magallanes y Antártica Chilena, en grados.

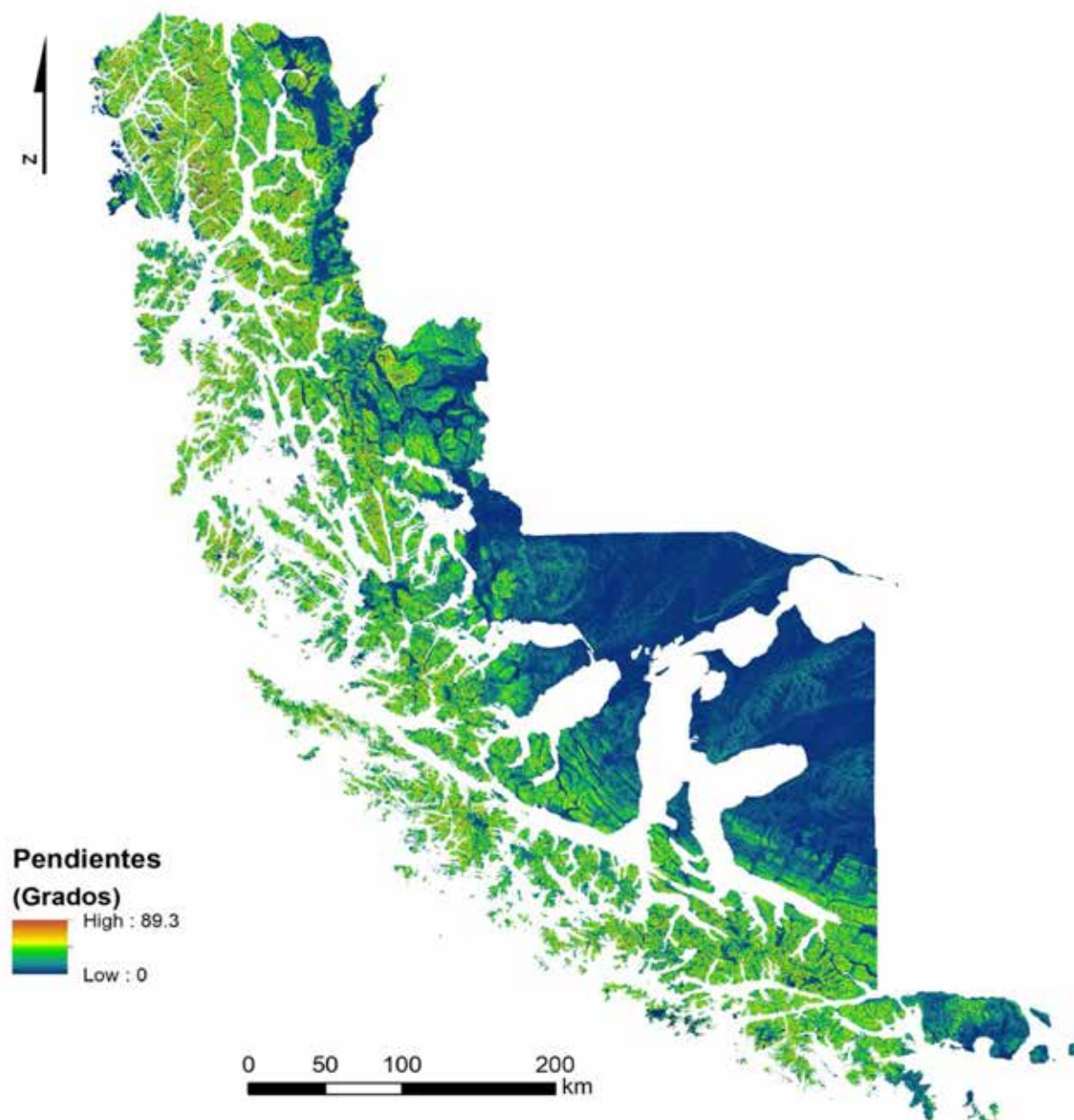


Figura 11 – Pendiente del terreno en la Región de Magallanes (grados).

En la Figura 12 se muestra un histograma o gráfico de frecuencia de clases de la pendiente del terreno en toda la Región de Magallanes, basado en el mapa de la Figura 11. En este gráfico se muestra claramente la predominancia de pendientes suaves entre 0 y 5 grados, ubicados esencialmente en la Región de Magallanes, que incluyen las cuencas Vertiente del Atlántico, Costeras e Islas entre R. Hollemberg, Golfo Almirante, Laguna Blanca, Costeras entre Laguna Blanca, Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes y Tierra del Fuego.

También hay un área significativa con pendientes entre 5 y 11 grados que se encuentra en toda el área de estudio, y puede estar asociada con zonas de transición entre áreas de pendiente suave y de mayor pendiente. Como sería de esperar, las áreas con mayor inclinación (36-90 grados), a pesar de su extensa dispersión espacial, son menos frecuentes, ubicándose, prácticamente en su totalidad en la cordillera de los Andes, que se extiende hasta la punta sur del área.

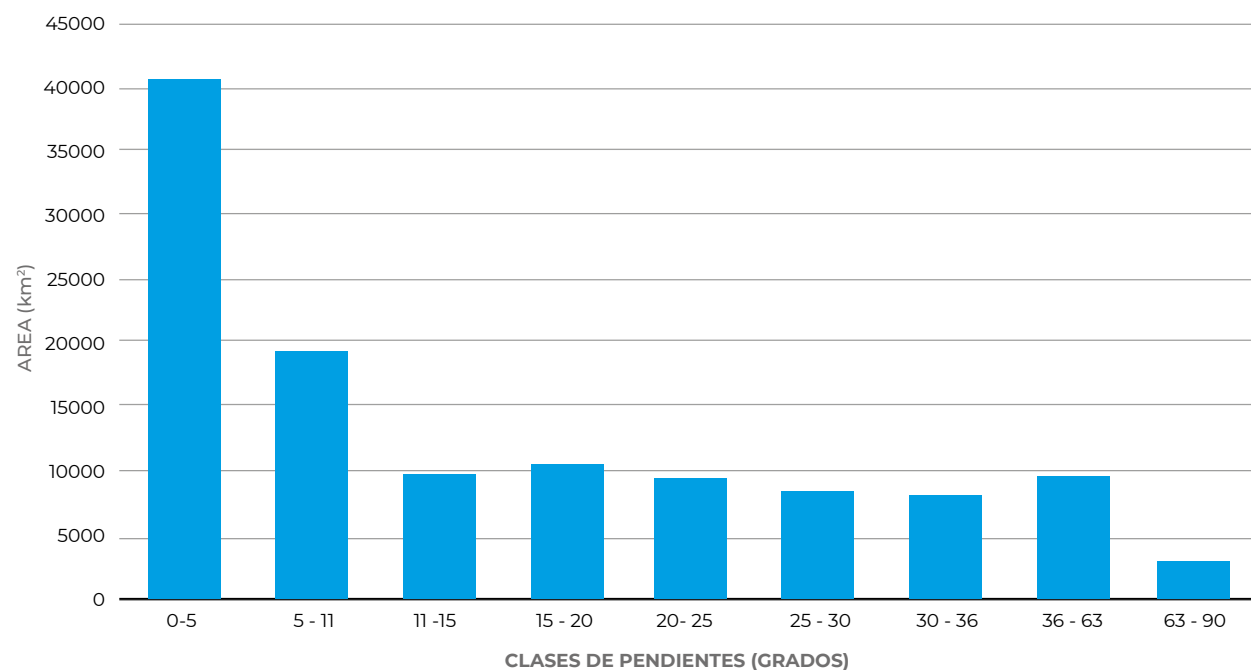


Figura 12 – Frecuencia de clases de pendiente del terreno.

2.3 Uso del suelo

El uso del suelo está directamente relacionado con la disponibilidad y calidad del agua subterránea.

En este trabajo se presenta un estudio comparativo entre el uso del suelo en 1995 y 2019. Se analizan las variables de recarga y riesgo de contaminación del agua subterránea por nutrientes para ambos años.

Este análisis está basado en información del estudio del estado actual de los ecosistemas terrestres en toda la Región de Magallanes (Pliscoff, 2023). En el trabajo citado se delimitan espacialmente varios tipos de ecosistemas y se hace una categorización utilizando métodos de teledetección. Las categorías otorgadas al uso del suelo en la región son las siguientes: Bosque caducifolio, Bosque siempreverde, Estepas y pastizales, Herbazal de altitud, Matorral bajo de altitud, Matorral caducifolio, Sin vegetación, Turberas, Áreas Urbanas-Industriales, Plantación, Terrenos Agrícolas, Humedales Estacionales, Humedales Intermareales, Lago, Laguna, Humedales Permanentes, Ríos y Turberas.

La Figura 13 muestra el uso del suelo para el año 1995 y la Figura 14 para 2019, de acuerdo con la clasificación de Pliscoff (2023).

En las imágenes se observa que el uso del suelo en la región está fuertemente asociado a la geomorfología de la cuenca que casi no presenta cambios en gran parte del área. Existe un gran predominio de turberas, principalmente en la zona más septentrional y en toda la cordillera de los Andes, que se extiende hacia el sur, en las islas al sur del Estrecho de Magallanes, y al sur de Tierra del Fuego.

En la franja norte-sur en el límite nororiental de la región, existe una extensa y continua área sin vegetación, asociada a áreas permanentemente cubiertas de nieve o áreas de glaciares. De hecho, es difícil obtener información y datos de esa zona.

En los sectores de Punta Arenas, el cual incluye la superficie de la Península de Brunswick, el sector Continental Norte y el sector de Tierra del Fuego, en zonas de pendiente bajas, el uso del suelo se caracteriza esencialmente por estepas y pastizales, humedales y matorrales. Los bosques caducifolios y siempreverdes se siguen alternando en toda la región con los demás usos del suelo y herbazales. De acuerdo con el trabajo de Pliscoff (2023), otro fenómeno que se observa es la creciente fragmentación y discontinuidad espacial de las categorías estepas y pastizales en los sectores de Tierra del Fuego, Punta Arenas y Costeras e islas entre R Holleberg, Golfo Alte. Laguna Blanca, que se convierten entre los años de 1995 y 2019 en terrenos agrícolas y/o zonas urbano-industriales.

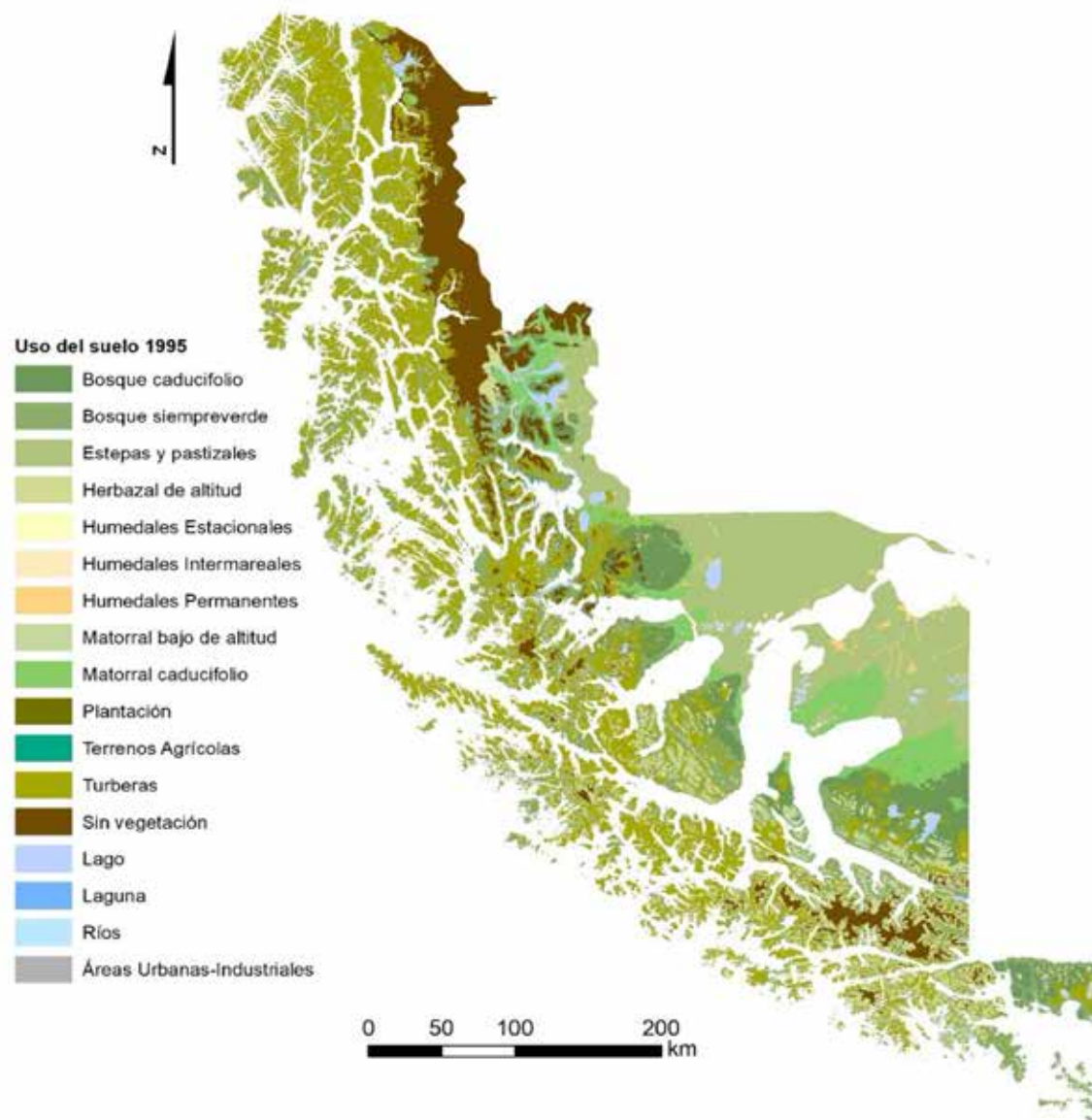


Figura 13 – Categorías de uso del suelo en 1995 (Pliscoff, 2023).

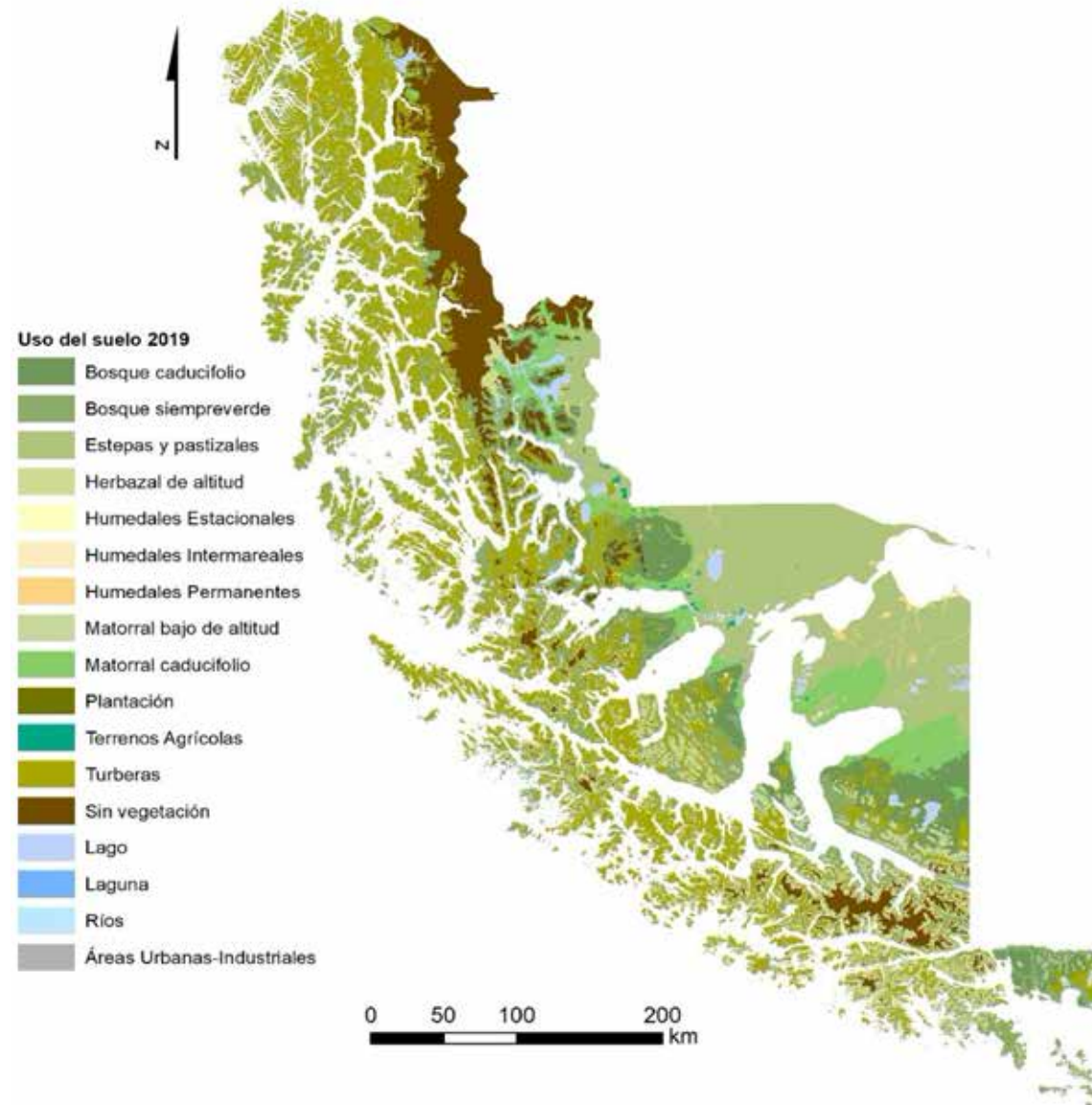


Figura 14 – Categorías de uso del suelo en 2019 (Pliscoff, 2023).

En el gráfico de la Figura 15 se presenta la ocupación correspondiente a las diferentes categorías en toda la región, para los años 1995 y 2019. Se verifica que las categorías que ocupan mayor territorio en la Región de Magallanes son “Turberas” (30.85%), “Estepas y pastizales/Herbazales” (20.19% en 1995; 20.03% en 2019) y “Bosque siempreverde” (16.48% en 1995; 16.47% en 2019).

Nótese que la variación de uso del suelo en toda la región es muy baja. De hecho, las mayores variaciones se dan en las zonas de Punta Arenas y Tierra del Fuego, específicamente con el aumento de áreas urbano-industriales y de terrenos agrícolas. Sin embargo, su relevancia es local, ya que a nivel regional este cambio es inferior al 1%.

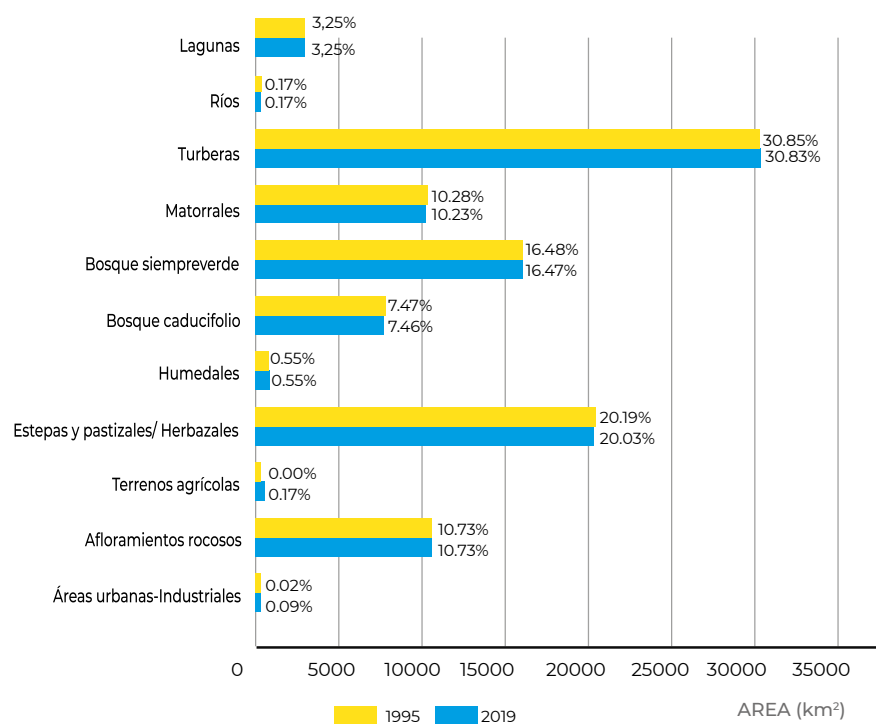


Figura 15 – Categorías de uso del suelo en la Región de Magallanes, para 1995 y 2019.

Para cuantificar el impacto que tendrán los cambios en el uso del suelo en la recarga, se recalcula la recarga para ambos años utilizando el modelo WetSpass calibrado previamente. En este proceso se llevó a cabo una reclasificación de las categorías originales de mapas, según las clases WetSpass. La reclasificación se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2 – Reclasificación de las categorías de uso del suelo de los años 1995 y 2016 a las clases de WetSpass.

Categorías de uso del suelo	Código Wetspass	Descripción WetSpas ¹
Áreas Urbanas-Industriales	3	industry
Bosque caducifolio	31	deciduous forest
Bosque siempreverde	32	coniferous forest
Estepas y pastizales	23	meadow
Herbazal de altitud	23	meadow
Humedales Estacionales	28	wet meadow
Humedales Intermareales	28	wet meadow
Humedales Permanentes	28	wet meadow
Lago	52	lake
Laguna	52	lake
Matorral bajo de altitud	36	shrub

1. Se presentan los nombres en inglés para mantener la terminología original y poder identificarlos fácilmente en caso de realizar un análisis posterior en WetSpass.

La reclasificación se llevó a cabo utilizando la mejor correspondencia con las clases de WetSpass, ya que este modelo tiene, por defecto, 34 clases de uso del suelo con todos los parámetros necesarios para el modelo.

Los mapas de uso del suelo reclasificados para el estudio comparativo entre 1995 y 2019 se presentan en la Figura 16 y Figura 17, respectivamente.

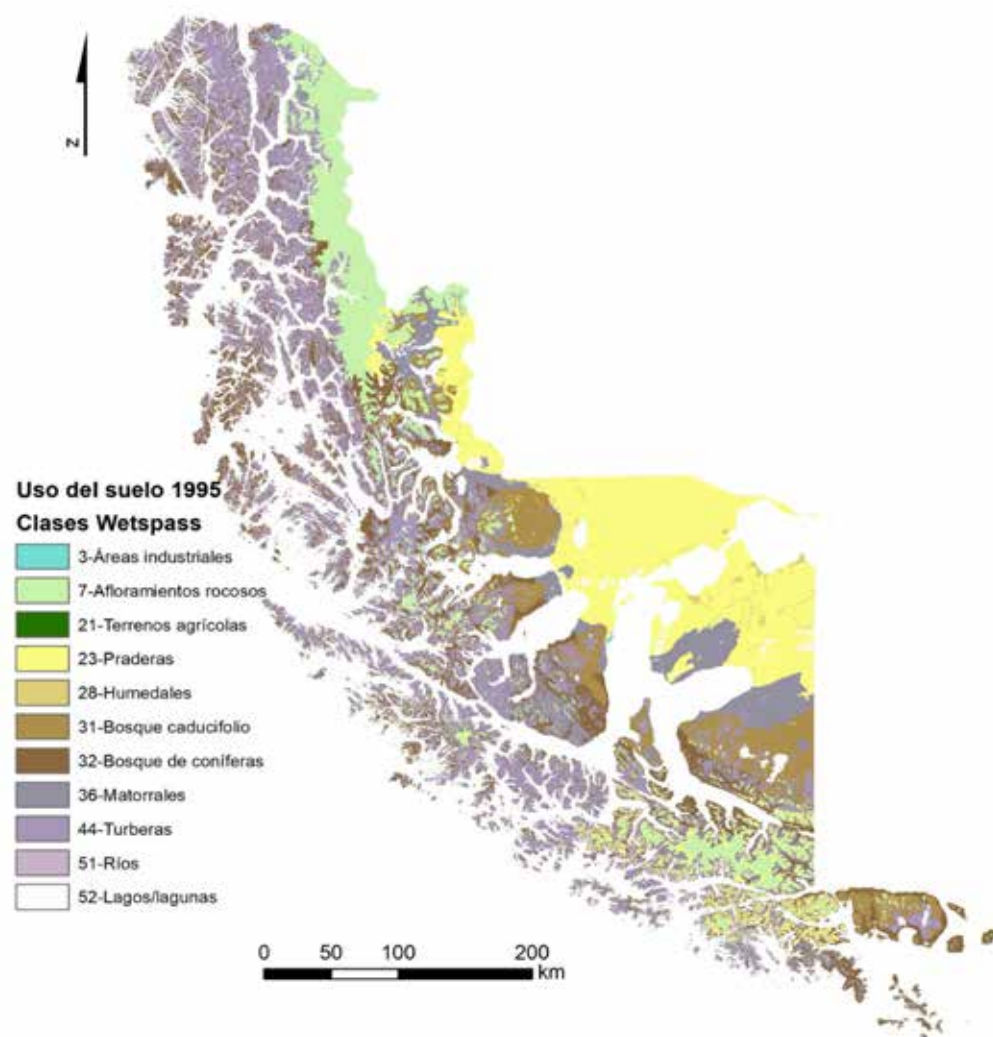


Figura 16 – Clases de WetSpass para el uso del suelo en 1995.

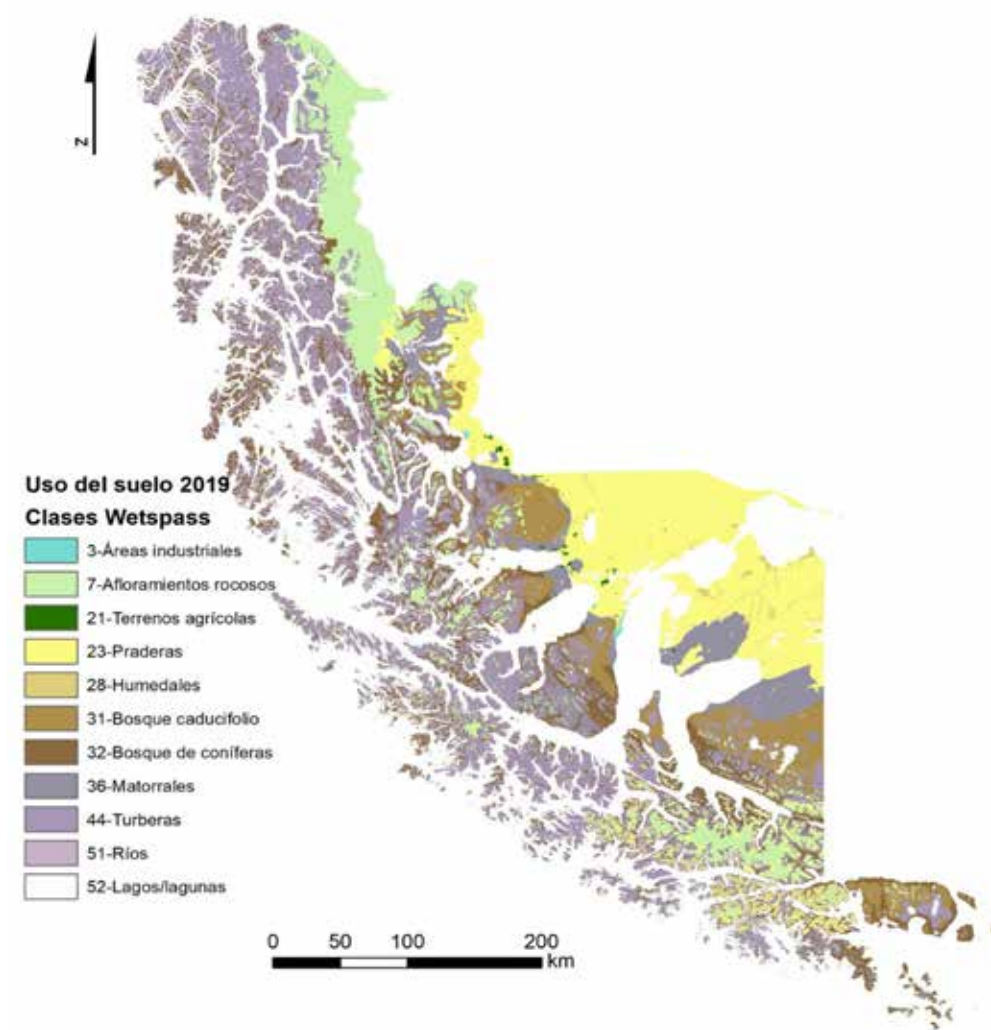


Figura 17 – Clases de WetSpass para el uso del suelo en 2019.

Para una mejor comprensión del significado de estos usos del suelo y sus parámetros, se recomienda la lectura del informe de avance: metodología del modelo y su aplicación para las cuencas seleccionadas, o los trabajos publicados por los siguientes autores: Batelaan & Smdet (2007) y Abdollahi *et al.* (2017).

La Tabla 3 presenta los atributos de las clases de uso del suelo de WetSpass para modelar la recarga. Debido a la falta de datos, específicamente de algunas variables de entrada en gran parte de la región, la zona donde DGA (2016) realizó la modelación hidrológica de los acuíferos de la Región fue considerada como áreas de calibración, que corresponde al sector de Punta Arenas (superficie de la Península Brunswick, el sector Continental Norte y el sector Tierra del Fuego).

Para las cuencas restantes se adoptaron los conjuntos de calibración según su proximidad y similitud a las cuencas de la DGA. Luego de calibrar los modelos, se concluyó que los conjuntos que generaron mejores resultados fueron los de las cuencas 125 y 128.

En la Tabla 3 se muestra el código de cuenca en la primera columna, la segunda columna muestra el código de uso de suelo de WetSpass.

Los atributos *Vegetation (VEG AREA)*, *Bare Soil (BARE AREA)*, *Impervious (IMP. AREA)* y *Open Water Area (OPENW AREA)* indican a qué componente corresponde el porcentaje de cada celda. La suma de estos componentes debe resultar en un valor igual a 1.

Tabla 3 - Parámetros considerados para cada clase¹.

Set de calibración de cuencas	CODE Código	LUSE_TYPE Tipo de uso del suelo	VEG. AREA % de área con vegetación	BARE AREA % de área sin vegetación	IMP. AREA % de área impermeable	OPENW. AREA % de área con agua	ROOT DEPTH (m) Profundidad de la raíz	LAI (-) Índice de área foliar	VEG. HEIGHT (m) Altura de la vegetación
	3	industry	0.4	0	0.6	0	0.3	2	0.12
125 y 128	7	excavation	0	1	0	0	0.05	0	0.001
	21	agriculture	0.8	0.2	0	0	0.4	4	0.6
125	23	meadow	0.9	0	0	0.1	0.1	2	0.1
128	23	meadow	0.85	0	0	0.15	0.5	4	0.6
	28	wet meadow	1	0	0	0	0.3	2	0.3
	31	deciduous forest	1	0	0	0	2	5	18
	32	coniferous forest	1	0	0	0	2	6	15
125 y 128	36	shrub	1	0	0	0	0.5	6	0.5
	44	mud flat/salt marsh	0.4	0.2	0	0.4	0.3	2	0.5
	51	navigable river	0	0	0	1	0.05	0	0
	52	lake	0	0	0	1	0.05	0	0

1. Se presentan los nombres en inglés y español para mantener la terminología original y poder identificarlos fácilmente en caso de realizar un análisis posterior en WetSpass.

2.4 Textura del suelo

La Región de Magallanes y de la Antártica Chilena es caracterizada por escasos estudios de suelos. Todavía existen algunos estudios de carácter exploratorio que permiten conocer las características generales de la edafogeografía de la zona (Luzio et al., 2010). Esta caracterización se basa entonces en información del Plan Estratégico de Gestión Hídrica (PEGH) de Punta Arenas (DGA, 2021), que contiene una recopilación de información local, basado esencialmente en el trabajo de Luzio (2010), y donde se presenta un mapeo de los suelos en la cuenca de Punta Arenas.

En la Región de Magallanes, los suelos son predominantemente de régimen de humedad ústico y temperatura frígida, mientras más al este, se va transformando en menor humedad. Los suelos ocupan terrazas medias y altas, con pendientes entre 1 a 3% y 5 a 8% en los terrenos más ondulados, presentando también terrenos de hundimiento con pendientes menores a 1%. Estas áreas han sufrido serios modelamientos del paisaje, lo que genera una variedad en los sustratos, tales como sedimentos glaciales, fluvio-glaciales, gravas redondeadas frescas y con matriz arenosa y un sedimento llamado localmente como "mazacote" característico de los suelos de la zona (Luzio et al., 2010).

En cuanto a las clases texturales, en horizontes superficiales varían entre franco limosa y franco arenosa muy fina en cambio en horizontes más profundos, éstos son mucho más variados, por el contacto directo con el sustrato basal. Pueden ser: arcillosa, arcillo arenosa, franco arcillo arenosa,

franco arcillo limosa, franco arenosa fina y franco arenosa. Existen abundantes gravas en los perfiles (Luzio et al., 2010).

La estructura dominante es la de bloques subangulares, volviéndose maciza a mayor profundidad. Horizontes orgánicos presentan mayormente estructuras granulares. La profundidad de los perfiles varía entre 60 y 120 cm, presentándose como suelos más bien delgados. Las clases de capacidad de uso varían entre III y VI y el drenaje está relacionado con la pendiente de los suelos, a menor pendiente, peor es el drenaje (Luzio et al., 2010).

