

“Estudio de adaptación al cambio climático para INTERCHILE.”

Tomo II:

Análisis de riesgos climáticos

Preparado para:



INTERCHILE

Cerro el Plomo 5630, oficina 1803, Las Condes, Santiago, Chile

Preparado por:



Con el apoyo de:

Centro UC
Energía

Centro de Cambio Global UC | Centro de Energía UC
Pontificia Universidad Católica de Chile
Av. Vicuña Mackenna 4860 - - Santiago - Chile
Fono: +56 9 5504 4137 | +56 9 5504 5895-
E-mail: cambioglobal@uc.cl

“Estudio de adaptación al cambio climático para INTERCHILE.”

Rol	Profesional	Especialidad
Dirección	PhD. Sebastián Vicuña	Ingeniería
Coordinación	MsC. David Morales	BBDD
	Rosario Chubretovic	Modelos clima
Especialista	PhD. Jorge Gironás	Hidrología y Eventos Extremos
	PhD. Horacio Gilabert	Riesgo de Incendios
	PhD. Álvaro Lorca	Riesgos sistémicos y de transición
	PhD. Francisco Meza	Comunidades / Agricultura
	PhD. Luis Abdón Cifuentes	Comunidades / Olas de calor
	PhD. Oscar Melo	Vulnerabilidad comunidades
Apoyo técnico	Rosario Chubretovic	Clima/eventos de temperatura extrema
	Juan de Dios Guzmán	Clima/aluviones
	Diego González	Riesgo de Incendios
	Katherine Duarte	Comunidades / Agricultura
	Manuel Portilla	Riesgos Transición
	Cristián Villalobos	Riesgos Transición
	Lucas Maulén	Riesgos Transición
	Juan Pablo Herane	Vulnerabilidad comunidades
	Paula Toledo	Vulnerabilidad comunidades

Fecha	Elaborado por	Revisado por	Versión
28-06-2024	DM/RC/JDG/DG/KD/MP/CV/LM/LPH	SV	2

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO	24
GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS	28
1 INTRODUCCIÓN GENERAL Y ANTECEDENTES	30
1.1 Introducción y objetivos del estudio	30
1.2 Marco conceptual	34
2 RIESGOS FÍSICOS DE ORIGEN CLIMÁTICO	41
2.1 Metodología general	41
2.2 Metodología específica para riesgos físicos sobre activos	42
2.2.1 Condiciones medias de temperaturas y precipitaciones	42
2.2.2 Riesgo por temperaturas extremas	43
2.2.3 Riesgo por ocurrencia de aluviones	45
2.2.4 Riesgo por ocurrencia de incendios	56
2.2.5 Riesgo por reducción de lavado por precipitaciones	60
2.3 Metodología específica para riesgos sobre comunidades	62
2.3.1 Riesgo por falta de disponibilidad de agua en las comunidades	62
2.3.2 Riesgo por disminución en productividad agrícola	64
2.3.3 Riesgo por ocurrencia de incendios	65
2.3.4 Olas de calor sobre la salud de la población expuesta	69
2.4 Caracterización de la exposición	70
2.4.1 Exposición para el riesgo físico de ocurrencia de incendios	75
2.5 Caracterización de amenazas de origen climático	81
2.5.1 Cambios en condiciones medias de temperaturas y precipitaciones	81
2.5.2 Cambios en temperaturas extremas	89
2.5.3 Cambios en ocurrencia de aluviones	98
2.5.4 Cambios en ocurrencia de incendios	156
2.5.5 Cambios en ocurrencia de lavado por precipitaciones	189
2.6 Riesgos sobre activos de INTERCHILE	190
2.6.1 Vulnerabilidad y riesgo asociado a temperaturas extremas	191

2.6.2	Vulnerabilidad y riesgo asociado a aluviones	191
2.6.3	Vulnerabilidad y riesgo asociado a incendios	191
2.6.4	Vulnerabilidad y riesgo asociado a lavado por precipitaciones	220
2.7	Riesgos en comunidades de interés para INTERCHILE	221
2.7.1	Disponibilidad de agua en las comunidades	221
2.7.2	Disponibilidad de agua sobre actividades agrícolas	223
2.7.3	Incendios	233
2.7.4	Efectos de la temperatura extrema sobre la salud de la población	253
3	RIESGOS Y OPORTUNIDADES DE TRANSICIÓN PARA INTERCHILE	261
3.1	Riesgos y oportunidades	261
3.1.1	Reputacionales	261
3.1.2	Riesgos normativos, tecnológicos y de mercado	262
3.2	Supuestos e Información de Entrada	278
3.2.1	Escenarios de Referencia: BAU y Transición Acelerada	280
3.2.2	Escenarios a partir de Sensibilidades	283
3.3	Resultados	288
3.3.1	Resultados BAU y Transición Acelerada	289
3.3.2	Cuantificación del Impacto en Infraestructura de Transmisión	297
3.3.3	Principales Conclusiones	315
4	CONCLUSIONES	318
5	REFERENCIAS	319

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Macrozonas definidas en el presente estudio.....	33
Figura 2-1: Relaciones entre la adaptación al cambio climático y la gestión de desastres.....	41
Figura 2-2: Curva de capacidad. Cambios en la potencia de transmisión máxima de una línea de 220 kV respecto de la temperatura ambiente.....	44
Figura 2-3: Área Aportante a Torres ubicadas en Quebrada Algarrobal.....	49
Figura 2-4: Curva Hipsométrica Área Aportante a Torres ubicadas en Quebrada Algarrobal.....	50
Figura 2-5: Curva de volumen umbral empírico para la ocurrencia de aluviones en torres ubicadas en Quebrada Algarrobal.	51
Figura 2-6: Ejemplo de representación gráfica de la probabilidad bivariada (Temperatura, Precipitación) de excedencia.	54
Figura 2-7: Diferencia densidad de probabilidad cópula vs empírica Estación Canto del Agua (Quebrada Algarrobal).	55
Figura 2-8: Proporción de incendios por región considerando la Interfaz Urbano Rural (IUR).	57
Figura 2-9: Propagación potencia de un incendio considerando el grado de alcance de las pavesas.....	59
Figura 2-10: Distribución de los SHAC's y APR's vinculados a las comunidades priorizadas por INTERCHILE.	63
Figura 2-11: Relación Mortalidad-Temperatura, Región Metropolitana 2008 – 2014.	70
Figura 2-12: Área expuesta en las líneas de Transmisión Encuentro-Lagunas y Cardones-Polpaico con un detalle a la macrozona Norte.....	72
Figura 2-13: Área expuesta en las líneas de Transmisión Encuentro-Lagunas y Cardones-Polpaico con un detalle a la macrozona Centro Norte1.	73

Figura 2-14: Área expuesta en las líneas de Transmisión Encuentro-Lagunas y Cardones-Polpaico con un detalle a la macrozona Centro Norte2.	74
Figura 2-15: Área expuesta en las líneas de Transmisión Encuentro-Lagunas y Cardones-Polpaico con un detalle a la macrozona Centro.	75
Figura 2-16: Distribución de la Exposición a material combustible según la metodología de Beverly et al. (2021) en la macrozona Centro.....	78
Figura 2-17: Distribución de la Exposición a material combustible según la metodología de Beverly et al. (2021) en la macrozona CentroNorte2.	79
Figura 2-18: Distribución de la Exposición a material combustible según la metodología de Beverly et al. (2021) en la macrozona Centro y CentroNorte2, focalizado en las comunidades aledañas a la línea de transmisión.....	80
Figura 2-19: Cambio (%) en la precipitación media anual futura (2020-2040) respecto del periodo histórico en el área expuesta, como promedio de los modelos.	83
Figura 2-20: Cambio (%) en la precipitación media anual futura (2040-2060) respecto del periodo histórico en el área expuesta, como promedio de los modelos.	84
Figura 2-21: Cambio (%) en la precipitación media anual futura (2080-2100) respecto del periodo histórico en el área expuesta, como promedio de los modelos.	85
Figura 2-22: Cambio (°C) en el promedio anual de la temperatura diaria máxima futura (2020-2040) respecto del periodo histórico en el área expuesta, promedio de los modelos.	87
Figura 2-23: Cambio (°C) en el promedio anual de la temperatura diaria máxima futura (2040-2060) respecto del periodo histórico en el área expuesta, promedio de los modelos.	88
Figura 2-24: Cambio (°C) en el promedio anual de la temperatura diaria máxima futura (2080-2100) respecto del periodo histórico en el área expuesta, promedio de los modelos.	89
Figura 2-25: Cambio futuro (2020-2040) en la frecuencia de olas de calor respecto del periodo histórico en el área expuesta, promedio de los modelos.	92

Figura 2-26: Cambio futuro (2040-2060) en la frecuencia de olas de calor respecto del periodo histórico en el área expuesta, promedio de los modelos.	93
Figura 2-27: Cambio futuro (2080-2100) en la frecuencia de olas de calor respecto del periodo histórico en el área expuesta, promedio de los modelos.	94
Figura 2-28: Cambio futuro (2020-2040) en la frecuencia de olas de frío respecto del periodo histórico en el área expuesta, promedio de los modelos.	96
Figura 2-29: Cambio futuro (2040-2060) en la frecuencia de olas de frío respecto del periodo histórico en el área expuesta, promedio de los modelos.	97
Figura 2-30: Cambio futuro (2080-2100) en la frecuencia de olas de frío respecto del periodo histórico en el área expuesta, promedio de los modelos.	98
Figura 2-31: Cantidad de eventos de precipitación y su volumen de agua generado en Estación Chiu-Chiu según registros históricos y según los 4GCMs seleccionados para el periodo histórico (1985-2019) Macrozona Norte.....	100
Figura 2-32: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP1-2.6.	102
Figura 2-33: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP1-2.	103
Figura 2-34: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP1-2.6.	104
Figura 2-35: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP1-2.6.	105
Figura 2-36: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP2-4.5.	107
Figura 2-37: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP2-4.5.	108
Figura 2-38: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP5-8.5.	109
Figura 2-39: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP2-4.5.	110

Figura 2-40: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP5-8.5.	112
Figura 2-41: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP5-8.5.	113
Figura 2-42: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP5-8.5.	114
Figura 2-43: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP5-8.5.	115
Figura 2-44: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP1-2.6. .	117
Figura 2-45: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP1-2.6. .	118
Figura 2-46: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP1-2.6. .	119
Figura 2-47: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP1-2.6. .	120
Figura 2-48: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP2-4.5. .	121
Figura 2-49: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP2-4.5. .	122
Figura 2-50: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP2-4.5. .	123
Figura 2-51: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP2-4.5. .	124
Figura 2-52: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP5-8.5. .	126
Figura 2-53: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP5-8.5. .	127

Figura 2-54: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP5-8.5. . 128

Figura 2-55: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP5-8.5. . 129

Figura 2-56: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP1-2.6. . 131

Figura 2-57: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP1-2.6. . 132

Figura 2-58: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP1-2.6. . 133

Figura 2-59: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP1-2.6. . 134

Figura 2-60: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP2-4.5. . 136

Figura 2-61: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP2-4.5. . 137

Figura 2-62: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP2-4.5. . 138

Figura 2-63: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP2-4.5. . 139

Figura 2-64: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP5-8.5. . 141

Figura 2-65: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP5-8.5. . 142

Figura 2-66: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP5-8.5. . 143

Figura 2-67: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP5-8.5. . 144

Figura 2-68: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP1-2.6.....	145
Figura 2-69: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP1-2.6.....	146
Figura 2-70: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP1-2.6.....	147
Figura 2-71: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP1-2.6.....	148
Figura 2-72: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP2-4.5.....	149
Figura 2-73: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP2-4.5.....	150
Figura 2-74: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP2-4.5.....	151
Figura 2-75: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP2-4.5.....	152
Figura 2-76: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP5-8.5.....	153
Figura 2-77: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP5-8.5.....	154
Figura 2-78: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP5-8.5.....	155
Figura 2-79: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP5-8.5.....	156
Figura 2-80: Representación gráfica del índice kappa.....	157
Figura 2-81: Probabilidad de incendios predicha en la macrozona Centro por el modelo RF, media de los modelos, SSP5-8.5, en conjunto con los incendios observados en el período 2003-2022.	159

Figura 2-82: Probabilidad de incendios predicha en la macrozona CentroNorte2 por el modelo RF, media de los modelos, SSP5-8.5, en conjunto con los incendios observados en el período 2003-2022. 160

Figura 2-83: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro cercano (2020-2040), media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro..... 161

Figura 2-84: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro medio (2040-2060), media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro..... 162

Figura 2-85: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro lejano (2080-2100), media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro..... 163

Figura 2-86: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro cercano (2020-2040), media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona CentroNorte2. .. 164

Figura 2-87: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro medio (2040-2060), media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona CentroNorte2. .. 165

Figura 2-88: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro lejano (2080-2100), media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona CentroNorte2. .. 166

Figura 2-89: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro cercano (2020-2040), media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro..... 167

Figura 2-90: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro medio (2040-2060), media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro..... 168

Figura 2-91: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro lejano (2080-2100), media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro..... 169

Figura 2-92: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro cercano (2020-2040), media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona CentroNorte2. .. 170

Figura 2-93: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro medio (2040-2060), media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona CentroNorte2. .. 171

Figura 2-94: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro lejano (2080-2100), media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona CentroNorte2. .. 172

Figura 2-95: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro cercano (2020-2040), media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro..... 173

Figura 2-96: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro medio (2040-2060), media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro..... 174

Figura 2-97: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro lejano (2080-2100), media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro..... 175

Figura 2-98: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro cercano (2020-2040), media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona CentroNorte2. .. 176

Figura 2-99: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro medio (2040-2060), media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona CentroNorte2. .. 177

Figura 2-100: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro lejano (2080-2100), media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona CentroNorte2. .. 178

Figura 2-101: Cambios en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro cercano (2020-2040), media de los modelos, escenario SSP1-2.6, Comunidades cercanas a la línea de transmisión. 179

Figura 2-102: Cambios en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro medio (2040-2060), media de los modelos, escenario SSP1-2.6, Comunidades cercanas a la línea de transmisión. 180

Figura 2-103: Cambios en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro lejano (2080-2100), media de los modelos, escenario SSP1-2.6, Comunidades cercanas a la línea de transmisión. 181

Figura 2-104: Cambios en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro cercano (2020-2040), media de los modelos, escenario SSP2-4.5, Comunidades cercanas a la línea de transmisión. 183

Figura 2-105: Cambios en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro medio (2040-2060), media de los modelos, escenario SSP2-4.5, Comunidades cercanas a la línea de transmisión. 184

Figura 2-106: Cambios en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro lejano (2080-2100), media de los modelos, escenario SSP2-4.5, Comunidades cercanas a la línea de transmisión. 185

Figura 2-107: Cambios en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro cercano (2020-2040), media de los modelos, escenario SSP5-8.5, Comunidades cercanas a la línea de transmisión. 186

Figura 2-108: Cambios en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro medio (2040-2060), media de los modelos, escenario SSP5-8.5, Comunidades cercanas a la línea de transmisión. 187

Figura 2-109: Cambios en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro lejano (2080-2100), media de los modelos, escenario SSP5-8.5, Comunidades cercanas a la línea de transmisión. 188

Figura 2-110: Distribución de la Vulnerabilidad a la ocurrencia de incendios, distancia de caminos, macrozona Centro.	192
Figura 2-111: Distribución de la Vulnerabilidad a la ocurrencia de incendios, distancia de caminos, macrozona CentroNorte2.	193
Figura 2-112: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período histórico (1985-2019) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro.	195
Figura 2-113: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro cercano (2020-2040) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro.	196
Figura 2-114: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro medio (2040-2060) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro.	197
Figura 2-115: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro lejano (2080-2100) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro.	198
Figura 2-116: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período histórico (1985-2019) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona CentroNorte2.....	199
Figura 2-117: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro cercano (2020-2040) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona CentroNorte2.....	200
Figura 2-118: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro medio (2040-2060) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona CentroNorte2.....	201
Figura 2-119: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro lejano (2080-2100) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona CentroNorte2.....	202
Figura 2-120: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período histórico (1985-2019) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro.	203

Figura 2-121: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro cercano (2020-2040) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro.	204
Figura 2-122: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro medio (2040-2060) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro.	205
Figura 2-123: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro lejano (2080-2100) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro.	206
Figura 2-124: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período histórico (1985-2019) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona CentroNorte2.....	207
Figura 2-125: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro cercano (2020-2040) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona CentroNorte2.....	208
Figura 2-126: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro medio (2040-2060) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona CentroNorte2.....	209
Figura 2-127: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro lejano (2080-2100) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona CentroNorte2.....	210
Figura 2-128: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período histórico (1985-2019) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro.	211
Figura 2-129: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro cercano (2020-2040) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro.	212
Figura 2-130: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro medio (2040-2060) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro.	213

Figura 2-131: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro lejano (2080-2100) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro.	214
Figura 2-132: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período histórico (1985-2019) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona CentroNorte2.....	215
Figura 2-133: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro cercano (2020-2040) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona CentroNorte2.....	216
Figura 2-134: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro medio (2040-2060) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona CentroNorte2.....	217
Figura 2-135: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro lejano (2080-2100) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona CentroNorte2.....	218
Figura 2-136: Cambio en la escorrentía más flujo base en Sitios Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC´s) vinculados a las comunidades de interés para INTERCHILE y los Servicios Sanitarios Rurales.	223
Figura 2-137: Valor promedio mensual de las temperaturas registradas en las estaciones seleccionadas.	228
Figura 2-138: Evapotranspiración potencial según fórmula de Hargreaves proyectada para el escenario SSP5-8.5. Valor promedio anual por macrozona.	229
Figura 2-139: Evapotranspiración de cultivo de Olivo según fórmula de Hargreaves proyectada para el escenario SSP5-8.5. Valor promedio anual por macrozona.	230
Figura 2-140: Diferencia evapotranspiración potencial del cultivo Olivo, periodo futuro cercano versus periodo histórico del promedio modelos.	231
Figura 2-141: Diferencia evapotranspiración potencial del cultivo Olivo, periodo futuro medio versus periodo histórico del promedio modelos.	232

Figura 2-142: Diferencia evapotranspiración potencial del cultivo Olivo, periodo futuro lejano versus periodo histórico del promedio modelos.....	233
Figura 2-143: Distribución de la Vulnerabilidad a la ocurrencia de incendios en comunidades, macrozona Centro y CentroNorte2.	235
Figura 2-144: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período histórico (1985-2019) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro y CentroNorte2.....	236
Figura 2-145: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período futuro cercano (2020-2040) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro y CentroNorte2.	237
Figura 2-146: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período futuro medio (2040-2060) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro y CentroNorte2.....	238
Figura 2-147: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período futuro lejano (2080-2100) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro y CentroNorte2.....	239
Figura 2-148: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período histórico (1985-2019) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro y CentroNorte2.....	241
Figura 2-149: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período futuro cercano (2020-2040) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro y CentroNorte2.	242
Figura 2-150: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período futuro medio (2040-2060) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro y CentroNorte2.....	243
Figura 2-151: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período futuro lejano (2080-2100) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro y CentroNorte2.....	244
Figura 2-152: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período histórico (1985-2019) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro y CentroNorte2.....	246

Figura 2-153: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período futuro cercano (2020-2040) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro y CentroNorte2.....	247
Figura 2-154: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período futuro medio (2040-2060) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro y CentroNorte2.....	248
Figura 2-155: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período futuro lejano (2080-2100) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro y CentroNorte2.....	249
Figura 2-156: Evolución exceso de riesgo de muerte, comunidades macrozona Norte.	253
Figura 2-157: Evolución exceso de riesgo de muerte, comunidades macrozona Centro Norte 1, parte1.	254
Figura 2-158: Evolución exceso de riesgo de muerte, comunidades macrozona Centro Norte 1, parte 2.	255
Figura 2-159: Evolución exceso de riesgo de muerte, comunidades macrozona Centro Norte 2, parte 1.	256
Figura 2-160: Evolución exceso de riesgo de muerte, comunidades macrozona centro Norte 2, parte 2.....	257
Figura 2-161: Evolución exceso de riesgo de muerte, comunidades macrozona Centro, parte 1.....	258
Figura 2-162: Evolución exceso de riesgo de muerte, comunidades macrozona Centro, parte 2.....	259
Figura 2-163: Evolución exceso de riesgo de muerte, comunidades macrozona Centro, parte 3.....	260
Figura 3-1: Clasificación de riesgos de transición y sus probabilidades de ocurrencia.....	274
Figura 3-2: Resumen metodología de cuantificación de riesgos y oportunidades de transición.....	277

Figura 3-3: Sistema eléctrico considerado.....	281
Figura 3-4: Infraestructura energética instalada predeterminada.....	282
Figura 3-5: Tipo de producción H2V.....	284
Figura 3-6: Trayectoria del impuesto verde definida en la PELP.....	285
Figura 3-7: Escenarios de integración de generación distribuida de la PELP.....	286
Figura 3-8: Evolución de la capacidad instalada de generación y almacenamiento del escenario BAU y de T. Acelerada.	289
Figura 3-9: Despacho de la generación para días representativos de enero y julio en 2028 y 2040, escenario BAU.	290
Figura 3-10: Despacho de la generación para días representativos de enero y julio en 2028 y 2040, Transición Acelerada.....	291
Figura 3-11: Vertimiento de generación eólica y solar para días representativos de enero y julio en 2028 y 2040, escenario BAU.....	292
Figura 3-12: Vertimiento de generación eólica y solar para días representativos de enero y julio en 2028 y 2040, escenario T. Acelerada.....	293
Figura 3-13: Evolución de la capacidad de Transmisión, BAU.....	294
Figura 3-14: Evolución de la capacidad de Transmisión, Transición Acelerada.	294
Figura 3-15: Cambio en la infraestructura energética cuando no se consideran expansiones de transmisión, BAU.	296
Figura 3-16: Cambio en la capacidad de generación cuando no se consideran expansiones de transmisión, Transición Acelerada.	297
Figura 3-17: Cambio en la capacidad de transmisión para las distintas sensibilidades.	298
Figura 3-18: Trayectorias de la expansión de capacidad en transmisión para los distintos escenarios.	301
Figura 3-19: Desviación estándar para las líneas de transmisión definidas, en MW.	303

Figura 3-20: Promedio de la diferencia neta construida para las líneas de transmisión definidas, en MW.	304
Figura 3-21: Cambio en la capacidad de transmisión para la línea NuevaCharrua500_Mulchen500.....	305
Figura 3-22: Uso promedio en horas de sol de la capacidad de transmisión de las líneas para los distintos escenarios.....	306
Figura 3-23: Uso promedio en horas sin sol de la capacidad de transmisión de las líneas para los distintos escenarios.....	307
Figura 3-24: Flujo de energía a través de la línea Kimal500_AltoJahuel500 en 2040.	310
Figura 3-25: Flujo de energía a través de línea Ancoa500_NuevaCharrua500 en 2040.....	310
Figura 3-26: Flujo de energía a través de línea Ancoa500_NuevaCharrua500 en 2040.....	311
Figura 3-27: Flujo de energía a través de línea Ancoa500_NuevaCharrua500 en 2040.....	314

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Distribución Regional de Torres y subestaciones a evaluar por riesgo de aluvión.	46
Tabla 2-2: Delimitación de volumen umbral desencadenante de aluviones para área aportante a torres en Quebrada Algarrobal.	50
Tabla 2-3: Base de datos espacial usada en la calibración del modelo Random Forest para determinar la probabilidad de un incendio forestal en un vóxel dado.	66
Tabla 2-4: Coberturas de Zhao et al. (2016) consideradas para el cálculo de exposición en base la metodología de Beverly et al. (2021).	76
Tabla 2-5: Cambio a futuro en la precipitación anual (%) por macrozona y periodos futuros.	82
Tabla 2-6: Cambio a futuro en la temperatura máxima (°C) de las olas de calor por macrozona y periodos futuros.	86
Tabla 2-7: Cambio a futuro en la intensidad (°C) de las olas de calor por macrozona y periodos futuros.	91
Tabla 2-8: Cambio a futuro en la frecuencia (días al año) de las olas de calor por macrozona y periodos futuros.	91
Tabla 2-9: Cambio a futuro en la intensidad (°C) de las olas de frío por macrozona y periodos futuros.	95
Tabla 2-10: Cambio a futuro en la frecuencia (días al año) de las olas de frío por macrozona y periodos futuros.	95
Tabla 2-11: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Norte SSP1-2.6.	101
Tabla 2-12: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Norte SSP2-4.5.	106
Tabla 2-13: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Norte SSP5-8.5.	111

Tabla 2-14: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Centro Norte 1 SSP1-2.6.	116
Tabla 2-15: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Centro Norte 1 SSP2-4.5.	121
Tabla 2-16: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Centro Norte 1 SSP5-8.5.	125
Tabla 2-17: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Centro Norte 2 SSP1-2.6.	130
Tabla 2-18: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Centro Norte 2 SSP2-4.5.	135
Tabla 2-19: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Centro Norte 2 SSP5-8.5.	140
Tabla 2-20: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Centro SSP1-2.6.....	145
Tabla 2-21: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Centro SSP2-4.5.....	149
Tabla 2-22: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Centro SSP5-8.5.....	153
Tabla 2-23: Estadísticos de rendimiento de los modelos de Random forest utilizados para el cálculo de la Amenaza – Probabilidad de incendios para el área de estudio.	158
Tabla 2-24: Promedio de días en que no ocurre precipitación o esta es menor a 1 milímetro para cuando este periodo es mayor a 90 días, por macrozona, escenario y periodo. Se muestra también el cambio esperado en porcentaje respecto del periodo histórico.....	190
Tabla 2-25: Rangos que categorizan Exposición, Amenaza y Vulnerabilidad, Riesgo de incendios en los activos de INTERCHILE.	194
Tabla 2-26: Superficie total (ha) por cultivo presentes en las comunas de interés.	224

Tabla 2-27: Valores de coeficiente de cultivo (Kc) para frutales como Cítrico, Palto y Olivo.	225
Tabla 2-28: Parámetros coeficiente de cultivo (Kc), duración y fecha de siembra para cultivos Maíz y Papa.	226
Tabla 2-29: Listado de estaciones meteorológicas de la Red Agrometeorológica INIA presentes en el área de estudio.	226
Tabla 2-30: Rangos que categorizan Exposición, Amenaza y Vulnerabilidad, Riesgo de incendios en comunidades.	234
Tabla 2-31: Riesgo de ocurrencia de incendios por comunidad, Macrozona y períodos histórico y futuros para el escenario SSP1-2.6.	250
Tabla 2-32: Riesgo de ocurrencia de incendios por comunidad, Macrozona y períodos histórico y futuros para el escenario SSP2-4.5.	251
Tabla 2-33: Riesgo de ocurrencia de incendios por comunidad, Macrozona y períodos histórico y futuros para el escenario SSP5-8.5.	252
Tabla 3-1: Resumen identificación y clasificación de riesgos de transición normativos, tecnológicos y de mercado.	263
Tabla 3-2: Cronograma considerado para el cierre y reconversión de centrales térmicas a carbón.	286
Tabla 3-3: Resumen de la energía vertida en los escenarios BAU y T. Acelerada durante los 12 días representativos de 2040.	293
Tabla 3-4: Cambios en los Costos Totales e inversión en Generación, Almacenamiento y Transmisión.	295
Tabla 3-5: Aumento en la capacidad total de Transmisión en los distintos escenarios.	298
Tabla 3-6: Vertimiento de generación solar y eólica en los distintos escenarios.	302
Tabla 3-7: Resumen del uso promedio diario de las líneas en el año 2040.	307
Tabla 3-8: Resumen del costo total y de Tx para cada escenario.	312

RESUMEN EJECUTIVO

En el contexto del estudio encargado por INTERCHILE al equipo del Centro de Cambio Global UC, con el apoyo del Centro de Energía UC se han hecho diversos análisis para caracterizar la exposición, amenaza y riesgo sobre los activos de INTERCHILE y las comunidades de interés aledañas a la infraestructura.

Para las amenazas de origen climático, se aprecian cambios positivos proyectados en la macrozona Norte para la precipitación, una zona de transición en las macrozonas Centro Norte 1 y Centro Norte 2 y disminuciones de precipitación del orden de -20% en la macrozona Centro, para el promedio de modelos. En el caso de las temperaturas, los incrementos siempre existen independiente de la macrozona, pudiendo llegar a más de 1,2°C hacia 2040 como promedio de modelos, en la macrozona norte. Esto implica potenciales cambios también en los regímenes de las componentes del Balance Hídrico como la escorrentía y el flujo base.

Respecto de la amenaza de aluviones, esta fue caracterizada en 11 estructuras susceptibles de eventos de remoción de masa ubicadas en distintas cuencas donde se ubican los trazados de la Línea de Transmisión Eléctrica, definiendo también los umbrales apropiados para la identificación de eventos que generan riesgo con base en el acople de las temperaturas y precipitaciones que pueden favorecerlo.

La amenaza de incendios implica la construcción de un modelo que calcula la probabilidad de ignición de un evento de este tipo basado en el método Random Forest, el cual solo se evalúa para las macrozonas Centro Norte 2 y Centro, dado que en las otras macrozonas la amenaza es descartable por la casi ausencia de combustible. Se reportan, para el periodo 1985-2019, mayores probabilidades de incendio hacia la macrozona centro, sobre todo en zonas específicas de la región de Valparaíso y la Región Metropolitana, donde hay que tener especial énfasis.

Por su parte, la amenaza de olas de calor (temperaturas extremas) define un umbral de 35°C como la base del análisis y contabiliza los días que este umbral se sobrepasa tanto por modelo como por macrozona. Los resultados muestran resultados severos en la macrozona Norte, con cambios en el número de días al año en que las olas de calor pueden ocurrir de incluso más de 60 días respecto del periodo de referencia 1985-2019. Esto se amortiza bastante en las macrozonas centro Norte 1 y 2 con cambios que en promedio solo suman cerca de + | día/año hacia el futuro, pero vuelve a incrementarse en la macrozona centro con modelos que prevén casi 8 días al año más con temperaturas máximas mayores a 35°C

hacia 2020-2040. En cuanto las olas de frío (umbral menor a 0°C), la señal es similar a la de las olas de calor pero con un sentido inverso, es esperada menor ocurrencia de eventos de frío extremos, con mayor severidad estos cambios en las macrozonas Norte y Centro.

Por su parte, la amenaza vinculada al análisis de lavado por precipitaciones indica cambios al aumento de estos periodos en la macrozona norte, con variaciones menores en el resto de las macrozonas. Esto implica una adecuación potencial respecto de los lavados que se debe hacer en la infraestructura de transmisión hacia el futuro inmediato, con miras a minimizar riesgos.

En cuanto al análisis de riesgo, sobre las estructuras de transmisión, para el riesgo vinculado a aluviones no existen tendencias generalizables a todo el trazado del proyecto. No obstante, parece haber una señal hacia la disminución de estos eventos potenciales en algunas de las estructuras.

En el caso del riesgo vinculado a incendios sobre la infraestructura de la LTE, se espera un aumento de este en las cercanías de esta, sobre todo en zonas vinculadas al límite entre las regiones de Valparaíso y Metropolitana. Como el riesgo fue calculado asumiendo que el único factor que cambia es el clima, solo se ve forzado el riesgo en estas variables. En la macrozona Centro Norte 2 se ve una tendencia de disminución y migración del riesgo hacia el sur de la macrozona, la cual se mantiene en el periodo futuro cercano e intermedio. INTERCHILE, como responsable de activos de transmisión eléctrica, enfrenta desafíos significativos en la gestión de riesgos, especialmente en las zonas de Coquimbo, Ovalle y Los Vilos, donde se observa un alto riesgo de ocurrencia de incendios forestales, según los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. a su vez, en la macrozona Centro, los resultados aumentan levemente, en los escenarios SSP1-2.6 y SSP2-4.5, donde la tendencia de aumento aparece en las comunas costeras de la Región de Valparaíso, sin embargo en el escenario SSP5-8.5, el escenario es mayoritariamente de riesgo alto en toda el área de estudio. La creciente amenaza de incendios forestales en áreas montañosas donde se encuentran las líneas de transmisión de INTERCHILE es un riesgo importante, el cual es exacerbado por el cambio climático. INTERCHILE debe implementar medidas específicas, como sistemas de monitoreo en tiempo real y medidas de prevención en los trazados, para garantizar la seguridad de la infraestructura eléctrica y prevenir interrupciones en el suministro de energía.

Para el riesgo asociado a olas de calor, los modelos consistentemente indican un alza en la magnitud hacia el futuro. En particular, el alza es más intensa en la macrozona Norte, donde coincidentemente se tiene que se incrementa la

frecuencia de los días de olas de calor. Asimismo, respecto de la persistencia de olas de calor, también en la macrozona Norte se proyecta un aumento representativo en la presencia de estos eventos. Vale decir, en la macrozona Norte se tiene una señal significativa y consistente de aumentos en el número de olas de calor, mientras que en las zonas Centro Norte 1 y 2 esa señal se debilita a aumentos menores, pero aun representativos respecto de magnitud y persistencia de eventos de calor extremo mientras que en la macrozona Centro se esperan menores aumentos, pero en ningún caso marginales respecto de la referencia histórica.

En el caso del frío, los resultados indican disminución en la frecuencia de las olas de fría, de forma generalizada en todas las macrozonas. No obstante, esto se acrecienta aún más en las macrozonas Norte y Centro, en esta última sobre todo en el área urbana de la región metropolitana.

El riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades, en el escenario SSP1-2.6, se evidencia un alto riesgo las comunidades Los Leones - Lliu Lliu, Los Laureles-El Maqui, Quebrada de Alvarado y Polpaico en la macrozona Centro, y una migración del riesgo hacia el sur en el futuro para la macrozona Centro Norte². En SSP2-4.5, las comunidades de Los Leones - Lliu Lliu y Los Laureles-El Maqui están rodeadas por un extenso parche de riesgo alto, con cambios notables en el futuro cercano, como la disminución de riesgo en Polpaico y Quebrada de Alvarado, y similares resultados para la macrozona Centro Norte 2 que los presentados en el escenario SSP1-2.6. En SSP5-8.5, se observa un desplazamiento del riesgo alto hacia la zona costera en el futuro medio, afectando principalmente a comunidades como Las Melosillas, La Estancilla y El Rincón. En el futuro lejano, hay un aumento generalizado del riesgo alto y medio, especialmente en las comunidades costeras de la Región de Valparaíso. En la macrozona Centro Norte 2, se experimentan cambios significativos en el riesgo de incendios en el futuro, con algunas comunidades pasando a riesgo bajo.

Los cambios en disponibilidad hídrica tanto para comunidades como para actividades agrícolas indican, en el primer caso, disminuciones de la disponibilidad hídrica marcadas (menores a -12%) en todos los Sitios Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común vinculadas a las comunidades y los Servicios Sanitarios Rurales. En cuanto a la demanda hídrica desde los cultivos (evapotranspiración) se espera incrementos en la demanda de agua por parte de los cultivos, y ante un escenario de disminución de disponibilidad de agua, se debe tener en consideración distintas estrategias de adaptación para preservar la seguridad hídrica.

Respecto a los riesgos de transición, se observa que pueden estar categorizados tanto a nivel normativo, tecnológico y de mercado, con distintas probabilidades de ocurrencia. Para cuantificar estos riesgos y oportunidades se utiliza un modelo de planificación de largo plazo considerando diferentes realizaciones de estos riesgos a través de potenciales escenarios futuros. Este modelo se basa en herramientas de optimización y permite determinar la expansión costo-eficiente del sistema eléctrico chileno para cada uno de los escenarios analizados. Los escenarios de referencia, que son el Business as Usual (BAU) y de Transición Acelerada, están basados en la información utilizada en el proceso de planificación energética de largo plazo (PELP) del Ministerio de Energía y se implementaron además sensibilidades que representan los riesgos identificados. De esta manera, a partir de las simulaciones se cuantifica el impacto que las distintas realizaciones tienen sobre la inversión en capacidad de transmisión y el uso que se da a las líneas, identificándose así las zonas que en el horizonte de tiempo tienen un mayor requerimiento de transporte energético.

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS

AR: Por sus siglas en inglés, reporte de evaluación del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC). El sexto es el último informe publicado a partir de 2021 (para el WGI).

Cambio climático: Variación del estado del clima de acuerdo con el cambio en el valor y/o variabilidad de sus medias o propiedades, verificadas estadísticamente. Se identifica por ser persistente en el tiempo, como decenios o períodos mayores.

CMIP: Por sus siglas en inglés, Proyecto asociado de Intercomparación de Modelos Acoplados de proyección climática.

Corrección de sesgo: Método por el cual los valores de un modelo se corrigen mediante el uso de observaciones, de forma de que a nivel promedio tengan la misma media.

Downscaling: Metodología para reducir la escala de representación espacial de GCM's y atribuir las a un contexto de observaciones históricas en una zona de estudio, preservando la señal original del modelo.

Ensamble: Conjunto de simulaciones de modelos que caracterizan una proyección climática en base a sus condiciones iniciales y forzamiento.

Forzamiento radiativo: Cambio en el flujo energético causado por un elemento impulsor y cuantificado en la parte superior de la atmósfera en W/m^2 .

Forzantes: Corresponde a una serie de elementos que condicionan el comportamiento de un sistema, dadas sus propiedades.

GCM: Por sus siglas en inglés, Modelos de Circulación General de la atmósfera. Utilizados para realizar simulaciones climáticas globales bajo distintos escenarios de emisiones.

GHG: Por sus siglas en inglés, Gases de Efecto Invernadero (GEI), gases atmosféricos que absorben y emiten radiación en el espectro del infrarrojo. Los principales GEI son el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el Óxido nitroso (N_2O) y el Ozono (O_3).

IPCC: Por sus siglas en inglés, Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change).

Modelo climático: Representación numérica del sistema climático basada en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, en sus interacciones y en sus procesos de retroalimentación, y que recoge todas o algunas de sus propiedades conocidas. Los GCM corresponden a un tipo de modelo climático.

Proyección climática: Respuesta del sistema climático basada en simulaciones en diversos escenarios de emisiones de GEI.

P-valor: Probabilidad de que la conclusión atribuida al resultado observado se deba al azar. Si este valor es menor que aquel definido como alfa (α), se asume que existe evidencia para rechazar la hipótesis de que no existe la diferencia observada.

RCP: Por sus siglas en inglés, Escenarios Representativos de Concentración de emisiones GEI (Representative Concentration Pathways) para CMIP5.

SSP: Por sus siglas en inglés, Escenarios Socioeconómicos Compartidos de evolución de emisiones GEI (Shared Socio-economics Pathways) para CMIP6

1 INTRODUCCIÓN GENERAL Y ANTECEDENTES

1.1 Introducción y objetivos del estudio

El cambio climático, como la serie de cambios a largo plazo de los patrones de la temperatura y los patrones climáticos (ONU, 2021), es cada vez un fenómeno menos cuestionable. Ya desde mediados del siglo XX se han observado cambios en el sistema climático que no han tenido precedentes en las últimas décadas o incluso milenios (IPCC, 2022). Como respuesta, se han generado instancias como las Conferencias de las Partes, en donde las autoridades a nivel mundial buscan llegar a acuerdos para tomar medidas y consensuar a nivel internacional distintas acciones para mitigar las consecuencias de este fenómeno. Inicialmente, con el protocolo de Kyoto en 1997 (ONU, 1998) los acuerdos se centraron en reducir los gases de efecto invernadero, pero la necesidad de adaptarse a los impactos del calentamiento global se ha vuelto cada vez más urgente.

Los efectos agudos y crónicos del cambio climático se están volviendo más evidentes tanto a nivel global como en el caso específico de Chile. Estos pueden asociarse a olas de calor en muchas zonas inéditas, inundaciones de vastas superficies, incendios de difícil control que abarcan grandes áreas, cambios en la disponibilidad de agua por alteraciones del ciclo hidrológico, entre otras. Por lo tanto, es esencial avanzar en la identificación de los riesgos a los que se está expuesto para planificar la adaptación a este fenómeno. Para lograrlo, se deben comprender estos riesgos en diferentes aspectos del sistema productivo, ambiental y social del país. Es en este sentido, que es relevante para INTERCHILE el evaluar la vulnerabilidad potencial de su infraestructura de transmisión eléctrica (subestaciones y líneas de transmisión) ante distintos riesgos vinculados a amenazas de origen climático, y los posibles impactos futuros que los eventos vinculados al riesgo podrían producir bajo distintos escenarios de proyección asociados cambio climático, en diferentes horizontes de tiempo. Con esta información levantada y estandarizada, INTERCHILE, por medio del presente estudio, podrá definir un plan de adaptación para sus activos considerando riesgos físicos vinculados a su infraestructura y comunidades aledañas, y su imagen como empresa a partir de sus riesgos de transición, teniendo en cuenta tanto sus operaciones actuales y futuras, así como las oportunidades que puedan aparecer para distintos aspectos del negocio.

El estudio de Adaptación al Cambio Climático para INTERCHILE tiene como objetivo general analizar los riesgos asociados a los fenómenos naturales causados

por el cambio climático que afectan al negocio y los activos de INTERCHILE y sus comunidades más cercanas, considerando los riesgos físicos y de transición vinculados con la adaptación al cambio climático. Para lograr este objetivo, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un diagnóstico que identifique la exposición, amenaza y vulnerabilidad, al que están expuestos los activos de INTERCHILE y las comunidades aledañas a las instalaciones, considerando escenarios para riesgos físicos y para riesgos de transición.
- Identificar, analizar y evaluar los riesgos ambientales, económicos sociales en función del negocio frente al cambio climático y los activos de INTERCHILE y las comunidades aledañas a las instalaciones, en el corto, mediano y largo plazo.
- Elaborar matriz de riesgos físicos y de transición asociados al cambio climático y los activos de INTERCHILE y las comunidades vecinas en un contexto de cambio climático, en el mediano y largo plazo.
- Elaborar un plan de adaptación al cambio climático para INTERCHILE, basado en el ciclo de vida de sus activos y sus comunidades en el corto, mediano y largo plazo.

En esta primera etapa del proyecto, se presenta el desarrollo de las actividades relacionadas con el primer objetivo específico.

Dentro de las actividades a realizar para conseguir los objetivos, se encuentra el desarrollo de marco conceptual y revisión de antecedentes sobre estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en Chile de forma general como vinculado a sistemas de transmisión eléctrica. Se ha revisado la literatura relevante, incluidos los reportes de TCFD de Recomendaciones sobre Declaraciones Financieras Relacionadas con el Clima (TCFD, 2017). Esta revisión comprende el análisis de referencias de los distritos riesgos físicos para la infraestructura considerando temperaturas extremas, aluviones, incendios y lavado por precipitaciones. Junto con ello también se revisan antecedentes sobre los riesgos vinculados a las comunidades de interés para INTERCHILE, respecto de la disponibilidad de agua sobre ellas en un contexto de consumo humano y agrícola, además de los potenciales riesgos asociados a incendios y los efectos de las olas de calor sobre las personas.

Por otra parte, se revisa los distintos escenarios climáticos a considerar, comenzado por un análisis de las tendencias observadas tanto de las principales variables

climáticas (temperaturas y precipitación) como de indicadores de eventos extremos derivados en una zona de estudio definida a partir de la exposición de la infraestructura de transmisión eléctrica de INTERCHILE, para luego corroborar la concordancia de estas observaciones con los modelos de cambio climático que serán utilizados para las proyecciones de los distintos riesgos. Con ello, se selecciona una batería de modelos climáticos que representen correctamente las condiciones históricas observadas y a su vez indiquen distintas trayectorias para los cambios esperados en temperatura y precipitaciones. Luego, se plantea la metodología para llevar la resolución gruesa de los modelos climáticos nativos a una resolución más fina considerando la grilla de análisis utilizada en el proyecto ARClím (Pica-Téllez et al., 2020).

Junto con lo anterior, se encuentra la definición de las distintas macrozonas que considera toda el área de estudio, y que se utiliza para reportar los resultados en una forma agregada, para que permita una comprensión fluida de los resultados dado el volumen de información que se ha generado y se generará con aun mayor presencia en la segunda etapa.

En ese sentido, estas macrozonas (Figura 1-1) han sido definidas con base a divisiones político-administrativas y se detallan como:

- **Macrozona Norte:** Región de Tarapacá y región de Antofagasta.
- **Macrozona Centro Norte 1:** Región de Atacama.
- **Macrozona Centro Norte 2:** Región de Coquimbo.
- **Macrozona Centro:** Región de Valparaíso y Región Metropolitana.

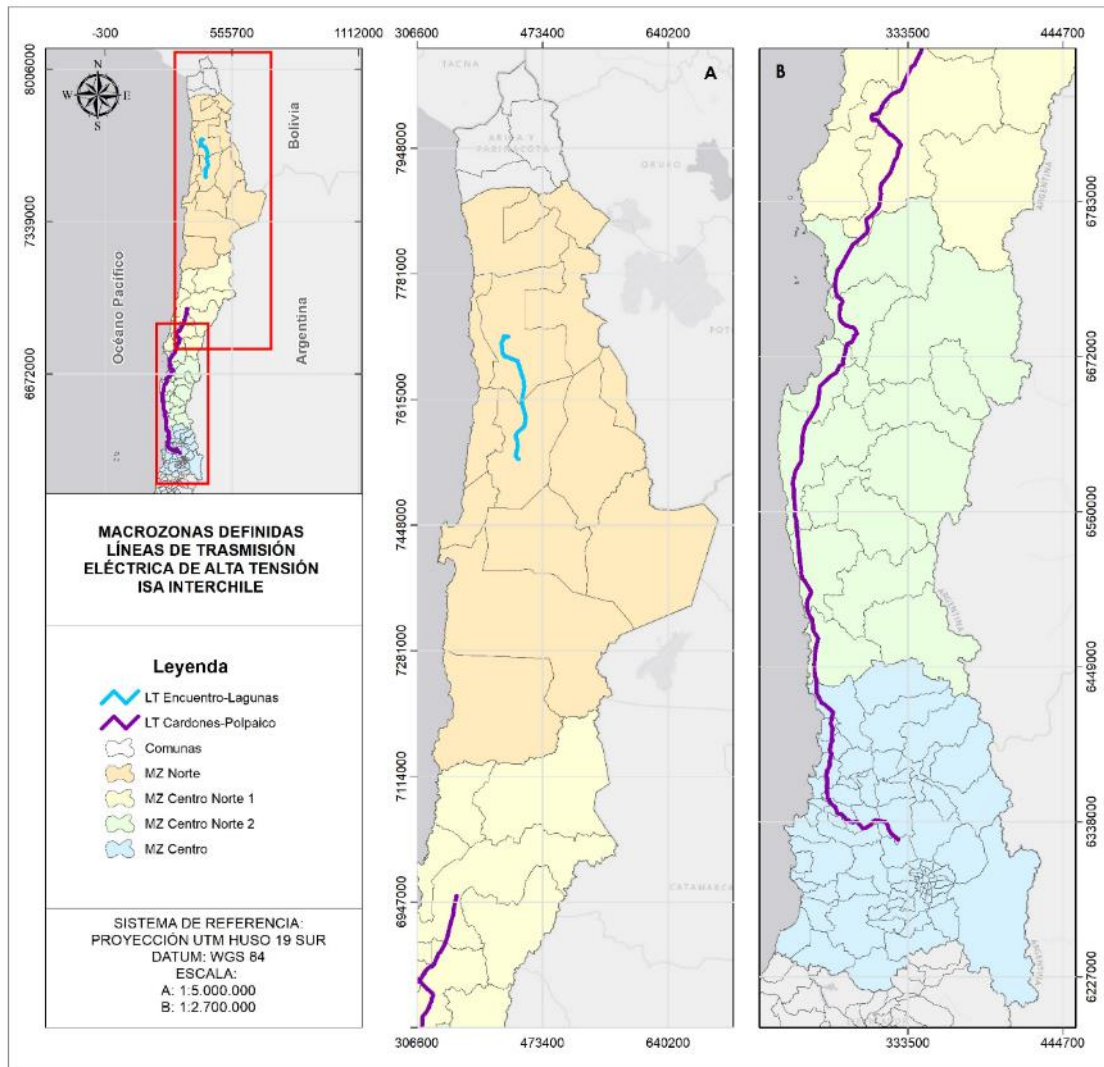


Figura 1-1: Macrozonas definidas en el presente estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Además, se detallan aspectos metodológicos para la obtención de variables y el cálculo de los distintos riesgos no sistémicos a analizar en el presente estudio. En este sentido, se incluyen metodologías específicas para los riesgos físicos vinculados a temperaturas extremas, aluviones, incendios y lavado por precipitaciones; metodologías para los riesgos vinculados a comunidades sobre disponibilidad de agua (para consumo y uso agrícola), así como incendios y efectos de olas de calor sobre la salud.

Finalmente, el estudio reporta los resultados tanto sobre riesgos físicos con potencial impacto en los activos y sobre las comunidades de interés, así como los riesgos y oportunidades de transición para INTERCHILE, considerando los desafíos vinculados a su negocio respecto de aspectos reputacionales, normativos, tecnológicos y de mercado.

1.2 Marco conceptual

El Grupo de Trabajo sobre Divulgaciones Financieras relacionadas con el Clima (TCFD) ha identificado varios tipos de riesgos y oportunidades que surgen del cambio climático y su impacto en las empresas y organizaciones (TCFD, 2017). En el presente informe, se hará un enfoque en los riesgos a analizar con una mirada basada en las conclusiones y recomendaciones del TCFD, identificando en primer lugar los riesgos físicos, que están relacionados con los impactos directos del cambio climático, como eventos climáticos extremos, variabilidad climática y cambios en los patrones climáticos que pueden producir efectos indeseados en distintos tipos de objetos de protección y/o valoración, como por ejemplo infraestructura de transmisión eléctrica, que pueden poner en peligro el funcionamiento del sistema, y las comunidades vinculadas a esta infraestructura, que puede verse afectada de forma directa por ejemplo en su salud en eventos de calor extremo o de forma indirecta respecto de la disponibilidad de agua tanto para consumo humano como para riego por efectos de cambios en el régimen de precipitación. En segunda instancia, el informe aborda distintos riesgos de transición, que surgen de la transición del sistema actual de uso de la energía en la compañía a una economía de bajas emisiones de carbono. A modo de marco conceptual, se describirán los principales riesgos identificados por el TCFD en ambas categorías, mencionando aquellas que serán abordadas en el presente, y presentarán metodologías que las empresas pueden utilizar para calcular estos riesgos, y que son aplicados en el presente estudio.

Cuando se habla de riesgos físicos, se entiende que los efectos del cambio climático pueden dar lugar eventos que se manifiestan en un corto plazo (riesgos agudos) o cambios a largo plazo (riesgos crónicos) en los patrones climáticos. Estos riesgos pueden tener implicaciones financieras para las organizaciones, incluyendo daños directos a sus activos o impactos indirectos debido a interrupciones en la cadena de producción. Además, el rendimiento financiero de las organizaciones puede verse afectado por distintas amenazas de origen climático que por ejemplo afecten la disponibilidad y calidad del agua y la seguridad alimentaria, o que los cambios extremos de temperatura afecten a sus

infraestructuras, operaciones, cadenas de producción, transporte y la seguridad de su personal y las comunidades de su entorno.

Respecto de los riesgos físicos agudos, estos se encuentran asociados a desastres inmediatos, como aquellos que derivan del aumento en la frecuencia de fenómenos climáticos extremos como ciclones, huracanes e inundaciones. Por otro lado, los riesgos físicos crónicos se refieren a los cambios a largo plazo en los patrones climáticos, como temperaturas continuamente altas, que pueden llevar al aumento del nivel del mar o a la presencia de olas de calor permanentes.

Estos riesgos físicos representan una preocupación creciente para las empresas y organizaciones y requieren de una gestión adecuada para asegurar la resiliencia y adaptación frente al cambio climático. Las empresas deben considerar estrategias de adaptación y mitigación para proteger sus activos, operaciones y personal, así como para asegurar su sostenibilidad financiera en un contexto de cambio climático cada vez más pronunciado. Así, dentro de los riesgos físicos que define el TCFD se encuentran:

- **Eventos climáticos extremos:** Los eventos climáticos extremos, como tormentas, inundaciones y sequías, o huracanes, representan uno de los principales riesgos físicos asociados al cambio climático. Estos eventos pueden causar daños significativos a la infraestructura, interrumpir la cadena de suministro y afectar la producción y distribución de bienes y servicios. Las empresas ubicadas en áreas propensas a estos eventos están expuestas a mayores riesgos y deben considerar medidas de adaptación y resiliencia. En el presente se evalúan directamente estos riesgos dada la exposición de la infraestructura de INTERCHILE, los cuales se pueden clasificar en:
 - **Cambio en patrones climáticos:** El cambio en los patrones climáticos, vinculado al aumento de las temperaturas promedio o a los cambios en los patrones de lluvia (intensidad y frecuencia), junto con sequías prolongadas, pueden afectar la disponibilidad de recursos hídricos, la productividad agrícola y la salud de los ecosistemas. Las empresas que dependen de recursos naturales y servicios ambientales deben evaluar cómo estos cambios afectarán sus operaciones y planificar medidas para mitigar los impactos negativos. Este riesgo físico es parte de aquellos que el presente estudio aborda, sobre todo en el

enfoque aplicado a las comunidades de interés para INTERCHILE respecto a la disponibilidad de agua.

- **Aumento del Nivel del Mar:** El aumento del nivel del mar es un riesgo físico crítico para las empresas ubicadas en zonas costeras. Puede provocar inundaciones, erosión costera y la intrusión de agua salada en acuíferos, lo que afecta la disponibilidad de agua dulce y la estabilidad de la infraestructura costera. Las empresas en estas áreas deben evaluar su exposición y desarrollar estrategias de adaptación y mitigación. Dada el área de estudio que define la infraestructura expuesta analizar, este riesgo físico no formará parte de los análisis en el presente estudio.
- **Derretimiento de Glaciares y Disminución de Recursos Hídricos:** Para las empresas que dependen de fuentes de agua alimentadas por glaciares y nieve, el derretimiento acelerado de los glaciares y la disminución de los recursos hídricos representan un riesgo significativo. Esto puede afectar la disponibilidad de agua para la producción, la generación de energía hidroeléctrica y el abastecimiento de agua para las operaciones. Las empresas deben monitorear los cambios en los recursos hídricos y desarrollar planes de contingencia. Si bien este es un riesgo que no afecta directamente a la operación de la infraestructura de INTERCHILE, si puede haber un riesgo indirecto por disponibilidad de agua en comunidades.
- **Incendios Forestales:** El aumento de la frecuencia e intensidad de los incendios forestales debido al cambio climático representa un riesgo para las empresas ubicadas en áreas propensas a este fenómeno. Los incendios pueden dañar la infraestructura, afectar la cadena de suministro y provocar interrupciones en la producción y distribución de bienes y servicios. Este es un riesgo que se analizará específicamente tanto en su afectación directa a los activos INTERCHILE como sobre las comunidades de interés.

Por su parte, los riesgos de transición se vinculan con las contingencias que puedan traer consigo el que las organizaciones realicen cambios orientados a adecuaciones hacia una economía con bajas emisiones de carbono, lo que

implica una serie de transformaciones significativas en los ámbitos reputacional, normativo, tecnológico y de mercado, con el objetivo de enfrentar los desafíos de mitigación y adaptación frente al cambio climático. Estos cambios pueden variar en cuanto a su naturaleza, rapidez y enfoque, lo que conlleva distintos niveles de riesgos financieros y reputacionales para las organizaciones.

La adopción de políticas y regulaciones más estrictas relacionadas con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero puede generar incertidumbre y desafíos para las empresas que dependen fuertemente de industrias intensivas en carbono. Las organizaciones podrían enfrentar presiones para implementar tecnologías limpias y reducir su huella de carbono, lo que a su vez podría implicar altos costos de inversión en infraestructura y tecnologías de vanguardia.

Además, la transición hacia energías renovables y bajas en carbono podría afectar significativamente a los mercados de energía, con cambios en la demanda y oferta de diferentes fuentes de energía. Las empresas deben estar preparadas para adaptarse a estos cambios en la dinámica del mercado y considerar posibles impactos en sus operaciones y modelos de negocio.

A nivel reputacional, las organizaciones también enfrentan riesgos asociados con la percepción pública y la opinión de los consumidores y accionistas. Aquellas empresas que no tomen medidas efectivas para abordar el cambio climático y reducir sus emisiones podrían enfrentar críticas y presiones por parte de los consumidores y comunidades aledañas, lo que podría afectar su reputación y valor de marca.

No obstante, y pese a que es un proceso complejo, presenta también oportunidades para las organizaciones. Aquellas que puedan adaptarse rápidamente a los cambios y abordar los desafíos del cambio climático estarán mejor posicionadas para asegurar su sostenibilidad a largo plazo y evitar impactos financieros y reputacionales negativos. Para mitigar estos riesgos, es fundamental que las organizaciones adopten una visión estratégica y proactiva hacia la acción climática y la transición hacia un futuro más sostenible. En ese sentido, los riesgos de transición abordados en el siguiente trabajo se agrupan en:

- **Reputacionales:** El cambio climático ha sido identificado como una fuente de riesgo para la reputación de una organización, relacionado con cómo los clientes o la comunidad pueden percibir su contribución o falta

de contribución en la transición hacia una economía de bajas emisiones de carbono. Esto implica que la forma en que una organización aborda o no aborda el cambio climático puede influir en la percepción que tiene el público sobre su responsabilidad ambiental y su compromiso con la sostenibilidad. Esta percepción puede afectar la imagen y la confianza que los clientes y la comunidad tienen en la organización, lo que a su vez podría tener repercusiones financieras y comerciales. Por lo tanto, es importante que las organizaciones consideren cuidadosamente cómo abordan el cambio climático y comuniquen de manera transparente sus acciones y compromisos relacionados con la transición hacia una economía con bajas emisiones de carbono.

- **Normativos o de cambios en Políticas y Regulaciones:** La transición a una economía de bajas emisiones de carbono puede llevar a cambios en las políticas y regulaciones relacionadas con el clima. Esto incluye la implementación de impuestos al carbono, estándares más estrictos de emisiones y restricciones a ciertas industrias. Las empresas deben evaluar cómo estas políticas y regulaciones pueden afectar sus operaciones y planificar la transición hacia una mayor sostenibilidad.
- **Tecnológicos:** Las mejoras o avances tecnológicos que respaldan la transición hacia una economía con bajas emisiones de carbono y mayor eficiencia energética pueden tener un impacto significativo en las organizaciones. Por ejemplo, la adopción y el desarrollo de tecnologías emergentes como las energías renovables, el almacenamiento de baterías, la eficiencia energética y la captura y almacenamiento de carbono pueden afectar la competitividad de ciertas organizaciones, sus costos de producción y distribución, y en última instancia, la demanda de sus productos y servicios por parte de los consumidores finales. A medida que estas nuevas tecnologías reemplazan a los sistemas más antiguos y alteran ciertas partes del actual sistema económico, surgirán ganadores y perdedores en este proceso de "destrucción creativa". Sin embargo, la principal incertidumbre radica en el momento de desarrollo y adopción tecnológica al evaluar el riesgo tecnológico.
- **Cambios en la Demanda de Mercado:** El aumento de la conciencia sobre el cambio climático puede cambiar la demanda del mercado hacia

productos y servicios más sostenibles y de bajas emisiones. Las empresas que no se adapten a esta demanda pueden enfrentar una disminución en la demanda de sus productos y una pérdida de cuota de mercado.

Adicionalmente, otros riesgos de transición pueden estar vinculados a:

- **Riesgo de Activos Varados:** Los activos relacionados con combustibles fósiles y otras industrias intensivas en carbono pueden enfrentar el riesgo de quedar varados en una economía de bajas emisiones de carbono. Esto ocurre cuando los activos pierden valor o se vuelven obsoletos debido a los cambios en las políticas y regulaciones o a la transición hacia fuentes de energía más limpias.
- **Riesgos Legales y Litigios:** Las empresas que no tomen medidas adecuadas para mitigar sus emisiones de carbono y reducir su impacto ambiental pueden enfrentar riesgos legales y litigios por parte de accionistas, inversores y otros grupos interesados. Los riesgos legales pueden surgir de la falta de divulgación adecuada sobre el impacto climático de las operaciones y la exposición a sanciones por incumplimiento de regulaciones ambientales.

Respecto de las metodologías para el cálculo de los distintos riesgos, las empresas pueden utilizar escenarios de cambio climático para proyectar los impactos físicos y de transición en sus operaciones y activos. Estos escenarios se basan en diferentes supuestos sobre el aumento de las temperaturas y las políticas de mitigación, lo que permite evaluar el riesgo en diferentes condiciones futuras. Esta estrategia es la que en el presente trabajo será llevada a cabo.

No obstante, también existe el análisis de sensibilidad financiera, el cual ayuda a las empresas a evaluar el impacto financiero de los riesgos físicos y de transición en sus estados financieros y resultados operativos. Esto incluye la estimación de costos adicionales debido a eventos climáticos extremos y el análisis del valor de los activos en diferentes escenarios de cambio.

Además, las empresas pueden realizar una evaluación de riesgos específica para su sector y ubicación geográfica. Esto implica evaluar los riesgos físicos y de transición más relevantes y desarrollar estrategias de mitigación y adaptación específicas para las características de cada empresa.

Por último, un análisis de escenarios de bajas emisiones ayuda a las empresas a evaluar cómo su cartera de activos puede evolucionar en un futuro de bajas emisiones de carbono. Esto incluye evaluar qué activos pueden quedar varados y qué inversiones en tecnologías limpias y renovables son necesarias para una transición exitosa.

Así, la identificación y evaluación de los riesgos físicos y de transición asociados al cambio climático son fundamentales para la gestión efectiva de la sostenibilidad y resiliencia financiera de las empresas. Al utilizar metodologías como el análisis de escenarios, la evaluación de riesgos por sector y el análisis de sensibilidad financiera, las empresas pueden identificar y gestionar los riesgos más relevantes y desarrollar estrategias para adaptarse a un futuro de bajas emisiones de carbono y mitigar los impactos del cambio climático.

2 RIESGOS FISICOS DE ORIGEN CLIMÁTICO

2.1 Metodología general

El análisis de riesgo de un sistema ya sea un territorio, una comunidad, una infraestructura o un ecosistema, según la metodología propuesta por el IPCC, se basa en tres aspectos fundamentales. En primer lugar, se evalúa la amenaza, que consiste en el cambio en las condiciones climáticas, tanto en sus valores medios como en los extremos, y los efectos que pueden tener en variables biofísicas, como caudales e incendios. Luego, se analiza la exposición, que se refiere a la coincidencia espacial entre la ocurrencia de la amenaza y el sistema en estudio. Por último, se evalúa la vulnerabilidad, que representa la sensibilidad o la falta de capacidad de adaptación del sistema analizado. Este marco conceptual para caracterizar los riesgos fue desarrollado en el Informe Especial de Cambio Climático y Eventos Extremos (SREX) y el quinto informe del IPCC (IPCC, 2014). En la Figura 2-1 se muestra la relación entre la adaptación al cambio climático y la gestión de desastres, siguiendo este enfoque metodológico (IPCC, 2012).

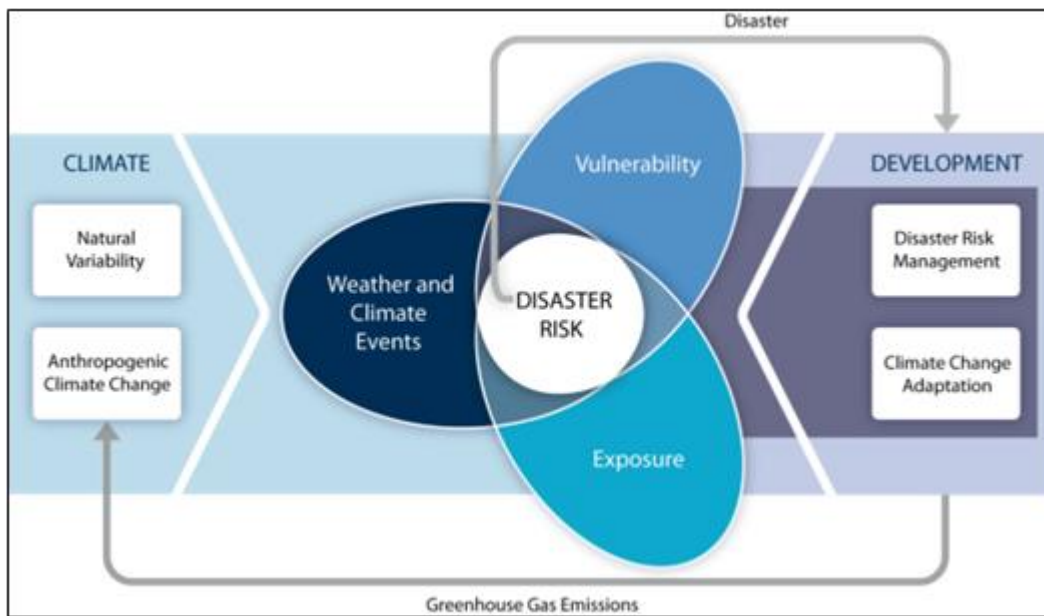


Figura 2-1: Relaciones entre la adaptación al cambio climático y la gestión de desastres.

Fuente: IPCC, 2012.

Este enfoque fue la base de análisis del Atlas de Riesgos Climáticos para Chile (ARClím), un proyecto del Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile, ejecutado por el Centro de Investigaciones sobre el Clima y la Resiliencia (CR2) y el Centro de Cambio Global UC (CCG-UC), y se aplicó para evaluar el riesgo de

cambio climático en los sectores social, ambiental y productivo de manera individual.

La metodología para analizar las amenazas de origen climático implica obtener una variable de salida que sintetice el riesgo del sistema frente a la amenaza a la que está expuesto, considerando su sensibilidad y vulnerabilidad inicial. Los resultados pueden reflejar la confiabilidad del sistema o su resiliencia.

Al caracterizar el riesgo climático, es esencial analizar los componentes del sistema que se ven afectados por las amenazas climáticas. Además, se deben definir posibles estados de daño o impacto en la operación de estos componentes para diferentes niveles de intensidad de la amenaza. Asociado a cada estado de daño, es necesario estimar tiempos de recuperación en función del riesgo para evaluar la resiliencia del sistema.

Por ejemplo, para el caso de una línea de transmisión eléctrica, una medida de intensidad del evento que afectaría los componentes vulnerables podría ser la temperatura máxima diaria. Si esta temperatura supera cierto umbral, podría generar un riesgo en la capacidad de transmisión del componente en ese momento.

Desde el punto de vista metodológico, el primer paso para evaluar el riesgo es la caracterización del área de estudio en términos de su exposición, identificando las áreas susceptibles a los riesgos y amenazas asociadas al cambio climático. Posteriormente, se realiza un análisis de las condiciones meteorológicas históricas en la zona en estudio, identificando patrones de tendencia tanto en las variables climáticas más comunes (temperaturas extremas y precipitación) como en indicadores de eventos extremos derivados de estas variables.

A continuación, se describen las metodologías específicas para cada uno de los riesgos físicos vinculados a los activos de INTERCHILE a analizar, junto con aquellos vinculados a las comunidades de interés y que pueden tener un efecto en la reputación de la compañía.

2.2 Metodología específica para riesgos físicos sobre activos

2.2.1 Condiciones medias de temperaturas y precipitaciones

Una vez seleccionados los modelos, se puede calcular estadísticos de las proyecciones por modelo y por zona. Esto ha permitido caracterizar las

proyecciones en la zona de estudio de manera general. Los valores de temperatura media a futuro presentan un incremento respecto del valor histórico, siendo todos los modelos consistentes con el aumento, aunque en diversas magnitudes según el modelo.

Sin embargo, la precipitación media no presenta consistencia entre modelos, en particular en la zona norte, puesto que los valores medios de las proyecciones indican tanto aumento de precipitación como disminución de esta. Esta incertidumbre tiene origen en lo complejo del clima desértico de la zona Norte, donde se presentan escasa precipitación y estos eventos son más bien esporádicos.

2.2.2 Riesgo por temperaturas extremas

Para calcular el impacto de las temperaturas extremas sobre la Línea de transmisión, se definen los siguientes indicadores que permiten cuantificar la amenaza que presentan las altas temperaturas: frecuencia, que indica la cantidad de días al año con temperatura máxima y mínima sobre un umbral establecido (número de eventos por año); persistencia, que indica la cantidad de días consecutivos que dura un evento promedio de temperatura extrema (número de días por evento); y por último, magnitud o intensidad, que indica los grados por sobre o bajo el umbral establecido en un evento de temperatura extrema (°C).

Estos indicadores se calculan tanto para el periodo histórico aplicando la metodología a los datos observados disponibles como a las proyecciones de los distintos modelos climáticos seleccionados en las mismas coordenadas de las estaciones, y se comparan los valores obtenidos de tal manera de obtener índices del incremento de la amenaza en el futuro respecto del histórico.

$$I = \frac{I_{\text{futuro}} - I_{\text{histórico}}}{I_{\text{histórico}}}$$

De tal manera que, si el valor del indicador I es mayor 0, hay un aumento en el indicador mencionado, es decir, a futuro las proyecciones indican un aumento tanto en la frecuencia, persistencia o magnitud de los eventos de temperatura extrema. Lo inverso si es que este indicador es menor que cero. Es importante destacar que el indicador I es estandarizado, lo que elimina los sesgos de magnitud y permite comparar los incrementos en las distintas zonas en términos relativos al histórico del mismo lugar.

Para analizar el cambio de eventos de olas de calor por temperatura extrema a futuro y tomando en cuenta las curvas de operación por potencia en función de la temperatura ambiente (Figura 2-2), y previa reunión de coordinación y avances con la contraparte, se definió un umbral fijo de 35°C sobre el cual, en caso de superarse, se restringe la capacidad de transmisión de electricidad en el sistema. Por otro lado, se definió un umbral inferior de 0°C, el cual de estar por debajo, también podría generar contingencias. En ese sentido, las formas en que puede cuantificarse el impacto de los eventos de temperatura extrema hacia el periodo futuro pueden ser: 1) Frecuencia: contabilizando el número de veces al año que la temperatura se encuentra fuera de los límites umbral en promedio para el periodo futuro, en comparación con el periodo histórico. 2) Magnitud/Intensidad: corresponde al mayor valor de temperatura diaria máxima en el año, sobre 35°C, y al menor valor bajo 0°C, de toda la serie tanto en el periodo histórico como en el futuro. 3) Persistencia: Número de olas de calor (definida como el número de días consecutivos en que la temperatura máxima supera los 35°C, con un mínimo de 3 días) al año, evaluada tanto en el periodo histórico como en el futuro. Esto mismo aplica para olas de frío en donde se busca estar por debajo de los 0°C. Del punto de vista de la amenaza climática se considera solo 1), no obstante respecto del riesgo sobre la infraestructura 2) y 3) pasan a ser relevantes.

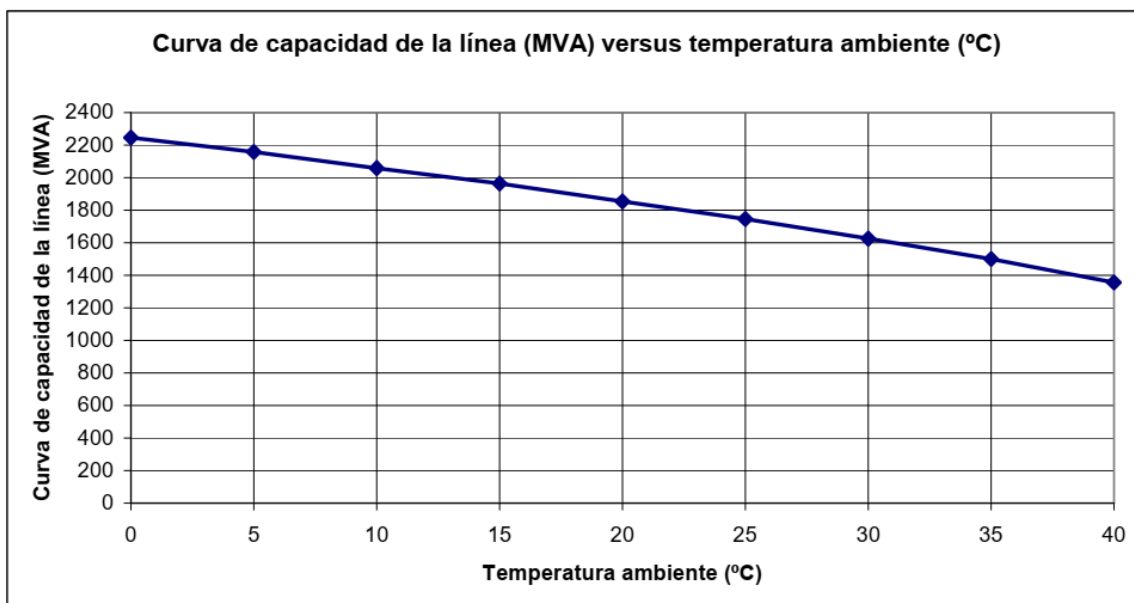


Figura 2-2: Curva de capacidad. Cambios en la potencia de transmisión máxima de una línea de 220 kV respecto de la temperatura ambiente.

Fuente: Consultoría Colombiana S.A. Facilitado por INTERCHILE.

En definitiva, la metodología considera los siguientes pasos:

- Cada tramo/región donde cruza la LTE es analizado de forma independiente a partir de todas las celdas expuestas que se inscriben en ella (y las del buffer).
- Se obtienen las series de tiempo diarias de Tmax y Tmin para cada celda en el periodo 1985-2100 en todos los modelos seleccionados, las cuales luego son analizadas de forma particular en cada periodo histórico y futuro.
- Luego, se contabiliza el número de días por año (frecuencia) en el periodo histórico y futuro, en el que se supera el umbral de 35°C o se está por debajo del umbral de 0°C.
- Finalmente, se contabiliza el cambio en el número de días entre los periodos histórico y futuro para la línea, reportado por tramo/región.

2.2.3 Riesgo por ocurrencia de aluviones

Dada la extensión de la línea de transmisión, es de interés identificar zonas de riesgo específicas frente a la ocurrencia de aluviones. Un supuesto de trabajo es que, frente al suceso de estos eventos y, dado el enfoque metodológico general, la caracterización del riesgo frente a aluviones se considera equivalente a la caracterización de la amenaza. Para caracterizar esta amenaza, es necesario definir si dada una cierta condición climática podría ocurrir un aluvión, y cuál sería su zona de influencia. Para evaluar la ocurrencia de eventos aluvionales a futuro, se definen las condiciones gatillantes con base en registros históricos de aluviones e información meteorológica del lugar. A partir de esta información se identifican condiciones desencadenantes para cada torre de interés de forma individual. Luego, se contabiliza el número de veces que se dan estas condiciones tanto en el periodo histórico y futuro utilizando los resultados de los escenarios climáticos seleccionados. El resultado permitirá hacer un mapeo espacial del cambio proyectado en la frecuencia de eventos con el potencial de gatillar aluviones/remociones en masa para cada torre y subestación seleccionada por INTERCHILE.

El enfoque adoptado corresponde a una aproximación simple a un problema complejo que es la ocurrencia de aluviones, la que depende por cierto de condiciones locales de las cuales no se tiene información, como una extensa caracterización del terreno y su topografía. De la misma manera, los registros

completos y extensos de precipitación de larga data en las cercanías de los sitios de interés, relevantes para la caracterización de aluviones e inundaciones, son comúnmente escasos, particularmente en la Macrozona Norte del país. Más aun, hay aluviones que se ven condicionados por precipitaciones en altas zonas de la cordillera para las cuales no existen estaciones con largos registros y bien podrían estar a decenas de kilómetros del punto de interés. Por tanto, para efectos de la modelación, resulta complejo identificar dichos eventos. Todos los antecedentes anteriores ilustran la dificultad inherente a la caracterización de eventos aluvionales, por lo que es pertinente reconocer la incertidumbre asociada a los resultados de la caracterización propuesta. Sin embargo, el enfoque utilizado es razonable, particularmente considerando la extensión del territorio a evaluar.