La categoría "Podzoles" corresponden a los suelos dominantes, que se caracterizan por tener en su perfil un horizonte superficial constituido por turba o rico en materia orgánica y raíces. Normalmente de color negro, continuando con un horizonte mineral de textura franco arenoso fino, franco arenoso o incluso arenoso de color gris claro o gris, terminando en un horizonte franco limoso o franco arcillo limoso de color pardo fuerte o franco limoso de color pardo amarillento. Además, son suelos moderadamente profundos a delgados. El sustrato corresponde a sedimentos glaciales con gravas y piedras, o bien un esquisto cretácico (Luzio et al., 2010).

Los podzoles, en su definición, tienen una característica propia que corresponde al horizonte de eluviación que en los suelos descritos anteriormente coincide con el horizonte de color gris. Este horizonte podría estar relacionado a la presencia de materiales volcánicos, propios del pasado geológico de la región. Según algunos autores, este

horizonte de color gris también puede pertenecer a procesos de iluviación (Luzio et al., 2010).

Teniendo en cuenta lo anterior, y según la Base de Datos Armonizada de Los Suelos del Mundo (HWSD: Harmonised World Soil Database - FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2012), en la zona de estudio DGA ha identificado los siguientes tipos de suelos, de acuerdo con la clasificación de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB), identificando sus respectivas características generales (FAO/ISRIC/IUSS, 2007):

- **Cambisoles:** Suelos con por lo menos un principio de diferenciación de horizontes en el subsuelo evidentes por cambio de estructura, color, contenido de arcilla o contenido de carbonato. Son característicos de zonas que estuvieron bajo la influencia de glaciaciones durante el Pleistoceno, con material parental joven;
- **Phaeozems:** Suelos oscuros ricos en materia orgánica. Son típicos de suelos de pastizales húmedos y zonas forestales en climas moderadamente continentales;
- **Luvisoles:** Son suelos que tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial, generando un horizonte subsuperficial árgico. También presentan altas concentraciones de bases a ciertas profundidades. Se encuentran en zonas llanas o suavemente inclinadas;
- **Leptosoles:** Son suelos muy someros sobre roca continua y suelos extremadamente gravillosos y/o pedregosos. Son azonales y particularmente comunes en regiones montañosas.

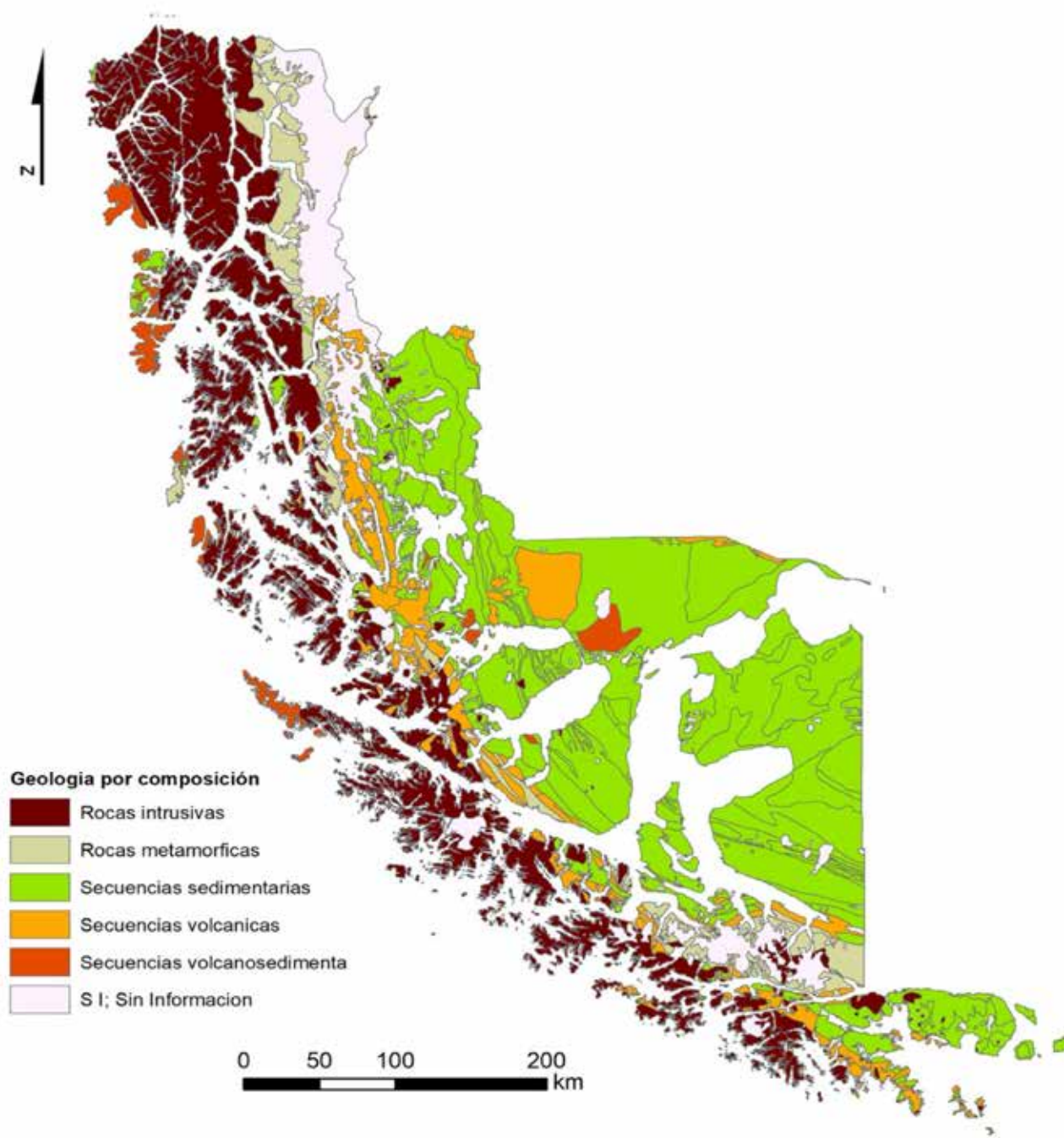


Figura 18 – Geología agrupada por tipo de composición litológica.

Sin otra información clara sobre la textura del suelo para el resto de la Región de Magallanes, se estableció una relación entre estos suelos y la geología local, con el fin de extrapolar el mapeo a toda el área de estudio. Para ello también se tuvo en cuenta el trabajo desarrollado por Casanova et al. (2013), con información sobre la textura del suelo para todo el país, y la información del mapa geológico digital de Chile (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2003).

Así, las formaciones geológicas fueron reclasificadas en texturas de suelo, en base a la información disponible y los siguientes criterios: edad geológica del terreno (Era y Periodo), y tipo de composición litológica.

Según los criterios definidos, durante la clasificación de las áreas correspondientes a las formaciones geológicas se respetó, con el mayor rigor posible, la información de DGA (2021) y Casanova et al. (2013). De esta manera, para cada formación geológica se asignó un tipo de suelo conforme con los tipos de textura de suelo. La relación establecida entre la información geológica y los suelos se describe en la Tabla 4.

Tabla 4 – Relación entre la geología y la textura del suelo.

ERA	PERIODO	GEOLOGIA	COMPOSICIÓN	SUELO ¹	COD. WETS-PASS
CENOZOICO	Paleogeno	E2c	Secuencias volcanosedimenta	clay loam	9
CENOZOICO	Paleogeno	E3	Secuencias volcánicas	silty loam	4
CENOZOICO	Paleogeno	Eg	Rocas intrusivas	silty loam	4
CENOZOICO	Neogeno	M1c	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
CENOZOICO	Neogeno	M3i	Secuencias volcánicas	clay loam	9
CENOZOICO	Neogeno	M3t	Secuencias volcánicas	clay loam	9
CENOZOICO	Neogeno	Mh	Rocas intrusivas	sandy clayl	7
CENOZOICO	Neogeno	MP1c	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
CENOZOICO	Neogeno	MP1m	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
CENOZOICO	Neogeno	Ms3i	Secuencias volcánicas	clay loam	9
CENOZOICO	Neogeno	Ms3t	Secuencias volcánicas	clay loam	9
CENOZOICO	Paleogeno	Og	Rocas intrusivas	silty loam	4
CENOZOICO	Paleogeno	OM3	Secuencias volcánicas	silty loam	4
CENOZOICO	Paleogeno	OM3t	Secuencias volcánicas	silty loam	4
CENOZOICO	Paleogeno	Pag	Rocas intrusivas	silty loam	4
CENOZOICO	Paleogeno	PE3a	Secuencias volcánicas	silty loam	4
CENOZOICO	Paleogeno	PE3i	Secuencias volcánicas	silty loam	4
CENOZOICO	Paleogeno	PEg	Rocas intrusivas	silty loam	4
CENOZOICO	Cuaternario	PI1m	Secuencias sedimentarias	clay loam	9
CENOZOICO	Neogeno	PP1r	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
CENOZOICO	Paleozoico	PTr3	Secuencias volcánicas	clay loam	9
CENOZOICO	Paleozoico	PTrg	Rocas intrusivas	sandy clayl	7
CENOZOICO	Cuaternario	Q1g	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
CENOZOICO	Cuaternario	Qa	Secuencias sedimentarias	sandy loam	3
CENOZOICO	Cuaternario	Qe	Secuencias sedimentarias	clay loam	9
CENOZOICO	Cuaternario	Qf	Secuencias sedimentarias	sandy loam	3
MEZOZOICO	Jurásico	J2m	Secuencias volcanosedimenta	sandy loam	3
MEZOZOICO	Jurásico	J3i	Secuencias volcánicas	sandy loam	3
MEZOZOICO	Jurásico	Ji1m	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2

ERA	PERIODO	GEOLOGIA	COMPOSICIÓN	SUELO ¹	COD. WETS-PASS
MEZOZOICO	Jurásico	Jig	Rocas intrusivas	clay loam	9
MEZOZOICO	Jurásico	JK1c	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
MEZOZOICO	Jurásico	JK1m	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
MEZOZOICO	Jurásico	JK3	Secuencias volcánicas	clay loam	9
MEZOZOICO	Jurásico	Js2c	Secuencias volcanosedimenta	sandy loam	3
MEZOZOICO	Jurásico	Jsg	Rocas intrusivas	clay loam	9
MEZOZOICO	Cretácico	Ki1m	Secuencias sedimentarias	loam	5
MEZOZOICO	Cretácico	Ki2c	Secuencias volcanosedimenta	clay loam	9
MEZOZOICO	Cretácico	Ki2m	Secuencias volcanosedimenta	clay loam	9
MEZOZOICO	Cretácico	Kia2	Secuencias volcanosedimenta	loam	5
MEZOZOICO	Cretácico	Kia3	Secuencias volcánicas	loam	5
MEZOZOICO	Cretácico	Kiag	Rocas intrusivas	clay loam	9
MEZOZOICO	Cretácico	Kibg	Rocas intrusivas	clay loam	9
MEZOZOICO	Cretácico	Ks2c	Secuencias volcanosedimenta	loam	5
MEZOZOICO	Cretácico	Ks3i	Secuencias volcánicas	loam	5
MEZOZOICO	Cretácico	Ksg	Rocas intrusivas	clay loam	9
MEZOZOICO	Cretácico	Ksh	Rocas intrusivas	clay loam	9
MEZOZOICO	Cretácico	KT2	Secuencias volcanosedimenta	loam	5
MEZOZOICO	Triásico	TrJ1c	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
MEZOZOICO	Triásico	TrJ3	Secuencias volcánicas	sandy loam	3
MEZOZOICO	Triásico	TrJg	Rocas intrusivas	clay loam	9
PALEOZOICO	Paleozoico	CP1	Secuencias sedimentarias	clay loam	9
PALEOZOICO	Paleozoico	CP3	Secuencias volcánicas	clay loam	9
PALEOZOICO	Paleozoico	CPg	Rocas intrusivas	sandy clayl	7
PALEOZOICO	Paleozoico	DC1	Secuencias sedimentarias	clay loam	9
PALEOZOICO	Paleozoico	DC4	Rocas metamórficas	silty clay	11

1. Se presentan los suelos en inglés para mantener la terminología original y poder identificarlos fácilmente en caso de realizar un análisis posterior en WetSpas.

Un análisis rápido de los diferentes tipos de textura muestra que los suelos más comunes en toda la región son los suelos relativamente francos, de composición volcánica o vulcano-sedimentaria (sandy loam), suelos arcillo-arenosos (loamy sand), y suelo compuesto principalmente de arena y limos (Loam). El área ocupada por cada tipo de textura de suelo se muestra en la Figura 19.

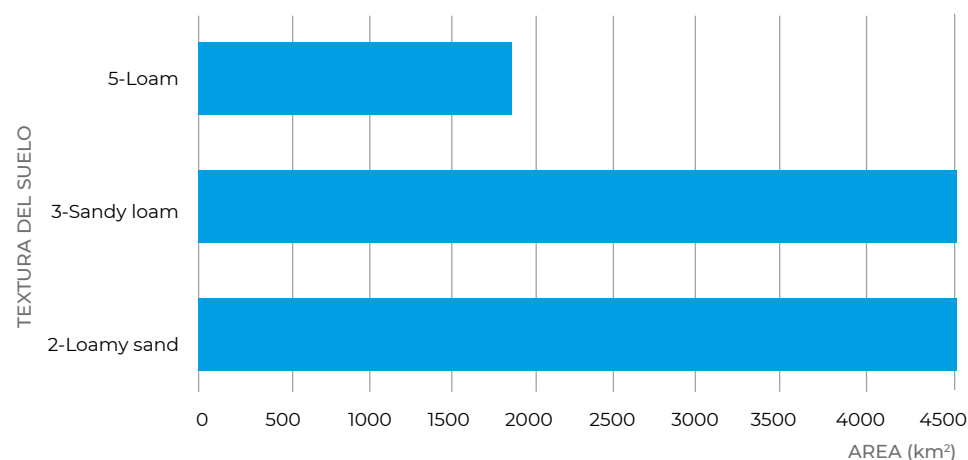


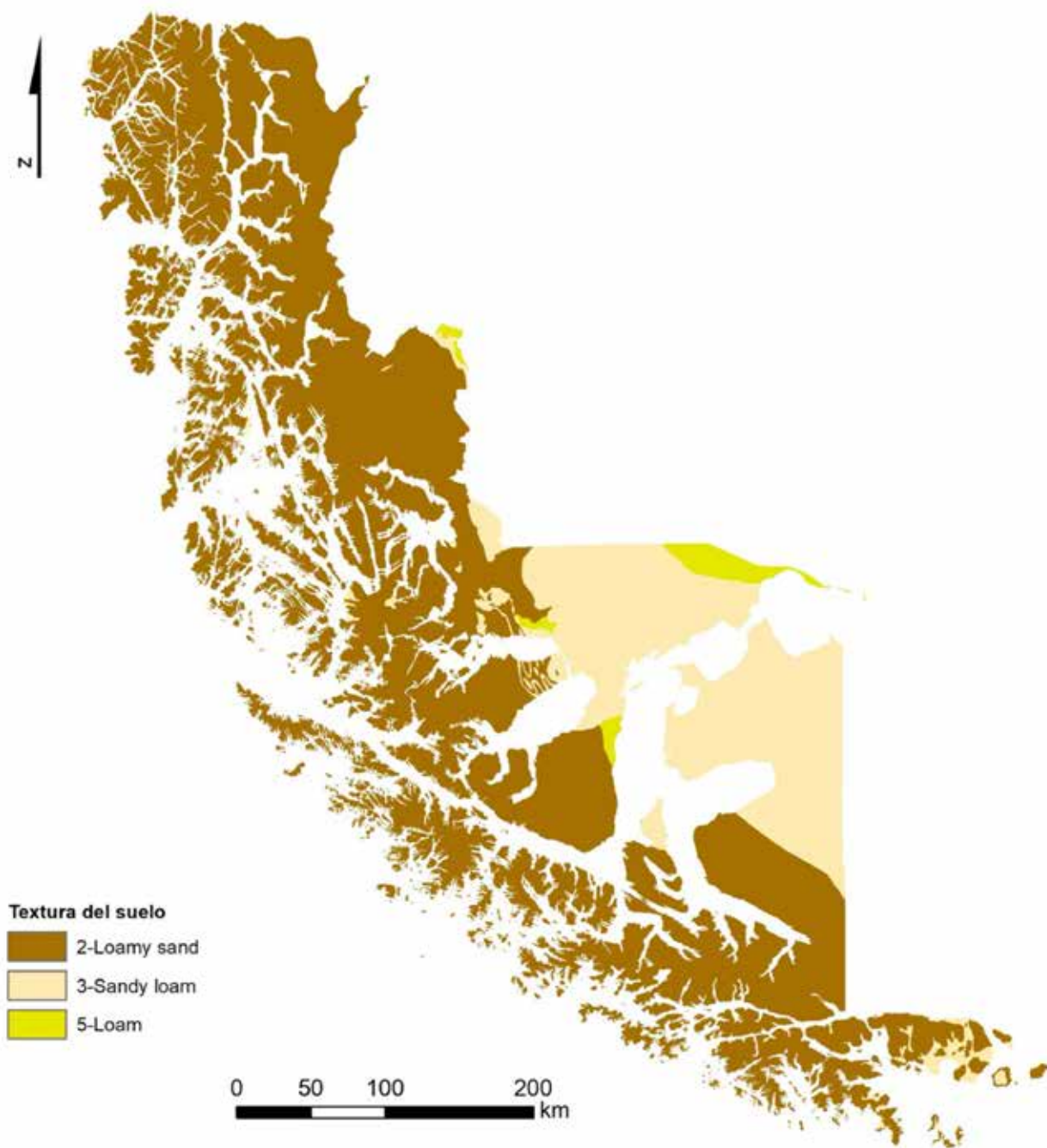
Figura 19 Área ocupada por los diferentes tipos de suelo, con los nombres de las clases originales de WetSpass.

Los parámetros utilizados en las simulaciones del modelo WetSpass para cada tipo de suelo en toda la Región de Magallanes se describen en la Tabla 5. La descripción de cada parámetro para el cálculo de la recarga está detallada en Batelaan & De Smedt (2007) y Abdollahi *et al.* (2017).

Tabla 5 - Parámetros considerados¹.

CODE	SOIL	FIELDCA-PAC	WILTINGPNT	PAW	RESIDUALWC	A1	EVAPODEPTH
2	loamy sand	0.15	0.07	0.08	0.035	0.47	0.05
3	sandy loam	0.21	0.09	0.12	0.041	0.44	0.05
5	Loam	0.25	0.12	0.13	0.027	0.37	0.05

1. Se presentan los suelos en inglés para mantener la terminología original y poder identificarlos fácilmente en caso de realizar un análisis posterior en WetSpass.



De esta manera, de acuerdo con la metodología presentada, resulta el mapa de texturas de suelo para toda la Región de Magallanes presentado en la Figura 20.

2.5 Precipitación

La información pluviométrica considerada para el estudio se basó en las series de precipitación registradas en las estaciones Explorador Climático (CR)², lo que permite trasladar un mapa de precipitación mensual para todo el país. (CR)² es una herramienta que permite visualizar datos climáticos y fue desarrollada por el Centro de Ciencia y Resiliencia del Clima e implementada por Meteodata (<https://explorador.cr2.cl>). Esta herramienta contiene una base de datos compilada muy robusta, que se completa y actualiza de acuerdo con los datos observados en las estaciones climatológicas chilenas administradas por diversas entidades. Los datos observados corresponden a datos recolectados in situ o remotamente, siendo estos datos obtenidos a través de otros exploradores de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y la Dirección General de Aguas (DGA).

Utilizando la información del (CR)² se obtuvo un mapa de precipitación mensual para toda la Región de Magallanes, con base en datos observados entre 1940 y 2022. En la Figura 21 se muestran las estaciones de lluvia con datos. Como se puede observar, las estaciones se distribuyen prácticamente por toda la región, exceptuando en las islas costeras.

Wetspass calcula la recarga anual, por lo que fue necesario transformar el mapa de precipitación promedio mensual en un mapa de precipitación promedio anual.

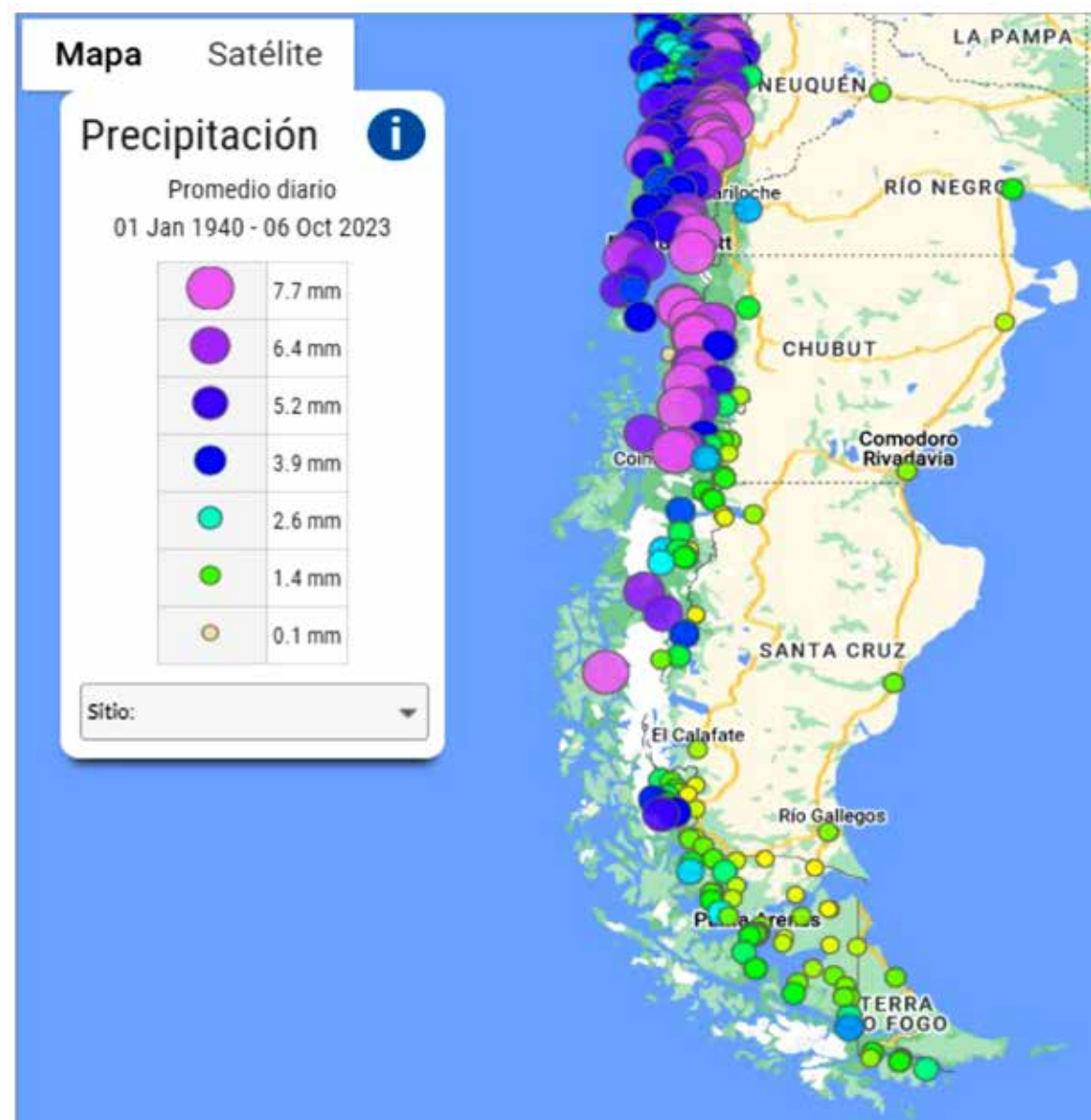
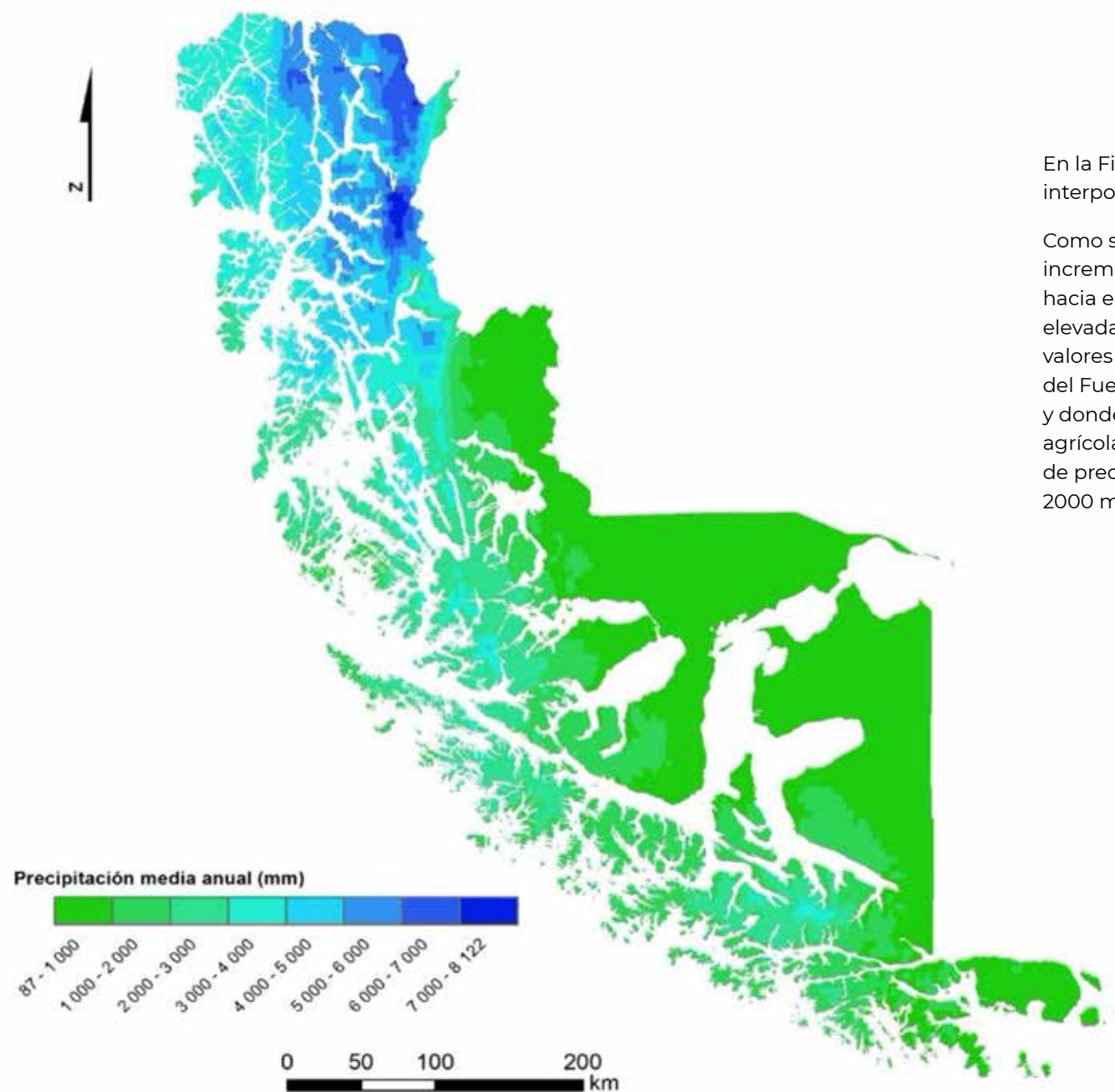


Figura 21 – Ubicación de las estaciones de precipitación en el Explorador Climático (CR)² en la Región de Magallanes y Antártica.



En la Figura 22 se muestra el resultado de la interpolación de los valores promedios anuales.

Como se puede observar en la figura, ocurre un incremento de la precipitación promedio anual hacia el norte, donde se presentan las áreas más elevadas. En esta zona, la precipitación alcanza valores superiores a 8000 mm. En la zona de Tierra del Fuego, región con mayor densidad poblacional, y donde se ha observado un aumento de áreas agrícolas e industriales en los últimos años, los valores de precipitación son más bajos, en el rango de 80 a 2000 mm/año.

Figura 22 – Valores finales de precipitación promedio anual para el periodo 1940 – 2022.

En la Figura 23 se muestra el histograma de los valores estimados donde se verifica que la clase más frecuente se sitúa en el rango de 87 a 653 mm.

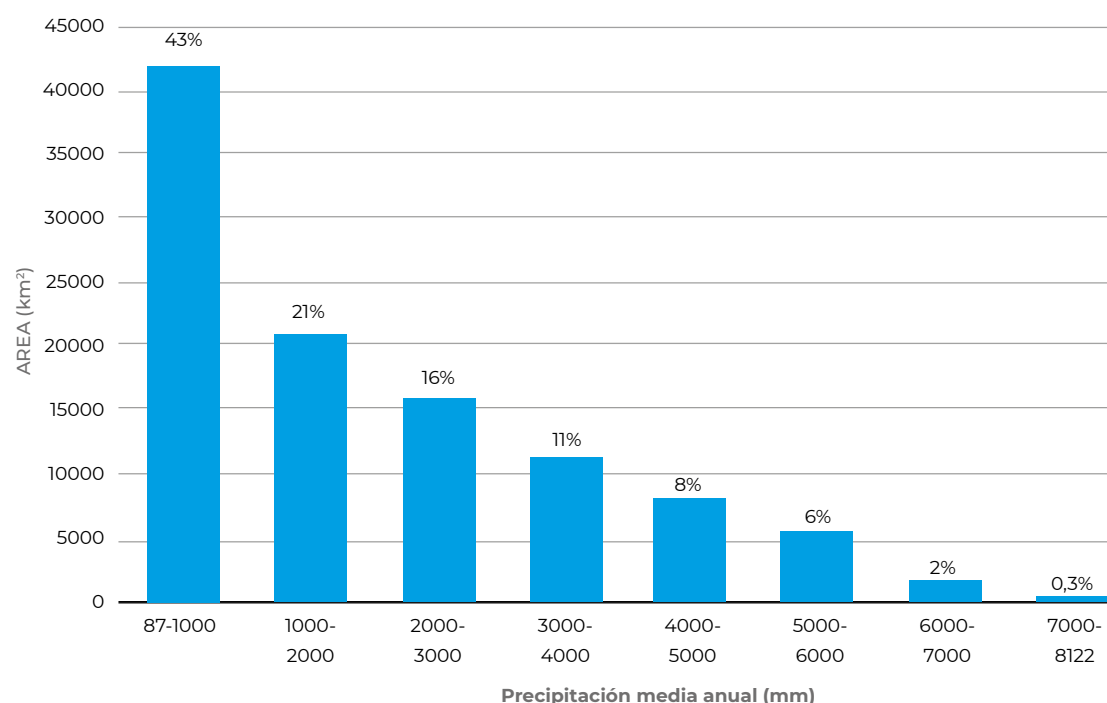


Figura 12 – Frecuencia de clases de pendiente del terreno.

2.6 Temperatura

Al igual que con las precipitaciones, los valores de temperatura considerada se basaron en las series de temperatura registradas en las estaciones Explorador Climático (CR)², lo que permite trasladar un mapa de temperatura promedio anual para todo el país. La herramienta contiene una base de datos compilada muy robusta, que se completa y actualiza de acuerdo con los datos observados en las estaciones climatológicas chilenas administradas por diversas entidades. Los datos observados corresponden a datos recolectados in situ o remotamente, siendo estos datos obtenidos a través de otros exploradores de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y la Dirección General de Aguas (DGA).

Utilizando (CR)² se obtuvo un mapa de temperatura anual para toda la Región de Magallanes, con base en datos observados entre 1940 y 2022. En la Figura 24 se muestran las estaciones de temperatura con datos. Las estaciones se distribuyen por toda la región, exceptuando una vez más las islas costeras. El mapa con los valores interpolados de la temperatura promedio anual se representa en la Figura 25.