Las variables de precipitación y temperatura son las relevantes para la caracterización de la amenaza aluvional. Se seleccionarán estaciones meteorológicas con registro de estas variables ubicadas lo más cerca a cada torre a analizar dentro de la línea, idealmente dentro de la subcuenca aportante a la planicie de inundación donde se ubica la estructura. Además, para corregir el sesgo en los modelos climáticos, los registros a considerar deben cubrir al menos el periodo histórico definido 1985 – 2020. Con base en la línea del trazado y evidencia histórica se trabajará sobre las quebradas y cauces de interés, con su respectiva estación representativa, y las torres expuestas, teniendo como criterio aquellas seleccionadas por los profesionales de INTERCHILE. Entre la Región de Tarapacá y la Metropolitana existen 23 torres y 6 subestaciones sobre las cuales se debe caracterizar el riesgo de ocurrencia de aluviones y se distribuyen regionalmente como muestra la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Distribución Regional de Torres y subestaciones a evaluar por riesgo de aluvi3n.

Región	Nº Torres	Nº Subestaciones
Tarapacá	10	1
Antofagasta	0	1
Atacama	5	2
Coquimbo	5	1
Valparaíso	3	0
Metropolitana	0	1
Total	23	6

Fuente: Elaboración propia.

La ocurrencia de eventos de remoción en masa tiene relación con factores condicionantes (propiedades físicas del sitio) y desencadenadores (precipitaciones, sismos) (Aleotti, 2004). Dado el enfoque que se implementará y

que ya han sido seleccionadas las torres, no urge caracterizar los factores condicionantes como el tipo de suelo y la pendiente. Al solo considerar los factores desencadenadores, el enfoque típico utilizado en la literatura es el de definir umbrales empíricos (Corominas et al., 2000; Guzzetti et al., 2007b; Aleotti, 2004). La presente metodología propone la identificación de 2 umbrales que se complementan. El primero tiene relación con el volumen de escorrentía generado por un evento y el segundo con la intensidad y duración de dicho evento.

Umbral volumen de escorrentía

Respecto del primer criterio, se quiere conocer la contribución de flujo desde la región aportante al cauce, que se traduce en crecidas y generación de flujos detríticos. Para definir la ocurrencia o no de aluviones, se fija un umbral en términos del volumen de agua escurrido, el cual depende directamente de la precipitación e indirectamente de la temperatura de la siguiente manera:

$$Vol = P * S_{líquida}$$

$$S_{líquida} = f(T, H)$$

Donde,

Vol: volumen potencial de agua que escurre.

P: Precipitación

S_{líquida}: Superficie sobre la cual precipita agua líquida

T: Temperatura

H: Hipsometría de la cuenca

En rigor, existe un coeficiente de escorrentía que determina qué porcentaje del agua líquida que cae escurre y qué porcentaje es retenido o se pierde por efectos de la infiltración o evaporación. En este análisis, dicho coeficiente será omitido, ya que lo que interesa comparar es la magnitud relativa entre un evento y otro, y se asume que la proporción de agua que escurre en cada evento se mantiene constante. Como no se está considerando dicho coeficiente en el cálculo, se asume además que debe existir una precipitación mínima para la cual el suelo se satura y el agua deja de infiltrarse y comienza a escurrir en un mayor porcentaje.

De esta manera, eventos con precipitación menor a un cierto umbral no tendrían el potencial para generar un aluvión o crecida (independiente del volumen). El efecto del cambio de la intensidad de la precipitación con la altura, por el cual, generalmente, a mayor altura mayor intensidad, se está despreciando en este análisis. Tampoco se está considerando el efecto de la precipitación sobre nieve, el cual genera un volumen mayor de escurrimiento por derretimiento.

La identificación del área contribuyente que recibe precipitación líquida requiere estimar la ubicación de la isoterma 0°C (es decir, la elevación sobre la cual la precipitación se asume como sólida, Z0). El área bajo esta elevación es la de interés. Para encontrar esta área se requiere conocer la curva hipsométrica de la cuenca aportante a cada ubicación donde se localizan las torres (cuantificación de la superficie de cuenca que está bajo una cierta altura). Esta cuenca aportante se estima utilizando el Modelo de Elevación Digital (DEM) ALOS PALSAR de 12,5 m de resolución, y herramientas de procesamiento hidrológica de QGIS. La altura de la isoterma 0°C (Z0) para cada evento de precipitación se encuentra utilizando la temperatura media diaria registrada por la estación meteorológica más cercana (con una completitud de datos > 70%) y asumiendo un gradiente de temperatura atmosférica de -6,5 °C/km (es decir, por cada 1.000 m de altura la temperatura disminuye en 6,5°C). Se utiliza la temperatura media, ya que existe una amplitud térmica dentro de un mismo día la cual podría provocar que se ignoren eventos que, si se revisan históricamente, fueron causantes de aluviones. Esto es especialmente relevante en la Macrozona Norte del país. Los cursos de agua utilizados para la modelación del riesgo serán aquellos que aporten o coincidan con el cauce principal asociado a la ubicación de cada torre identificada por ITCL, lo que dependerá del área aportante identificada respecto de cada torre.

A modo de ejemplo, la Figura 2-3 muestra la delimitación del área aportante a las torres asociadas a la Quebrada Totoral. Por otro lado, se muestra en la Figura 2-4 la Curva hipsométrica de esta área aportante tomando en consideración las elevaciones que contiene.

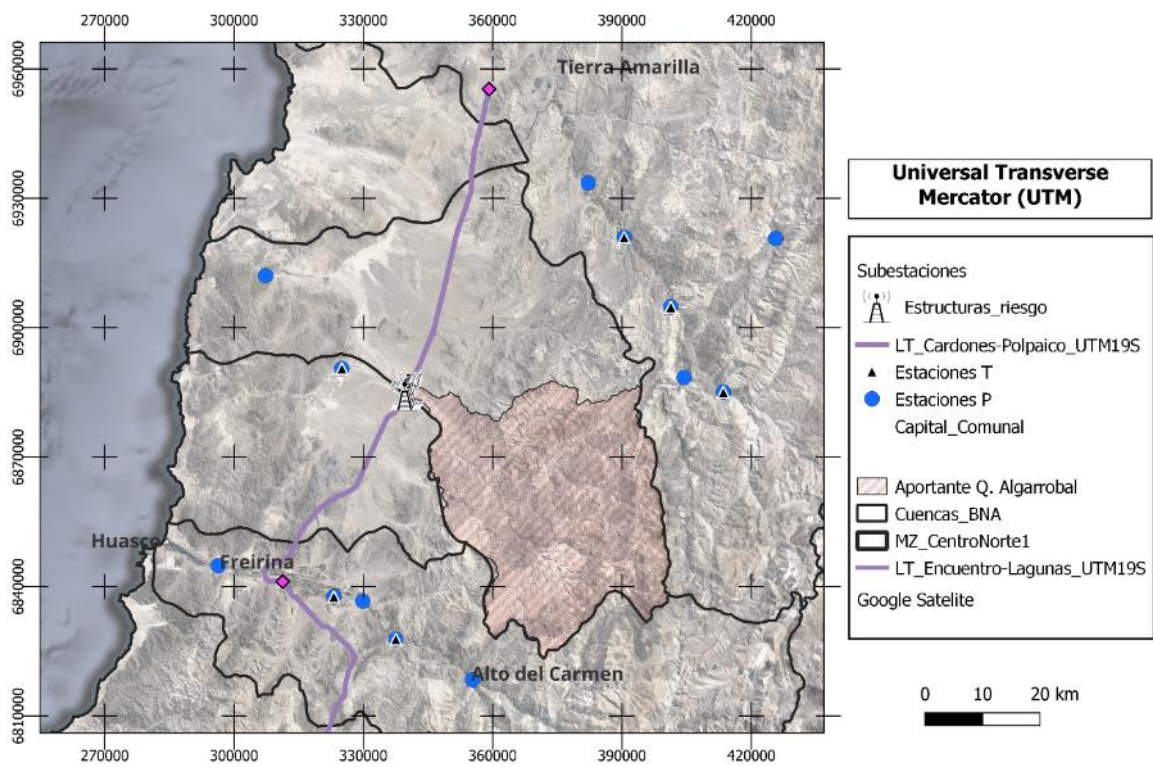


Figura 2-3: Área Aportante a Torres ubicadas en Quebrada Algarrobal.

Fuente: Elaboración propia.

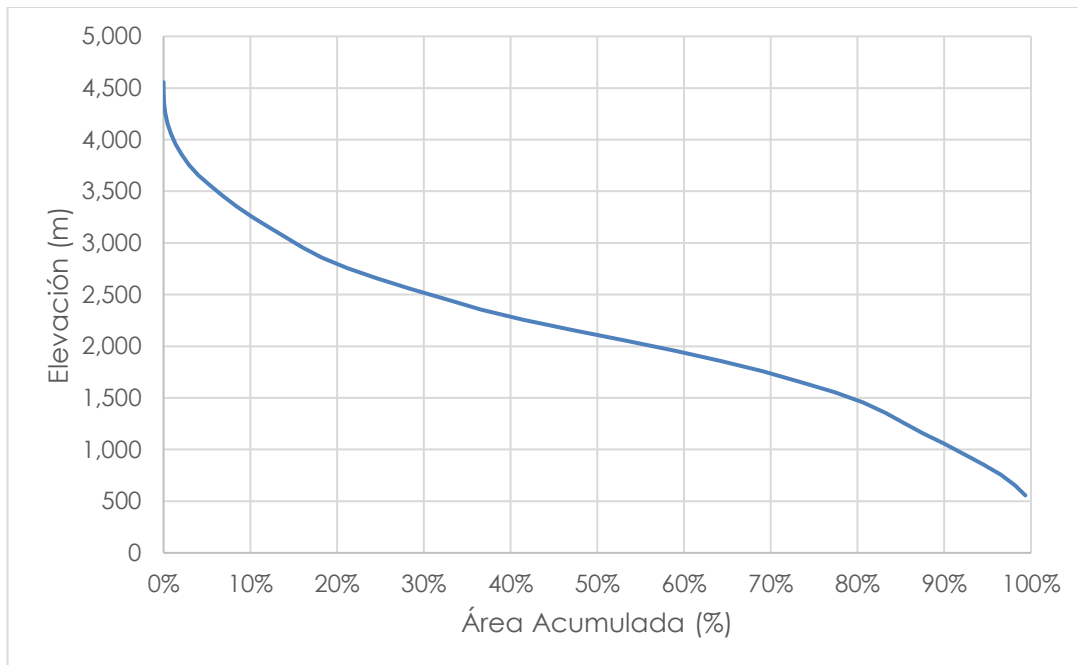


Figura 2-4: Curva Hipsométrica Área Aportante a Torres ubicadas en Quebrada Algarrobal.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la construcción de un catastro histórico de eventos, se puede identificar el umbral de volumen asociado a eventos aluvionales críticos, el que se utiliza para identificar eventos que pueden detonar aluviones. Siguiendo con el ejemplo de las torres en la Quebrada Algarrobal, se identificaron eventos de precipitación, distinguiendo independencia por un periodo de 6 horas o más continuas sin lluvia. Para cada evento, se estimó la Profundidad (mm), intensidad media (mm/h), Duración (h), Temperatura media (°C) y Volumen (m^3). Contrastando con la ocurrencia histórica de eventos de los que se tiene información, se marca un volumen umbral (color rojo) correspondiente a aquel evento de menor magnitud en el cual ocurrió una remoción en masa.

Tabla 2-2: Delimitación de volumen umbral desencadenante de aluviones para área aportante a torres en Quebrada Algarrobal.

N°	Profundidad	Intensidad	Duración	Temperatura media	Volumen	Fecha Inicio
1	118,76	2,33	51	10,54	125,66	6/16/1991
2	79,79	2,1	38	13,63	121,86	8/17/1997
3	92,7	3,71	25	10,96	110,23	6/11/1997
4	60,93	1,97	31	13,92	105,29	7/24/1987
5	33,39	3,71	9	16,7	61,56	6/23/2000
6	25	1,39	18	15,06	48,39	5/17/2017

N°	Profundidad	Intensidad	Duración	Temperatura media	Volumen	Fecha Inicio
7	29,58	0,62	48	15,43	47,74	5/11/2017
8	26,04	1,37	19	16,67	46,94	8/27/2002
9	20,76	1,09	19	17,94	42,81	5/27/1992
10	16,43	0,71	23	21,91	38,48	5/25/2002
11	18,34	0,83	22	14,54	32,92	7/8/2011
12	19,14	1,06	18	12,58	28,3	6/6/1992
13	14,65	0,7	21	15,72	28,19	5/14/2000

Fuente: Elaboración propia.

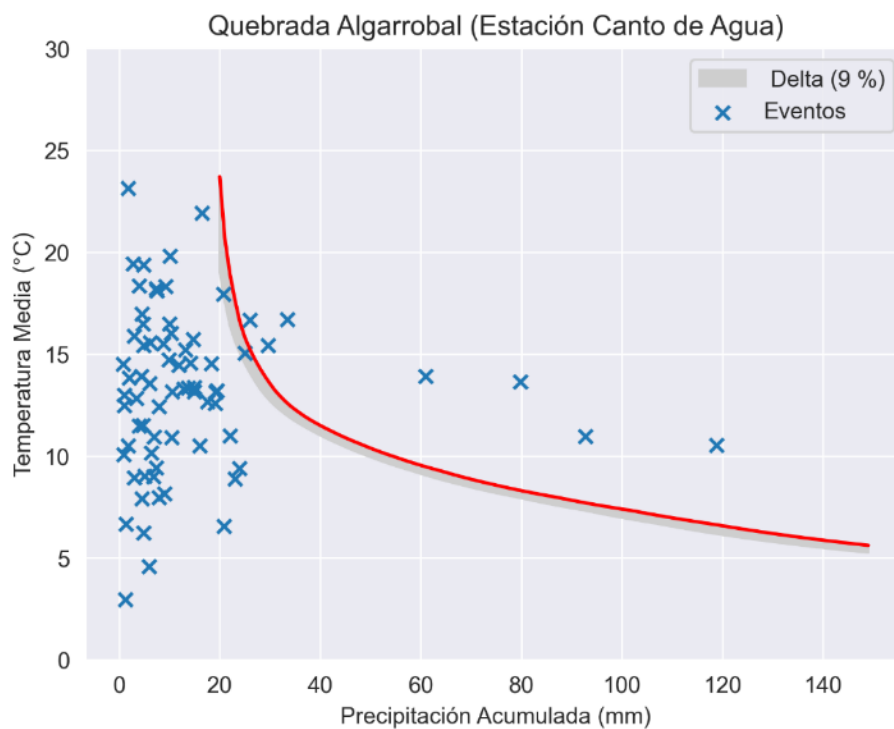


Figura 2-5: Curva de volumen umbral empírico para la ocurrencia de aluviones en torres ubicadas en Quebrada Algarrobal.

Fuente: Elaboración propia.

La definición de un volumen umbral permite que posteriormente se pueda comparar la cantidad de ocurrencias históricas vs la proyección de ocurrencias futuras, determinando una eventual tasa de cambio. Sin embargo, se propone ajustar estadísticamente la probabilidad conjunta de que se supere cierto valor de precipitación y temperatura sobre el cual podría darse la ocurrencia de aluviones, robusteciendo el análisis al disponer de un modelo. Luego, se puede estimar la tasa de cambio en la frecuencia de ocurrencia respecto de la historia vs el futuro proyectado.

Dado que se han identificado como factores desencadenadores la precipitación y temperatura, determinando así el volumen de escorrentía, se pretende realizar un ajuste bivariado que pueda estimar la probabilidad de que ocurran eventos críticos (desencadenantes) por medio del uso de funciones de cópula. Una cópula es una distribución conjunta multivariada en la cual la distribución marginal es uniforme (0,1) y que puede ser utilizada para derivar la distribución conjunta de dos o más variables, independiente de sus respectivas distribuciones marginales originales (Miao et al., 2016). Es decir, cada variable tiene una asociada de forma independiente una distribución de probabilidad, con su respectivo modelo teórico, el cual es uniformizado por medio de su curva de frecuencia, a lo cual se le da el nombre de distribución marginal acumulada. La función que modela el comportamiento multivariado de las distribuciones marginales, se denomina cópula.

Dicho de otra forma, sea $v_j = H_x(a_j), j = 1, 2, \dots, m$, la distribución marginal acumulada (CDF) de cada variable j y $H_A(A)$ la distribución multivariada de $A_j, j = 1, 2, \dots, m$. Entonces la distribución multivariada puede ser expresada como:

$$H_A(A) = C_A\{v_1, v_2, \dots, v_m; \theta\} X \in R^d$$

Donde, C_A es una cópula d-dimensional.

El procedimiento para la aplicación y utilización de un modelo de cópula se basa en lo propuesto por Tilloy et al. (2020) y es el siguiente:

- 1) Definir un valor umbral de precipitación (1mm en este caso), procurando tener por lo menos 30 valores disponibles que permitan realizar un ajuste estadístico, pero intentando eliminar numerosos eventos pequeños.
- 2) Ajustar distribuciones marginales de las 2 variables de interés (precipitación y temperatura) a alguno de los 6 modelos de distribución de probabilidad analizados (Normal, Log normal, Gamma, t-Student, Beta y GEV). La selección se hace mediante 2 pasos:
 - i. Se realiza un test de *Kolmogorov-Smirnov* a cada ajuste de distribución. Si el valor p del test es mayor a 0,05 se considera que dicho ajuste es seleccionable.
 - ii. Para los N ajustes seleccionables se evalúa el valor del *Akaike Information Criterion (AIC)* (Akaike, 1974), estimado como:

$$AIC = k \cdot \log\left(\frac{RSS}{k}\right) + 2m$$

Donde k es el tamaño de la muestra, m es el número de parámetros y RSS es la suma de los cuadrados de los residuales. Mientras más pequeño sea el valor de AIC , mejor es la bondad de ajuste de la distribución de probabilidad. Por lo tanto, para cada variable se selecciona aquella distribución dentro de las N seleccionables que tenga un menor valor de AIC .

- 3) Transformar las variables a una distribución uniforme (estimando la probabilidad acumulada respectiva de cada valor sin ordenar). Ambos vectores ya no tienen información directa de las distribuciones marginales, pero mantienen información respecto de la estructura de dependencia (Nelsen, 2006).
- 4) Ajustar a cada función de cópula de las disponibles en librerías de libre acceso en *Python* (Gaussiana, Gumbel, Clayton y Frank) estimando el valor del parámetro de esta. La estimación se hace considerando una de las alternativas propuestas en Teegavarapu et al. (2019), implementando una variante del método de Máxima Verosimilitud Exacta (*EML* por su acrónimo en inglés). Este método tiene como objetivo estimar de forma simultánea las distribuciones marginales univariadas y el o los parámetros de la cópula. Como se menciona en 2), se estiman de forma previa las distribuciones marginales univariadas, en vez de estimar todos los parámetros de forma simultánea. Esta variante es conocida como Inferencia Desde las Marginales (*IDM* por su acrónimo en inglés).
- 5) De forma análoga a la metodología de ajuste univariado, se realiza un test multivariado de *Kolmogorov-Smirnov*, para luego seleccionar la cópula con un menor valor del test AIC .
- 6) Se generan 1.000 series sintéticas de 10.000 eventos y se estiman probabilidades de eventos conjuntos considerando el volumen umbral en base a la función de cópula ajustada, incorporando la incertidumbre del ajuste.

La Figura 2-6 muestra un ejemplo de resultado para el ajuste de cópula en la Estación Canto de Agua como referencia para las torres ubicadas en Quebrada Algarrobal. El eje de las abscisas corresponde a las precipitaciones acumuladas de cada evento y el eje de las ordenadas a las temperaturas medias. La curva verde representa las combinaciones de P y T correspondientes al volumen umbral y las cruces (puntos) sobre ese umbral caracterizan aquellos observados (simulados) que recogen condiciones de desencadenar un aluvión. Las áreas demarcadas representan periodos de retorno conjuntos específicos. Para este caso específico, el mejor ajuste fue el de una cópula Gaussiana, la cual se observa que mapea de forma adecuada la ocurrencia bivariada de eventos precipitación-temperatura.

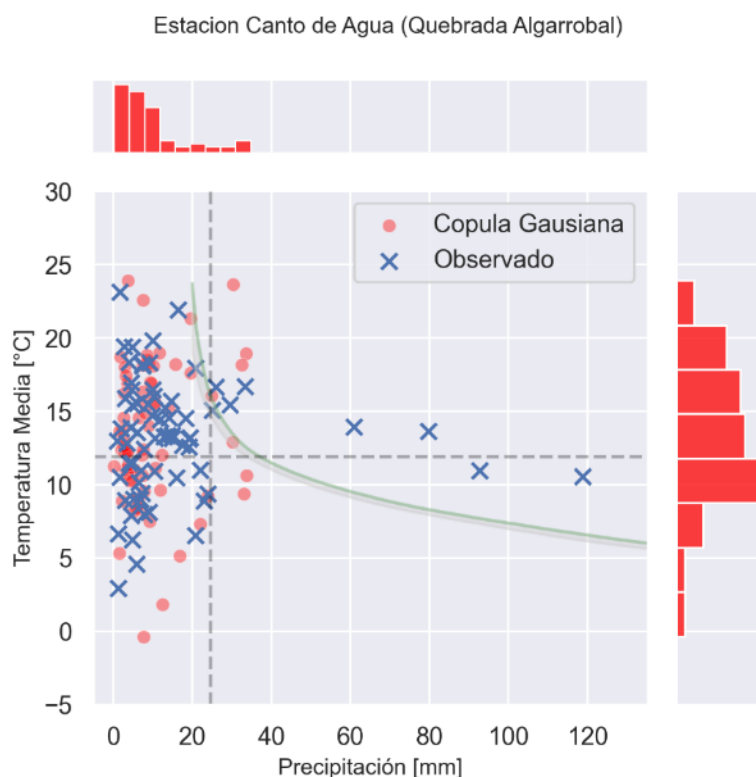


Figura 2-6: Ejemplo de representación gráfica de la probabilidad bivariada (Temperatura, Precipitación) de excedencia.

Fuente: Elaboración propia.

De manera adicional, para verificar la pertinencia de este ajuste, se estima la diferencia en la densidad de probabilidad de la copula respecto de la densidad empírica (Ver Figura 2-7). Se puede observar que no hay un sesgo sostenido hacia

la sobre o sub representación en determinada dirección. Además, sumando todas las diferencias se llega a un valor cercano a 0 (-0,0003).

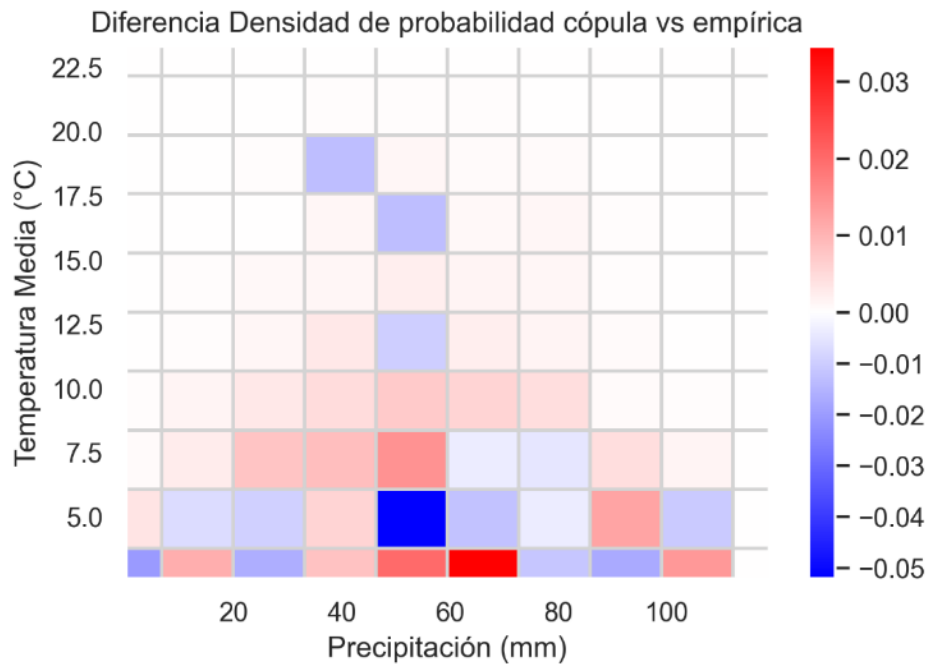


Figura 2-7: Diferencia densidad de probabilidad cópula vs empírica Estación Canto del Agua (Quebrada Algarrobal).
Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que ante la detección de torres o subestaciones en las cuales se encuentre evidencia de que no han ocurrido eventos aluviones o de remoción en masa, se descarta realizar análisis sobre dichas estructuras. En la subestación Maitencillo (Cuenca Río Huasco) no hay antecedentes explícitos de la ocurrencia de aluviones en aquellas fechas que coinciden con eventos en esa cuenca. Para esto, se revisaron notas de prensa, reportes y cartografías de Sernageomin, documentos municipales, entre otros. Si bien aguas arriba efectivamente han ocurrido aluviones, el embalse Santa Juana (operativo desde 1995) y el ensanchamiento del cauce parecieran tener un efecto regulador sobre estos eventos. Efectuando procedimientos similares, se han identificado las subestaciones Polpaico y Lagunas como ubicaciones en las cuales no existen antecedentes ni fuentes de flujo aportante relevantes para la ocurrencia de aluviones.

2.2.4 Riesgo por ocurrencia de incendios

Para que se produzca un incendio forestal, hay tres factores principales que concurren: una fuente de ignición, material combustible para quemar (vegetación, viva o muerta) y condiciones climáticas que faciliten la propagación del fuego inicial desde el punto de ignición (principalmente altas temperaturas y vientos). En Chile, la mayoría de los incendios son iniciados por personas, y hay una gran cantidad de terreno ocupado por vegetación, especialmente entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos, habitadas por más de 15 millones de personas (INE, 2021). La precipitación y la temperatura son probablemente los factores climáticos más importantes que moldean el régimen de incendios, donde hay altas temperaturas y baja precipitación, en general, hay condiciones favorables para que se inicien y se propaguen los incendios forestales.

Para evaluar y cuantificar el riesgo o susceptibilidad de un paisaje a los incendios forestales, existen muchas opciones; hay ejemplos de modelos matemáticos para estimar las probabilidades de ignición (Cao et al., 2017; Valdez et al., 2017) o el cálculo de índices ad hoc (Dasgupta et al., 2006; Pradhan et al., 2007). Estas no son todas las opciones, pero son las más comunes para reportar el riesgo.

Los índices ad hoc generalmente utilizan información de puntos de ignición y un conjunto de variables predictivas del evento de fuego/no fuego para construir una métrica de amenaza o susceptibilidad utilizando varios métodos como la razón de frecuencia (Pradhan et al., 2007) o relaciones dirigidas a la base física del fuego, como el cálculo de la energía calórica pre-ignición en el combustible vivo (Dasgupta et al., 2006), que luego se escala para convertirse en un índice de susceptibilidad a los incendios forestales. Cuando se utilizan modelos matemáticos, como modelos logísticos o probit, o algoritmos basados en árboles o redes neuronales, la variable de respuesta es un valor distribuido en el rango de 0 a 1. Esto se interpreta como la probabilidad de incendio (ignición) para los modelos paramétricos (regresión logística o probit) o se puede interpretar como una predisposición a los incendios forestales cuando se utilizan métodos de aprendizaje automático como Random Forest o Boosted Regression Trees (Miranda et al., 2020) (Figura 2-8). La predicción de la ocurrencia de incendios forestales es un problema de clasificación binaria y, por lo tanto, los modelos predictivos utilizan el valor estimado como un indicador de susceptibilidad a los incendios forestales (Bjanes et al., 2021, Cao et al., 2017, Valdez et al., 2017). En la medida que la probabilidad esperada lo indique, este valor será transformado a una **frecuencia** esperada de incendios. No obstante, se debe tener presente que

dadas las características de la exposición (a diferencia de macrozonas al sur de la región Metropolitana de Santiago), la fracción de material combustible lleva a que las probabilidades de ignición sean comparativamente bajas, las que se traducen en frecuencias bajas para periodos de tiempo que son más acotados.

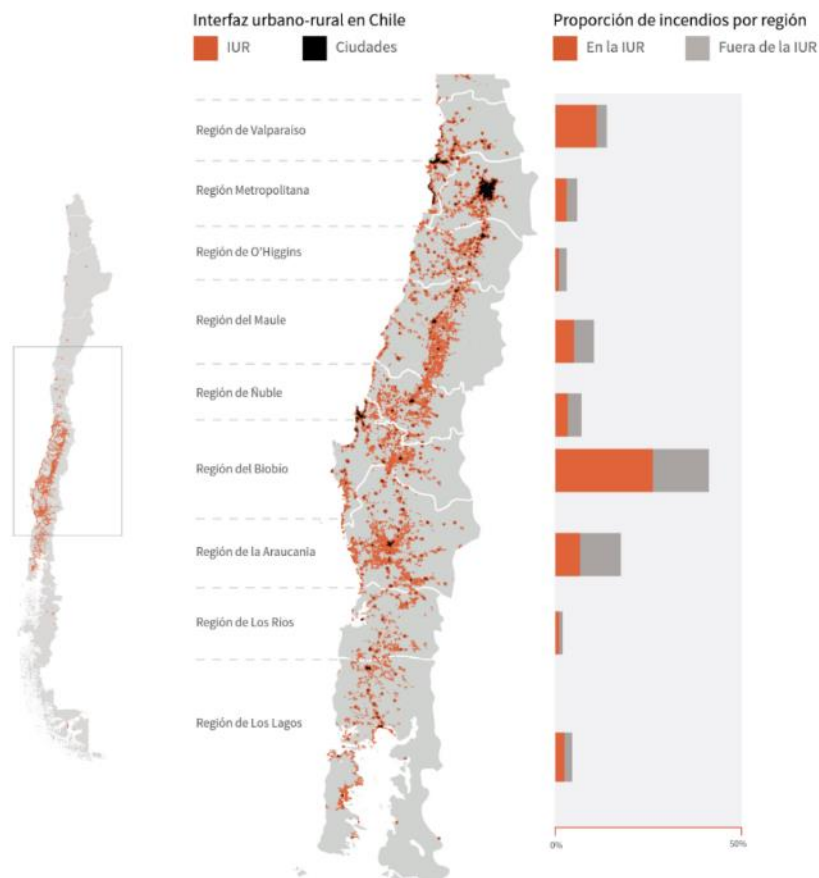


Figura 2-8: Proporción de incendios por región considerando la Interfaz Urbano Rural (IUR).

Fuente: Miranda et al., 2020.

El grado de proximidad entre los elementos de la cobertura terrestre en un paisaje puede influir en la propagación de incendios. Las evaluaciones de la propagación potencial de incendios suelen utilizar modelos empíricos o de simulación que estiman probabilidades en función de las interacciones complejas entre factores bióticos y abióticos. Con el objetivo de evaluar la precisión de una nueva métrica de exposición al fuego, Beverly et al. (2021) realizó un estudio en Alberta, Canadá, donde se mapeó la exposición a combustibles peligrosos. La metodología de cálculo de la exposición a utilizar, planteada por Beverly et al. (2021), encontró una correspondencia entre la exposición y las áreas quemadas, y observaron

cambios en la exposición durante un período de tiempo (Figura 2-9). La métrica resultante de exposición al fuego permite cuantificar fácilmente el potencial de transmisión del fuego a una ubicación específica, considerando la composición y configuración de los combustibles circundantes, sin importar el clima u otros controles de incendios. Además, esta métrica puede ser comparada entre regiones geográficas y períodos de tiempo, y puede ser utilizada junto con otras métricas de control de incendios para estudiar los incendios en el paisaje. El enfoque métrico de exposición presentado por Beverly et al. (2021) al fuego en el paisaje consiste en asignar una calificación numérica al potencial de propagación del fuego hacia una ubicación específica, considerando la composición y disposición de los combustibles cercanos, sin verse afectado por el clima u otros controles de incendios. Esta métrica simple, determinista y univariada de exposición al fuego se ajusta a los incendios reales observados en cualquier área de estudio y representa un cambio en comparación con los enfoques computacionalmente complejos y basados en datos utilizados para caracterizar el potencial de propagación de incendios en paisajes.

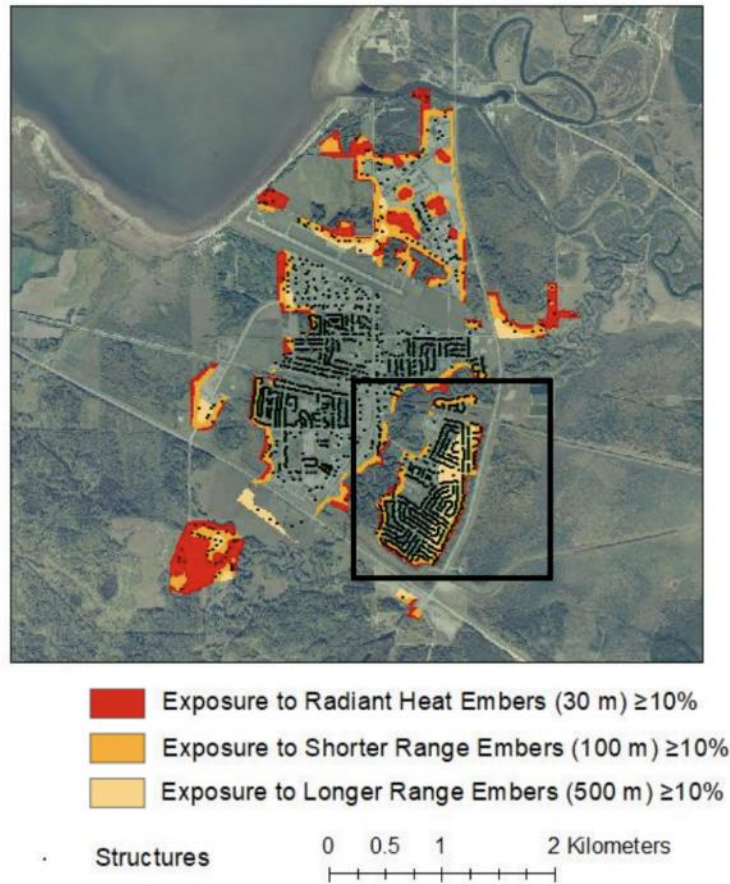


Figura 2-9: Propagación potencia de un incendio considerando el grado de alcance de las pavesas.

Fuente: Beverly et al., 2021.

Según (Ricotta et al., 2018) los incendios tienden a iniciarse preferentemente cerca de las carreteras en todas las clases de cobertura de suelo, y la influencia de las carreteras es mucho más fuerte en los usos del suelo menos impactados, donde la disponibilidad de encendidos inducidos por humanos depende en gran medida de las redes de accesibilidad. Basados en Ricotta et al. (2018) y Miranda et al. (2020), para definir la vulnerabilidad de los activos de INTERCHILE frente a una ocurrencia de incendios se utilizará la distancia euclidiana de estos activos a los caminos, senderos y huellas existentes en el área (más cercano, distancia media, etc).

Para el riesgo de ocurrencia de incendios, no hay suficiente información de puntos de incendio observados en la macrozona Norte y CentroNorte1, por lo que no se

puede ajustar un modelo o algoritmo de estimación para estas áreas y debe considerarse que no hay un alto riesgo de incendios en esas macrozonas.

2.2.5 Riesgo por reducción de lavado por precipitaciones

Los *dry spells* son periodos de tiempo prolongados sin precipitación. La repetición de periodos prolongados sin lluvia, en zonas donde hoy en día llueve regularmente, puede tener un impacto en los costos de mantención del sistema de transmisión.

Utilizando los datos históricos observacionales de la caracterización del área de estudio y las salidas de los modelos corregidos para la variable precipitación, se analizarán los cambios en la y ocurrencia de *dry spells* que pudiera mostrar alteraciones en la frecuencia de lavado para evitar los cortes circuitos y fallas del sistema. La exposición asociada corresponde a la infraestructura de INTERCHILE en los dos tramos de interés: Cardones – Polpaico y Encuentro – Lagunas.

Desde INTERCHILE, se hizo entrega del calendario de lavados para el año 2024 para el trazado Encuentro-Lagunas, dividido en dos sectores principales:

- **Encuentro-AnaMaria** (que comprende 70 torres) y que tiene programada sesiones de lavados de tres semanas consecutivas a inicios de marzo y a inicios de agosto, vale decir haciendo lavados cada cinco meses.
- **AnaMaria-Lagunas** (con un total de 373) torres divididas en cuatro sectores:
 - **Sector 1** (66 torres), con lavados en dos semanas consecutivas en julio. Al no haber otra sesión, se entiende que este sector el proceso se realiza una vez al año.
 - **Sector 2** (214 torres) a realizarse entre las últimas dos semanas de marzo y las dos primeras de mayo, por un total de ocho semanas. Solo aparece una sesión al año.
 - **Sector 3** (67 torres), se realizan cuatro sesiones de lavado de tres semanas cada una (febrero, mayo, agosto, noviembre) separadas cada tres meses aproximadamente.
 - **Sector 4** (26 torres), se calendarizan tres sesiones de 2 semanas, cada una separadas cuatro meses entre ellas, aproximadamente.

Basado en este esquema de lavados, aquellas sesiones que se encuentren menos espaciadas temporalmente entre sí, definen el tiempo mínimo en que los

aisladores se deben lavar, es por eso que el periodo de análisis para reportar el lavado de aisladores se ha definido en 90 días.

Por su parte, la vulnerabilidad fue diferenciada respecto de las macrozonas de estudio, considerando la propensión de ellas a tener periodos prolongados en que la precipitación diaria no supera 1 mm. En ese sentido, las macrozonas Norte y Centro Norte 1 presentan mayor vulnerabilidad que las macrozonas Centro Norte 2 y Centro. Por otra parte, la frecuencia con la que se realiza limpieza a los aisladores también define la vulnerabilidad al riesgo de fallas en la línea por ausencia de lavado, ya que se acumulará más suciedad en los aisladores, lo que disminuirá su eficiencia y aumentará el riesgo. Además, el tipo y calidad de los aisladores será considerado referencialmente para la cuantificación del riesgo. Aisladores de superficie porosa son más propensos a acumular polvo y suciedad, por lo que presentan mayor vulnerabilidad. Por otro lado, los aisladores de vidrio son menos propensos a acumular suciedad debido a su superficie más lisa, lo que los hace más resistentes al lavado y reducen el riesgo de fallo por contaminación. Sin embargo, también pueden presentar cierta acumulación de suciedad con el tiempo, lo que hace necesario el mantenimiento y limpieza periódica.

Metodológicamente, se asignó a cada celda de grilla con datos de precipitación para los modelos en distintos escenarios, y considerando para el periodo histórico y los dos periodos futuros un valor vinculado a la exposición estandarizado entre 0 y 1, donde cero indique que la lejanía de la celda a la línea de Transmisión no tendrá un efecto sobre el lavado de aisladores, y 1 que la celda toca al menos algún segmento del trazado. Con esto, se obtuvo la exposición de la infraestructura al riesgo de falla por ausencia de lavado de precipitaciones natural.

En segundo lugar, la vulnerabilidad fue calculada con base en la frecuencia de lavado se la infraestructura de INTERCHILE por cada uno de sus tramos, estandarizando sus valores entre 0 y 1, cuando 1 es la máxima frecuencia de lavado.

En tercer lugar, se estandarizó la amenaza respecto de la ubicación geográfica, con base en las celdas de grilla por cada macrozona que reporten datos de precipitación en todos los modelos, escenarios y periodos. Se obtuvo un promedio de días continuos al año en donde la precipitación es inferior a 1 mm. A priori, se entiende que una precipitación inferior a 1 mm diario no es capaz de lavar adecuadamente los conductores, por lo que se considera como un día seco. Para

el presente, y con base en los antecedentes entregados por INTERCHILE, más estudios previos, se ha definido un umbral de días acumulados para determinar si existe un *dry spell* de 90 días.

2.3 Metodología específica para riesgos sobre comunidades

2.3.1 Riesgo por falta de disponibilidad de agua en las comunidades

La metodología para estimar el riesgo sobre la disponibilidad de agua en las comunidades se basa en las proyecciones de los cambios en precipitación y temperatura que fuerzan un modelo de estimación de componentes de balance hídrico. Esta información se obtuvo de los resultados de la Homologación del Balance Hídrico Nacional (BHN) (DGA, 2022), un compendio de las distintas metodologías aplicadas en los balances hídricos previos. Es importante mencionar que hubo revisión de los informes de los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica en distintas cuencas asociadas, no hallándose información homologada.

Bajo este contexto, y para analizar la vulnerabilidad ante el cambio climático en el área definida como zona de estudio, que corresponde a los Sitios Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC's) (DGA, 2014) vinculadas a las comunidades de interés y los Servicios Sanitarios Rurales (SSR) aledaños.

En concreto, sobre estos SHAC's se reporta el riesgo de disponibilidad de agua en las distintas comunidades priorizadas de acuerdo con los SSR (ex sistemas de Agua Potable Rural (APR)) (DOH, 2015) que se vinculan a las comunidades (Figura 2-10). Para evaluar el cambio en disponibilidad hídrica en los SSR vinculados a las comunidades en estos sitios, se utilizarán los resultados de la homologación del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2022) para los cuatro modelos seleccionados en los escenarios CMIP5 RCP8.5.

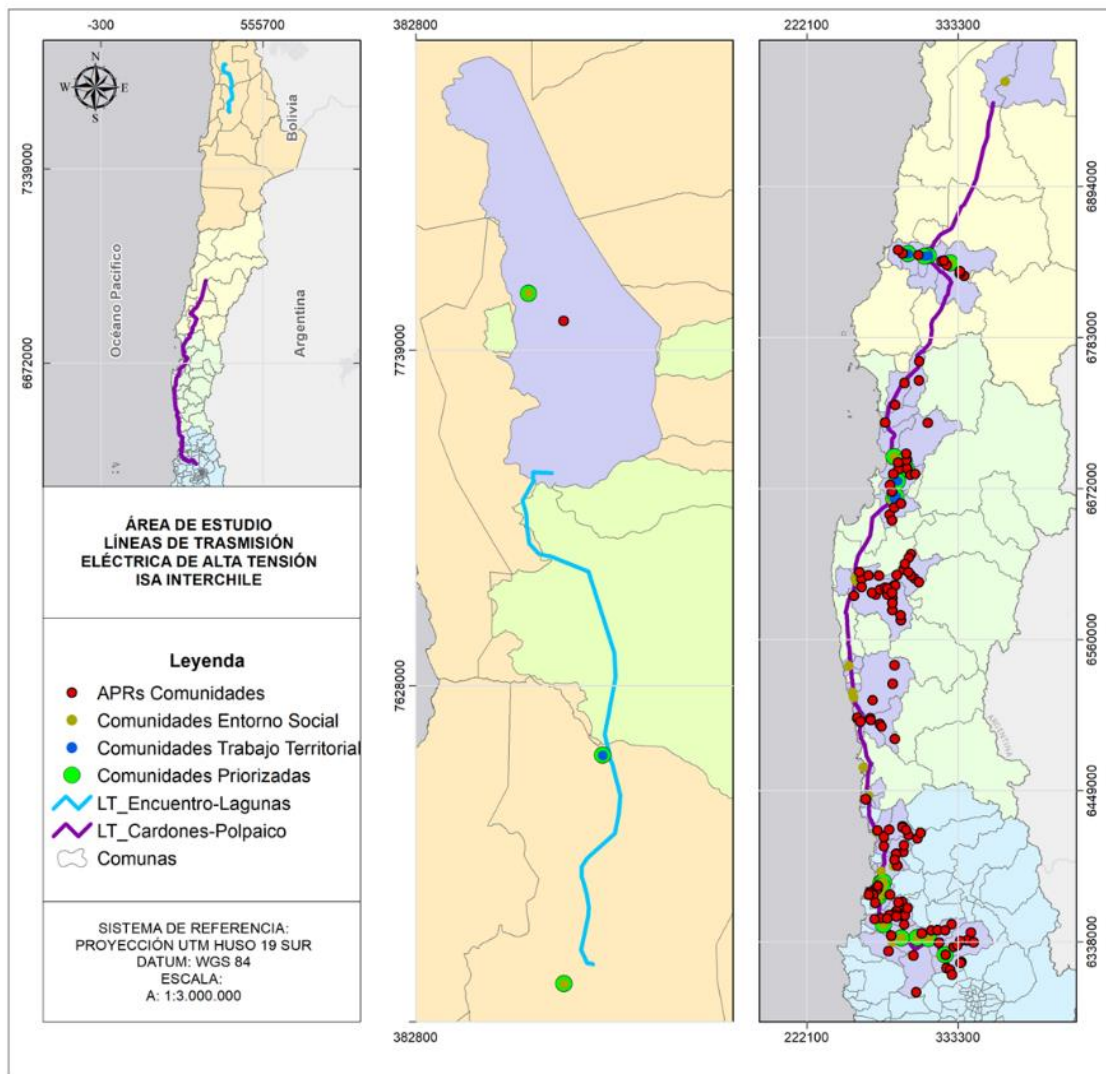


Figura 2-10: Distribución de los SHAC´s y APR´s vinculados a las comunidades priorizadas por INTERCHILE.

Fuente: Elaboración propia.

Estos cambios esperados se obtendrán para los flujos superficiales (escorrentía) y subterráneos (flujo base) para una comparación entre los periodos 1985-2015 y 2030-2060, según los modelos reportados en BHN. Con esto, se evalúa la respuesta hidrológica mediante la comparación de modelos climáticos, a partir el cálculo del cambio porcentual entre el valor promedio anual para el período de referencia 1985-2015 y el valor promedio anual para el período 2030-2060.

$$\text{Cambio (\%)} = \frac{(\text{Valor futuro}_{2030-2060} - \text{Valor histórico}_{1985-2015})}{\text{Valor histórico}_{1985-2015}} * 100$$

2.3.2 Riesgo por disminución en productividad agrícola

La metodología para estimar el riesgo sobre la disponibilidad de agua sobre actividades agrícolas ha sido definida por el riesgo de que se reduzca el suministro de agua para los grupos de cultivos presentes en las comunas de las comunidades con mayor superficie clasificada como cultivo definido por la cobertura de Zhao et al. (2016, ver sección 1.4.2. Riesgo para las comunidades de interés, Disponibilidad de agua sobre actividades agrícolas). Se revisará el Censo Agropecuario 2021 (INE, 2021) con un foco en las comunas La Serena, Coquimbo, Ovalle, Quillota, Limache, Villa Alemana y Tiltil. Dado que la superficie regada es predominante versus la superficie en secano se considerará como supuesto que todos los cultivos poseen algún sistema de riego implementado.

Dado los diferentes grupos de cultivos¹ presentados por el Censo Agropecuario (INE, 2021), se seleccionará una especie agrícolas representativa por grupo, las cuales estarán elegidas por su mayor área cultivada a nivel comunal.

Ya teniendo las especies de cultivos seleccionados, se procedió a calcular la demanda hídrica en condiciones actuales y futuras, con base en la revisión de estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio, además de la selección de modelos climáticos y proyección de escenarios definidos previamente. El método de estimación utilizado corresponde a la ecuación de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985).

$$ET_0 = 0,0135 * (t_{med} + 17,78) * \frac{R_s}{2,45}$$

En donde,

Et_0 = evapotranspiración potencial diaria, mm/día.

t_{med} = temperatura media, °C.

R_s = radiación solar incidente, convertida en mm/día.

¹ Grupos de cultivos: Cereales, Leguminosas y tubérculos, Hortalizas, Hongos, Aromáticas, Medicinales y Condimentarias, Frutales, Vides para vinificación y Uvas pisqueras y Forrajeras.

Teniendo las estimaciones de oferta de agua, se calculó el cambio en las demandas hídricas de los cultivos (ET_c), revisando el promedio a nivel anual del periodo futuro (cercano, medio y lejano) con respecto al periodo histórico para cada cultivo analizado ante el escenario de reducciones de oferta de agua.

$$ET_c = ET_0 * K_c$$

En donde,

ET_c = evapotranspiración potencial diaria del cultivo.

Et_0 = evapotranspiración potencial diaria, mm/día.

K_c = coeficiente de cultivo.

2.3.3 Riesgo por ocurrencia de incendios

Se describe la metodología para estimar los efectos del cambio climático en los incendios forestales y vincular estos riesgos con dimensiones socioeconómicas y culturales en las comunidades locales, especialmente en la interfaz entre áreas silvestres y urbanas (WUI, por sus siglas en inglés).

La interfaz urbano-rural se refiere a la zona donde coexisten comunidades humanas con coberturas vegetales propensas a incendios, como por ejemplo un conjunto de viviendas cercanas a matorrales o plantaciones forestales. Esta área es donde los incendios causan el mayor número de muertes, pérdidas de viviendas y otras construcciones a nivel mundial, por lo que es crucial identificar y evaluar alternativas de manejo del paisaje para las políticas de planificación territorial. Se definirá la interfase urbano rural del área circundante a los activos de INTERCHILE mediante la metodología propuesta por Miranda et al. (2020).

El método para la estimación del riesgo de incendios sobre comunidades sigue las siguientes etapas:

- a) **Exposición:** Se utilizará la metodología de Beverly et al. (2021) sobre la base de la información de áreas combustibles para incendios y la ubicación de información histórica de puntos de ignición de incendios forestales en las áreas de interés. Se superpondrá la información de incendios forestales (ubicación, área, duración, tipos de combustibles, causa probable, entre otras variables) proporcionada por CONAF a capas de información sobre

uso del suelo y tipos de vegetación de la Encuesta Nacional de Bosques Nativos, también proporcionada por CONAF.

- b) **Vulnerabilidad:** Se determinará la interfaz urbano-rural utilizando la metodología de Miranda et al. (2020). Para la replicación de la metodología se usarán los límites (*thresholds*) de la zona SNZ1 designados por Miranda et al. (2020). Para la densidad poblacional se utilizarán datos de WorldPop² y datos del Censo 2017 (INE, 2018). Para el uso de suelo, se utilizará los mapas de Land Cover de Zhao et al. (2016).
- c) Creación de una base de datos espacial con **covariables** (clima, uso del suelo, actividad antrópica y topografía) en las áreas de ignición y no ignición. La base de datos asume una teselación del área en píxeles de 4 hectáreas. Un píxel en un año determinado se conoce como un voxel. Cada voxel, para el período 2010 – 2020, se atribuirá (además de la ubicación y el año) con datos adicionales, principalmente variables climáticas (temperaturas y precipitaciones), densidades de población, viviendas y carreteras, distancia al pueblo o carretera más cercanos, usos del suelo, tipos de vegetación categóricos y variables topográficas (altitud, pendiente, orientación). Todas estas variables se consideran posibles variables independientes para la predicción de la ocurrencia de incendios forestales. La Tabla 2-3 muestra las variables que contiene la base de datos:

Tabla 2-3: Base de datos espacial usada en la calibración del modelo Random Forest para determinar la probabilidad de un incendio forestal en un vóxel dado.

Variable	Abreviatura	Unidad	Descripción
Área incendiada	area_inc	ha	Área quemada total por el o los incendios en el voxel
Incendios sobre 4 ha en el área de estudios	conteo_inc	binaria	Presencia o ausencia de incendios en el voxel
Clase vegetacional predominante	pctFOREST pctSHRUBS pctAGRIC	-	Cobertura de vegetación con mayor superficie en el píxel, catalogados en tres columnas, Bosques, Matorral, o Cultivos.
Porcentaje por clase vegetacional	pctFOREST pctSHRUBS pctAGRIC	%	Porcentaje de cobertura de clase vegetacional predominante 1 en el píxel, catalogados en tres columnas, Bosques, Matorral, o Cultivos.
Densidad poblacional	población	(personas/km ²)	Conteo de la población por km ² ajustado para coincidir con las

² Disponibles en: <https://hub.worldpop.org/geodata/summary?id=49923>

Variable	Abreviatura	Unidad	Descripción
			estimaciones de población a nivel nacional, datos de WorldPop
Distancia al pueblo más cercano	ED_Urban	m	Distancia de cada píxel de análisis al pueblo más cercano
Distancia al camino más cercano	ED_Caminos	m	Distancia de cada píxel de análisis al camino más cercano
Temperatura media diaria verano, otoño, invierno y primavera.	tas-inv tas-otono tas-prim tas-ver	°C	Extraída de los modelos climáticos
Media temperatura máxima diaria verano, otoño, invierno y primavera.	tasmx-inv tasmx-otono tasmx-prim tasmx-ver	°C	Extraída de los modelos climáticos
Media temperatura mínima diaria verano, otoño, invierno y primavera.	tasmin-inv tasmin-otono tasmin-prim tasmin-ver	°C	Extraída de los modelos climáticos
Precipitación acumulada verano, otoño, invierno y primavera.	pr-inv pr-otono pr-prim pr-ver	Mm	Extraída de los modelos climáticos
Precipitación acumulada de la temporada de incendios	pr-ano	mm	Precipitación acumulada hasta el fin de la temporada desde el 1° de julio inmediatamente anterior hasta el 30 de junio
Humedad Relativa promedio verano, otoño, invierno y primavera.	HRmed-inv HRmed-otono HRmed-prim HRmed-ver	%	Promedio de la humedad Relativa del aire en cada temporada
Humedad Relativa mínima verano, otoño, invierno y primavera.	HRmin-inv HRmin-otono HRmin-prim HRmin-ver	%	Extraída mediante Fórmulas de Penmann-Monteith (Allen et al., 2006) de la temperatura máxima los modelos climáticos

Variable	Abreviatura	Unidad	Descripción
Humedad Relativa máxima verano, otoño, invierno y primavera.	HRmax-inv HRmax-otono HRmax-prim HRmax-ver	%	Extraída mediante Fórmulas de Penmann-Monteith (Allen et al., 2006) de la temperatura mínimas los modelos climáticos
Elevación	DEM	msnm	Extraída de los DEM de ALOS PALSAR
Pendiente en grados	Pend_grados	grados	Extraída de los DEM de ALOS PALSAR
Pendiente en porcentaje	Pend_percent	%	Extraída de los DEM de ALOS PALSAR
Exposición	Aspect	grados	Extraída de los DEM de ALOS PALSAR
Forma del relieve	Landform1 Landform2 Landform3	-	forma del relieve más frecuente en el píxel, catalogados en tres columnas, como el primer dominante, segundo y tercero.
Porcentaje forma del relieve dominante, segundo y tercero	lf_prop_1 lf_prop_2 lf_prop_3	%	porcentaje de forma del relieve, catalogados en tres columnas, como el primer dominante, segundo y tercero.
NDVI	NDVI	-	De imágenes Landsat 5 y 8, media anual de las imágenes disponibles
Distancia del píxel a la línea del trazado	ED_Linea	m	Extraída mediante distancia euclidiana

Fuente: Elaboración propia.

- d) **Amenaza:** Calibración de un modelo matemático para estimar la probabilidad de un incendio forestal en un voxel dado (modelo de ignición). Se calibrará un modelo de Random Forest utilizando la información espacial de los puntos de ignición y las posibles variables independientes dentro de las áreas de interés. Este modelo estimará la probabilidad de una ignición en un año dentro de las áreas de interés, condicionada al valor de un conjunto de variables predictoras (probablemente variables climáticas, topográficas y de actividad antrópica). Esto es un indicador aproximado de peligro en las áreas de interés.

El modelo de ignición se utilizará para estimar la probabilidad anual o mensual de que ocurra un incendio forestal en un voxel dado y estas estimaciones se mapearán en las áreas de interés para detectar sitios donde es más probable que

ocurra un incendio forestal. Este mapa de peligro de incendio se superpondrá al mapa de exposición y a los valores de vulnerabilidad dados por un análisis de la Interfaz Urbano-Rural para delinear puntos críticos donde coinciden niveles altos de peligro de incendio y de alta exposición y vulnerabilidad.

Cabe destacar que, al igual que en los riesgos a los activos de INTERCHILE, para el caso del riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades, no existe suficiente información de puntos de incendio en la macrozona Norte y CentroNorte¹, por lo que no es posible ajustar un modelo Random Forest para estas áreas.

2.3.4 Olas de calor sobre la salud de la población expuesta

La metodología que se utiliza para estimar el riesgo a la salud asociado a las temperaturas extremas comprende siguientes pasos:

- I. Definición de curva de exposición-respuesta apropiada para cada comunidad
- II. Estimación del aumento de riesgo de muerte asociado al aumento de la temperatura y las olas de calor para cada localidad de interés

El primer paso consiste en asignar una curva de temperatura-mortalidad (exposición-respuesta) que represente la realidad nacional. En esta primera etapa, se estima dicha relación para la Región Metropolitana utilizando la metodología propuesta por Sera y Gasparrini (Gasparrini, 2011; Sera & Gasparrini, 2022), que establece la relación no lineal de retardos distribuidos (*distributed lag nonlinear models*) entre la exposición a temperatura y el desenlace de salud a analizar. Esta metodología ha sido utilizada ampliamente por el grupo internacional "MCC Collaborative Research Network" para estimar el impacto de la exposición a temperaturas extremas y para evaluar el riesgo de distintos escenarios futuros de cambio climático. Así, en 2017 (Gasparrini et al., 2017), dicho grupo estimó el exceso de muertes debido al incremento en temperaturas a escala mundial utilizando 4 posibles escenarios. En dicha investigación se contó con información proveniente de Chile para los años 2008 – 2014 y, por tanto, se estimó la curva dosis-respuesta utilizando los mismos datos y metodología usada en dicha investigación, obteniendo así la curva que se muestra en la figura siguiente:

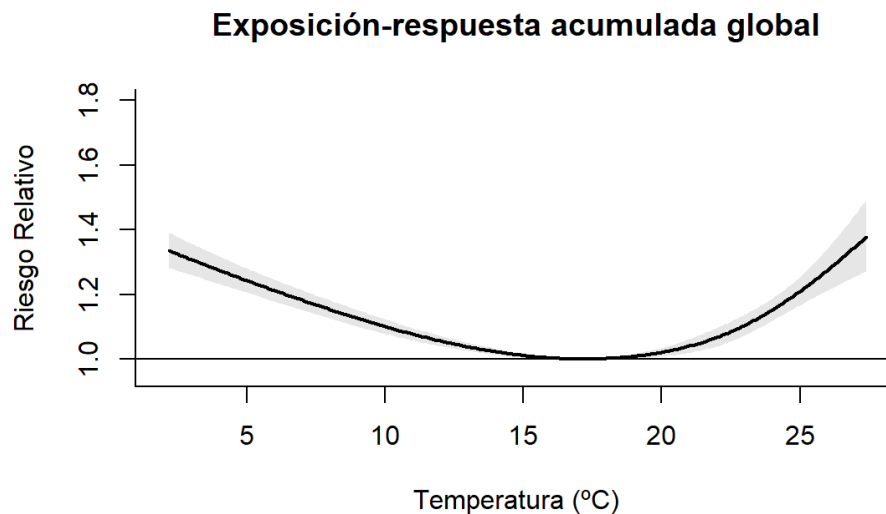


Figura 2-11: Relación Mortalidad-Temperatura, Región Metropolitana 2008 – 2014.

Fuente: Elaboración propia, método Gasparrini et al., 2017.

En este estudio se estima la temperatura de mínimo riesgo de muerte, la cual se establece a los 17,2°C. Como el soporte de temperaturas está limitado por los datos de Santiago, se ajusta una curva GAM para poder extrapolar el riesgo relativo a temperaturas más extremas, generando una función que establezca el riesgo a todas las temperaturas proyectadas hasta el año 2100.

El segundo paso, a partir de la curva antes mostrada y la respectiva función ajustada, se estima el riesgo para frío y calor en cada comunidad establecida, utilizando los datos proyectados diarios, estableciendo como punto de mínimo riesgo cuando la temperatura es igual a 17,2°C. Se estima la serie temporal del riesgo para cada día y cada comunidad, con las cuales luego se estima el riesgo medio anual para cada una de ellas. Finalmente, se estima el riesgo atribuible porcentual para los periodos 2020-2040, 2040-2060 y 2080-2100.

2.4 Caracterización de la exposición

La Exposición, como la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios y recursos ambientales, infraestructura, o activos económicos, sociales o culturales, en lugares que podrían verse afectados negativamente, comprende a su vez una medida del tamaño absoluto o relativo del sector o sistema que enfrenta una amenaza en una condición actual. Esta se vincula al riesgo de desastres en su interacción con la vulnerabilidad o sensibilidad de aquel sector y su amenaza

correspondiente, lo que permite establecer relaciones entre las causas y efectos de eventos de distinta magnitud vinculados a cambios en las condiciones climáticas. Se destaca entonces que la exposición es un elemento básico para determinar si un riesgo climático afecta al sistema de interés particular. En ese sentido, para el presente estudio la exposición está dada por la infraestructura de INTERCHILE en los tramos Cardones-Polpaico y Encuentro Lagunas. En específico, y para representarla espacialmente, se considera un área de influencia de 0,4° desde el trazado (Figura 2-12 a Figura 2-15) que considera a las cuatro macrozonas, identificando el área de estudio representada por todas las celdas de tamaño 5x5 km de la grilla en donde se caracterizarán los riesgos. La definición de este polígono se explica con base a que las condiciones climáticas suelen cambiar en promedio entre los 20 y 25 kilómetros en zonas mediterráneas, lo que soporta el hecho de que el riesgo, de existir, influya en las líneas de Transmisión en este entorno espacial. Es sobre esta superficie, y diferenciando por macrozona definida, que se reportarán los análisis de amenazas de origen climático, para luego estimar los impactos y riesgos asociadas.

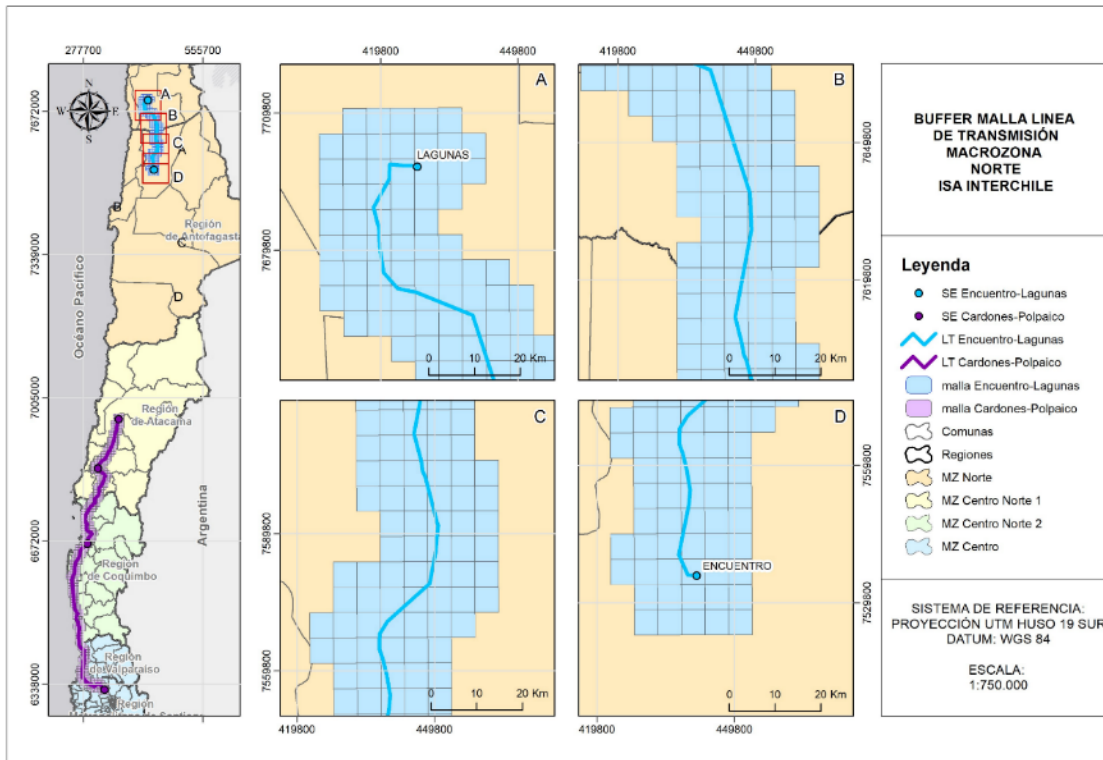


Figura 2-12: Área expuesta en las líneas de Transmisión Encuentro-Lagunas y Cardones-Polpaico con un detalle a la macrozona Norte.

Fuente: Elaboración propia

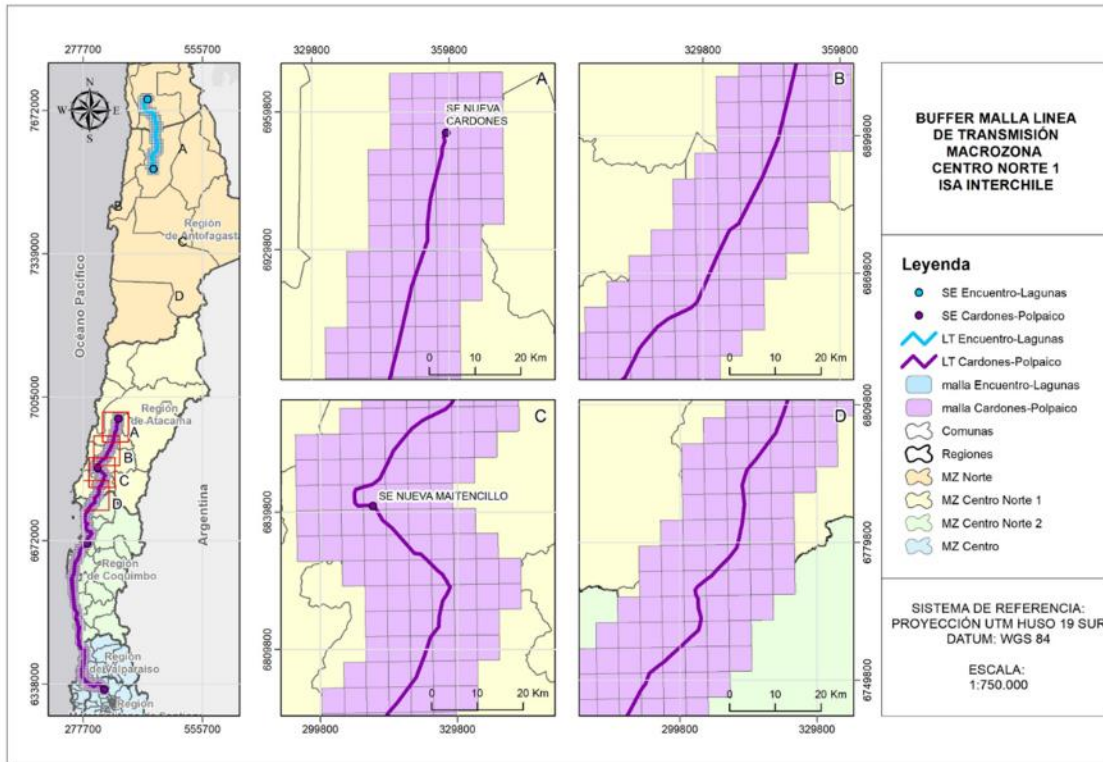


Figura 2-13: Área expuesta en las líneas de Transmisión Encuentro-Lagunas y Cardones-Polpaico con un detalle a la macrozona Centro Norte 1.

Fuente: Elaboración propia.

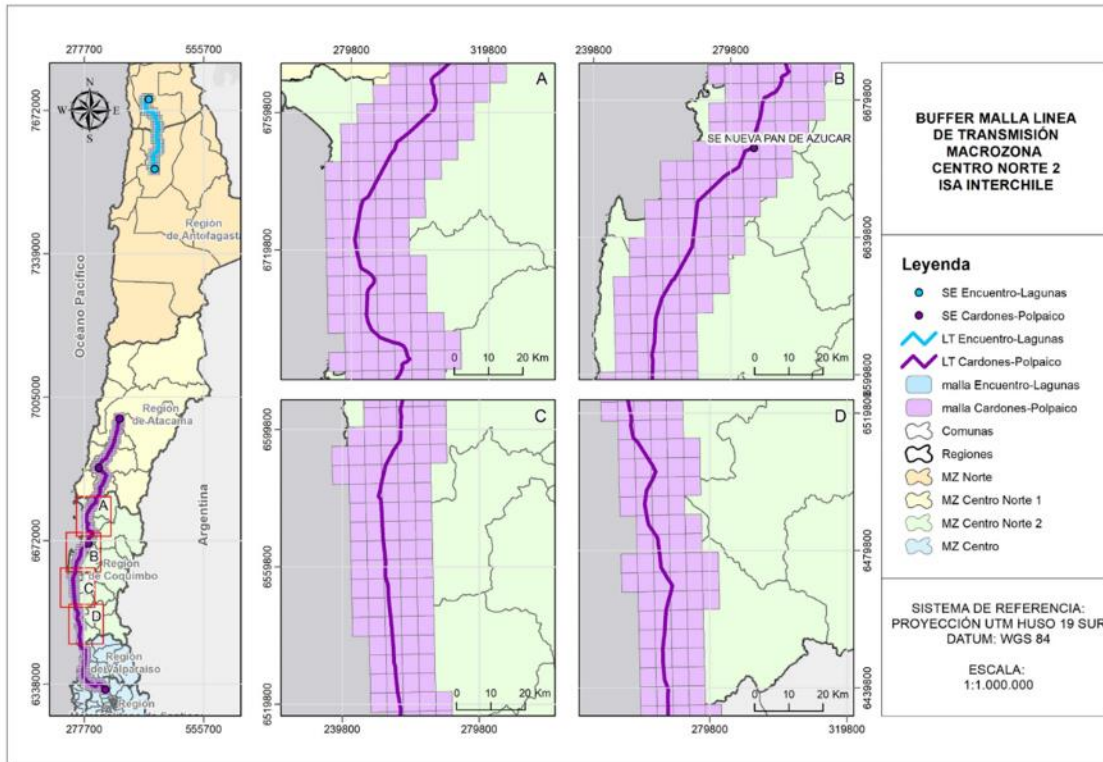


Figura 2-14: Área expuesta en las líneas de Transmisión Encuentro-Lagunas y Cardones-Polpaico con un detalle a la macrozona Centro Norte2.

Fuente: Elaboración propia.

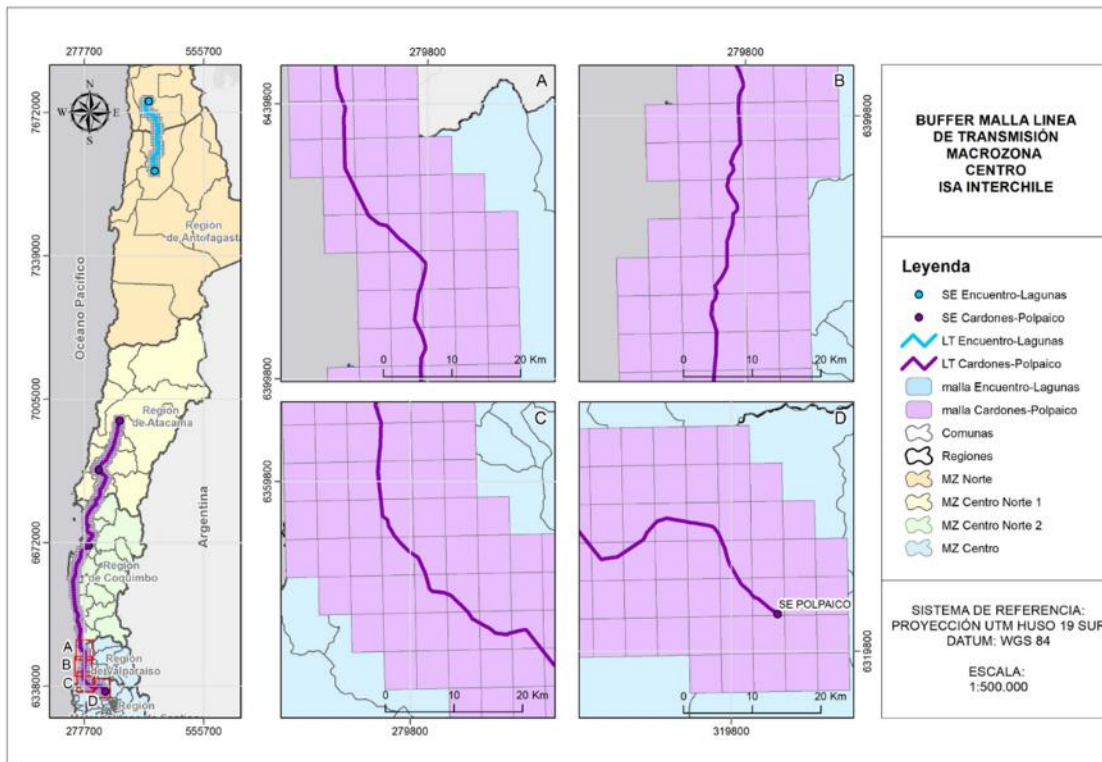


Figura 2-15: Área expuesta en las líneas de Transmisión Encuentro-Lagunas y Cardones-Polpaico con un detalle a la macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

En términos territoriales, el área expuesta abarca el territorio de Chile continental comprendido entre la región de Tarapacá y la región de Los Metropolitanos de Santiago, para el buffer mencionado.

Cada una de las bases de datos vinculadas a esta exposición (datos climáticos en distintas proyecciones, indicadores de vegetación para modelar incendios, entre otros) se cruza el conjunto de pixeles con grillas regulares donde se realizan los análisis de amenazas y riesgos climáticos (grilla de 5x5 km), siguiendo tanto la metodología general como la específica para cada análisis.

2.4.1 Exposición para el riesgo físico de ocurrencia de incendios

Como se mencionó previamente en los capítulos 2.2.4 y 2.3.3, para el cálculo de la exposición se utilizó la metodología de Beverly et al. (2021). La metodología fue replicada en base a las instrucciones proporcionadas en el estudio citado, usando como Landcover la capa de Zhao et al. (2016). A diferencia del estudio de Beverly

et al (2021), en Chile las coberturas propensas a propagar incendios son distintas a las de Canadá, es por esto por lo que, de las coberturas de Zhao et al. (2016) entregadas por el documento de descripción simplificada del producto (Hernández et al., 2016), se seleccionaron las siguientes coberturas mostradas en la Tabla 2-4:

Tabla 2-4: Coberturas de Zhao et al. (2016) consideradas para el cálculo de exposición en base la metodología de Beverly et al. (2021).

Código en Zhao et al. 2016	Cobertura	Uso
110	Cultivos - Arrozales	Transmite incendios, pero no es considerada
120	Cultivos - Invernaderos	Transmite incendios, pero no es considerada
130	Cultivos - Otros Cultivos	Transmite incendios, pero no es considerada
140	Cultivos - Huertos	Transmite incendios, pero no es considerada
150	Cultivos - Barbechos	Transmite incendios, pero no es considerada
211	Bosques - Nativo de Hoja Ancha Primarios	Vegetación que transmite incendios
212	Bosques - Nativo de Hoja Ancha Renovales	Vegetación que transmite incendios
221	Bosques - Nativo de Coníferas Primarios	Vegetación que transmite incendios
222	Bosques - Nativo de Coníferas Renovales	Vegetación que transmite incendios
231	Bosques - Mixtos Primarios	Vegetación que transmite incendios
232	Bosques - Mixtos Renovales	Vegetación que transmite incendios
241	Bosques - Plantaciones de Hoja Ancha Adultas	Vegetación que transmite incendios
242	Bosques - Plantaciones de Hoja Ancha Cosechas	Vegetación que transmite incendios
251	Bosques - Plantaciones de Coníferas Adultas	Vegetación que transmite incendios
252	Bosques - Plantaciones de Coníferas Cosechas	Vegetación que transmite incendios
311	Pastizales - Praderas Anuales	Vegetación que transmite incendios
312	Pastizales - Praderas Perennes	Vegetación que transmite incendios
320	Pastizales - Otros Pastizales	Transmite incendios, pero no es considerada

Código en Zhao et al. 2016	Cobertura	Uso
330	Pastizales - Pastizales Áridos	Transmite incendios, pero no es considerada
410	Matorrales - Matorrales	Vegetación que transmite incendios
420	Matorrales - Matorrales Arborescentes	Vegetación que transmite incendios
430	Matorrales - Suculentas	Transmite incendios, pero no es considerada
440	Matorrales - Plantación de Matorrales	Transmite incendios, pero no es considerada
450	Matorrales - Otros Matorrales Áridos	Transmite incendios, pero no es considerada
510	Humedales - Marismas	Máscara, no transmite incendios
520	Humedales - Pantanos	Máscara, no transmite incendios
530	Humedales - Otros Humedales	Máscara, no transmite incendios
610	Cuerpos de agua - Lagos	Máscara, no transmite incendios
620	Cuerpos de agua - Reservorios	Máscara, no transmite incendios
630	Cuerpos de agua - Ríos	Máscara, no transmite incendios
640	Cuerpos de agua - Océano	Máscara, no transmite incendios
800	Superficies Impermeables	Máscara, no transmite incendios
920	Tierras desnudas - Salares	Máscara, no transmite incendios
920	Tierras desnudas - Suelos arenosos	Máscara, no transmite incendios
931	Tierras desnudas - Suelos rocosos - Rocas	Máscara, no transmite incendios
932	Tierras desnudas - Suelos rocosos - Gravas	Máscara, no transmite incendios
1010	Nieve	Máscara, no transmite incendios
1020	Hielo	Máscara, no transmite incendios
1210	Nubes	Máscara, no transmite incendios

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Figura 2-16, Figura 2-17 y Figura 2-18 se muestra la distribución de la exposición usada para el cálculo del riesgo en ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para las macrozonas Centro, CentroNorte2 y como también para las comunidades cercanas en ambas macrozonas respectivamente.