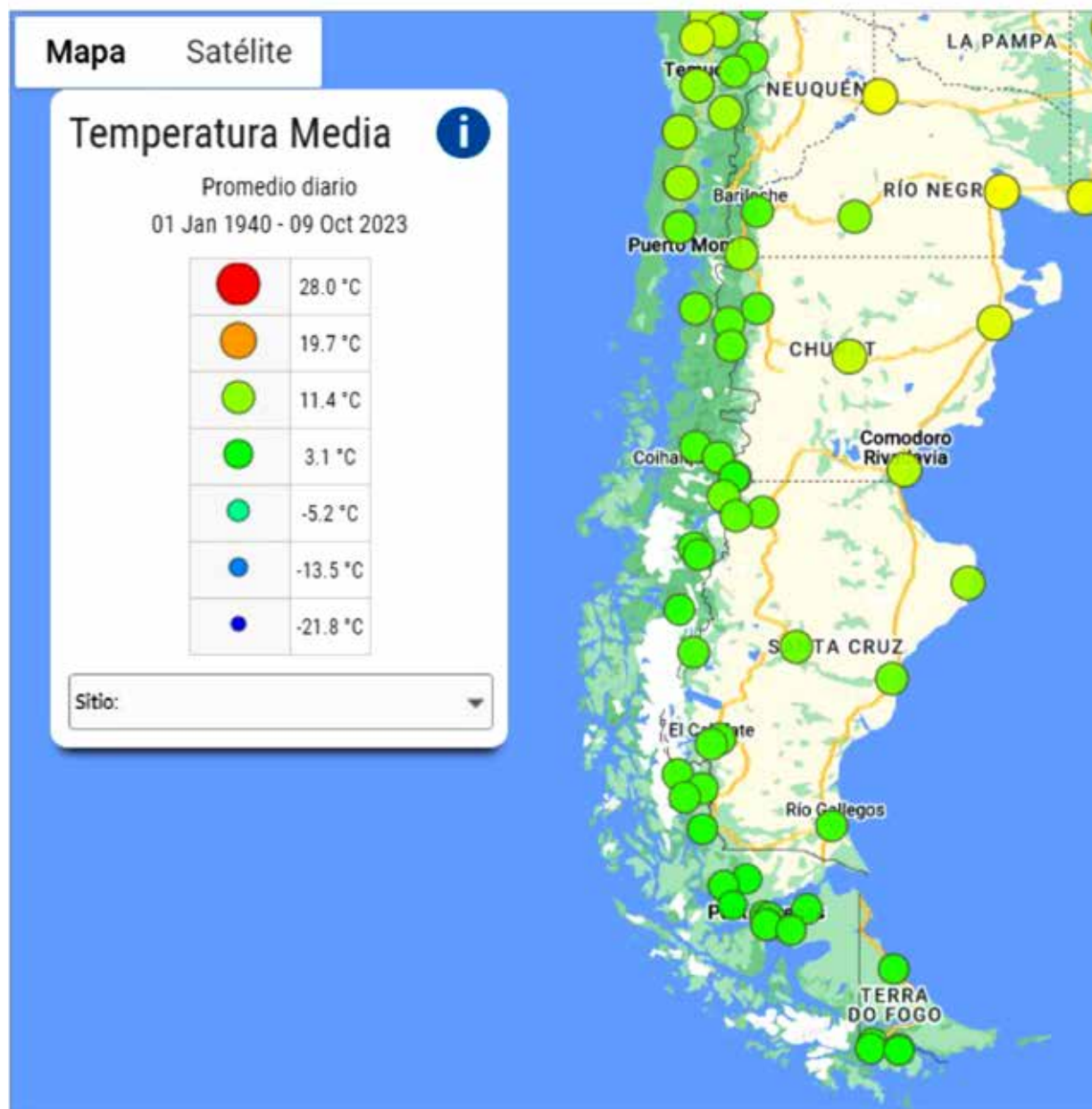


Figura 24 – Localización de las estaciones meteorológicas (temperatura) utilizadas en el estudio.

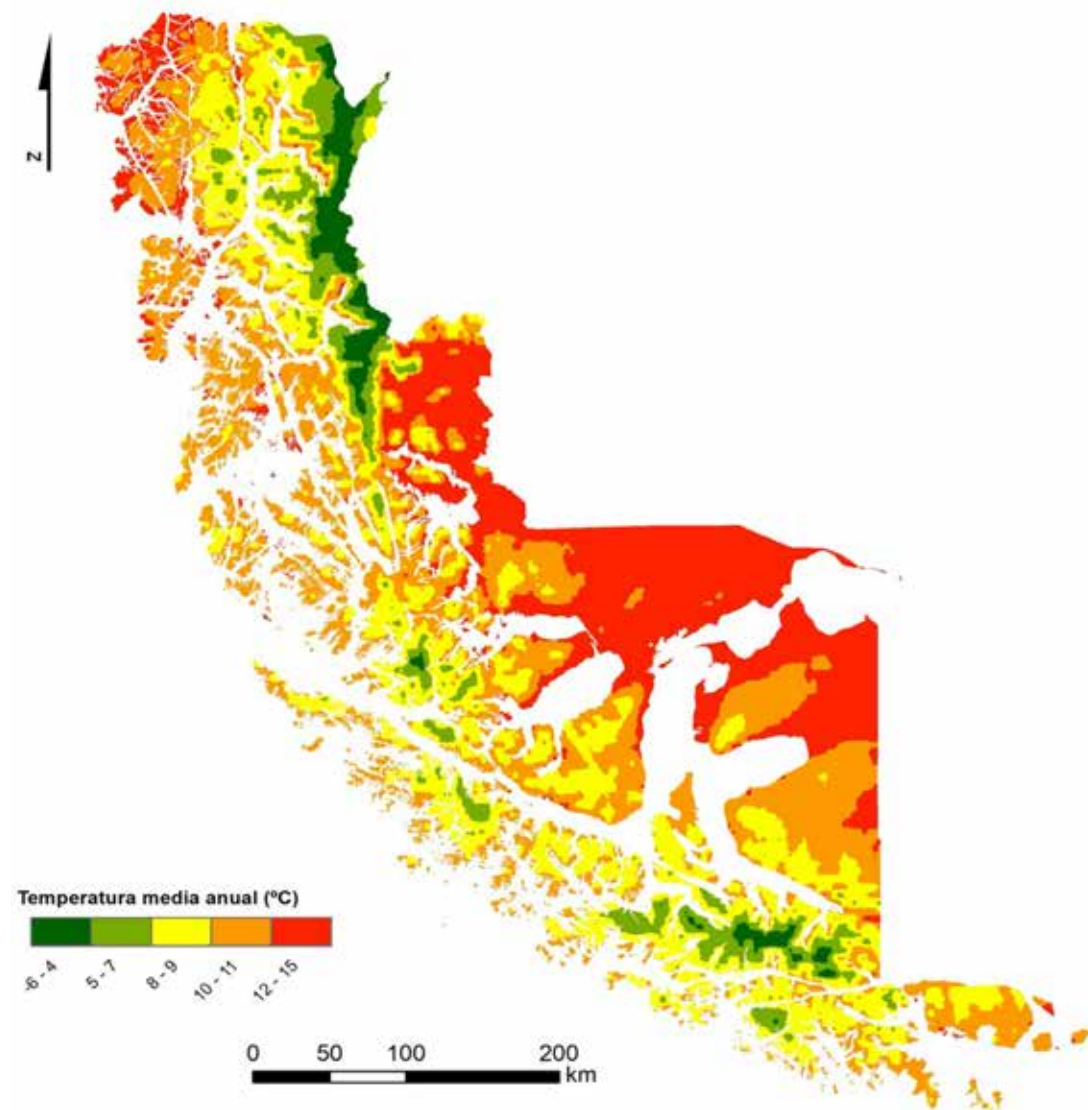


Figura 25 – Temperatura promedio anual en la Región de Magallanes.

El mapa muestra que los valores de temperatura son más elevados en la zona central de la cuenca, en la Vertiente Continental, Punta Arenas y Tierra del Fuego, con valores del orden de los 12 a 15°C. Los valores más bajos se encuentran en las zonas más altas, al noreste de la cuenca, con valores del orden de los -6 a 4°C.

Según el análisis de frecuencia de clases representado en la Figura 26, el rango de valores que presenta mayor recurrencia son los 10 a 11°C que se dan, principalmente, en la zona central, sur e islas costeras de toda la región.

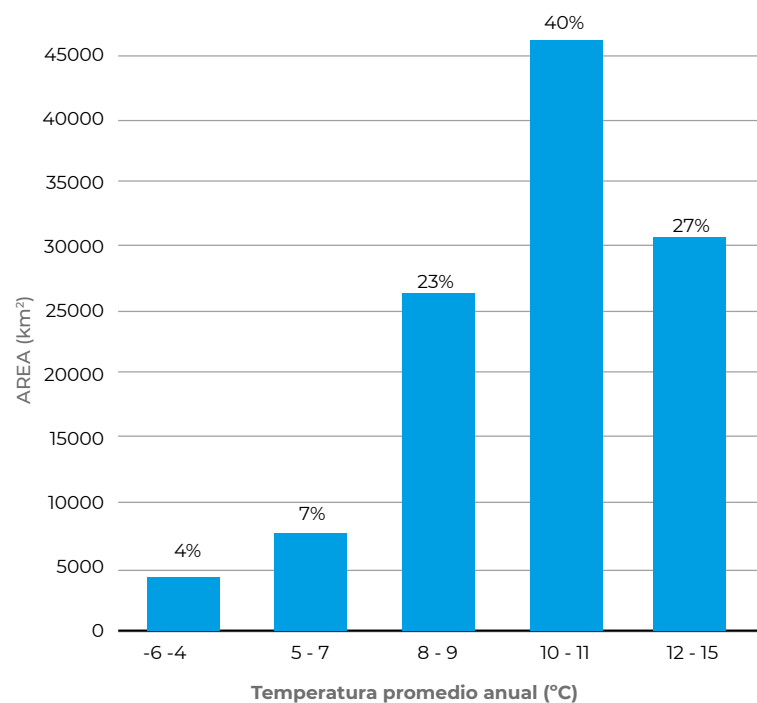
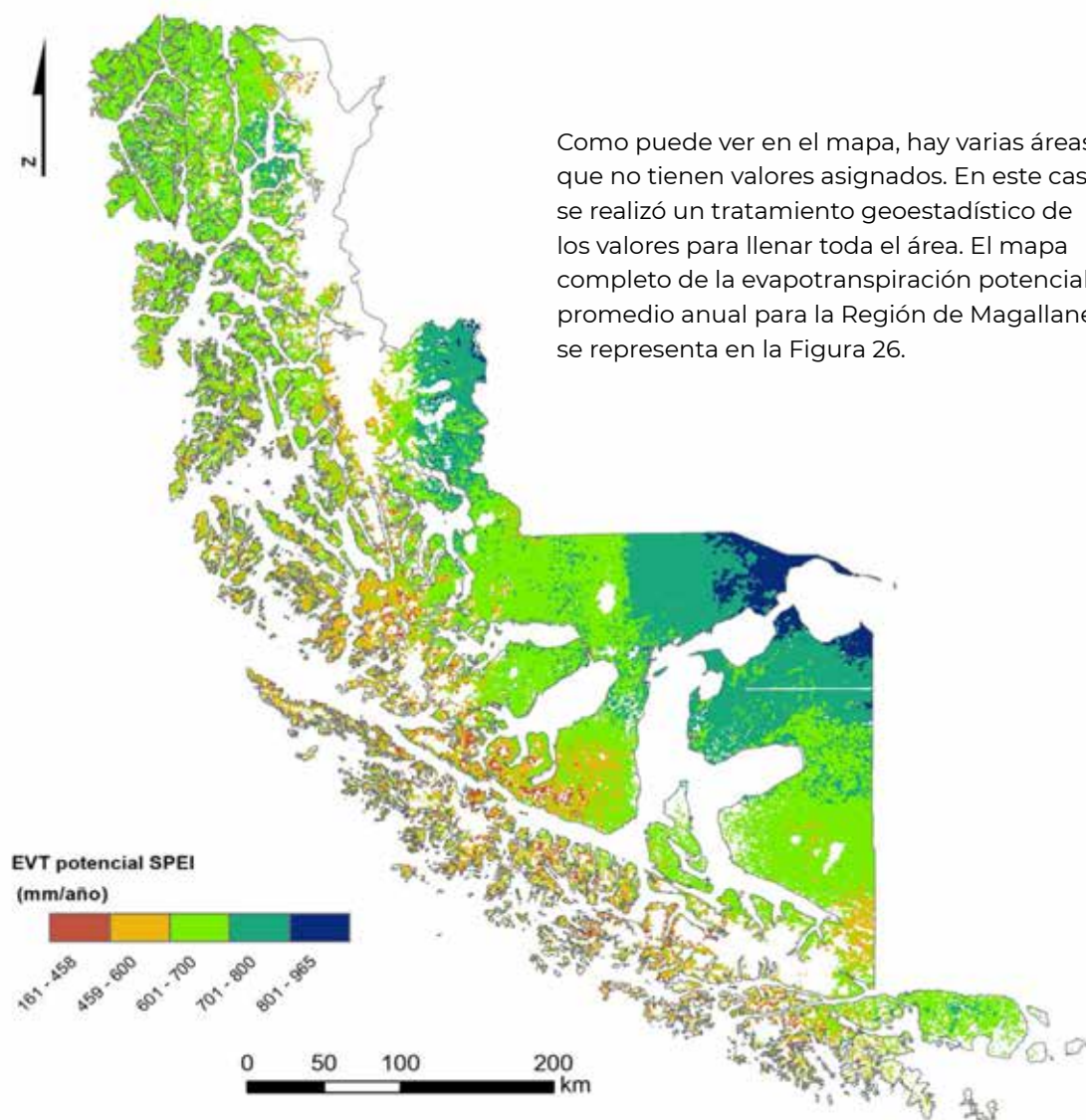


Figura 26 – Histograma de valores promedio de temperatura.

2.7 Evapotranspiración potencial

El mapa de evapotranspiración potencial para la Región de Magallanes fue obtenido a partir de la aplicación del Índice de Evapotranspiración de Precipitación Estandarizada (SPEI, por sus siglas en inglés), el cual fue calculado para el periodo 2000-2014 a partir de los productos satelitales CHIRPS V2 y MOD16 para la precipitación (Pp) y evapotranspiración (ET) respectivamente (Galleguillos et al, 2017). De acuerdo con los mismos autores, la Región de Magallanes presenta en su zona norte una ausencia de datos dada la condición de nubosidad constante y de campos de hielos que cubren extensas partes de la región. Dentro de las cuencas que se encuentran en la región hay niveles bajos de déficit, siendo la cuenca de Ensenada de Torino y Punta Dugeness (cod. 1205), la que presenta las mayores magnitudes de sequía moderada, así como también de magnitud severa.

El mapa para la evapotranspiración potencial para el quinquenio 2000-2014 está representado en la Figura 27.



Como puede ver en el mapa, hay varias áreas que no tienen valores asignados. En este caso, se realizó un tratamiento geoestadístico de los valores para llenar toda el área. El mapa completo de la evapotranspiración potencial promedio anual para la Región de Magallanes se representa en la Figura 26.

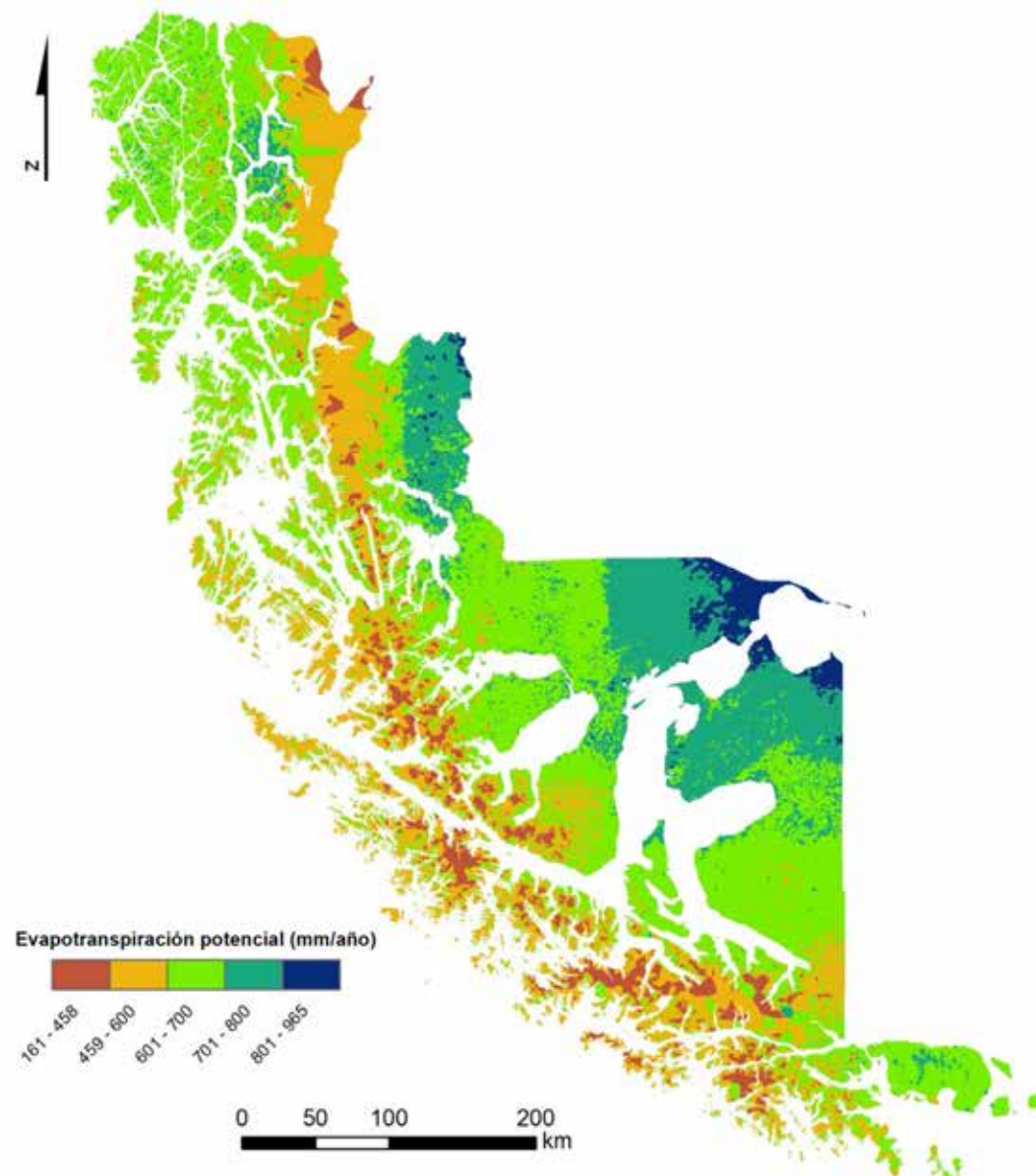


Figura 27 -- Evapotranspiración potencial promedio anual para la región (fuente: Galleguillos et al., 2019).

Figura 28 -- Mapa completo de evapotranspiración potencial promedio anual para la Región de Magallanes.

De acuerdo con Galleguillos et al. (2019), el índice de déficit hídrico basado en la demanda de la atmósfera (ETP), muestra una serie temporal sumamente variable con 6 periodos de déficit hídrico en verano-otoño 2002, alcanzando valores de sequía extrema, verano 2005 con déficit moderado, otoño 2008, verano 2009 y primavera-verano 2011 y primavera 2012. Por otro lado, se registra un periodo de normalidad desde el 2012 hasta fines del 2014. Este comportamiento nos indica la ausencia de una tendencia marcada al déficit, lo que estaría obedeciendo a patrones naturales de déficit hídricos periódico, los que usualmente son acompañados por periodos de superávit en los años 2001, 2003, 2006-2008, 2013-2014.

Se optó por utilizar un mapa con valores promedio, donde las tasas de radiación solar son representativas de los valores anuales, para correr el modelo para el cálculo de la recarga en el escenario con el promedio anual de las condiciones hidrológicas.

Según el análisis de frecuencia de clases mostrado en la Figura 29, el rango de valores que presenta mayor recurrencia corresponde al intervalo de 600-700 mm/año, con mayor presencia en la zona centro y norte. Sin embargo, cabe señalar que, en general, los valores de evapotranspiración potencial son moderadamente bajos y con gran representatividad en toda la cuenca. Este aspecto se observa en la misma figura, y donde se aprecia también que existen algunas áreas con valores abajo de 458 mm/año a lo largo de la cordillera de los Andes.

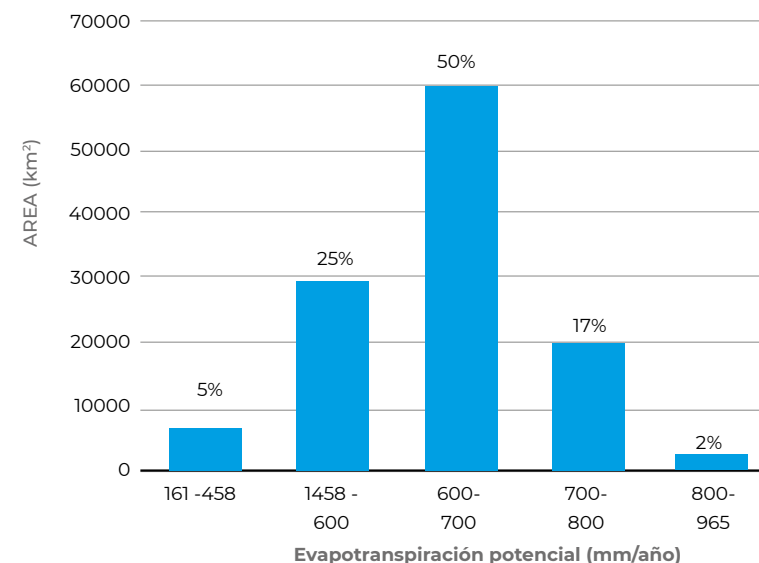


Figura 29 – Clases de frecuencia de evapotranspiración potencial promedio anual.

2.8 Velocidad del viento

Para obtener el mapa de velocidad del viento se utilizó el Energy Explorer del Ministerio de Energía de Chile (<https://eolico.minenergia.cl/sig>). Esta herramienta permite la descarga y visualización de información sobre el recurso eólico, información que resulta de modelación numérica. Los mapas de viento dan como resultado datos promedio anuales simulados independientes de las estaciones meteorológicas locales. El modelo numérico basado en la simulación de valores es el Weather Research and Forecasting (WRF), el cual fue desarrollado por el National Center for Atmospheric Research (NCAR), en los Estados Unidos de América. Los datos de viento del modelo WRF tienen una resolución de 1 kilómetro y contienen datos verticales de hasta 120 metros de altura. El mapa seleccionado para el cálculo de la recarga de la Región de Magallanes fue el mapa de las simulaciones realizadas para 2015 con una altura de 10 metros, que se puede ver en la Figura 29.

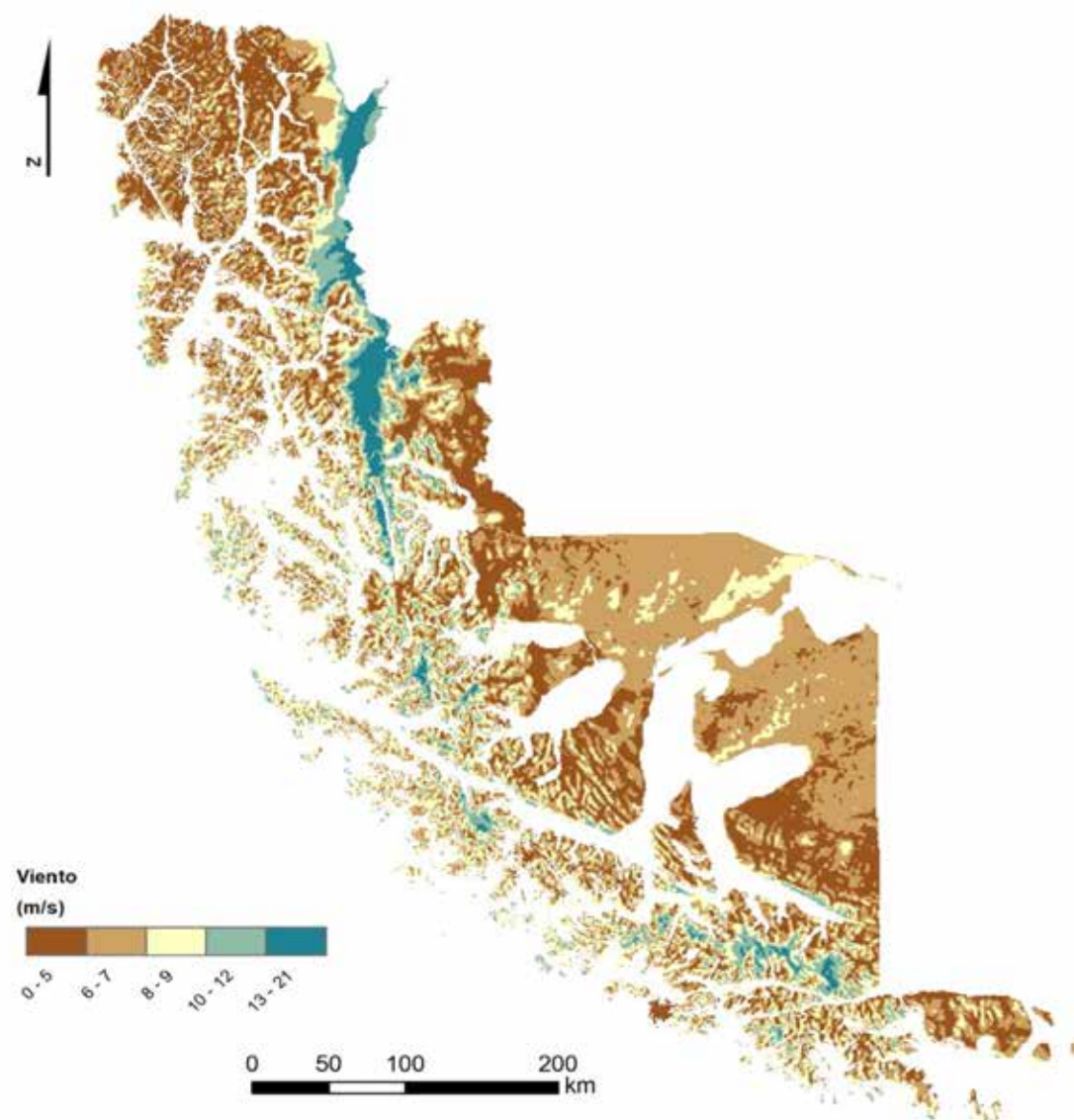


Figura 30 – Mapa de velocidad del viento (m/s).

En la Figura 31 se observan las frecuencias de clases del mapa de velocidad del viento. Las clases más recurrentes son las dos que tienen velocidad del viento entre 5 a 7 m/s, asociadas a las zonas centro de la cuenca. La zona con mayores clases de viento se encuentran en las zonas más altas de la región.

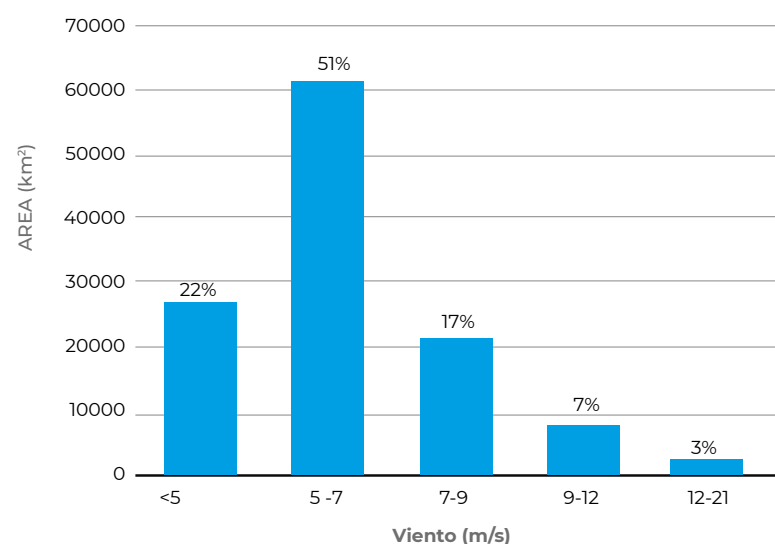


Figura 31 – Clases de frecuencia para la velocidad del viento.

2.9 Profundidad del nivel piezométrico

La elaboración del mapa de profundidades del nivel piezométrico en la región ha dependido esencialmente de datos del informe de la DGA (2016), donde se realiza una actualización de la información y modelación hidrológica hídrica de la Región de Magallanes y la Antártida. Este estudio realizó un relevamiento de 195 pozos de agua subterránea, en las comunas de Laguna Blanca, Punta Arenas, Porvenir, Primavera y San Gregorio, ubicados fundamentalmente en la Península de Brunswick (Punta Arenas), zona continental norte y la “Isla de Tierra del Fuego”. De estos pozos, fue posible procesar y analizar para el presente estudio mediciones de nivel del agua en 158 pozos, de los cuales alrededor de 30 solo tenían indicación de que el nivel era Surgente o Superficial.

Es importante mencionar que estos datos fueron obtenidos en un corto periodo de tiempo, entre los meses de noviembre de 2014 y enero de 2015, por lo que están sujetos a fuertes limitaciones espaciotemporales, con muchos vacíos en cuanto al territorio restante. Debido a la escasez de datos en otras zonas de la Región de Magallanes, se estudió la relación entre el nivel del agua y la topografía en las zonas donde se dispone de datos, con el fin de extrapolar los valores del nivel del agua para las zonas restantes.

En un primer análisis de la información se observó una relación significativa entre el nivel piezométrico¹ y la altitud, sin embargo el reducido número de piezómetros constituye un factor de alta incertidumbre que no pudo verificarse con datos de campo en zonas sin datos.

¹. Nivel piezométrico es la elevación del agua en un pozo en relación con una superficie horizontal especificada (datum de elevación) como el nivel del mar.

En la Figura 32 se muestran las relaciones entre piezometría y altitud para los datos disponibles. Al tratarse de muy buena correlación, la relación se dio por válida para las áreas de la Península de Brunswick (Punta Arenas), zona continental norte y la "Isla de Tierra del Fuego", y fue considerada para representar la profundidad del nivel piezométrico para toda la región.

En la Figura 33 se muestra la profundidad del nivel piezométrico utilizada como insumo inicial para el modelo WetSpass.

Debido a la escasez de los datos, no fue posible evaluar la tendencia temporal del nivel piezométrico.

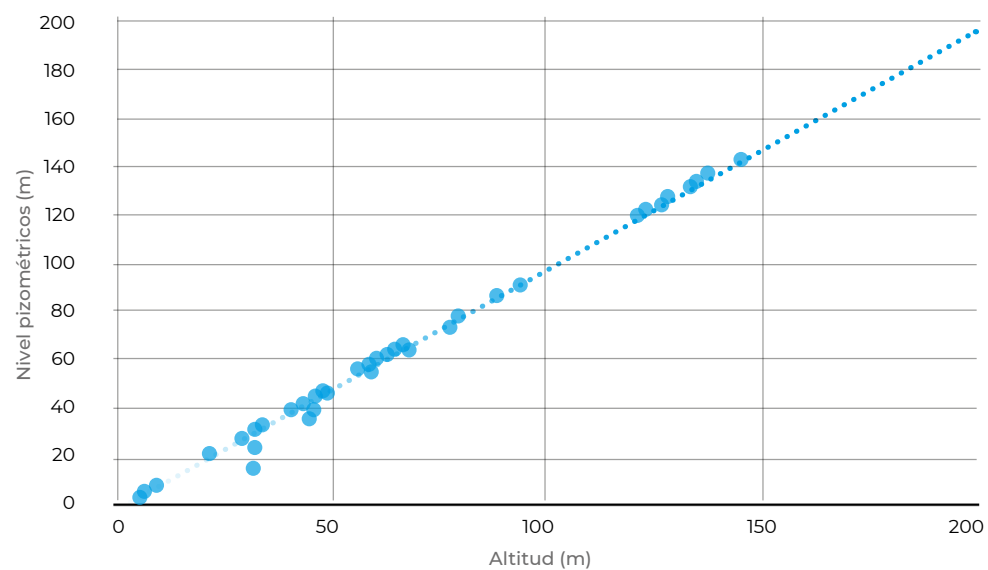


Figura 32 – Relación entre la altitud y el nivel piezométrico.

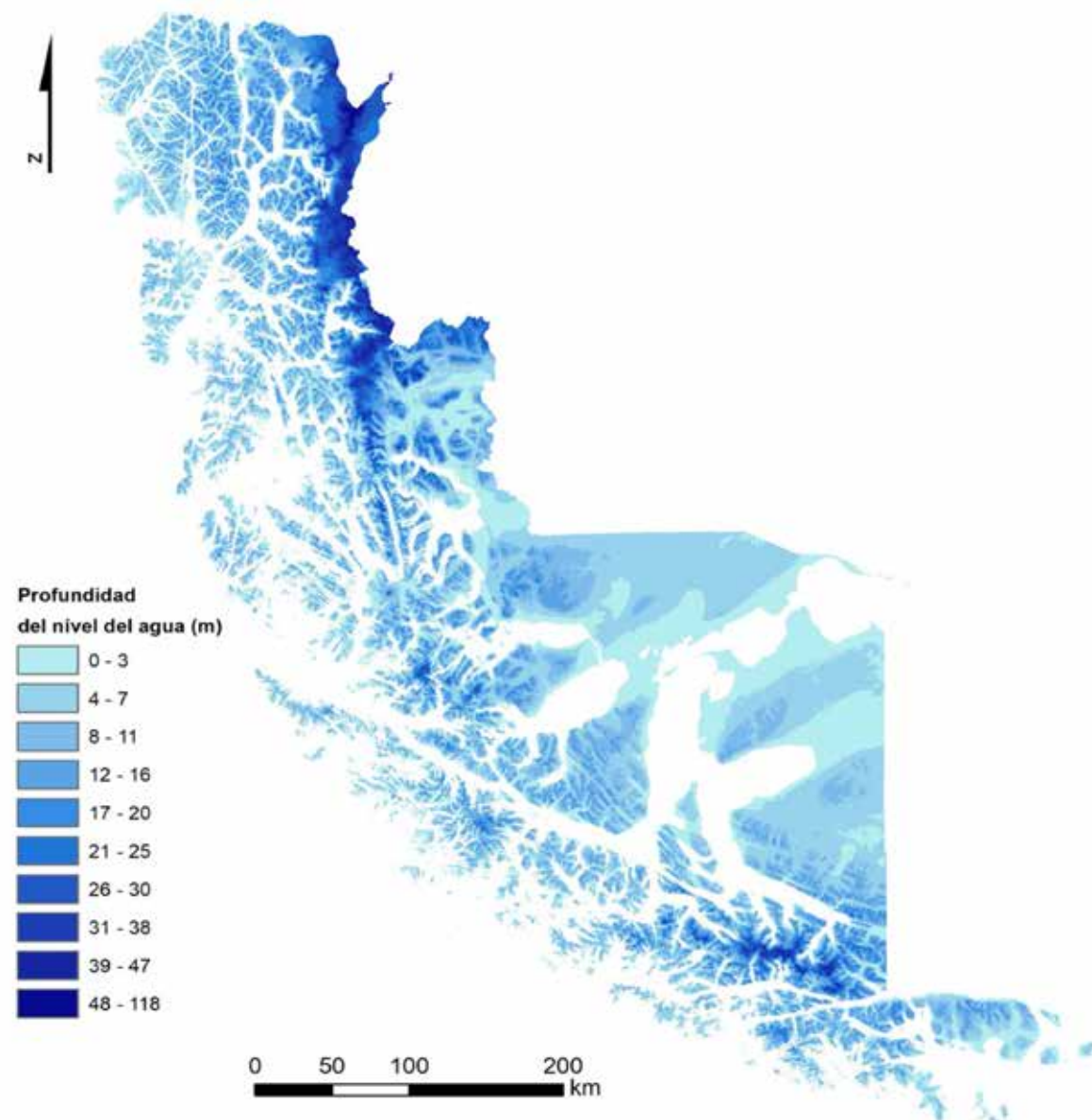


Figura 33 – Profundidad del nivel piezométrico en la Región de Magallanes.

Según los objetivos de este trabajo, se aplica el modelo WetSpass a la Región de Magallanes para obtener un mapa de la distribución espacial de la recarga media anual. Para esto, se tuvo en cuenta que el modelo sería resultado de la simulación a partir de mapas con valores promedio anuales de las variables de entrada.

3.1 Suposiciones del modelo

Después de analizar la información disponible, se fijó una resolución de 30x30 m para el modelo del presente trabajo. Todos los mapas fueron convertidos a esta resolución. Como se utilizaron varios modelos digitales del terreno para cubrir toda la superficie de la cuenca, se prestó especial atención al proceso de unión de éstos para evitar la pérdida de datos, así como errores en la compilación de esta información. Con este objetivo se definió un área rectangular con la siguiente extensión (coordenadas WGS_1984_UTM_Zona_19S):

- Arriba: 4621346.99 m
- Izquierda: -16332.04 m
- Derecha: 693107.96 m
- Abajo: 3801896.99 m

Utilizando esta referencia espacial y la misma resolución en todos los mapas, se garantizó la homogeneidad de la información, generando archivos raster con el mismo número de filas y columnas para todos los insumos. En este caso, todos los mapas incorporados al modelo WetSpass tenían 23648 filas y 27315 columnas.

3.2 Calibración

El proceso de calibración tuvo en cuenta la información relativa a la recarga de aguas subterráneas disponible en el Actualización de Información y Modelación Hidrológica Acuíferos de la XII Región, de Magallanes y la Antártica, Informe Definitivo Etapa II (DGA, 2016). Este informe presenta los recursos subterráneos sostenibles (recarga media anual de los acuíferos) en las cuencas del Continental Norte, Punta Arenas y Tierras del Fuego. Por esto, fueron las cuencas consideradas para el proceso de calibración.

Además de la recarga, se consideran también los valores de la escorrentía superficial y de la evapotranspiración real en lo proceso de calibración del WetSpass.

Durante el proceso de calibración se ajustaron los parámetros relativos al uso y tipo del suelo, así como los parámetros: coeficiente de rugosidad de Manning (coeficiente de rugosidad de la superficie relacionado con el uso del suelo), α (para el cálculo de Ch – un coeficiente que presenta las condiciones de humedad del suelo) y el coeficiente LP (un parámetro de calibración adimensional que reduce la evapotranspiración potencial en función de la humedad del suelo).

En la Tabla 6 se muestran los resultados finales del proceso de calibración. Como se verifica, el valor calibrado en la cuenca “Costeras entre Lag. Blanca(inc), Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes” fue próximo al valor propuesto por la DGA. En las restantes dos cuencas los valores de recarga modelados son considerablemente inferiores. Todavía el porcentaje de precipitación que contribuye para la recarga de estas dos cuencas es idéntica a la cuenca con los mejores datos de calibración. Además, los valores modelados de escorrentía superficial y evapotranspiración real son similares a los valores de base.

Tabla 6 – Recarga promedia anual por cuenca en la Región de Magallanes en las cuencas de calibración.

Cod Cuenca	Enfoque	Recarga DGA (mm/año)	Recarga promedio 2019 (mm/año)
125	Costeras entre Lag. Blanca(inc), Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes	48	50
126	Vertiente del Atlántico: Continental Norte	12	43
128	Tierras del Fuego	17	39

4.1 Impacto por cambios en el uso del suelo

4.1.1 Recarga

La aplicación del modelo WetSpass para los años 1995 y 2019 permitió conocer los impactos que los cambios en el uso del suelo provocaron en la recarga. Las simulaciones se llevaron a cabo teniendo en cuenta toda la información previamente utilizada para la calibración del modelo, con la excepción del mapa de uso del suelo.

En la Figura 34 se muestra la recarga calculada a partir del uso del suelo en 1995. Como se observa en los resultados obtenidos durante el proceso de calibración del modelo, las áreas con mayor recarga se encuentran asociadas a áreas de bosques caducifolios, coníferos y matorrales. Las principales zonas donde no se produce recarga están relacionadas con las mayores pendientes y zonas urbanas e industriales. En el área metropolitana de Porvenir y Punta Arenas se observa una pequeña zona donde la recarga es bastante baja. Esto se debe a la impermeabilización de los suelos en las áreas metropolitanas. Las zonas del sur y norte tienen valores de recarga bajos, ya que la pendiente es bastante alta y hay nieve en la zona (cordillera de los Andes). El modelo WetSpass no modela estas áreas con nieve, ya que no es capaz de modelar suelos de “permafrost”, solo modela el deshielo y la infiltración de agua.

La simulación con el uso del suelo de 2019 (Figura 35) mostró que los valores no cambian significativamente, con excepción de algunas áreas convertidas a terrenos agrícolas durante el periodo analizado (1995 a 2019). Esta variación del uso del suelo provocó una alteración en la distribución de la recarga, principalmente en Punta Arenas y Continental Norte.

En anexo se presentarán los mapas de recarga con resolución a nivel de cuencas.

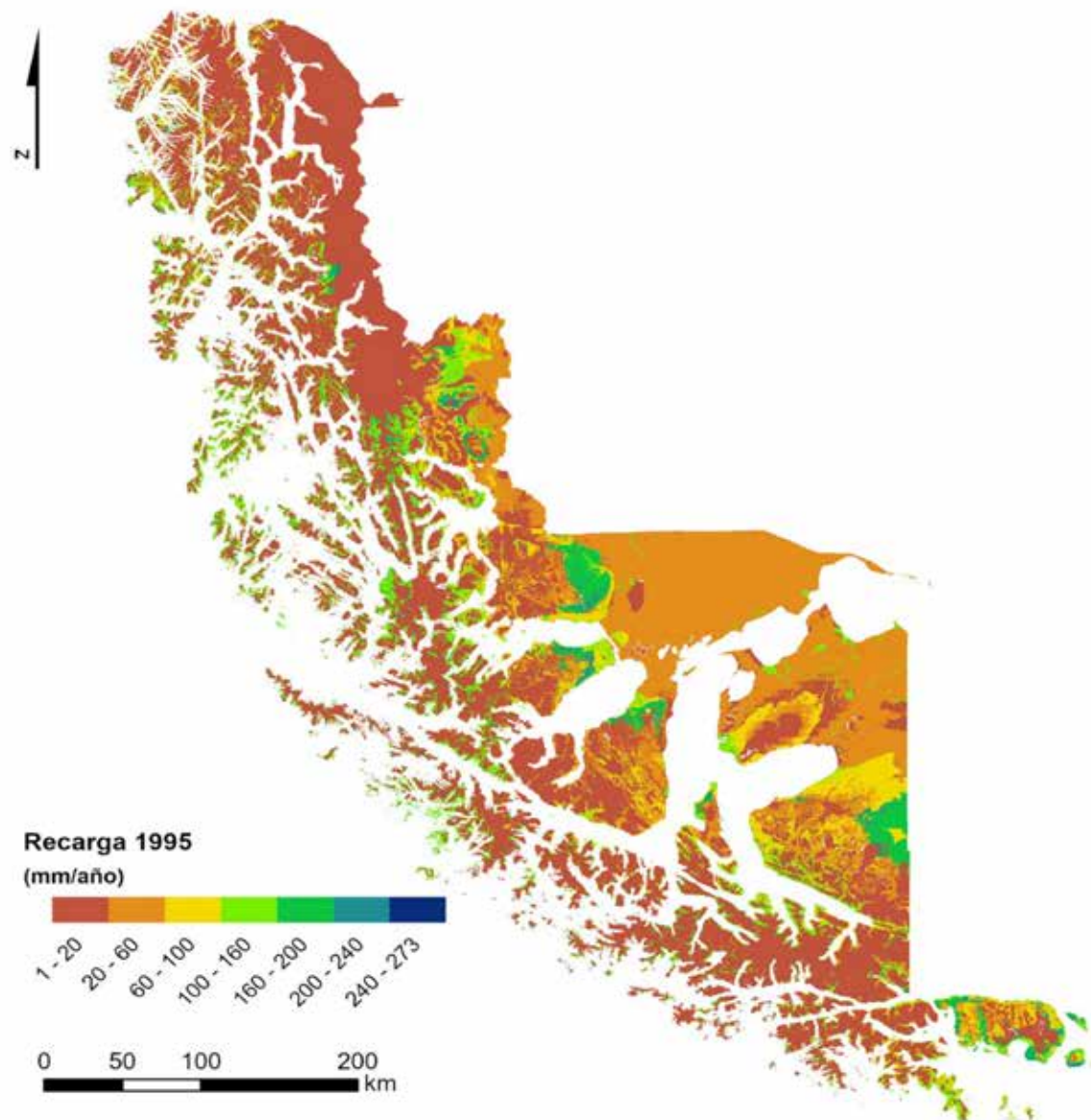


Figura 34 – Distribución de la recarga promedio anual en el año 1995.

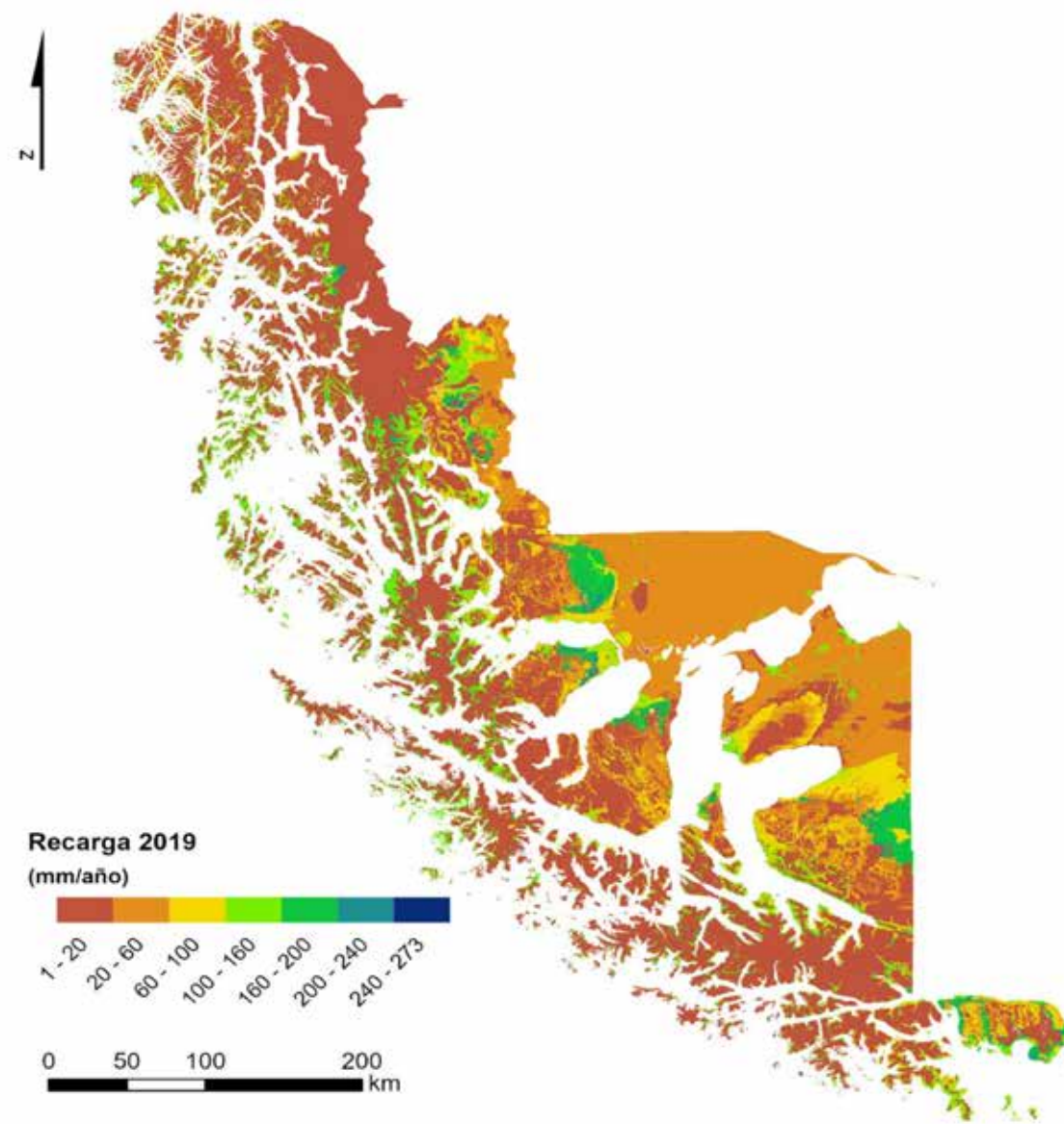


Figura 35 – Distribución de la recarga promedio anual en el año 2019.

Los errores promedios de los balances hídricos para las simulaciones de los años 1995 y 2019 son muy próximos de cero. Sin embargo, las zonas con mayor incertidumbre se siguen concentrando en las zonas urbanas y en algunas áreas correspondientes a afloramientos rocosos (y nieve), turberas, cuerpos de agua superficial, como lagos y ríos. No obstante, las zonas identificadas con mayores valores de recarga se encuentran en áreas donde los errores de simulación son mínimos o muy próximos a cero, lo que permite considerar los resultados con un buen nivel de confianza.

La Tabla 7 presenta un resumen al nivel de las cuencas, con valores recarga promedios por cuenca en 1995 y 2019. El valor promedio de recarga para toda la Región de Magallanes es de 36.8 mm/año.

Tabla 7 – Recarga promedio anual por cuenca en la Región de Magallanes.

Cod Cuenca	Enfoque	Recarga promedio 1995 (mm/año)	Recarga promedio 2019 (mm/año)
125	Costeras entre Lag. Blanca(inc), Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes	45	50
126	Vertiente del Atlántico: Continental Norte	44	43
128	Tierras del Fuego	32	39
129	Islas al sur del Canal Beagle y Territorio Antártico	46	46
127	Islas al Sur Estrecho de Magallanes	25	25
124	Costeras e Islas entre R Hollemberg, Golfo Alte. Laguna Blanca	41	41
123	Islas entre Canales Concepción, Sarmiento y E. de Magallanes	44	44
122	Costeras entre Seno Andrew y R. Hollemberg e islas al oriente	39	39
126.2	Vertiente del Atlántico 1	0	0
120	Costeras entre Límite Región y Seno Andrew	9	9
121	Islas entre Límite Región y Canal Ancho y Estrecho de la Concepción	26	26
126.3	Vertiente del Atlántico 2	0	0

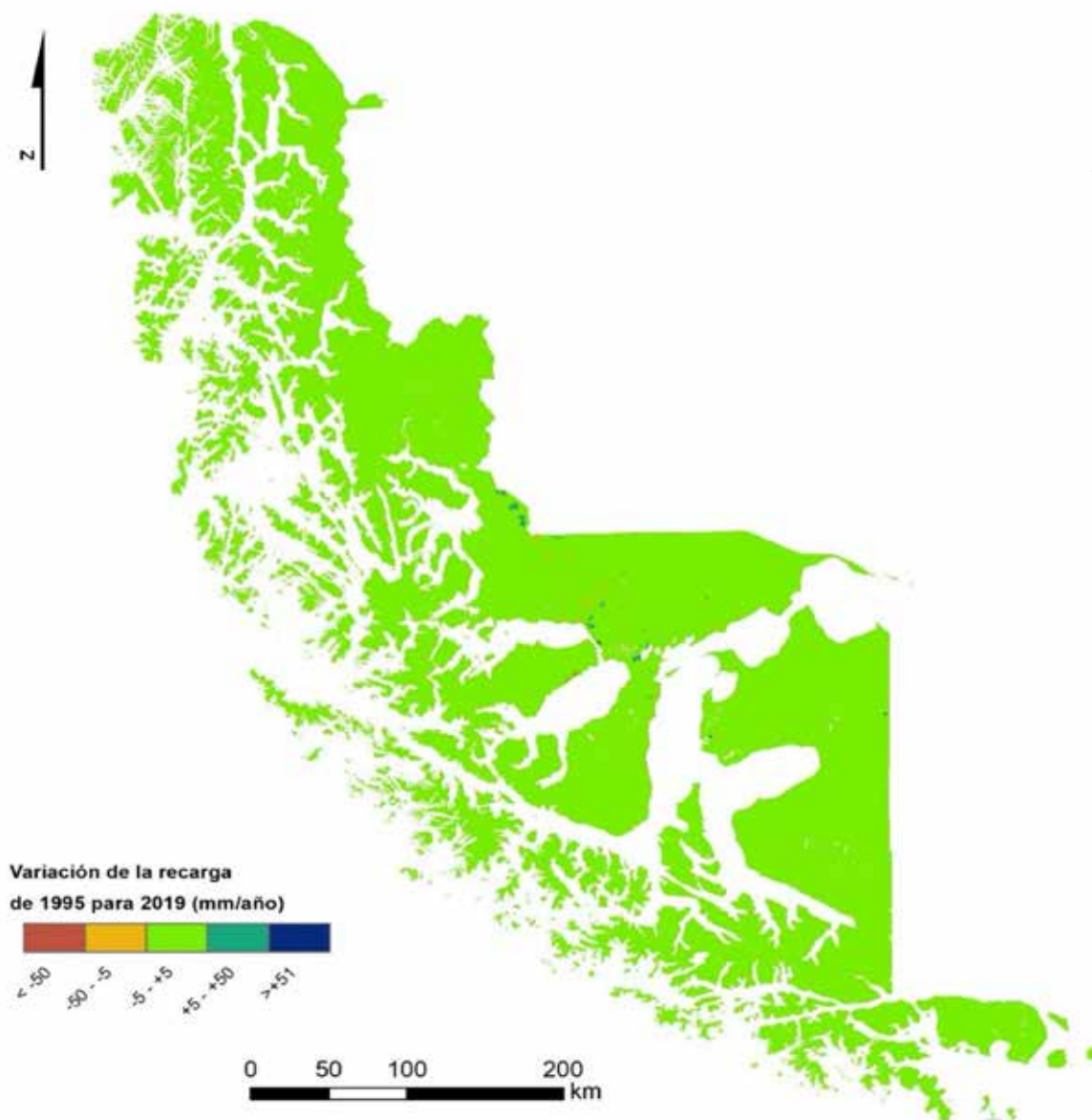


Figura 36 – Distribución y cuantificación de los cambios en los valores de recarga entre 1995 y 2016..

En la Figura 36 se muestra espacialmente la comparación entre los valores de recarga de 1995 y de 2019. Se observan que las mayores variaciones ocurren en la zona oeste, con una disminución de <50 mm/año, causada por la transformación del uso del suelo en áreas industriales. Todavía esa clase representa solamente 0.01% de toda el área. Por otro lado, 99.83% del área no presenta cambio en la recarga.

En general se observa que la recarga entre los dos años analizados de mantiene relativamente estable, como se muestra en la Figura 37. En esta figura, se observa que la clase de variación más significativa de la recarga corresponde a una disminución de entre -5 a -50 mm, que ocurre en un área aproximada de 43 km².

Con el objetivo de identificar las zonas preferenciales de recarga, se realizó una reclasificación de los valores de recarga para representarlos por cuartiles. En base a los límites del primer, segundo y tercer cuartil (Q1, Q2 y Q3 respectivamente) y el valor máximo, se definieron cuatro rangos de valores. Las celdas que presentan valores entre el tercer cuartil y el máximo son áreas de especial interés para la gestión de la recarga de los acuíferos de la cuenca.

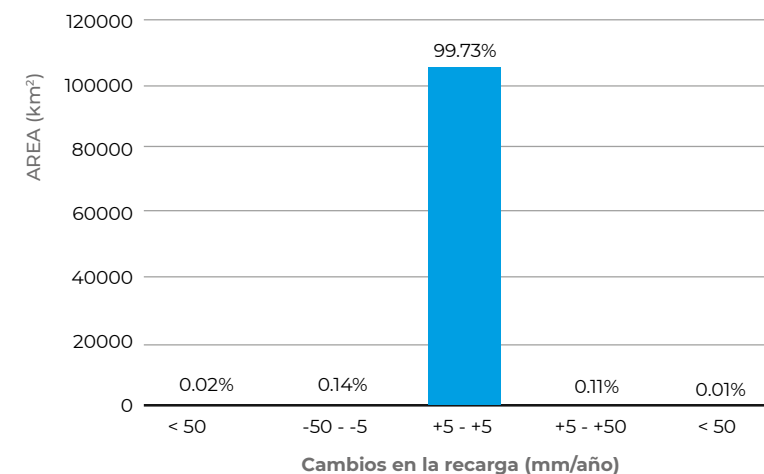


Figura 37– Frecuencia de clases de cambios en los valores de recarga.

Estos valores se basan en los resultados del uso del suelo de 2019 para toda la Región de Magallanes, y no consideran el área con recarga cero o próximo de cero (Figura 38). En la siguiente tabla se muestran las estadísticas de estos rangos, así como su importancia para la recarga total en la región. Se verifica que la clase Q3<Max., contribuye con un 39% de la recarga total, mientras ocupa solamente el 25% de la superficie de la cuenca.

En la Figura 38, se puede comprobar que las áreas de recarga preferenciales (> Q3 = 112-273 mm) se sitúan en el área central y suroeste de la cuenca, coincidiendo con el área de pendientes más bajas, y en tipos de uso del suelo específicos como matorrales y bosques. Sin embargo, debido a la importancia del recurso para la zona y debido a la escasez de agua presente en gran parte de la región, también se deben tener en cuenta las áreas de recarga asociadas a la clase Q2<Q3 (64-112 mm).

Los altos valores de recarga observados en la zona andina se deben a la alta precipitación y baja evapotranspiración de la zona. Sin embargo, la contribución de las precipitaciones a la recarga es menor en esta zona que en las zonas central y suroeste, ya que el porcentaje de precipitación que se infiltra en el suelo es mucho menor en las zonas inclinadas y con suelos poco desarrollados.

En la Figura 39 se presentarán las frecuencias de clase de la recarga más altas en 2019 y marco con las comunas. En la Figura 40 se ilustra la recarga media anual ponderada por comuna.

Tabla 8 - Estadísticas de la distribución espacial de la recarga.

Clase de recarga	Área (km ²)	Mínimo (mm)	Máximo (mm)	Recarga Promedia (mm)	Volumen total (hm ³)	Contribución para la recarga total
< Q1	11949	1	45	11	128.81	12%
Q1 < Q2	13194	45	64	19	248.96	22%
Q2 < Q3	11461	64	112	27	304.39	27%
Q3 < Max.	12086	112	272	36	435.10	39%

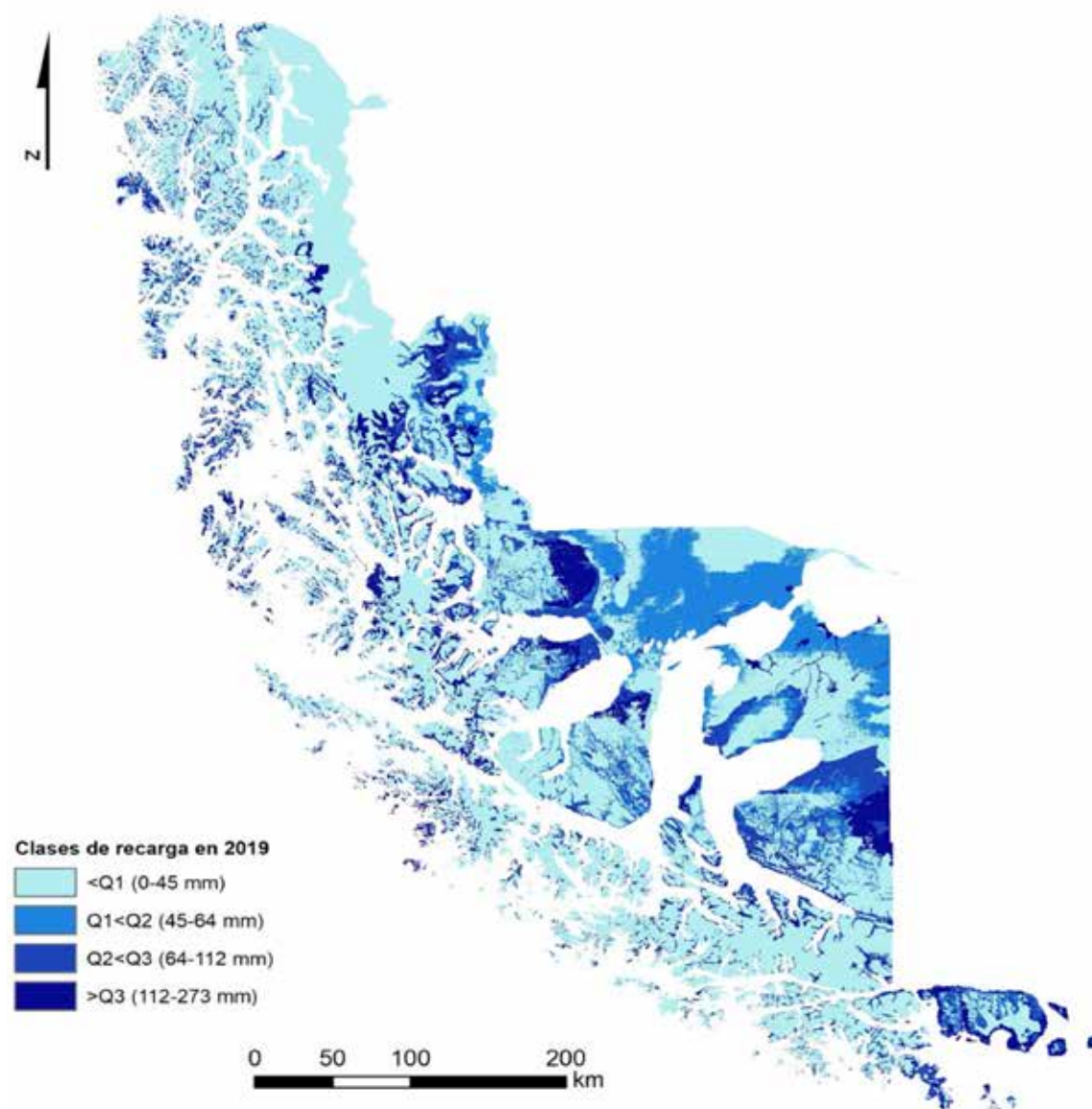


Figura 38– Frecuencias de clase de la recarga en 2019.

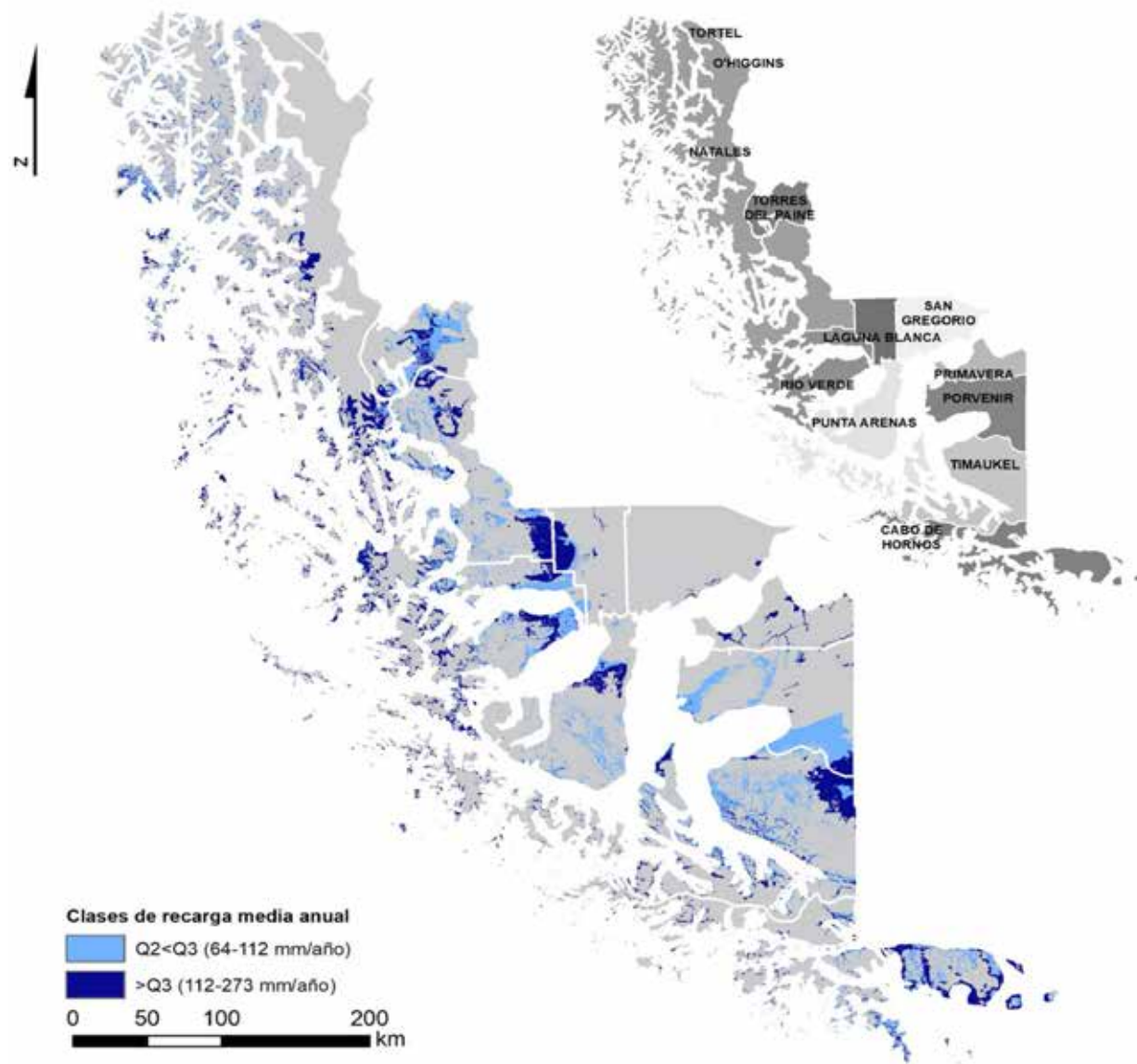


Figura 39– Frecuencias de clase de la recarga más altas en 2019 y marco con las comunas.

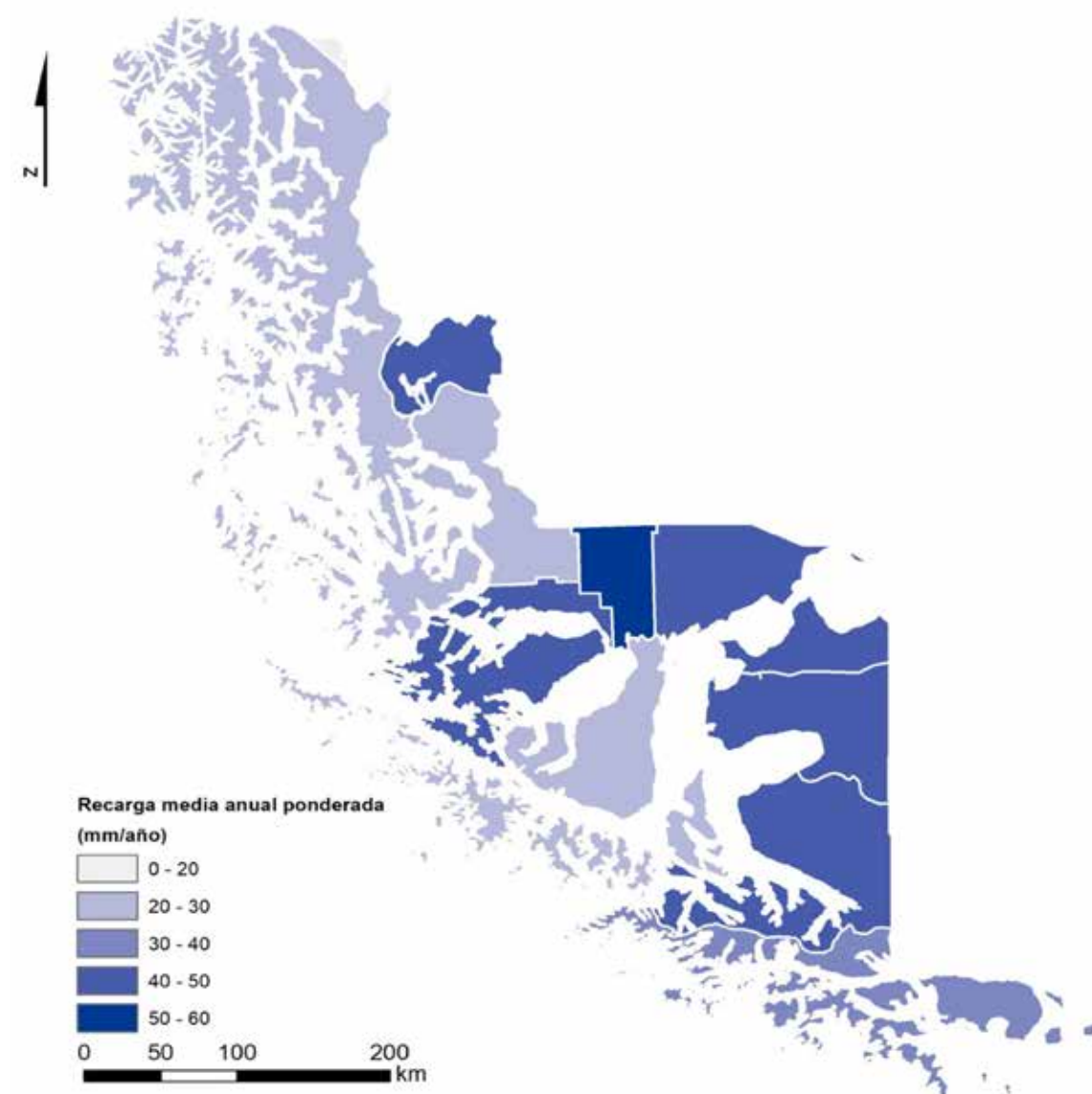


Figura 40 – Recarga media anual ponderada por comuna.