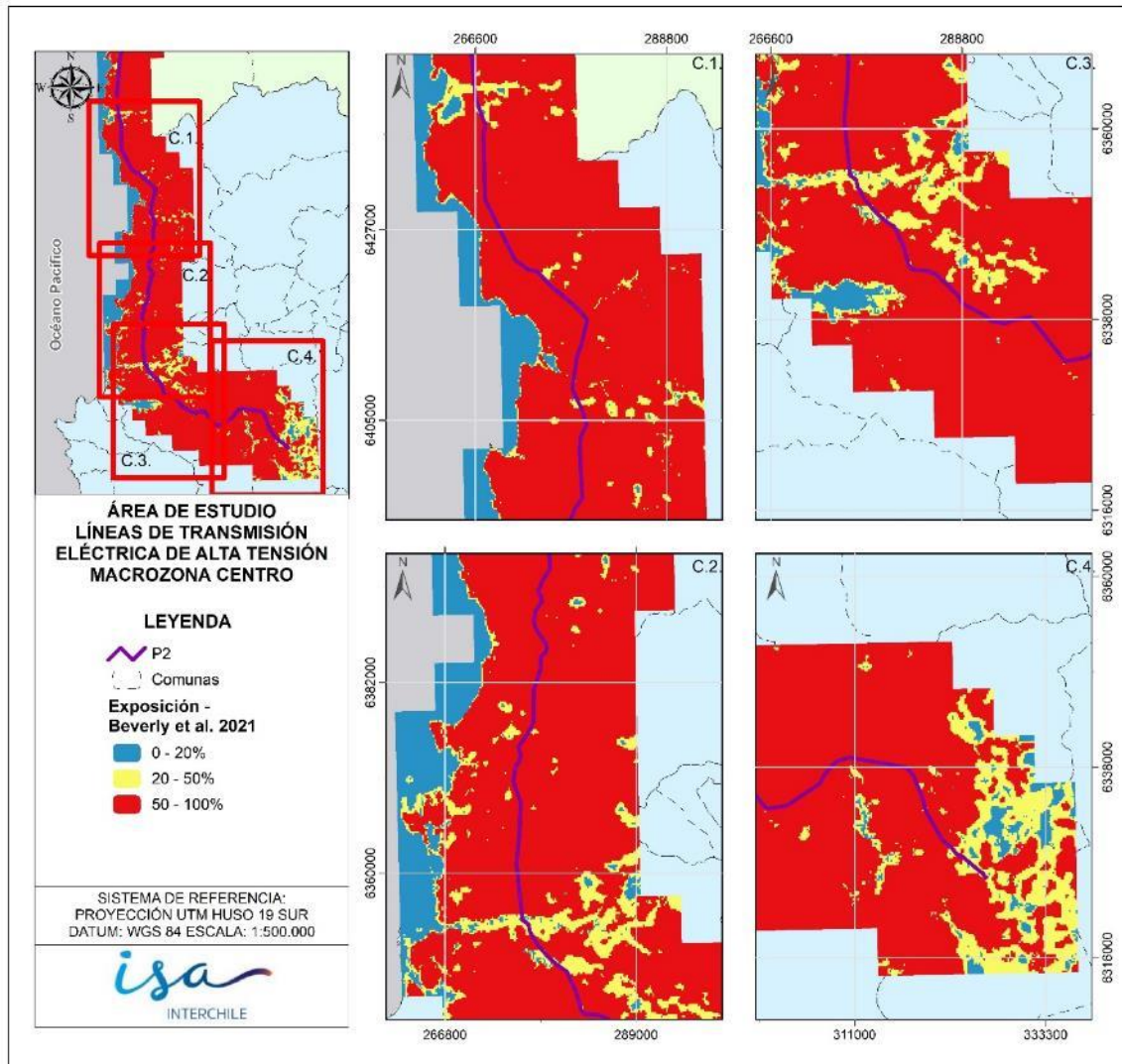


Figura 2-16: Distribución de la Exposición a material combustible según la metodología de Beverly et al. (2021) en la macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

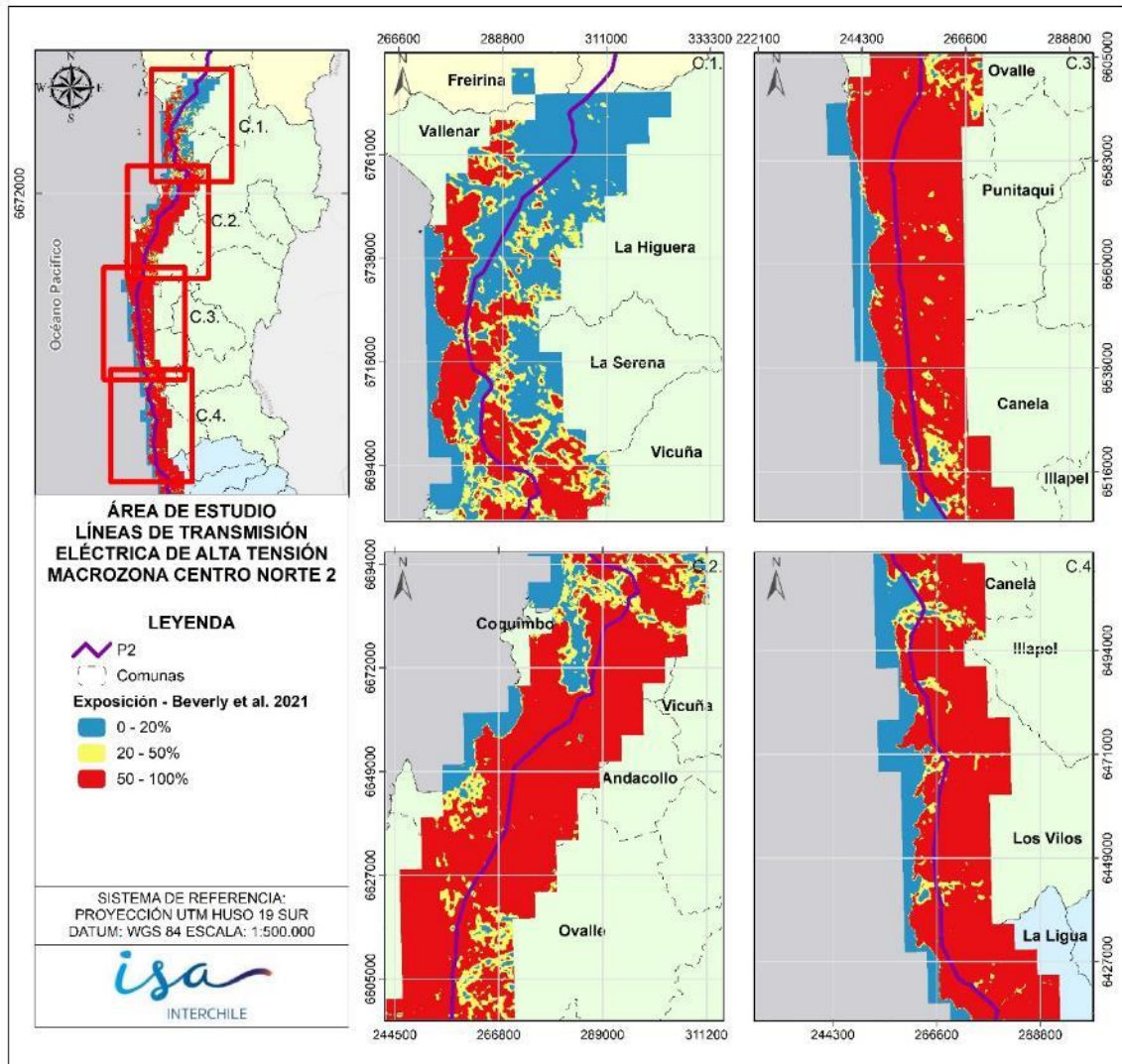


Figura 2-17: Distribución de la Exposición a material combustible según la metodología de Beverly et al. (2021) en la macrozona CentroNorte2.
Fuente: Elaboración propia.

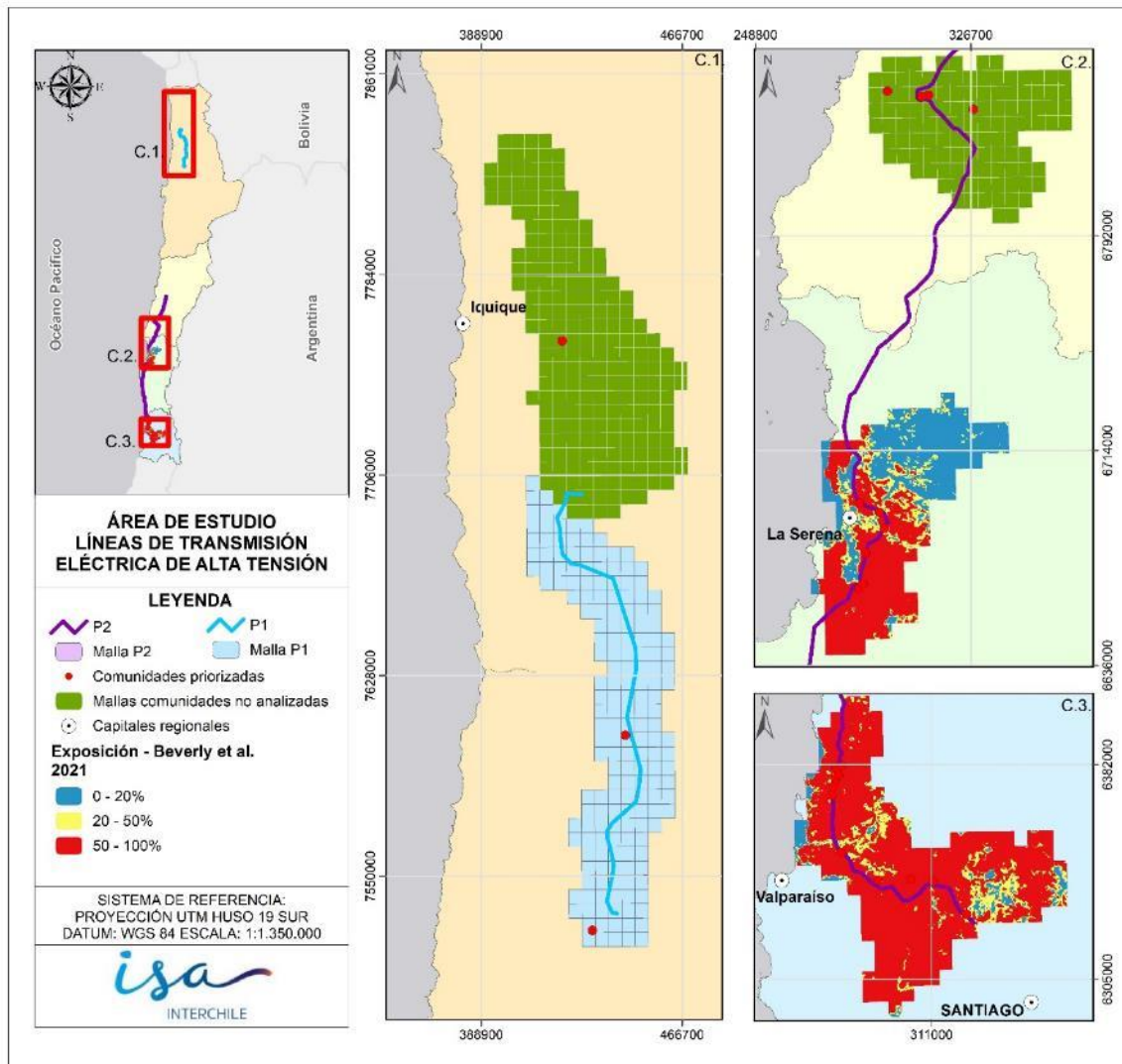


Figura 2-18: Distribución de la Exposición a material combustible según la metodología de Beverly et al. (2021) en la macrozona Centro y CentroNorte2, focalizado en las comunidades aledañas a la línea de transmisión.

Fuente: Elaboración propia.

Con excepción de la zona más al norte de la macrozona CentroNorte2 (cuadro C.1 en la Figura 2-17) la mayor parte del área de estudio posee una alta cantidad de material combustible, esto principalmente a la presencia de bosque y matorral esclerófilo, como también de praderas; las zonas con exposición media (entre el 20 y el 50%), son principalmente áreas que transmiten el fuego (ver Tabla 2-4) y áreas de borde de vegetación.

2.5 Caracterización de amenazas de origen climático

2.5.1 Cambios en condiciones medias de temperaturas y precipitaciones

En agosto de 2021 se publicó el 6to Informe de Evaluación del Cambio Climático del Grupo de Trabajo I del IPCC (AR6). Las principales conclusiones de este informe dan cuenta que (IPCC, 2021):

- Es inequívoco que la influencia humana ha calentado la atmósfera, el océano y la tierra. Se han producido cambios rápidos y generalizados en la atmósfera, el océano, la criósfera y la biósfera.
- La escala de los cambios recientes en todo el sistema climático y el estado actual de muchos aspectos de este sistema no tienen precedentes durante muchos siglos o miles de años.
- La temperatura global de la superficie seguirá aumentando hasta al menos mediados de siglo en todos los escenarios de emisiones considerados. El calentamiento global de 1,5 °C y 2 °C se superará durante el siglo XXI a menos que se produzcan reducciones profundas en el dióxido de carbono (CO₂) y otras emisiones de gases de efecto invernadero en las próximas décadas.
- Muchos cambios en el sistema climático se agrandan en relación directa con el aumento del calentamiento global. Estos incluyen aumentos en la frecuencia e intensidad de los extremos cálidos, olas de calor marinas y fuertes precipitaciones, sequías agrícolas y ecológicas en algunas regiones y la proporción de ciclones tropicales intensos, así como reducciones en el hielo marino del Ártico, la capa de nieve y el permafrost.

En el contexto de este nuevo informe del IPCC surgen inquietudes sobre cuales escenarios son más plausibles que ocurran en Chile bajo las condiciones actuales de emisiones, en un contexto de actualización de los escenarios CMIP5 (provenientes del Quinto Informe de Evaluación del IPCC o AR5) a CMIP6 (sexto informe o AR6). Estos escenarios de AR5 han sido la base de trabajos como el Atlas de Riesgo Climático (Pica-Téllez et al., 2020) o los planes de adaptación para distintos sectores que actualmente están en operación o diseño en Chile. Cada uno de estos reportes mencionados ha venido aparejado con la publicación de

Modelos de Circulación General (GCM por sus siglas en inglés), los cuales son una representación del clima planetario en distintas escalas espaciotemporales en base a ecuaciones que resuelven el comportamiento de la atmósfera y el sistema oceánico bajo distintas condiciones o forzamientos. Estos modelos que se utilizan en distintos escenarios o experimentos se enmarcan en el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP por sus siglas en inglés), la cual es una iniciativa que, a través de grupos de investigación internacionales, analiza y valida los GCM's desarrollados por los distintos centros de investigación alrededor del mundo.

En este sentido, para la línea de transmisión expuesta de INTERCHILE, es que existe una amenaza vinculada a los cambios de condiciones medias en los regímenes de precipitación y temperatura hacia el futuro, que será evaluada en el área expuesta en todos los modelos seleccionados por macrozona para el escenario SSP5-8.5.

Cambios en precipitación

Existe variación entre macrozonas respecto de los cambios esperados en precipitación para el promedio de modelos comparando el periodo histórico (1985-2019) y los periodos futuros (2020-2040, 2040-2060, 2080-2100), con una variabilidad también entre modelos sobre todo en la macrozona Norte.

Tabla 2-5: Cambio a futuro en la precipitación anual (%) por macrozona y periodos futuros.

	Norte	CentroNorte1	CentroNorte2	Centro
2020-2040	53	-27	-20	-3
2040-2060	1	-7	-12	-13
2080-2100	-4	-12	-29	-29

Fuente: Elaboración propia.

Precisamente en esta macrozona los modelos bajo condiciones medias prevén aumentos de precipitación del orden del 50% en el futuro cercano, lo que es concordante con lo que los modelos a escala general proyectan para la zona. Sin embargo, no presentan la misma tendencia de resultados para los periodos más alejados, puesto que para finales de siglo hay tanto valores de disminución como de aumento de la precipitación.

En la macrozona centro, es clara la tendencia a la disminución de la precipitación hacia finales del siglo. Tanto en las macrozonas Centro Norte 1 y 2 es posible notar

una ligera tendencia a la disminución de las precipitaciones de magnitud constante para los diferentes periodos futuros.

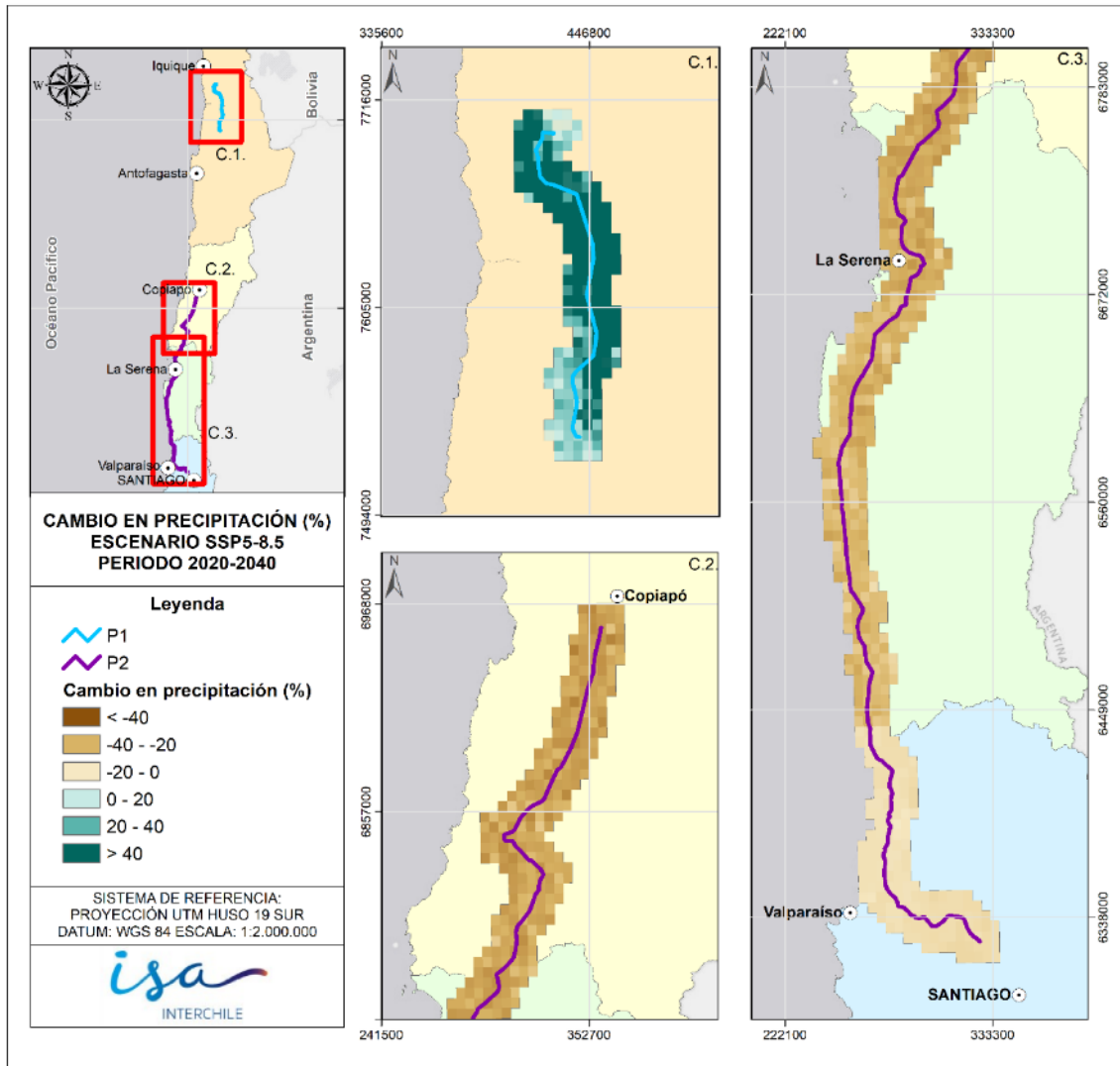


Figura 2-19: Cambio (%) en la precipitación media anual futura (2020-2040) respecto del periodo histórico en el área expuesta, como promedio de los modelos.

Fuente: Elaboración propia.

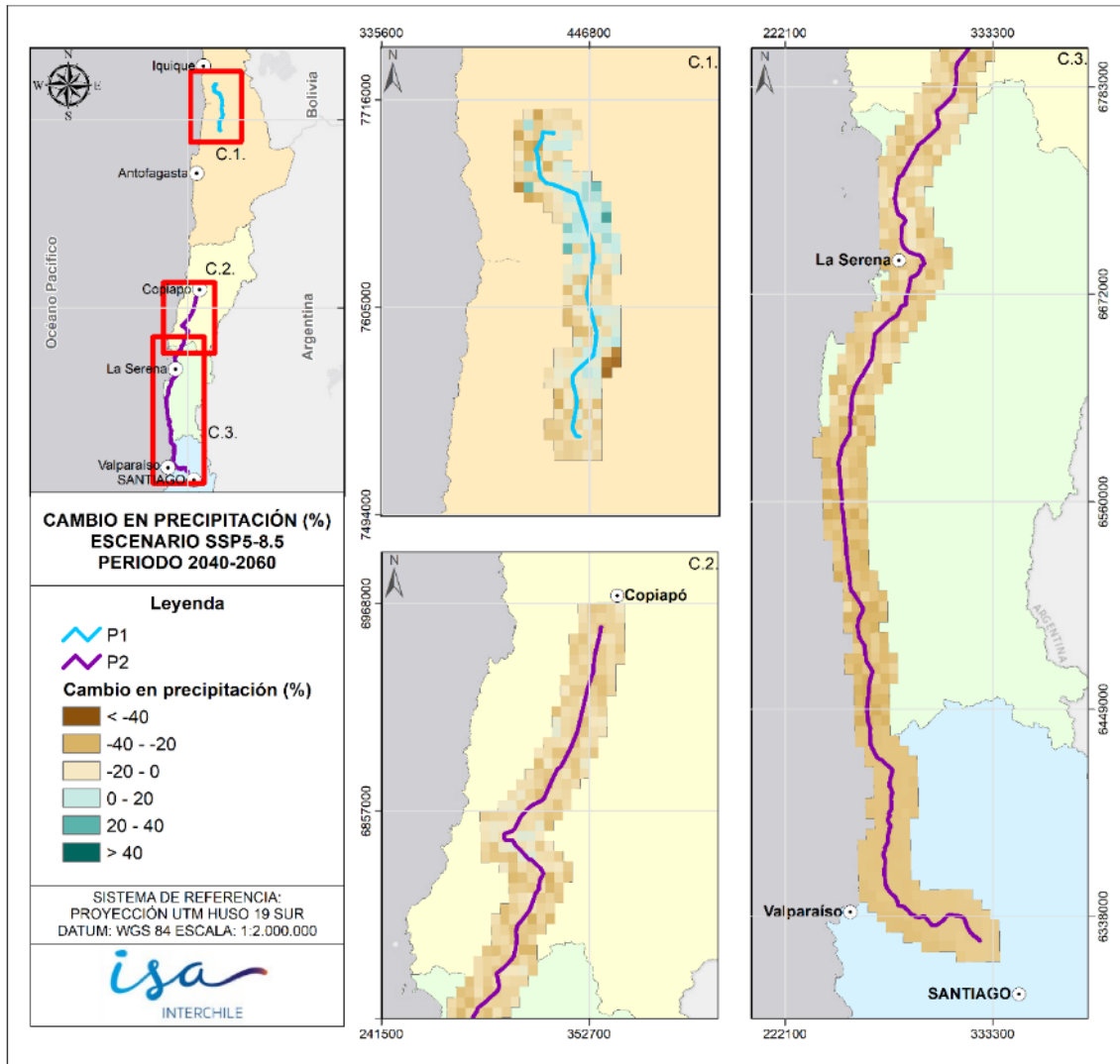


Figura 2-20: Cambio (%) en la precipitación media anual futura (2040-2060) respecto del periodo histórico en el área expuesta, como promedio de los modelos.
Fuente: Elaboración propia.

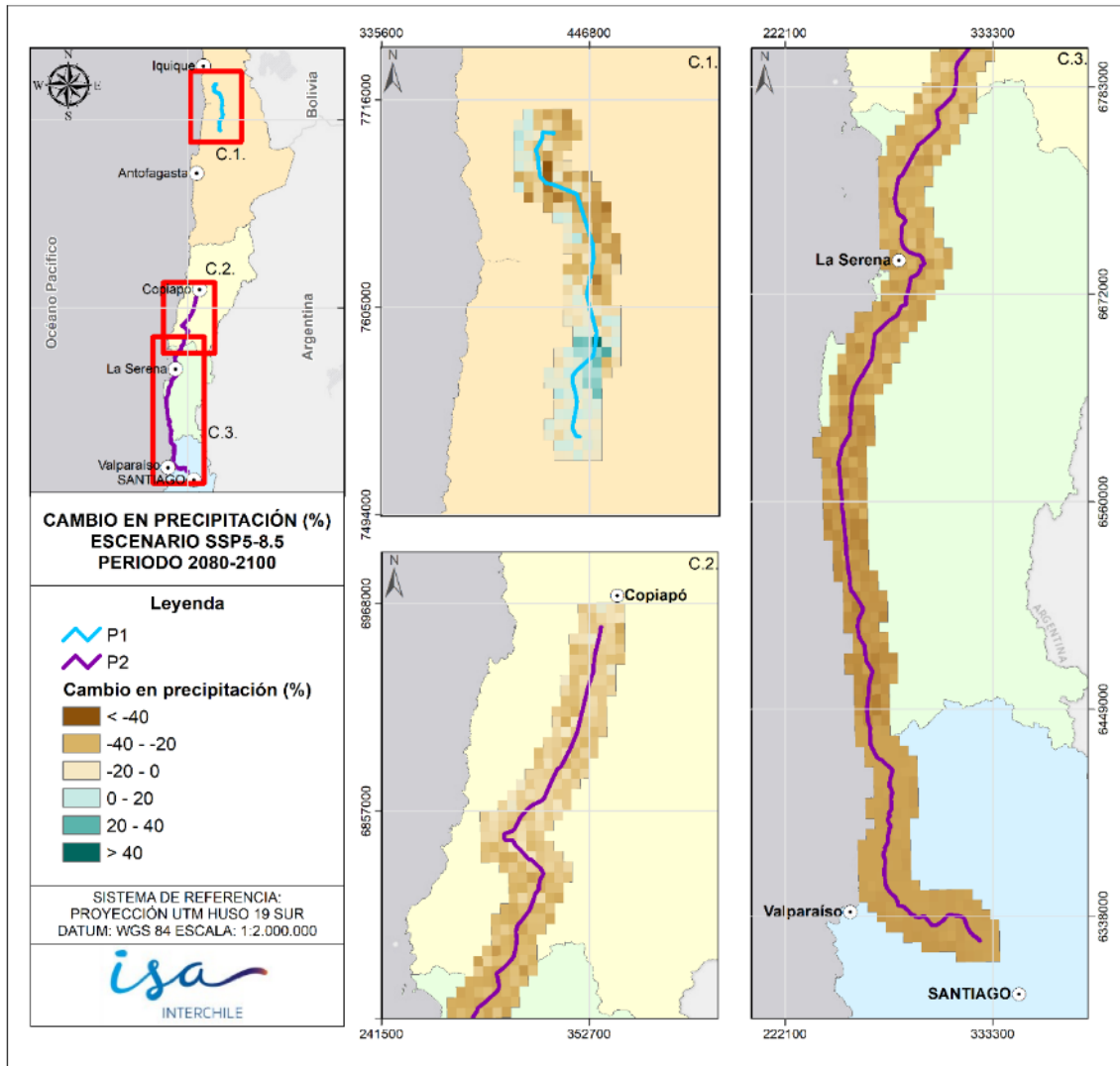


Figura 2-21: Cambio (%) en la precipitación media anual futura (2080-2100) respecto del periodo histórico en el área expuesta, como promedio de los modelos.
Fuente: Elaboración propia.

Cambios en temperatura máxima diaria

Los cambios esperados en la temperatura máxima diaria entre macrozonas para el promedio de los modelos, comparando el periodo histórico (1985-2019) y los periodos futuros son bastante homogéneos y consistentes al alza entre modelos, aunque presenta un mayor aumento en la macrozona Norte.

Tabla 2-6: Cambio a futuro en la temperatura máxima (°C) de las olas de calor por macrozona y periodos futuros.

	Norte	CentroNorte1	CentroNorte2	Centro
2020-2040	0,8	0,7	0,7	0,7
2040-2060	1,7	1,5	1,5	1,5
2080-2100	4,7	3,9	3,6	3,5

Fuente: Elaboración propia.

Precisamente en esta macrozona (Figura 2-22

Figura 2-22: Cambio (°C) en el promedio anual de la temperatura diaria máxima futura (2020-2040) respecto del periodo histórico en el área expuesta, promedio de los modelos.

Fuente: Elaboración propia.

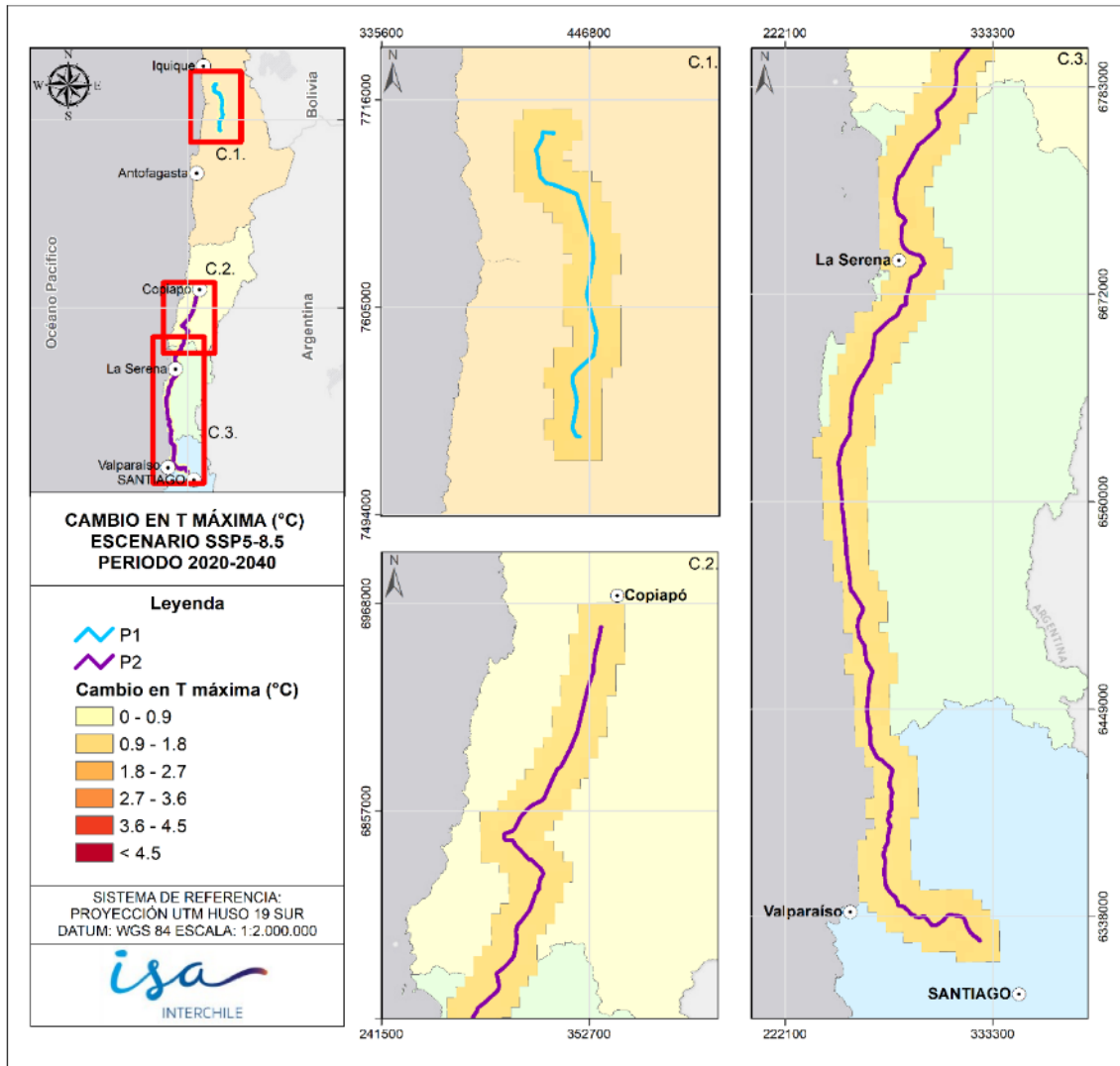


Figura 2-22: Cambio (°C) en el promedio anual de la temperatura diaria máxima futura (2020-2040) respecto del periodo histórico en el área expuesta, promedio de los modelos.

Fuente: Elaboración propia.

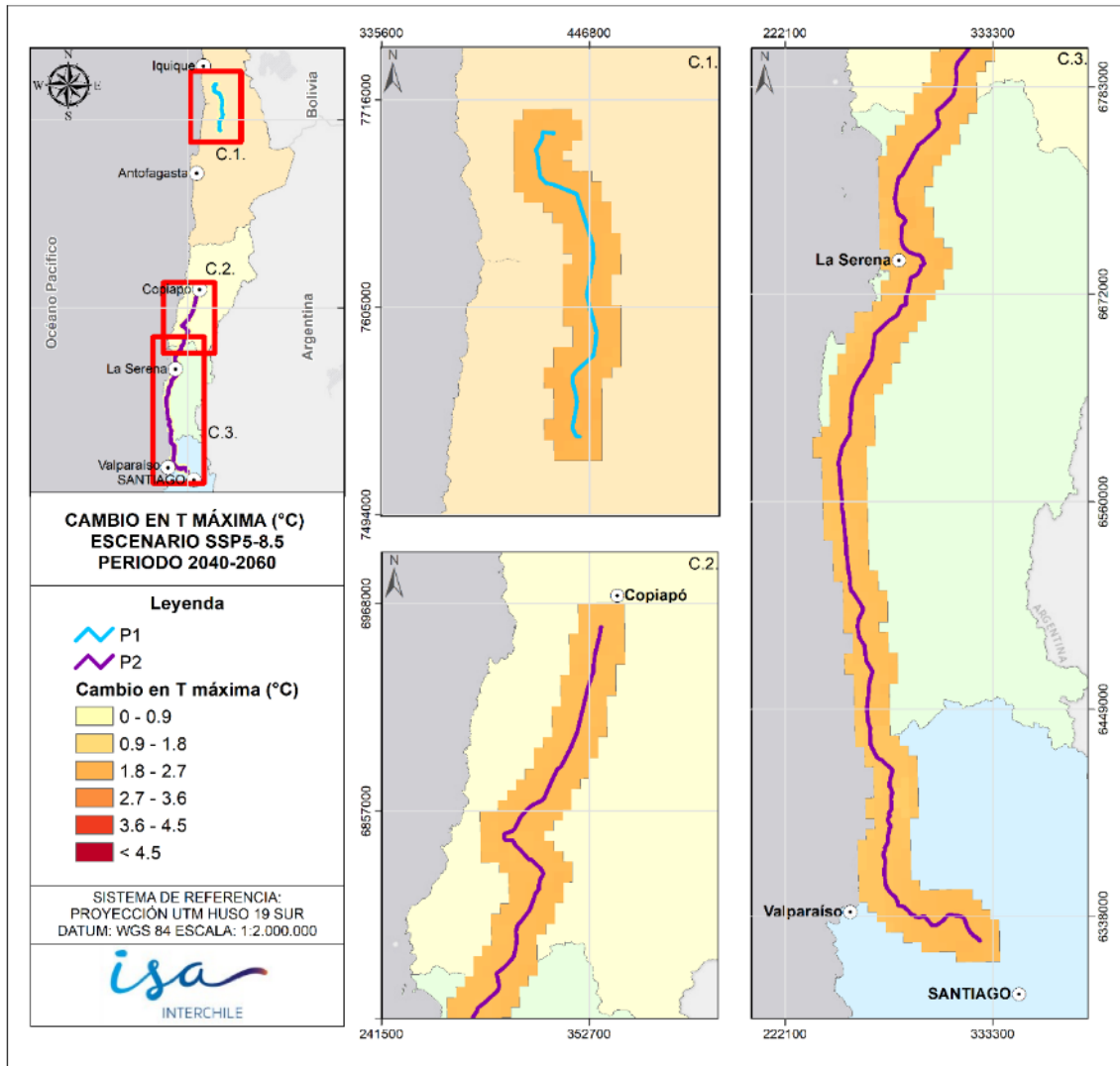


Figura 2-23: Cambio (°C) en el promedio anual de la temperatura diaria máxima futura (2040-2060) respecto del periodo histórico en el área expuesta, promedio de los modelos.

Fuente: Elaboración propia.

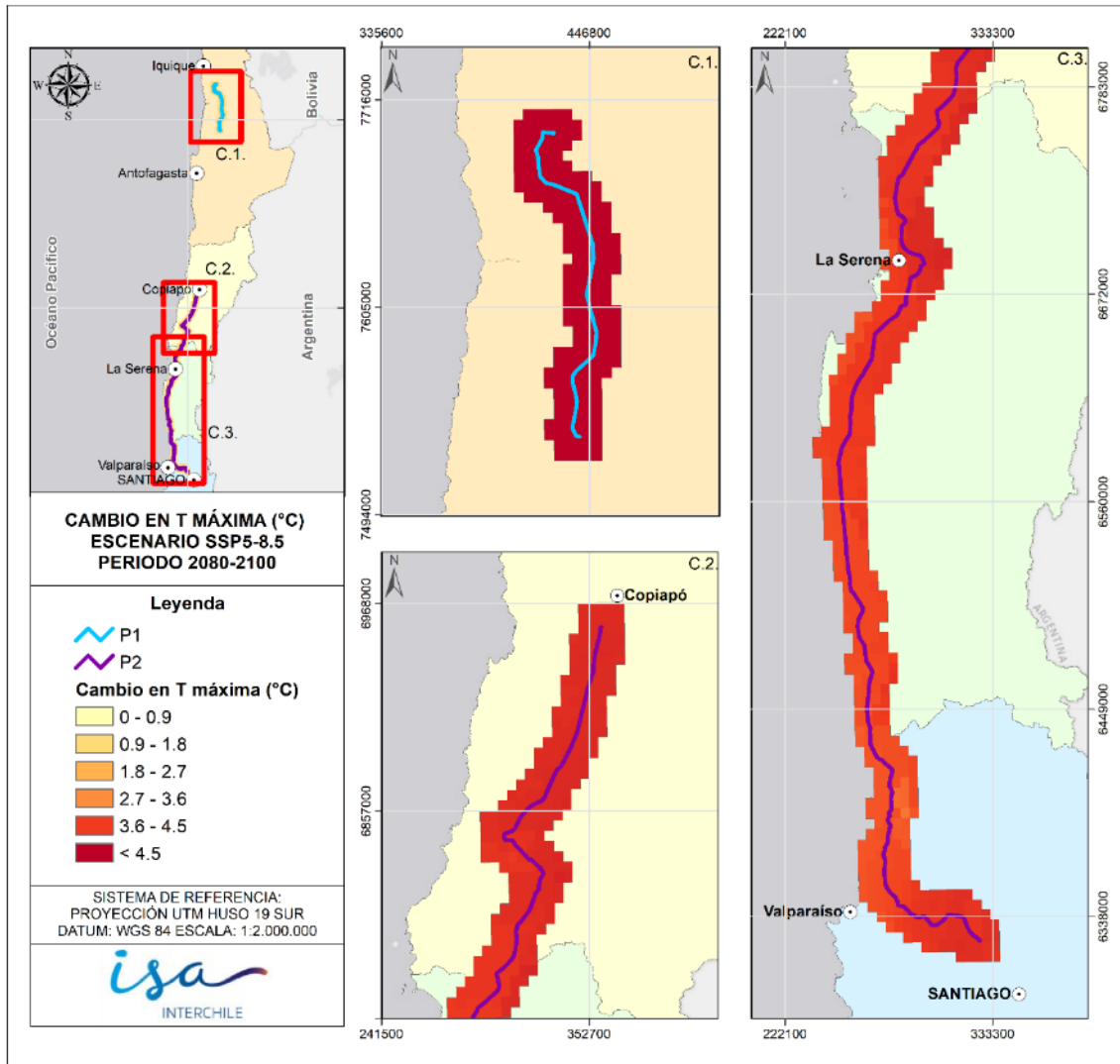


Figura 2-24: Cambio (°C) en el promedio anual de la temperatura diaria máxima futura (2080-2100) respecto del periodo histórico en el área expuesta, promedio de los modelos.

Fuente: Elaboración propia.

2.5.2 Cambios en temperaturas extremas

Como consecuencia de la emisión de GEI, se espera que el cambio climático repercuta en el aumento de la frecuencia de eventos de olas de calor ($T > 35^{\circ}\text{C}$) y una disminución de las olas de frío ($T < 0^{\circ}\text{C}$), lo que potencialmente puede afectar la operación de la Línea de Transmisión.

Bajo esta premisa, y para poder caracterizar aquellos eventos de olas de calor, se realizó en primera instancia un análisis de variables climáticas a partir de los escenarios climáticos seleccionados. En particular, se revisaron las estadísticas de las variables de temperatura máxima y temperatura mínima, y cómo estas pueden afectar la capacidad de transmisión potencial de la línea. Lo anterior, teniendo en consideración un umbral de temperatura límite superior de 35°C y un umbral inferior de 0°C. Superado este umbral superior, aumentan las posibilidades de que ocurra, por ejemplo, un arco eléctrico en la vegetación, en las estructuras o en el suelo. Además, se pueden favorecer las pérdidas de energía por sobrecalentamiento, aumentar su tensión por expansión y favorecer la deformación de aislantes, lo que a su vez puede llevar a cortocircuitos.

Respecto de temperaturas por debajo del nivel de congelación, puede disminuirse la eficiencia en la transmisión dada una reducción de la conductividad eléctrica del aire. Además, la acumulación de hielo y nieve puede aumentar el peso de las líneas, aumentando su probabilidad de deformación. Esto a su vez puede estar relacionado al aumento de tensiones mecánicas producto de contracciones significativas.

No obstante, como cada línea de transmisión tiene su propio límite térmico en función del tipo de conductor que posea y las condiciones meteorológicas del lugar, el emplazamiento de las torres debe tomar en cuenta los límites térmicos correspondientes, las condiciones topográficas y las temperaturas máximas y mínimas esperadas bajo un contexto de clima histórico y futuro. Bajo esta condición se espera que exista la mínima distancia entre la línea y el suelo definida según su tensión y de acuerdo con lo indicado en el Reglamento de Corrientes. Si se supera la temperatura máxima de diseño se debe reducir la capacidad de flujo para asegurar que la línea no se encuentre bajo esta distancia mínima.

Junto con lo anterior, se encuentran en análisis los cambios en la frecuencia de eventos que pueden disminuir la capacidad de transmisión. Dado que el aumento de temperatura provoca una disminución en la capacidad de conducción de energía en las líneas de transmisión, con base en las proyecciones de cambios de temperatura obtenidas, y para el área definida como expuesta, se realizó una estimación de los cambios en la capacidad de transmisión del sistema, en función del número esperado de días al año en que esto ocurre en el periodo histórico y en el futuro.

Los resultados de cambios en la frecuencia de ocurrencia de olas de calor se muestran entre la Figura 2-25 y la Figura 2-27, para los diferentes periodos futuros. Es posible notar que el mayor aumento en frecuencia se da en la macrozona norte, con aumento de casi 100 días con temperatura igual o superior a 35°C. También se puede notar que, para finales de siglo, hay un aumento en la frecuencia de olas de calor en el tramo de la línea de transmisión que llega a la ciudad de Santiago.

Tabla 2-7: Cambio a futuro en la intensidad (°C) de las olas de calor por macrozona y periodos futuros.

	Norte	CentroNorte1	CentroNorte2	Centro
2020-2040	1,0	0,9	1,0	1,1
2040-2060	1,9	1,9	2,2	2,1
2080-2100	5,0	4,3	4,4	4,4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2-8: Cambio a futuro en la frecuencia (días al año) de las olas de calor por macrozona y periodos futuros.

	Norte	CentroNorte1	CentroNorte2	Centro
2020-2040	3	0	0	0
2040-2060	11	0	0	1
2080-2100	96	1	0	6

Fuente: Elaboración propia.

Es posible notar que en la zona CentroNorte 1 y 2, a pesar de aumentar la temperatura, no presenta un cambio en la frecuencia de las olas de calor. Por el contrario, en la zona Norte, con similar aumento en grados de la temperatura, la frecuencia de las ocurrencias de las olas de calor a futuro será mucho mayor.

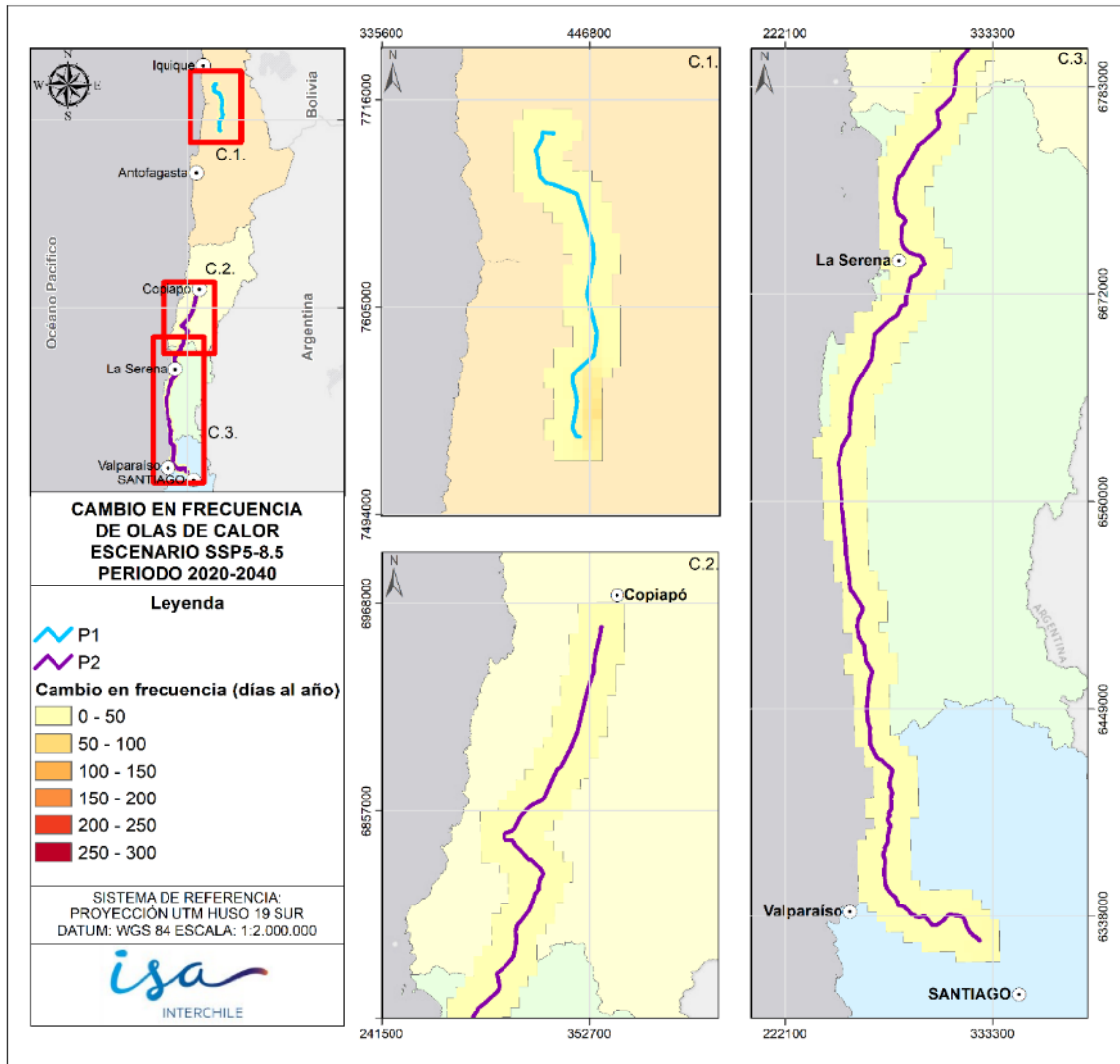


Figura 2-25: Cambio futuro (2020-2040) en la frecuencia de olas de calor respecto del periodo histórico en el área expuesta, promedio de los modelos.
Fuente: Elaboración propia.

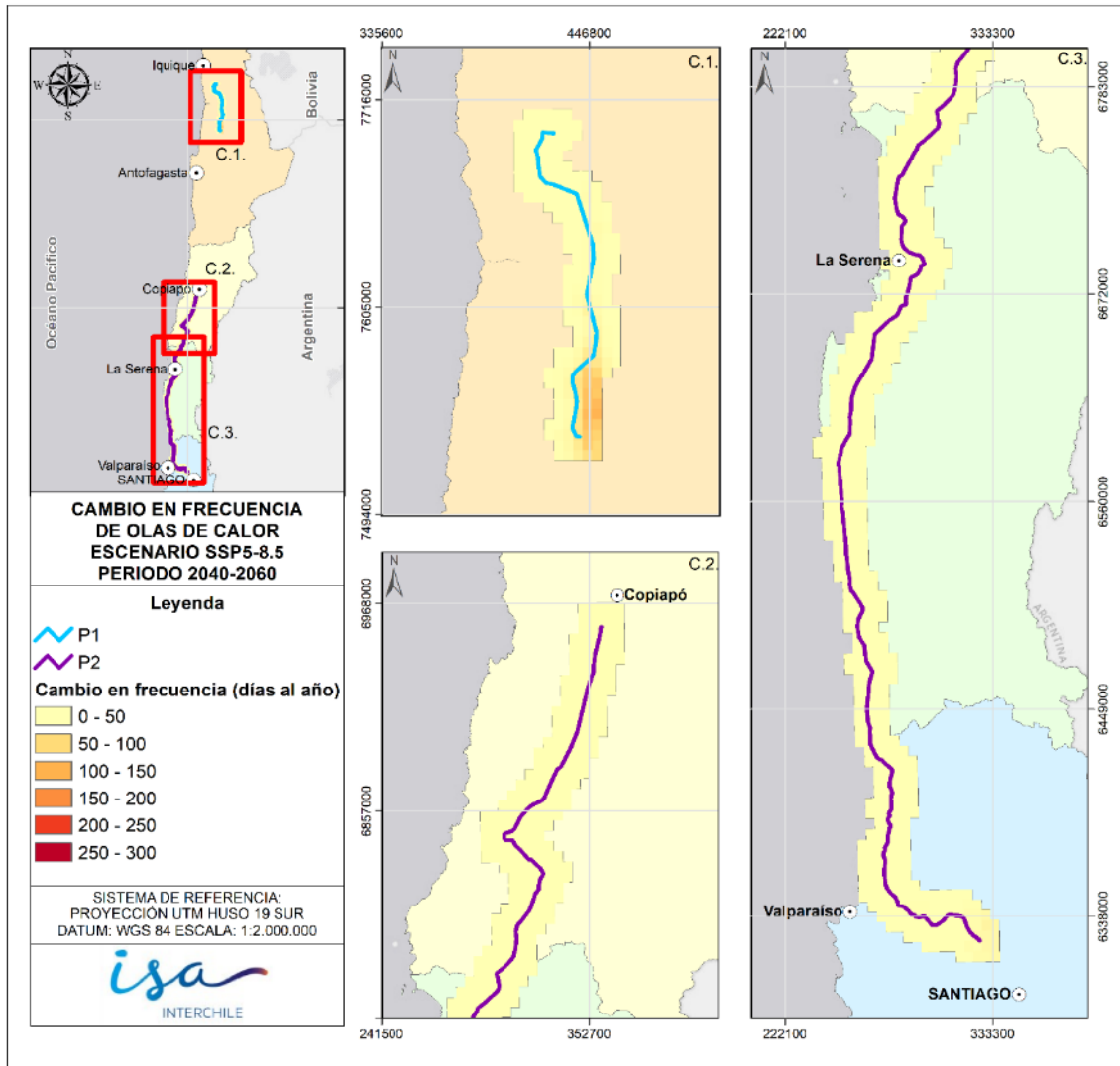


Figura 2-26: Cambio futuro (2040-2060) en la frecuencia de olas de calor respecto del periodo histórico en el área expuesta, promedio de los modelos.
 Fuente: Elaboración propia.

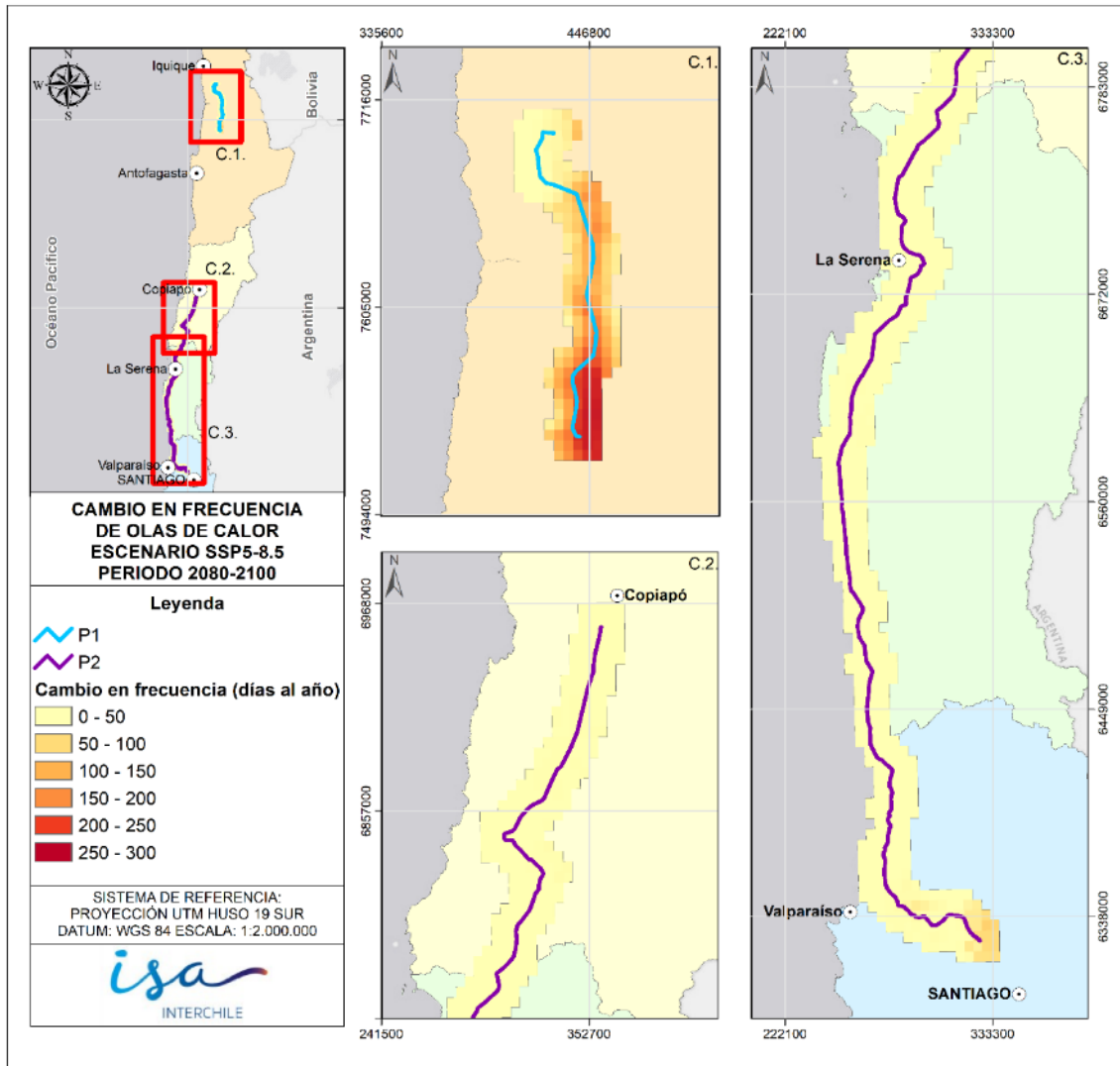


Figura 2-27: Cambio futuro (2080-2100) en la frecuencia de olas de calor respecto del periodo histórico en el área expuesta, promedio de los modelos.
Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, los resultados de cambio en frecuencia de olas de frío, es decir, días en que la temperatura mínima es igual o inferior a los 0°C, presenta una disminución general en todas las macrozonas, pero con mayor intensidad en la macrozona norte y en la región metropolitana. Esto corresponde con el aumento en la frecuencia de las olas de calor, lo que concuerda con los pronósticos generales de aumento consistente de la temperatura bajo el escenario SSP5-8.5.

En la Tabla 2-9 y Tabla 2-10 se muestran los valores promedios por macrozona y por periodo tanto en la intensidad (cuánto menos frías son las olas de frío en el futuro que en el pasado) en como en la frecuencia, en días por año.

Tabla 2-9: Cambio a futuro en la intensidad (°C) de las olas de frío por macrozona y periodos futuros.

	Norte	CentroNorte1	CentroNorte2	Centro
2020-2040	0,9	0,7	0,6	0,6
2040-2060	1,9	1,8	1,5	1,0
2080-2100	5,2	4,2	3,4	2,6

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2-10: Cambio a futuro en la frecuencia (días al año) de las olas de frío por macrozona y periodos futuros.

	Norte	CentroNorte1	CentroNorte2	Centro
2020-2040	-3	0	0	-3
2040-2060	-4	0	0	-4
2080-2100	-5	-1	0	-7

Fuente: Elaboración propia.

Es posible notar que en la zona CentroNorte 1 y 2, a pesar de aumentar la temperatura, no presenta un cambio en la frecuencia de las olas de frío. Por el contrario, en la zona Centro, con menor aumento en grados de la temperatura, la frecuencia de las ocurrencias de las olas de frío a futuro será mayor.

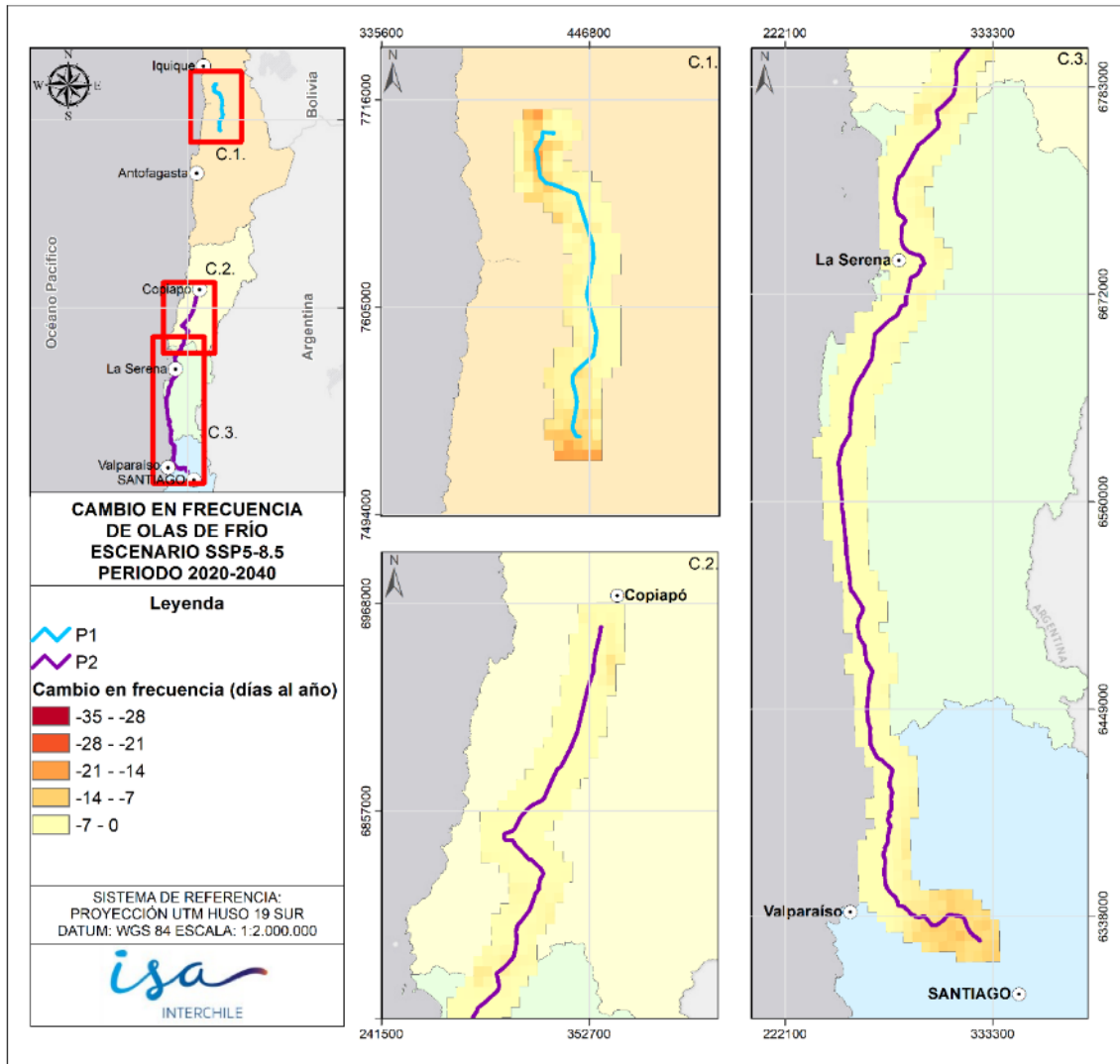


Figura 2-28: Cambio futuro (2020-2040) en la frecuencia de olas de frío respecto del periodo histórico en el área expuesta, promedio de los modelos.
Fuente: Elaboración propia.

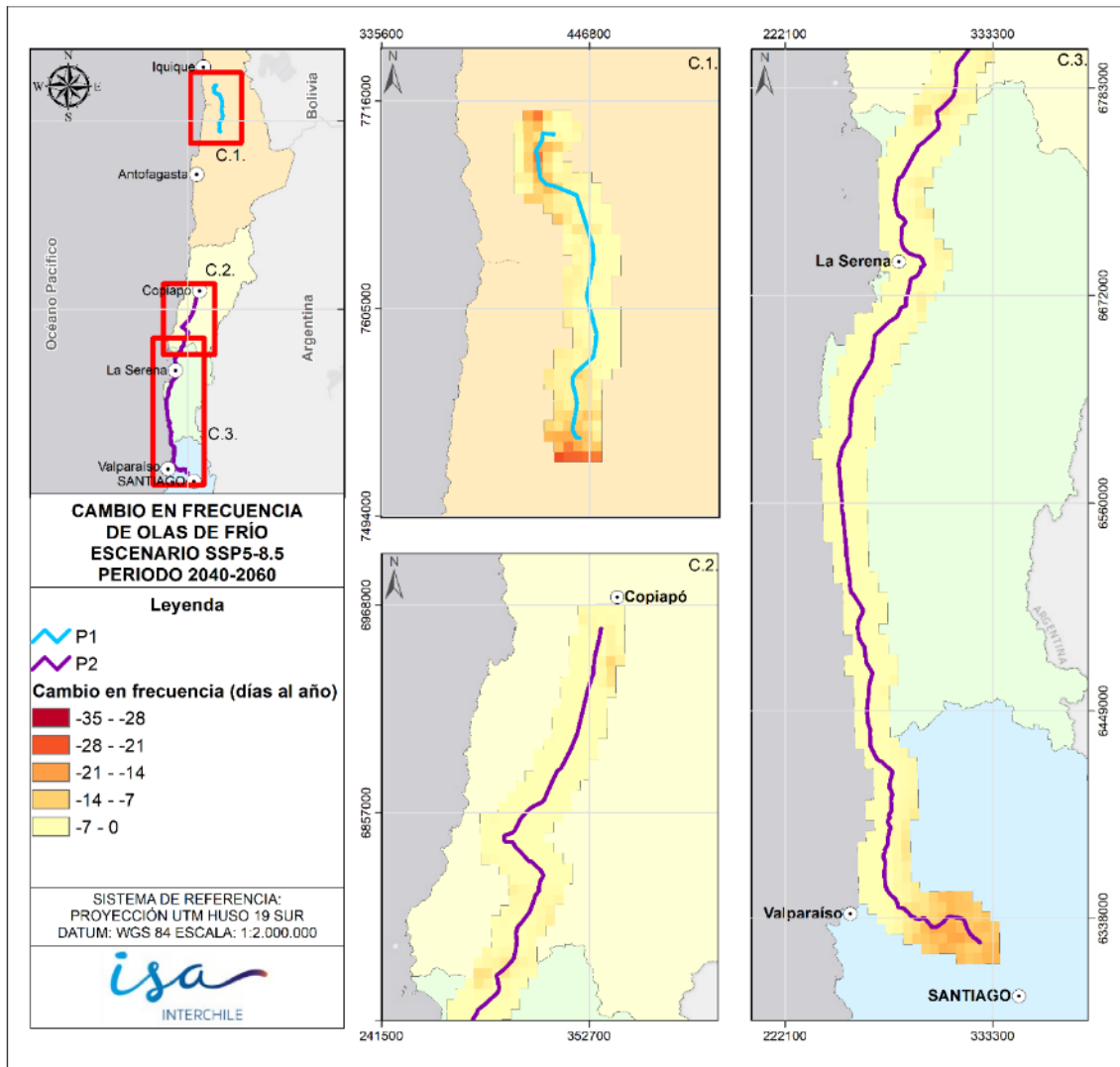


Figura 2-29: Cambio futuro (2040-2060) en la frecuencia de olas de frío respecto del periodo histórico en el área expuesta, promedio de los modelos.

Fuente: Elaboración propia.

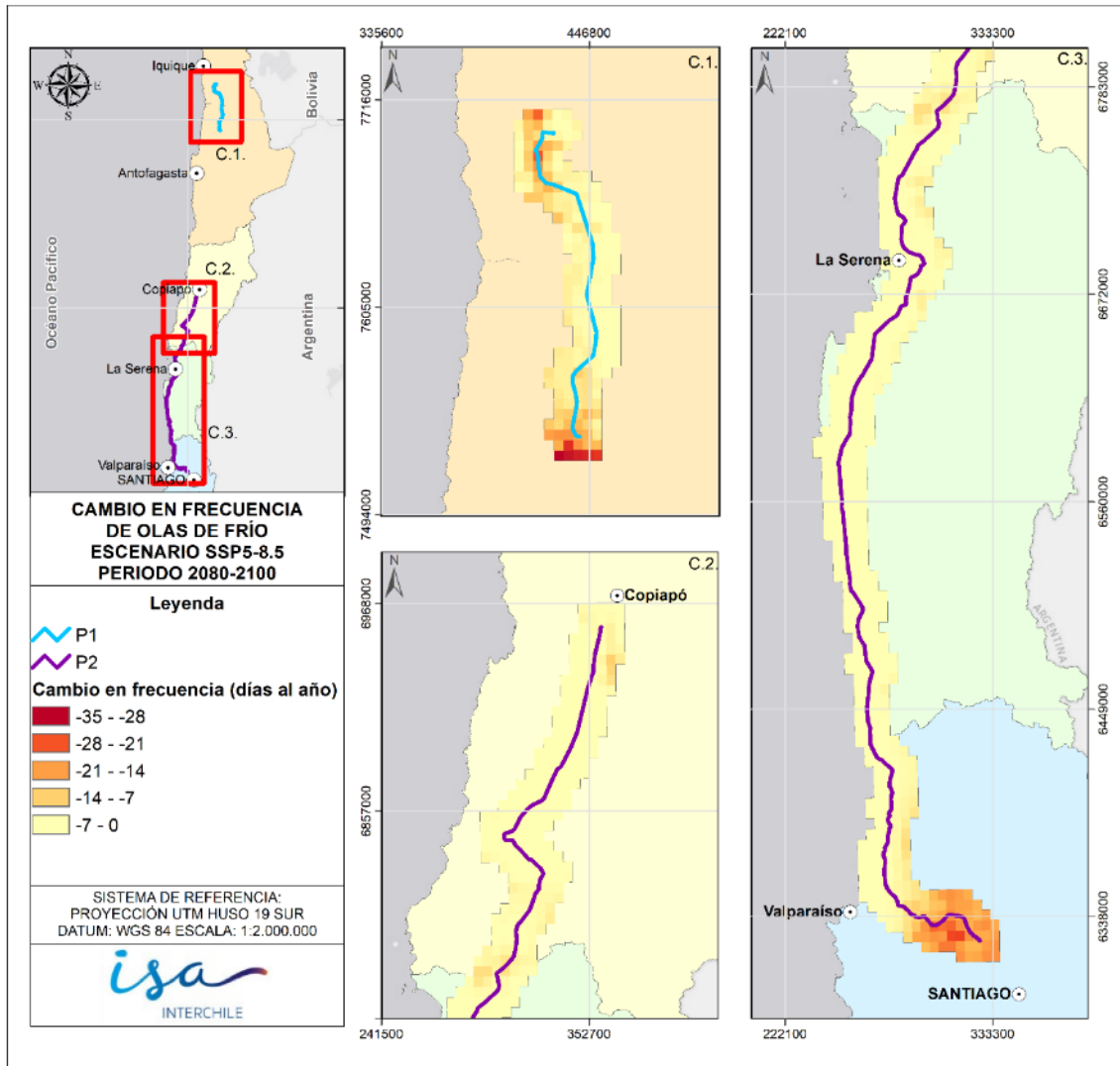


Figura 2-30: Cambio futuro (2080-2100) en la frecuencia de olas de frío respecto del periodo histórico en el área expuesta, promedio de los modelos.
Fuente: Elaboración propia.

2.5.3 Cambios en ocurrencia de aluviones

Para caracterizar el riesgo de la infraestructura expuesta a aluviones, se estima individualmente la ocurrencia de eventos en cada torre/subestación identificada por INTERCHILE. Para proyectar el número de ocurrencias futuras de aluviones se utilizan las proyecciones de precipitación y temperatura para los 4 GCM seleccionados por macrozona. Se determinó como factor gatillante la superación de un valor umbral de volumen de precipitación líquida de los eventos en

cuestión. Los umbrales respectivos se definieron a partir de eventos históricos usando datos de estaciones meteorológicas cercanas a cada torre. Para homologar el reporte de los resultados y hacerlos comparables, se estima la ocurrencia de eventos gatillantes de aluviones en un periodo de 20 años.

Teniendo en cuenta también que la metodología propuesta no pretende explicar en detalle las condiciones de flujo que se pueden desencadenar en cada evento, sino que dar una medida de su magnitud con base en sus respectivas temperaturas y precipitación líquida, el cambio en el riesgo de la infraestructura seleccionada se entiende como el aumento o disminución proyectado de la ocurrencia de eventos desencadenantes de aluviones.

Cabe señalar que para cada macrozona se presentan mapas con los cambios medios respecto del periodo de referencia histórico (1985-2019), hacia los periodos futuros 2020-2040 (cercano), 2040-2060 (intermedio) y 2080-2100 (lejano), considerando los escenarios de emisión SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5. En las tablas se presentan eventos aluvionales esperados a nivel individual de GCM y su promedio para el periodo histórico. De forma adicional, en estas se presentan aquellas ocurrencias estimadas con observaciones de las estaciones meteorológicas asignadas para cada infraestructura (torre o subestación).

En particular, es necesario mencionar que especialmente en la Macrozona Norte del país, los GCM tienen dificultades para representar lo que sucede a nivel general en el clima respecto de los eventos de precipitación. Por lo general, suelen reportar un número de precipitaciones mucho más elevado del que se observa durante el periodo histórico. Por ejemplo, si se revisa en detalle las precipitaciones de la estación Chiu-Chiu (representativa de las torres P2-L7-247, P2-L7-317, P2-L7-318, P2-L7-319), en el periodo histórico seleccionado (1985-2019), se identifican 80 tormentas mayores a 1 mm, mientras que los GCMs reportan todos más de 400 eventos para el mismo periodo tal y como presenta la Figura 2-31. A medida que se avanza hacia el sur este fenómeno se va atenuando y lo reportado por las estaciones se hace más similar a lo estimado por los GCMs. Para mantener consistencia en los análisis, se prioriza comparar lo reportado por los GCMs a nivel histórico (1985-2019) respecto de los distintos escenarios y periodos futuros. Lo más relevante a tener en cuenta es la diferencia absoluta en el número de eventos que podrían gatillar la ocurrencia de un aluvión.

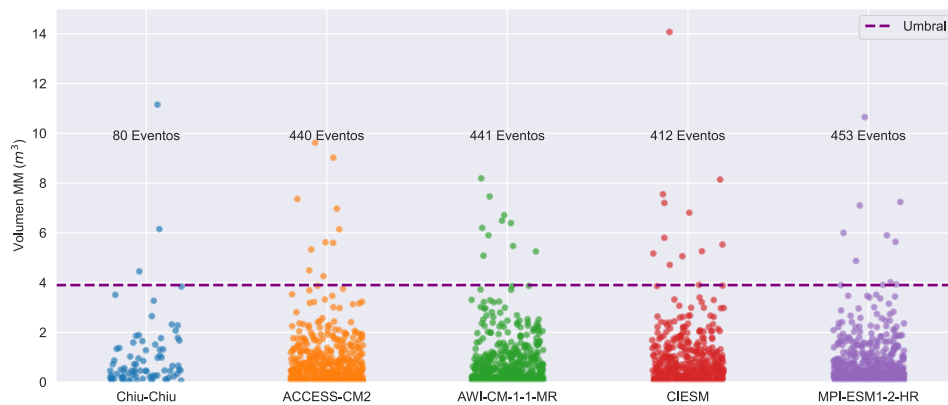


Figura 2-31: Cantidad de eventos de precipitación y su volumen de agua generado en Estación Chiu-Chiu según registros históricos y según los 4GCMs seleccionados para el periodo histórico (1985-2019) Macrozona Norte.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2-11 muestra las estimaciones en base a las observaciones de estaciones de referencia, de los 4 modelos climáticos y el promedio de estos modelos para la Macrozona Norte en el periodo histórico, respectivamente bajo el escenario SSP1-2.6. Luego, entre la Figura 2-32 y la Figura 2-34 presentan el cambio proyectado en la ocurrencia de aluviones para cada infraestructura en el espacio por periodo entre la ventana de tiempo histórica y la futura cercana, intermedia y lejana del promedio de los modelos para la Macrozona Norte. Finalmente, la Figura 2-35 presenta los cambios esperados en la ocurrencia de eventos aluvionales para un futuro cercano (2020-2040), intermedio (2040-2060) y lejano (2080-2100).