4.1.2 Evaluación del riesgo de contaminación

• Índice de susceptibilidad a contaminación

El análisis del riesgo de contaminación por nutrientes se basó en el Índice de Susceptibilidad (IS). Este método es una adaptación del índice de vulnerabilidad DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) y fue propuesto por Ribeiro (2005), con aplicaciones a diferentes ambientes y casos de estudio a nivel mundial (por ej. Stigter *et al.*, 2005; Ribeiro *et al.*, 2017, Zhang *et al.*, 2018). La novedad principal de este método fue el uso del parámetro LU (Landuse), que corresponde al uso del suelo, dejando atrás el concepto de un índice puramente intrínseco, basado únicamente en las condiciones naturales. En otras palabras, el IS fue desarrollado con el objetivo de evaluar la vulnerabilidad específica, que considera los impactos potenciales del uso del suelo y posibles contaminantes asociados a ese uso.

El IS se calcula a partir de la suma ponderada de valores otorgados a los siguientes parámetros: profundidad del nivel (D), recarga (R), material del acuífero (A), inclinación del terreno (T) y uso del suelo (LU). Los valores otorgados se representan en un rango de 1 a 100 para facilitar la lectura de los resultados.

La profundidad del nivel freático (D) indica el espesor de la zona no saturada. Esta es la distancia que atraviesa el agua infiltrada (que potencialmente contiene el contaminante) hasta alcanzar el acuífero. Cuanto menor sea la profundidad del nivel freático, mayor será la probabilidad del contaminante de alcanzar el acuífero.

La Recarga (R) es la cantidad de agua por unidad de superficie que alimenta el acuífero. Este proceso es el principal vehículo de entrada de contaminante, cuanto mayor sea la recarga, mayor será la probabilidad del contaminante de llegar al nivel freático.

El material del Acuífero (A) determina la movilidad del contaminante que lo atraviesa. Cuanto mayor sea el tiempo de movilización del contaminante en el acuífero, más mitigados serán sus efectos.

La Topografía (T) contribuye para el cálculo del índice en función de la pendiente. Cuanto mayor sea la pendiente, menor será el potencial de contaminación, debido al incremento de la escorrentía superficial.

El parámetro LU define el tipo de uso del suelo. Para ello, el uso del suelo se divide en clases, aplicando la clasificación que se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9 - Puntuación del tipo de uso del suelo.

Ocupación del suelo	Puntuación
Áreas agrícolas	
Regadíos (cultivos anuales, ...)	90
Cultivos permanentes (viñas, huertos, oliveras, ...)	70
Áreas agrícolas heterogéneas	50
Pastos y áreas agroforestales	50
Áreas artificiales	
Descargas de residuos industriales y vertederos	100
Canteras, astilleros, minas a cielo abierto	80
Áreas urbanas continuas, aeropuertos, puertos, vías férreas, áreas con actividades industriales y comerciales, ...	75
Áreas urbanas discontinuas	70
Áreas naturales	
Ambientes acuáticos (marismas, salinas, etc.)	50
Bosques y zonas seminaturales	0
Cuerpos de agua	0

Los pesos otorgados a cada parámetro para la ponderación se basaron en un panel DELPHI elaborado por especialistas en hidrogeología (Tabla 10).

Después de calcular el índice para cada celda, los resultados se clasifican en 8 grupos, donde los valores más elevados indican un mayor riesgo de contaminación.

- **Aplicación de IS a la Región de Magallanes**

En la Figura 41 y Figura 42 se presentan los resultados de la aplicación del IS a la Región de Magallanes, para el uso del suelo de 1995 y 2019 respectivamente. Se puede comprobar que el riesgo de contaminación en el área de estudio se divide en dos zonas: una con riesgo mayor (pero no significativo) en el área central y otra con riesgo menor hacia el este y norte.

Las clases de riesgo mayores están asociadas a las prácticas agrícolas en terrenos poco inclinados en un suelo con un componente arenoso significativo donde, además, la profundidad del nivel piezométrico varía entre 0 y 7 m. Sin embargo, las zonas urbanas presentan un riesgo “Moderado a alto” debido a la proximidad de los niveles de agua a la superficie.

Tabla 10 - Parámetros y factores de ponderación de IS.

Parámetro	D	R	A	T	LU
Ponderación	0,186	0,212	0,259	0,121	0,222



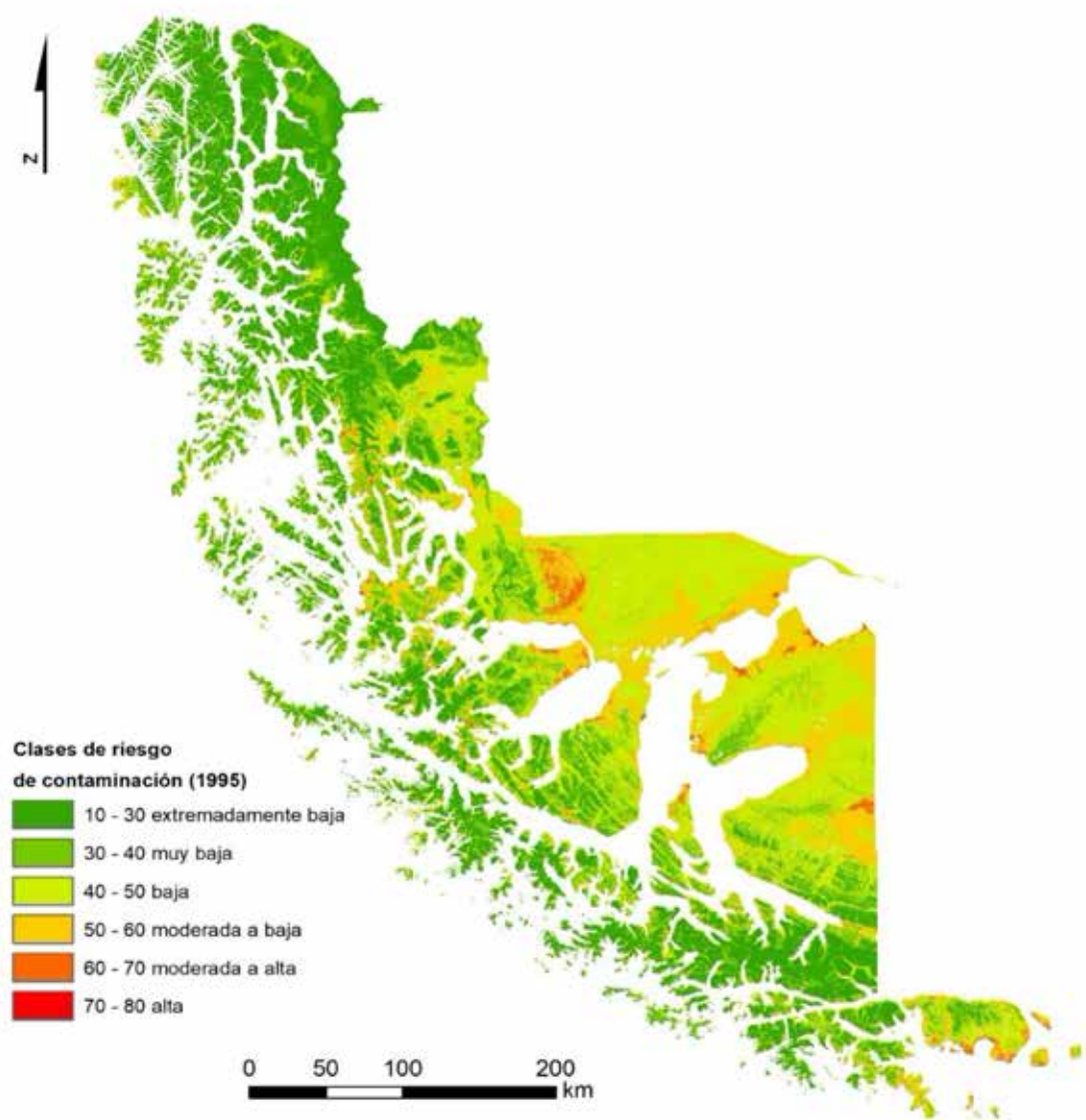


Figura 41 – Mapa de riesgo de contaminación para el año 2095

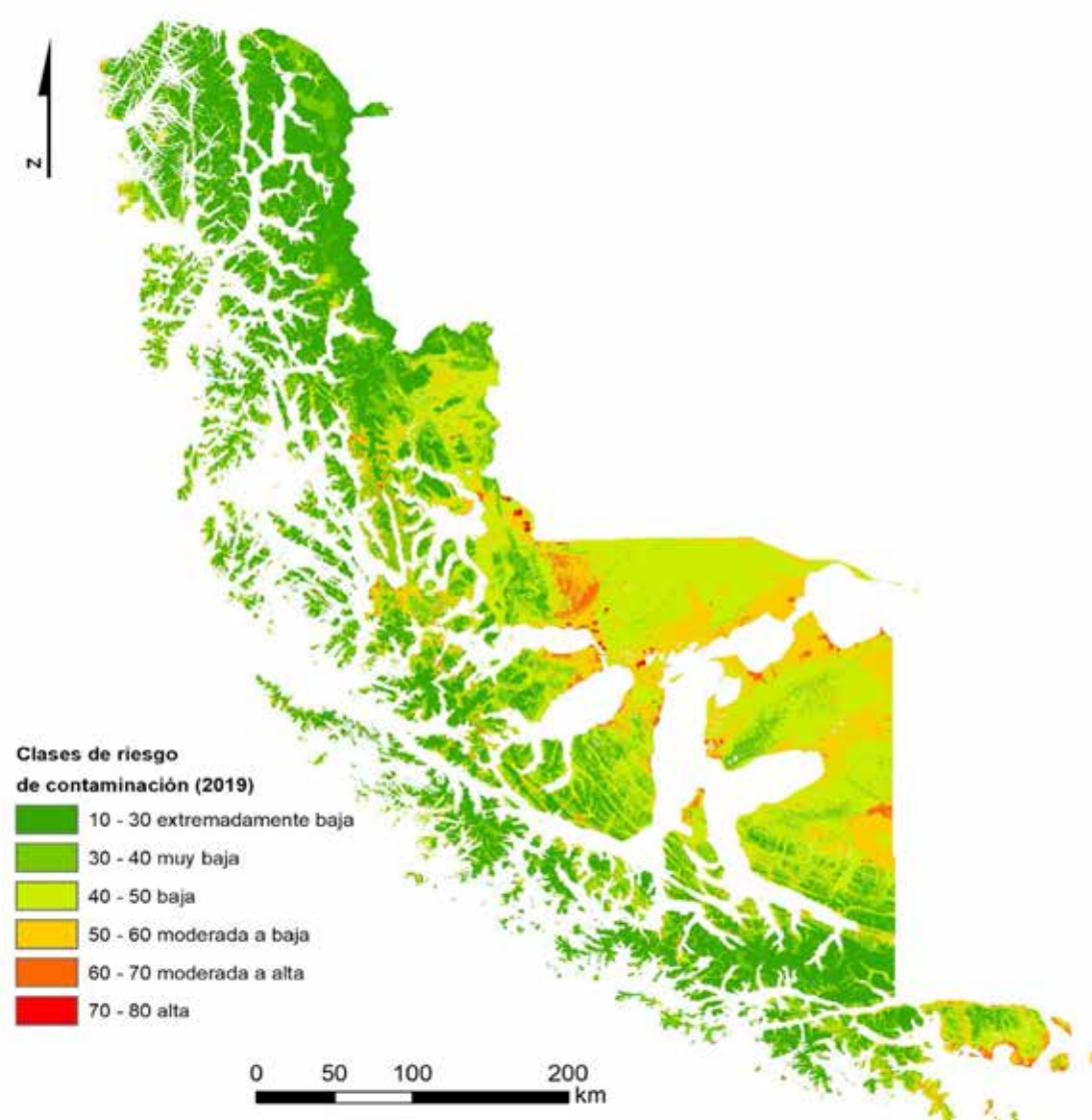


Figura 42 – Mapa de riesgo de contaminación para el año 2019.

La Figura 43 muestra los cambios en el riesgo de contaminación entre 1995 y 2019, basado en los cambios en el uso del suelo.

Se puede concluir, de manera general, que el riesgo de contaminación en esta cuenca es similar entre los años 1995 y 2019. Sin embargo, se observa un incremento local del riesgo en las nuevas zonas agrícolas o industriales. Estas áreas se pueden ver con más detalle en la figura 1 y figura 2, para la cuenca Costeras e Islas entre R Holleberg, Golfo Alte. Laguna Blanca (cod. 124), y Costeras entre Lag. Blanca (inc), Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes (cod. 125), respectivamente.

Este aumento del riesgo tiene un origen directo, relacionado con las prácticas contaminantes del uso del suelo, pero también indirecto, relacionado con el impacto del uso del suelo en la recarga.

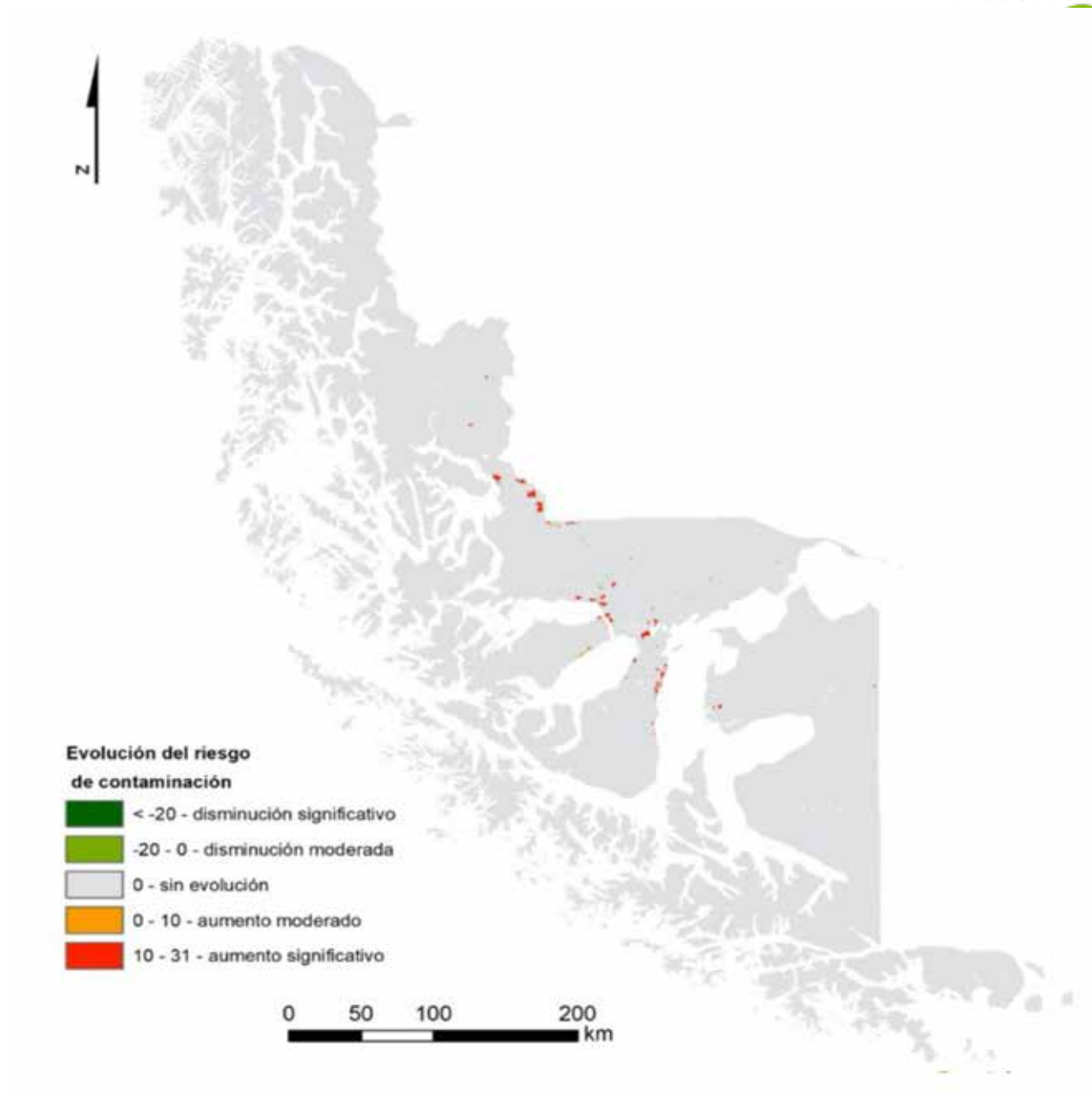


Figura 43 – Mapa de cambios en la vulnerabilidad entre 1995 y 2019.

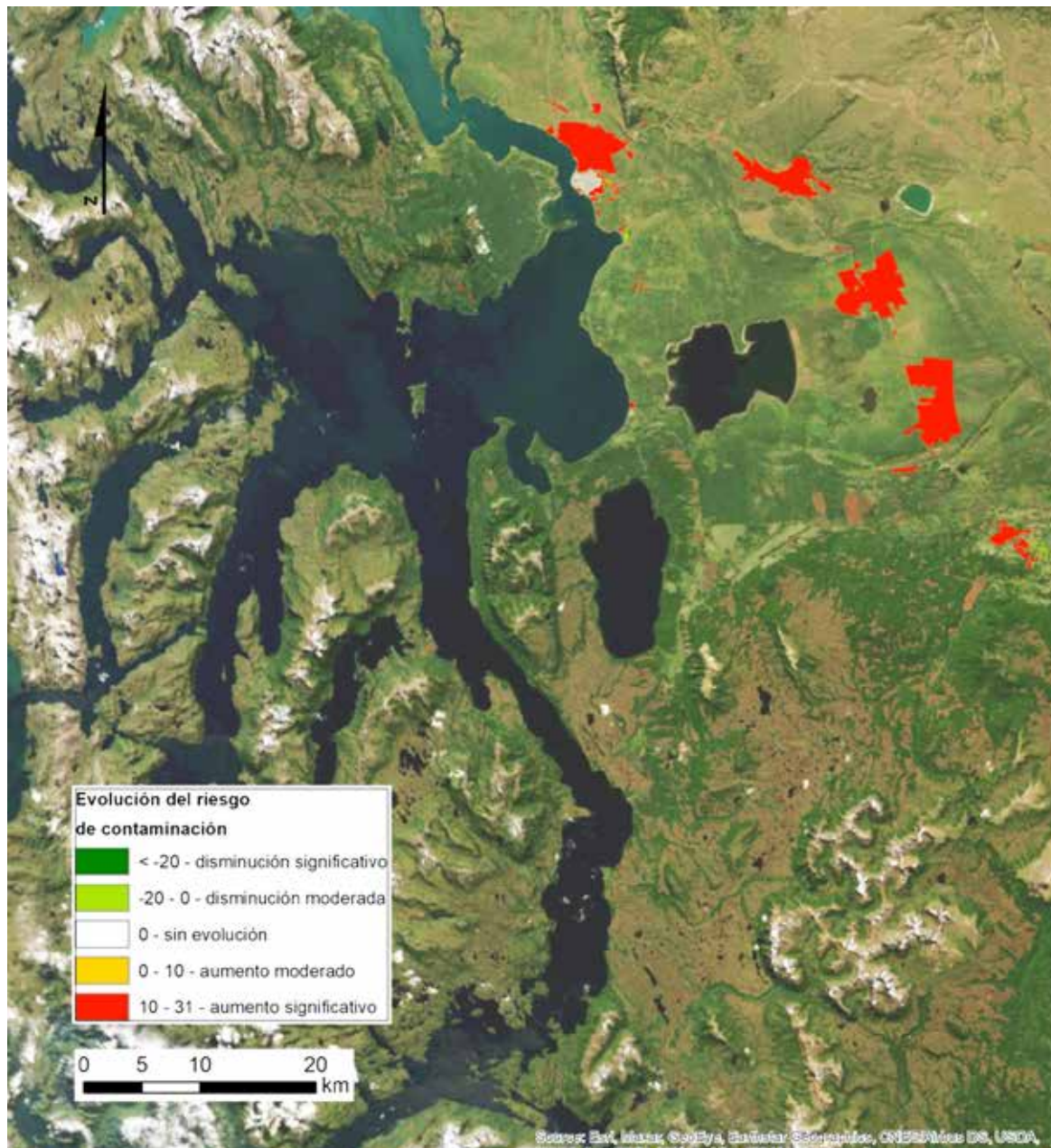


Figura 44 - Cambios en el riesgo de contaminación entre 1995 y 2019, en la cuenca Costeras e Islas entre R Hollemberg, Golfo Alte. Laguna Blanca (cod. 124).

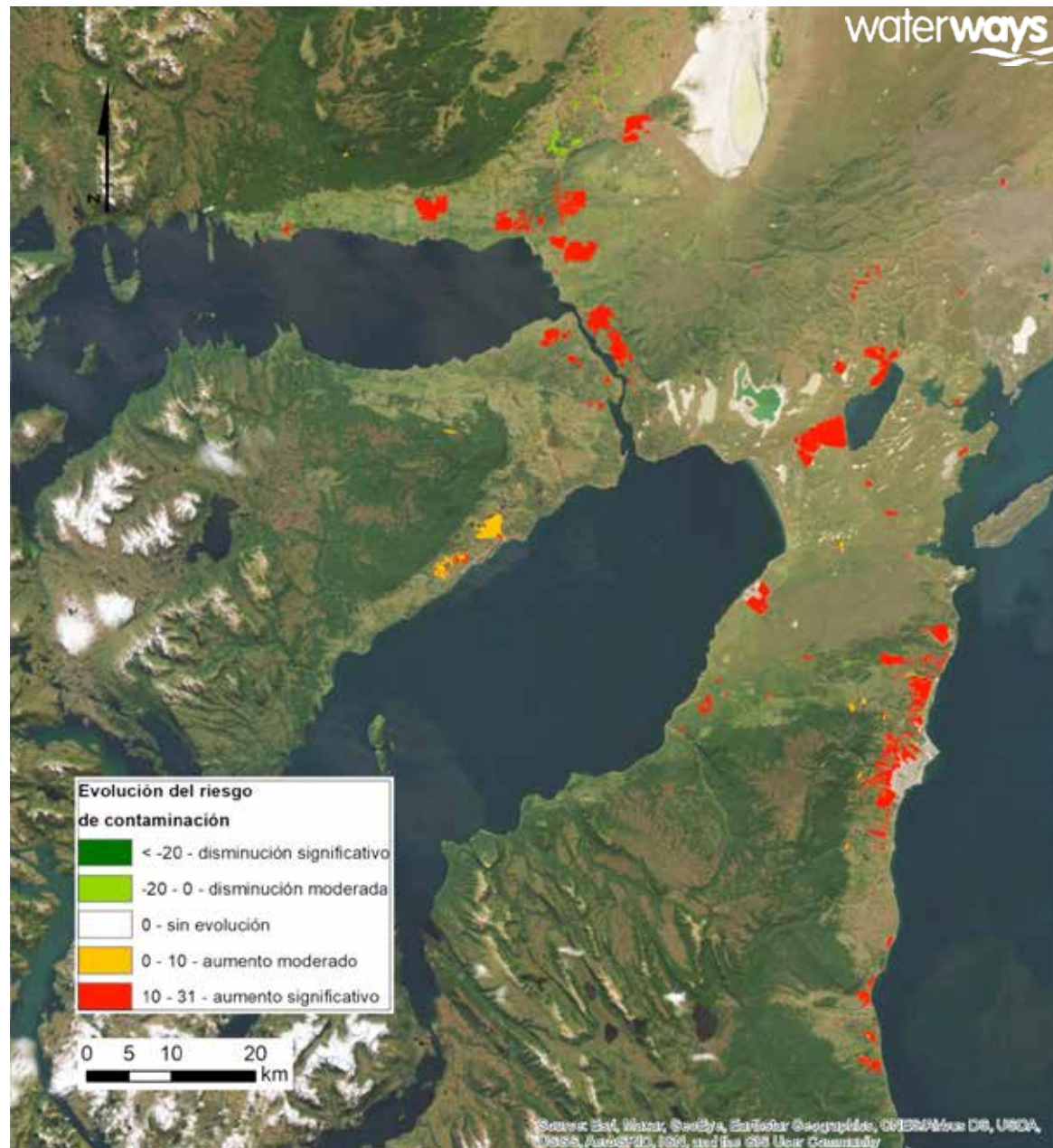


Figura 45 - Cambios en el riesgo de contaminación entre 1995 y 2019, en la cuenca Costeras entre Lag. Blanca (inc), Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes (cod. 125).

En el gráfico de la Figura 46 se muestra la variación del área para las clases de frecuencia asociada a la evolución del riesgo de contaminación entre estos años. Se observa que cerca del 0.02% del área presenta una disminución del riesgo de contaminación, mientras que un 0.24% presenta un riesgo mayor en 2019. La ausencia de alteración del riesgo es la clase más representativa (cerca del 99.74% del área), dato que indica que los cambios en la región estudiada son muy reducidos. Se puede concluir que los cambios observados indican un incremento relativo del riesgo muy poco significativo a escala de toda la Región de Magallanes, pero a nivel de las cuencas del área de Tierra del Fuego, podrán tener algún impacto localizado.

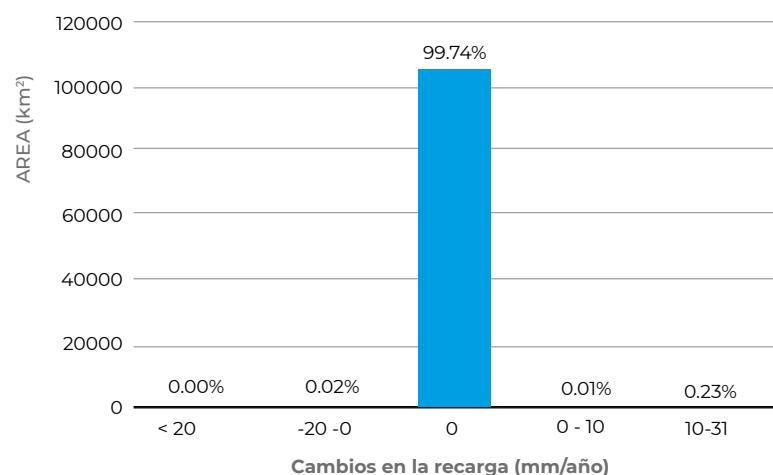


Figura 46 – Evolución de la vulnerabilidad entre 1995 y 2019.

4.2 Brechas de información

La gestión de los recursos naturales se debe fundamentar en información fidedigna que permita una buena caracterización con la menor incertidumbre posible. A pesar de la existencia de herramientas que ayudan a manejar la incertidumbre, la adecuada resolución temporal y espacial de la información facilita la toma de decisiones robustas.

Debido al costo que representan las redes de monitoreo, la selección de puntos deberá realizarse con criterio, que tiene que ser estudiado de acuerdo con las necesidades identificadas y objetivos del monitoreo. Otro aspecto para tener en cuenta es la selección del equipo de monitoreo, ya que actualmente existen equipos automáticos que transmiten la información por vía telemática con gran fiabilidad y que minimizan el desplazamiento habitual de personal operativo a los lugares monitoreados.

En el caso del presente estudio, la información considerada se basó en tres tipos de variable:

1. **Variables intrínsecas características de la cuenca: geología, suelos y topografía.**
2. **Variables antropogénicas: uso del suelo.**
3. **Redes de monitoreo: datos del clima y de los recursos hídricos.**

La calidad de cada una de estas variables tendrá una influencia directa en la calidad de los resultados.

Debido al carácter regional del trabajo, se optó por evitar considerar variables intrínsecas muy detalladas, ya que se considera que no aportarían mejoras notables a los resultados generales. En lugar

de eso, se priorizó la generación de una relación robusta entre las variables intrínsecas y los datos de entrada del modelo WetSpass.

La información referente al uso del suelo fue adecuada para los objetivos del trabajo, tanto a nivel de resolución espacial como a nivel de caracterización de los usos.

La representatividad temporal y espacial de las redes de monitoreo de clima y recursos hídricos fue diferente según el tipo de variable monitoreada. Para la precipitación, temperatura y viento se comprobó que la información disponible era adecuada para el estudio, con una representatividad espacial bastante significativa en toda la región, esencialmente debido a los datos disponibles en (CR)², que contenía series de datos desde 1940 hasta la actualidad. Dada la escala del área y la importancia de unas zonas en relación con otras, se considera que la información es suficientemente detallada. La resolución temporal y periodicidad también fueron adecuadas.

En relación con el monitoreo del nivel piezométrico los puntos existentes son muy escasos en áreas más remotas al norte y, además, la casi totalidad se ubican en la zona centro, cerca de los aglomerados urbanos e industriales, en Punta Arenas, Vertiente del Atlántico y Tierra del Fuego. No hay todavía algún estudio o series de datos que permitan un estudio de la tendencia temporal. Por este motivo es urgente realizar un esfuerzo para el desarrollo de esta red de monitoreo, que servirá

de base para numerosos tipos de gestión de los recursos hídricos subterráneos. Por ejemplo, esta red es idónea para poder detectar, a través de la evolución de los niveles, si estamos ante un régimen de sobreexplotación y así tomar medidas de licenciamiento e identificación de los conos de descenso que ponen en peligro la calidad del agua, debido a los cambios que se puedan provocar en la dirección del flujo regional. Otro aporte importante de las redes de monitoreo de aguas subterráneas es el estudio de ecosistemas dependientes de aguas subterráneas, donde la historia de la piezometría y la calidad del agua es fundamental. Las mediciones deberán ser, al menos, bianuales para obtener un valor en la época húmeda y otro en la época seca. De este modo se podrían relacionar las variaciones de nivel con los regímenes de captación de agua y con las variaciones de la recarga natural. La implementación de la red deberá empezar en las áreas donde hay captación de agua y tener una buena representatividad espacial, sin sesgo estadístico.

Debido a la falta de datos de piezometría distribuidos por toda la cuenca, se optó por extrapolar la relación entre la piezometría y la topografía usando como referencia la comparación con los valores de piezometría de las cuencas de la Tierra del Fuego, lo que conlleva un incremento de la incertidumbre para el resto de toda el área de estudio.

Otras variables que considerar en futuras redes de monitoreo son el control de la calidad del agua subterránea y el caudal en los manantiales. Esta variable permite obtener información importante de la recarga y descarga de los acuíferos a partir del cálculo de la curva de recesión. Esta curva proporciona una información muy relevante para la gestión de los sistemas acuíferos y ecosistemas dependientes del agua subterránea.

4.3. Definición de medidas de protección y gestión de las aguas subterráneas

4.3.1. Introducción

La gestión de las aguas subterráneas es un proceso complejo debido a la incertidumbre asociada a este recurso invisible que forma parte de la dinámica del ciclo del agua. Por este motivo, el agua subterránea no se puede gestionar del mismo modo que una laguna, ya que sus aguas no se encuentran estancadas, pero tampoco como un río, dado que es un recurso acumulativo con una elevada resiliencia. Este hecho provoca que numerosos gobernantes y entidades prefieran utilizar las aguas superficiales, por tratarse de un recurso en el que la disponibilidad presenta una gestión relativamente fácil, reservando el agua subterránea para cuando no existe otra alternativa. Sin embargo, el agua subterránea es un recurso con un gran potencial para el abastecimiento público, la economía y los ecosistemas dependientes, siendo estos los tres ejes de desarrollo de los planes de gestión de aguas subterráneas.

La gestión de la demanda, recarga y fuentes de agua alternativas, son las herramientas base para garantizar la sustentabilidad de las aguas subterráneas. En cada lugar, el equilibrio entre estas herramientas es un garante para el refuerzo de la economía agrícola, la cohesión social y la calidad del agua y de los ecosistemas.

Cabe señalar que, en muchos casos, la sensibilización de las entidades locales, individuales o colectivas anticipa la toma de decisiones a la implementación de las políticas nacionales. Estos procesos locales suelen ser bastante eficaces en la gestión de los acuíferos, incluyendo el aumento de los rendimientos agrícolas y la protección de los ecosistemas. Sin embargo, como es natural, cuando existen políticas de apoyo adecuadas, la aplicación de medidas locales resulta más sencilla.

4.3.2. Evolución de la piezometría y del riesgo de contaminación en la Región de Magallanes

La gestión del agua subterránea en la Región de Magallanes deberá tener en cuenta las siguientes conclusiones:

- Según los resultados del estudio, la localización de las principales zonas de recarga está vinculada a áreas naturales con buenas condiciones de infiltración, como bosques y matorrales, en la zona más central e interior de la región.
- Existe un aumento de recarga en nuevas zonas agrícolas debido a la transformación de áreas naturales para zonas con recarga natural e irrigación.
- Existe una disminución de las áreas de recarga debido a la transformación de áreas naturales en áreas urbanas o industriales.
- Las principales zonas de recarga presentan un riesgo de contaminación alto debido a bajos pendientes y niveles de agua muy próximos de la superficie.

La toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos de esta cuenca deberá considerar la compleja relación entre recarga y riesgo de contaminación, ya que la sustentabilidad de este recurso podrá estar en juego, en un área con pocos recursos hídricos disponibles.

La falta de información no permite analizar la tendencia de los niveles piezométricos, que indicaría si existe o no un descenso continuo de éstos.

4.3.3. Propuestas de medidas para la Región de Magallanes

La gestión de los recursos hídricos subterráneos de la Región de Magallanes deberá tener el objetivo de gestionar de una manera integrada la recarga y el riesgo de contaminación de los acuíferos.

En la Figura 45 se muestra la relación entre las zonas preferenciales de recarga (Recarga > Q2 mm/año) y las clases de mayor riesgo de contaminación. Como se observa en la figura, la mayor parte de la zona principal de recarga presenta un riesgo de contaminación moderado. Este hecho se debe abordar con una visión holística, mediante la consideración adecuada de las consecuencias que podrían derivar de los diferentes escenarios de gestión posibles, tanto para la cantidad como para la calidad del agua subterránea. Al final, se deberán tomar medidas que optimicen el interés económico de los acuíferos, la salud pública y el medio ambiente.

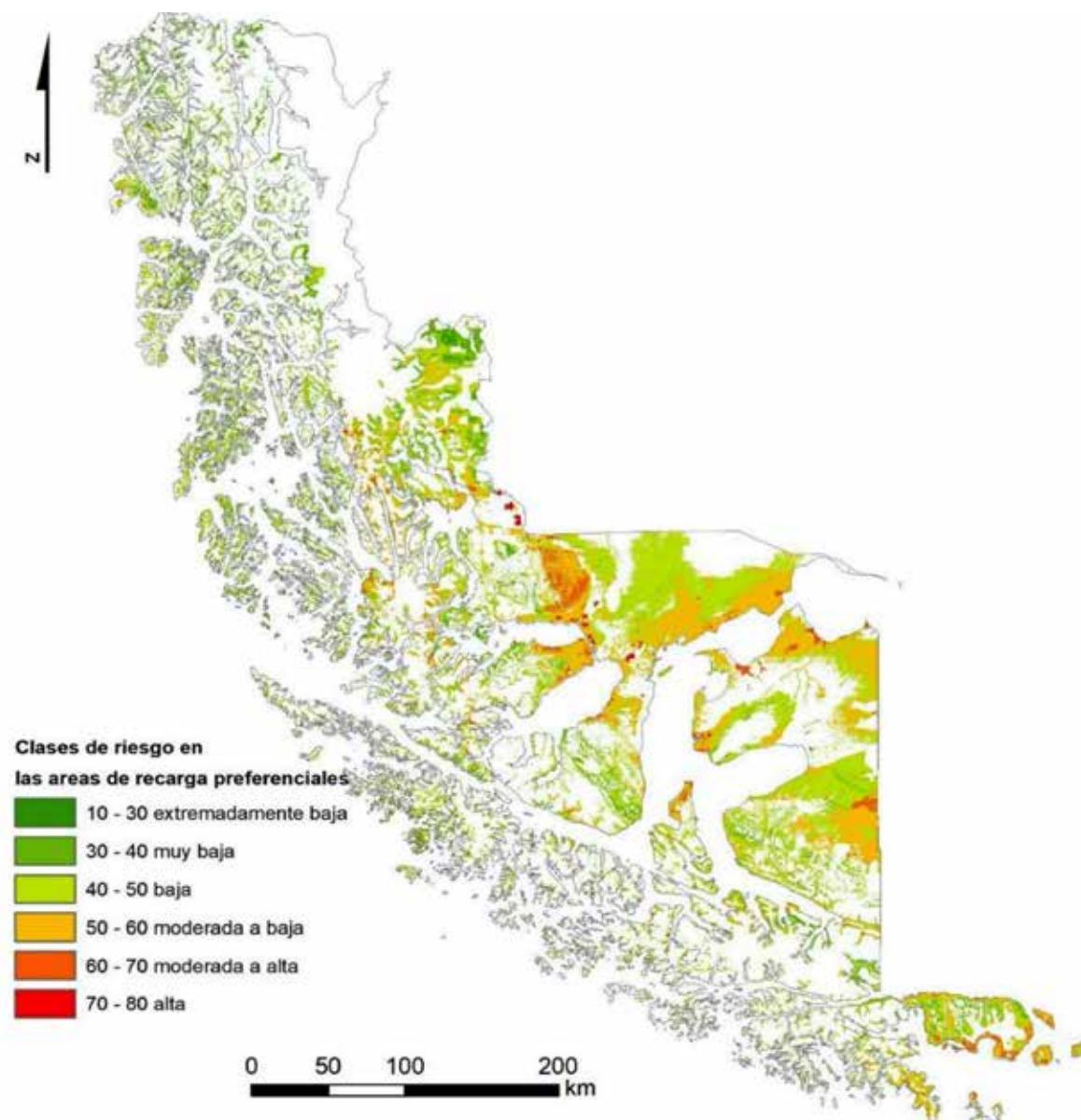


Figura 47 – Riesgo de contaminación en las áreas preferenciales de recarga.

En el caso de la Región de Magallanes, teniendo en cuenta lo expuesto en capítulos anteriores, el modelo de gestión deberá comenzar por la mejora del conocimiento de los sistemas acuíferos, aguas subterráneas y sus usuarios, incluso ecosistemas dependientes. En una primera fase se deberán instalar redes de monitoreo de vigilancia. Este tipo de red de monitoreo tiene como objetivo el estudio general de los acuíferos; por ejemplo, el régimen de explotación, la dirección del flujo y el estado cualitativo del agua. Posteriormente a la generación del conocimiento base, se recomienda la instalación de una red operacional, con una mayor densidad de puntos de control y un mayor número de variables de calidad de agua, que permita analizar el impacto en el acuífero correspondiente a zonas específicas, como por ejemplo áreas agrícolas.

El diseño de estas redes de monitoreo deberá tener en cuenta la densidad de la red (puntos por km²), la representatividad estadística (mínimo 5 puntos) y la representatividad espacial (índice de representatividad superior al 80%). Este último parámetro es fundamental para evitar los sesgos en la interpretación de los datos en el futuro.

Esta información es esencial para poder conocer los impactos que las actividades humanas provocan en el acuífero y poder definir medidas de gestión del acuífero adecuadas.

Por otro lado, la caracterización de los usuarios tiene la misma importancia que el estudio hidrogeológico. Determinar los volúmenes de agua necesarios, identificar las parcelas agrícolas, caracterizar las prácticas agrícolas actuales, incluyendo los productos utilizados, las expectativas de los agricultores, la experiencia con otros tipos de agricultura, son algunas de las informaciones importantes para definir el futuro modelo de gestión. Cabe destacar que la proximidad a los agricultores se deberá realizar mediante una relación de confianza, ya que en caso contrario no será posible obtener toda la información necesaria.

La gestión de los usuarios, a pesar de ser el mejor camino para la mejora del estado de los acuíferos, es uno de los mayores desafíos en el modelo de

gestión. Las cuestiones socioeconómicas son bastante relevantes en lo que respecta al cambio de prácticas o hábitos, y los usuarios a menudo prefieren trasladar la resolución de los problemas de escasez o calidad de agua a las generaciones futuras.

4.4. Análisis de sostenibilidad de uso de aguas subterráneas

Cualquier medida y gestión que afecte su cantidad y calidad repercutirá en los restantes componentes de este ciclo. Este hecho significa que la cuantificación y aplicación del porcentaje máximo de recarga que se puede captar influye en todos los usuarios, desde la disponibilidad de agua para los ecosistemas dependientes, los volúmenes disponibles para el caudal base de los ríos, la mayor o menor capacidad de recarga de los acuíferos (recarga inducida), entre otros fenómenos.

Dada la relación entre todos estos factores, la definición de este parámetro requiere de estudios en profundidad a nivel del acuífero y de la cuenca hidrográfica donde se inserta.

Actualmente, la modelación numérica de la dirección del flujo de agua subterránea, junto con modelos hidrológicos, es el enfoque más confiable para definir este valor.

Como ejemplo, la Unión Europea obliga a sus estados miembros a definir este porcentaje para evaluar el estudio cuantitativo de las masas de agua subterránea; es decir, cuando los volúmenes anuales de extracción son superiores al límite impuesto por el porcentaje máximo de recarga, se considera que el acuífero está en mal estado. En este caso, los estados miembros están obligados a definir un conjunto de medidas para que el acuífero vuelva a estar en buenas condiciones.

Para el análisis de sostenibilidad de uso de aguas subterráneas, se tuvo en cuenta los datos disponibles de los derechos consuntivos subterráneos en el explorador CAMELS-CL (<https://camels.cr2.cl/>), organizados por cuencas (Alvarez-Garreton et al, 2018; Barría et al., 2021). La ubicación de los datos está distribuida en algunas cuencas como se puede ver en la Figura 47; por lo tanto, solo una parte de la región tiene datos sobre derechos de consumo de aguas subterráneas.

Cabe señalar que los derechos otorgados para toda la región son de 134,48 L/s (fuente: Dirección General de Aguas (DGA) en CAMELS-CL Explorer, organizados por cuencas: Alvarez-Garreton et al, 2018; Barría et al., 2021), frente a una recarga promedio 1344,71 L/s para toda la Región de Magallanes.

La siguiente tabla contiene los datos que se utilizarán para crear un mapa de sostenibilidad de uso de agua subterránea, considerando el consumo estimado en cada punto por subcuenca y la recarga espacial calculada con Wetspass. Los porcentajes de uso de agua subterránea, en relación con la recarga promedio de cada subcuenca, se detallan en la última columna de la tabla.

La Figura 48 muestra el porcentaje de recarga en las cuencas con datos disponibles asignados actualmente a derechos de uso de aguas subterráneas. De acuerdo con estos resultados, no se considera un escenario de sobreexplotación.

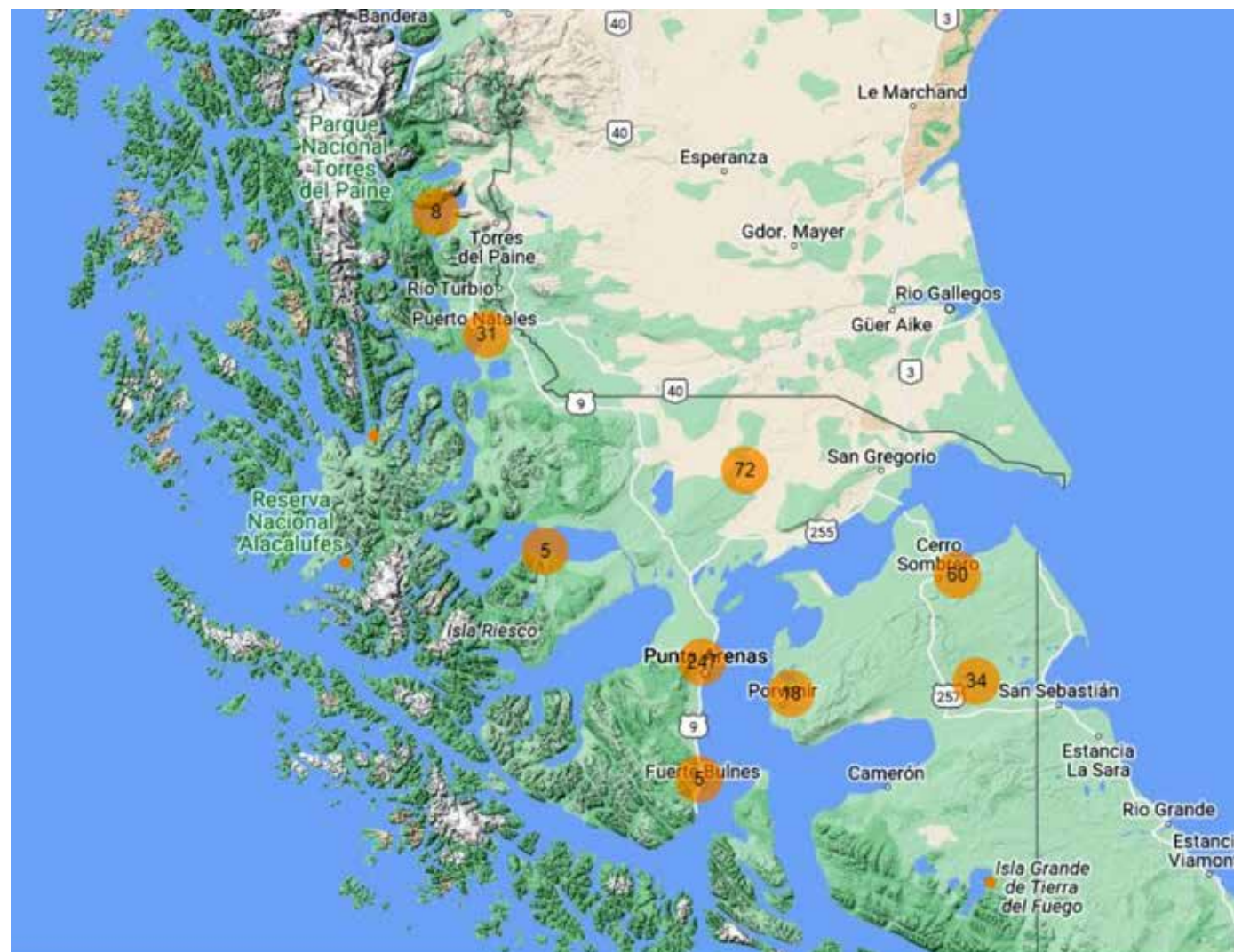


Figura 48 - Visualización espacial de datos disponibles sobre derechos subterráneos consuntivos en la Región de Magallanes.

Tabla 11 – Datos para el cálculo de la sostenibilidad del uso de aguas subterráneas en la Región de Magallanes (Camels, 2023).

ID gauge	Nombre de gauge	Area (km²)	Consumo (L/s)	Recarga (L/s)	Porcentaje de recarga otorgada
12861001	Río Cullen En Frontera	708.6	51.7	1150	4.50%
12660001	Río Ci-Aike Antes Frontera	1460.4	27.61	2006	1.38%
12400003	Río Tranquilo En Ruta N 9	380.3	16	415	3.86%
12400004	Río Hollemberg En Desembocadura	1236.1	16	951	1.68%
12289001	Río Serrano En Desembocadura	8574.6	8.6	15627	0.06%
12284005	Río Don Guillermo En Cerro Castillo	500.0	2.6	473	0.55%
12284007	Río Las Chinas Antes Desague Del Toro	3936.8	2.6	4580	0.06%
12802001	Río Side En Cerro Sombrero	808.5	1.38	937	0.15%
12876001	Río Grande En Tierra Del Fuego	2841.0	0.91	3940	0.02%
12806001	Río Oro En Bahía San Felipe	600.7	0.86	497	0.17%
12872001	Río Herminita En Ruta Y-895	590.8	0.72	2277	0.03%
12582001	Río San Juan En Desembocadura	864.0	0.3	920	0.03%
12280002	Río Paine En Parque Nacional 2	581.6	0	740	0.00%
12284002	Río Baguales En Cerro Guido	564.3	0	824	0.00%
12284003	Río Vizcachas En Cerro Guido	1729.7	0	2010	0.00%
12284006	Río Las Chinas En Cerro Guido	901.5	0	1968	0.00%
12285001	Río Chorrillos Tres Pasos Ruta N 9	101.1	0	159	0.00%
12285003	Río Tres Pasos En Desague Lago Toro	568.7	0	1304	0.00%
12286002	Río Rincon En Ruta Y-290	75.7	0	73	0.00%
12287001	Río Grey Antes Junta Serrano	865.4	0	121	0.00%
12288002	Río Geikie En Desembocadura	472.8	0	534	0.00%
12288003	Río Tindall En Desembocadura	119.8	0	213	0.00%
12288004	Río Caadon 1 En Desembocadura	158.4	0	169	0.00%

ID gauge	Nombre de gauge	Area (km²)	Consumo (L/s)	Recarga (L/s)	Porcentaje de recarga otorgada
12291001	Río Prat En Desembocadura	220.0	0	386	0.00%
12448001	Río Grande En Isla Riesco	604.1	0	558	0.00%
12452001	Río Pérez En Desembocadura	308.2	0	246	0.00%
12561001	Río Grande En Seno Otway	262.6	0	576	0.00%
12563001	Río Calete En Seno Otway	214.1	0	139	0.00%
12585001	Río Tres Brazos Antes Bt. Sendos	100.0	0	67	0.00%
12585002	Río Legnadura Antes Bt Sendos	49.0	0	82	0.00%
12586001	Río Las Minas En Bt. Sendos	35.6	0	118	0.00%
12600001	Río Rubens En Ruta N 9	504.4	0	433	0.00%
12622001	Río Penitente En Morro Chico	1479.5	0	5106	0.00%
12805001	Río Oscar En Bahia San Felipe	559.6	0	532	0.00%
12820001	Río Caleta En Tierra Del Fuego	87.9	0	124	0.00%
12825002	Río Azopardo En Desembocadura	3524.5	0	2494	0.00%
12863002	Río San Martín En San Sebastian	198.2	0	311	0.00%
12865001	Río Chico En Ruta Y-895	590.8	0	1367	0.00%
12876004	Río Catalina En Pampa Guanacos	82.7	0	144	0.00%
12878001	Río Rasmussen En Frontera	468.9	0	536	0.00%
12930001	Río Robalo En Puerto Williams	20.6	0	25	0.00%

Dado el carácter regional de la evaluación del porcentaje máximo de recarga disponible para la captación, no existen suficientes trabajos publicados para una evaluación exhaustiva; sin embargo, de los trabajos seleccionados que se envían en anexo, se destaca el trabajo de Heriksen et al., 2008, como más apto para adaptarse a la Región de Magallanes.

Los autores aplican modelos numéricos acuífero-río a todos los acuíferos de Dinamarca, considerando como variables limitativas las variables: caudal base, variación de recarga y caudal del río. Los autores también consideran la variabilidad climática asociada con la resiliencia de los acuíferos. También cabe señalar que la naturaleza de los acuíferos de este estudio es equivalente a los principales acuíferos de la Región de Magallanes. A partir de la aplicación de esta metodología, los autores calcularon que, para garantizar la sostenibilidad de los sistemas, el volumen máximo disponible para captura corresponde al 35% de la recarga, equivalente a 470,65 L/s (16 mm/año).

Otros autores aplican una captura entre 2.5-83% de la recarga, que depende de los límites de los sistemas acuíferos y del efecto negativo en la piezometría (Gejl et al., 2020; Chung et al., 2015). En Portugal, en el ámbito de los Planes de Gestión de las Regiones Hidrográficas (en cumplimiento de la Directiva Marco del Agua), los recursos hídricos subterráneos disponibles representan alrededor del 80% de la recarga media anual a largo plazo (APA, 2022).

A pesar de la falta de estudios más profundos aplicados al caso específico de la Región de Magallanes, se recomienda este valor como primera aproximación. El desarrollo de trabajos más profundos y el seguimiento del nivel piezométrico permitirán ajustar este valor en el futuro.

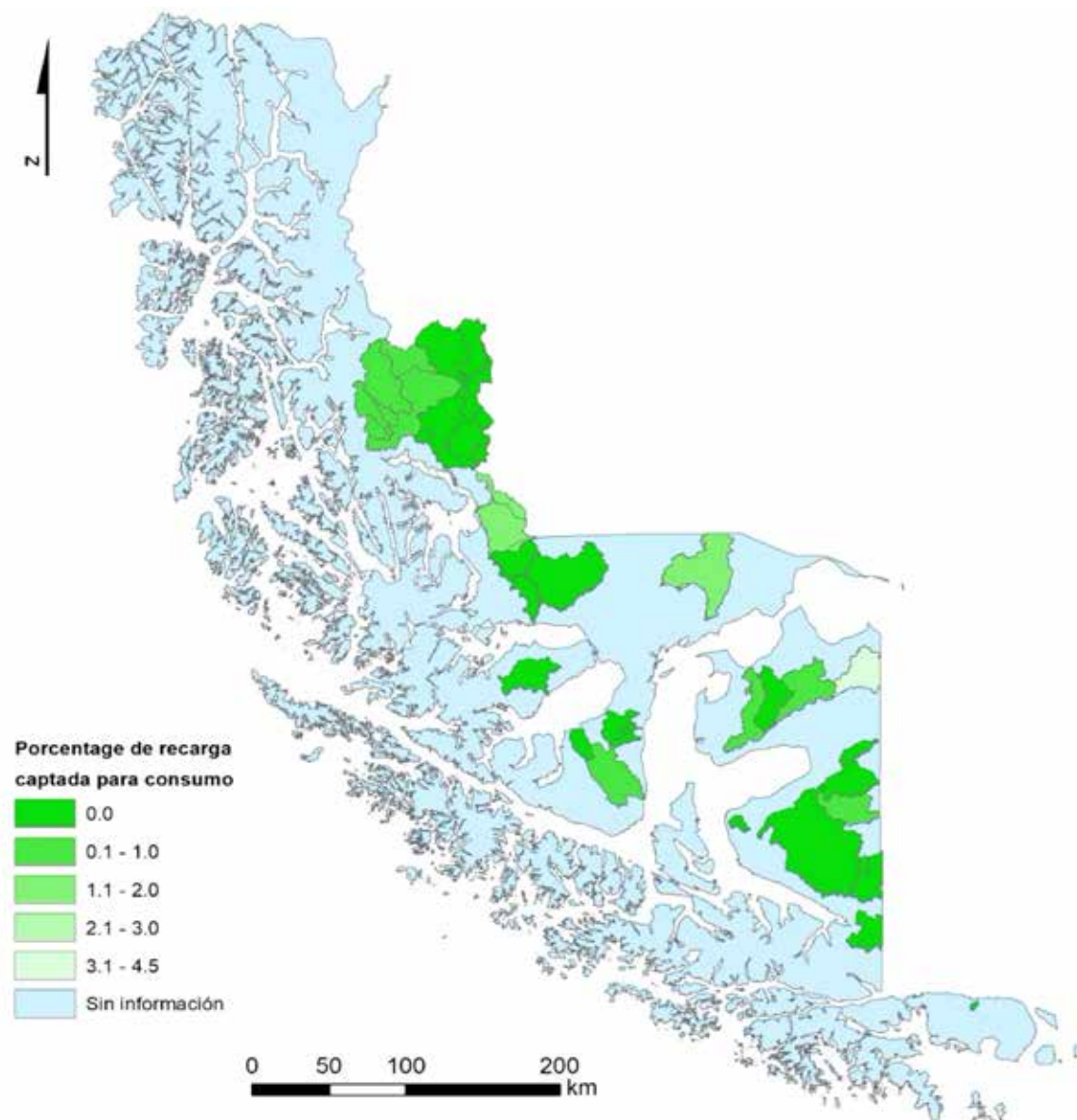


Figura 49 – Datos para el cálculo de la sostenibilidad del uso de aguas subterráneas en la Región de Magallanes (Camels, 2023).

Conclusiones

El presente trabajo se enmarca en la iniciativa **Escenarios Hídricos 2030, Fase III**, que es desarrollada por la Fundación Chile. Uno de los objetivos es Identificar zonas hídricas críticas que aportan a la conservación del ciclo del agua, levantando oportunidades para las soluciones basadas en la naturaleza y de reparación hidrológica en la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena.

En este informe se desarrolla el componente de Estimación de Recarga de Acuíferos, que consiste en la determinación de la recarga existente en los acuíferos de la Región de Magallanes, así como la distribución espacial de las zonas de recarga natural utilizando el modelo Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere (WetSpass).

Se presentan todos los insumos e información necesaria para la aplicación del modelo WetSpass, así como sus especificaciones y configuraciones. Se utilizaron mapas de inclinación del terreno, uso del suelo, textura del suelo, precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial, velocidad del viento y profundidad del nivel piezométrico.

Debido a la relación entre el uso del suelo y la disponibilidad y calidad de agua subterránea, se elaboró un estudio comparativo entre el uso del suelo en 1995 y 2019.

Este estudio se basó en información del estudio de Pliscoff (2023) en el cual se delimitaron espacialmente los diferentes tipos de ecosistemas identificados para toda la región. En este periodo se produjo un incremento de área con terrenos agrícolas y una expansión de los centros urbanos, pero que en la escala del área de estudio no es muy relevante.

Después del cálculo realizado con el modelo WetSpass utilizando los usos del suelo de 1995 y 2019, se pudieron determinar los impactos que los cambios en el uso del suelo han provocado en los procesos de recarga.

En cuanto a la simulación utilizando el uso del suelo de 2019, la situación no cambia significativamente, con excepción de algunas áreas locales donde el uso del suelo cambió para agrícola durante el periodo analizado (1995 a 2019). Esta variación del uso del suelo provocó una alteración en la distribución de la recarga, principalmente en Punta Arenas y Continental Norte. El valor promedio de recarga para toda la Región de Magallanes es de 36,8 mm/año.

Con el objetivo de identificar las zonas preferenciales de recarga, se realizó una reclasificación de los valores de recarga para representarlos por cuartiles de área. Así, se delimitan áreas con los valores de recarga más elevados que totalizan 12086 km². Estas áreas contribuyen con el 39% del total de la recarga (36 mm o 435 hm³/año) ocupando tan solo el 25% de la superficie de la cuenca.

Se realizó un análisis del riesgo de contaminación por nutrientes que fue basado en el Índice de Susceptibilidad (IS). Las clases de riesgo mayores están asociadas a áreas donde ocurre simultáneamente un valor elevado de recarga y uso agrícola, o donde hay pendientes menores y donde la profundidad del agua es menor. Este resultado está asociado a las prácticas agrícolas en terrenos poco inclinados en un suelo con un componente arenoso significativo donde, además, la profundidad del nivel piezométrico oscila entre 0 y 7 m. Sin embargo, las zonas

urbanas presentan un riesgo “Moderado a alto” debido a la proximidad de los niveles de agua a la superficie.

En cuanto a la evolución del riesgo de contaminación entre 1995 y 2019, se puede concluir, de manera general, que el riesgo es similar en ambos años.

La ausencia de una red de monitoreo del nivel piezométrico no permite realizar una evaluación del régimen de explotación de los acuíferos de la región. Por este motivo, se propone, como primera medida de gestión del agua subterránea, la implementación de una red de monitoreo de vigilancia de cantidad y calidad del agua en las cuencas con mayores captaciones.

La discretización espacial del modelo, con celdas de 30 metros, puede ser más o menos relevante dependiendo de la escala de los futuros proyectos. En el caso de proyectos a escala regional, como la gestión de un acuífero, cuenca o parque natural, la escala es adecuada, ya que presenta tendencias regionales. En el caso de proyectos muy localizados (por ejemplo, la instalación de un pozo), puede ser útil como primer enfoque; sin embargo, las especificidades locales pueden requerir estudios más refinados que utilicen métodos in situ.

Abdollahi, K., Bashir, I., Verbeiren, B., Harouna, M.R., Griensven, A.V., Huysmans, M., Batelaan, O., 2017. A distributed monthly water balance model: formulation and application on Black Volta Basin. *Environ Earth Sci* (2017) 76:198

Alvarez-Garretón, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., and Ayala, A.: The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 5817-5846, <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>, 2018.

APA, Agência Portuguesa do Ambiente (2022), *Plano de Gestão de Região Hidrográfica do Rio Tejo e ribeiras do Oeste (RH5A), Fichas de massas de água, Volumes I e II. APA, Lisboa.*

Barría, P., Sandoval, I. B., Guzman, C., Chadwick, C., Alvarez-Garretón, C., Díaz-Vasconcellos, R., Ocampo-Melgar, A., Fuster, R.: Water allocation under climate change: A diagnosis of the Chilean system. *Elem Sci Anth*, 9(1), 00131, <https://doi.org/10.1525/elementa.2020.00131>, 2021.

Batelaan, O., De Smedt, F., 2007. GIS-based recharge estimation by coupling surface–subsurface water balances. *J Hydrol* 337(3):337–355

Camels, Camels-CL Explorer (2023) <https://camels.cr2.cl>

Casanova, M., Salazar, O., Seguel, O., Luzio, W., 2013. *The Soils of Chile*. World Soils Book Series, Springer. ISBN 978-94-007-5949-7 (eBook)

DGA (2016) Actualización de la información y modelación hidrológica hídrica de la XII Región, de Magallanes. y la Antártida. Informe Definitivo, Etapa II. Santiago, 249 p.

DGA (2021) Plan Estratégico de Gestión Hídrica en las Cuencas de Punta Arenas. Informe Final. Santiago, 345 p.

FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC. (2012). *Harmonized World Soil Database (version 1.2)*.

FAO/ISRIC/IUSS. (2007). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo* (Segunda ed).

Galleguillos, M., Zambrano, M., Puelma, C. y Jopia, A. (2017). Evaluación espacio-temporal del déficit hídrico para las cuencas de Chile a partir de información satelital. Santiago, Chile. Iniciativa Escenarios Hídricos 2030. Disponible en URL: <http://escenarioshidricos.cl/multimedia/>

Henriksen, H.J., Trolldborg, L., Højberg, A.L., Refsgaard, J.C. (2008) Assessment of exploitable groundwater resources of Denmark by use of ensemble resource indicators and a numerical groundwater–surface water model. *Journal of Hydrology* 348, 224–240. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.09.056

Pliscoff, P. (2023) Análisis del estado actual de los ecosistemas terrestres en la región de Magallanes. Estudio realizado para Escenarios Hídricos 2030, Fase III. Universidad Católica de Chile.