Se puede observar que tanto para el corto como mediano plazo se proyectan disminuciones (hasta 2 ocurrencias menos en mediano plazo), mientras que a finales de siglo se esperan aumentos de hasta 1 evento aluvional adicional para un periodo de 20 años. Por lo tanto, bajo este escenario y tomando en cuenta los 3 periodos, en promedio no se proyectan cambios significativos.

Tabla 2-11: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Norte SSP1-2.6.

Estructura_ID	Estación	ACCESS-CM2	AWI-CM-1-1-MR	CIESM	MPI-ESM1-2-HR	Promedio Modelos
P2-L7-320	1,71	10,40	5,71	6,29	4,00	6,60
P2-L7-319	2,78	9,30	9,95	10,31	8,13	9,42
P2-L7-318	2,78	9,30	9,95	10,31	8,13	9,42
P2-L7-317	2,78	9,30	9,95	10,31	8,13	9,42
P2-L7-316	1,71	10,40	5,71	6,29	4,00	6,60
P2-L7-315	1,71	10,40	5,71	6,29	4,00	6,60
P2-L7-311	1,71	10,40	5,71	6,29	4,00	6,60
P2-L7-310	1,71	10,40	5,71	6,29	4,00	6,60
P2-L7-253	1,71	10,40	5,71	6,29	4,00	6,60
P2-L7-247	2,78	9,30	9,95	10,31	8,13	9,42
Encuentro	2,13	2,25	2,38	2,30	0,85	1,94

Fuente: Elaboración propia.

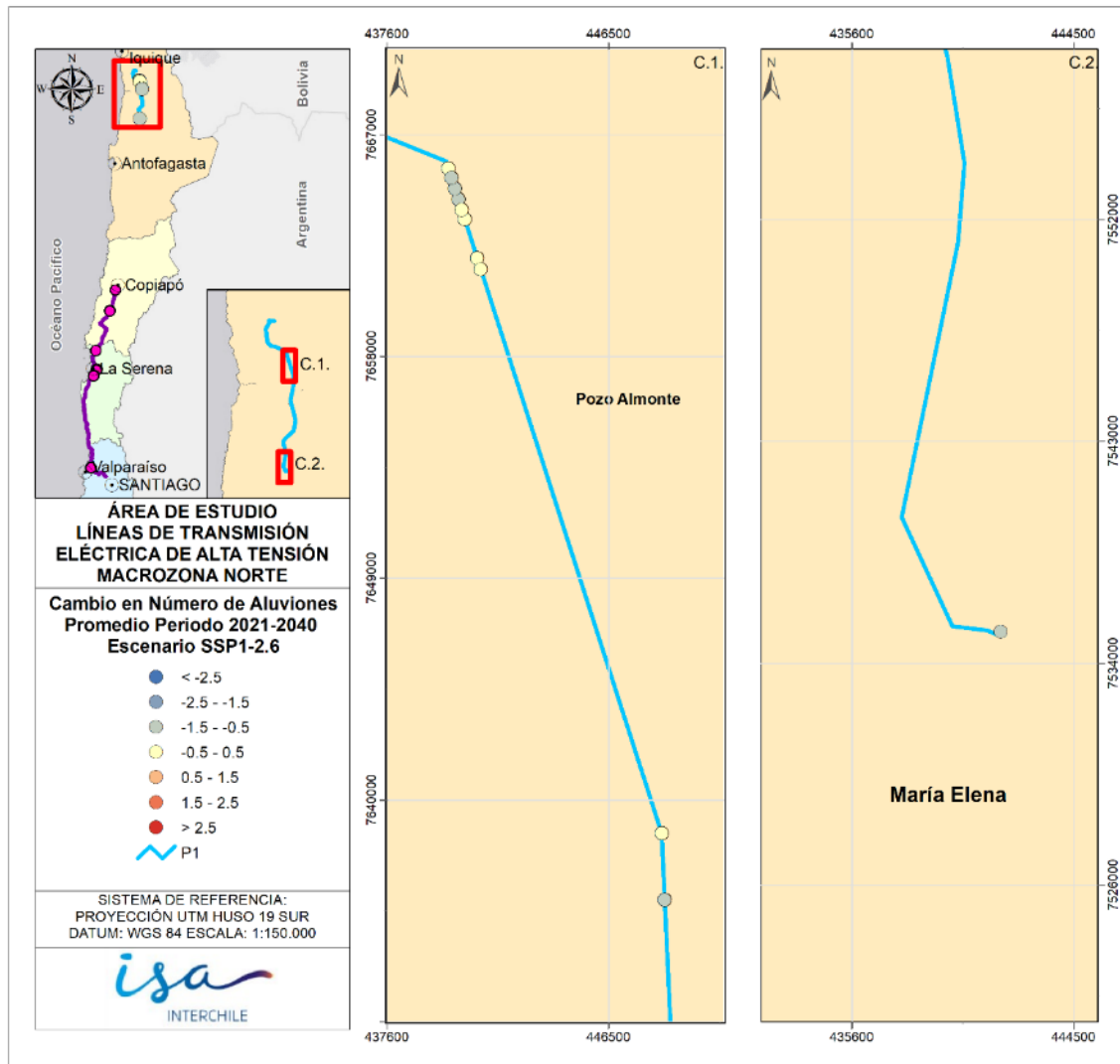


Figura 2-32: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP1-2.6.

Fuente: Elaboración propia.

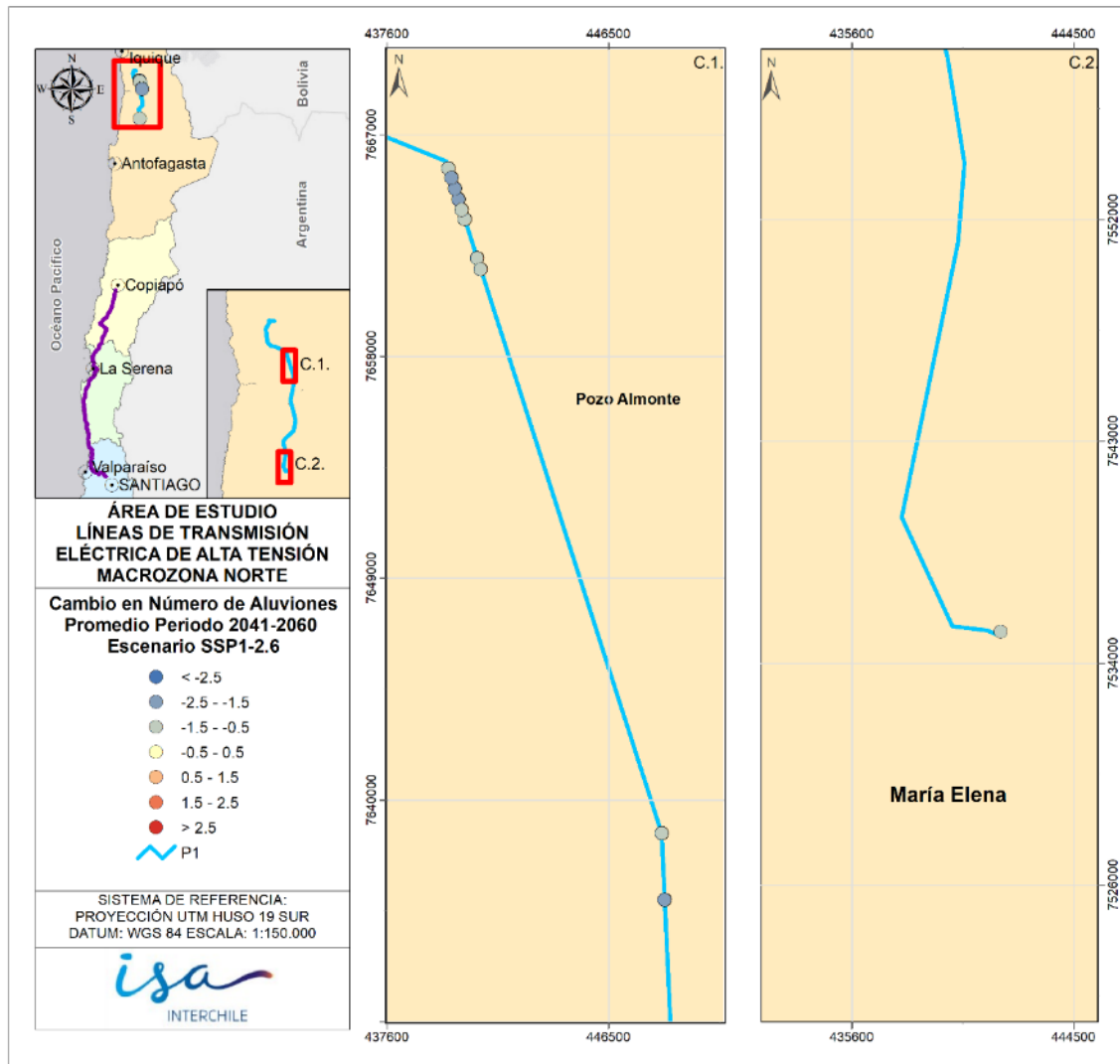


Figura 2-33: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP1-2.

Fuente: Elaboración propia.

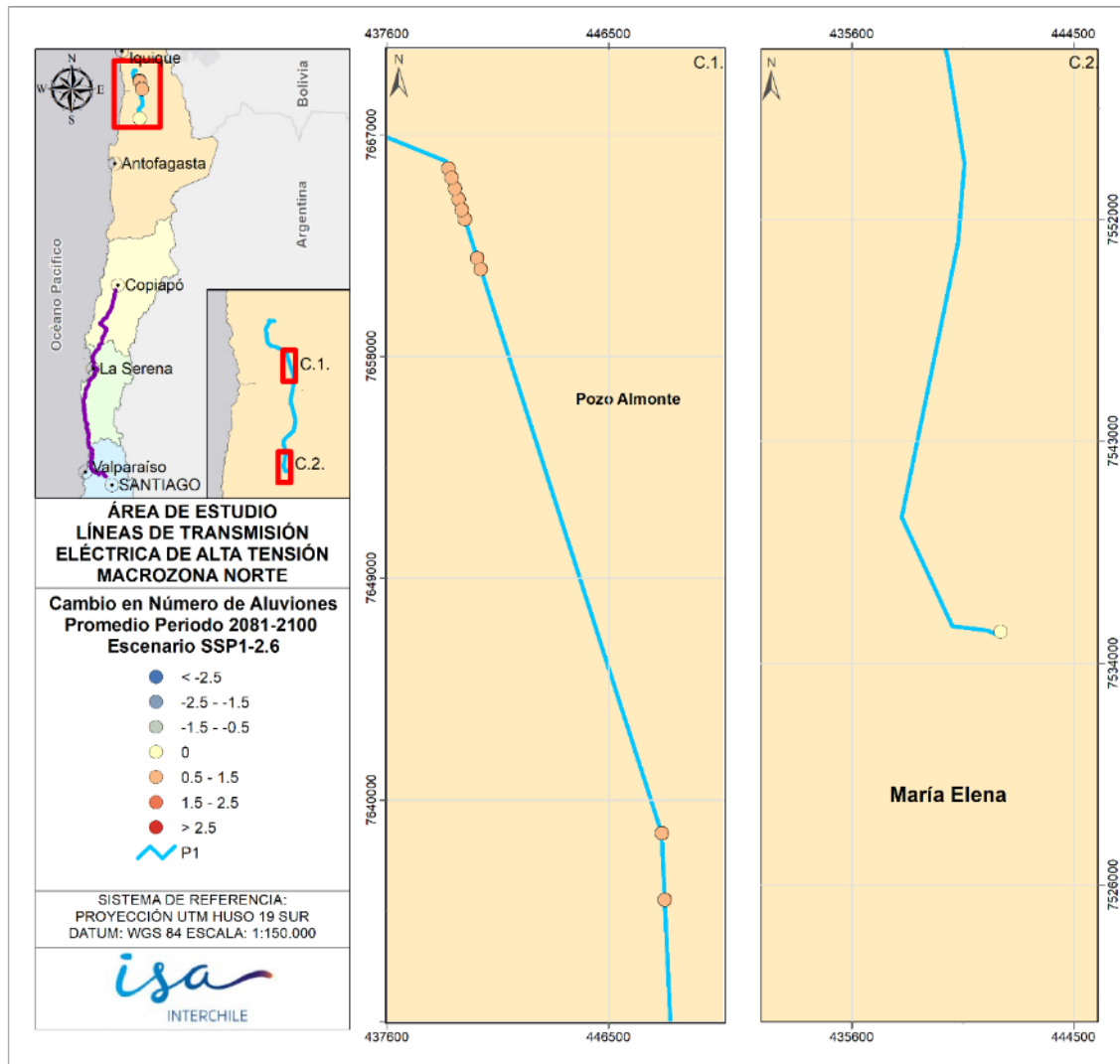


Figura 2-34: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP1-2.6.

Fuente: Elaboración propia.

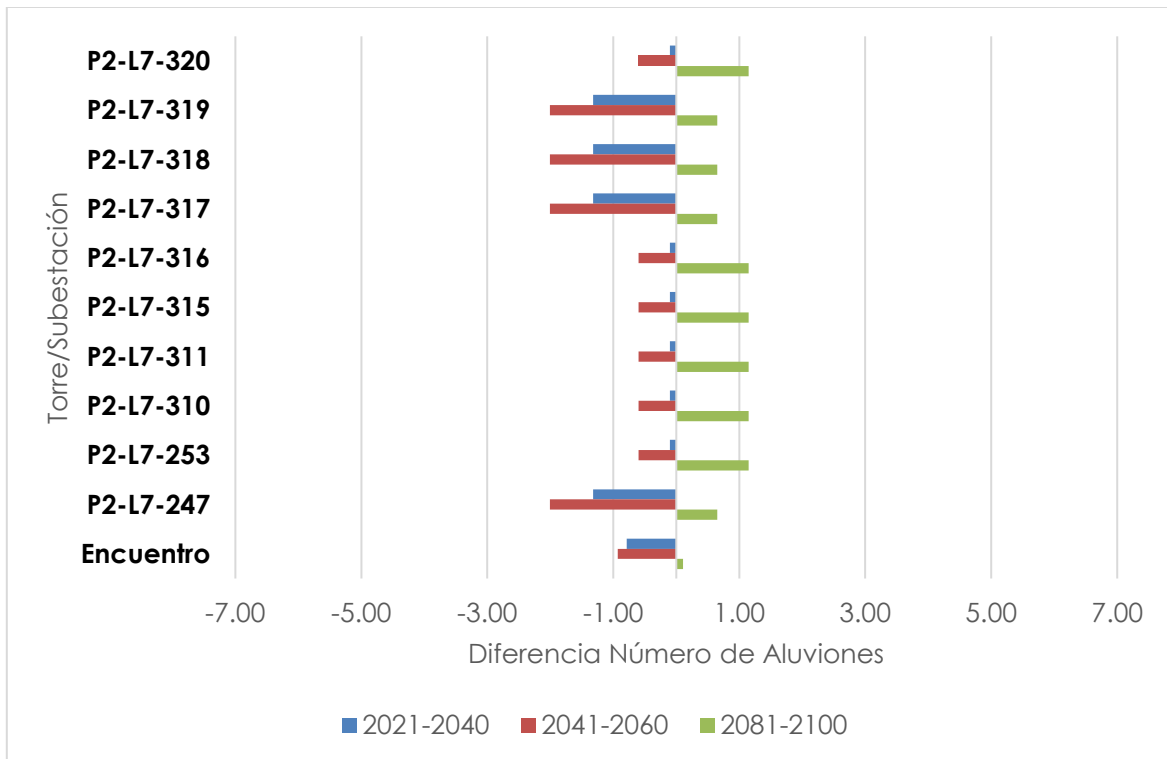


Figura 2-35: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP1-2.6.
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2-12 presenta las estimaciones en base a las observaciones de estaciones de referencia, de los 4 modelos climáticos y el promedio de estos modelos para la Macrozona Norte en el periodo histórico, respectivamente bajo el escenario SSP2-4.5. Luego, entre la Figura 2-36 y la Figura 2-38 se presenta el cambio proyectado en la ocurrencia de aluviones para cada infraestructura en el espacio por periodo entre la ventana de tiempo histórica y la futura cercana, intermedia y lejana del promedio de los modelos para la Macrozona Norte. Finalmente, la Figura 2-39 presenta los cambios esperados en la ocurrencia de eventos aluvionales para un futuro cercano (2020-2040), intermedio (2040-2060) y lejano (2080-2100).

A diferencia del escenario SSP1-2.6, existe una tendencia en todos los periodos a la disminución de la ocurrencia de eventos aluvionales. En algunas estructuras la disminución es relativamente homogénea y de aproximadamente un evento menos en un periodo de 20 años respecto de las ocurrencias históricas. En otras, la disminución aumenta llegando a ser cerca de 3 eventos menos esperados hacia finales de siglo. Cabe mencionar que, el hecho de que existan menos

eventos esperados no significa que no vayan a ocurrir a futuro, ni tampoco significa que sean menores las magnitudes de los eventos que puedan ocurrir en un tiempo futuro. La única excepción es la subestación Encuentro para el corto plazo, en que se proyecta un aumento menor, que es de hecho cercano a 0.

Tabla 2-12: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Norte SSP2-4.5.

Estructura_ID	Estación	ACCESS-CM2	AWI-CM-1-1-MR	CIESM	MPI-ESM1-2-HR	Promedio Modelos
P2-L7-320	1,71	5,71	10,48	6,86	6,86	7,48
P2-L7-319	2,78	10,15	9,52	7,63	9,95	9,31
P2-L7-318	2,78	10,15	9,52	7,63	9,95	9,31
P2-L7-317	2,78	10,15	9,52	7,63	9,95	9,31
P2-L7-316	1,71	5,71	10,48	6,86	6,86	7,48
P2-L7-315	1,71	5,71	10,48	6,86	6,86	7,48
P2-L7-311	1,71	5,71	10,48	6,86	6,86	7,48
P2-L7-310	1,71	5,71	10,48	6,86	6,86	7,48
P2-L7-253	1,71	5,71	10,48	6,86	6,86	7,48
P2-L7-247	2,78	10,15	9,52	7,63	9,95	9,31
Encuentro	2,13	2,02	1,04	1,78	1,84	1,67

Fuente: Elaboración propia.

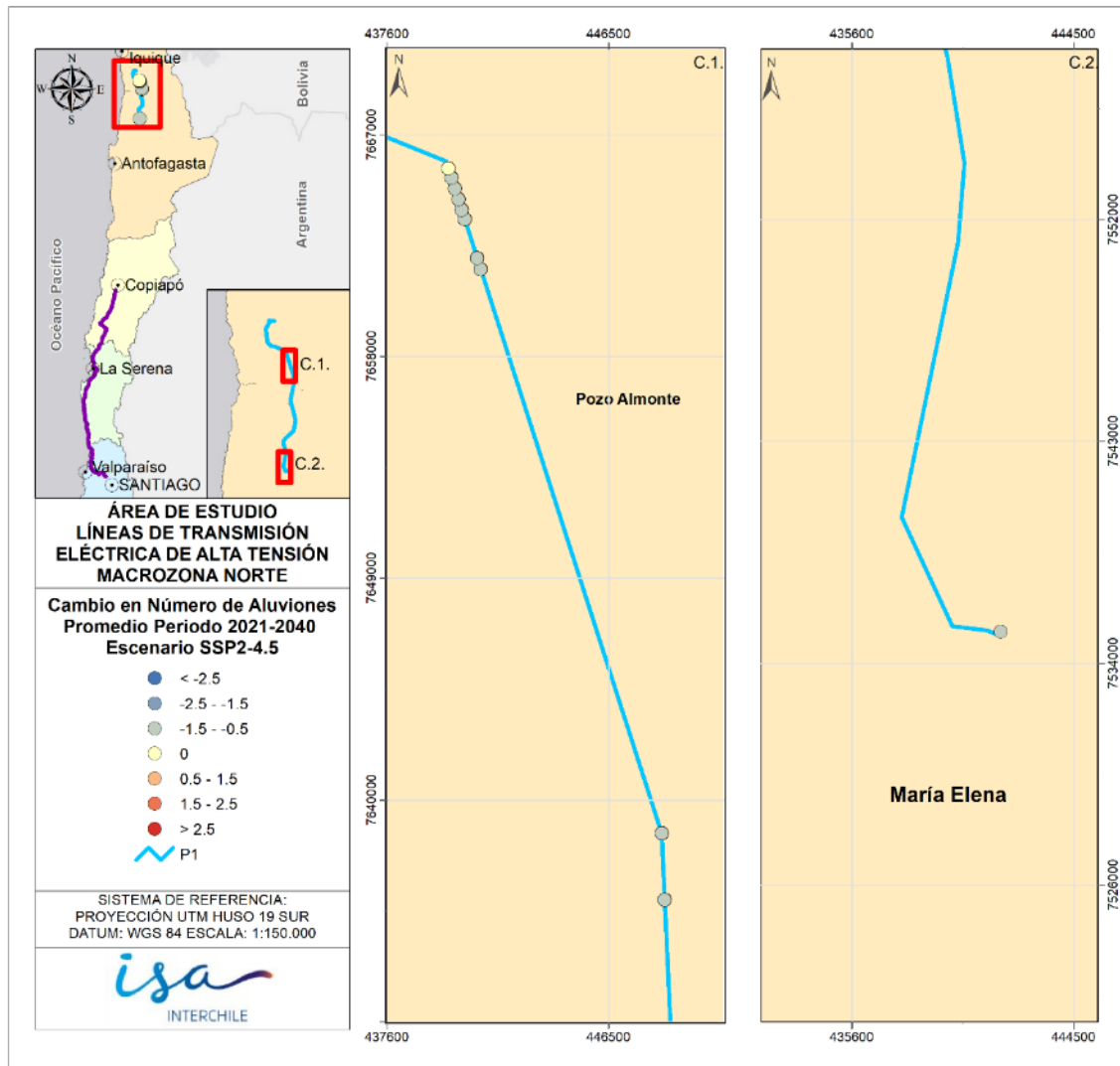


Figura 2-36: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP2-4.5.

Fuente: Elaboración propia.

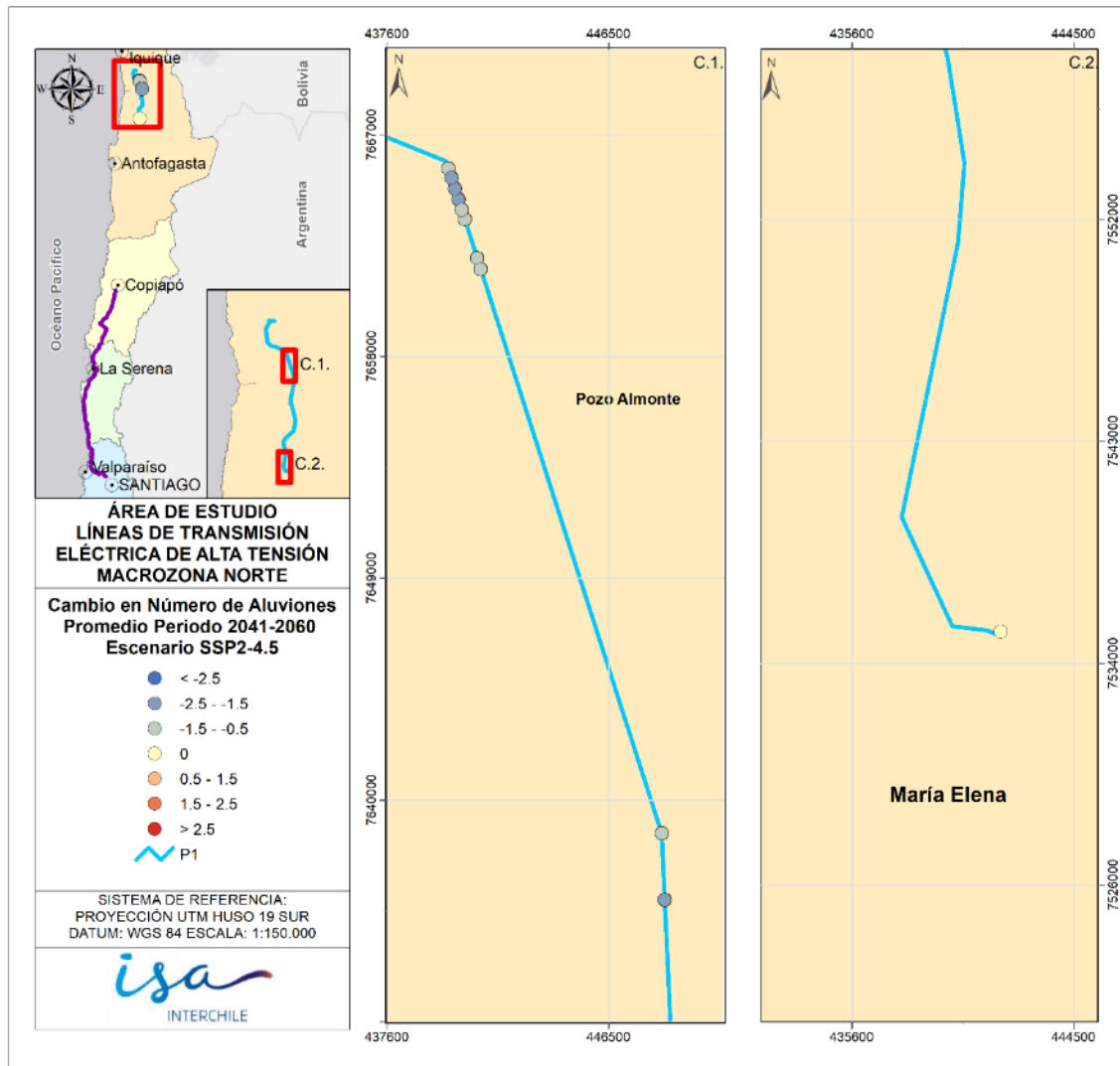


Figura 2-37: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP2-4.5.

Fuente: Elaboración propia.

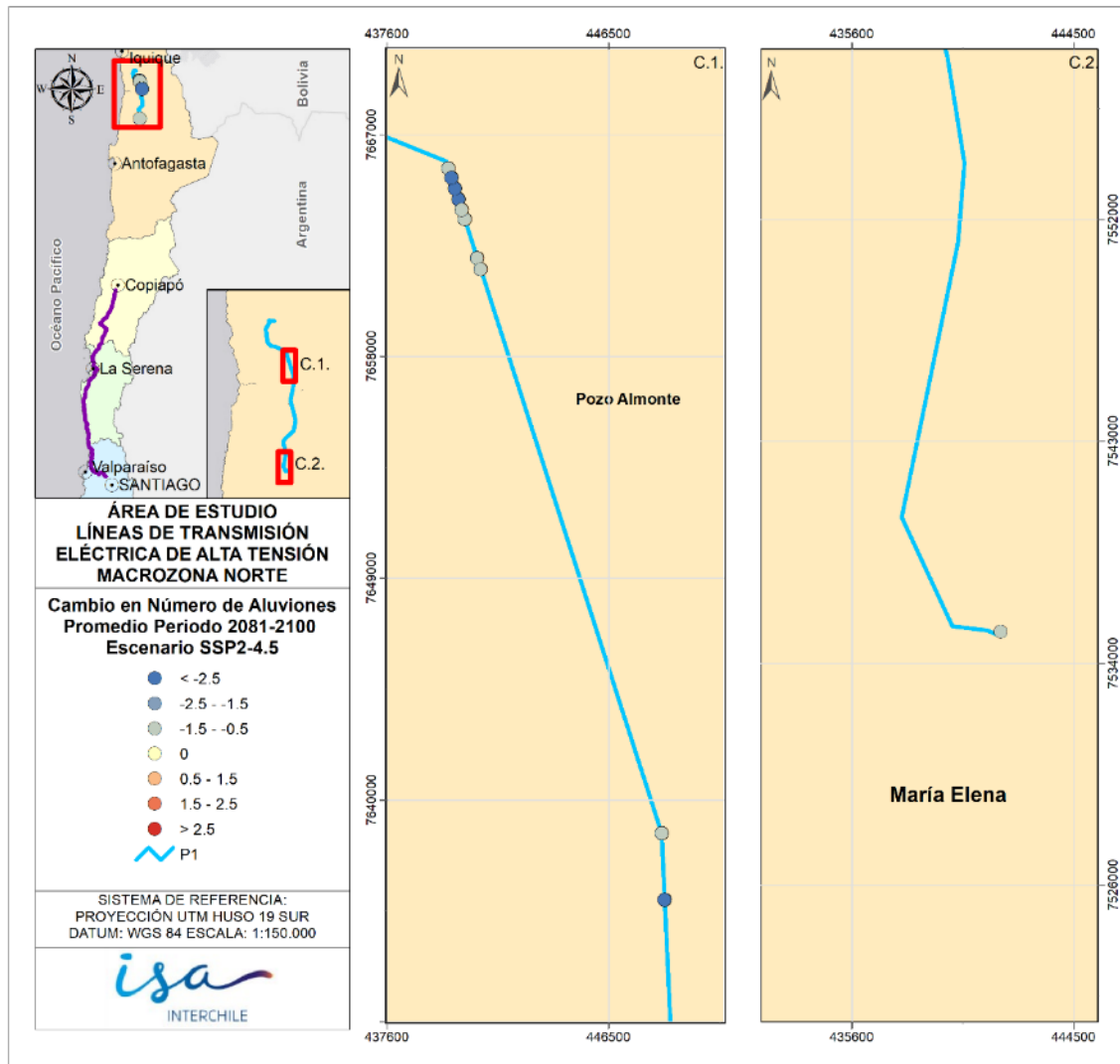


Figura 2-38: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP5-8.5.

Fuente: Elaboración propia.

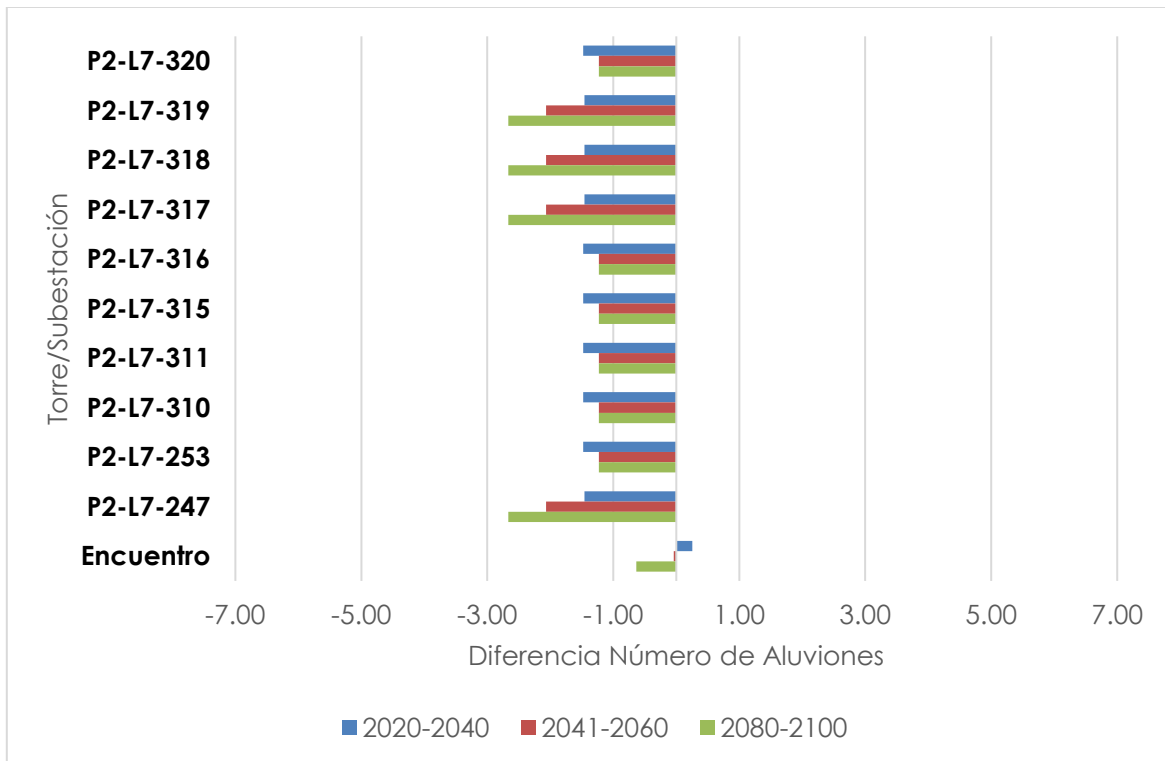


Figura 2-39: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP2-4.5.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2-13 presenta las estimaciones en base a las observaciones de estaciones de referencia, de los 4 modelos climáticos y el promedio de estos modelos para la Macrozona Norte en el periodo histórico, respectivamente bajo el escenario SSP5-8.5. Luego, entre la Figura 2-40 y la Figura 2-42 se presenta el cambio proyectado en la ocurrencia de aluviones para cada infraestructura en el espacio por periodo entre la ventana de tiempo histórica y la futura cercana, intermedia y lejana del promedio de los modelos para la Macrozona Norte. Finalmente, la Figura 2-43 presenta los cambios esperados en la ocurrencia de eventos aluvionales para un futuro cercano (2020-2040), intermedio (2040-2060) y lejano (2080-2100).

A diferencia de los otros 2 escenarios, en este caso se proyectan aumentos en el cambio de ocurrencia de aluviones para todos los periodos. Sorpresivamente, el cambio es más severo en un futuro cercano y se va haciendo más pequeño hacia finales de siglo. La magnitud de estos aumentos también es relevante, ya que proyectar un aumento de 7 eventos de las características de una remoción en masa y/o inundación para un periodo de 20 años puede ser particularmente

crítico desde el punto de vista de la acumulación de erosión en las fundaciones de las torres.

Tabla 2-13: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Norte SSP5-8.5.

Estructura_ID	Estación	ACCESS-CM2	AWI-CM-1-1-MR	CIESM	MPI-ESM1-2-HR	Promedio Modelos
P2-L7-320	1,71	6,29	7,43	5,14	4,57	5,86
P2-L7-319	2,78	8,70	8,55	7,49	7,72	8,11
P2-L7-318	2,78	8,70	8,55	7,49	7,72	8,11
P2-L7-317	2,78	8,70	8,55	7,49	7,72	8,11
P2-L7-316	1,71	6,29	7,43	5,14	4,57	5,86
P2-L7-315	1,71	6,29	7,43	5,14	4,57	5,86
P2-L7-311	1,71	6,29	7,43	5,14	4,57	5,86
P2-L7-310	1,71	6,29	7,43	5,14	4,57	5,86
P2-L7-253	1,71	6,29	7,43	5,14	4,57	5,86
P2-L7-247	2,78	8,70	8,55	7,49	7,72	8,11
Encuentro	2,13	1,36	2,66	1,52	2,88	2,10

Fuente: Elaboración propia.

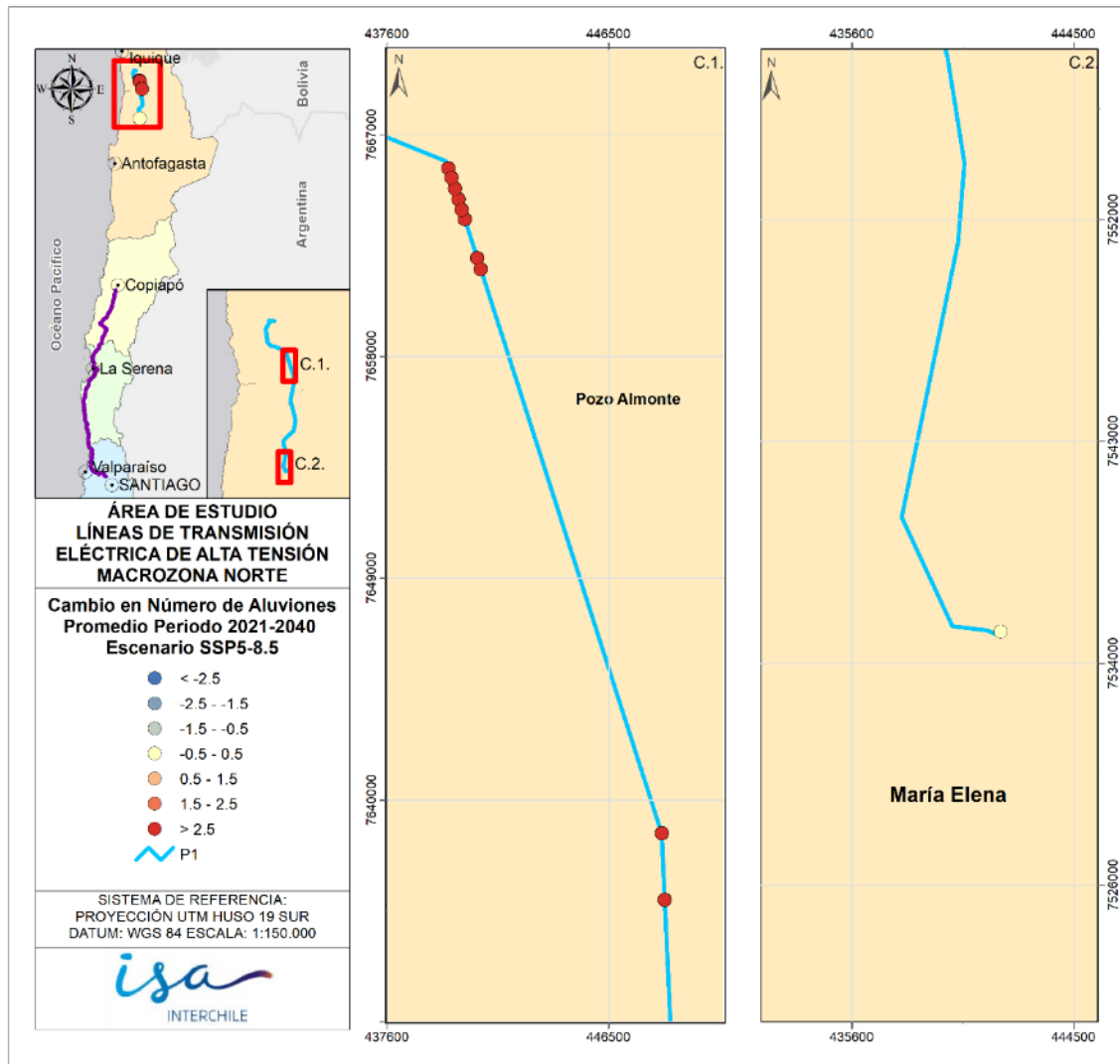


Figura 2-40: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP5-8.5.

Fuente: Elaboración propia.

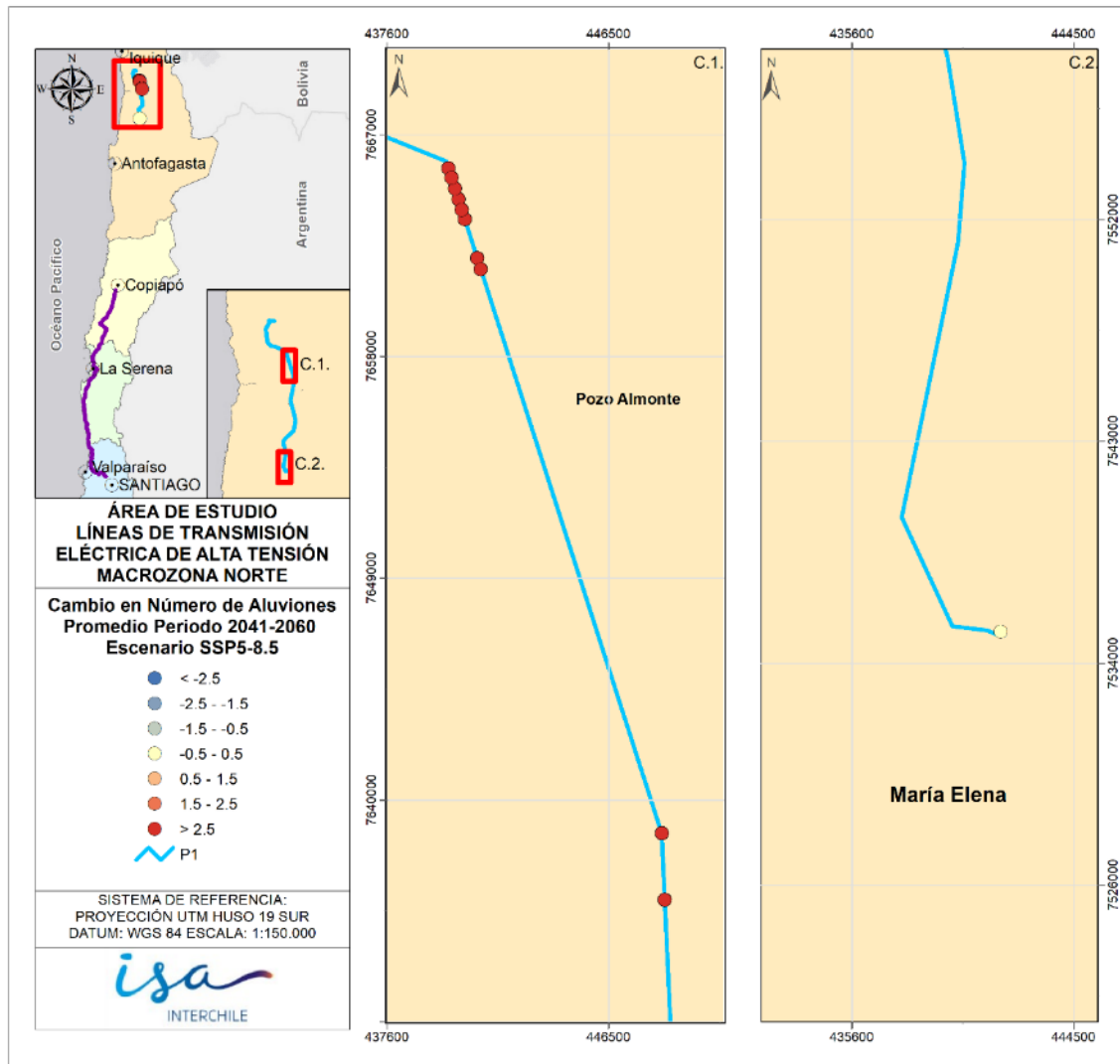


Figura 2-41: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP5-8.5.

Fuente: Elaboración propia.

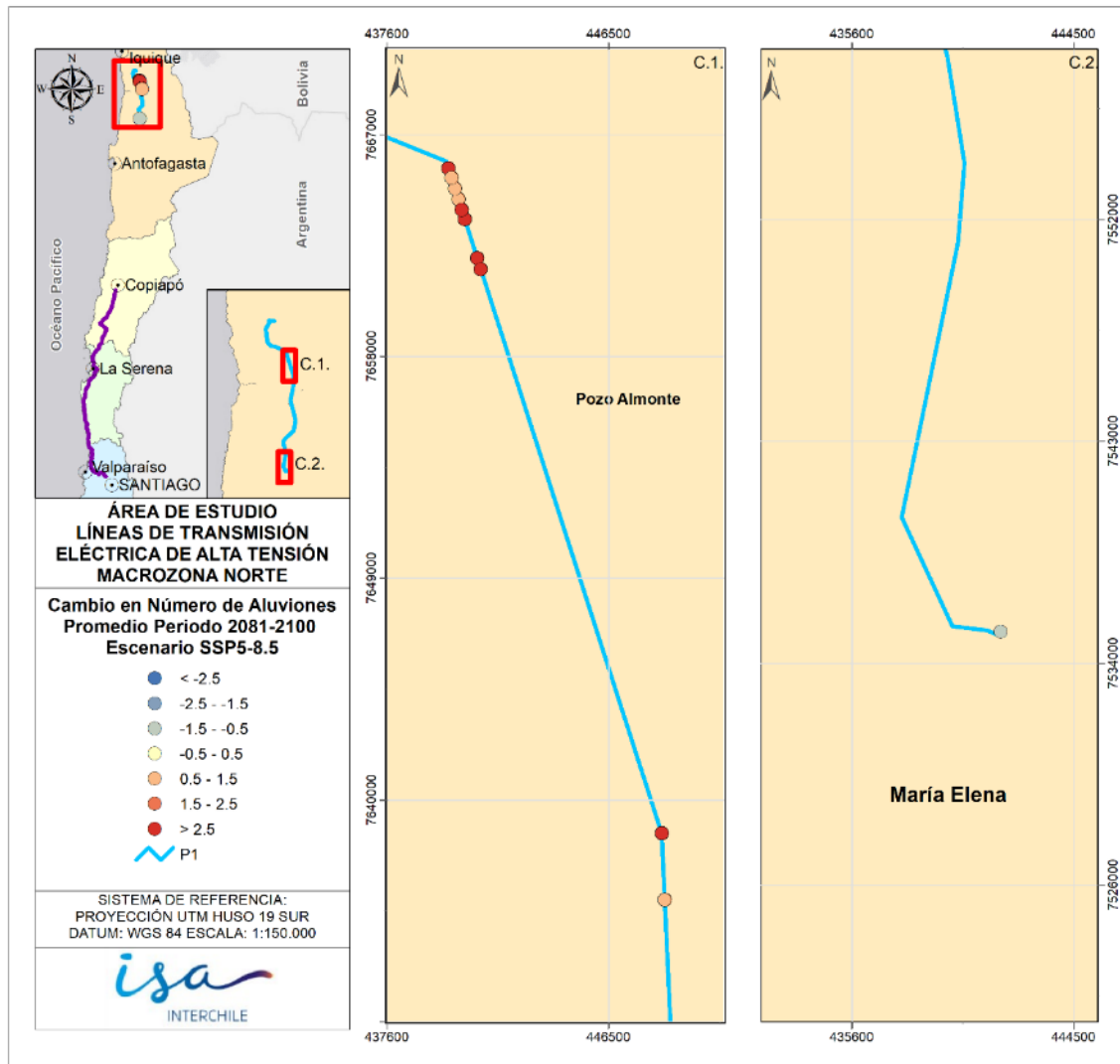


Figura 2-42: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP5-8.5.

Fuente: Elaboración propia.

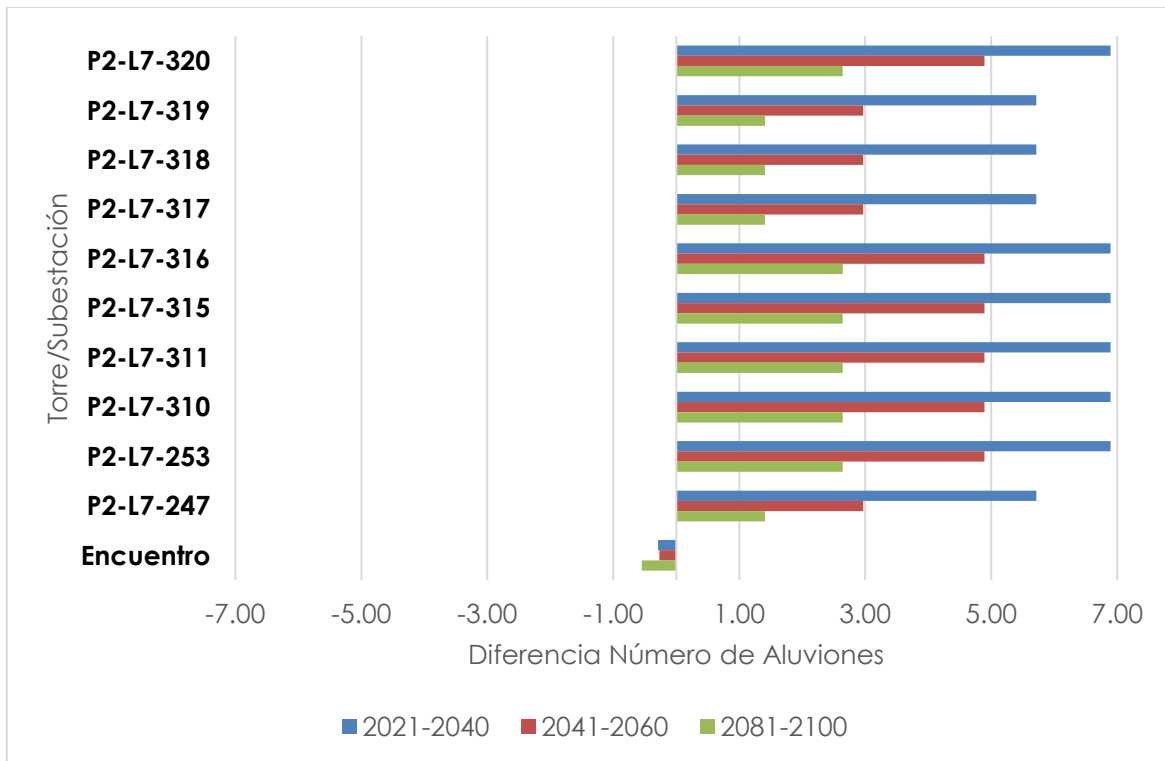


Figura 2-43: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Norte, Escenario SSP5-8.5.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2-14 muestra las estimaciones en base a las observaciones de estaciones de referencia, de los 4 modelos climáticos y el promedio de estos modelos para la Macrozona Centro Norte 1 en el periodo histórico, respectivamente bajo el escenario SSP1-2.6. Luego, entre la Figura 2-44 y la Figura 2-46 se presenta el cambio proyectado en la ocurrencia de aluviones para cada infraestructura distribuida en el espacio por periodo entre la ventana de tiempo histórica y la futura cercana, intermedia y lejana del promedio de los modelos para la Macrozona Centro Norte 1. Finalmente, la Figura 2-47 presenta los cambios promedio esperados en la ocurrencia de eventos aluvionales para un futuro cercano (2020-2040), intermedio (2040-2060) y lejano (2080-2100).

En primer lugar, para la subestación Nueva Cardones no se proyectan cambios significativos en un ningún periodo, esperando una situación similar a la de los últimos años. Por otro lado, en las torres cercanas al cauce del Río Elqui, no se identifica una tendencia en el tiempo, sino que cambios menores para todos los periodos, cercanos al aumento/disminución de 1 evento aluvional para un periodo de 20 años.

Tabla 2-14: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Centro Norte 1 SSP1-2.6.

Estructura_ID	Estación	BCC- CSM2-MR	CIESM	MPI- ESM1-2- LR	NESM3	Promedio Modelos
Nueva Cardones	2,29	0,57	1,14	1,14	0,57	0,86
P1-L2-152	4,26	3,77	1,37	2,56	3,98	2,92
P1-L2-153	4,26	3,77	1,37	2,56	3,98	2,92
P1-L2-154	4,26	3,77	1,37	2,56	3,98	2,92
P1-L2-155	4,26	3,77	1,37	2,56	3,98	2,92
P1-L2-156	4,26	3,77	1,37	2,56	3,98	2,92

Fuente: Elaboración propia.

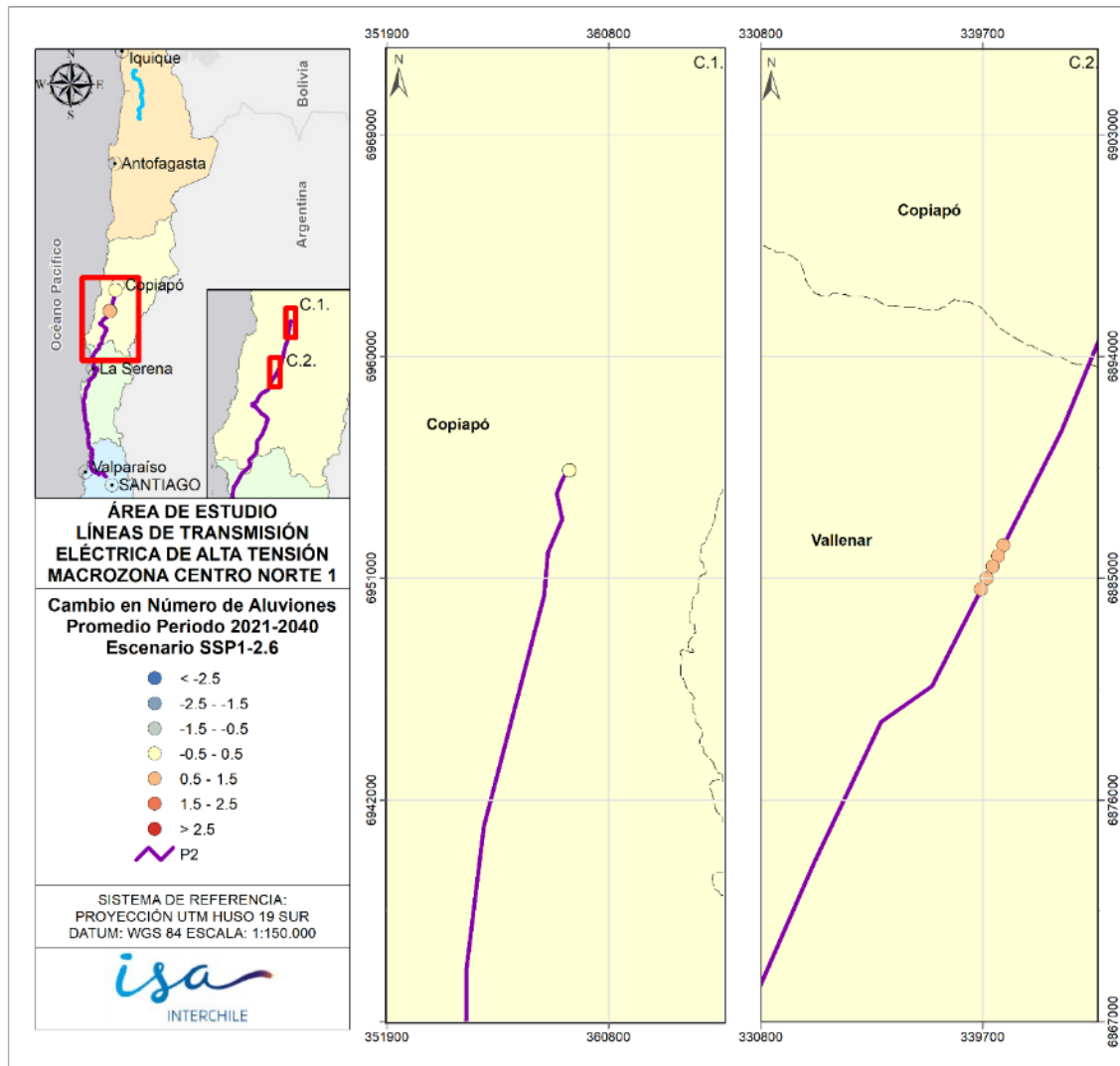


Figura 2-44: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP1-2.6.
Fuente: Elaboración propia.

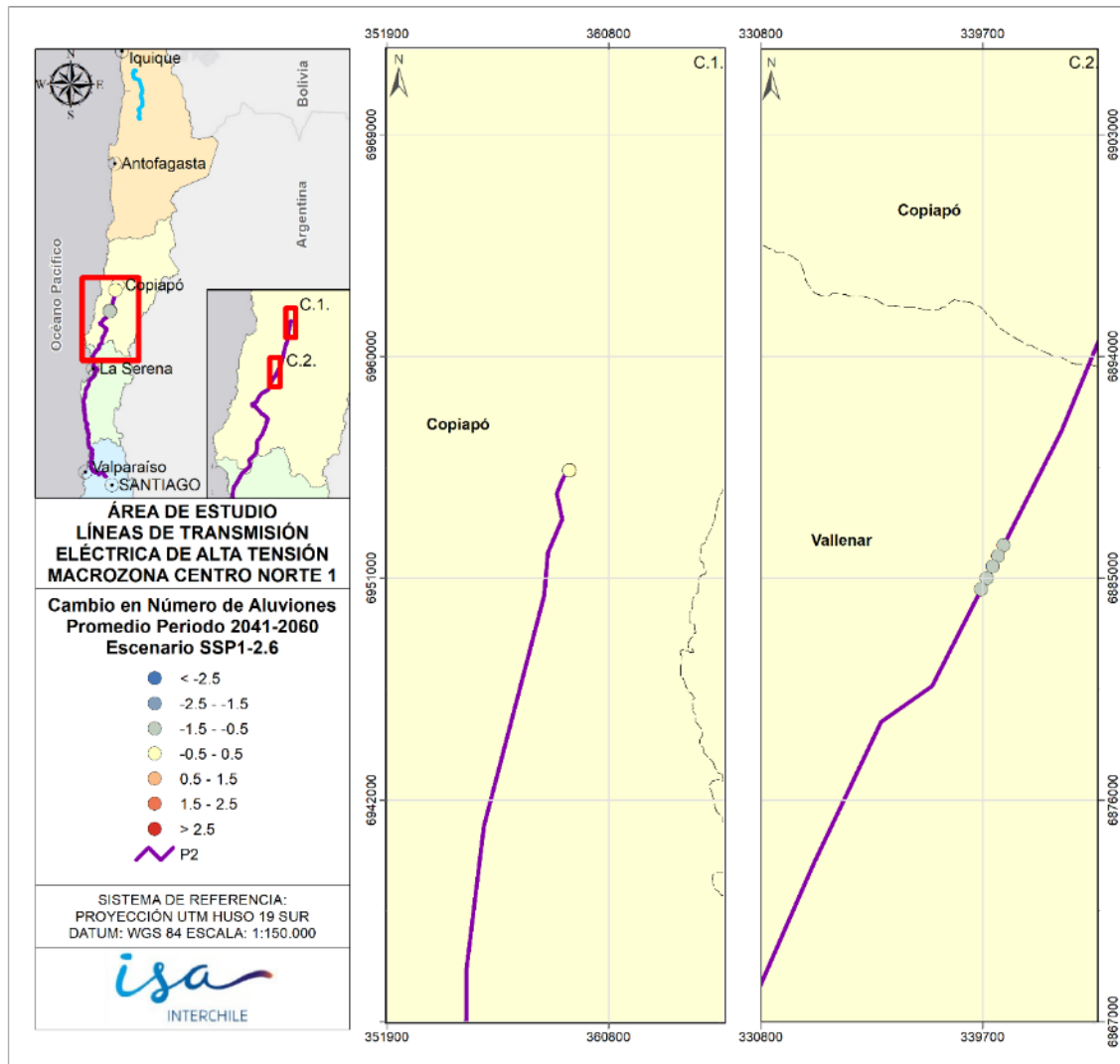


Figura 2-45: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP1-2.6.

Fuente: Elaboración propia.

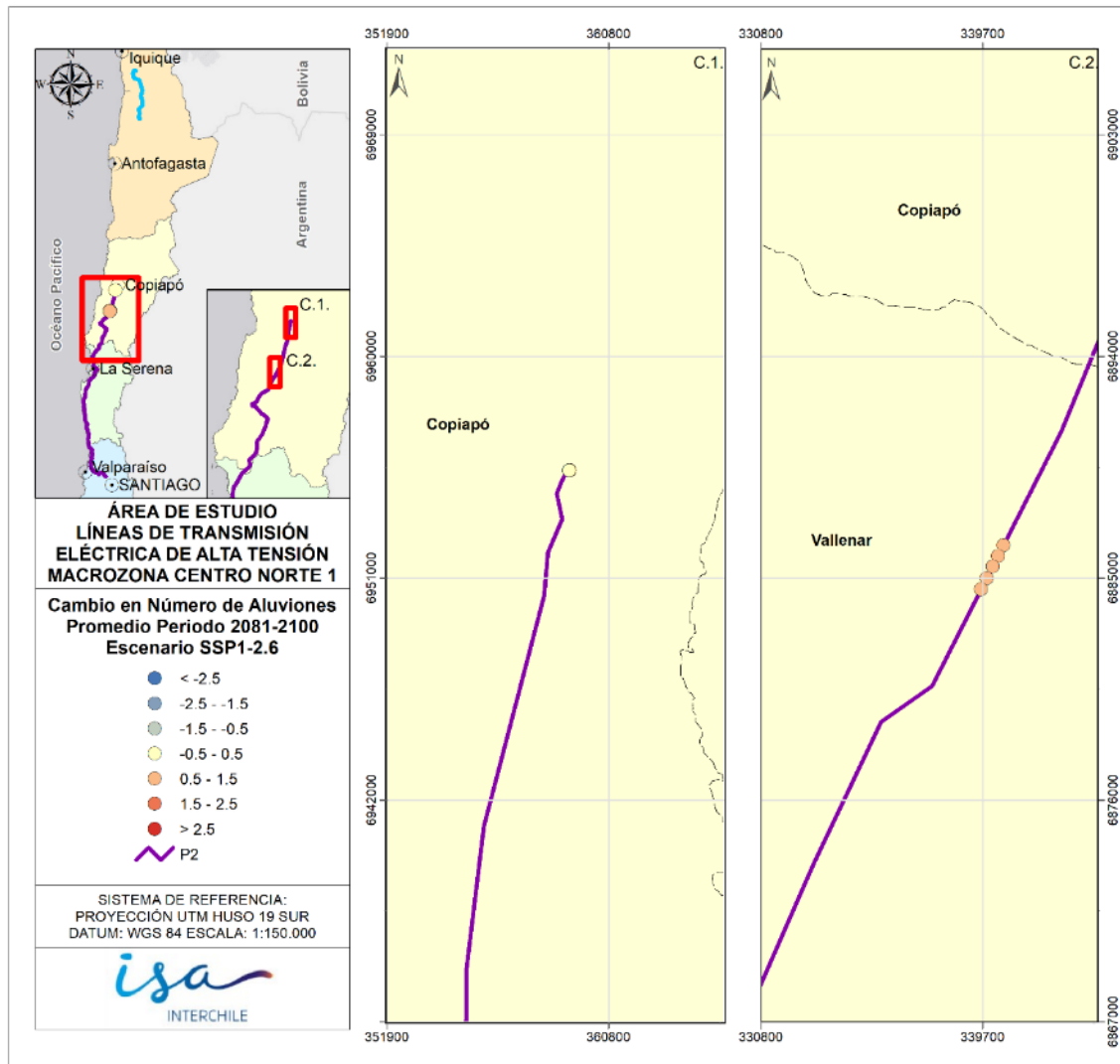


Figura 2-46: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP1-2.6.

Fuente: Elaboración propia.

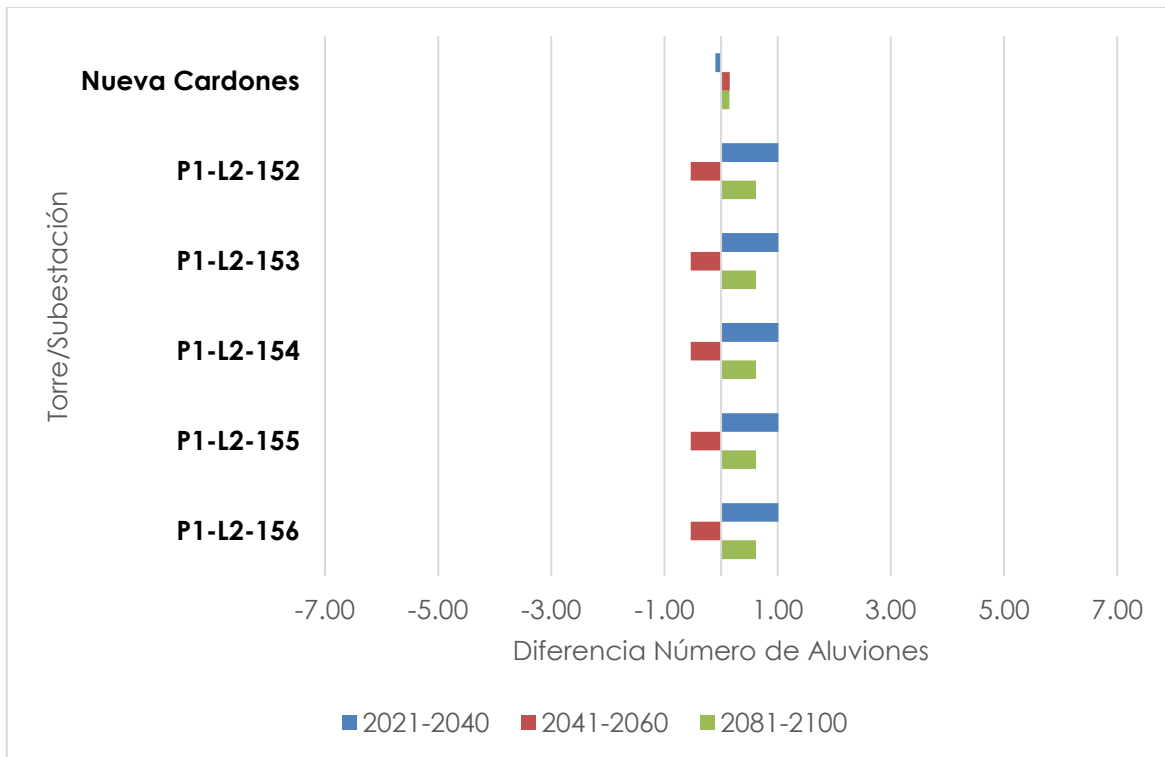


Figura 2-47: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP1-2.6.

Fuente: Elaboración propia.

Continuando el análisis de vulnerabilidad de Macrozona Centro Norte 1, la Tabla 2-15 presenta las estimaciones en base a las observaciones de estaciones de referencia, de los 4 modelos climáticos y el promedio de estos modelos en el periodo histórico, bajo el escenario SSP2-4.5. Luego, la Figura 2-48, Figura 2-49 y Figura 2-50 presentan el cambio proyectado en la ocurrencia de aluviones para cada infraestructura distribuida en el espacio por periodo entre la ventana de tiempo histórica y la futura cercana, intermedia y lejana del promedio de los modelos para la Macrozona Centro Norte 1. La Figura 2-51 presenta los cambios promedio esperados en la ocurrencia de eventos aluvionales para un futuro cercano (2020-2040), intermedio (2040-2060) y lejano (2080-2100).

Para la subestación Nueva Cardones solo se proyectan disminuciones, por lo que, referido a la vulnerabilidad en la frecuencia de estos eventos, hay una disminución. De forma similar, en las torres se proyectan disminuciones para el corto y mediano plazo relativas a cerca de un evento y en el largo plazo un leve aumento el cual, solo si se proyecta a 100 años significaría un evento adicional.

Tabla 2-15: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Centro Norte 1 SSP2-4.5.

Estructura_ID	Estación	BCC- CSM2-MR	CIESM	MPI- ESM1-2- LR	NESM3	Promedio Modelos
Nueva Cardones	2,29	1,71	1,14	2,86	2,29	2,00
P1-L2-152	4,26	3,34	2,46	3,35	1,66	2,70
P1-L2-153	4,26	3,34	2,46	3,35	1,66	2,70
P1-L2-154	4,26	3,34	2,46	3,35	1,66	2,70
P1-L2-155	4,26	3,34	2,46	3,35	1,66	2,70
P1-L2-156	4,26	3,34	2,46	3,35	1,66	2,70

Fuente: Elaboración propia.

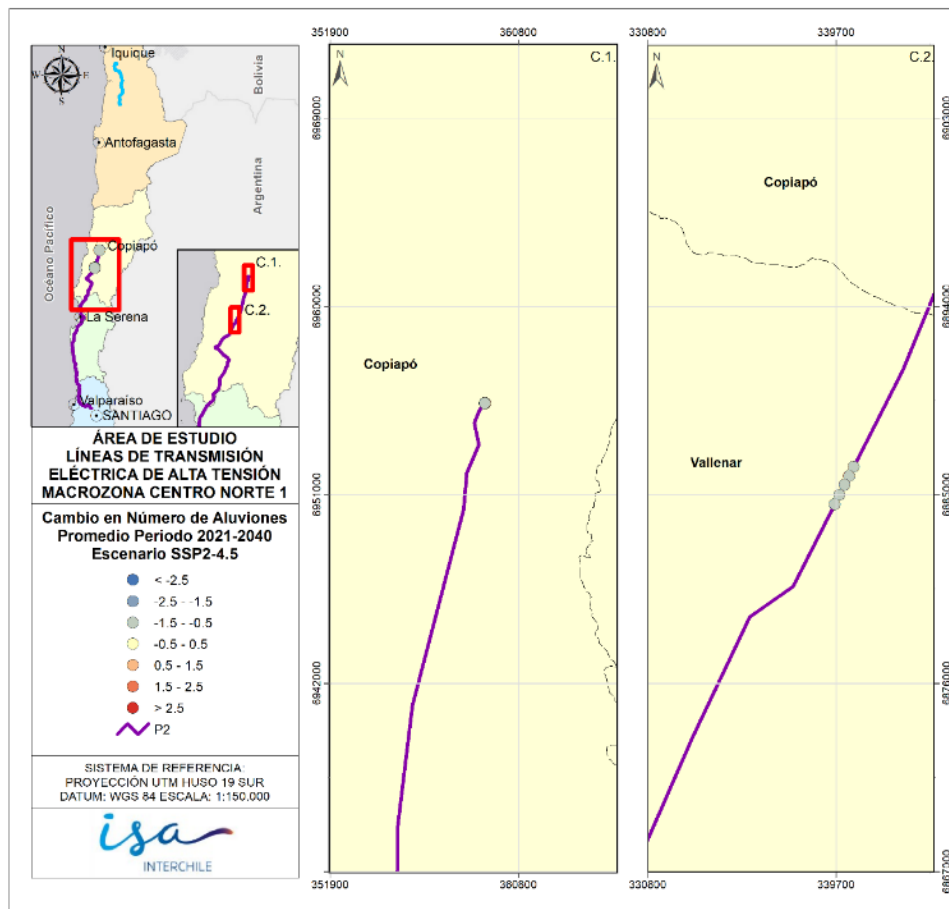


Figura 2-48: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP2-4.5.

Fuente: Elaboración propia.

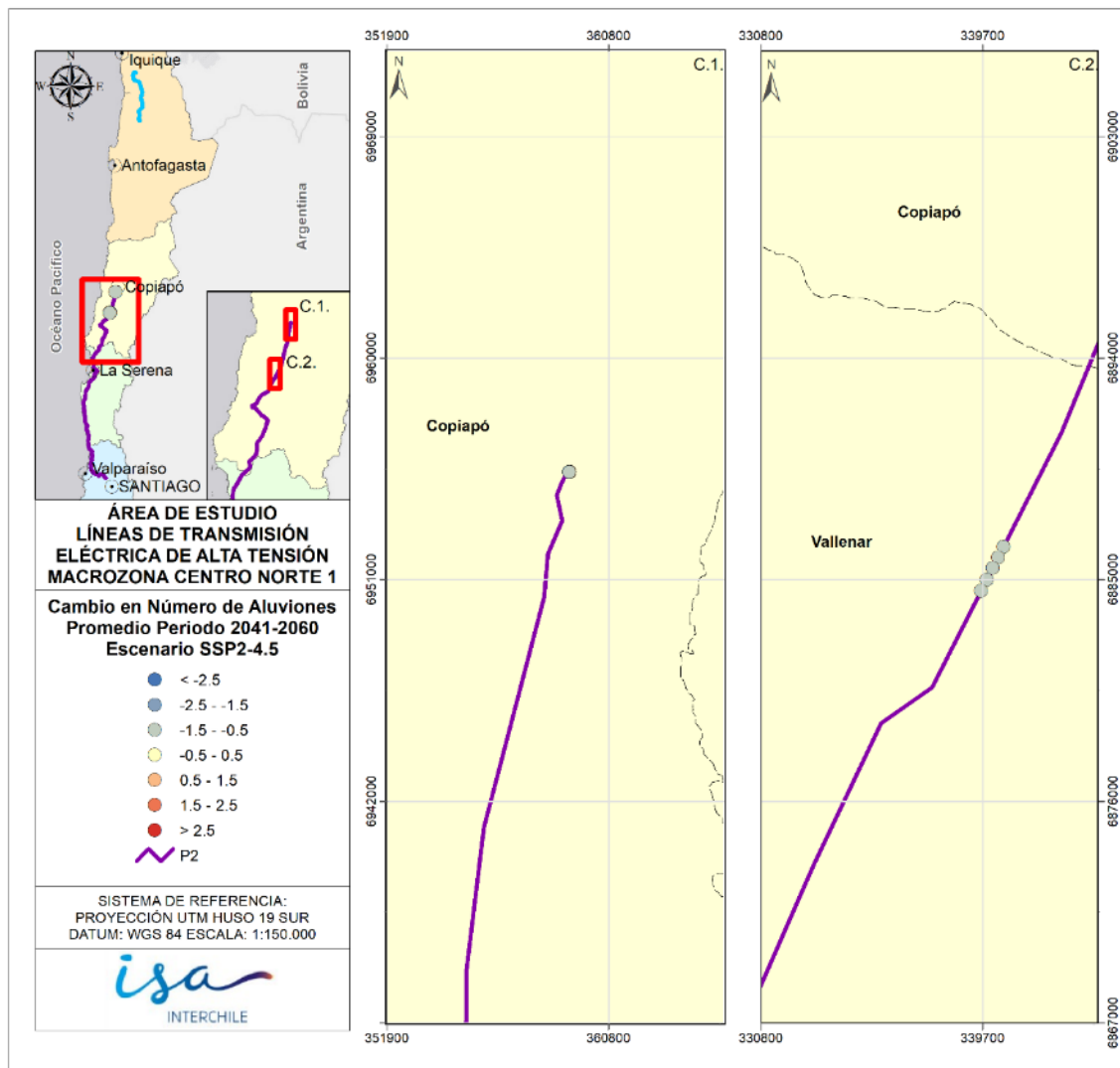


Figura 2-49: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP2-4.5.

Fuente: Elaboración propia.

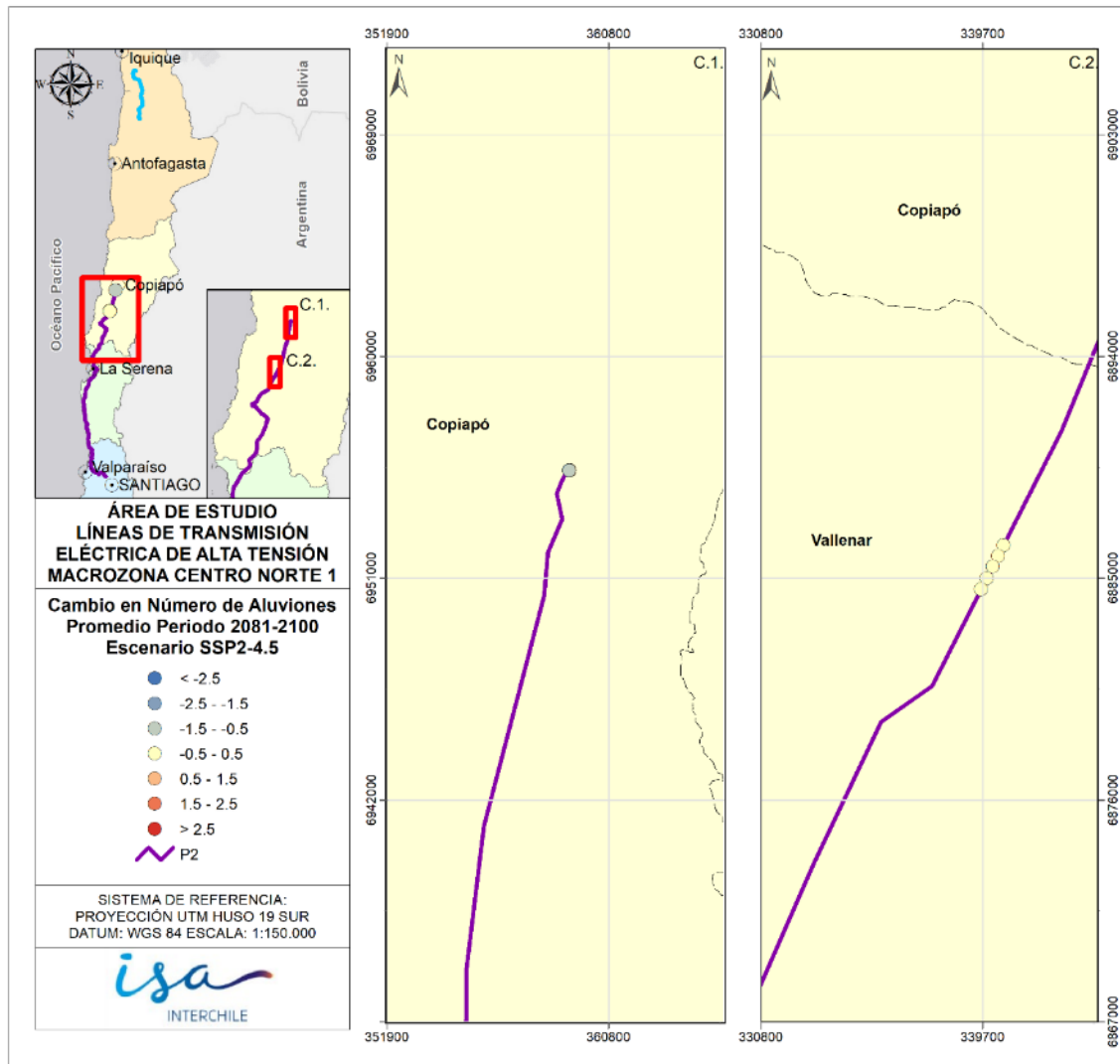


Figura 2-50: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP2-4.5.

Fuente: Elaboración propia.

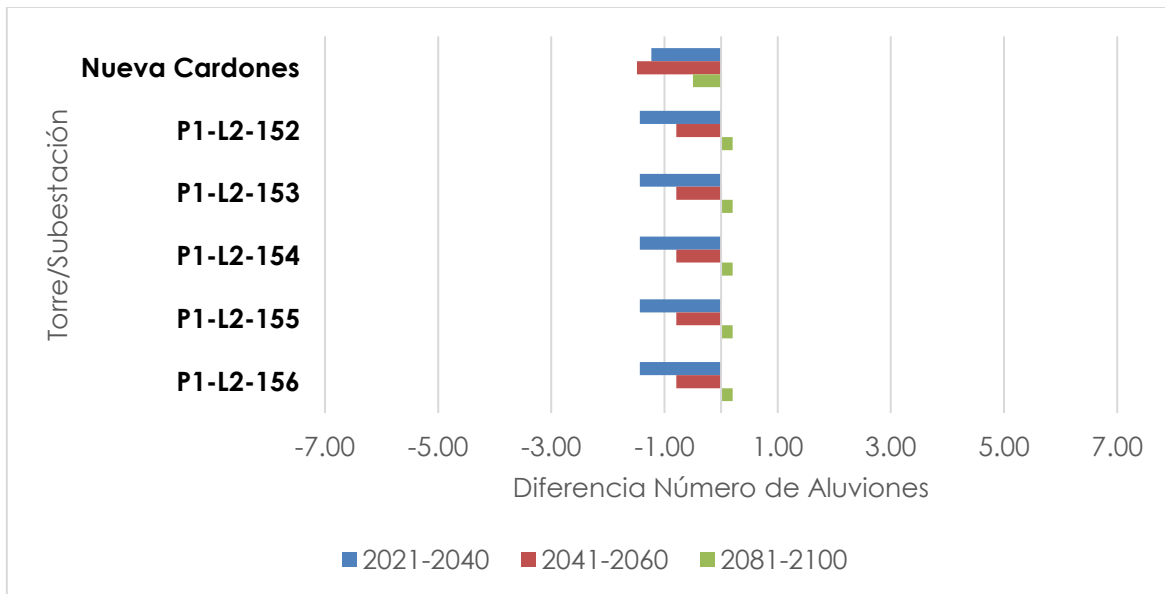


Figura 2-51: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP2-4.5.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2-16 presenta las estimaciones en base a las observaciones de estaciones de referencia, de los 4 modelos climáticos y el promedio de estos modelos para la Macrozona Centro Norte 1 en el periodo histórico, bajo el escenario SSP5-8.5. Luego, entre la Figura 2-52 y la Figura 2-54 se presenta el cambio proyectado en la ocurrencia de aluviones para cada infraestructura distribuida en el espacio por periodo entre la ventana de tiempo histórica y la futura cercana, intermedia y lejana del promedio de los modelos para la Macrozona Centro Norte 1. La Figura 2-55 presenta los cambios promedio esperados en la ocurrencia de eventos aluvionales para un futuro cercano (2020-2040), intermedio (2040-2060) y lejano (2080-2100).

Los resultados son bastante similares a lo proyectado bajo el escenario SSP2-4.5. Tanto en el futuro cercano como intermedio se esperan cerca de 1 evento menos para un periodo de 20 años y, en el futuro lejano se proyecta una condición casi idéntica a la actual en términos de la frecuencia de ocurrencia de estos eventos.

A grandes rasgos, considerando los cambios en el riesgo de la infraestructura frente a aluviones como el cambio en su frecuencia proyectada de ocurrencia, no se ven grandes cambios para la Macrozona Centro Norte 1 bajo ningún escenario SSP. Hay una relativa consistencia en que se espera una disminución cercana a 1 evento para el corto y mediano plazo y una mantención de la

cantidad de eventos gatillantes de aluviones hacia finales de siglo respecto de la situación del periodo 1985-2019.

Tabla 2-16: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Centro Norte 1 SSP5-8.5.

Estructura_ID	Estación	BCC-CSM2-MR	CIESM	MPI-ESM1-2-LR	NESM3	Promedio Modelos
Nueva Cardones	2,29	1,71	0,02	2,29	1,71	1,43
P1-L2-152	4,26	2,77	3,00	2,95	3,08	2,95
P1-L2-153	4,26	2,77	3,00	2,95	3,08	2,95
P1-L2-154	4,26	2,77	3,00	2,95	3,08	2,95
P1-L2-155	4,26	2,77	3,00	2,95	3,08	2,95
P1-L2-156	4,26	2,77	3,00	2,95	3,08	2,95

Fuente: Elaboración propia.

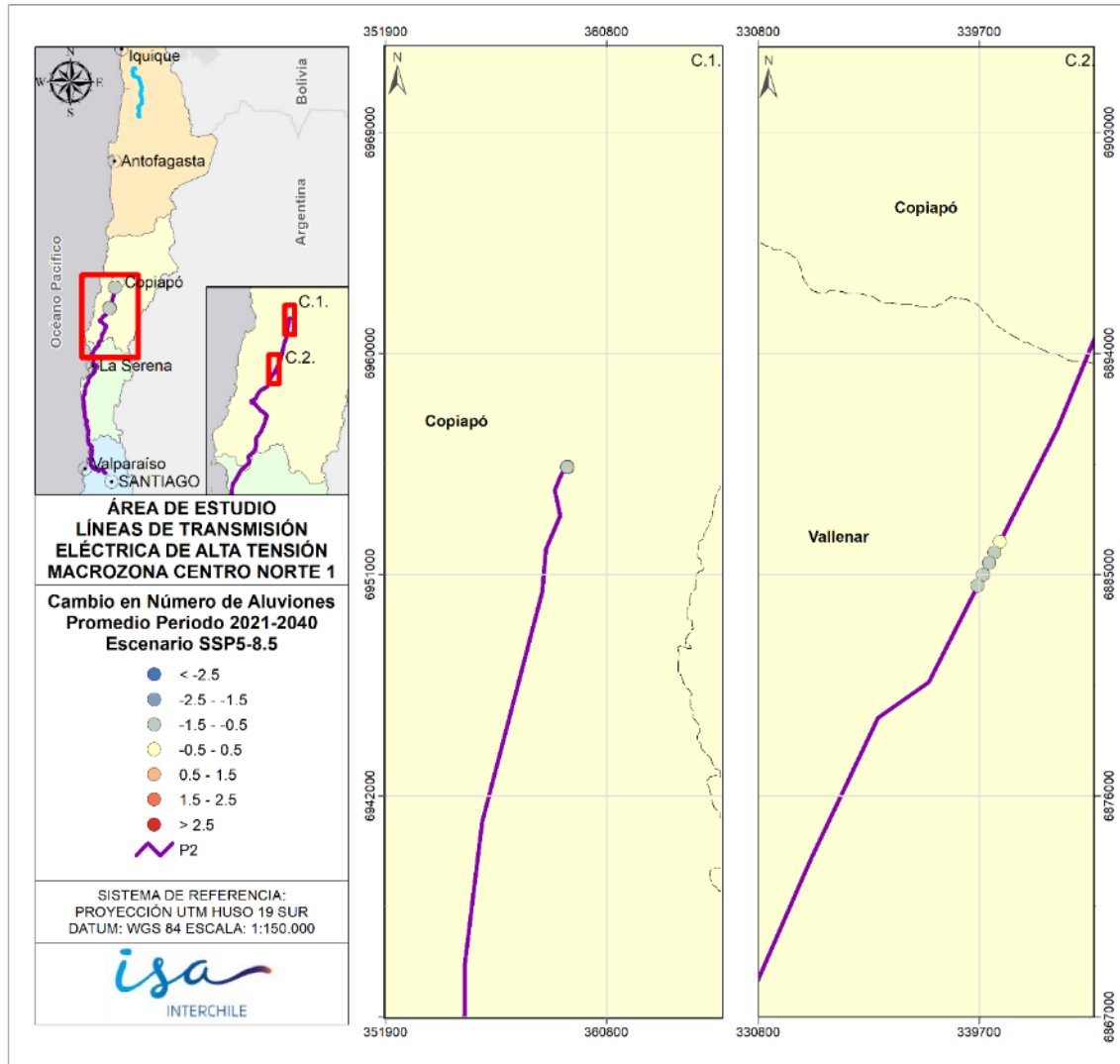


Figura 2-52: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP5-8.5.
 Fuente: Elaboración propia.

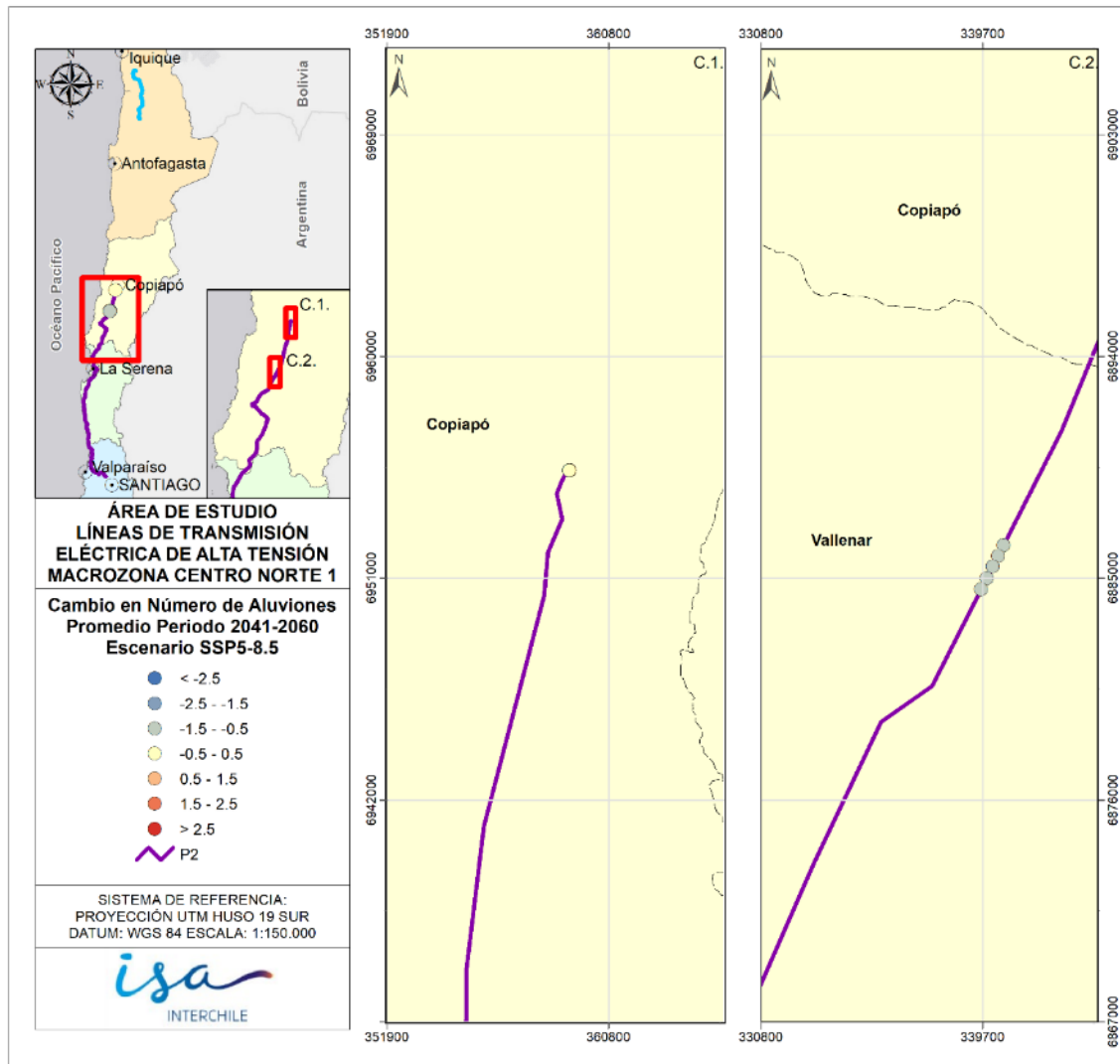


Figura 2-53: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP5-8.5.

Fuente: Elaboración propia.

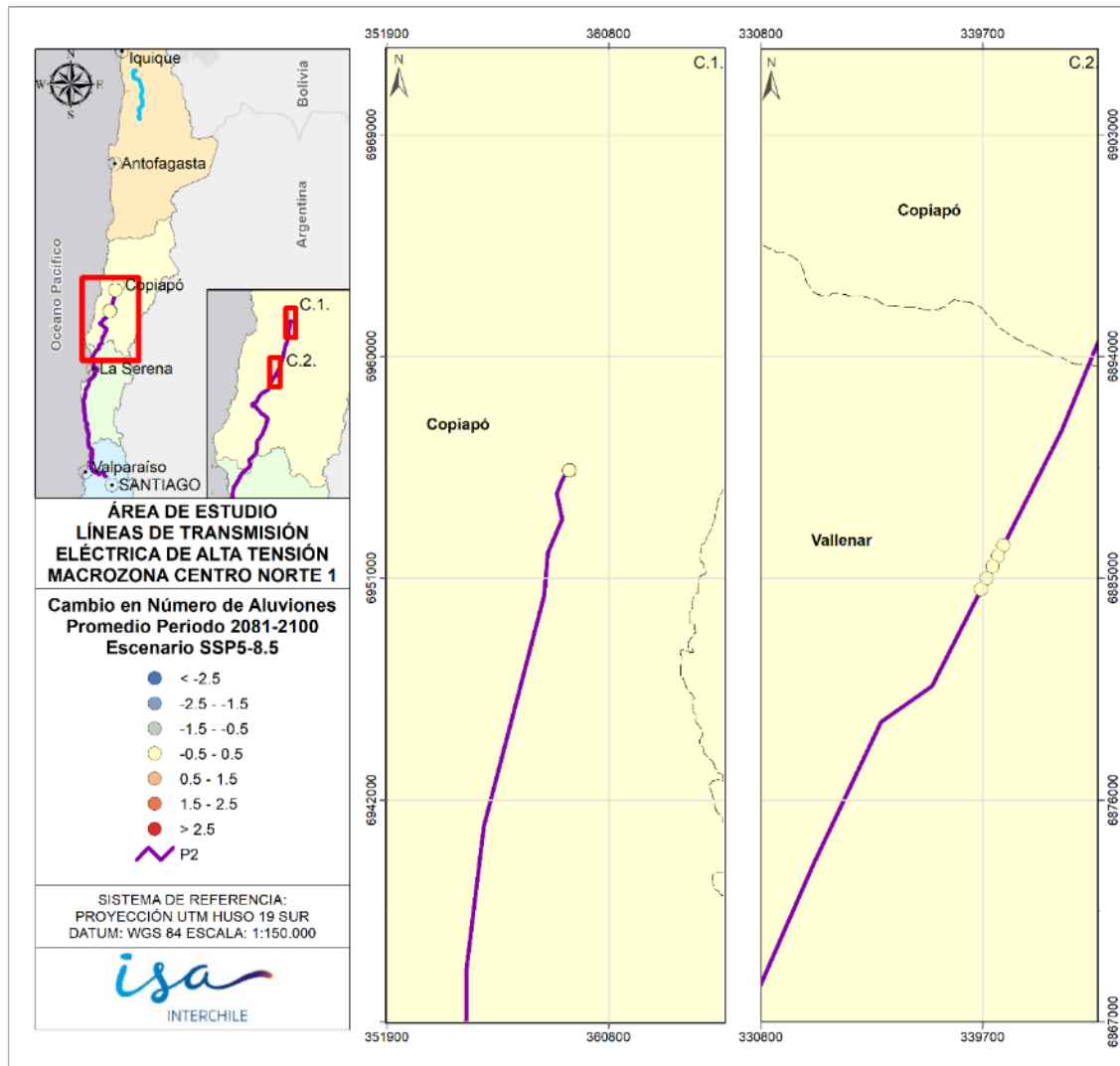


Figura 2-54: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP5-8.5.

Fuente: Elaboración propia.

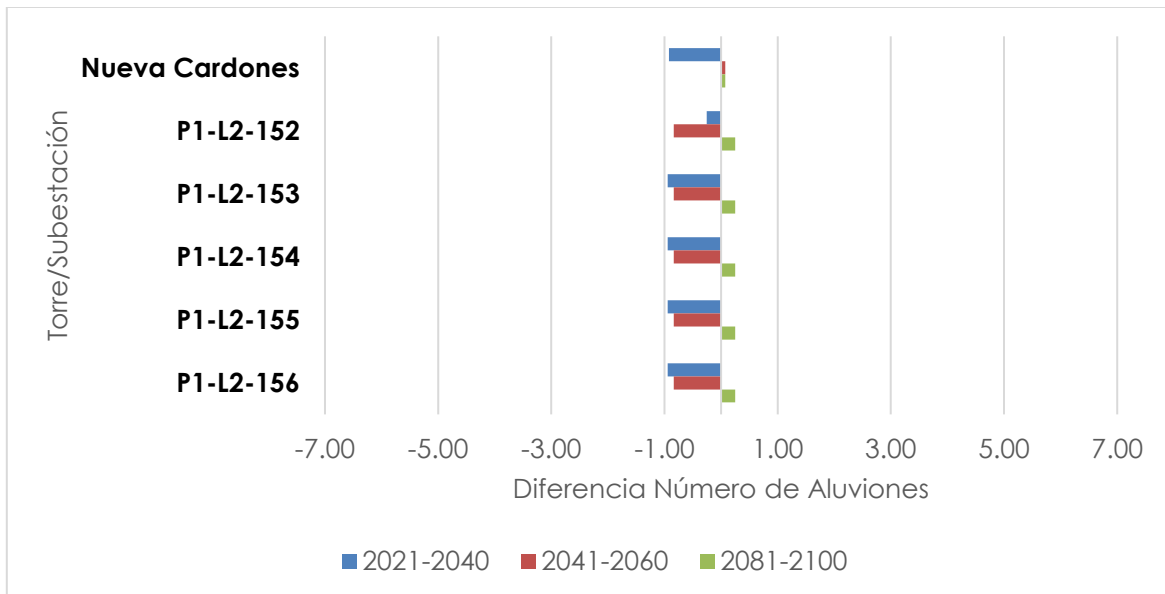


Figura 2-55: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 1, Escenario SSP5-8.5.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2-17 presenta las estimaciones con base en las observaciones de estaciones de referencia, de los 4 modelos climáticos y el promedio de estos modelos para la Macrozona Centro Norte 2 en el periodo histórico, bajo el escenario SSP1-2.6. Luego, entre la Figura 2-56 y la Figura 2-58 se presenta el cambio proyectado en la ocurrencia de aluviones para cada infraestructura distribuida en el espacio por periodo entre la ventana de tiempo histórica y la futura cercana, intermedia y lejana del promedio de los modelos para la Macrozona Centro Norte 2. La Figura 2-59 presenta los cambios promedio esperados en la ocurrencia de eventos aluvionales para un futuro cercano (2020-2040), intermedio (2040-2060) y lejano (2080-2100).

Se puede ver la ausencia de una tendencia clara tanto para las distintas estructuras de norte a sur, como para los distintos periodos. Sin embargo, todos los cambios son iguales o menores al aumento/disminución de 1 evento, dando cuenta de cierta estabilidad más que de cambios de la ocurrencia de estos eventos hacia el futuro.

Tabla 2-17: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Centro Norte 2 SSP1-2.6.

Estructura_ID	Estación	BCC-CSM2-MR	CIESM	NESM3	MPI-ESM1-2-LR	Promedio Modelos
P1-L4-241	1,85	0,67	1,06	0,05	1,16	0,74
P1-L4-242	1,85	0,67	1,06	0,05	1,16	0,74
P1-L4-409	2,86	1,14	2,29	1,14	0,57	1,29
P1-L4-420	3,45	7,49	8,10	5,36	6,90	6,96
P1-L4-421	3,45	7,49	8,10	5,36	6,90	6,96
Nueva Pan de Azucar	3,43	2,86	2,86	3,43	4,00	3,29
P1-L6-5	3,43	2,86	2,86	3,43	4,00	3,29

Fuente: Elaboración propia.

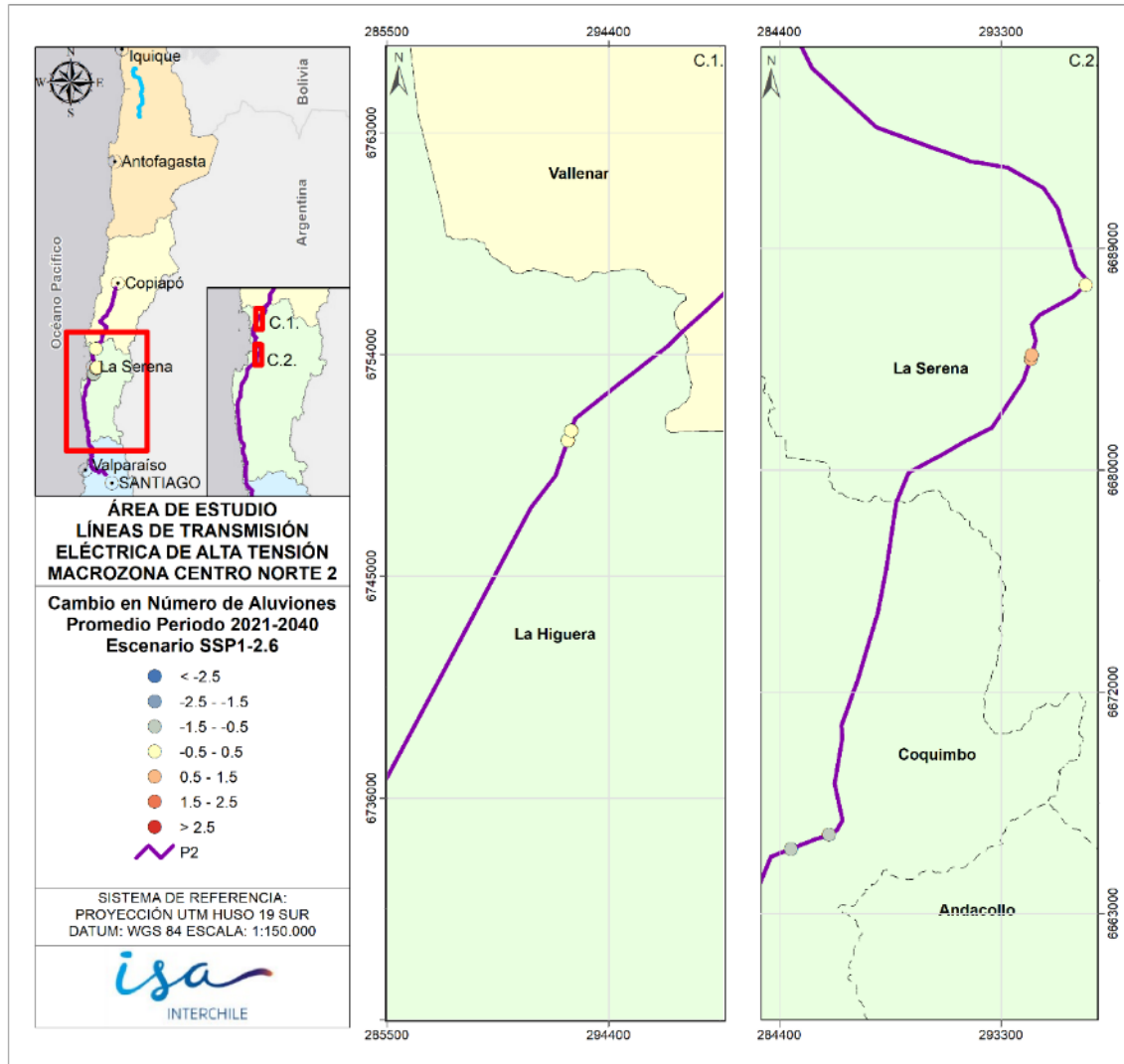


Figura 2-56: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP1-2.6.
 Fuente: Elaboración propia.

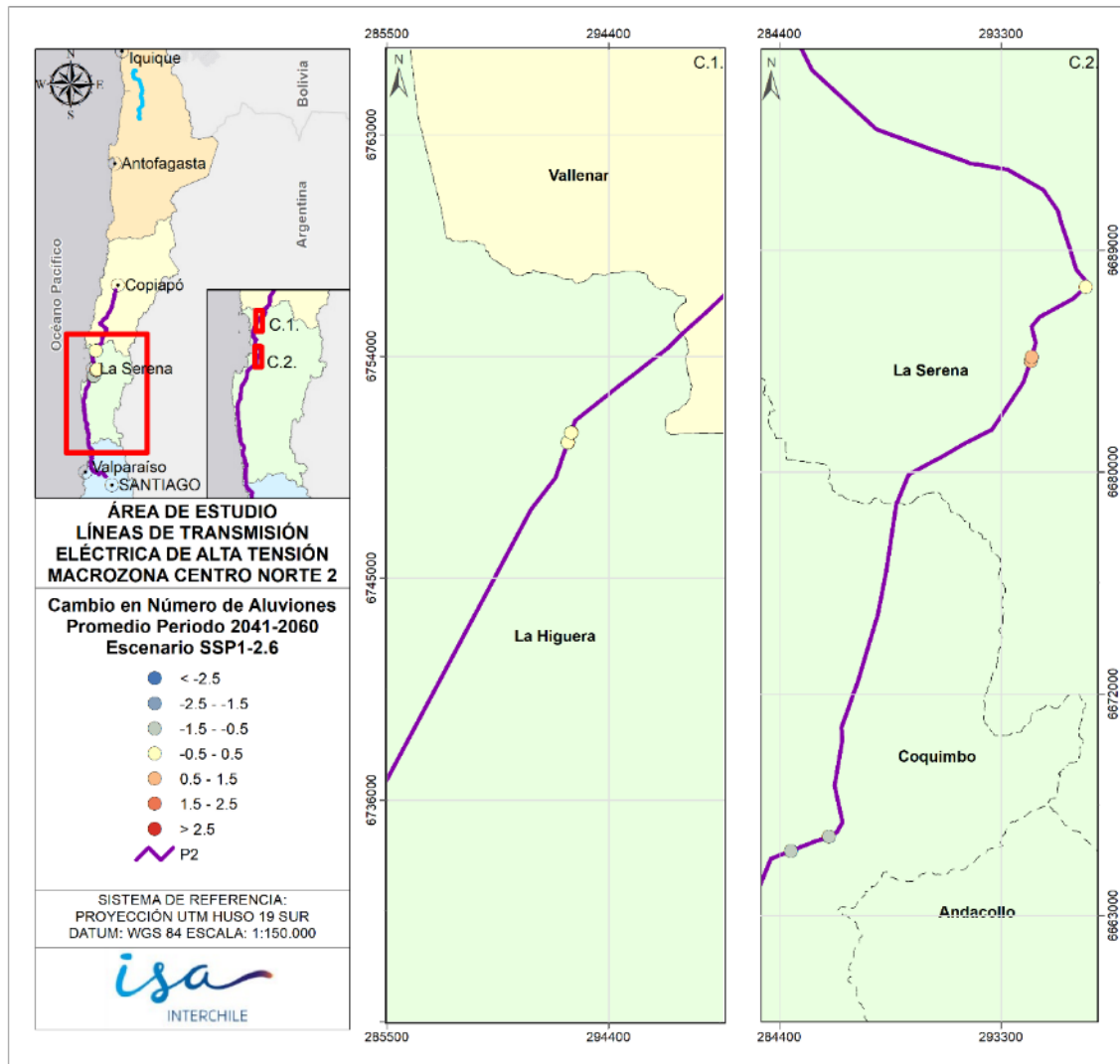


Figura 2-57: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP1-2.6.
 Fuente: Elaboración propia.

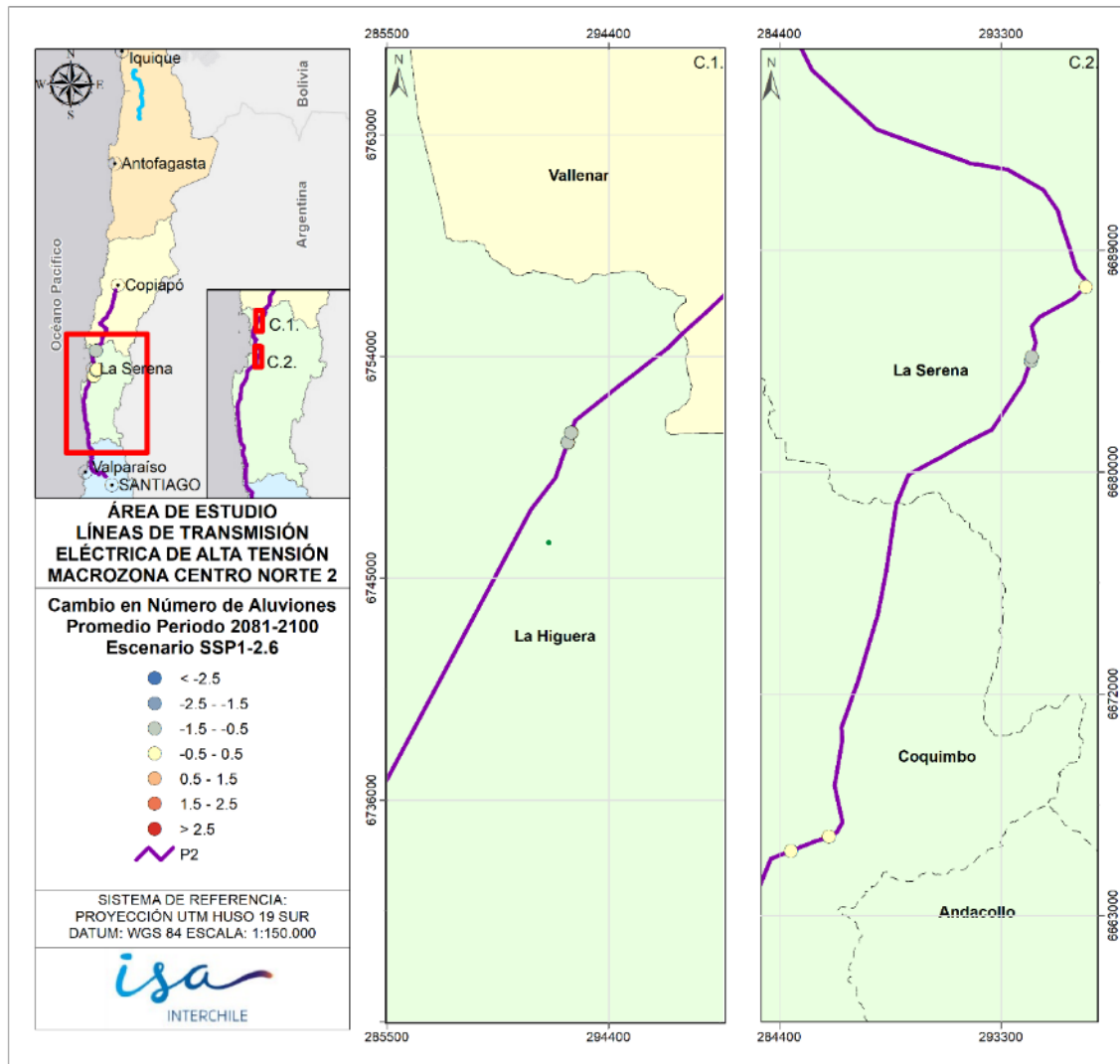


Figura 2-58: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP1-2.6.
 Fuente: Elaboración propia.

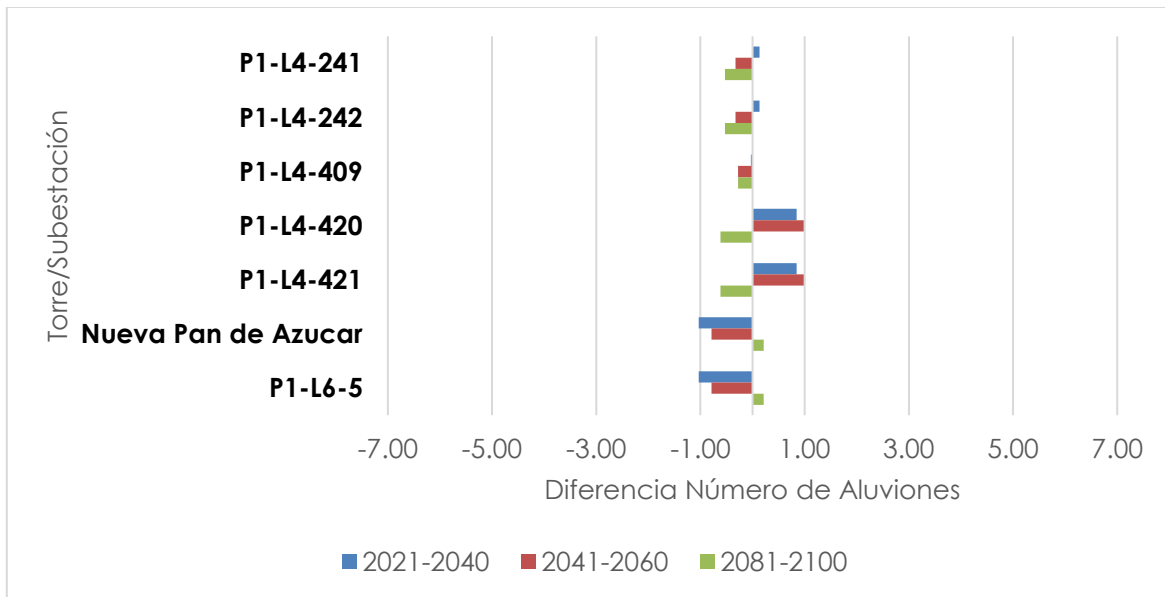


Figura 2-59: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP1-2.6.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2-18 presenta las estimaciones con base en las observaciones de estaciones de referencia, de los 4 modelos climáticos y el promedio de estos modelos para la Macrozona Centro Norte 2 en el periodo histórico, bajo el escenario SSP2-4.5. Luego, entre la Figura 2-60 y la Figura 2-62 se presenta el cambio proyectado en la ocurrencia de aluviones para cada infraestructura distribuida en el espacio por periodo entre la ventana de tiempo histórica y la futura cercana, intermedia y lejana del promedio de los modelos para la Macrozona Centro Norte 2. La Figura 2-63 presenta los cambios promedio esperados en la ocurrencia de eventos aluvionales para un futuro cercano (2020-2040), intermedio (2040-2060) y lejano (2080-2100).

Similar a lo identificado bajo el escenario SSP1-2.6, no se identifica una única tendencia por periodo y estructura, aunque los cambios proyectados son iguales o menores a una disminución/aumento de 1 evento. La única excepción es la Subestación Nueva Pan de azúcar y la torre P1-L6-5, ubicadas en la Quebrada Martínez, las cuales proyectan disminuciones similares para todos los periodos (hasta 2 eventos menos en el horizonte futuro intermedio).

Tabla 2-18: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Centro Norte 2 SSP2-4.5.

Estructura_ID	Estación	BCC- CSM2-MR	CIESM	NESM3	MPI- ESM1-2- LR	Promedio Modelos
P1-L4-241	1,85	0,08	0,16	1,43	0,02	0,42
P1-L4-242	1,85	0,08	0,16	1,43	0,02	0,42
P1-L4-409	2,86	5,71	0,02	0,02	0,02	1,44
P1-L4-420	3,45	6,90	1,83	6,06	6,45	5,31
P1-L4-421	3,45	6,90	1,83	6,06	6,45	5,31
Nueva Pan de Azucar	3,43	5,71	3,43	4,00	2,29	3,86
P1-L6-5	3,43	5,71	3,43	4,00	2,29	3,86

Fuente: Elaboración propia.

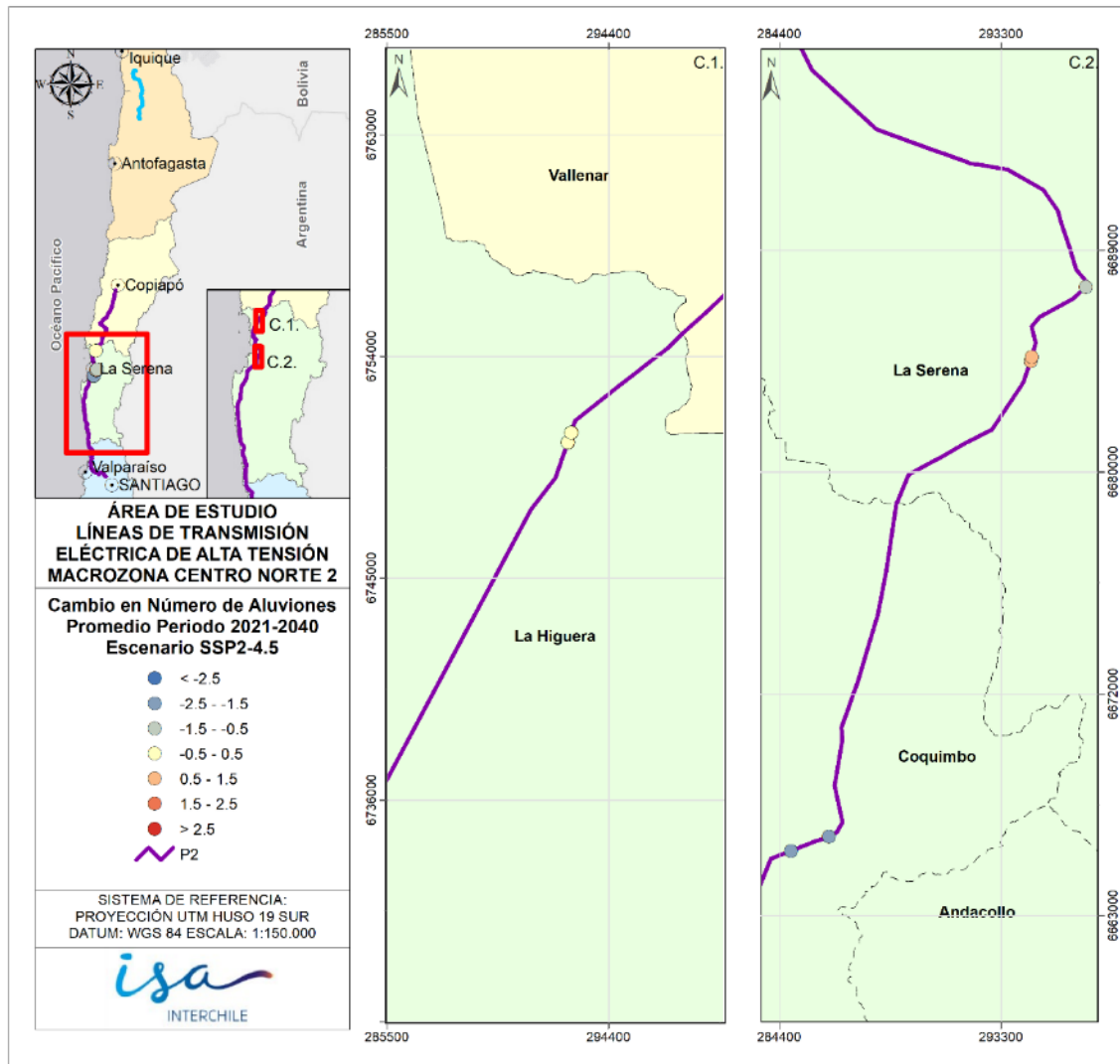


Figura 2-60: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP2-4.5.

Fuente: Elaboración propia.

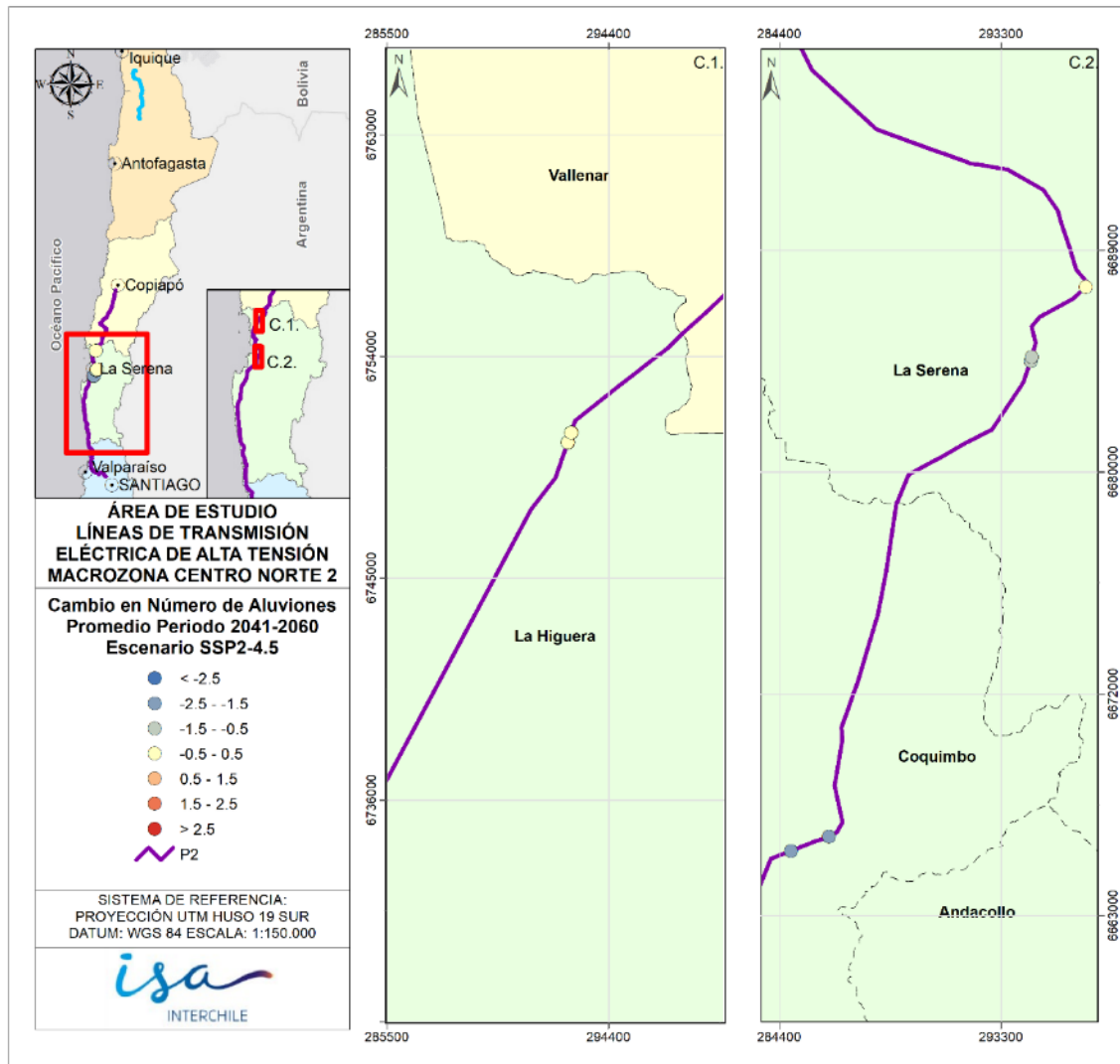


Figura 2-61: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP2-4.5.

Fuente: Elaboración propia.

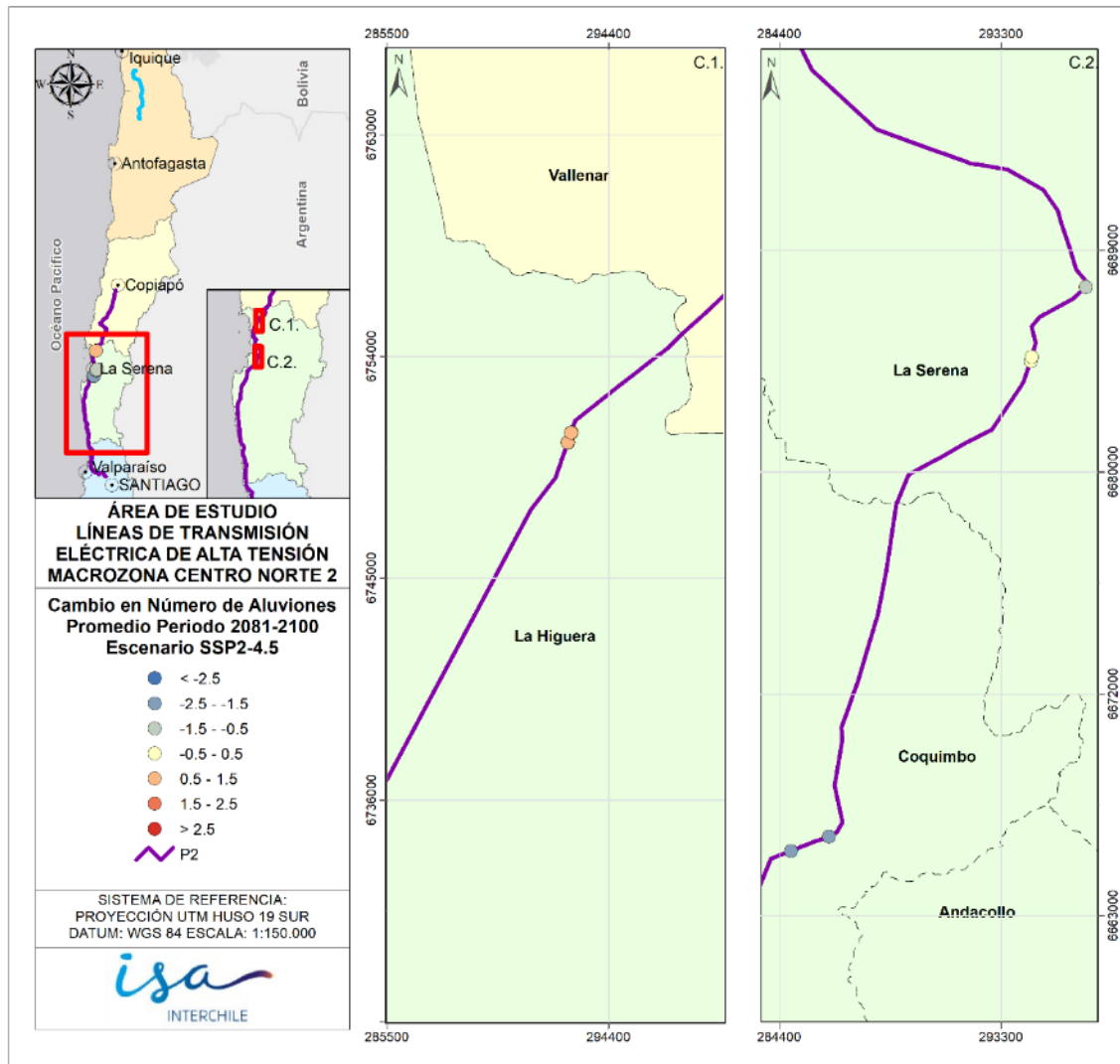


Figura 2-62: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP2-4.5.

Fuente: Elaboración propia.

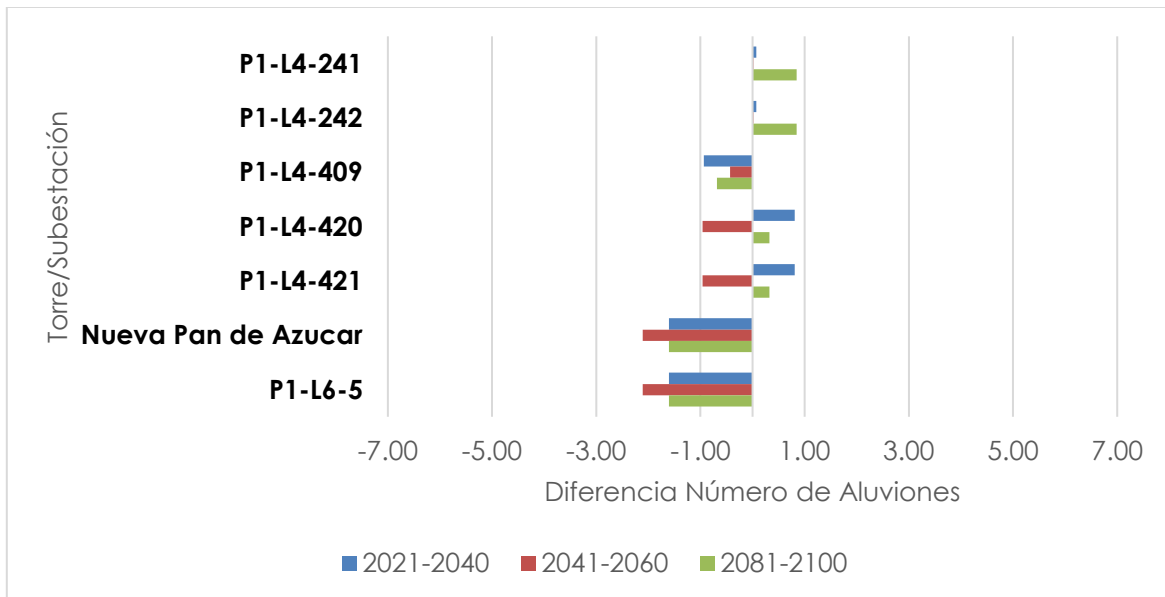


Figura 2-63: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP2-4.5.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2-19 presenta las estimaciones en base a las observaciones de estaciones de referencia, de los 4 modelos climáticos y el promedio de estos modelos para la Macrozona Centro Norte 2 en el periodo histórico, bajo el escenario SSP5-8.5. Luego, entre la Figura 2-64 y la Figura 2-66 se presenta el cambio proyectado en la ocurrencia de aluviones para cada infraestructura distribuida en el espacio por periodo entre la ventana de tiempo histórica y la futura cercana, intermedia y lejana del promedio de los modelos para la Macrozona Centro Norte 2. La Figura 2-67 presenta los cambios promedio esperados en la ocurrencia de eventos aluvionales para un futuro cercano (2020-2040), intermedio (2040-2060) y lejano (2080-2100).

Bajo este escenario de mayor severidad en el aumento de emisiones, si se identifica una señal permanente de disminución o mantención en la cantidad de ocurrencias de eventos gatillantes de aluviones esperados. En particular, es notoria la disminución proyectada al corto y largo plazo en las torres ubicadas en el cauce del Río Elqui.

Tabla 2-19: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Centro Norte 2 SSP5-8.5.

Estructura_ID	Estación	BCC- CSM2-MR	CIESM	NESM3	MPI- ESM1-2- LR	Promedio Modelos
P1-L4-241	1,85	0,85	0,57	0,02	1,16	0,65
P1-L4-242	1,85	0,85	0,57	0,02	1,16	0,65
P1-L4-409	2,86	0,02	1,14	0,57	1,14	0,72
P1-L4-420	3,45	7,91	9,30	7,43	7,07	7,93
P1-L4-421	3,45	7,91	9,30	7,43	7,07	7,93
Nueva Pan de Azucar	3,43	2,86	4,00	3,43	2,29	3,14
P1-L6-5	3,43	2,86	4,00	3,43	2,29	3,14

Fuente: Elaboración propia.

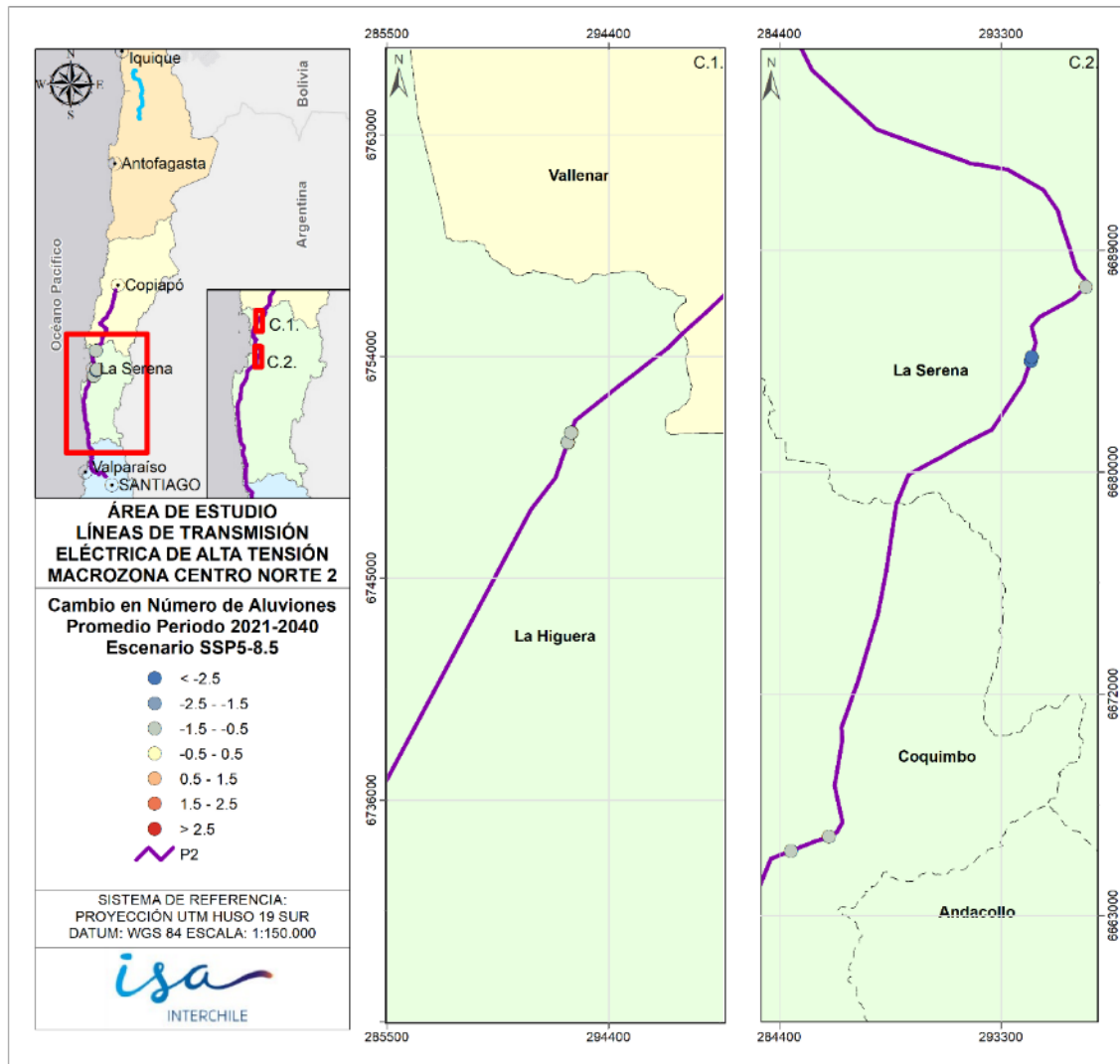


Figura 2-64: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP5-8.5.

Fuente: Elaboración propia.

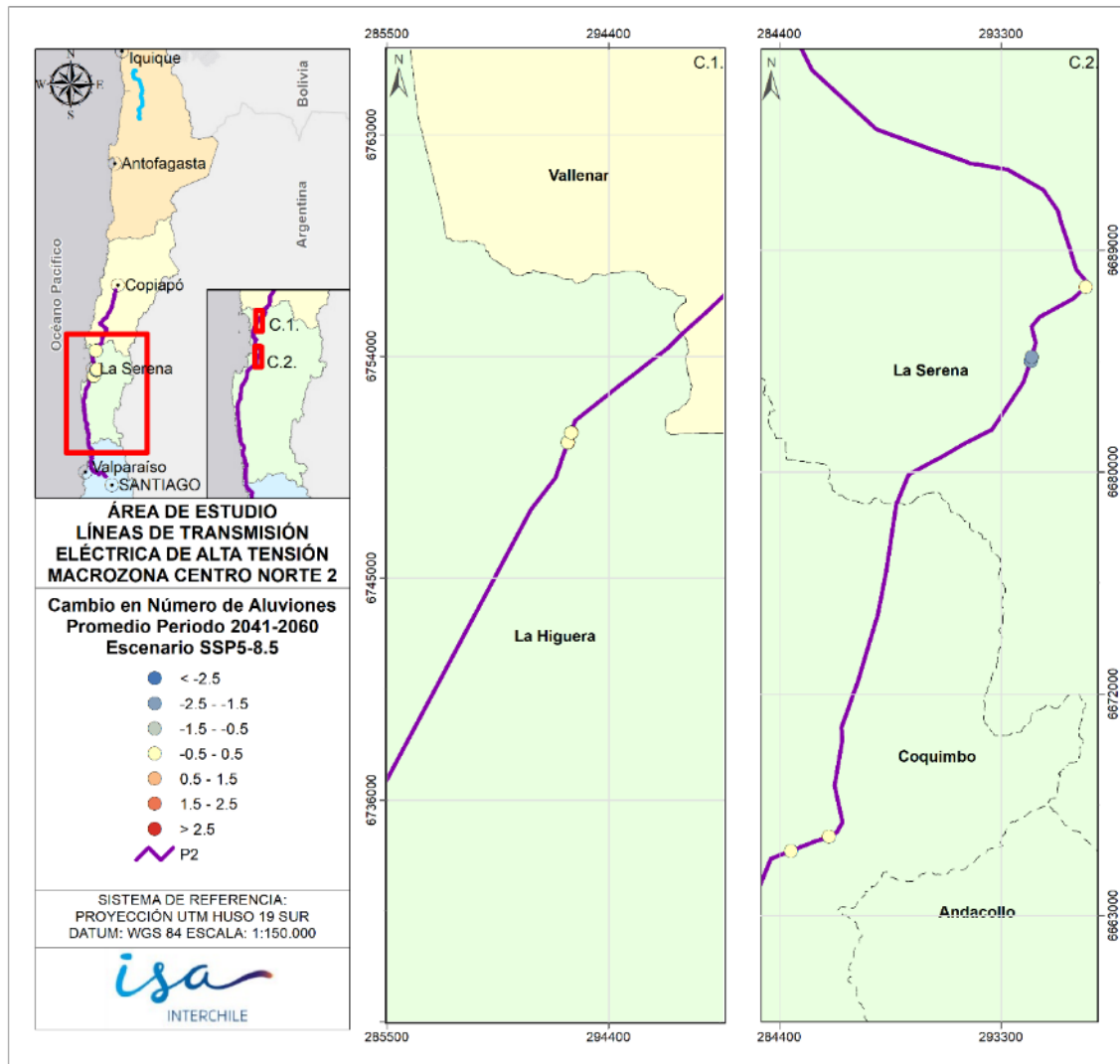


Figura 2-65: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP5-8.5.

Fuente: Elaboración propia.

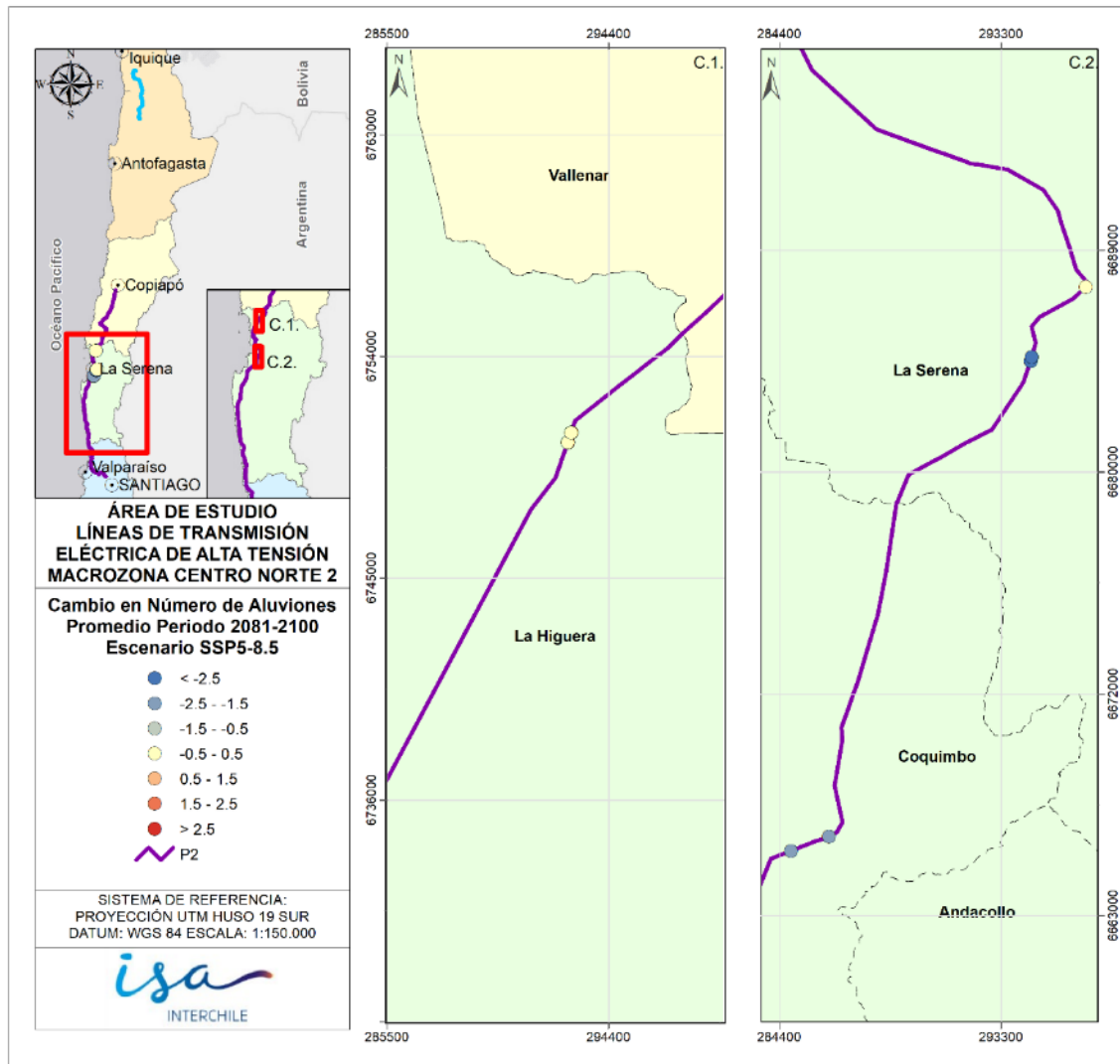


Figura 2-66: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP5-8.5.

Fuente: Elaboración propia.

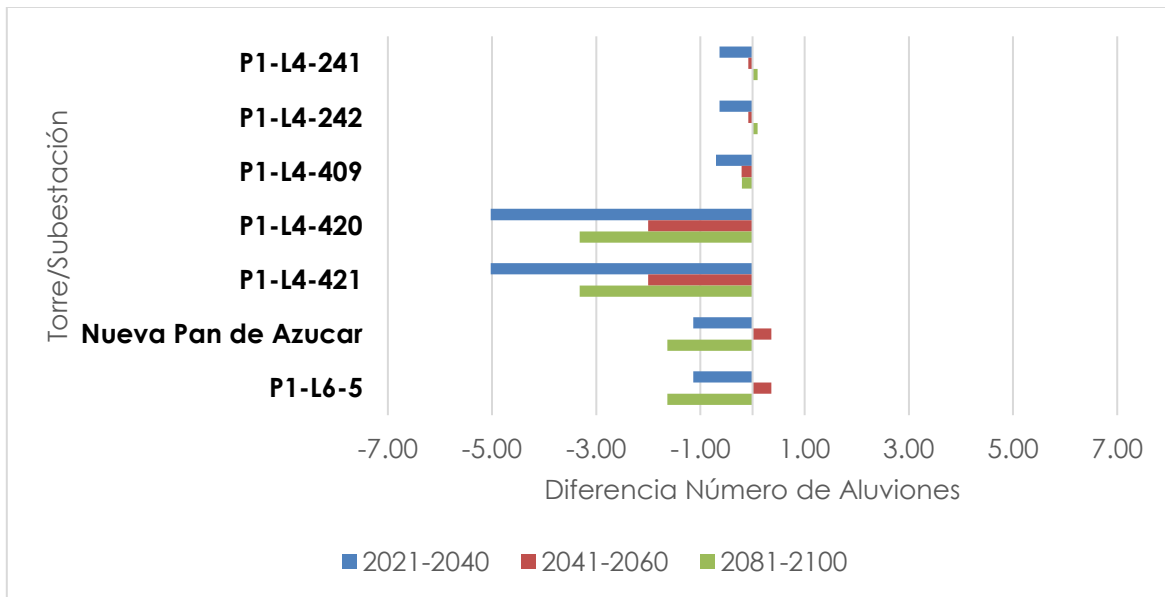


Figura 2-67: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro Norte 2, Escenario SSP5-8.5.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2-20 presenta las estimaciones con base en las observaciones de estaciones de referencia, de los 4 modelos climáticos y el promedio de estos modelos para la Macrozona Centro en el periodo histórico, bajo el escenario SSP1-2.6. Luego, entre la Figura 2-68 y la Figura 2-70 se presenta el cambio proyectado en la ocurrencia de aluviones para cada infraestructura distribuida en el espacio por periodo entre la ventana de tiempo histórica y la futura cercana, intermedia y lejana del promedio de los modelos para la Macrozona Centro. La Figura 2-71 presenta los cambios promedio esperados en la ocurrencia de eventos aluvionales para un futuro cercano (2020-2040), intermedio (2040-2060) y lejano (2080-2100).

Tanto para el horizonte cercano e intermedio se estima una leve disminución, la cual, si se realiza una proyección lineal, correspondería a 1 evento aluvional adicional en un horizonte de 50 años. Lo mismo ocurre, pero a la inversa para el futuro lejano, en donde se proyecta un leve aumento. Todos estos cambios se hacen imperceptibles al considerar los rangos presentados en los distintos mapas, pero sí se pueden apreciar en la Figura 2-71.

Tabla 2-20: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Centro SSP1-2.6.

Estructura_ID	Estación	ACCESS-CM2	ACCESS-ESM1-5	BCC-CSM2-MR	MPI-ESM1-2-LR	Promedio Modelos
P1-L6-745	3,05	3,19	3,08	2,90	3,10	3,07
P1-L6-746	3,05	3,19	3,08	2,90	3,10	3,07
P1-L6-747	3,05	3,19	3,08	2,90	3,10	3,07

Fuente: Elaboración propia.

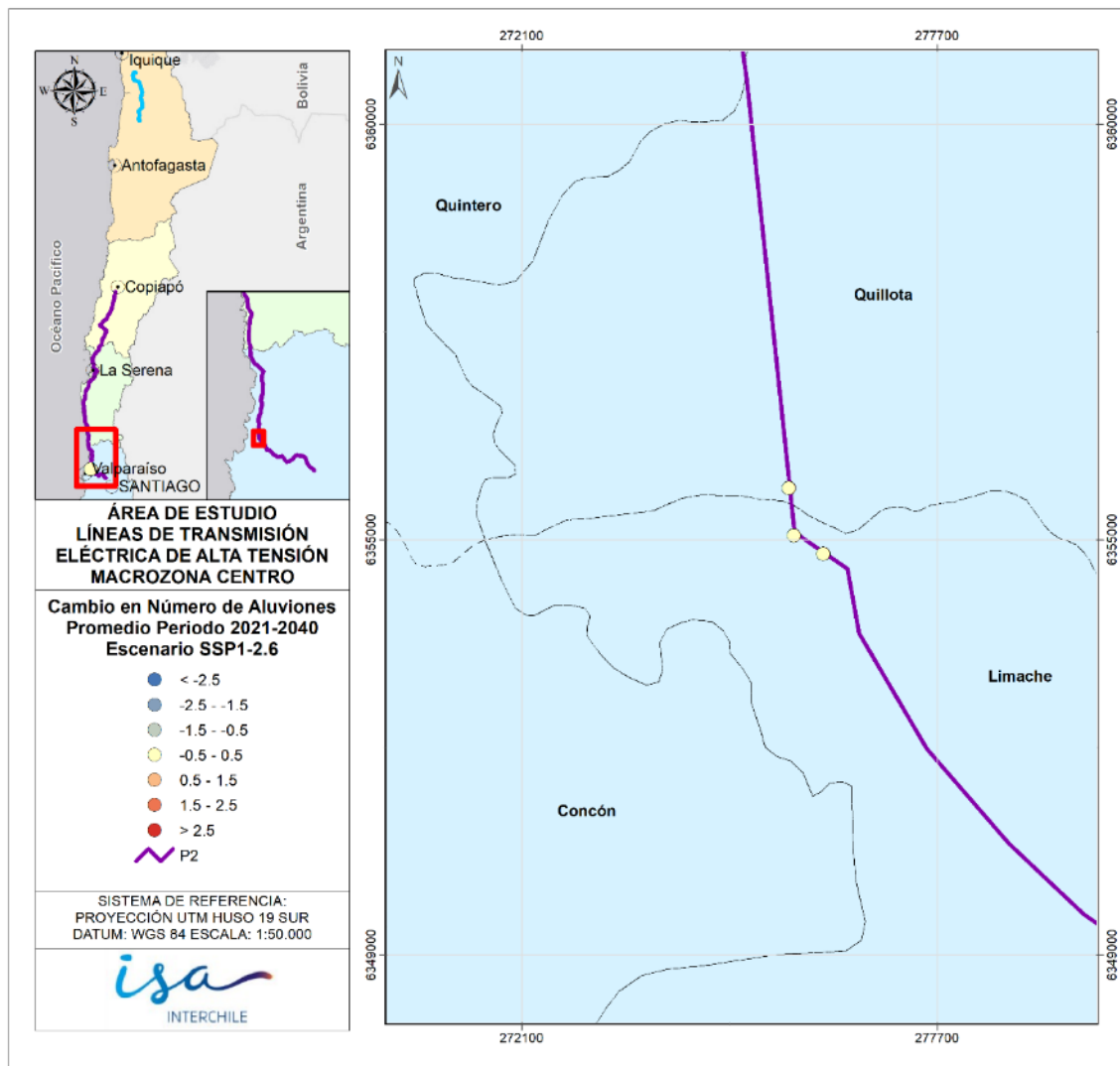


Figura 2-68: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP1-2.6.

Fuente: Elaboración propia.

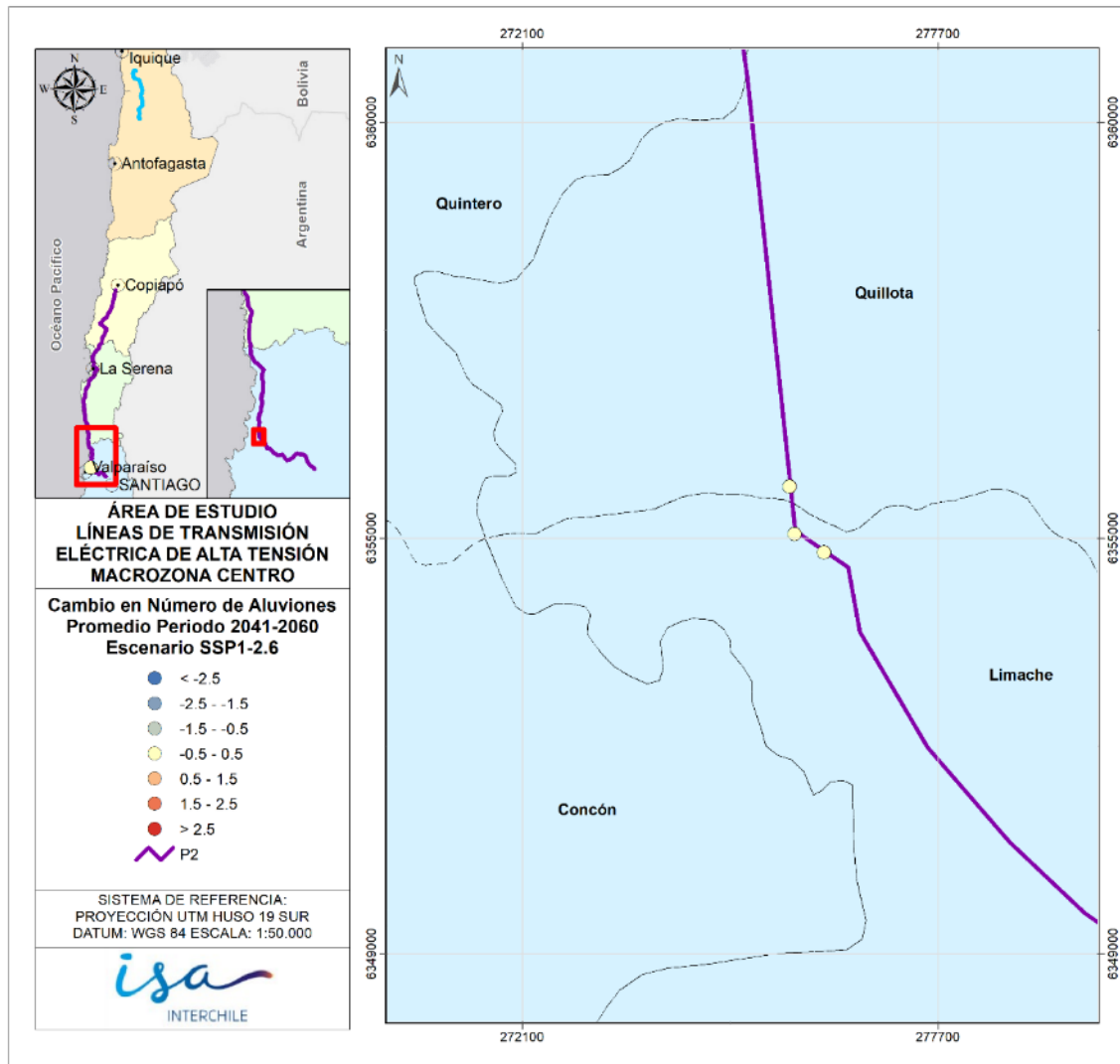


Figura 2-69: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP1-2.6.
Fuente: Elaboración propia.