Luzio, W., W., Casanova Pinto, M. y Seguel Seguel, Ó. (2010). *Suelos de Chile*. Santiago, Universidad de Chile, 2010. 360 p. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/182305>

Servicio Nacional de Geología y Minería, 2003. Mapa geológico de Chile: versión digital. Publicación geológica digital, No. 4, 2003, Base Geológica escala 1:1.000.000

I. Mapa de las cuencas de la Región de Magallanes

Anexo

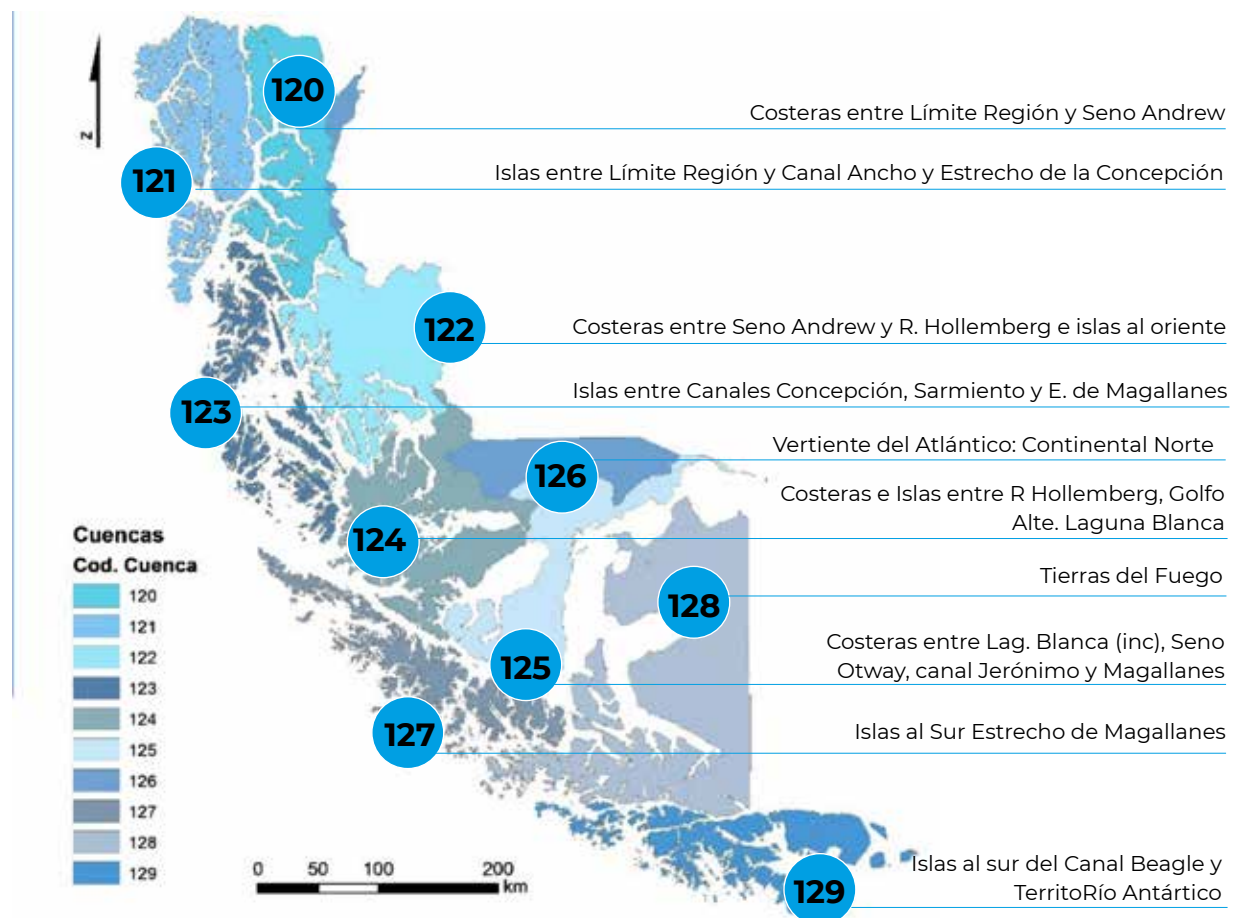


Figura 50 – Cuencas de la Región de Magallanes

II. Mapas de **recarga** con resolución a nivel de cuencas

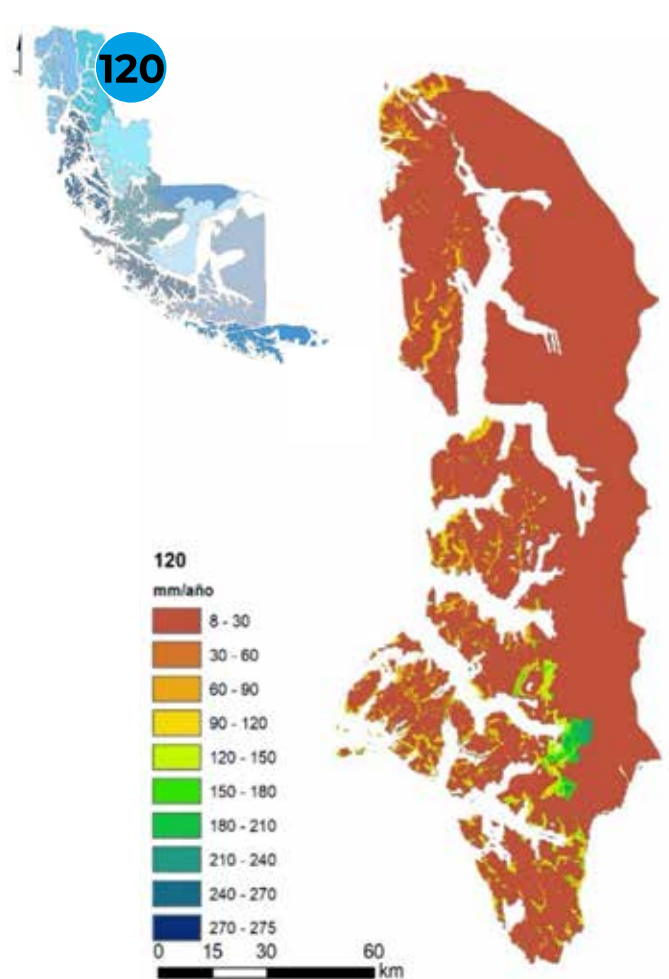


Figura 51 – Cuenca Costeras entre Límite Región y Seno Andrew (Cod. 120).

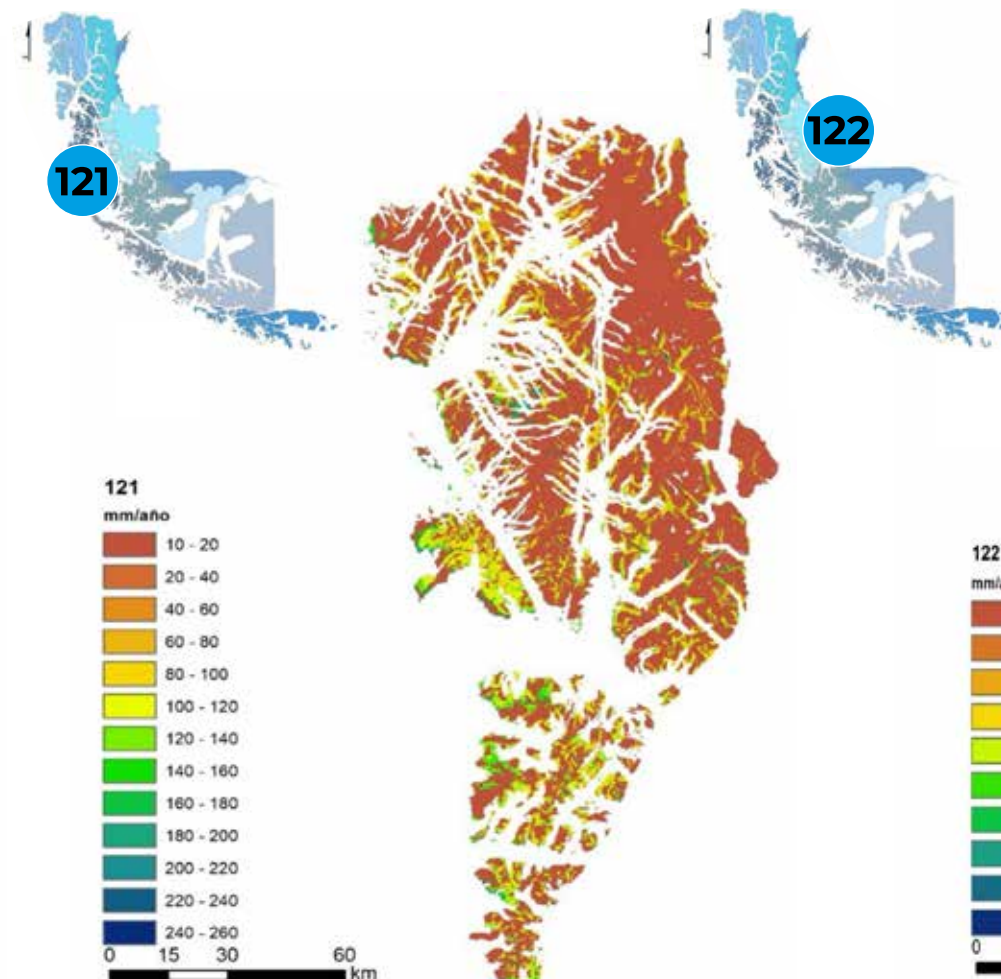


Figura 52 – Cuenca Islas entre Límite Región y Canal Ancho y Estrecho de la Concepción (Cod. 121).

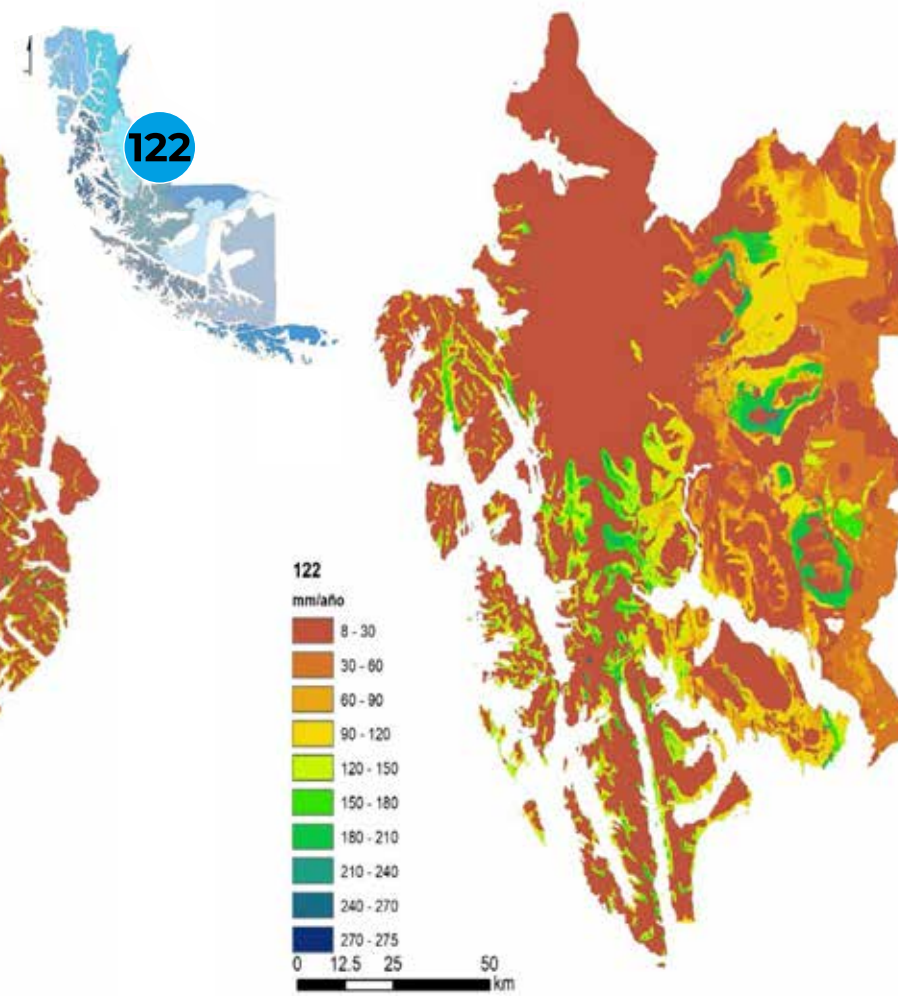


Figura 53 – Cuenca Costeras entre Seno Andrew y R. Holleberg e islas al oriente (Cod. 122).

II. Mapas de **recarga** con resolución a nivel de cuencas

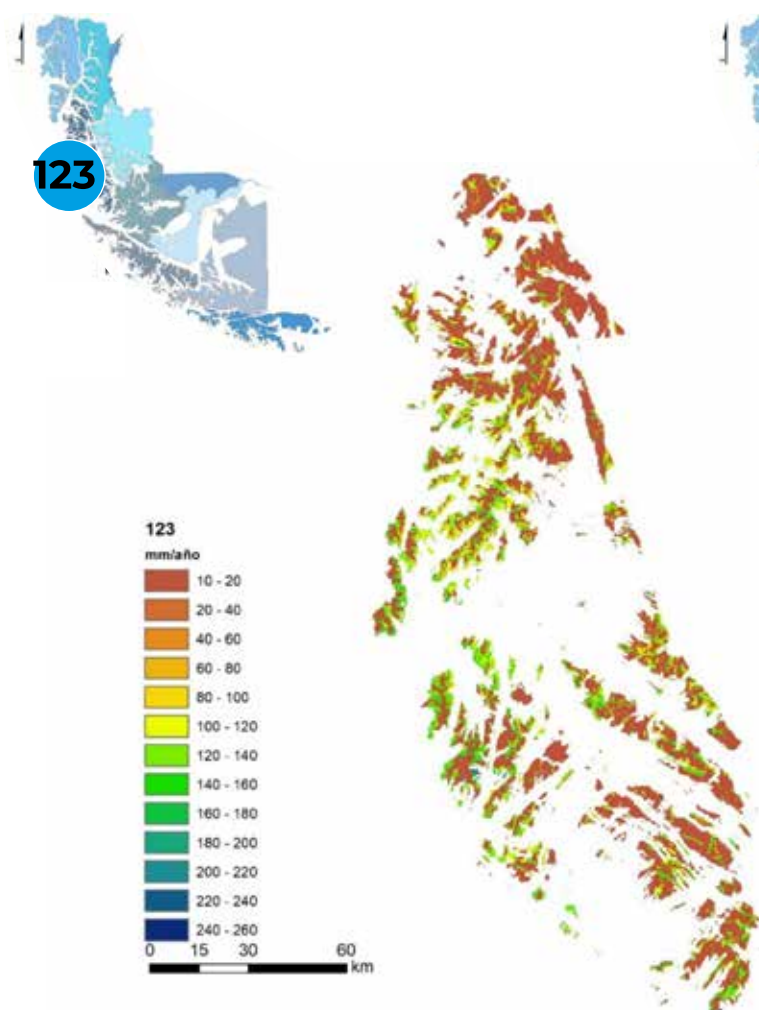


Figura 54 – Cuenca Islas entre Canales Concepción, Sarmiento y E. de Magallanes (Cod. 123).

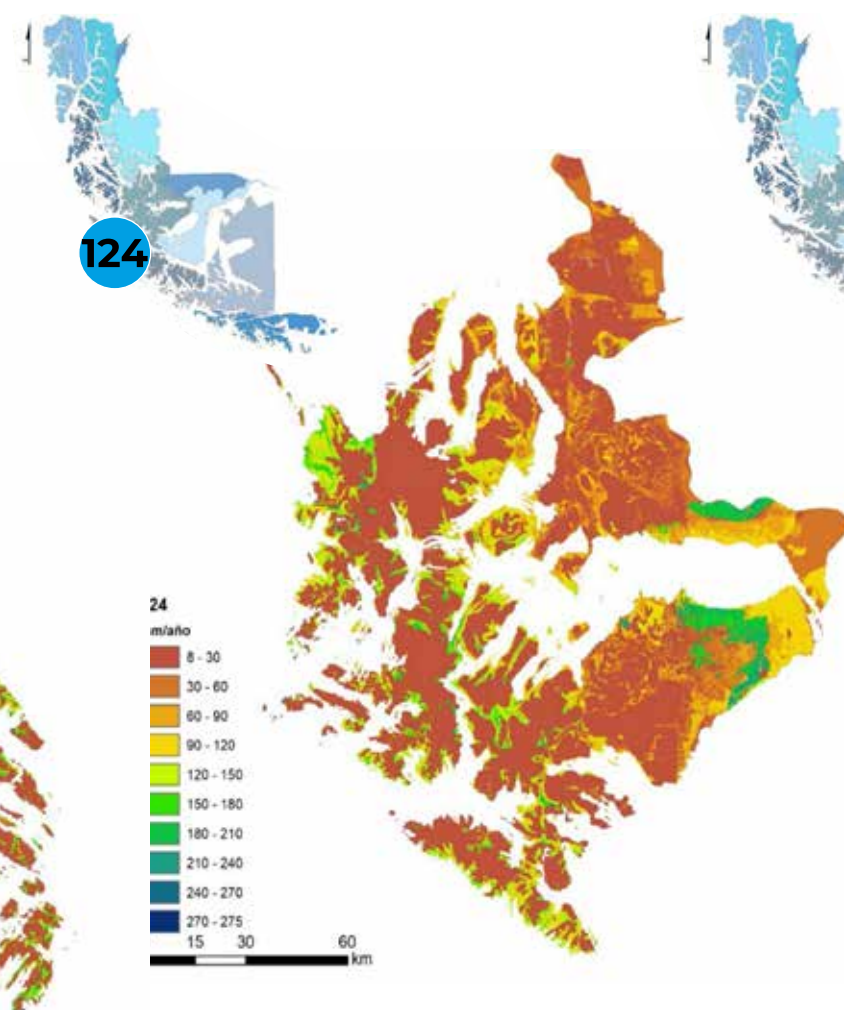


Figura 55 – Cuenca Costeras e Islas entre R Holleberg, Golfo Alte. Laguna Blanca (Cod. 124)

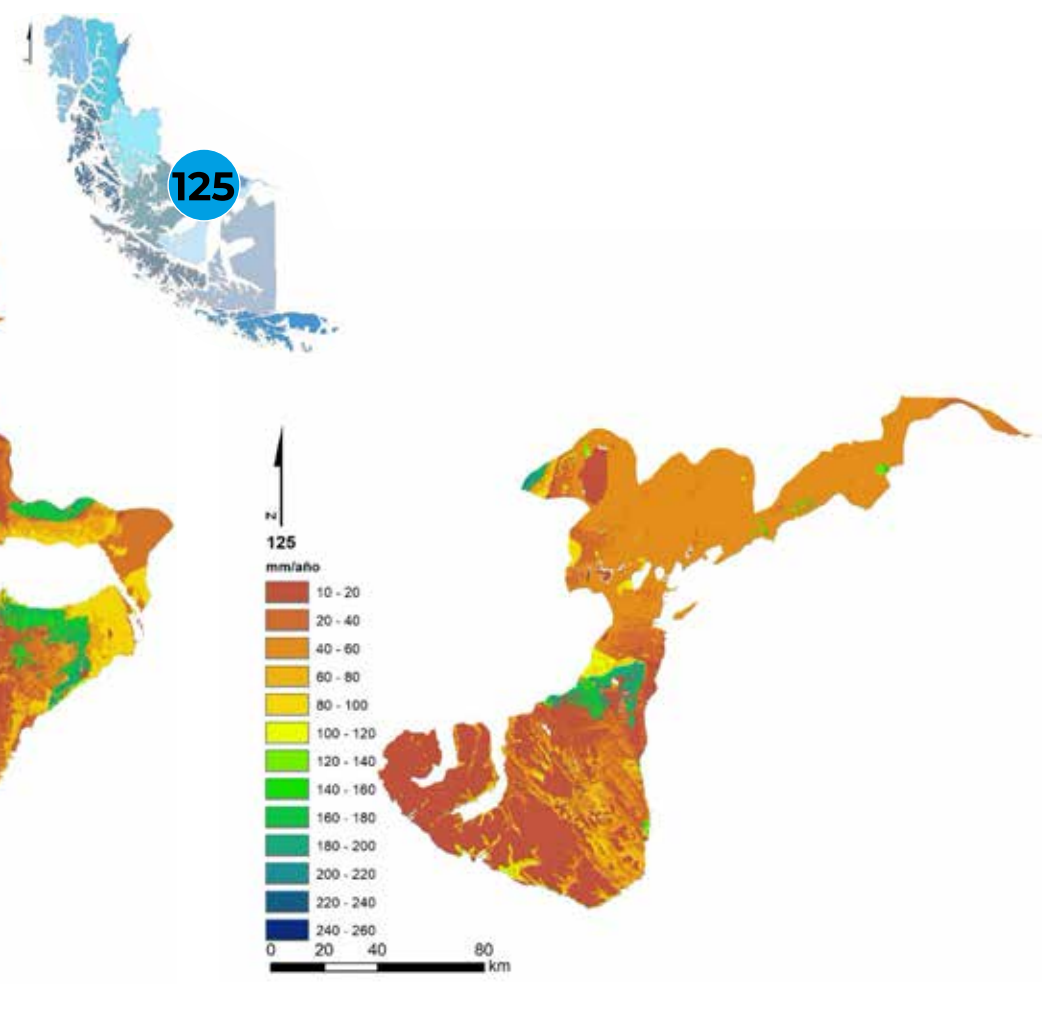


Figura 56 – Cuenca Costeras entre Lag. Blanca (inc), Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes (Cod. 125).

II. Mapas de **recarga** con resolución a nivel de cuencas

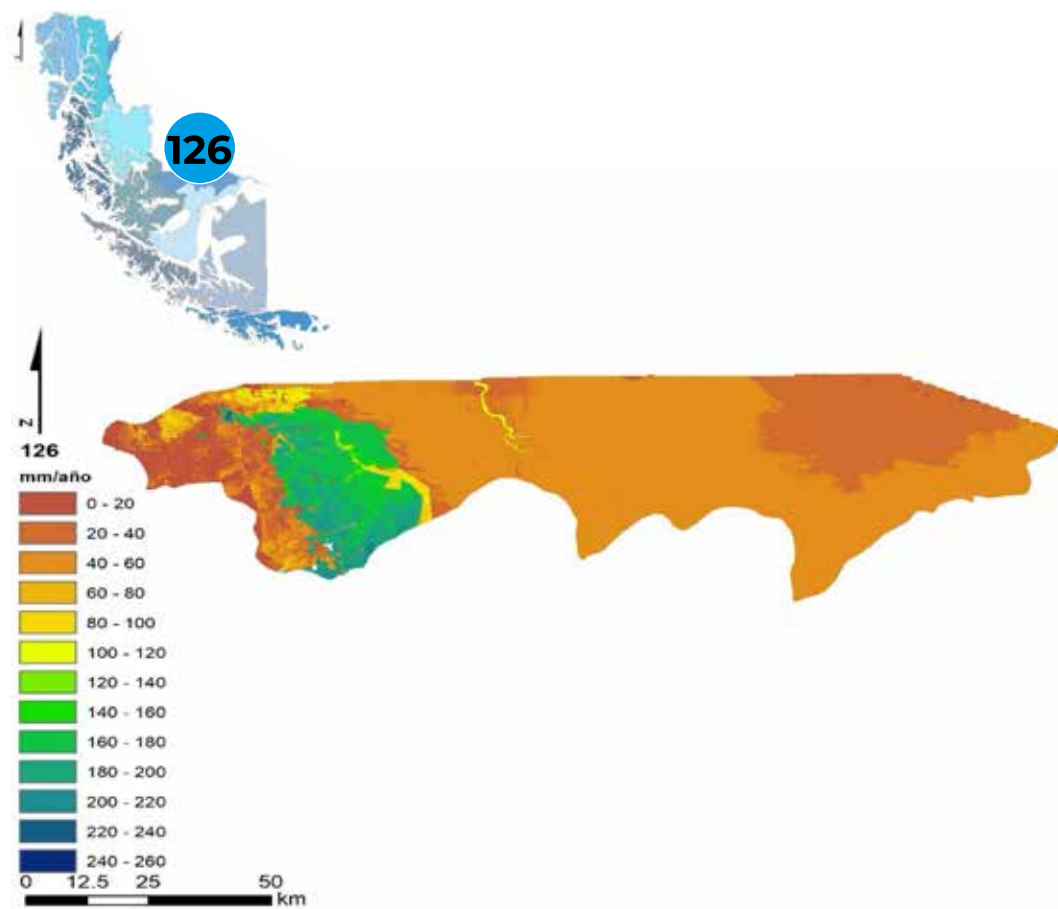


Figura 57 – Recarga en la Cuenca Vertiente del Atlántico: Continental Norte (Cod. 126).

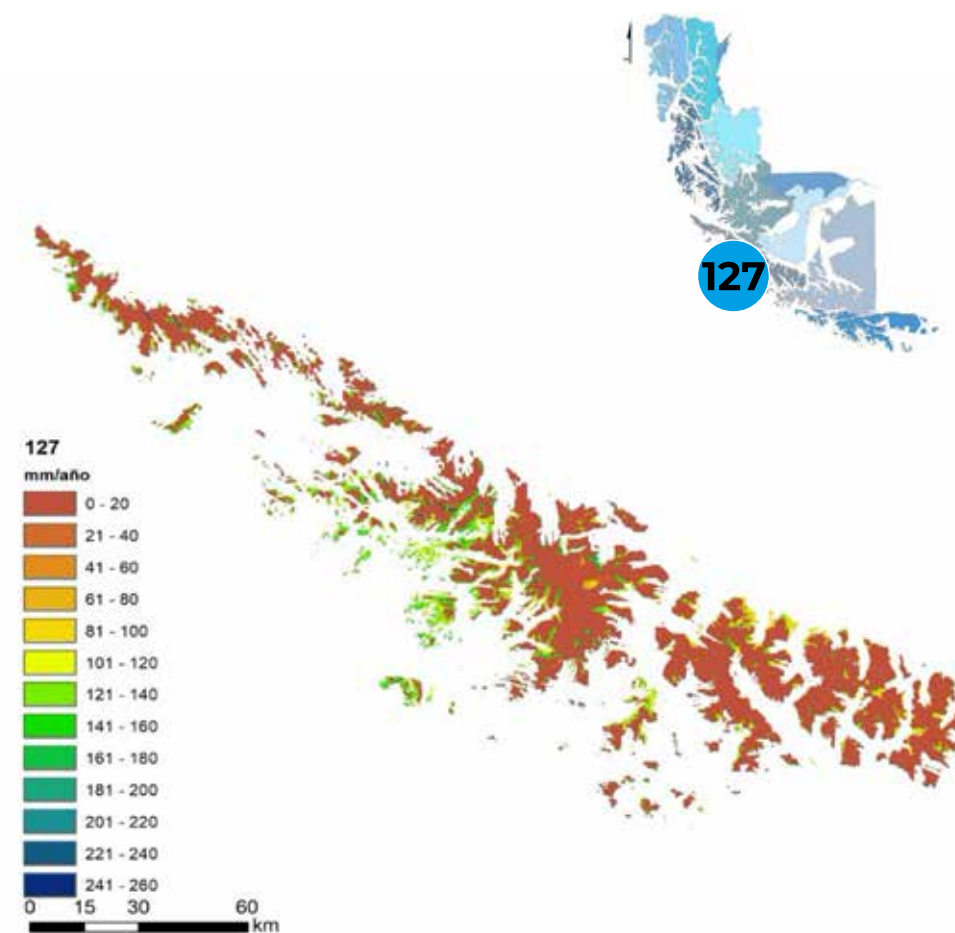


Figura 58 – Cuenca Islas al Sur Estrecho de Magallanes (Cod. 127).

II. Mapas de **recarga** con resolución a nivel de cuencas

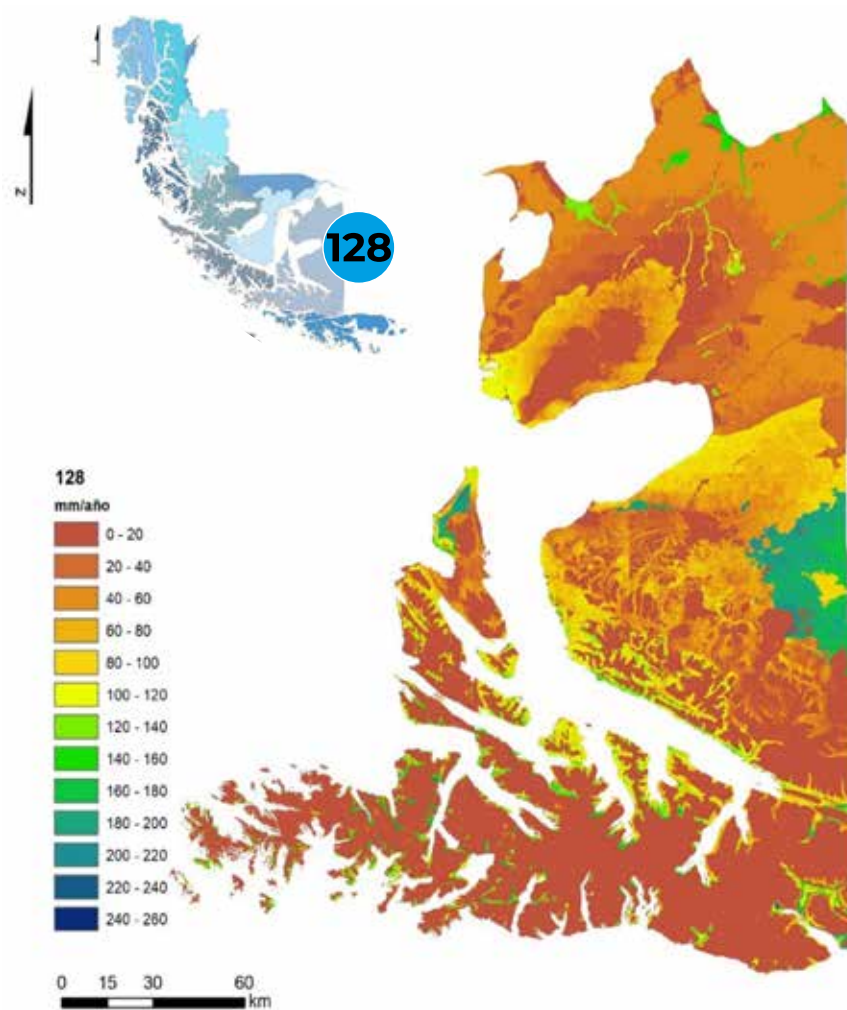


Figura 59 – Recarga en la Cuenca Tierras del Fuego (Cod. 128).

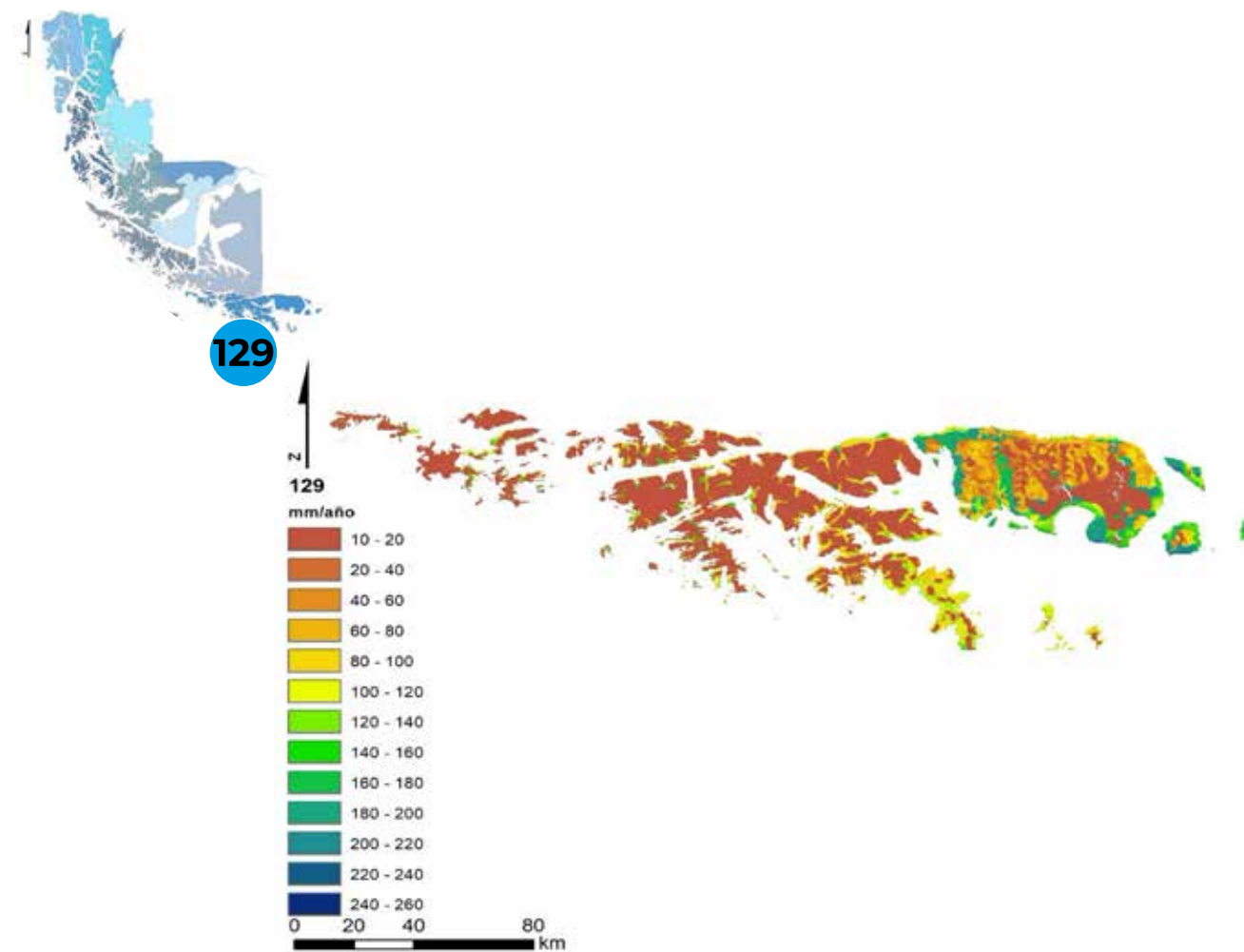


Figura 60 – Cuenca Islas al sur del Canal Beagle y Territorio Antártico (Cod. 129).

II. Mapas de **Clases de Riesgo de contaminación** con resolución a nivel de cuencas

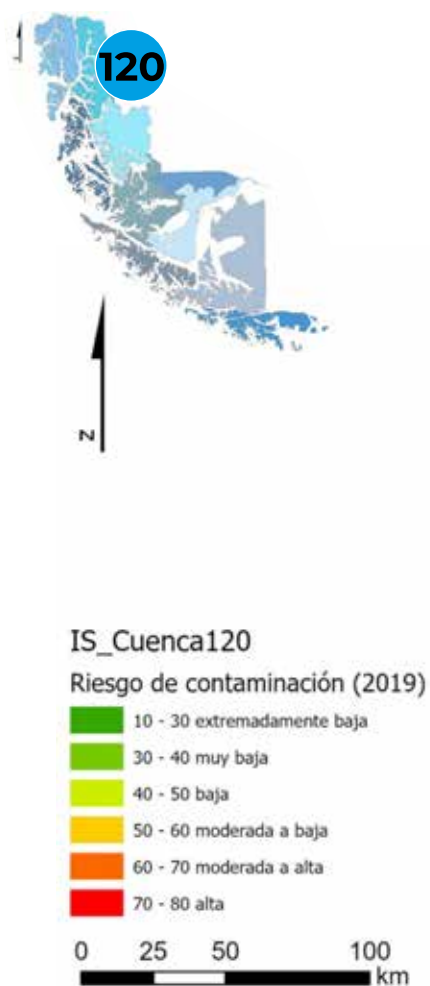


Figura 61 – Cuenca Costeras entre Límite Región y Seno Andrew (Cod. 120)

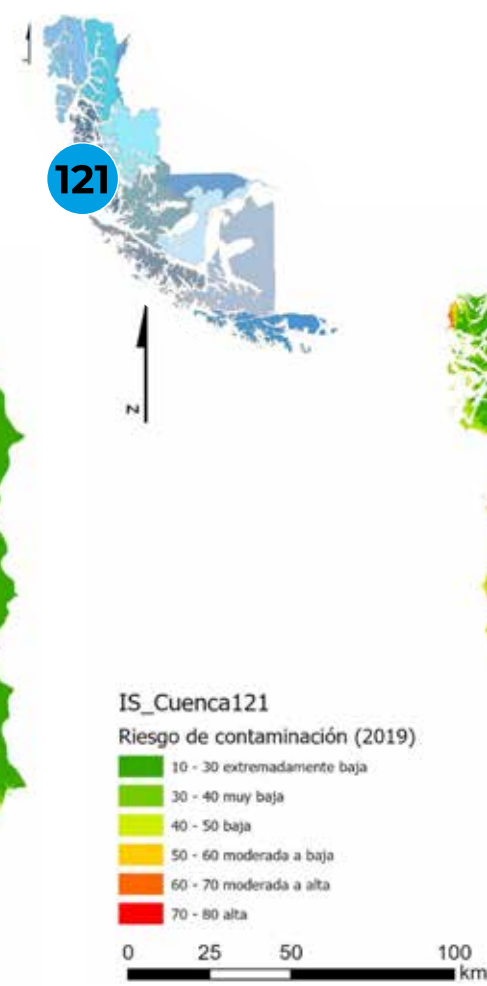


Figura 62 – Cuenca Islas entre Límite Región y Canal Ancho y Estrecho de la Concepción (Cod. 121).