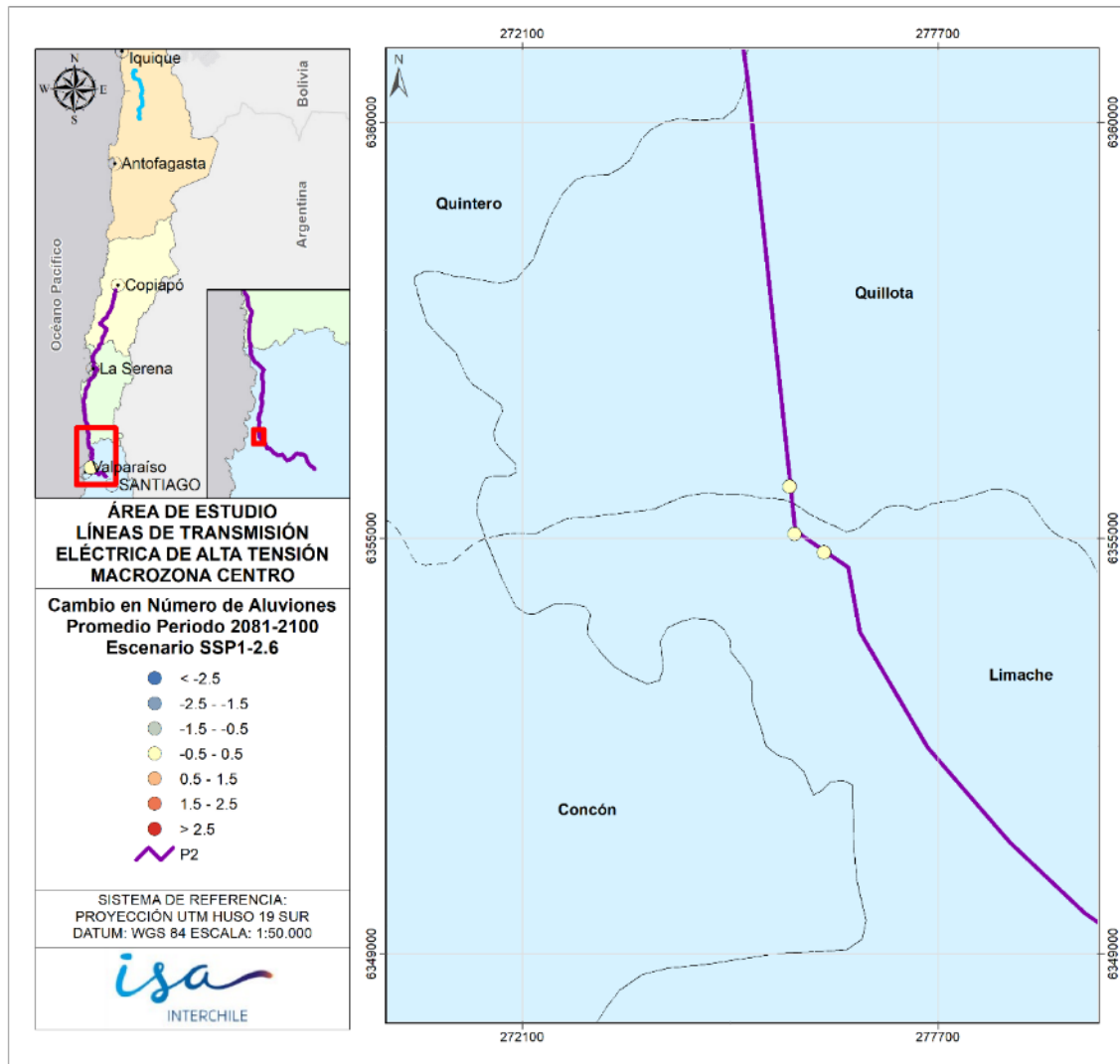


Figura 2-70: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP1-2.6.

Fuente: Elaboración propia.

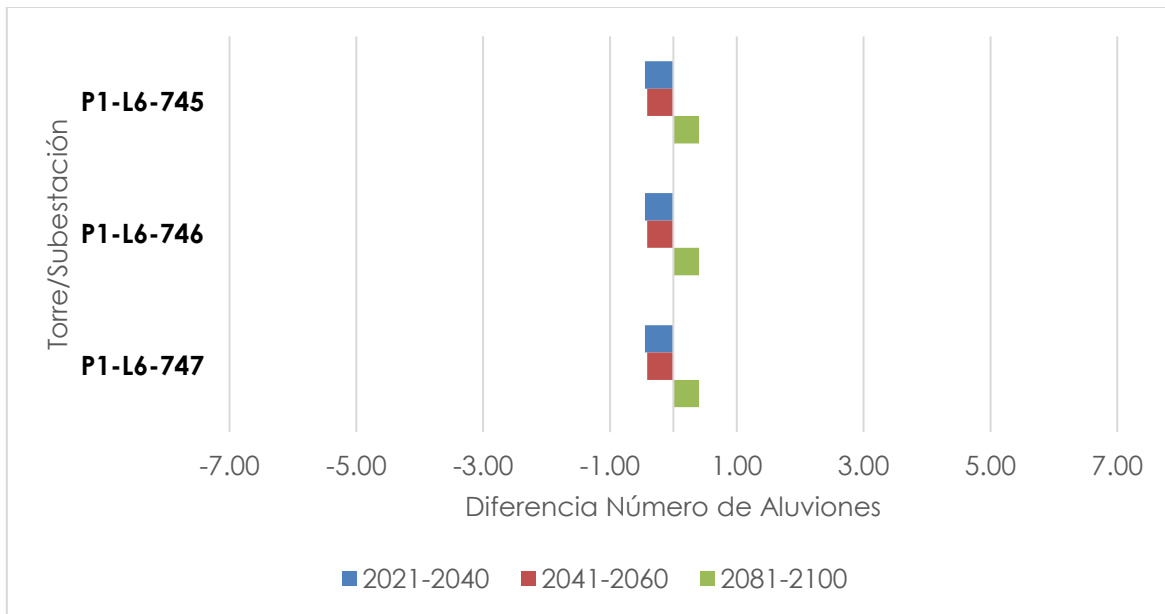


Figura 2-71: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP1-2.6.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2-21 presenta las estimaciones con base en las observaciones de estaciones de referencia, de los 4 modelos climáticos y el promedio de estos modelos para la Macrozona Centro en el periodo histórico, bajo el escenario SSP2-4.5. Luego, entre la Figura 2-72 y la Figura 2-74 se presenta el cambio proyectado en la ocurrencia de aluviones para cada infraestructura distribuida en el espacio por periodo entre la ventana de tiempo histórica y la futura cercana, intermedia y lejana del promedio de los modelos para la Macrozona Centro. La Figura 2-75 presenta los cambios promedio esperados en la ocurrencia de eventos aluvionales para un futuro cercano (2020-2040), intermedio (2040-2060) y lejano (2080-2100).

Se proyecta una tendencia al alza de las disminuciones de eventos, yendo desde 0,4 eventos menos por periodo en el corto plazo hasta cerca de 1 eventos menos por periodo hacia finales de siglo, por lo que en este escenario es consistente la disminución del riesgo.

Tabla 2-21: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Centro SSP2-4.5.

Torre_ID	Estación	ACCESS-CM2	ACCESS-ESM1-5	BCC-CSM2-MR	MPI-ESM1-2-LR	Promedio Modelos
P1-L6-745	3,05	3,08	3,45	2,60	2,70	2,96
P1-L6-746	3,05	3,08	3,45	2,60	2,70	2,96
P1-L6-747	3,05	3,08	3,45	2,60	2,70	2,96

Fuente: Elaboración propia.

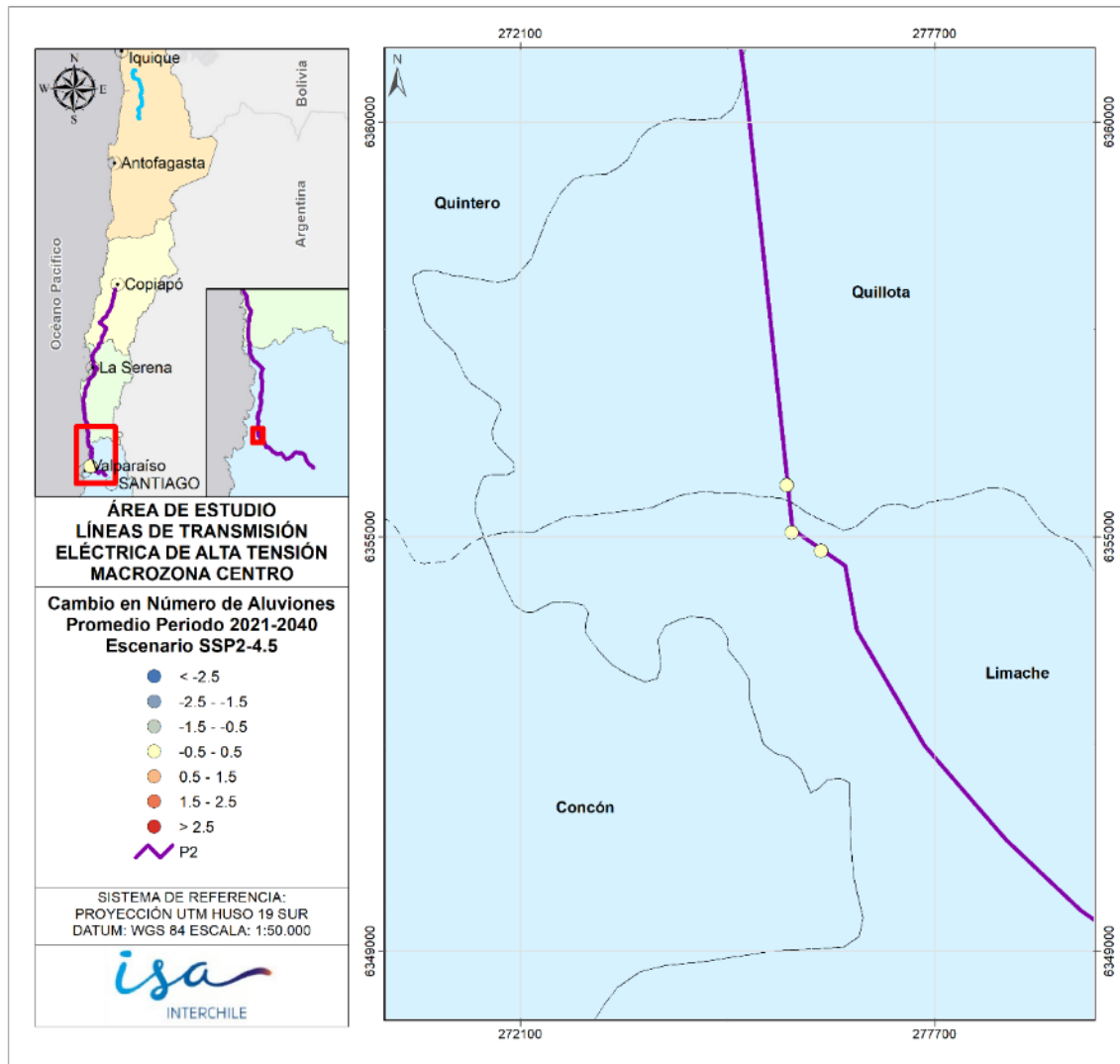


Figura 2-72: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP2-4.5.

Fuente: Elaboración propia.

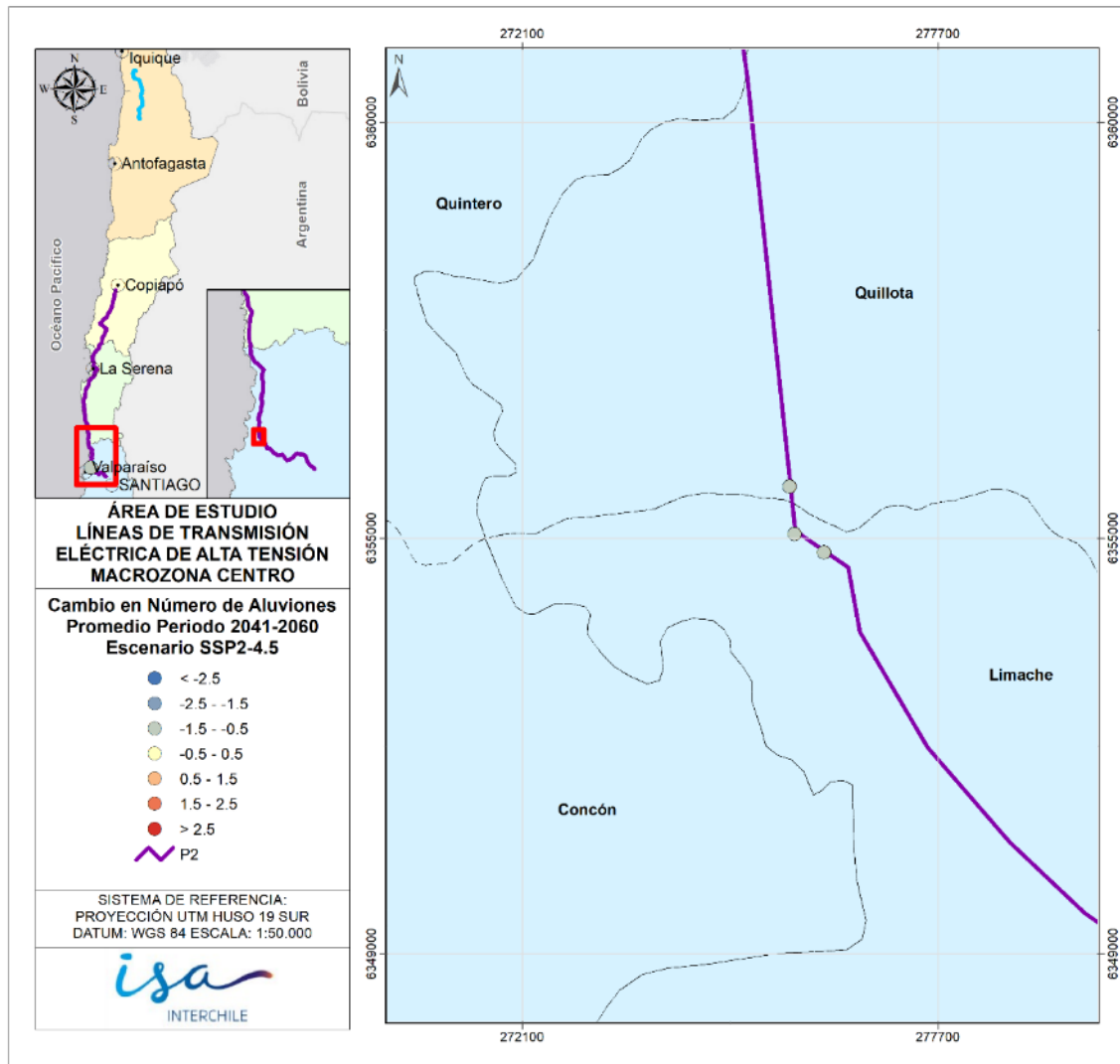


Figura 2-73: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP2-4.5.

Fuente: Elaboración propia.

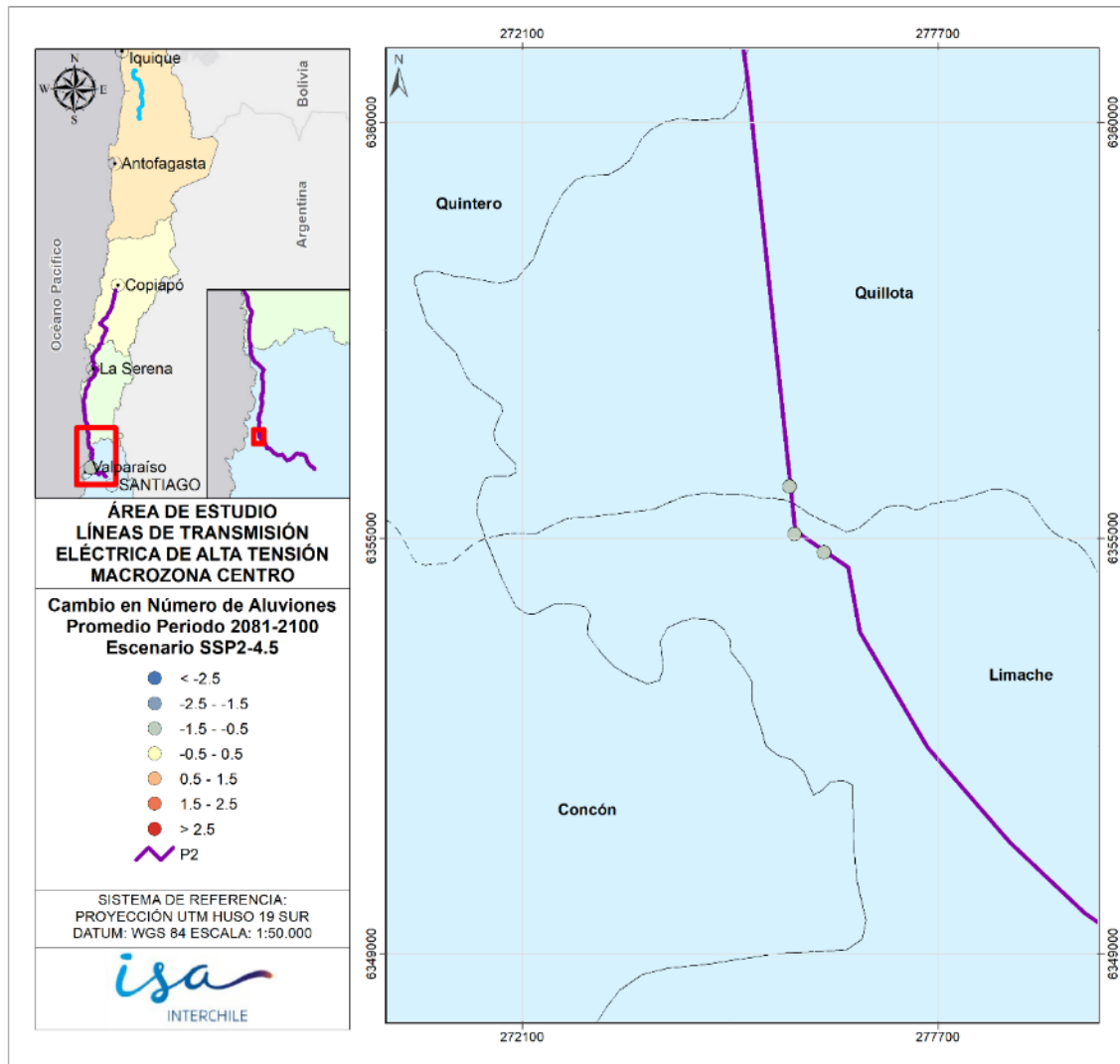


Figura 2-74: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP2-4.5.

Fuente: Elaboración propia.

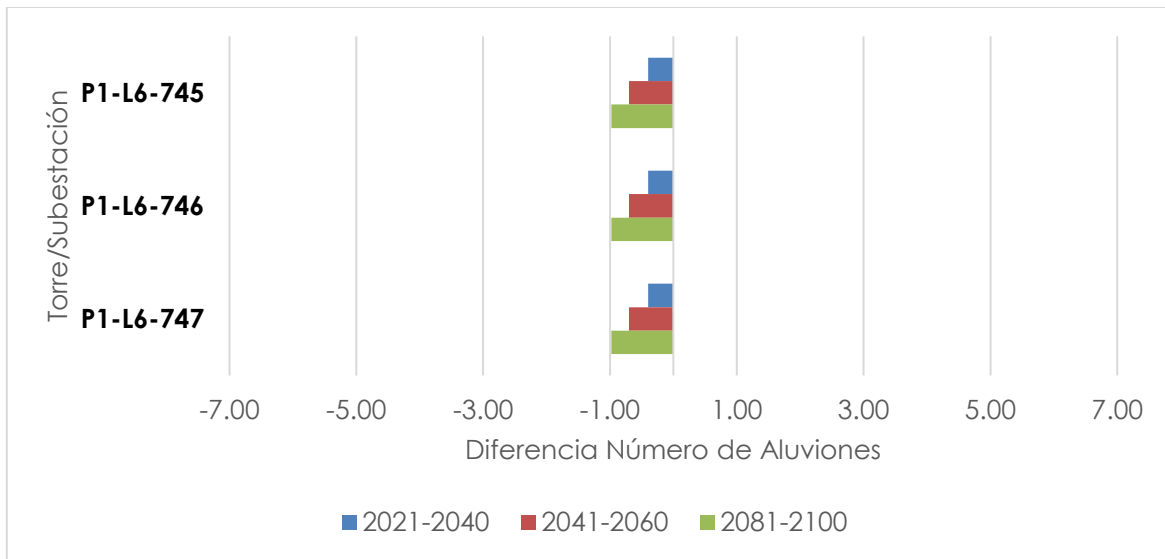


Figura 2-75: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP2-4.5.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2-22 presenta las estimaciones con base en las observaciones de estaciones de referencia, de los 4 modelos climáticos y el promedio de estos modelos para la Macrozona Centro en el periodo histórico, bajo el escenario SSP5-8.5. Luego, entre las Figura 2-76 y la Figura 2-78 se presenta el cambio proyectado en la ocurrencia de aluviones para cada infraestructura distribuida en el espacio por periodo entre la ventana de tiempo histórica y la futura cercana, intermedia y lejana del promedio de los modelos para la Macrozona Centro. La Figura 2-79 presenta los cambios promedio esperados en la ocurrencia de eventos aluvionales para un futuro cercano (2020-2040), intermedio (2040-2060) y lejano (2080-2100).

Este escenario proyecta una tendencia similar al SSP2-4.5, pero hacia finales de siglo las disminuciones en eventos son cerca de 2 para un periodo de 20 años. Es decir, si para el periodo 1985-2019, los modelos estimaron la ocurrencia de cerca de 3 eventos, hacia finales de siglo bajo el escenario SSP5-8.5, se esperaría que ocurra solo 1 evento. Para los horizontes de corto y mediano plazo, la reducción es cerca de 1 evento menos.

Tabla 2-22: Número de eventos aluvionales periodo histórico 1985-2019 en Macrozona Centro SSP5-8.5.

Torre_ID	Estación	ACCESS-CM2	ACCESS-ESM1-5	BCC-CSM2-MR	MPI-ESM1-2-LR	Promedio Modelos
P1-L6-745	3,05	3,14	2,46	3,57	3,38	3,14
P1-L6-746	3,05	3,14	2,46	3,57	3,38	3,14
P1-L6-747	3,05	3,14	2,46	3,57	3,38	3,14

Fuente: Elaboración propia.

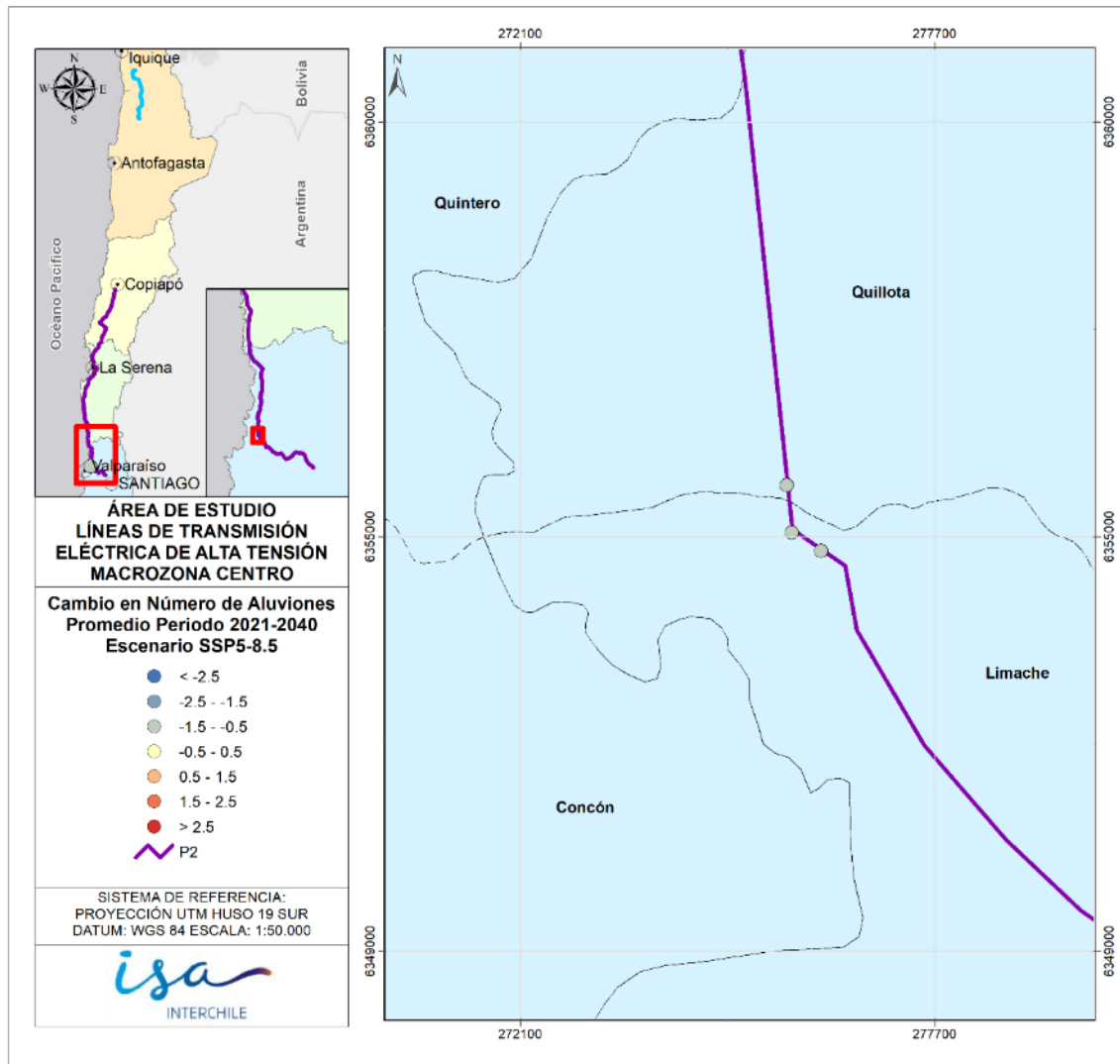


Figura 2-76: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2020-2040, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP5-8.5.

Fuente: Elaboración propia.

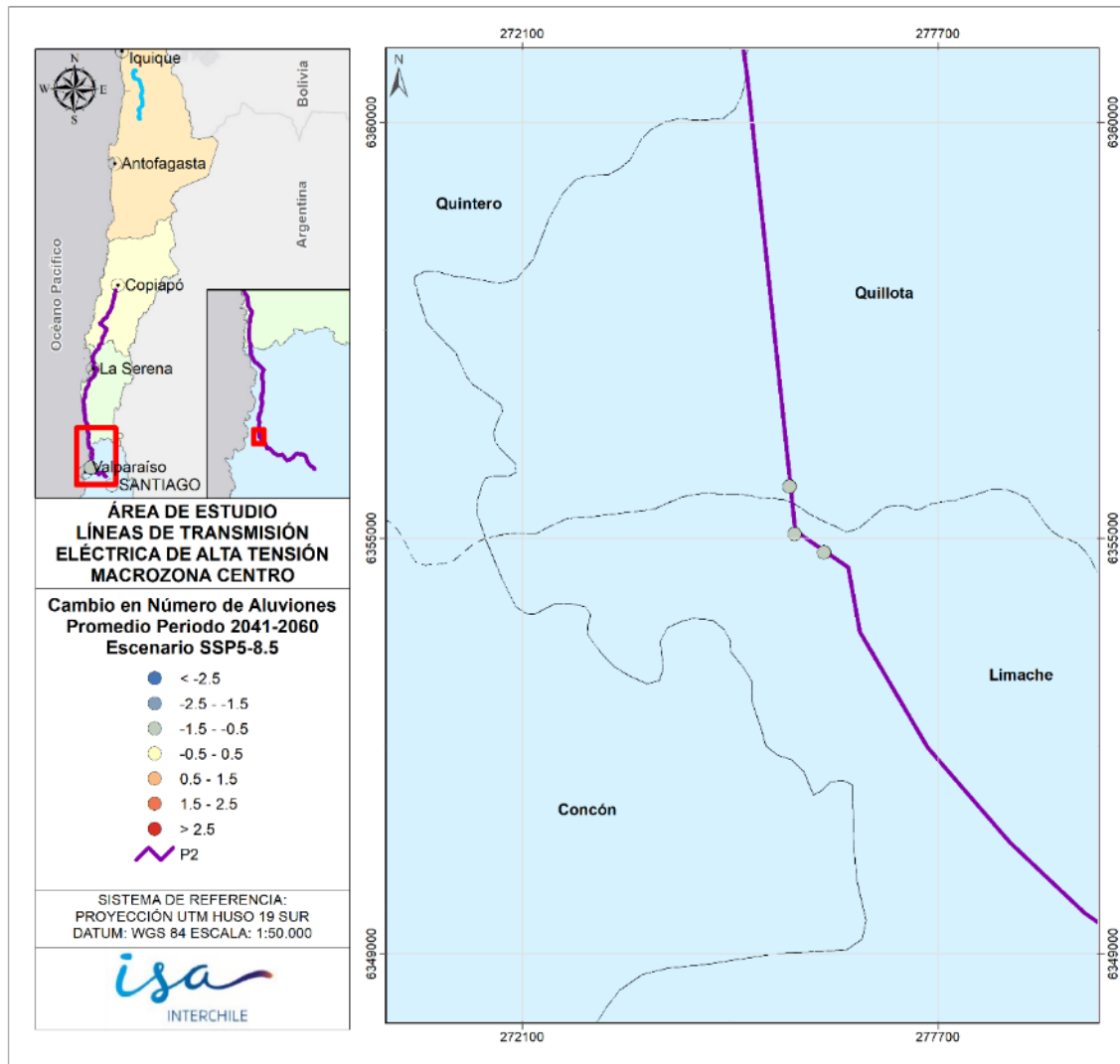


Figura 2-77: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2040-2060, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP5-8.5.
Fuente: Elaboración propia.

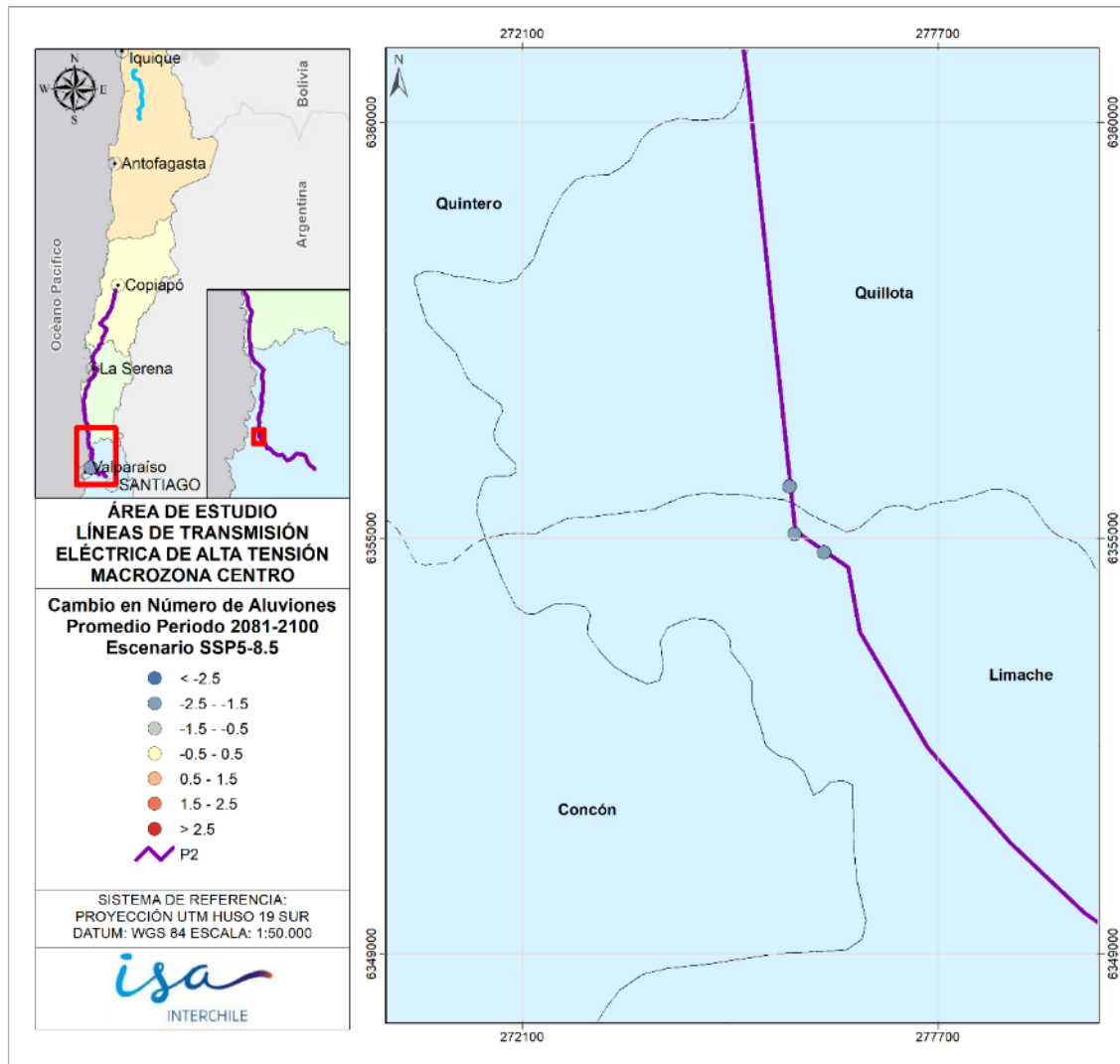


Figura 2-78: Diferencia de aluviones esperados para periodo 2080-2100, respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP5-8.5.
Fuente: Elaboración propia.

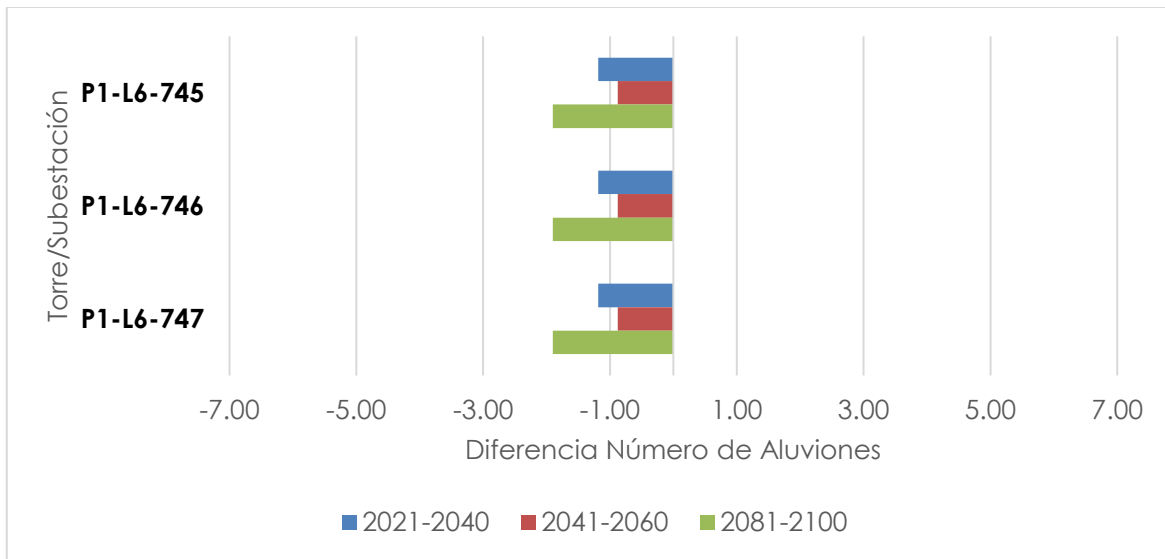


Figura 2-79: Diferencia de aluviones esperados para periodo de 20 años respecto de línea de base (1985-2019) Macrozona Centro, Escenario SSP5-8.5.

Fuente: Elaboración propia.

2.5.4 Cambios en ocurrencia de incendios

Como se presentó en los capítulos 2.2.4 y 2.3.3, para la caracterización de la amenaza, se utilizó un modelo Random Forest (RF) para predecir la probabilidad de incendios. La variable objetivo (probabilidad de incendios), fue calculada a una precisión de 1km ya que a un tamaño de voxel más pequeño, el tamaño de la base de datos no permitía calcular el RF; a su vez, esta variable exhibe una distribución 'zero-inflated', lo que significa que hay una abundancia de ceros en comparación con los demás valores. Para manejar esta situación, se ha implementado una estrategia de muestreo específica, donde se ha seleccionado una muestra de instancias aleatorias con valores de la variable igual a uno (1), y se ha tomado una muestra tres veces más grande, también de manera aleatoria, de instancias con valores iguales a cero (0). Esta técnica se utiliza con el propósito de equilibrar el conjunto de datos y asegurar que el modelo Random Forest tenga en cuenta adecuadamente tanto los casos en los que la variable es cero como aquellos en los que es uno (ocurrencia de un evento de incendio). Al generar un conjunto de datos balanceado, se busca mejorar la capacidad del modelo para aprender patrones significativos y realizar predicciones precisas, especialmente cuando se trata con variables zero-inflated que presentan desafíos particulares en términos de sesgo hacia ceros.

Cuando se implementa un Random Forest, se utiliza una técnica de medición de desempeño llamada "Out-of-Bag" (OOB) para evaluar el rendimiento del modelo sin la necesidad de un conjunto de prueba adicional. El conjunto de datos de entrenamiento se divide en diferentes subconjuntos para entrenar cada árbol individual, y cada árbol se valida utilizando las instancias que no forman parte de su subconjunto de entrenamiento, es decir, el *Out-of-Bag* (los fuera de la bolsa). Esta evaluación OOB proporciona una estimación imparcial del rendimiento del modelo.

La precisión (*Accuracy*) es una métrica fundamental que mide la proporción de predicciones correctas realizadas por el modelo sobre el conjunto de datos total. Es calculada dividiendo el número de predicciones correctas por el total de instancias. La precisión es útil para evaluar la capacidad general del modelo para clasificar correctamente las instancias.

Además de la precisión, el índice Kappa es otra métrica importante para evaluar la calidad del modelo. Kappa tiene en cuenta la tasa de aciertos esperada al azar y ajusta la precisión observada en consecuencia, tal y como se muestra en la Figura 2-80. Proporciona una medida de la concordancia entre las predicciones del modelo y las observaciones reales, teniendo en cuenta la posibilidad de que los aciertos sean producto del azar. Un valor de Kappa cercano a 1 indica un buen acuerdo entre las predicciones y las observaciones más allá de lo que se esperaría por azar.

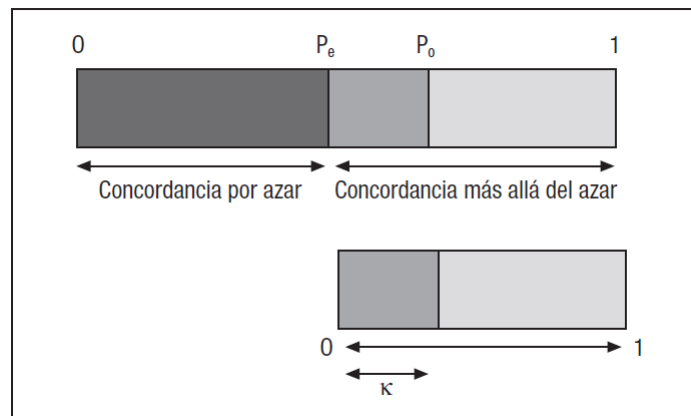


Figura 2-80: Representación gráfica del índice kappa.
Fuente: Abraira, 2001.

A continuación, en la Tabla 2-23 se presentan estos tres indicadores para todos los modelos ajustados de Random Forest.

Tabla 2-23: Estadísticos de rendimiento de los modelos de Random forest utilizados para el cálculo de la Amenaza – Probabilidad de incendios para el área de estudio.

Zona	Modelo	SSP	OOB Error	Accuracy	Kappa
Centro	ACCESS_CM2	SSP1-2.6	20,06%	0,79	0,40
Centro	ACCESS_CM2	SSP2-4.5	19,61%	0,9	0,42
Centro	ACCESS_CM2	SSP5-8.5	20,21%	0,81	0,45
Centro	ACCESS_ESM1-5	SSP1-2.6	19,57%	0,8	0,42
Centro	ACCESS_ESM1-5	SSP2-4.5	20,06%	0,81	0,44
Centro	ACCESS_ESM1-5	SSP5-8.5	19,42%	0,81	0,43
Centro	BCC_CSM2-MR	SSP1-2.6	19,68%	0,8	0,43
Centro	BCC_CSM2-MR	SSP2-4.5	20,02%	0,8	0,43
Centro	BCC_CSM2-MR	SSP5-8.5	19,61%	0,8	0,42
Centro	MPI-ESM1-2-LR	SSP1-2.6	19,49%	0,8	0,43
Centro	MPI-ESM1-2-LR	SSP2-4.5	20,29%	0,81	0,44
Centro	MPI-ESM1-2-LR	SSP5-8.5	19,95%	0,8	0,42
CentroNorte2	BCC-CSM2-MR	SSP1-2.6	23,33%	0,84	0,41
CentroNorte2	BCC-CSM2-MR	SSP2-4.5	26,67%	0,81	0,28
CentroNorte2	BCC-CSM2-MR	SSP5-8.5	25%	0,83	0,38
CentroNorte2	CIESM	SSP1-2.6	25%	0,84	0,38
CentroNorte2	CIESM	SSP2-4.5	21,67%	0,81	0,33
CentroNorte2	CIESM	SSP5-8.5	23,75%	0,84	0,41
CentroNorte2	MPI-ESM1-2-LR	SSP1-2.6	25,42%	0,83	0,43
CentroNorte2	MPI-ESM1-2-LR	SSP2-4.5	22,92%	0,8	0,29
CentroNorte2	MPI-ESM1-2-LR	SSP5-8.5	25,83%	0,81	0,3
CentroNorte2	NESM3	SSP1-2.6	24,17%	0,84	0,4
CentroNorte2	NESM3	SSP2-4.5	25,83%	0,83	0,4
CentroNorte2	NESM3	SSP5-8.5	22,50%	0,82	0,38

Fuente: Elaboración propia.

La media del error OOB es del 19,83% para la macrozona Centro, y un 24,34% para la macrozona CentroNorte2; el Accuracy tiene una media de 80,24% en la macrozona Centro y de 82,45% para la macrozona CentroNorte2; finalmente, el Kappa medio de la macrozona Centro es de 42,73% (considerado como grado de acuerdo moderado según Abraira (2001)) y de 36,57% (considerado como grado de acuerdo mediano según Abraira (2001)), para la macrozona CentroNorte2.

Para mostrar la capacidad de predicción de los modelos de Random Forest generados, presentan en las Figura 2-81 y Figura 2-82 la predicción del período histórico de la media de los modelos para el SSP5-8.5 en conjunto con los incendios en el período 2003-2022 se para las macrozonas Centro y CentroNorte2 respectivamente:

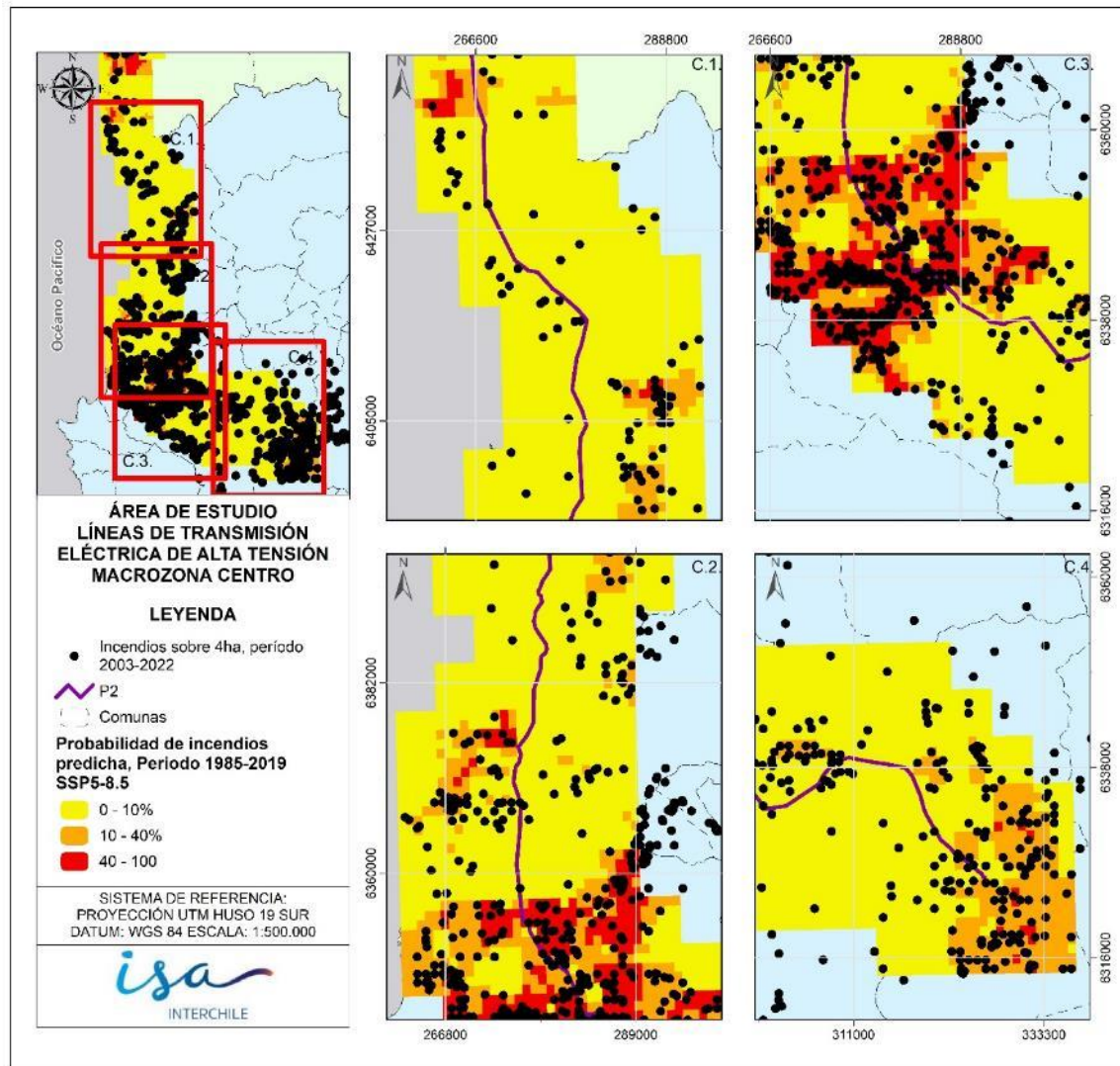


Figura 2-81: Probabilidad de incendios predicha en la macrozona Centro por el modelo RF, media de los modelos, SSP5-8.5, en conjunto con los incendios observados en el período 2003-2022.

Fuente: Elaboración propia.

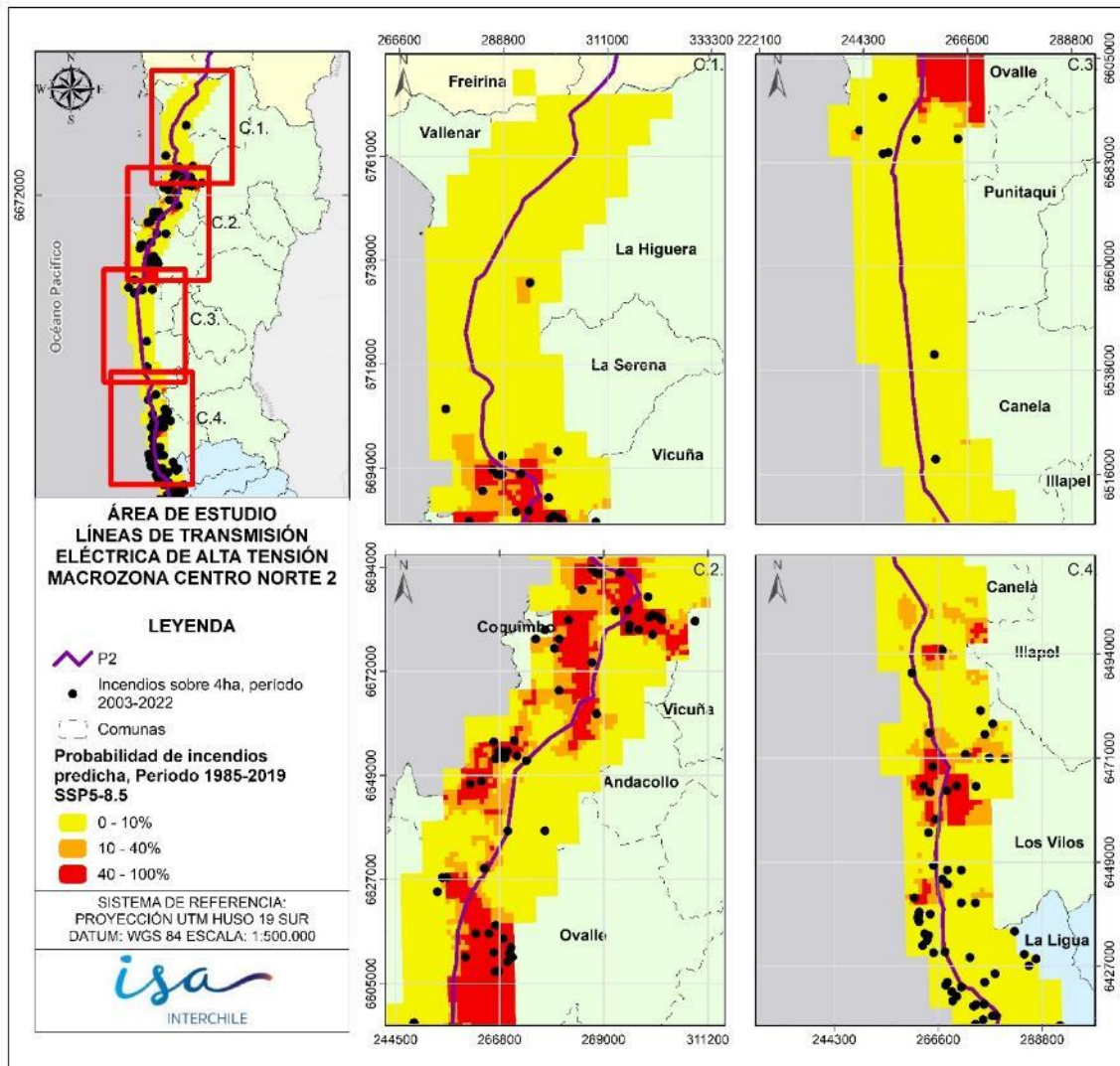


Figura 2-82: Probabilidad de incendios predicha en la macrozona CentroNorte2 por el modelo RF, media de los modelos, SSP5-8.5, en conjunto con los incendios observados en el periodo 2003-2022.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2-83, Figura 2-84 y Figura 2-85 se muestran los cambios absolutos entre el periodo histórico y los periodos futuros para la probabilidad de incendios en el escenario SSP1-2.6, para la macrozona Centro, generado por las predicciones del modelo RF.

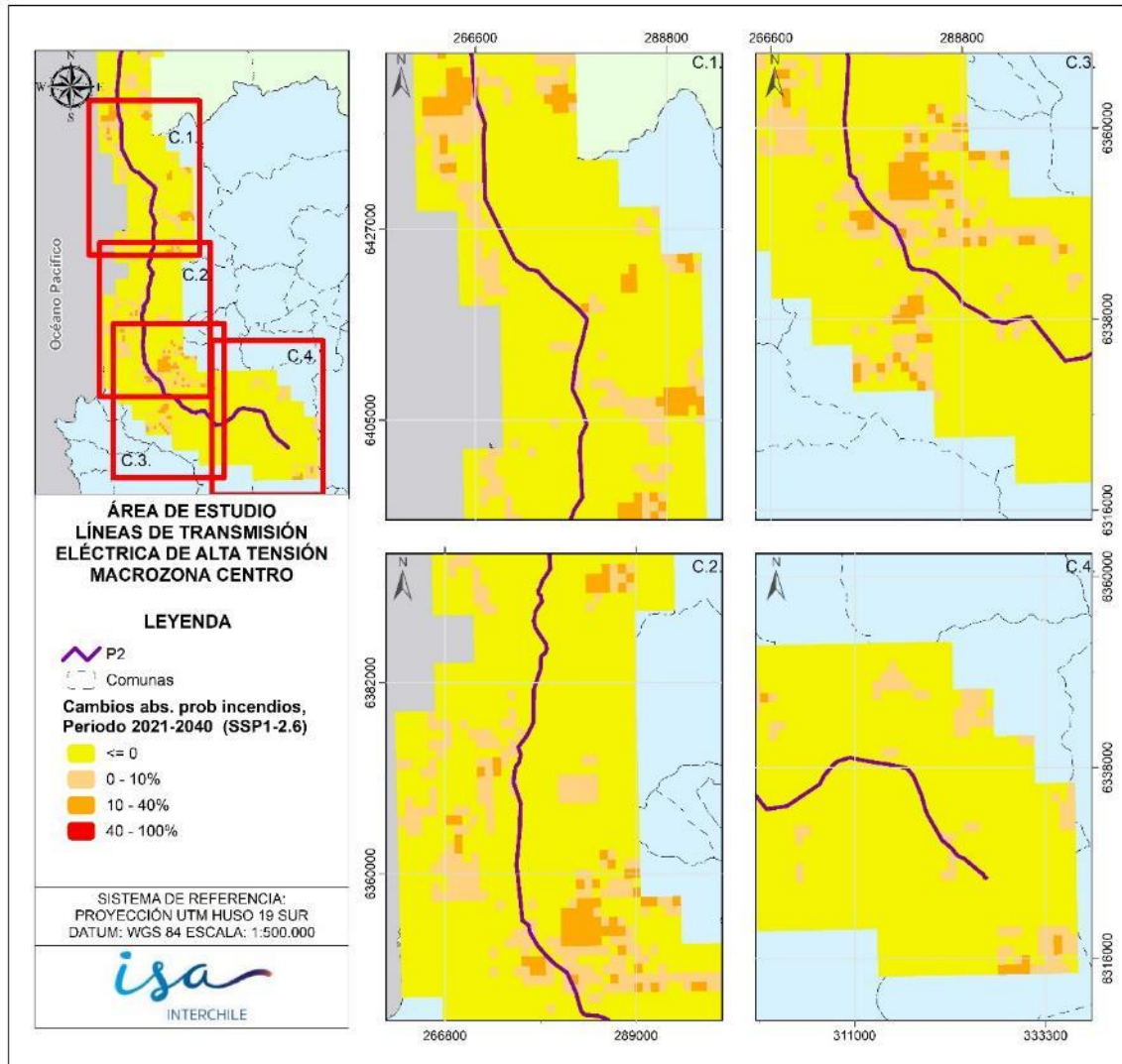


Figura 2-83: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro cercano (2020-2040), media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

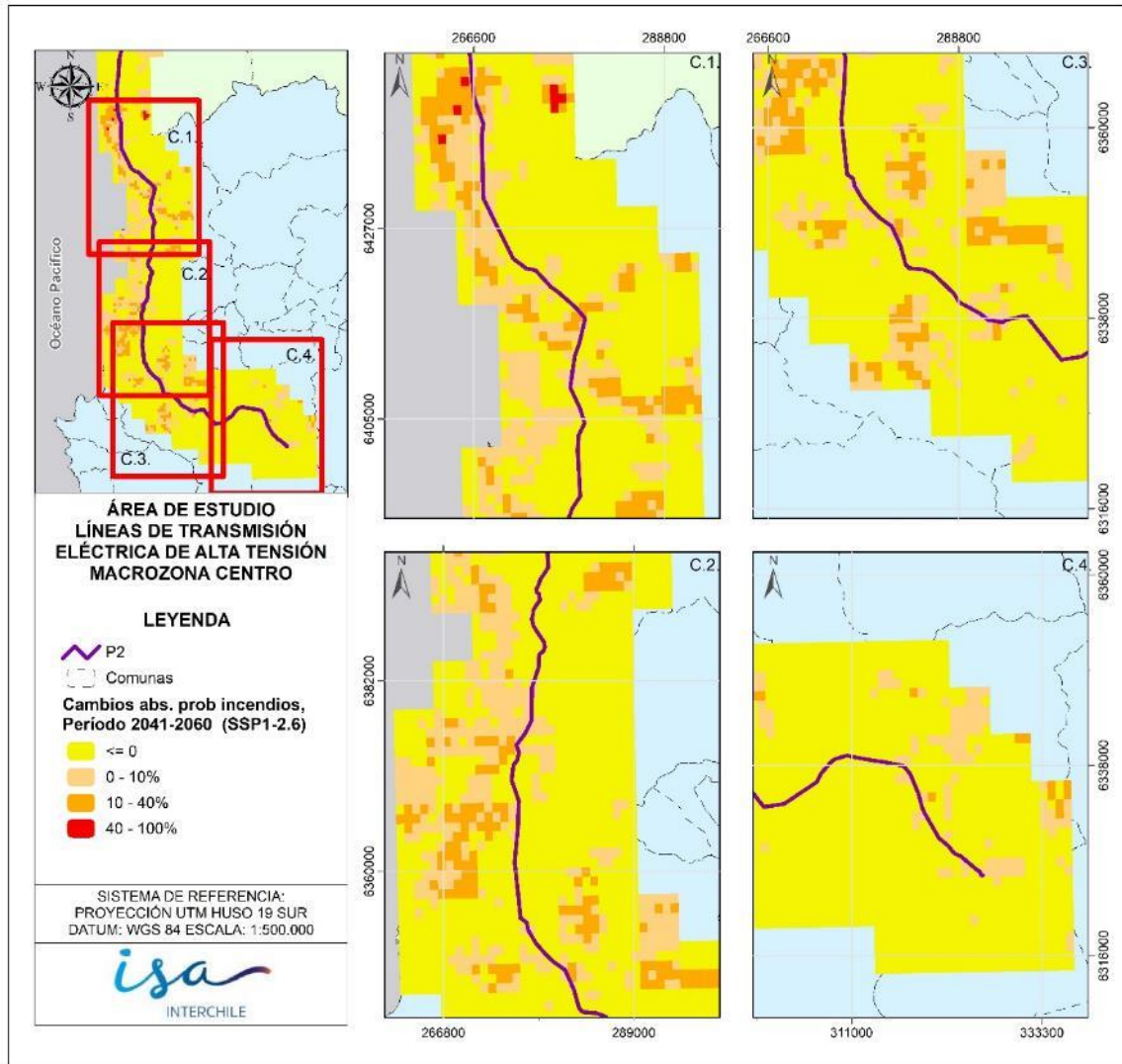


Figura 2-84: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro medio (2040-2060), media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

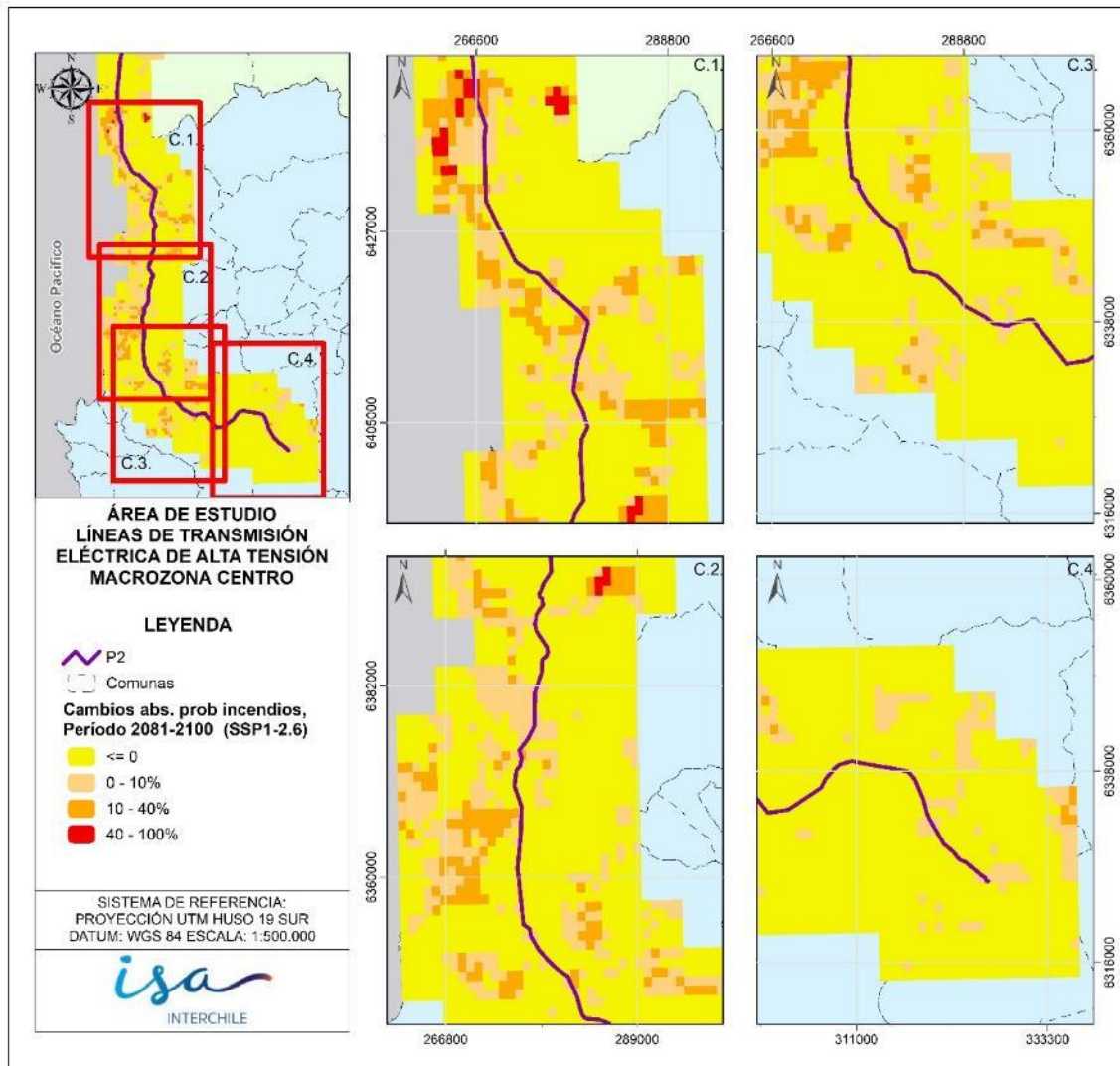


Figura 2-85: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro lejano (2080-2100), media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

En las figuras anteriores se puede apreciar un cambio leve, paulatino y creciente en la probabilidad de incendios para el escenario SSP1-2.6, siendo el que presenta mayor aumento, el período futuro lejano (2080-2100), sobre todo en la zona costera de la Región de Valparaíso, área que posee más registros de incendios (ver Figura 2-81).

A continuación, en la Figura 2-86, Figura 2-87 y Figura 2-88 se presentan los cambios absolutos entre el periodo histórico y los periodos futuros para la probabilidad de incendios en el SSP1-2.6 para la zona CentroNorte2 generada por las predicciones del modelo RF.

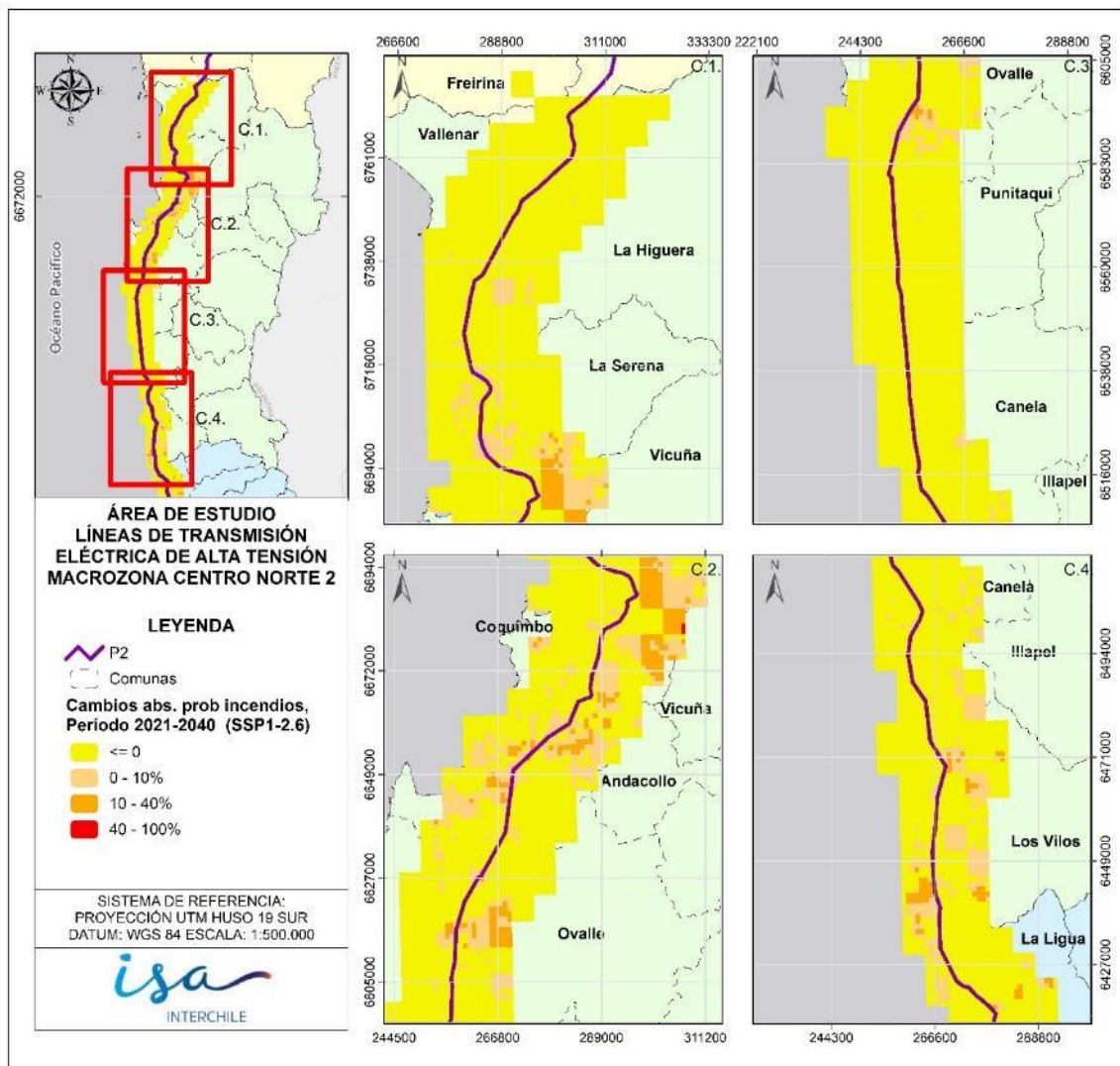


Figura 2-86: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro cercano (2020-2040), media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

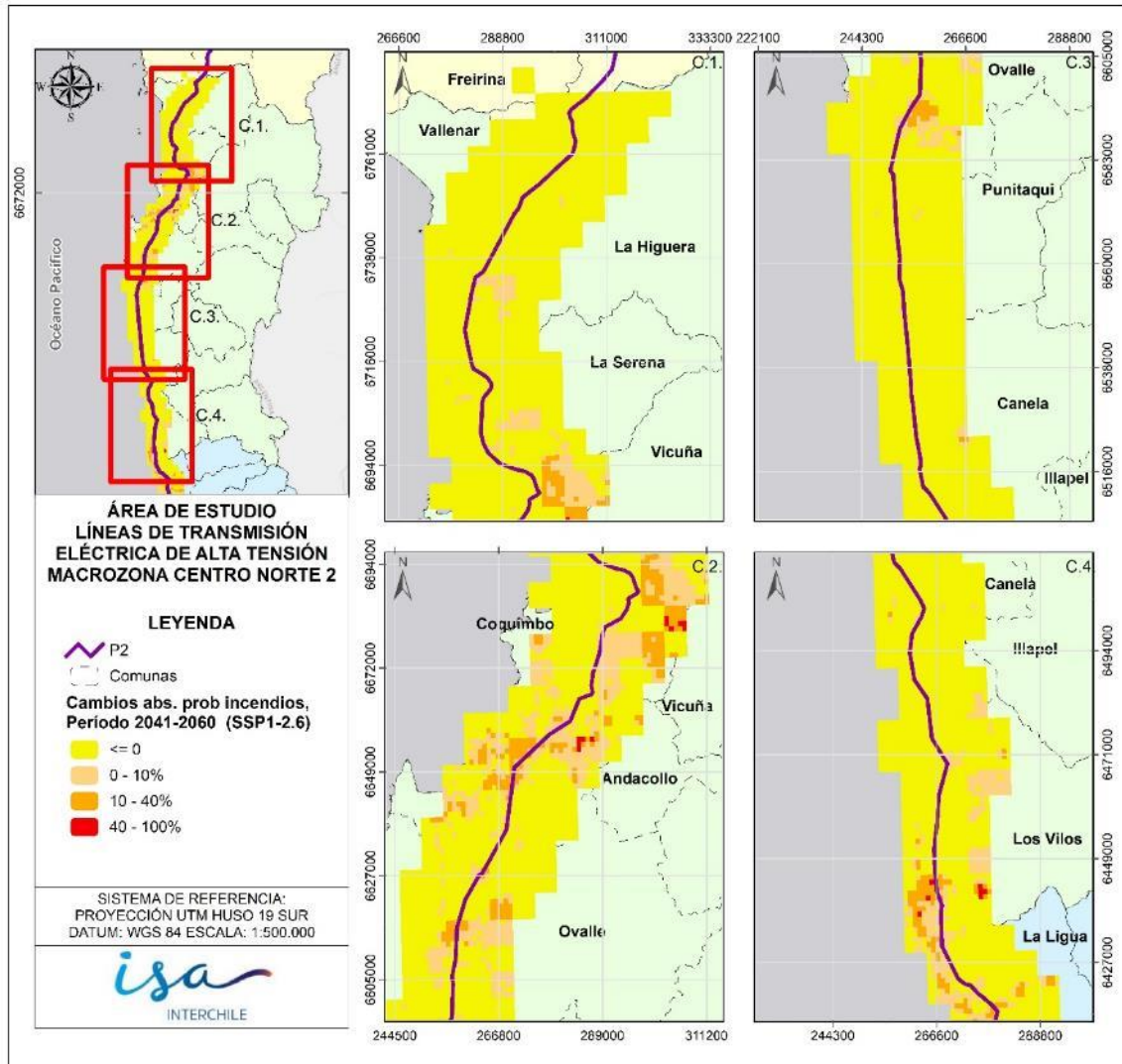


Figura 2-87: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro medio (2040-2060), media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

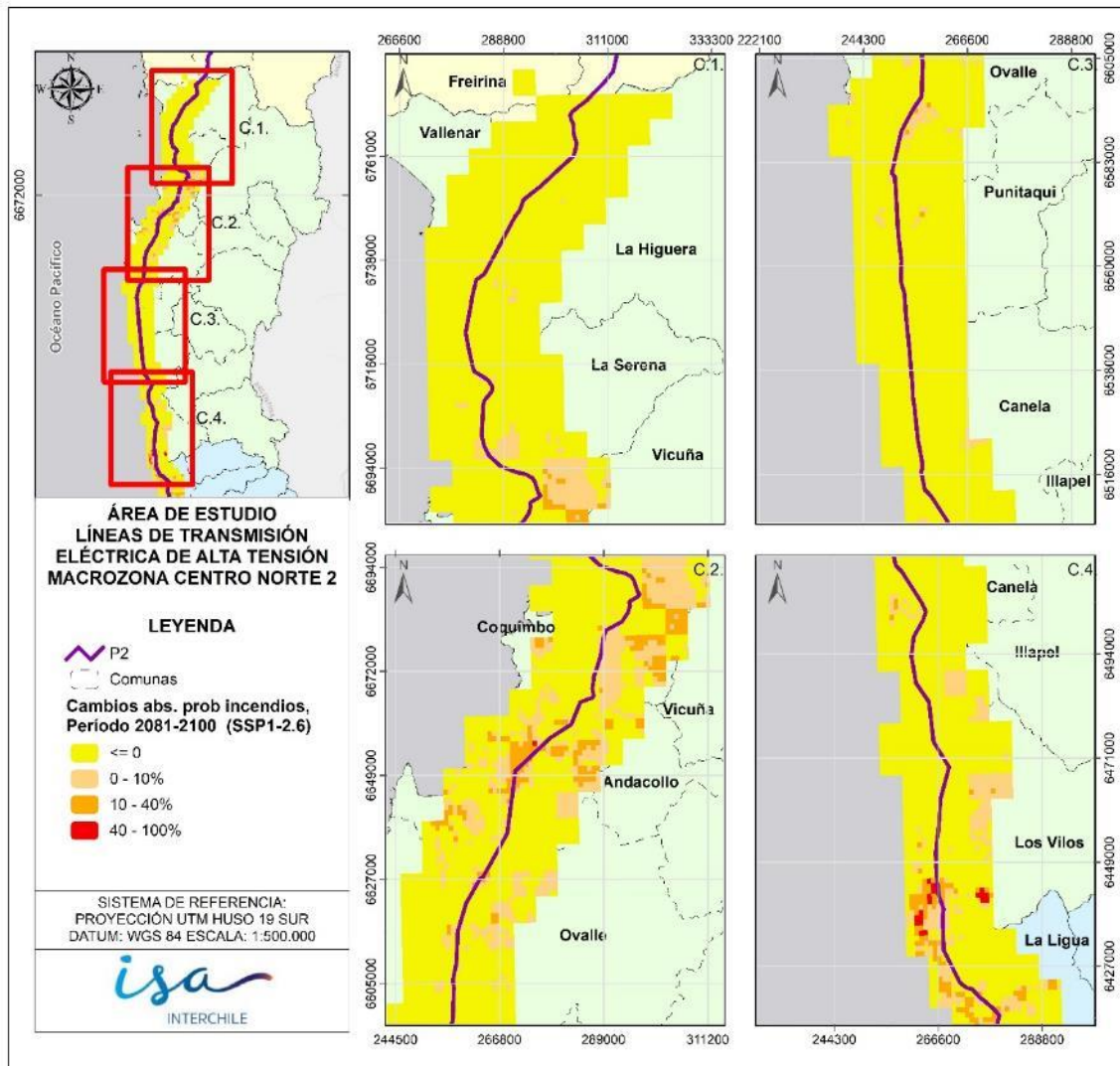


Figura 2-88: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro lejano (2080-2100), media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en los cambios absolutos de la macrozona Centro, en la macrozona CentroNorte2 se aprecia un aumento en la probabilidad de incendios a medida que nos movemos por los escenarios futuros, principalmente entre La Ligua y Los Vilos (casilla C.4 de las figuras anteriores) y entre las comunas de Andacollo, Vicuña, Coquimbo y La Serena.

De la misma forma, las figuras a continuación (Figura 2-89, Figura 2-90 y Figura 2-91) muestran los mismos cambios entre períodos para el escenario SSP2-4.5.

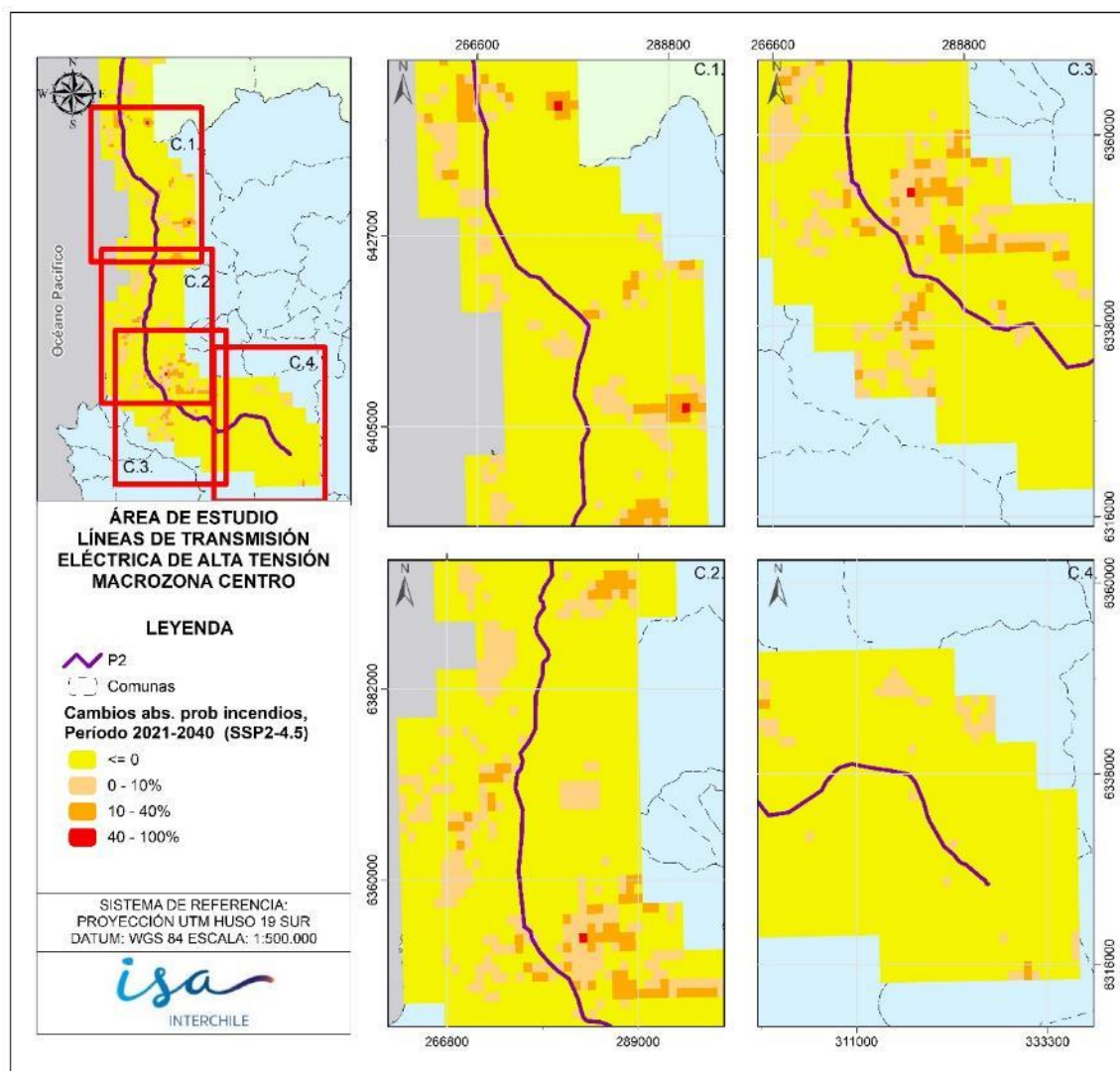


Figura 2-89: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro cercano (2020-2040), media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

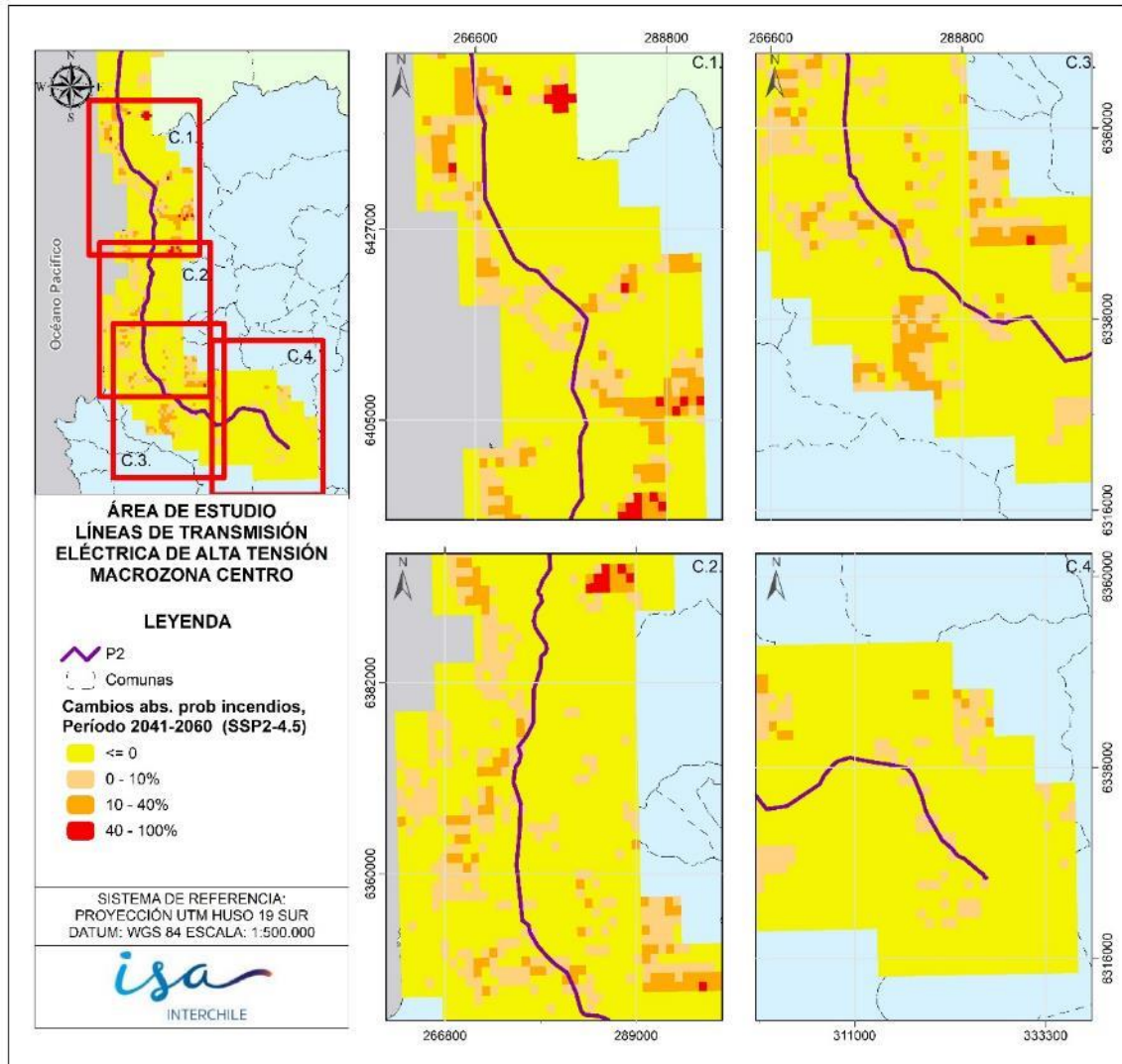


Figura 2-90: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro medio (2040-2060), media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

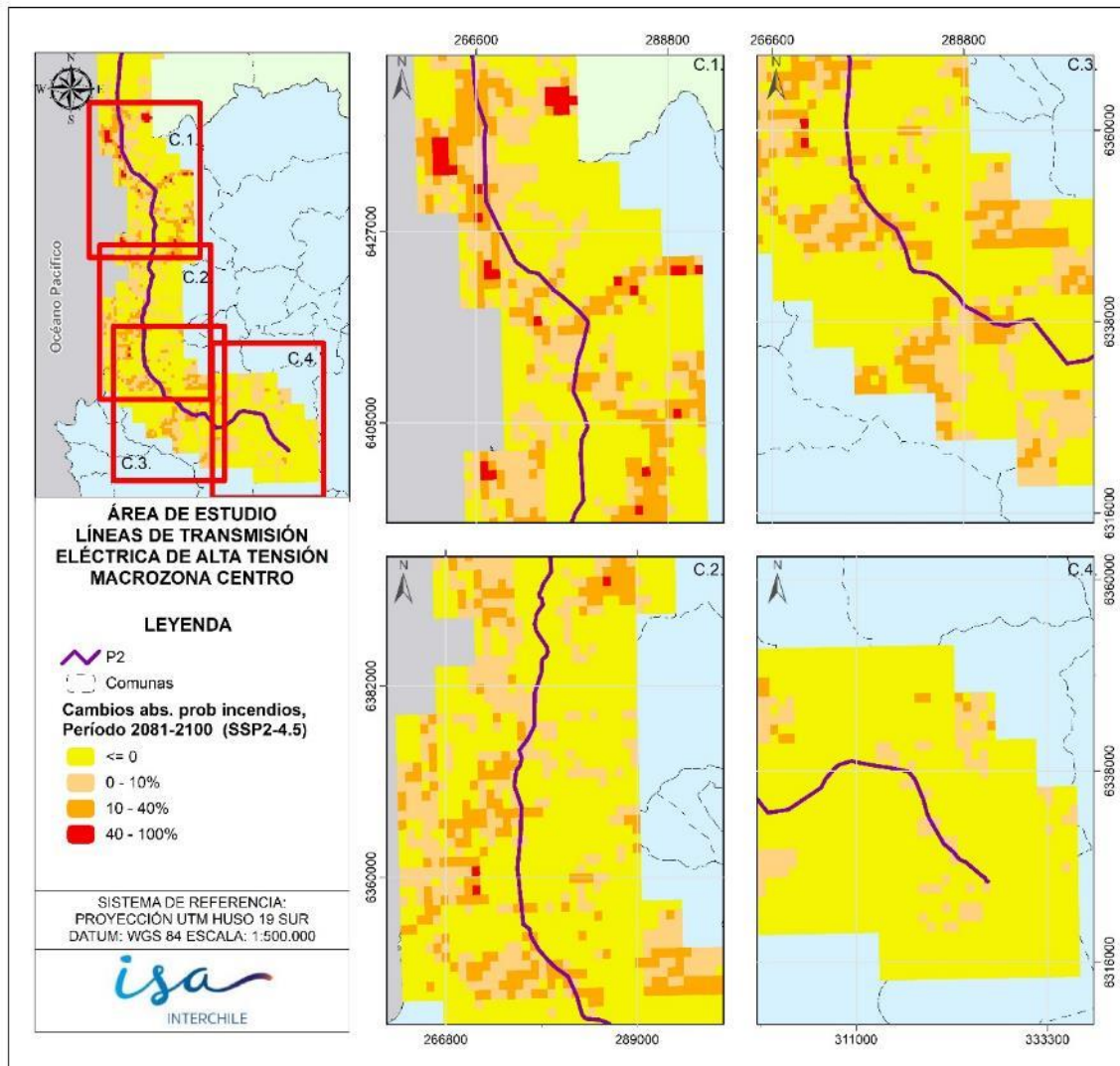


Figura 2-91: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro lejano (2080-2100), media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

En este escenario (SSP2-4.5) se ven que los cambios absolutos en la probabilidad de incendios son mayores a los presentados en el SSP1-2.6), siendo en el período futuro lejano (2080-2100) donde el aumento es notorio en toda la macrozona Centro, sobre todo los cambios entre 0 y 10% y con apariciones significativas de cambios por sobre el 20% en la zona costera de la Región de Valparaíso.

Las figuras a continuación (Figura 2-92, Figura 2-93 y Figura 2-94) presentan los cambios en probabilidad de incendios en el escenario SSP2-4.5 para la macrozona CentroNorte2.

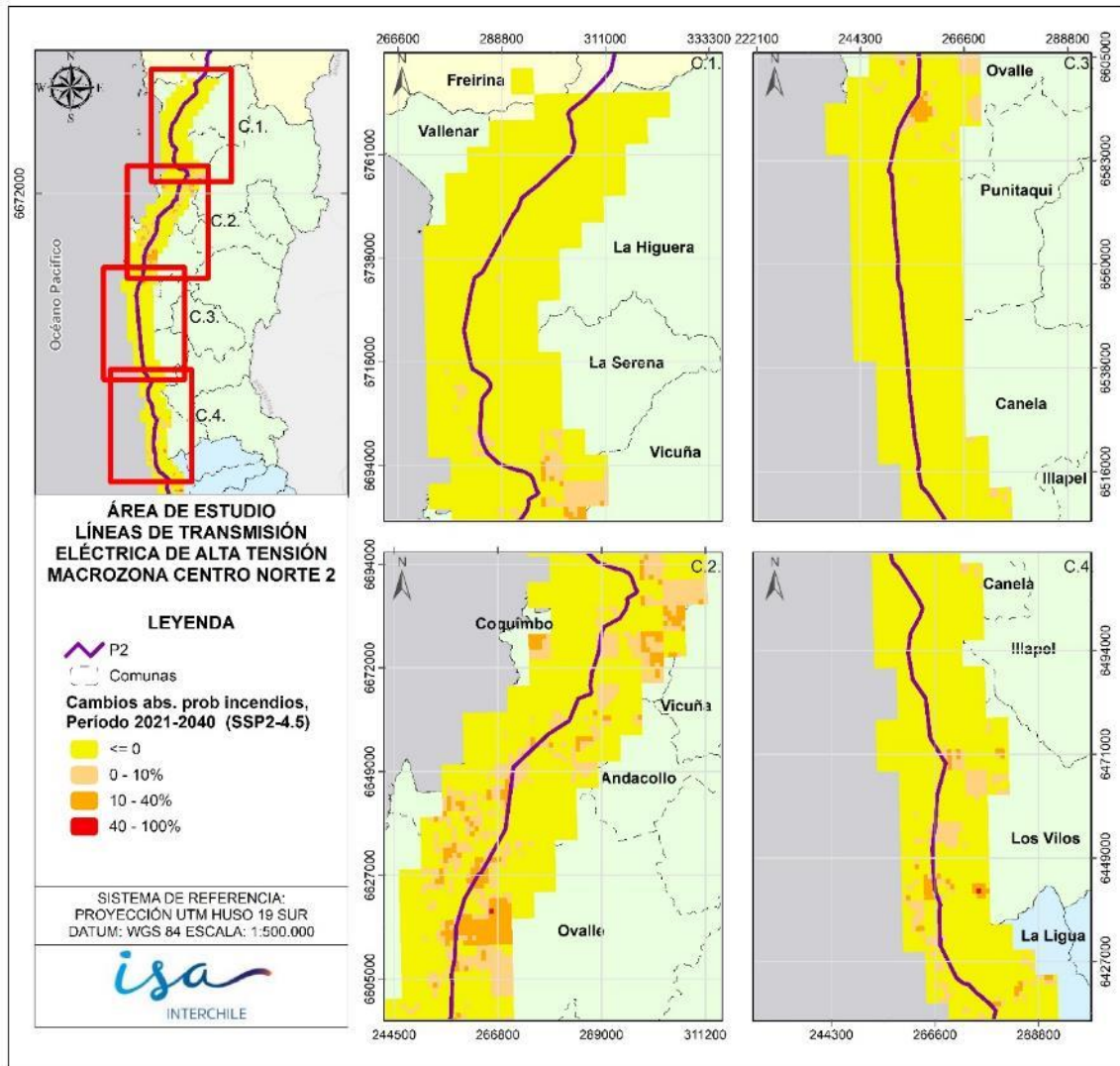


Figura 2-92: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro cercano (2020-2040), media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

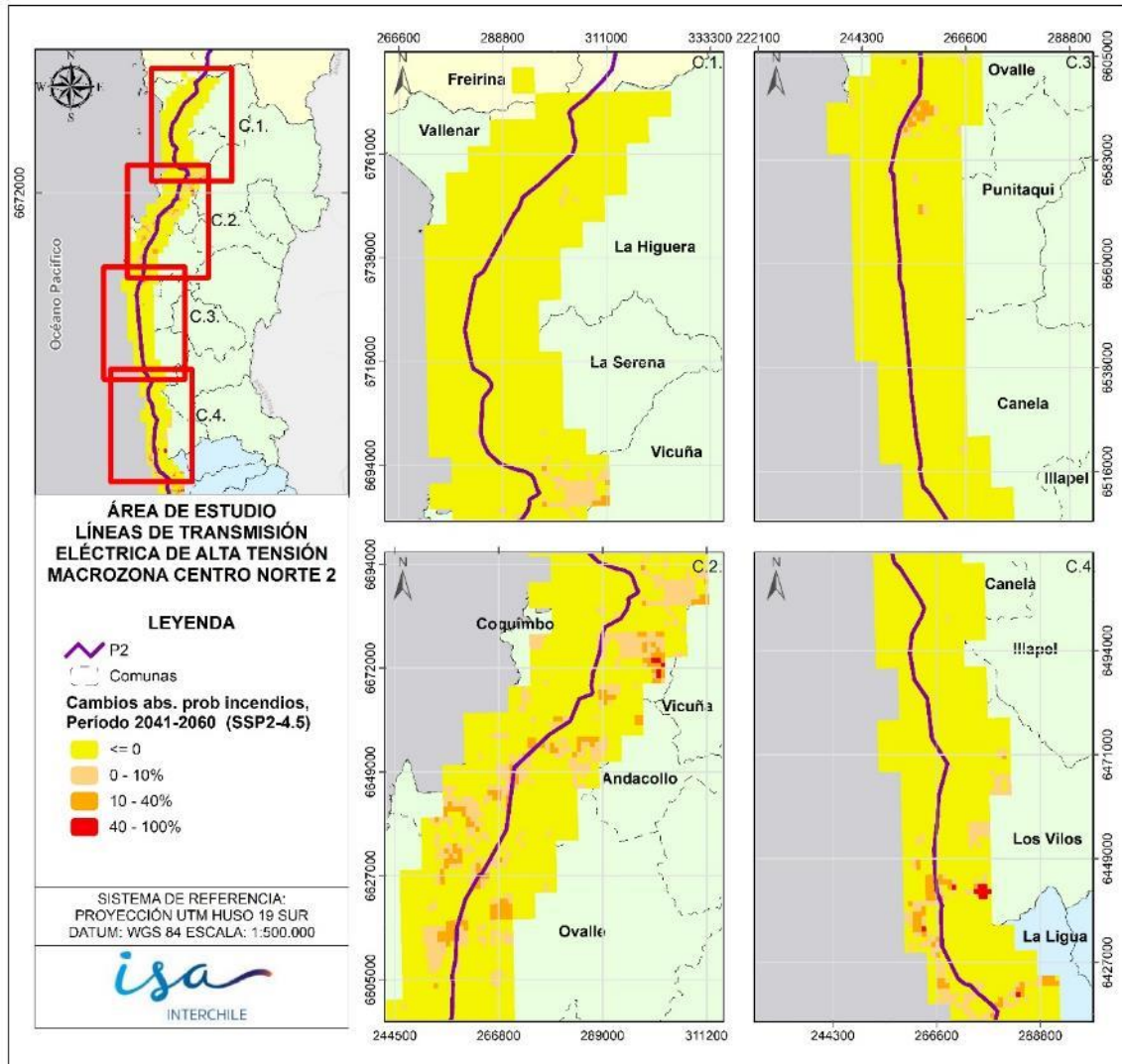


Figura 2-93: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro medio (2040-2060), media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

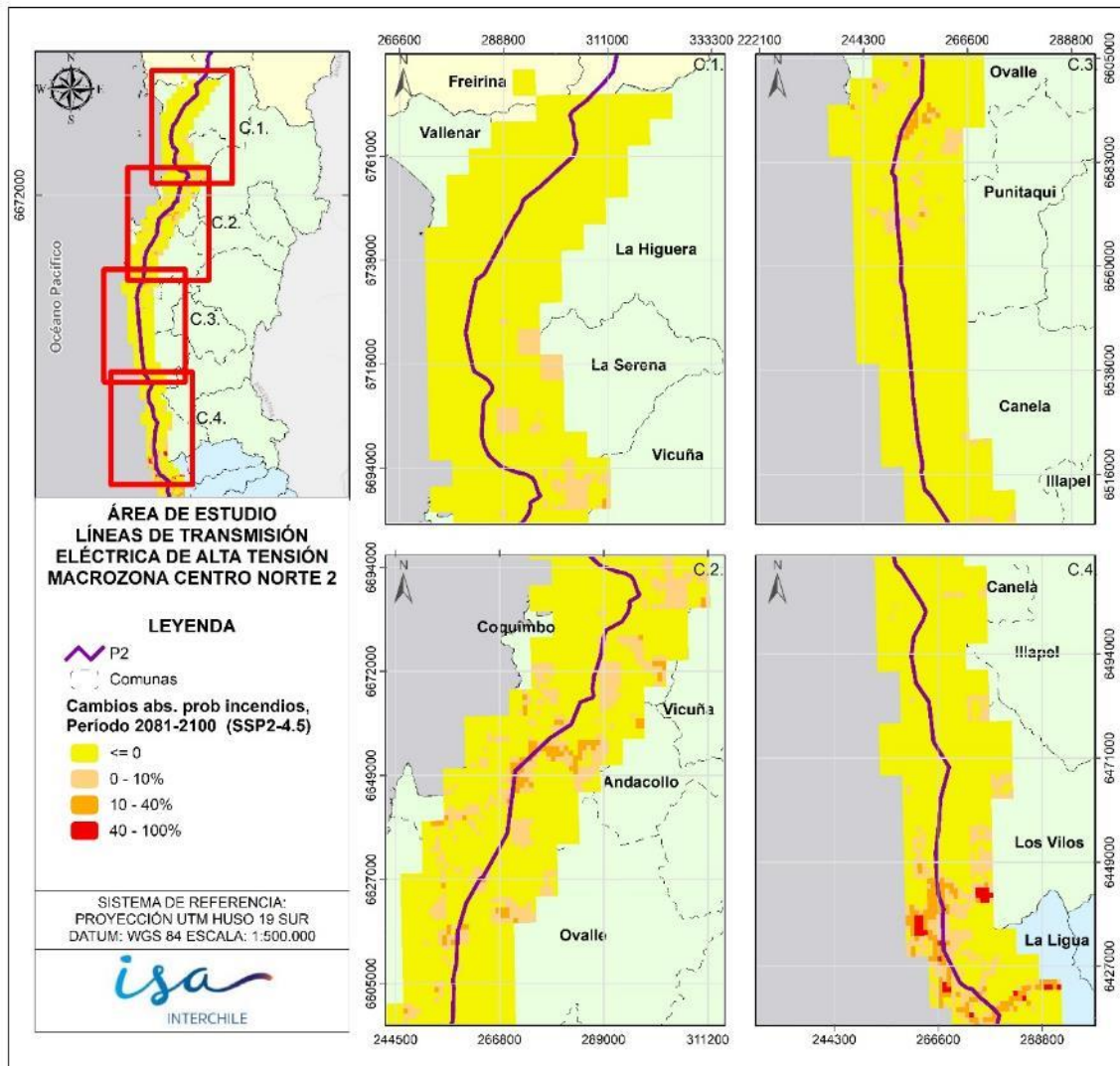


Figura 2-94: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro lejano (2080-2100), media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

Los cambios absolutos que se observan en la Figura 2-92 muestran un aumento en la probabilidad de incendios en zonas específicas entre La Serena y Ovalle, las cuales se atenúan en los siguientes escenarios, sin embargo, en la zona de La Ligua Los Vilos (C.4 en la Figura 2-94) hay un aumento considerable de áreas que aumentan su probabilidad en los periodos futuros medio (2040-2060) y lejano (2080-2100).

A continuación, en la Figura 2-95, Figura 2-96 y Figura 2-97, se presentan los cambios entre períodos para el escenario SSP5-8.5 para la macrozona Centro.

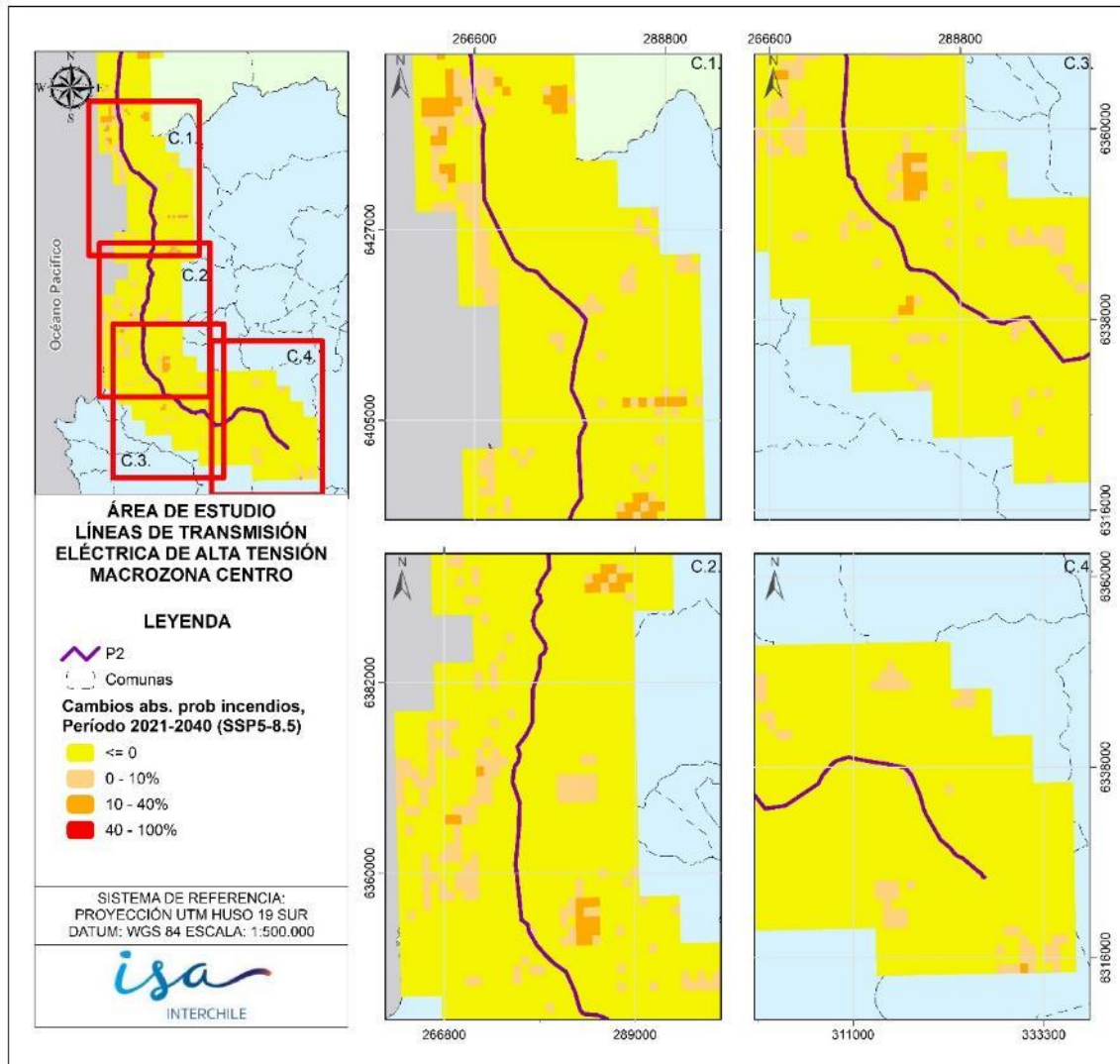


Figura 2-95: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro cercano (2020-2040), media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

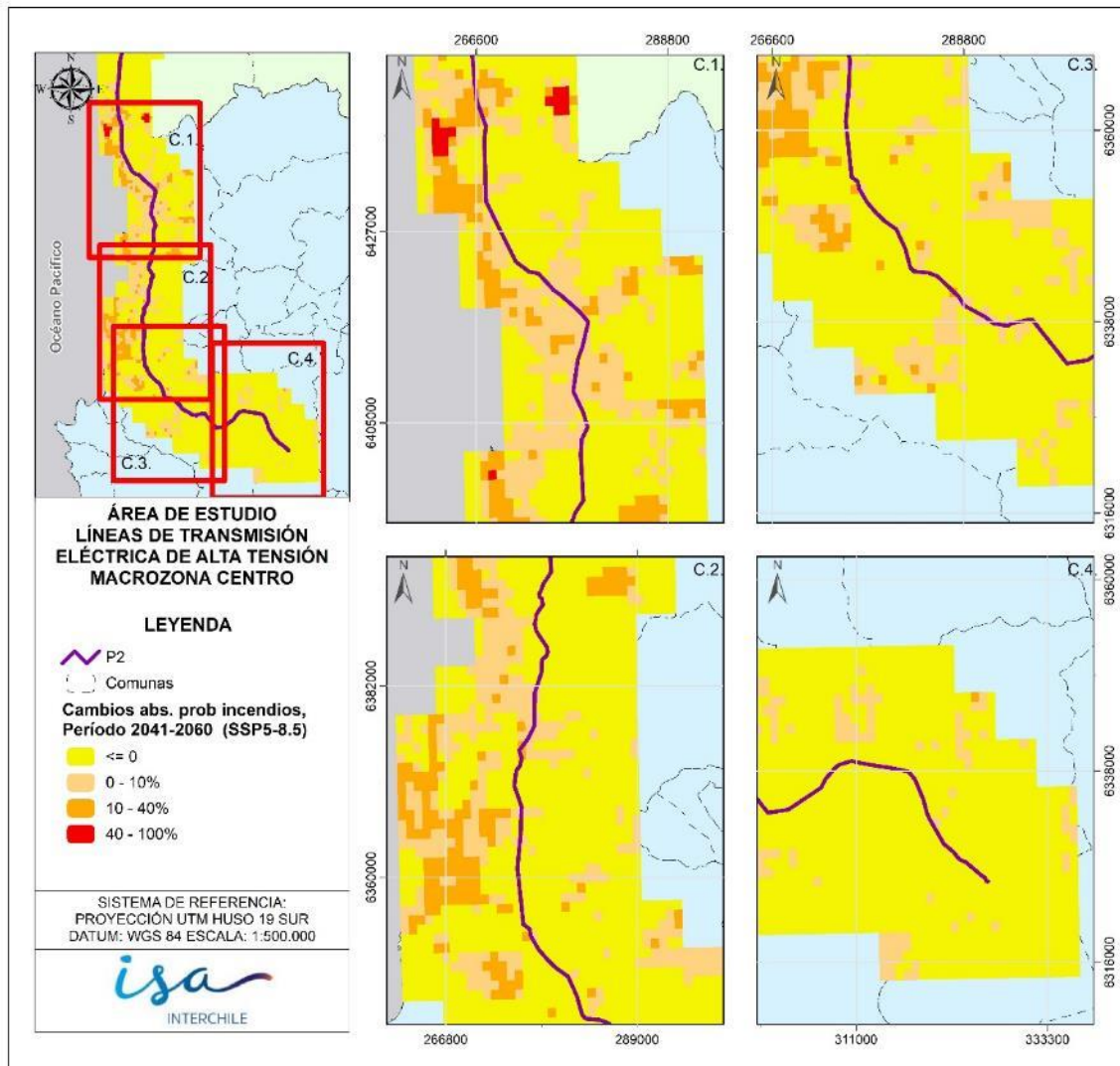


Figura 2-96: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro medio (2040-2060), media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

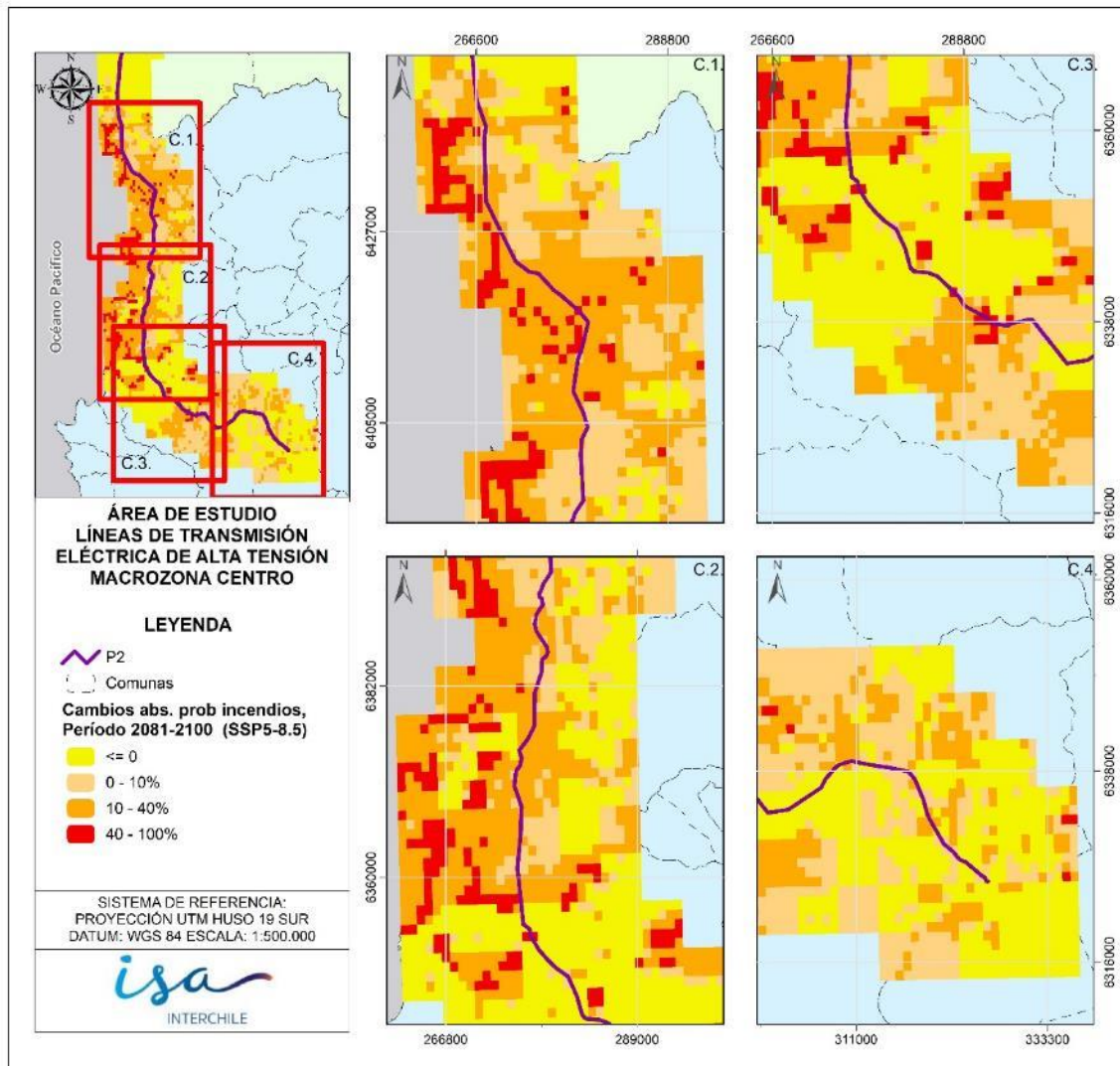


Figura 2-97: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro lejano (2080-2100), media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

Para el periodo futuro cercano (2020-2040) el aumento es leve, siendo la zona costera de la Región de Valparaíso la que muestra más cambios, sin embargo, tanto en el futuro medio ya se logra ver un aumento generalizando en la macrozona. Para el futuro lejano (2080-2100), el más pesimista, se muestra un cambio sustancial de la probabilidad de riesgo en toda la macrozona, siendo relevantes los cambios por sobre un 10% y sobre un 40% una gran parte de la zona costera de la Región de Valparaíso, especialmente en comunas como La Ligua,

Papudo, Zapallar, Puchuncaví y Quintero, como también en las comunas más cercanas a la Región Metropolitana, como Quilpué, Olmué, Limache, Hijuelas, Llay-Llay, e incluso Tiltil y Lampa que pertenece a esta última.

Por último, se presenta a continuación (Figura 2-98, Figura 2-95, Figura 2-99 y Figura 2-100) los cambios absolutos entre períodos para el escenario SSP5-8.5 en la macrozona CentroNorte2.

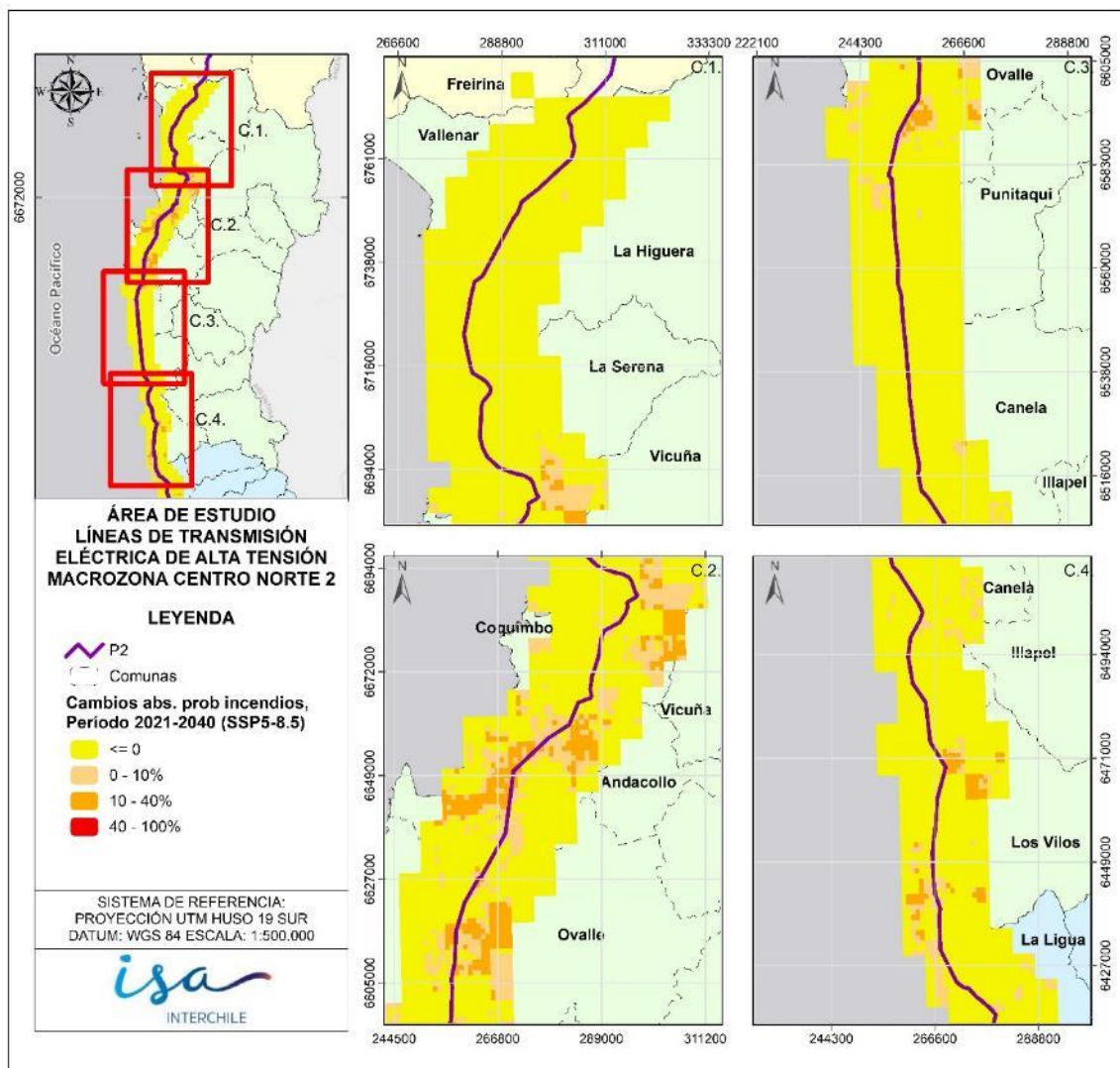


Figura 2-98: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro cercano (2020-2040), media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

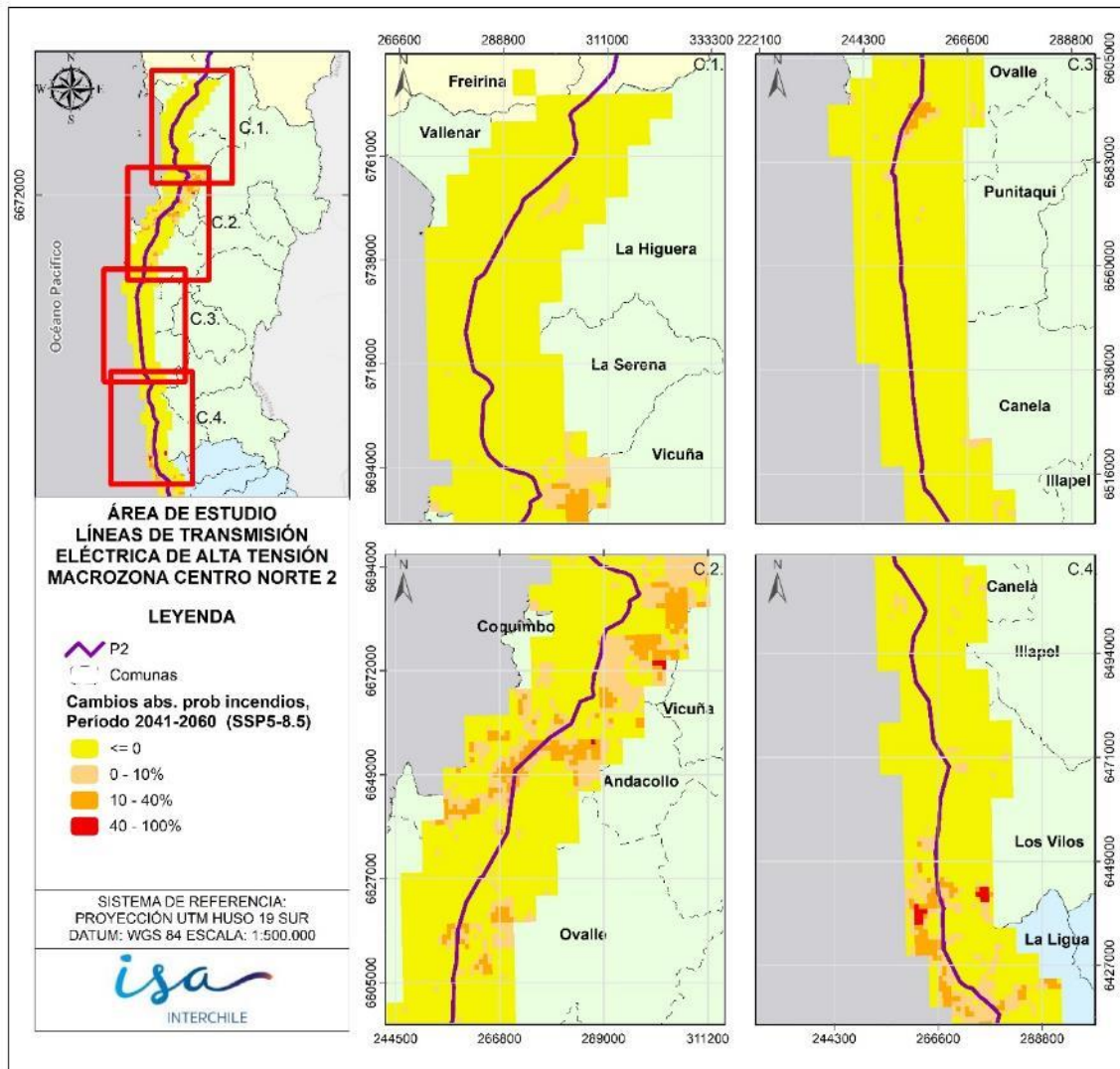


Figura 2-99: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro medio (2040-2060), media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

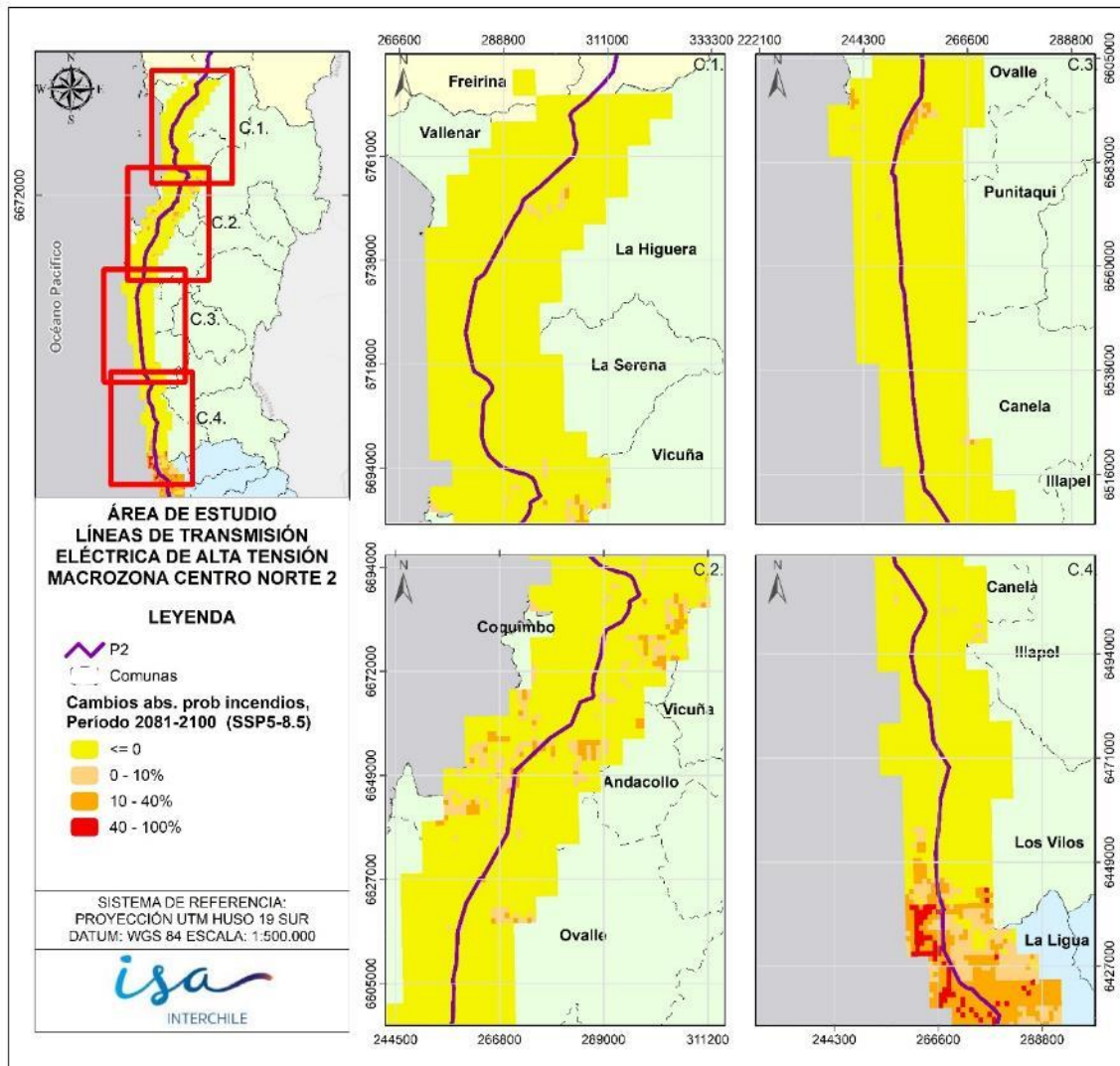


Figura 2-100: Cambios absolutos en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro lejano (2080-2100), media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

De igual forma que en la Figura 2-97, el período lejano (2080-2100) muestra un cambio significativo en las comunas de la Región de Valparaíso que se extiende a la comuna de Los Vilos de la Región de Coquimbo, sin embargo, en el mismo modelo se ve solo un leve aumento en las comunas de La Serena, Coquimbo, Andacollo y Vicuña, no así en los periodos cercano (2020-2040) e intermedio (2040-2060), que muestran un aumento mayor que el del período lejano.

En la Figura 2-101, Figura 2-102 y Figura 2-103 se muestran los cambios en probabilidad de incendios en los distintos periodos presentados previamente, pero en esta oportunidad, enfocados en las Comunidades cercanas a la línea de transmisión, para el escenario SSP1-2.6.

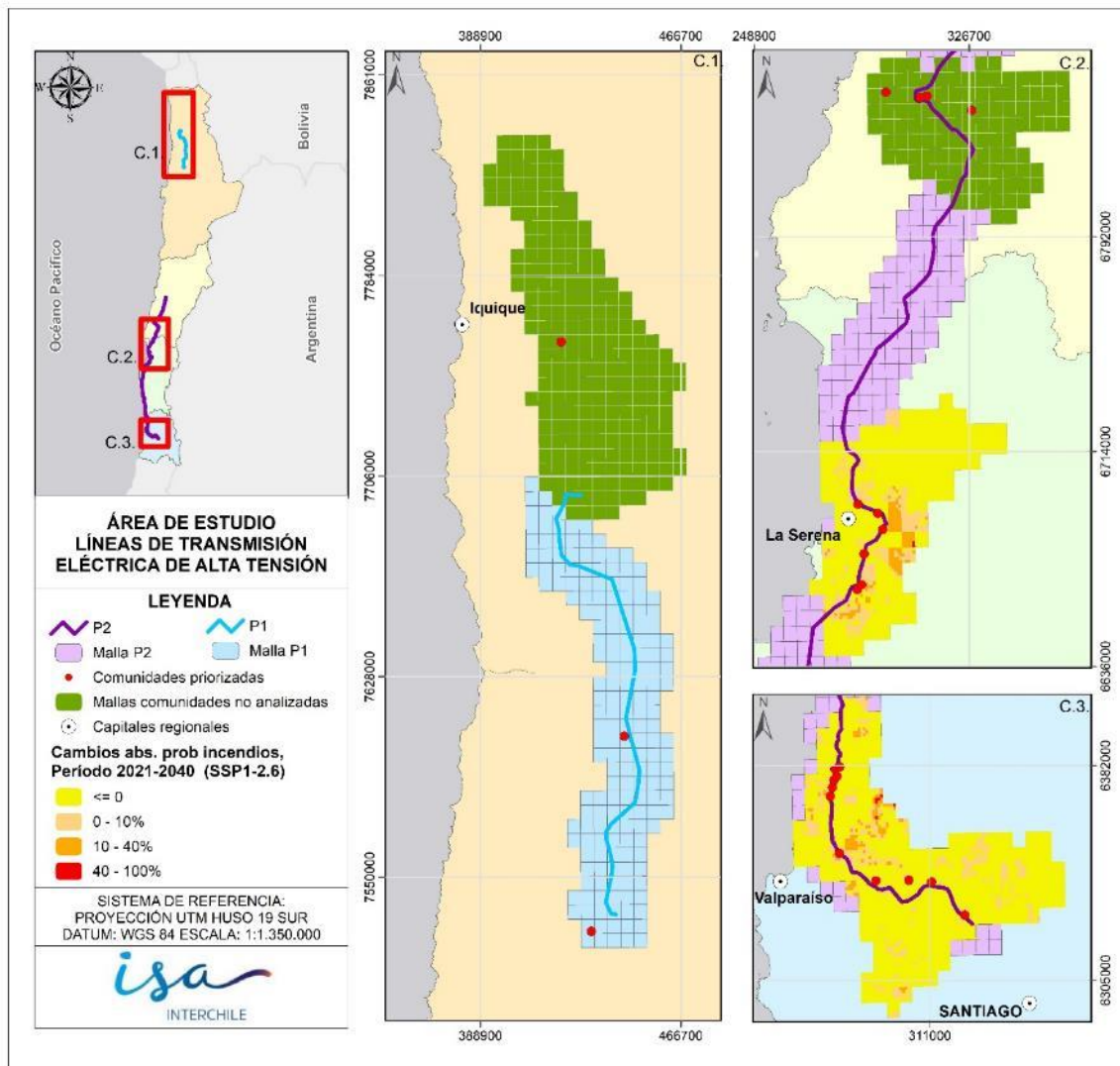


Figura 2-101: Cambios en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro cercano (2020-2040), media de los modelos, escenario SSP1-2.6, Comunidades cercanas a la línea de transmisión.

Fuente: Elaboración propia.

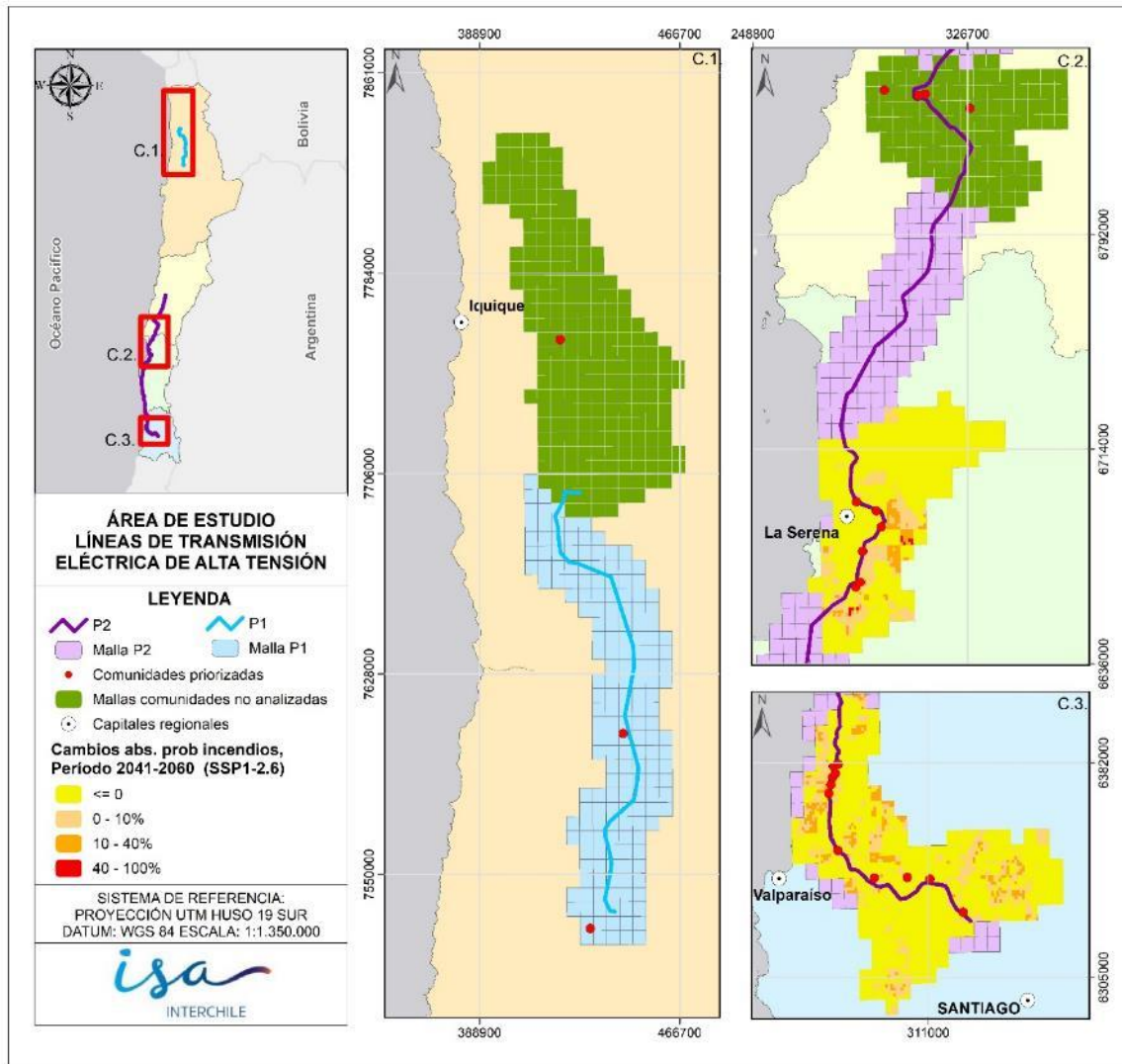


Figura 2-102: Cambios en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro medio (2040-2060), media de los modelos, escenario SSP1-2.6, Comunidades cercanas a la línea de transmisión.

Fuente: Elaboración propia.

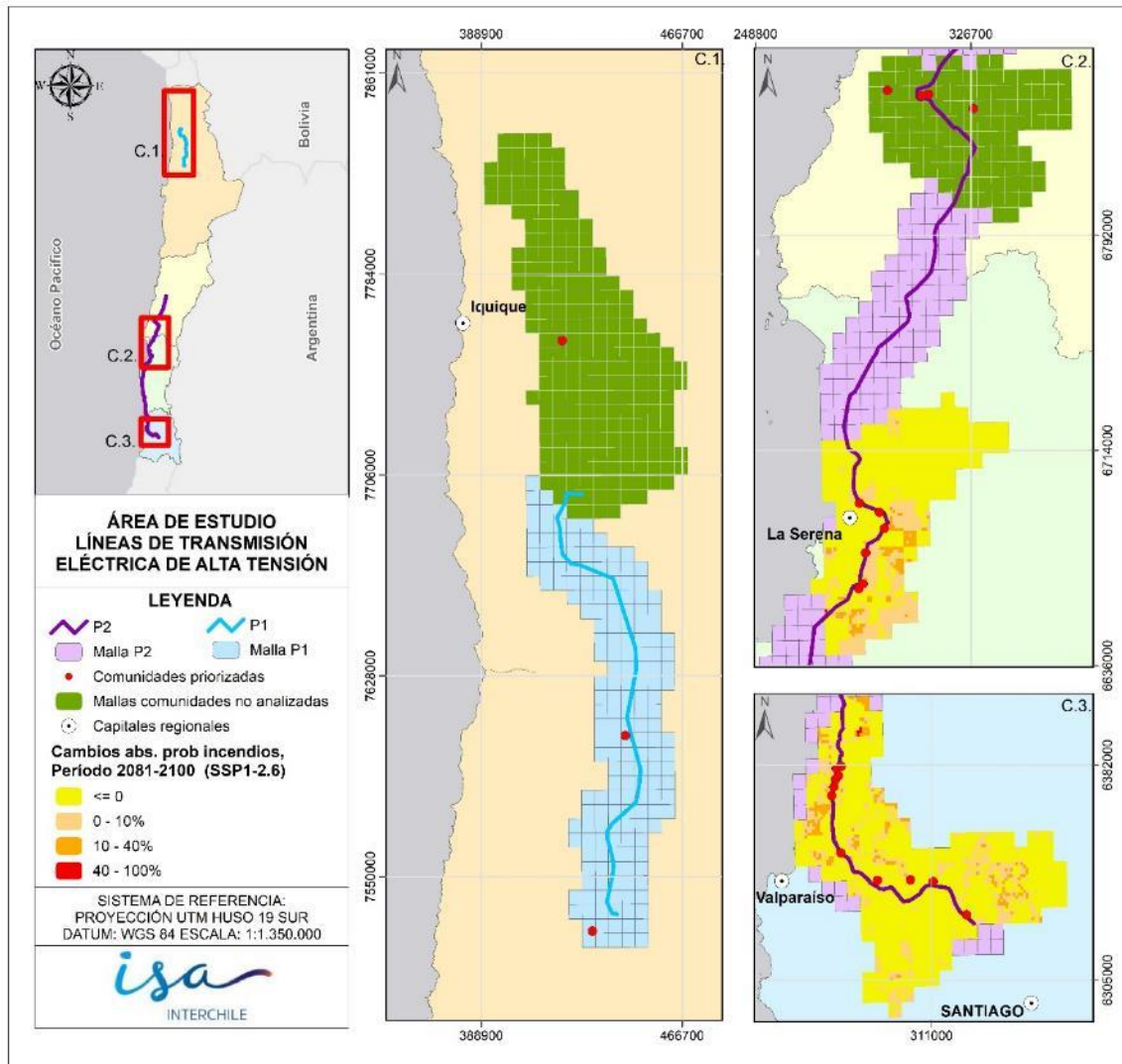


Figura 2-103: Cambios en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro lejano (2080-2100), media de los modelos, escenario SSP1-2.6, Comunidades cercanas a la línea de transmisión.

Fuente: Elaboración propia.

Ya que las áreas de análisis se solapan bastante con el análisis anterior y al ser los mismos resultados, no se ahondará en las comunas previamente nombradas. En esta oportunidad cabe recalcar que el cambio de riesgo que se muestra en la comuna de Colina es paulatino en el tiempo, y en general no supera el 10% en el período lejano (2080-2100) con excepción de algunos píxeles, sin embargo, crece en tamaño considerablemente. Por su parte, la comuna de La Serena, especialmente su sección más hacia el valle central se mantiene sin cambios. A

su vez, las comunidades de Las Melosillas, La Estancilla, El Rincón, Potrerillos, La Quebrada y San Antonio son las que muestran mayores aumentos de probabilidad de incendios en sus cercanías. Por su parte, en la macrozona CentroNorte2, las comunidades de Compañías Altas, El Peñón, Quebrada Martínez y Cruz de Caña también muestran un aumento en la probabilidad de incendios principalmente en el período lejano (2080-2100).

A continuación, en la Figura 2-104, Figura 2-105 y Figura 2-106 se muestran los cambios en probabilidad de incendios en los distintos periodos presentados previamente, pero en esta oportunidad, enfocados en las Comunidades cercanas a la línea de transmisión, para el escenario SSP2-4.5.

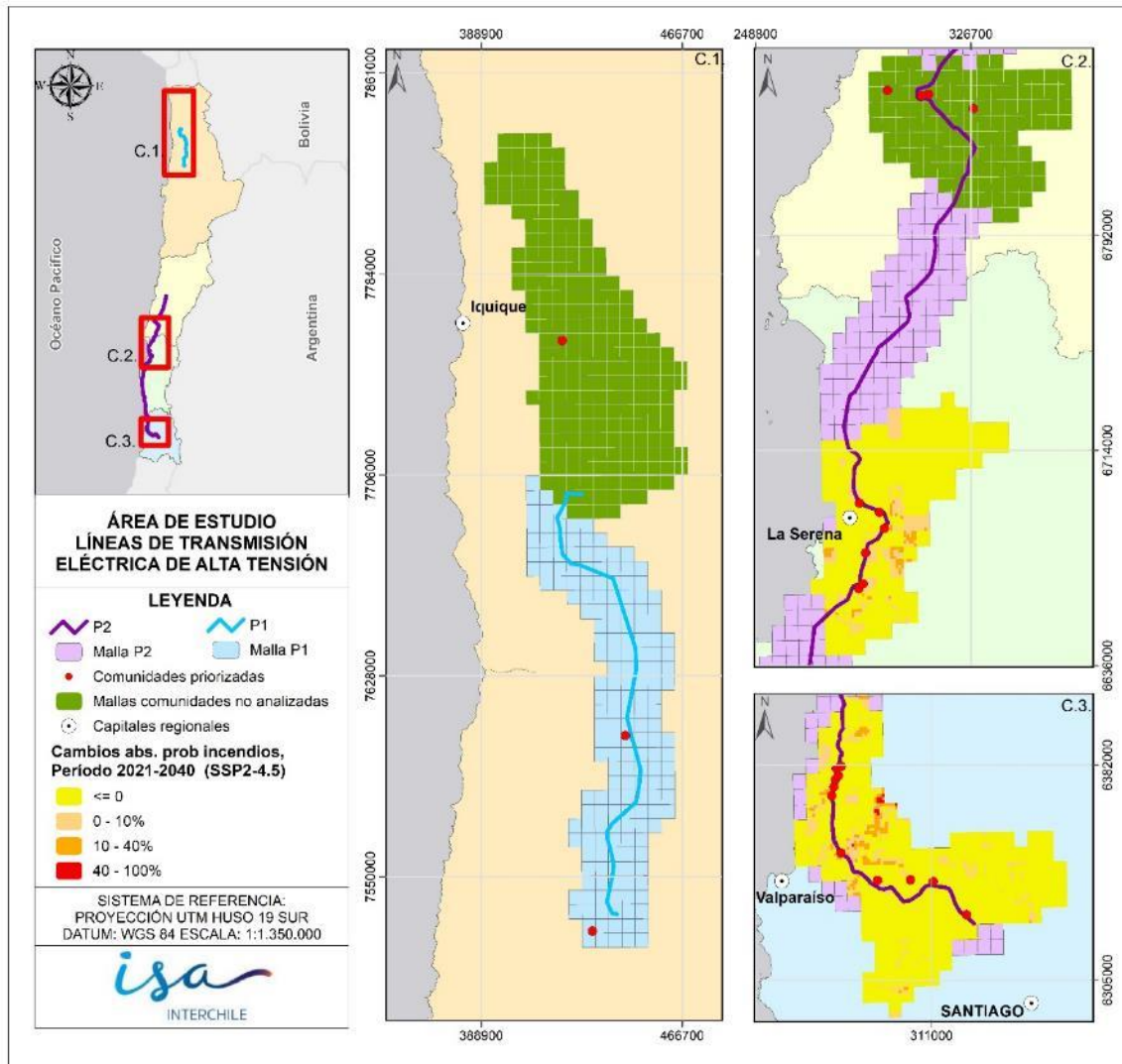


Figura 2-104: Cambios en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro cercano (2020-2040), media de los modelos, escenario SSP2-4.5, Comunidades cercanas a la línea de transmisión.

Fuente: Elaboración propia.

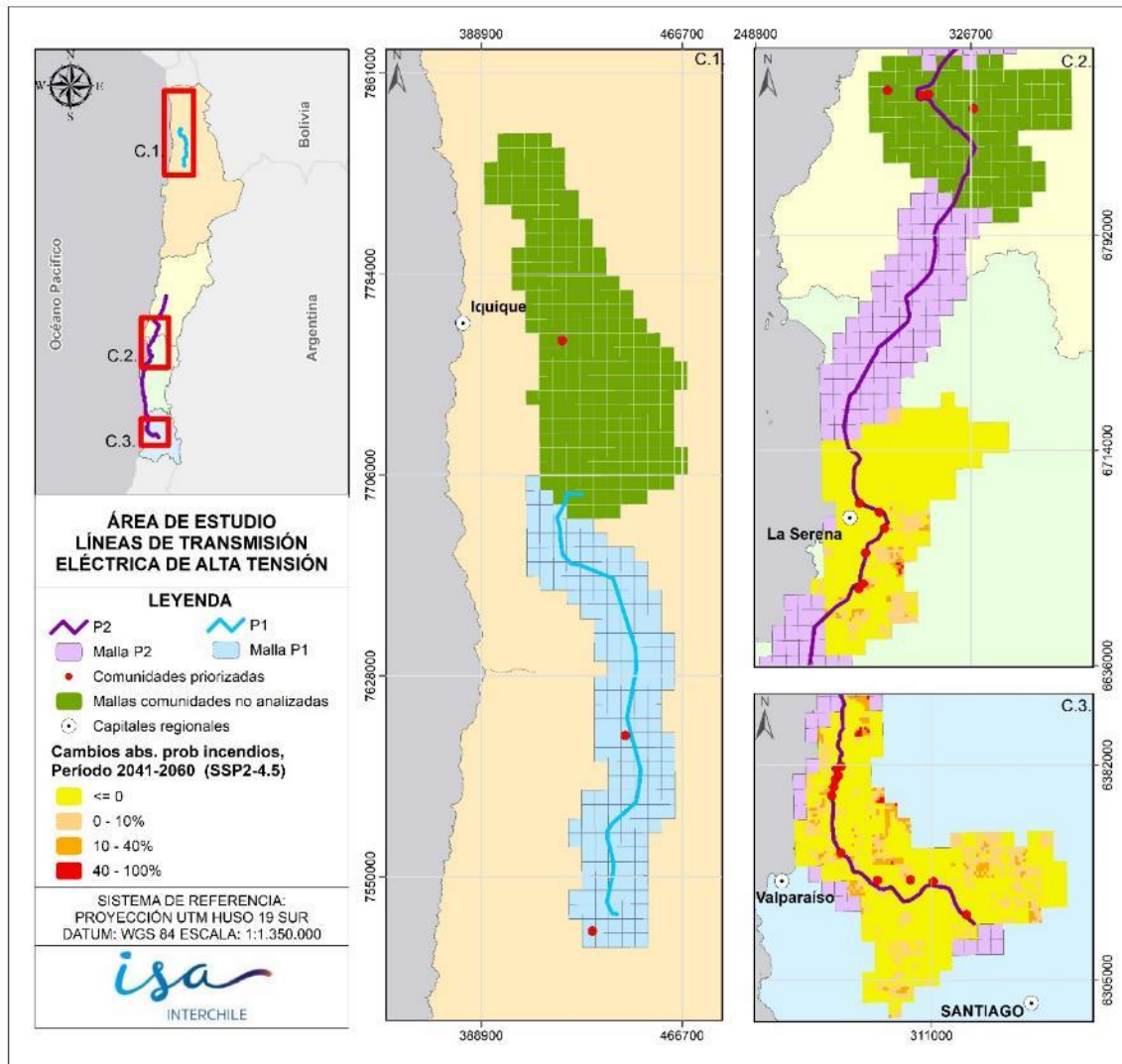


Figura 2-105: Cambios en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro medio (2040-2060), media de los modelos, escenario SSP2-4.5, Comunidades cercanas a la línea de transmisión.

Fuente: Elaboración propia.

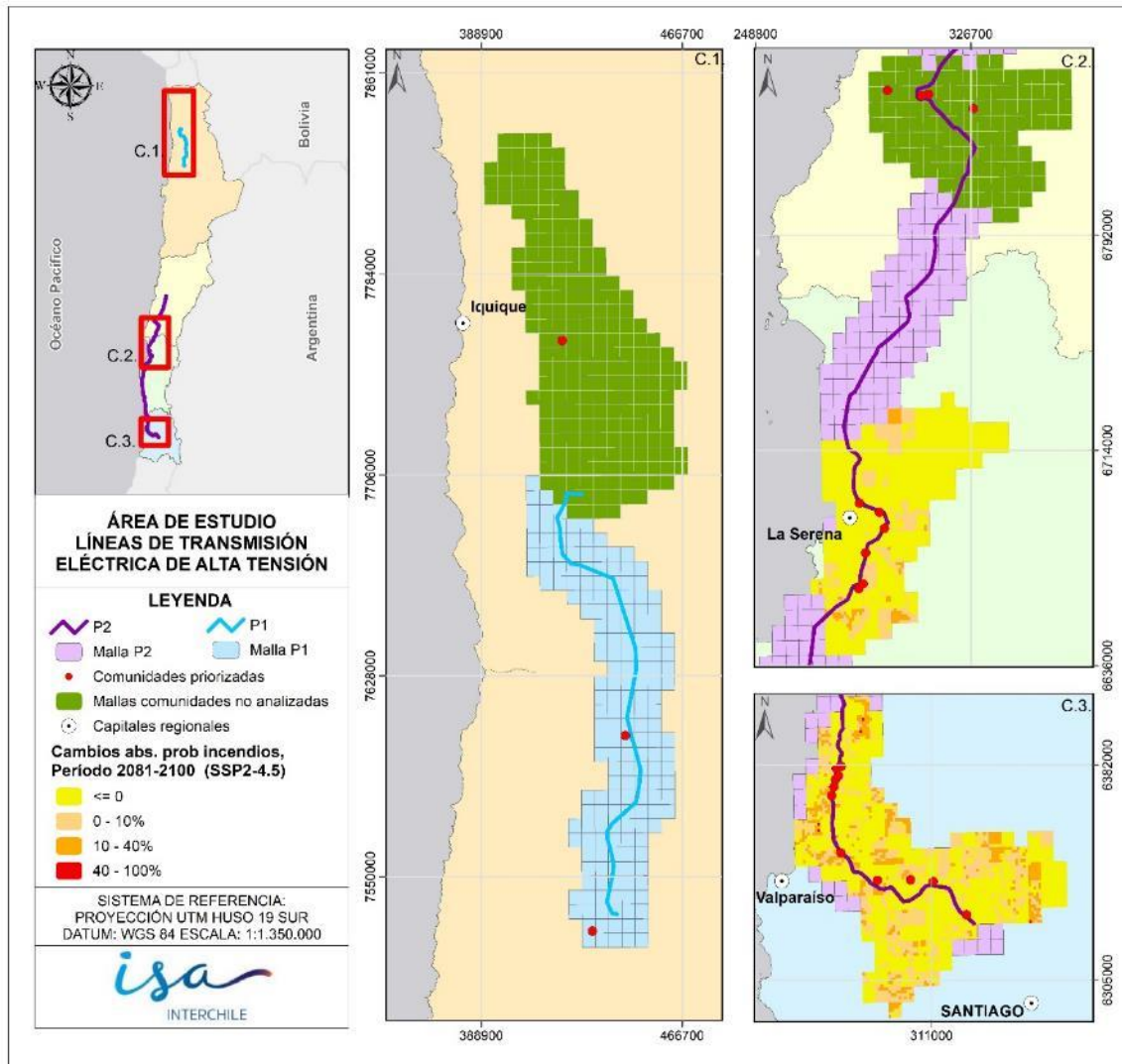


Figura 2-106: Cambios en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro lejano (2080-2100), media de los modelos, escenario SSP2-4.5, Comunidades cercanas a la línea de transmisión.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del período futuro medio (2040-2060), la comuna de Colina muestra un aumento espacialmente distribuido de aumento en la probabilidad de incendios, se suman al diagnóstico las comunidades de Los Leones - Lliu Lliu y Los Laureles-El Maqui que muestran un aumento en la probabilidad de incendios en sus cercanías para el periodo futuro lejano (2080-2100), sumándose a las que se encuentran en la costa de la Región de Valparaíso (Las Melosillas, La Estancilla, El Rincón,

Potrerillos, La Quebrada y San Antonio), como también las de El Peñón y Quebrada Martínez en la Región de Coquimbo.

Finalmente, se presentan en la Figura 2-107, Figura 2-108 y Figura 2-109 los cambios en probabilidad de incendios en comunidades para el escenario SSP5-8.5.

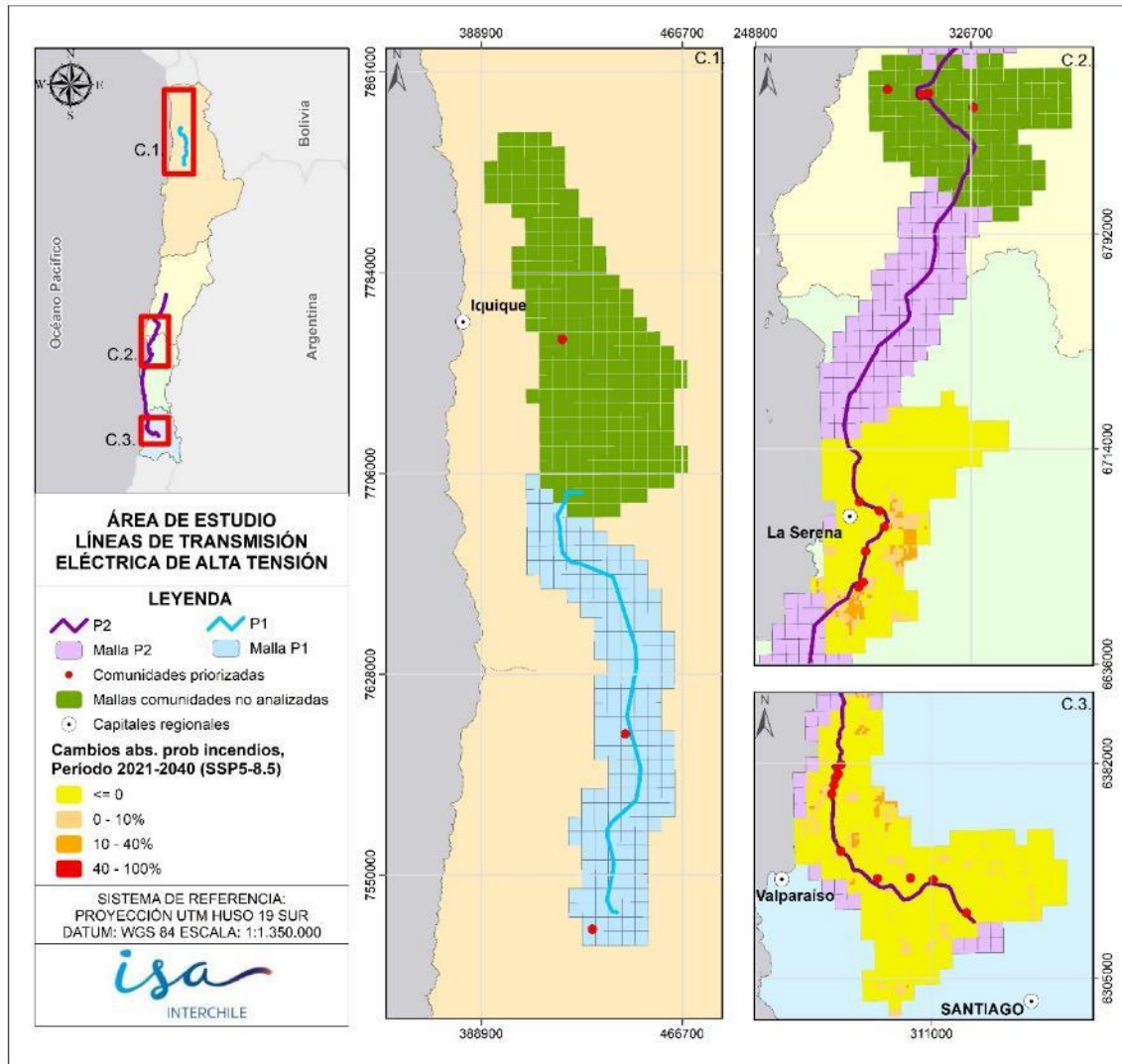


Figura 2-107: Cambios en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro cercano (2020-2040), media de los modelos, escenario SSP5-8.5, Comunidades cercanas a la línea de transmisión.

Fuente: Elaboración propia.