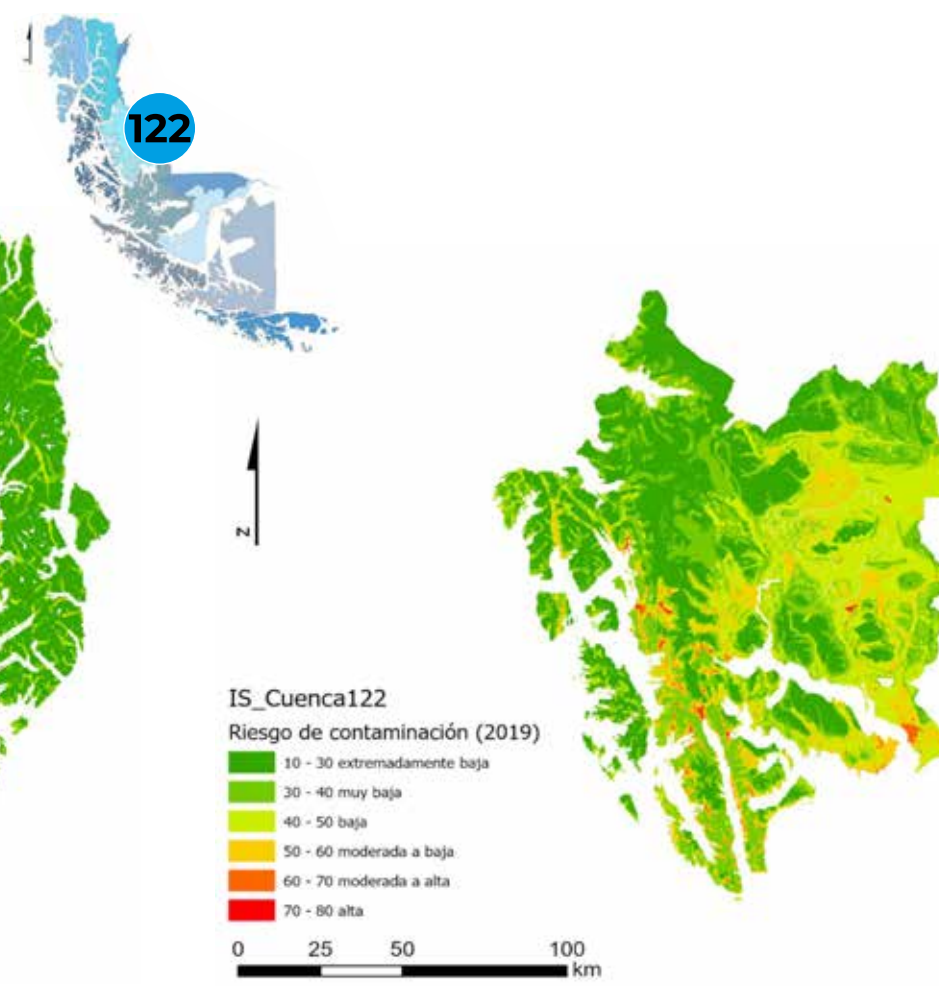


Figura 63 – Cuenca Costeras entre Seno Andrew y R. Holleberg e islas al oriente (Cod. 122).

II. Mapas de **Clases de Riesgo de contaminación** con resolución a nivel de cuencas

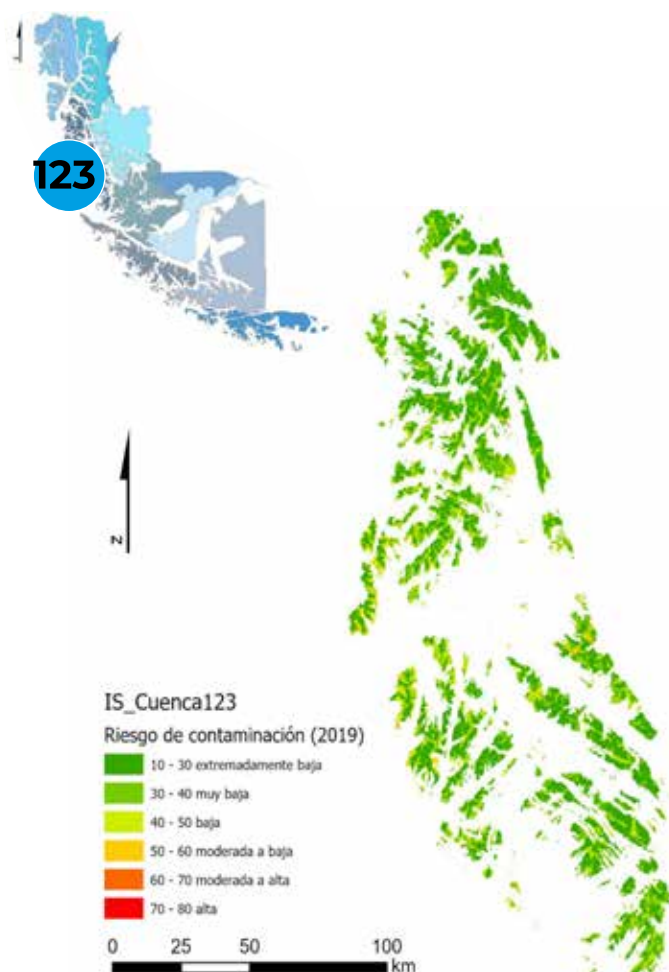


Figura 64 – Cuenca Islas entre Canales Concepción, Sarmiento y E. de Magallanes (Cod. 123).

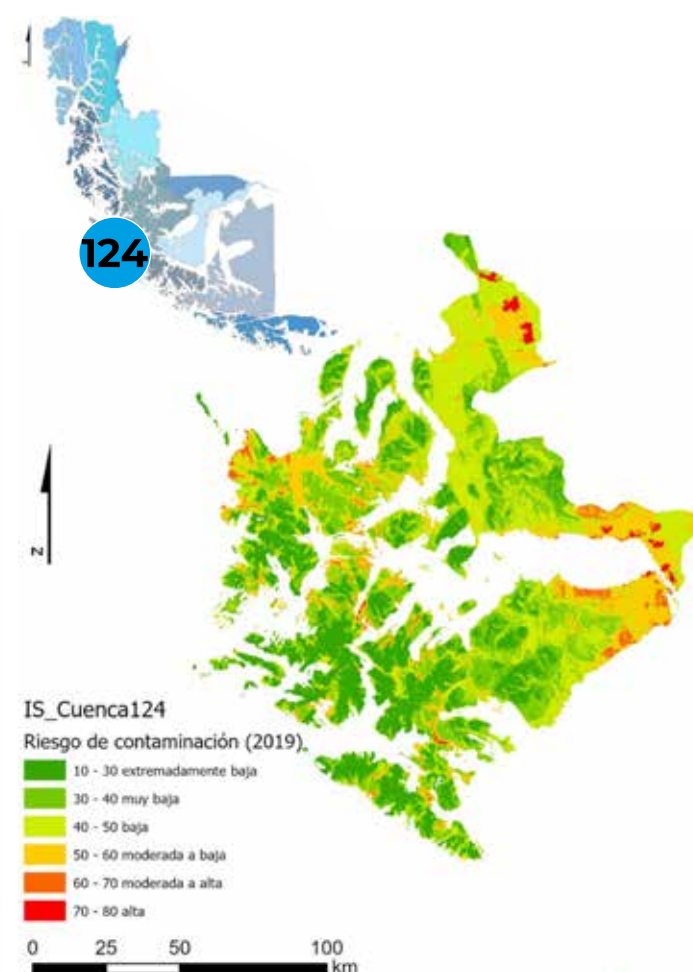


Figura 65 – Cuenca Costeras e Islas entre R Holleberg, Golfo Alte. Laguna Blanca (Cod. 124)

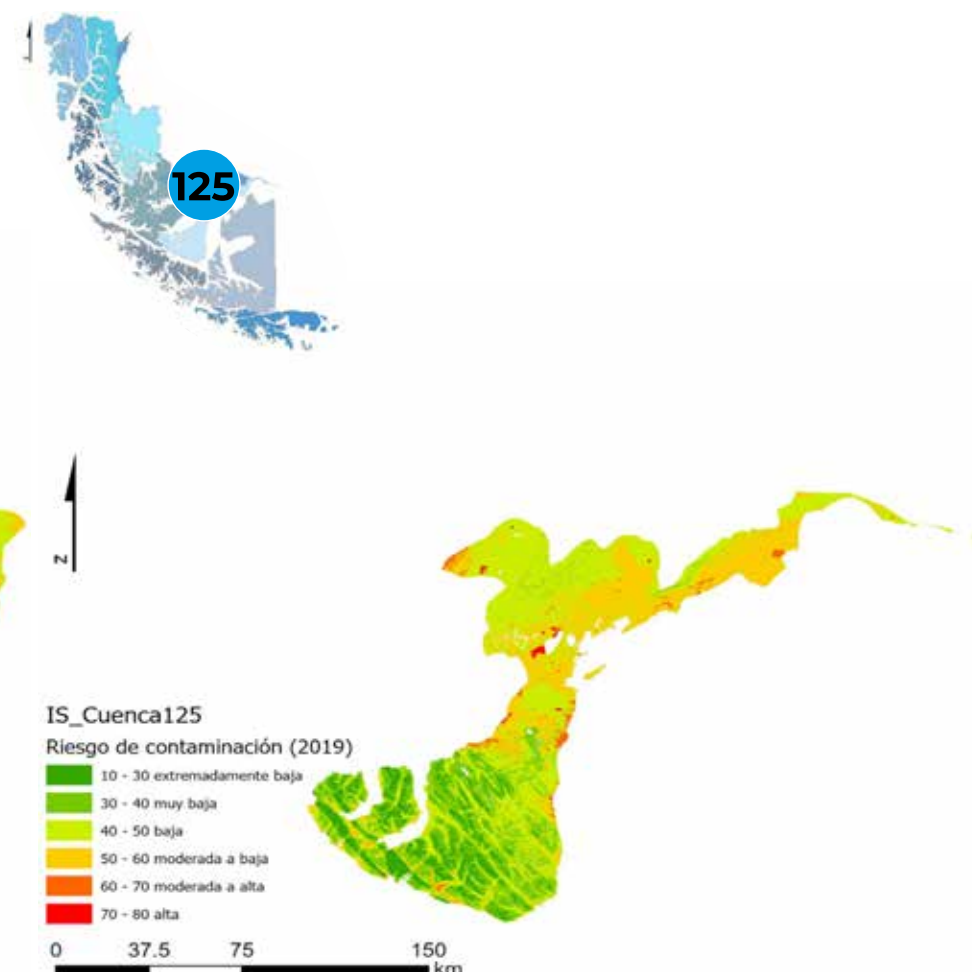


Figura 66 – Cuenca Costeras entre Lag. Blanca (inc), Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes (Cod. 125).

II. Mapas de **Clases de Riesgo de contaminación** con resolución a nivel de cuencas

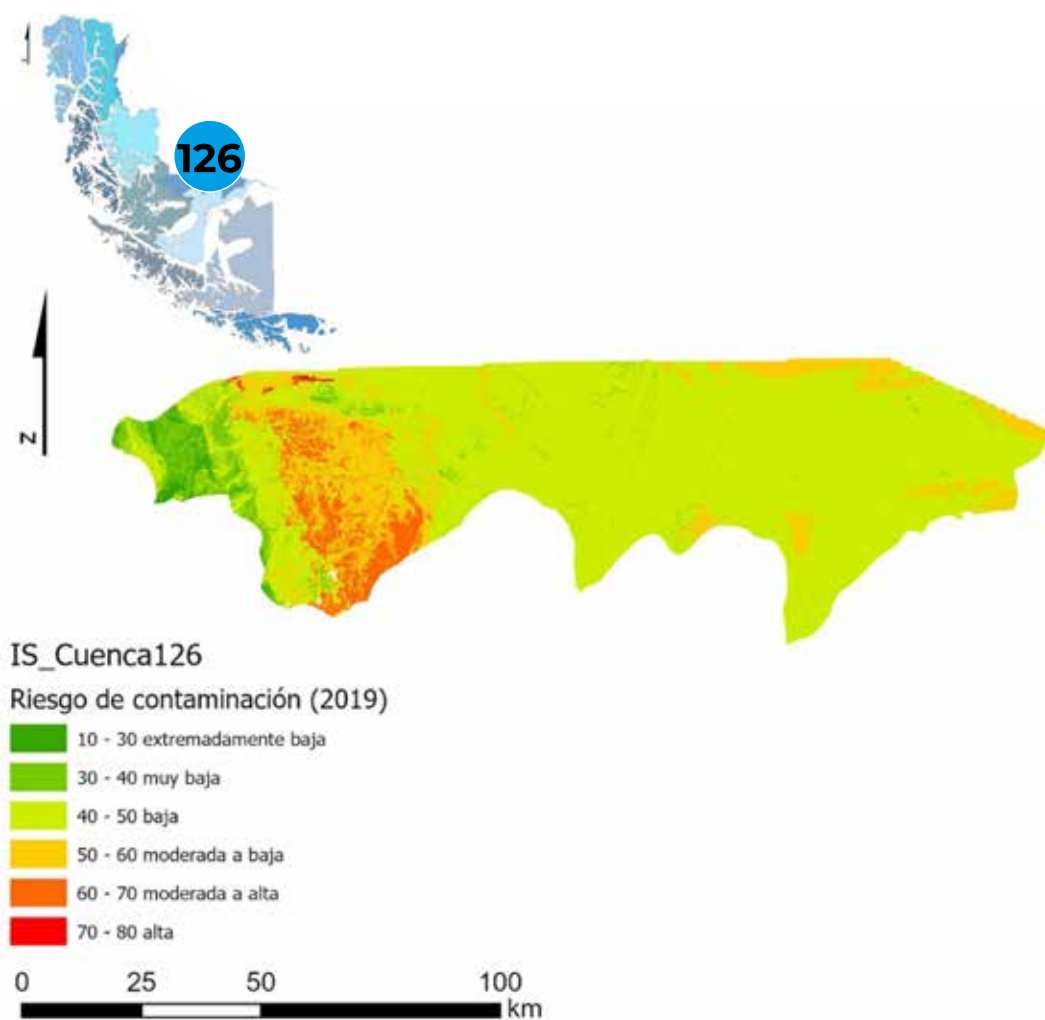


Figura 67 – Recarga en la Cuenca Vertiente del Atlántico: Continental Norte (Cod. 126).

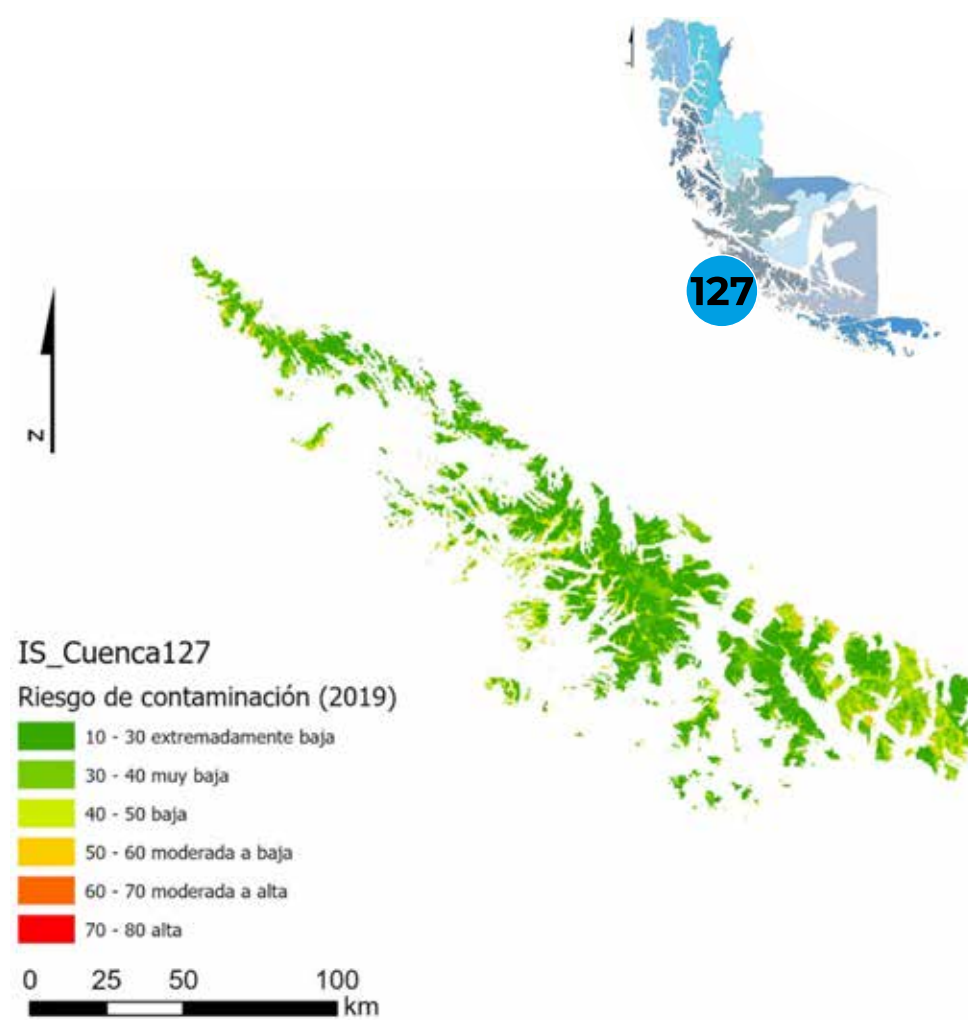


Figura 68 – Cuenca Islas al Sur Estrecho de Magallanes (Cod. 127).

II. Mapas de **Clases de Riesgo de contaminación** con resolución a nivel de cuencas

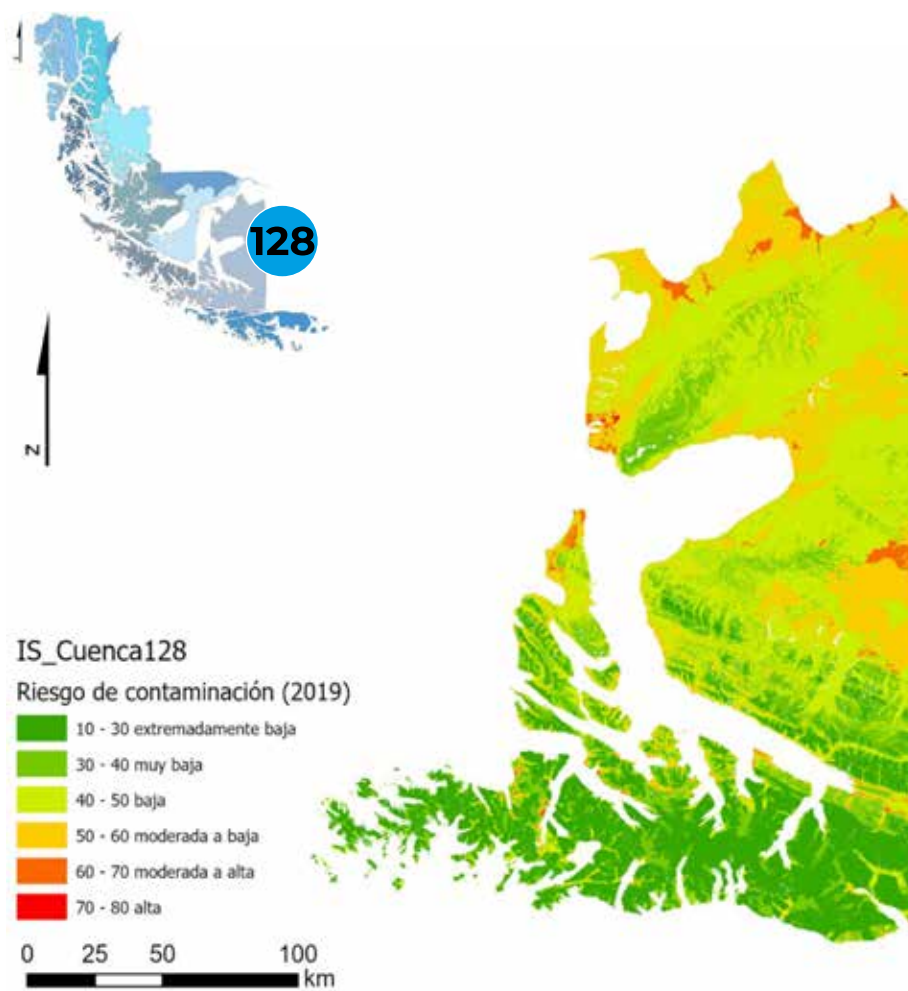


Figura 69 – Recarga en la Cuenca Tierras del Fuego (Cod. 128).

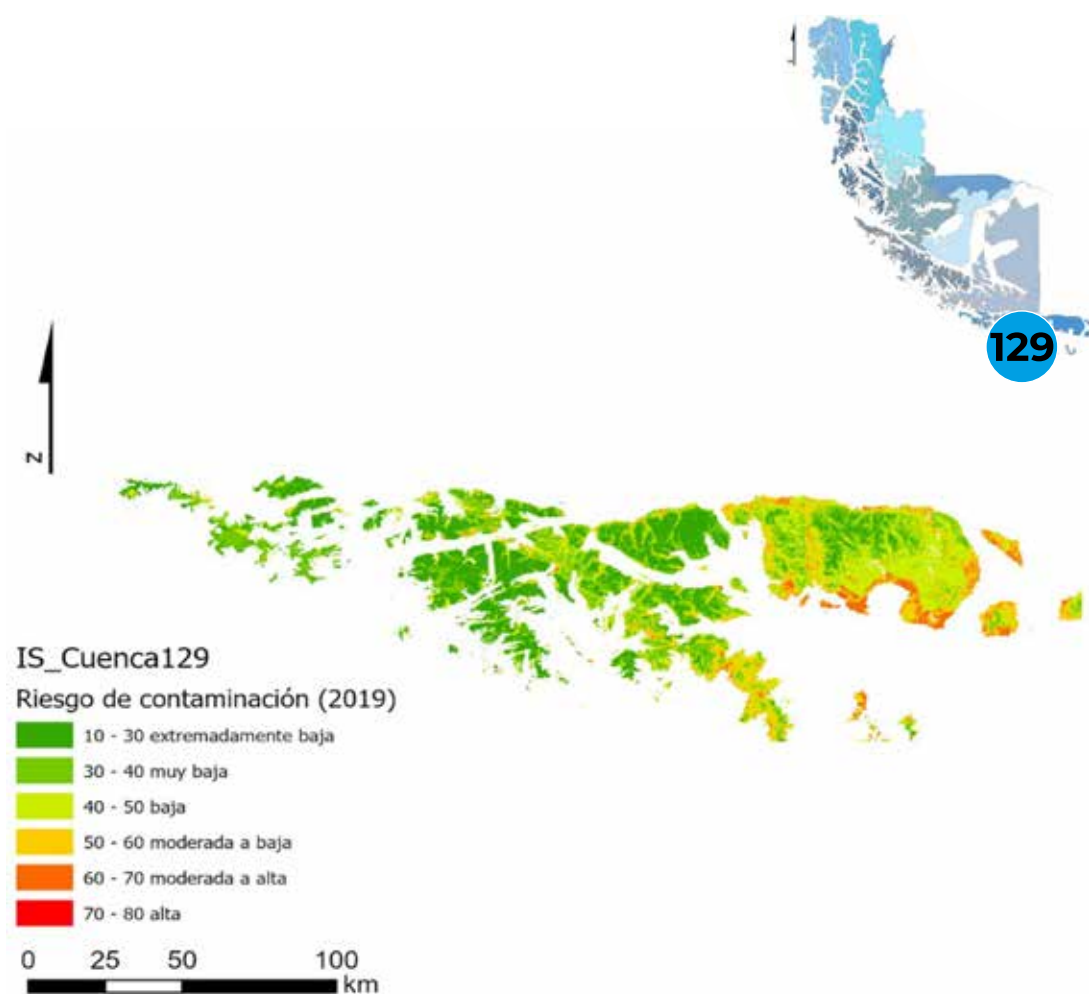


Figura 70 – Cuenca Islas al sur del Canal Beagle y Territorio Antártico (Cod. 129).

ANÁLISIS CAPACIDAD DE USO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Región de Magallanes

El agua subterránea es una parte del ciclo del agua. Cualquier medida y gestión que afecte su cantidad y calidad repercutirá en los restantes componentes de este ciclo.

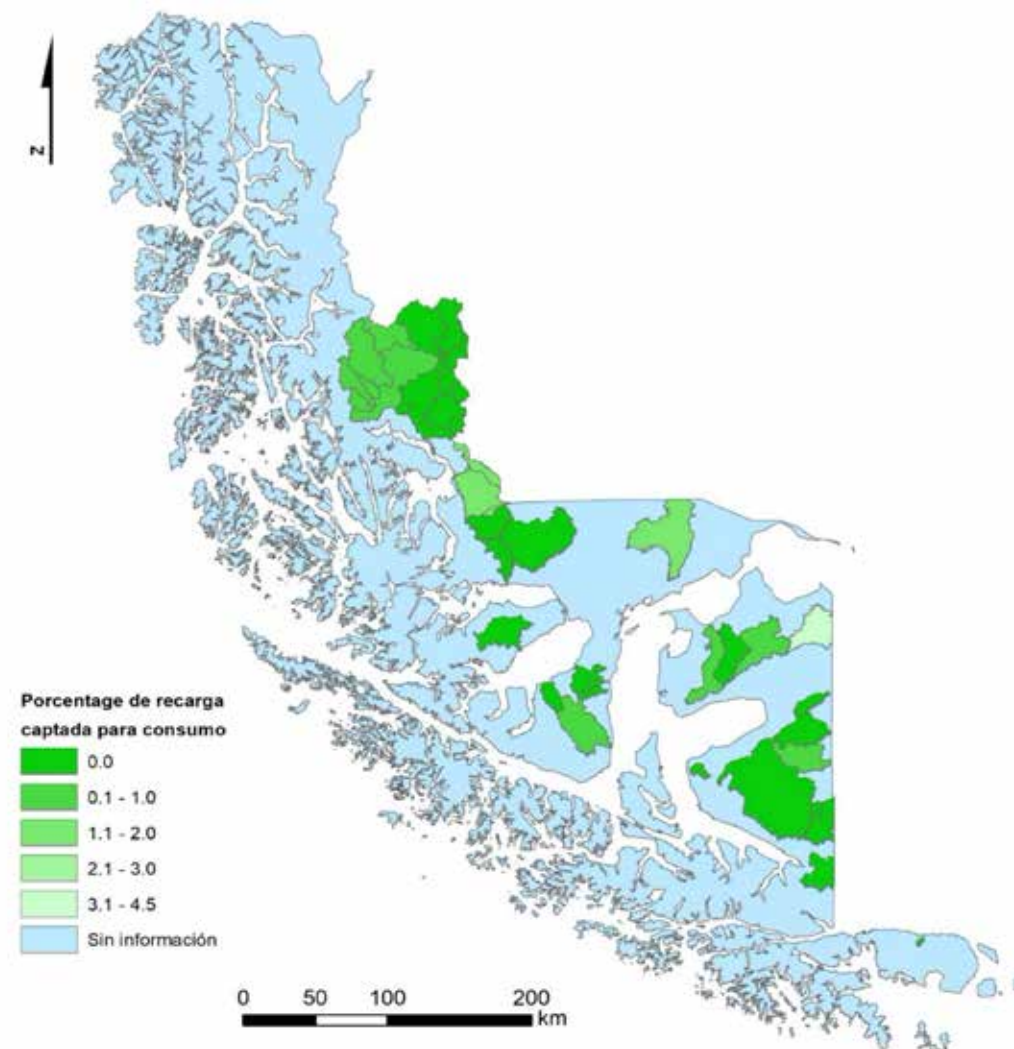
Este hecho significa que la cuantificación y aplicación del porcentaje máximo de recarga que se puede captar influye en todos los usuarios, desde la disponibilidad de agua para los ecosistemas dependientes, los volúmenes disponibles para el caudal base de los ríos, la mayor o menor capacidad de recarga de los acuíferos (recarga inducida), entre otros fenómenos.

Dada la relación entre todos estos factores, la definición de este parámetro requiere de estudios en profundidad a nivel del acuífero y de la cuenca hidrográfica donde se inserta.

Actualmente, la modelación numérica de la dirección del flujo de agua subterránea junto con modelos hidrológicos es el enfoque más confiable para definir este valor.

La Unión Europea obliga a sus estados miembros a definir este porcentaje para evaluar el estudio cuantitativo de las masas de agua subterránea; es decir, cuando los volúmenes anuales de extracción son superiores al límite impuesto por el porcentaje máximo de recarga, se considera que el acuífero está en mal estado. En este caso, los estados miembros están obligados a definir un conjunto de medidas para que el acuífero vuelva a estar en buenas condiciones.

La siguiente figura muestra el porcentaje de recarga en la Región de Magallanes destinado presentemente a derechos de uso de aguas subterráneas. De acuerdo con estos resultados, no se considera que pueda haber un escenario de sobreexplotación.



Cabe señalar que los derechos otorgados para toda la región son de 134,48 L/s (fuente: Dirección General de Aguas (DGA) en CAMELS-CL Explorer, organizados por cuencas: Alvarez-Garreton et al, 2018; Barría et al., 2021), frente a una recarga promedio 1344,71 L/s para toda la Región de Magallanes.

La siguiente tabla contiene los datos disponibles que se utilizarán para crear un mapa de sostenibilidad de uso de agua subterránea, considerando el consumo estimado en cada punto por subcuenca, y la recarga espacial calculada con Wetspass. Los porcentajes de uso de agua subterránea en relación con la recarga promedio de cada subcuenca se detallan en la última columna de la tabla.

Dado el carácter regional de la evaluación del porcentaje máximo de recarga disponible para la captación, no existen suficientes trabajos publicados para una evaluación exhaustiva, sin embargo, de los trabajos seleccionados que se envían en anexo, se destaca el trabajo de Heriksen *et al.*, 2008, como más apto para adaptarse a la Región de Magallanes.

Los autores aplican modelos numéricos acuífero-río a todos los acuíferos de Dinamarca, considerando como variables limitativas las variables: caudal base, variación de recarga y caudal del río. Los autores también consideran la variabilidad climática asociada con la resiliencia de los acuíferos. También cabe señalar que la naturaleza de los acuíferos de este estudio es equivalente a los principales acuíferos de la Región de Magallanes.

A partir de la aplicación de esta metodología, los autores calcularon que, para garantizar la sostenibilidad de los sistemas, el volumen máximo disponible para captura corresponde al 35% de la recarga, equivalente a 470,65 L/s (16 mm/año).

A pesar de la falta de estudios más profundos aplicados al caso específico de la Región de Magallanes, se recomienda este valor como primera aproximación. El desarrollo de trabajos más profundos y el seguimiento del nivel piezométrico permitirán ajustar este valor en el futuro.

ID gauge	Nombre de gauge	Area (km²)	Consumo (L/s)	Recarga (L/s)	Porcentaje de recarga otorgada
12861001	Río Cullen En Frontera	708.6	51.7	1150	4.50%
12660001	Río Ci-Aike Antes Frontera	1460.4	27.61	2006	1.38%
12400003	Río Tranquilo En Ruta N 9	380.3	16	415	3.86%
12400004	Río Hollemberg En Desembocadura	1236.1	16	951	1.68%
12289001	Río Serrano En Desembocadura	8574.6	8.6	15627	0.06%
12284005	Río Don Guillermo En Cerro Castillo	500.0	2.6	473	0.55%
12284007	Río Las Chinas Antes Desague Del Toro	3936.8	2.6	4580	0.06%
12802001	Río Side En Cerro Sombrero	808.5	1.38	937	0.15%
12876001	Río Grande En Tierra Del Fuego	2841.0	0.91	3940	0.02%
12806001	Río Oro En Bahía San Felipe	600.7	0.86	497	0.17%
12872001	Río Herminita En Ruta Y-895	590.8	0.72	2277	0.03%
12582001	Río San Juan En Desembocadura	864.0	0.3	920	0.03%

Estimación de la recarga en la **Región de Magallanes** a través del **Modelo WetSpass**

Enero 2024