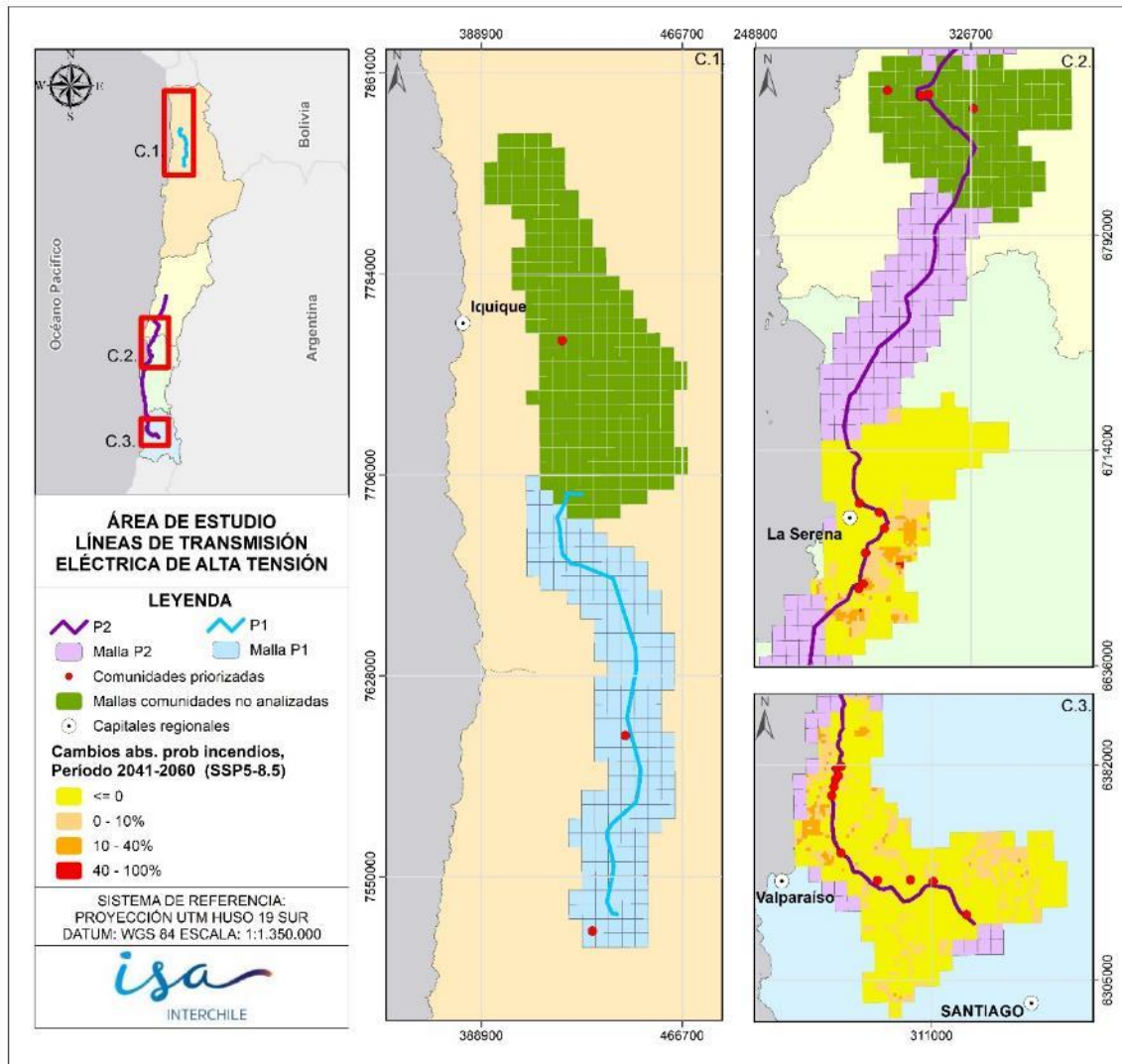


Figura 2-108: Cambios en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro medio (2040-2060), media de los modelos, escenario SSP5-8.5, Comunidades cercanas a la línea de transmisión.

Fuente: Elaboración propia.

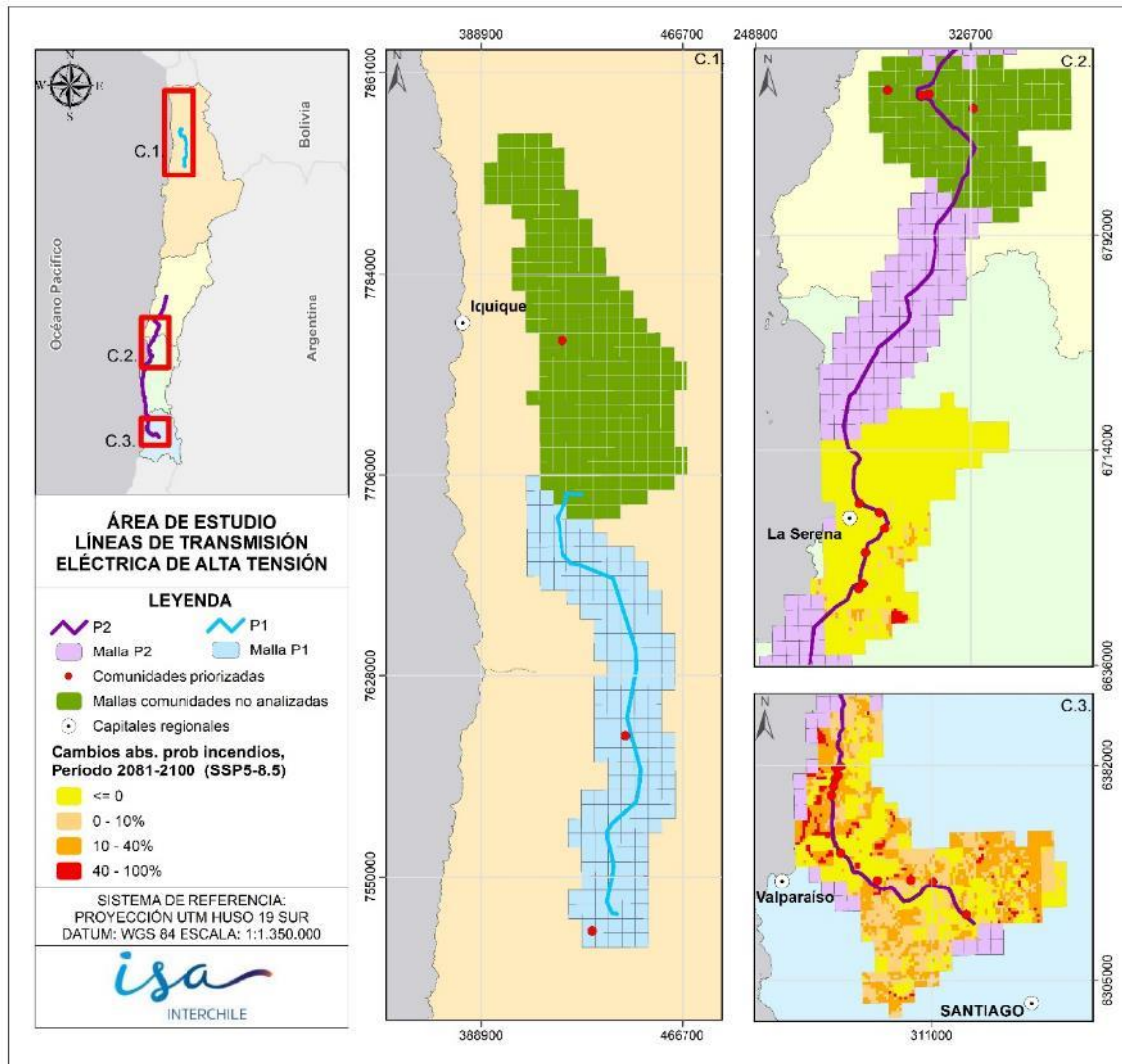


Figura 2-109: Cambios en la probabilidad de incendios predicha por el modelo RF entre el período histórico (1985-2019) y el período futuro lejano (2080-2100), media de los modelos, escenario SSP5-8.5, Comunidades cercanas a la línea de transmisión.

Fuente: Elaboración propia.

En este escenario, se muestra nuevamente que el cambio en la macrozona Centro es generalizado, y aumenta por sobre el 10% principalmente en la zona costera de la Región de Valparaíso, como también en la comuna de Colina en la Región Metropolitana. Las comunidades ubicadas en la macrozona CentroNorte2 no muestran aumentos significativos de probabilidad de incendios, sin embargo, todas las comunidades de la macrozona centro están en cercanía a zonas con aumentos significativos de probabilidad de incendios (Las Melosillas, La Estancilla,

El Rincón, Potrerillos, La Quebrada, Quebrada de Alvarado, La Dormida, Los Leones – Lliu Lliu, Los Laureles – El Maqui, San Antonio y Polpaico).

2.5.5 Cambios en ocurrencia de lavado por precipitaciones

Respecto de los periodos secos, se entiende bajo la metodología expuesta, que un periodo seco corresponde a un periodo de 90 o más días consecutivos sin precipitaciones o con eventos con lluvias menores a 1 mm. En ese sentido, se contó para el periodo histórico y los tres periodos futuros el largo promedio en días, por macrozona, de estos intervalos de tiempo.

Debe distinguirse que solo se reportan los periodos mayores a 90 días, lo que no implica que las lluvias ocurran en el periodo de tiempo indicado. Por ejemplo, al considerar los periodos entre lluvias sin filtrar por los 90 días mínimo, se obtiene para el periodo histórico en la macrozona centro un promedio de cerca de 18 días entre eventos de precipitación (>0 mm), mientras que si solo se consideran los periodos mayores a 90 días, el promedio de días entre ellos es de casi 147 días. Esto quiere decir, que en promedio para el periodo histórico, hay un promedio de 147 días entre eventos de precipitación mayor a 1 milímetro cuando el periodo mínimo es de 90 días.

Así, la Tabla 2-23 muestra el número medio de días que existen con periodos con un mínimo de 90 días en donde la precipitación es cero o menor a un milímetro. Como es esperable, la cantidad de días entre eventos de precipitación mayor a un milímetro que superan al menos los 90 días (periodos secos), es mayor en la macrozona Norte, con cerca de 1.500 días. Este valor disminuye conforme se avanza hacia la macrozona centro, en donde el promedio de días de periodos secos llega a los 217,65 días en el escenario más severo (SSP5-8.5) en el periodo más lejano (2080-2100).

Respecto de los cambios esperados, es posible notar que los cambios más severos ocurren en la macrozona Norte y centro Norte 1 en el escenario menos severo, con aumento de los periodos secos de 46,81 y 11,12% respectivamente, para el periodo 2040-2060. Esto se atribuye a que en este escenario si bien las precipitaciones no disminuyen tanto como en los escenarios más severos, si aumentan los periodos en que no llueve. Hacia el periodo más lejano, en la macrozona Centro Norte 2 en el escenario SSP1-2.6 ocurre un incremento de 24,79% respecto del periodo histórico del número de días en periodos secos.

Finalmente, algunas de las simulaciones indican que puede haber disminuciones de estos periodos, la más representativa es la reducción de -5,67% hacia el periodo 2020-2040 en el escenario más severo SSP5-8.5 para la macrozona norte, aunque dado el número medio de días en ese periodo (1.226,18) esta disminución parece despreciable.

Tabla 2-24: Promedio de días en que no ocurre precipitación o esta es menor a 1 milímetro para cuando este periodo es mayor a 90 días, por macrozona, escenario y periodo. Se muestra también el cambio esperado en porcentaje respecto del periodo histórico.

Macrozona	Escenario	Media periodos >90 días pp <1mm			Cambio (%) respecto 1985-2019		
		20-40	40-60	80-100	20-40	40-60	80-100
Norte	SSP1-2.6	1.539,83	1.556,07	1.237,79	5,90	46,81	4,89
	SSP2-4.5	1.253,49	1.693,02	2.233,16	3,60	8,44	35,48
	SSP5-8.5	1.226,18	1.594,40	1.587,30	-5,67	39,28	14,56
C. Norte 1	SSP1-2.6	261,57	297,16	263,70	-1,75	11,12	-1,25
	SSP2-4.5	268,07	278,65	280,68	1,72	5,59	6,60
	SSP5-8.5	303,91	279,50	310,01	12,34	3,50	15,33
C. Norte 2	SSP1-2.6	199,99	201,80	244,79	1,83	2,64	24,79
	SSP2-4.5	199,96	200,50	204,41	1,96	2,22	4,44
	SSP5-8.5	204,40	201,49	217,65	3,71	2,41	10,26
Centro	SSP1-2.6	148,06	146,07	144,46	2,16	0,79	-0,28
	SSP2-4.5	145,99	146,10	147,84	0,37	0,48	1,62
	SSP5-8.5	145,35	148,39	147,47	-0,18	1,83	1,26

Fuente: Elaboración propia.

En ese sentido, y con base en los resultados obtenidos, se espera que en la macrozona norte exista un incremento en la frecuencia en que las líneas de transmisión deben ser lavadas. En algunos casos, y si amerita, ese incremento en la frecuencia debiera ser de cerca de un 50% más del que actualmente se realiza. En el resto de las macrozonas, esto es más relativo y depende directamente de los resultados del escenario y el periodo que se analice, habiendo resultados que no indican una señal clara. En cualquier caso, las frecuencias actuales de lavado pueden mantenerse.

2.6 Riesgos sobre activos de INTERCHILE

Incluidas las metodologías de análisis de los distintos riesgos y su cálculo, a continuación, se procederá a detallar la vulnerabilidad y el riesgo expresada para cada una de las áreas de trabajo analizadas.

2.6.1 Vulnerabilidad y riesgo asociado a temperaturas extremas

La vulnerabilidad en los riesgos de ocurrencia de eventos de temperaturas extremas (olas de calor o frío) está asociada a la sensibilidad que tiene el material conductor de la línea de transmisión eléctrica a las altas temperaturas, puesto que su eficacia disminuye. Lo anterior resulta en que, frente a la amenaza de temperaturas máximas igual o superiores a 35°C, aumenta el riesgo de la LTE a ser menos eficiente en la capacidad de transmisión.

2.6.2 Vulnerabilidad y riesgo asociado a aluviones

Dado que, para el caso particular de aluviones, la exposición es binaria (0 si es infraestructura que no identificó ITCL y 1 en caso contrario) y que la amenaza equivale al riesgo según lo explicado en la sección de metodología (2.2.3), el cambio en la ocurrencia de aluviones descrito en 2.5.3 equivale al cambio en el riesgo de la infraestructura. Por tanto, el aumento o disminución del riesgo es directamente proporcional al aumento o disminución en la cantidad de eventos gatillantes de aluviones descrito previamente.

2.6.3 Vulnerabilidad y riesgo asociado a incendios

La vulnerabilidad en los riesgos de ocurrencia de incendios sobre los activos de INTERCHILE se caracteriza como la distancia de caminos, la cual fue calculada utilizando las cartografías actualizadas de la Red Vial de Chile proporcionadas por el Ministerio de Obras Públicas³ y el algoritmo de ArcGIS® de Distancia Euclidiana, para luego ser promediado en cada uno de los vóxeles de 4 hectáreas. A continuación, en la Figura 2-110 y Figura 2-111, se detalla la distribución de la vulnerabilidad para las macrozonas Centro y CentroNorte² respectivamente.

³ Disponible en <https://geoportal.cl/geoportal/catalog/31689/Red%20Vial%20Nacional>

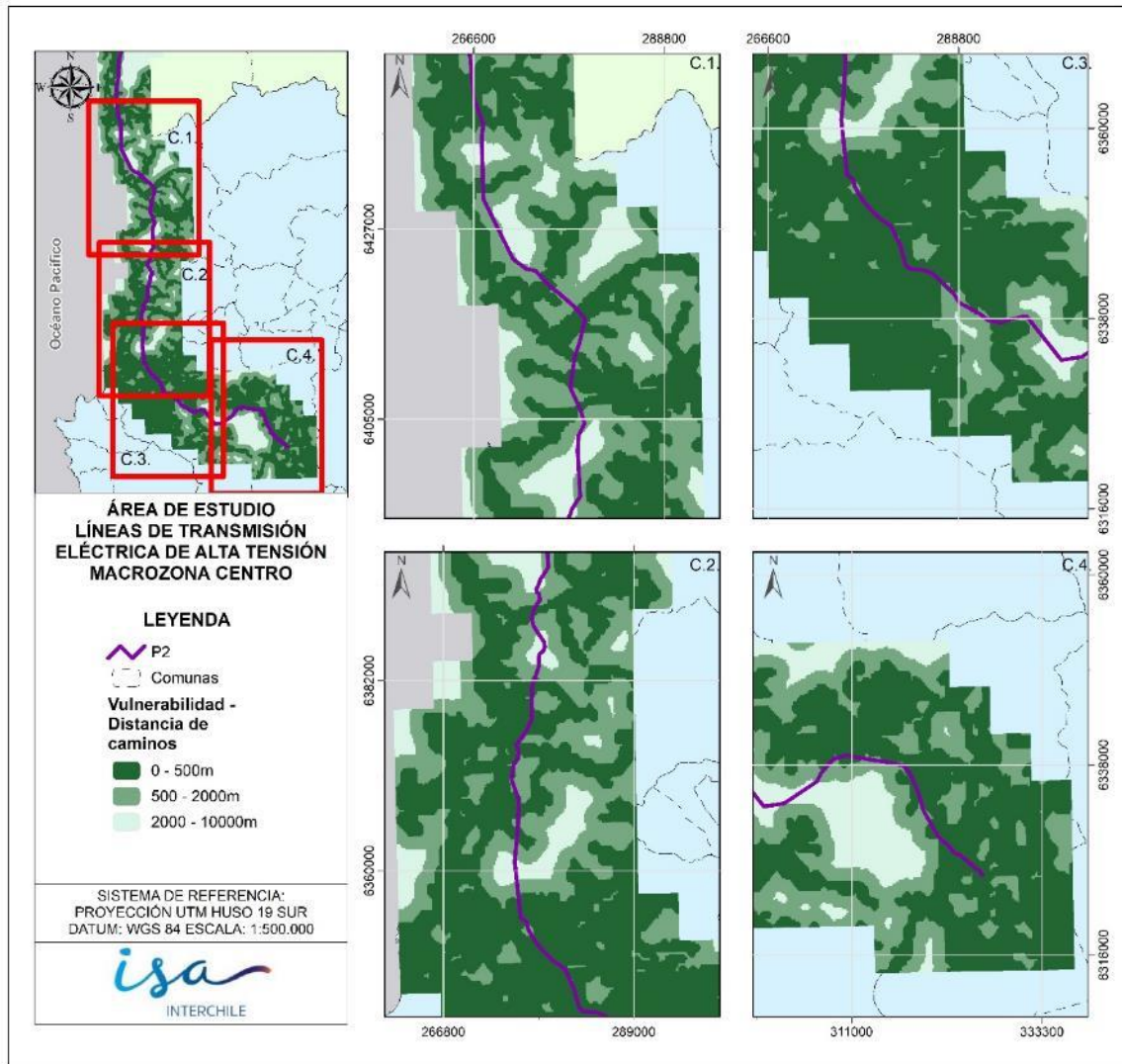


Figura 2-110: Distribución de la Vulnerabilidad a la ocurrencia de incendios, distancia de caminos, macrozona Centro.
Fuente: Elaboración propia.

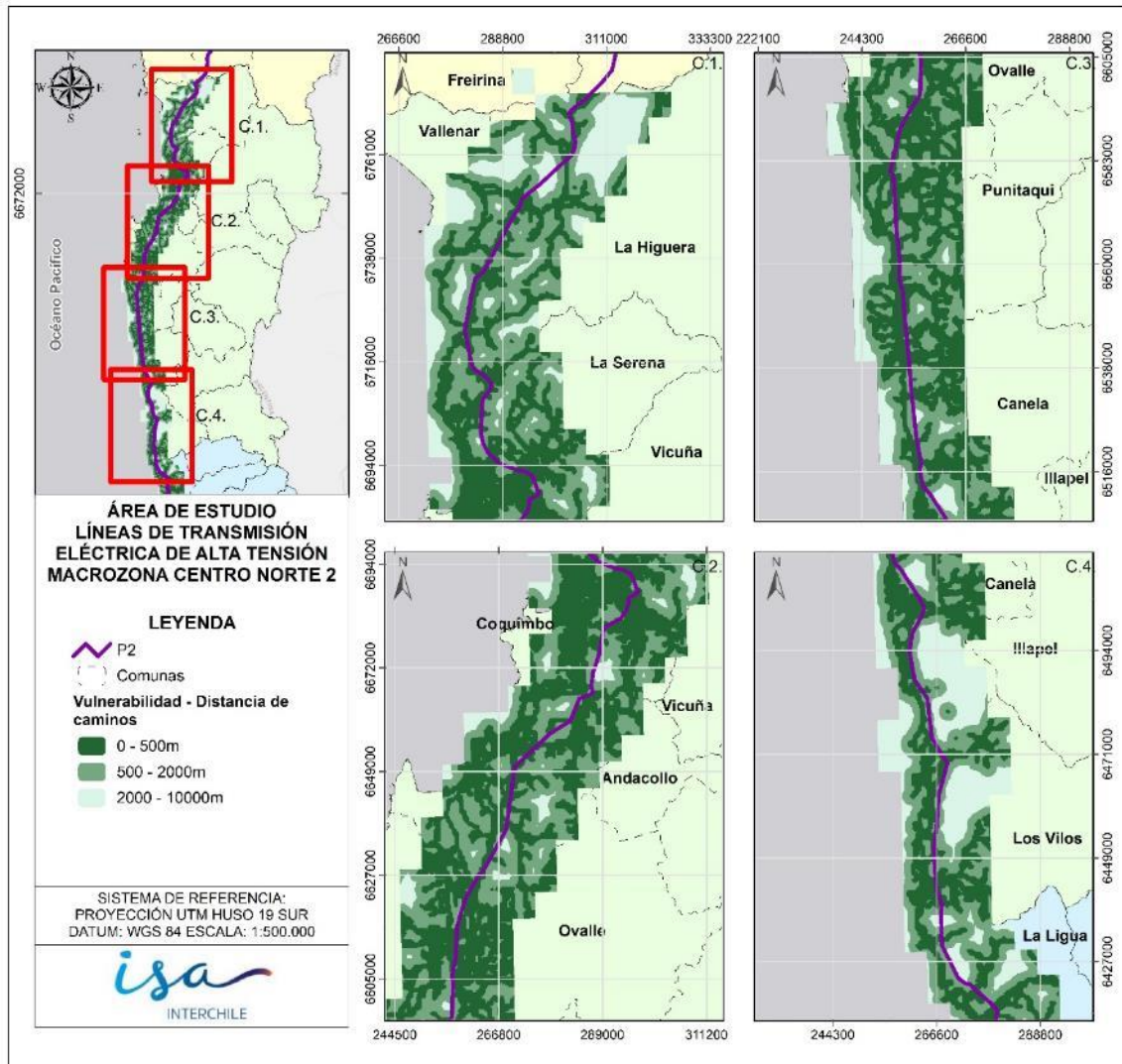


Figura 2-111: Distribución de la Vulnerabilidad a la ocurrencia de incendios, distancia de caminos, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo del Riesgo, tanto en los activos de INTERCHILE, como en comunidades, se separaron Amenaza, Vulnerabilidad y Exposición en 3 rangos, en función de su distribución de frecuencias en el área de estudio. Los rangos seleccionados coinciden con los mostrados en los mapas relacionados de Exposición, Amenaza de los capítulos 2.4.1 y 2.5.4, como también la vulnerabilidad presentada anteriormente en las figuras Figura 2-110 y Figura 2-111.

A modo de resumen se presentan estos rangos para el riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE en la Tabla 2-25:

Tabla 2-25: Rangos que categorizan Exposición, Amenaza y Vulnerabilidad, Riesgo de incendios en los activos de INTERCHILE.

Componente del riesgo	Rangos		
	Bajo	Medio	Alto
Exposición	0 a 20%	20 a 50%	> 50%
Amenaza	0 a 10%	10 a 40%	> 40%
Vulnerabilidad	<= 500m	entre 500 y 2.000m	> 2.000m

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación (Figura 2-112, Figura 2-113, Figura 2-114 y Figura 2-115), se presentan los riesgos calculados para los cuatro períodos, histórico (1985-2019), futuro cercano (2020-2040), futuro medio (2040-2060) y futuro lejano (2080-2100) para el escenario SSP1-2.6 en la macrozona Centro.

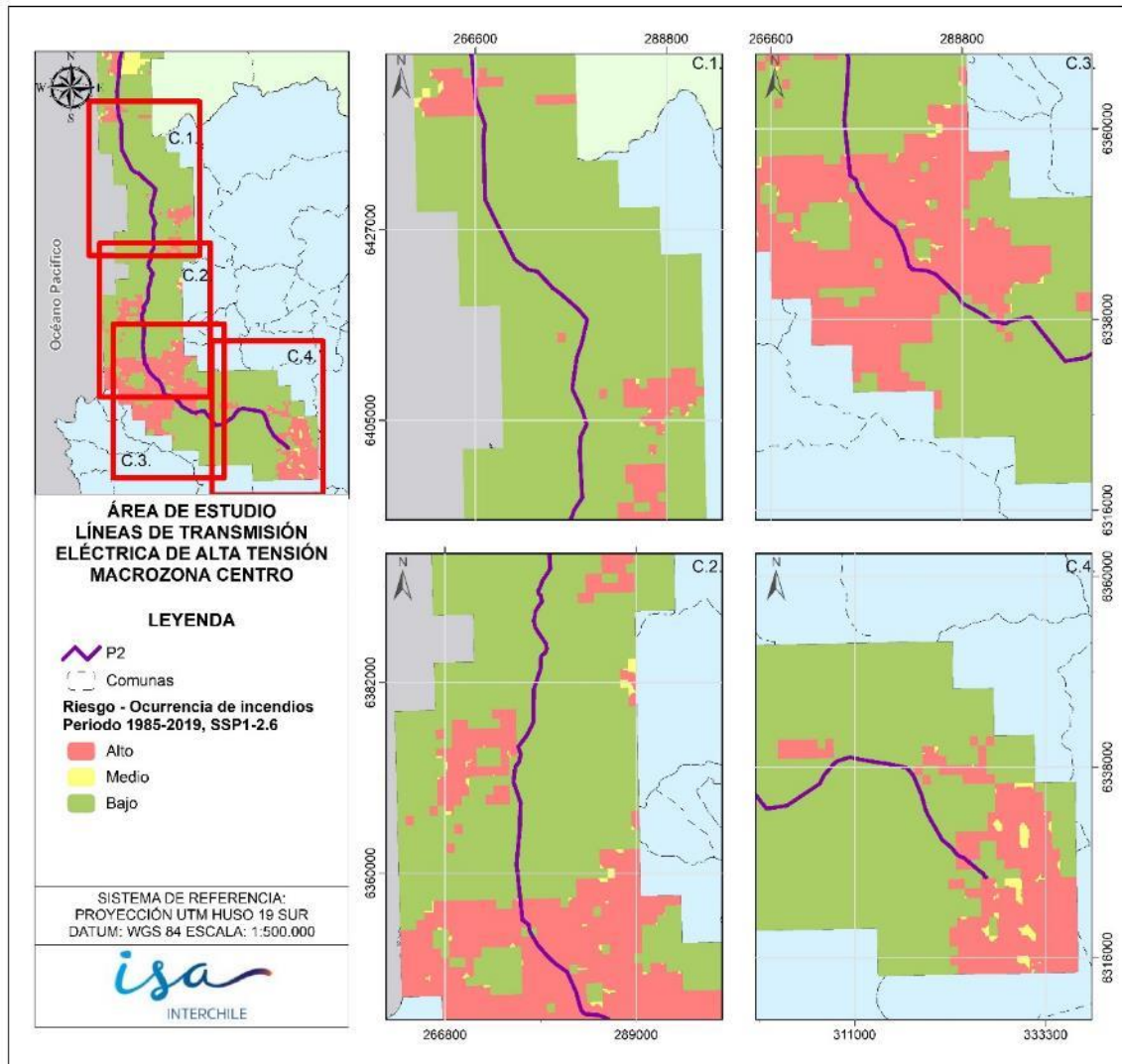


Figura 2-112: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período histórico (1985-2019) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

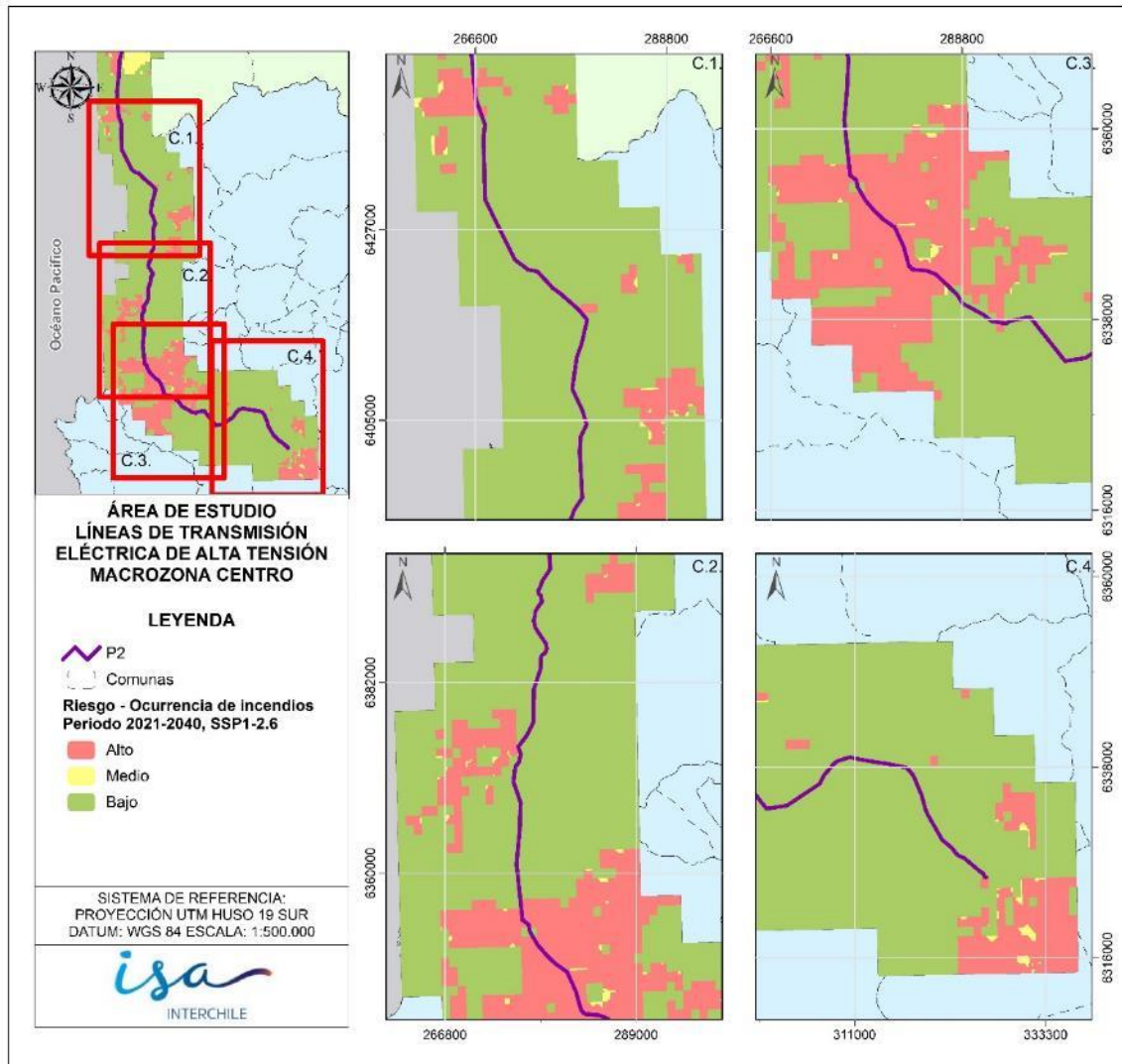


Figura 2-113: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro cercano (2020-2040) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

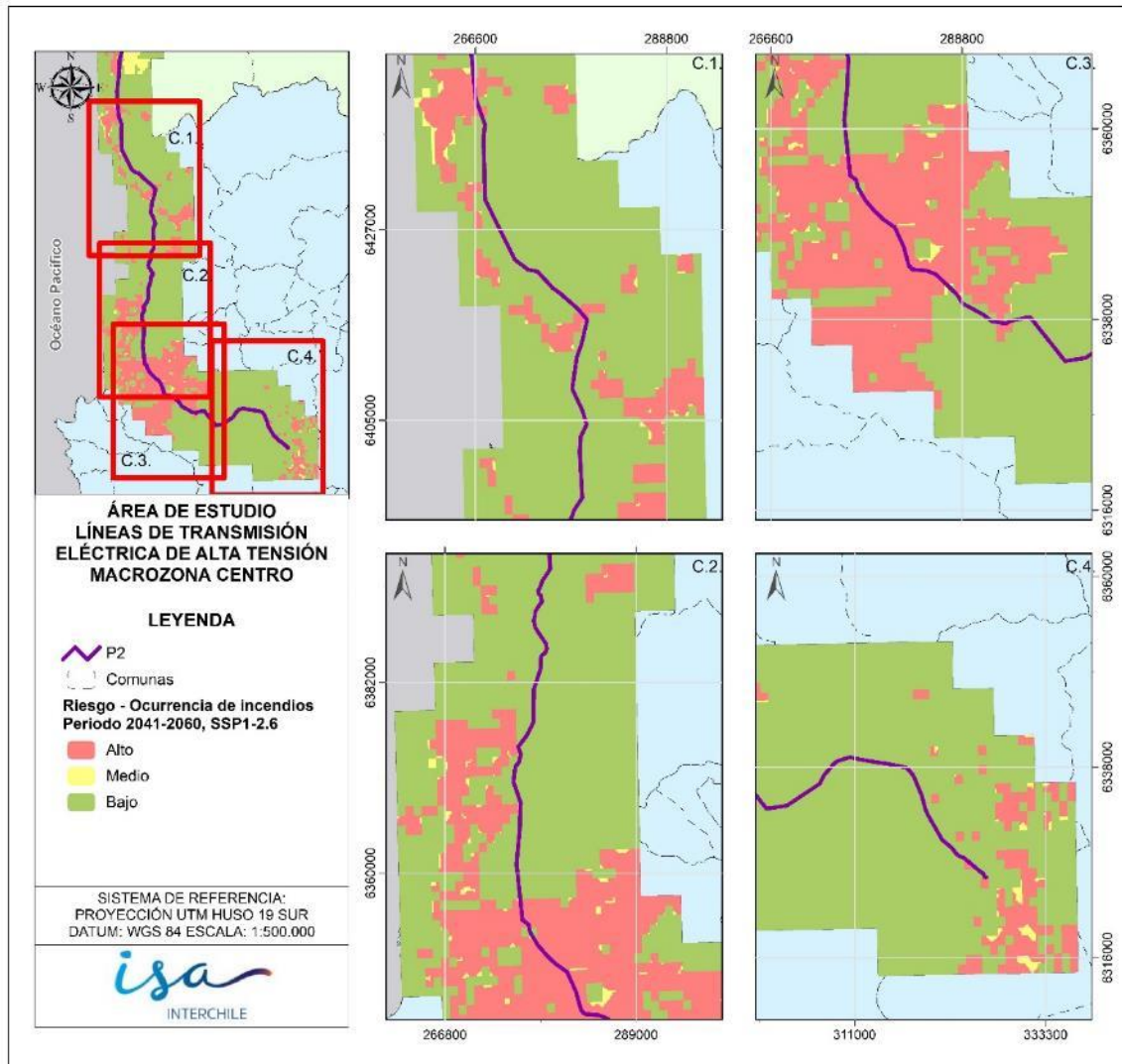


Figura 2-114: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro medio (2040-2060) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

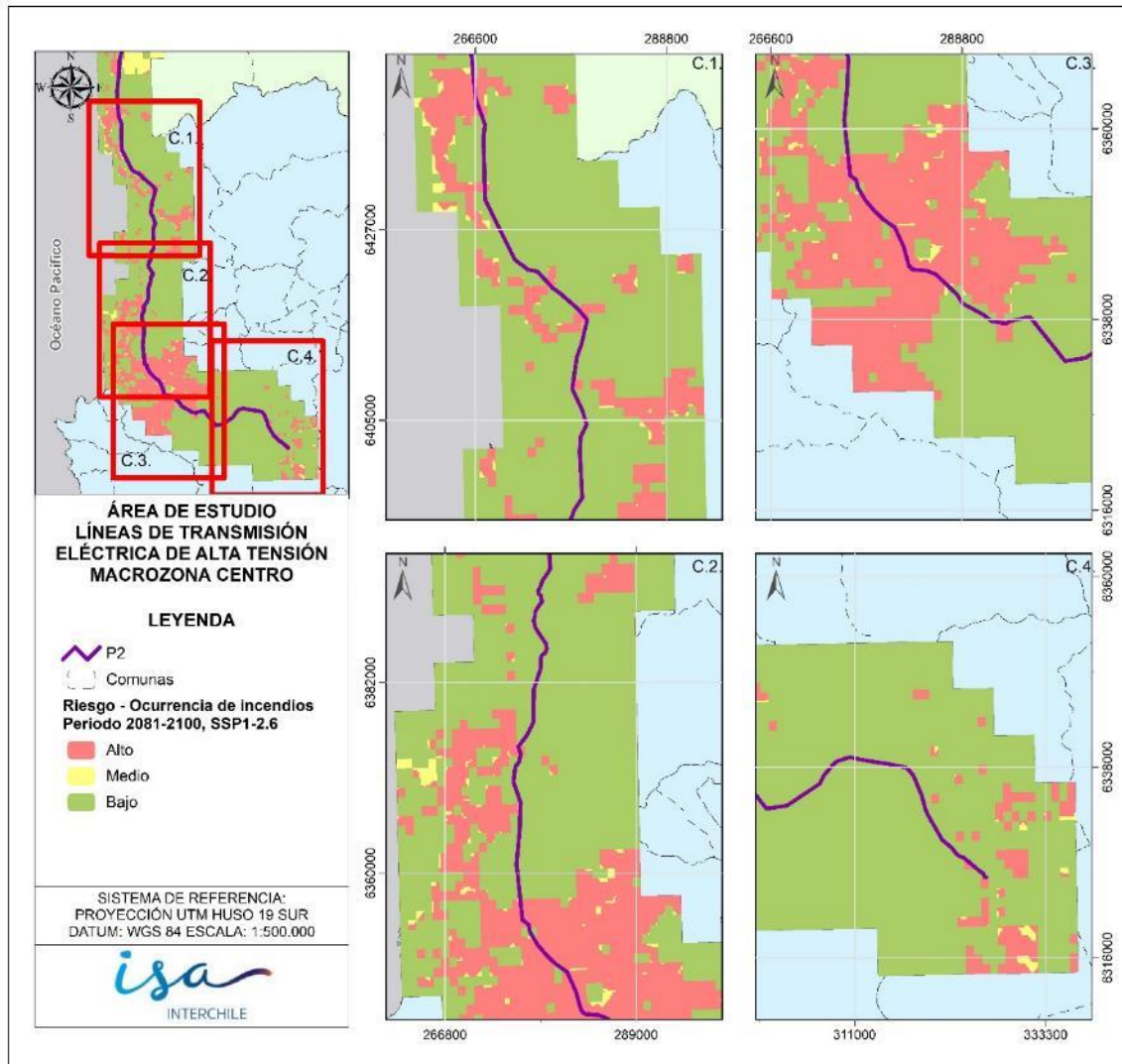


Figura 2-115: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro lejano (2080-2100) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

En la macrozona Centro, se observan cambios significativos, destacando una disminución del riesgo en las comunas de Tiltil y Lampa, ubicadas en la Región Metropolitana. No obstante, persisten áreas de riesgo elevado a medida que avanzamos en los periodos futuros. Por otro lado, las comunas de Quillota, Concón, Quintero y Limache experimentan un notable incremento en la cantidad de píxeles que pasan a un nivel de riesgo alto en los períodos futuros. Asimismo, las comunas costeras de la región de Valparaíso, especialmente La Ligua, Zapallar y

Puchuncaví, también experimentan un aumento considerable en su riesgo, aunque no alcanza la misma magnitud que en las comunas mencionadas anteriormente.

A continuación, en las figuras a continuación (Figura 2-116, Figura 2-117, Figura 2-118 y Figura 2-119), se presenta el riesgo de ocurrencia de incendios en el escenario SSP1-2.6 para la macrozona CentroNorte2.

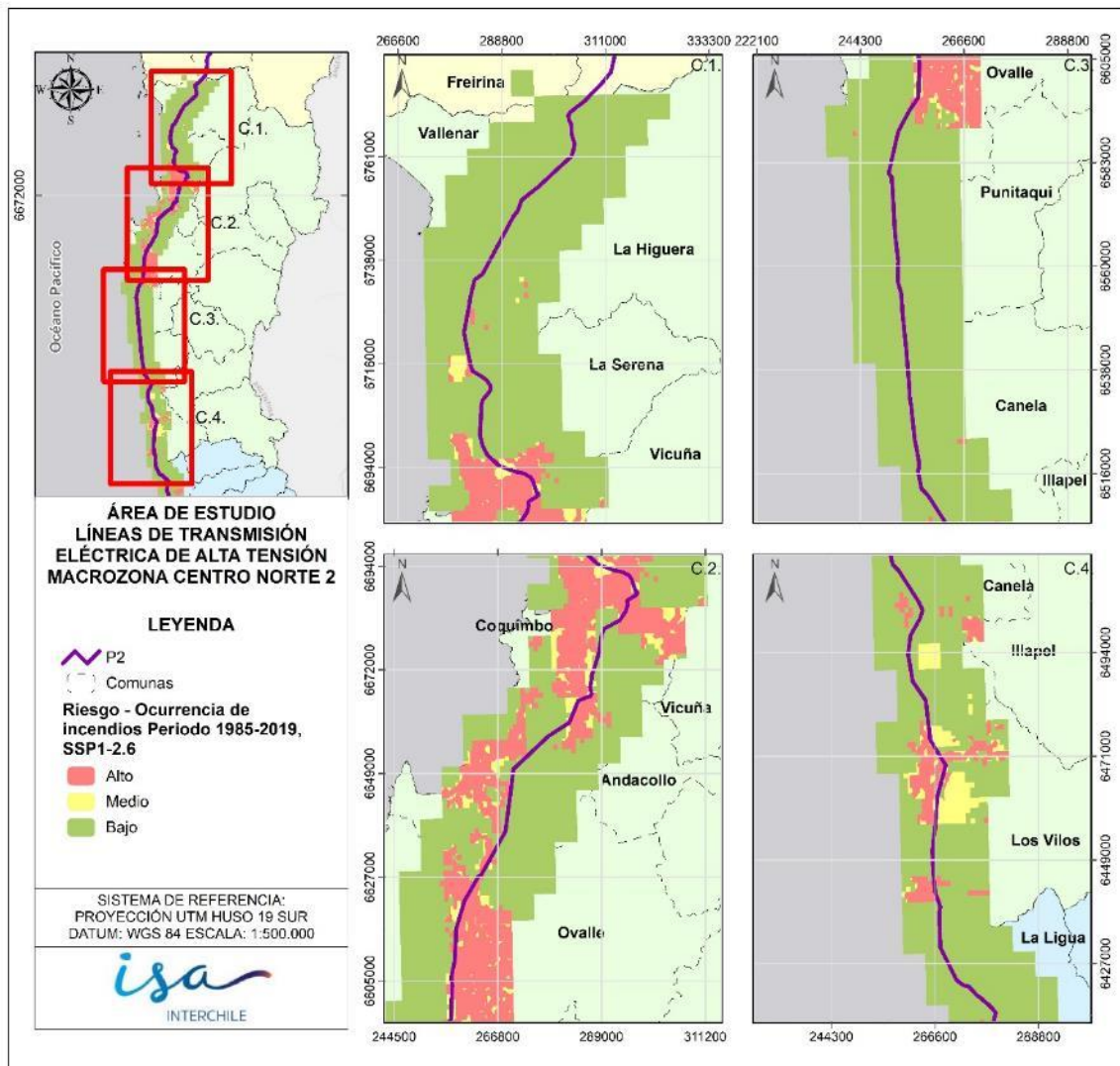


Figura 2-116: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período histórico (1985-2019) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

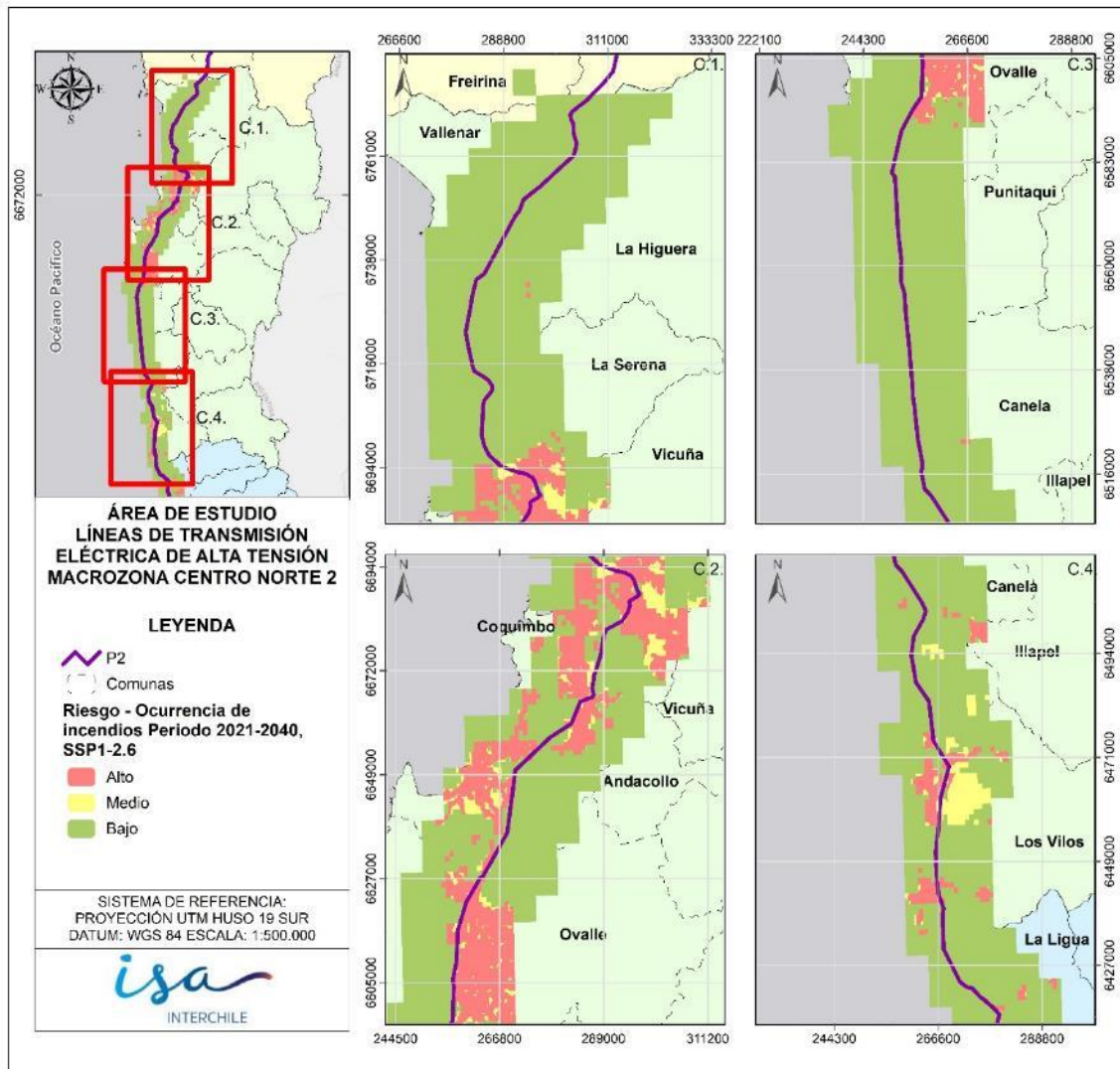


Figura 2-117: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro cercano (2020-2040) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

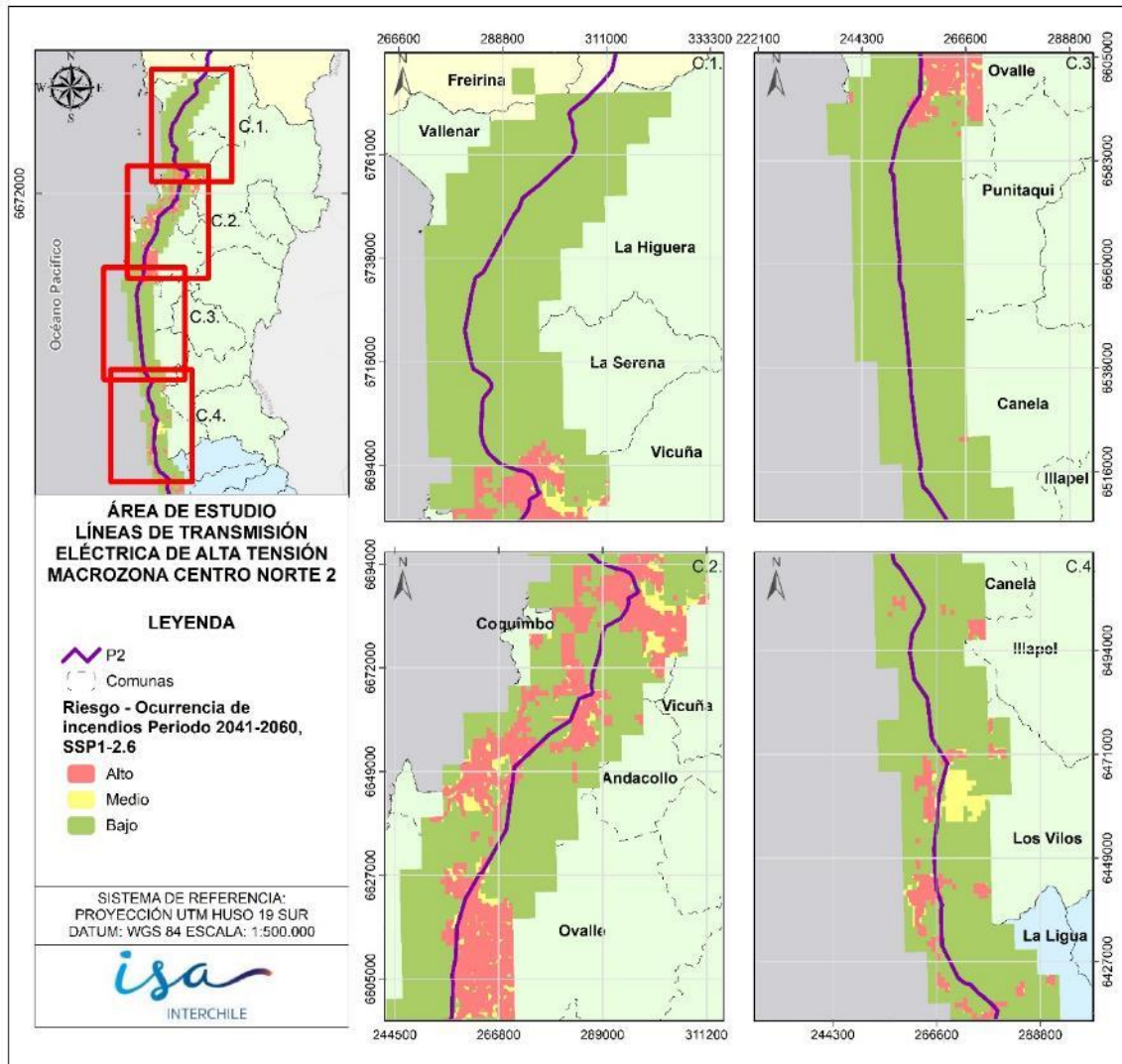


Figura 2-118: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro medio (2040-2060) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona CentroNorte2.
 Fuente: Elaboración propia.

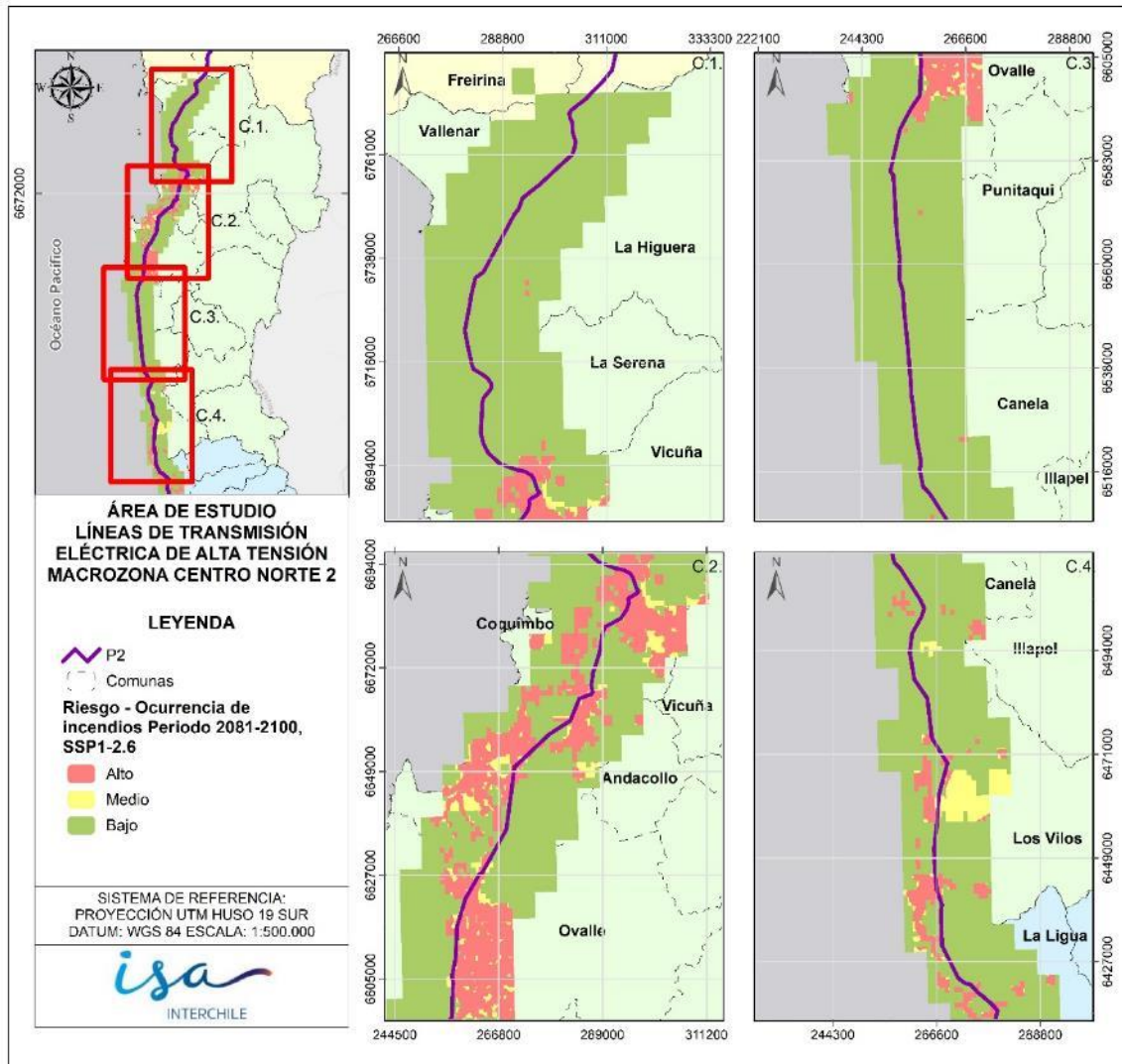


Figura 2-119: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro lejano (2080-2100) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

En la macrozona CentroNorte2 se ve una tendencia del riesgo de incendios a ir migrando paulatinamente hacia el sur, de manera consistente en los periodos futuros, con leves disminuciones en las comunas de La Serena y Coquimbo en el período del futuro cercano, que se mantienen consistentes durante el resto de los periodos. A su vez, existe un leve aumento de riesgo en la comuna de Los Vilos, sobre todo en la zona más cerca de la costa.

A continuación, en la Figura 2-120, Figura 2-121, Figura 2-122 y Figura 2-123 se muestra el riesgo de ocurrencia de incendios para el escenario SSP2-4.5 en la macrozona Centro.

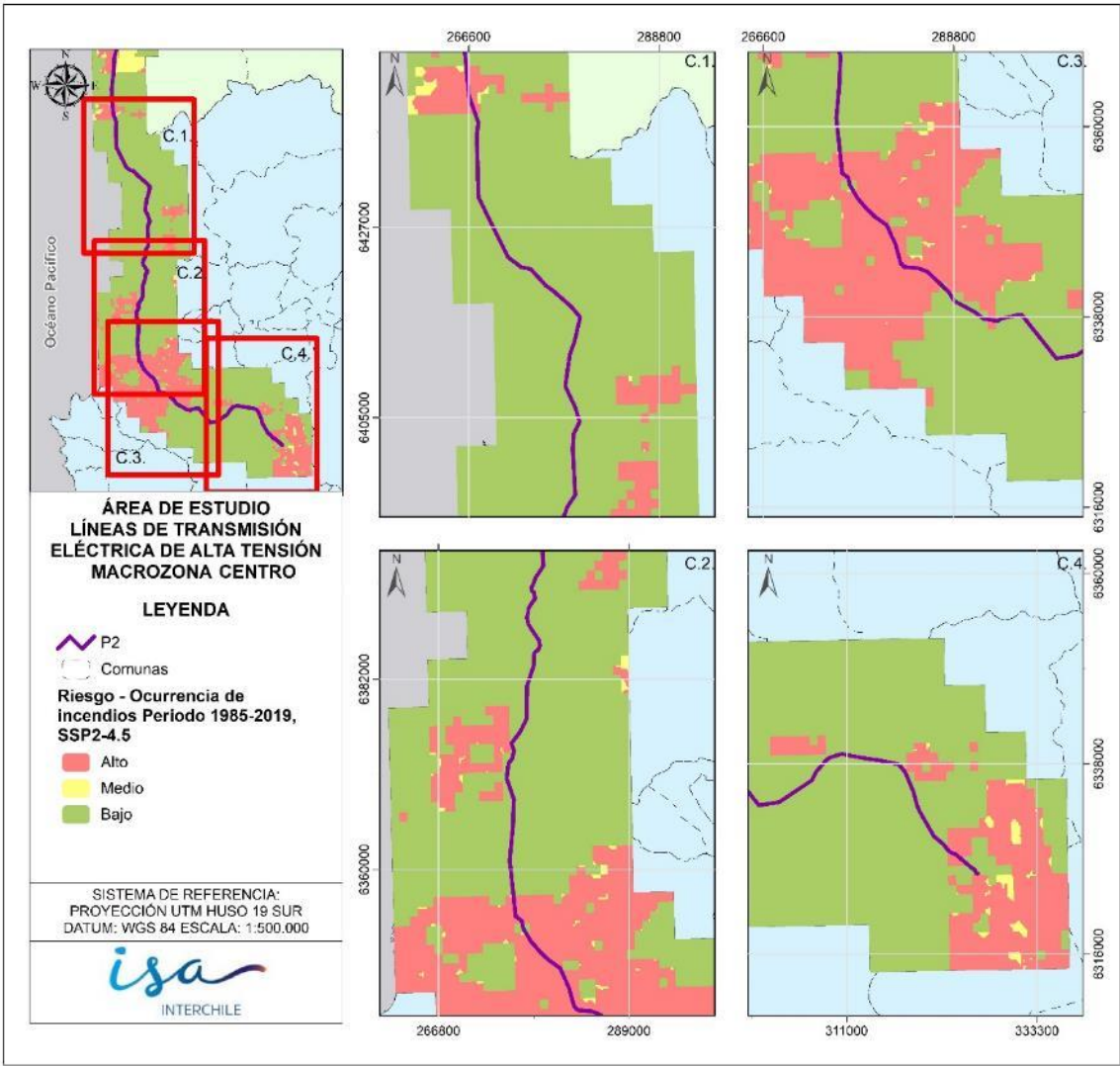


Figura 2-120: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período histórico (1985-2019) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

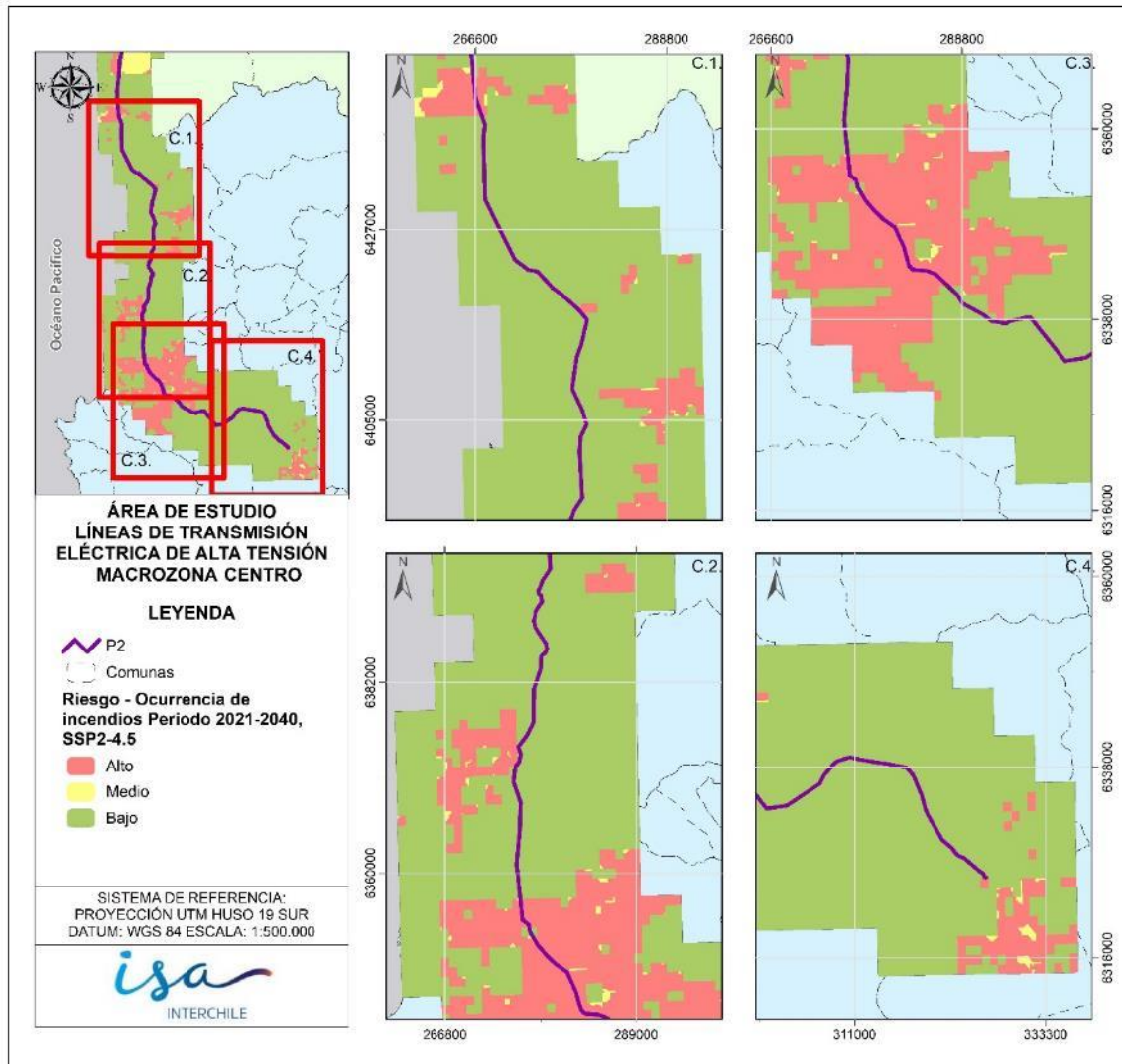


Figura 2-121: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro cercano (2020-2040) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

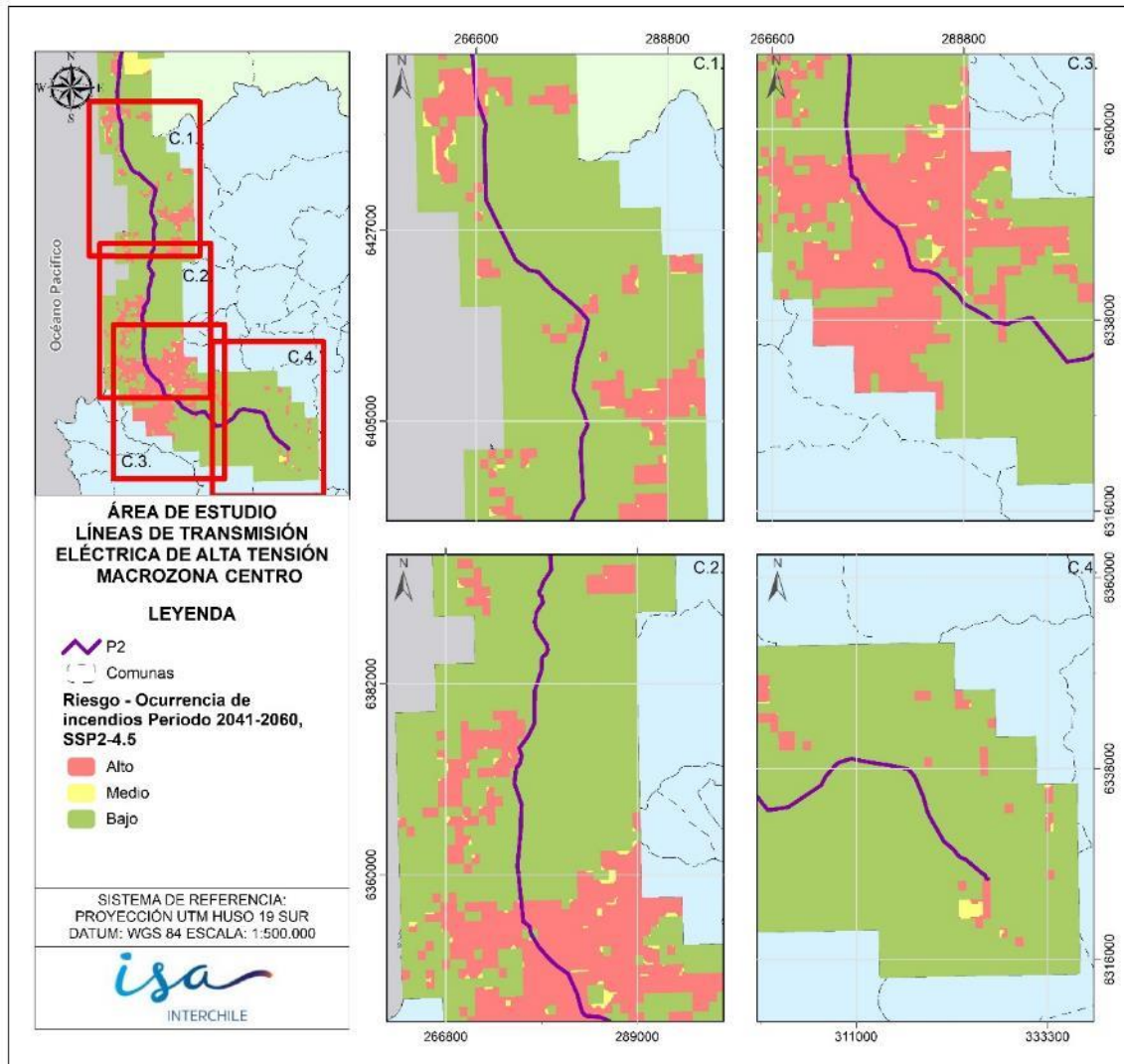


Figura 2-122: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro medio (2040-2060) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

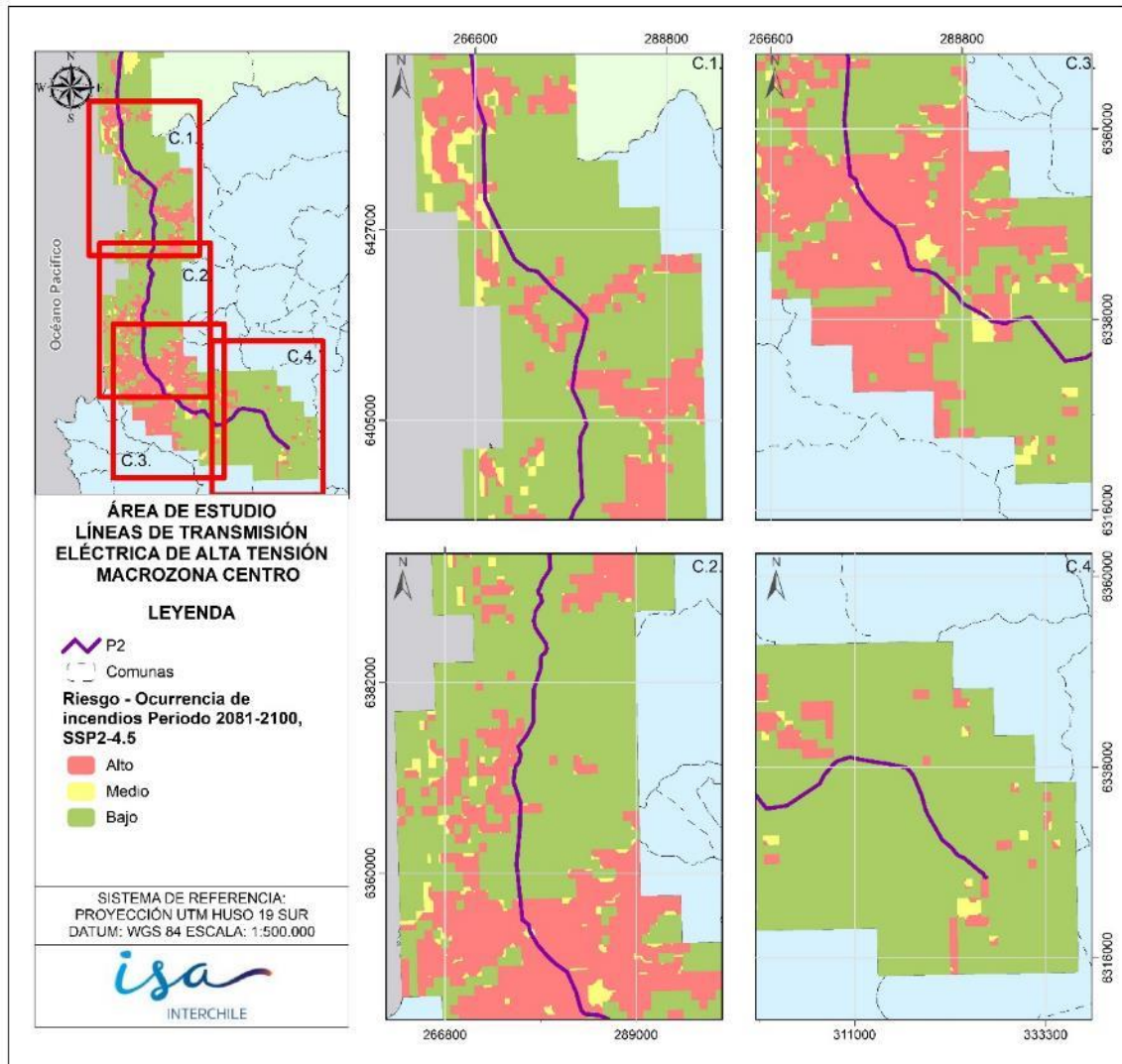


Figura 2-123: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro lejano (2080-2100) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

En el periodo futuro cercano (2020-2040) se ve una disminución generalizada de las áreas de riesgo alto en la macrozona, principalmente en las comunas de Tiltfil y Lampa hasta casi disminuir por completo en el futuro lejano (2080-2100). La tendencia de disminución en el futuro cercano se mantiene para el resto de la macrozona, sin embargo, la tendencia vuelve al alza en el futuro medio (2040-2060) y lejano (2080-2100), aumentando considerablemente el riesgo alto y medio principalmente en las comunas de la zona costera de la Región de Valparaíso,

como Viña del Mar, Quintero, Puchuncaví, y Concón, fenómeno que se repite en menor medida en las comunas de La Ligua, Zapallar y en muy menor medida en Papudo.

En las siguientes figuras (Figura 2-124, Figura 2-125, Figura 2-126 y Figura 2-127) se muestra el riesgo para todos los períodos, en el escenario SSP2-4.5, para la macrozona CentroNorte2.

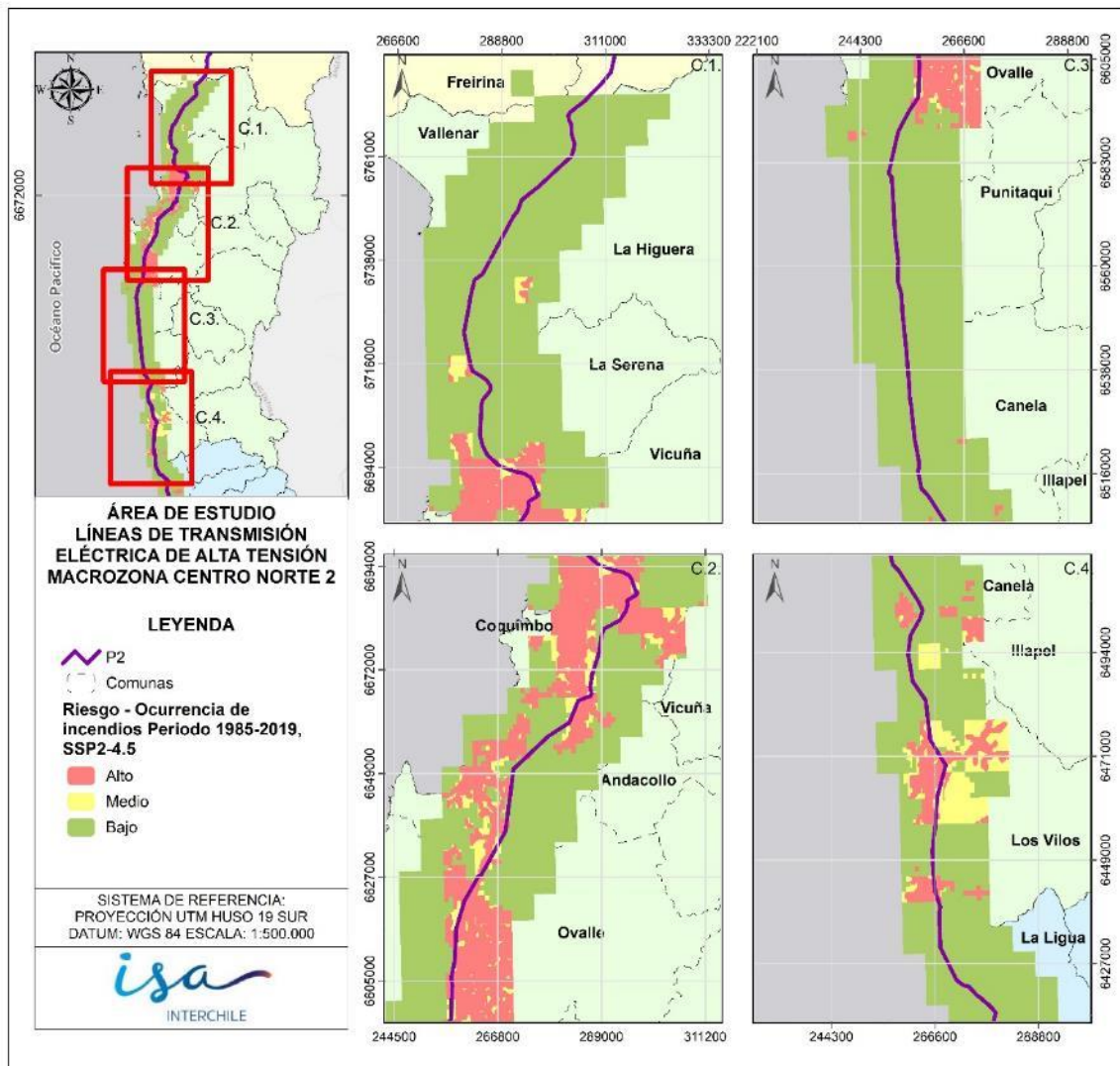


Figura 2-124: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período histórico (1985-2019) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

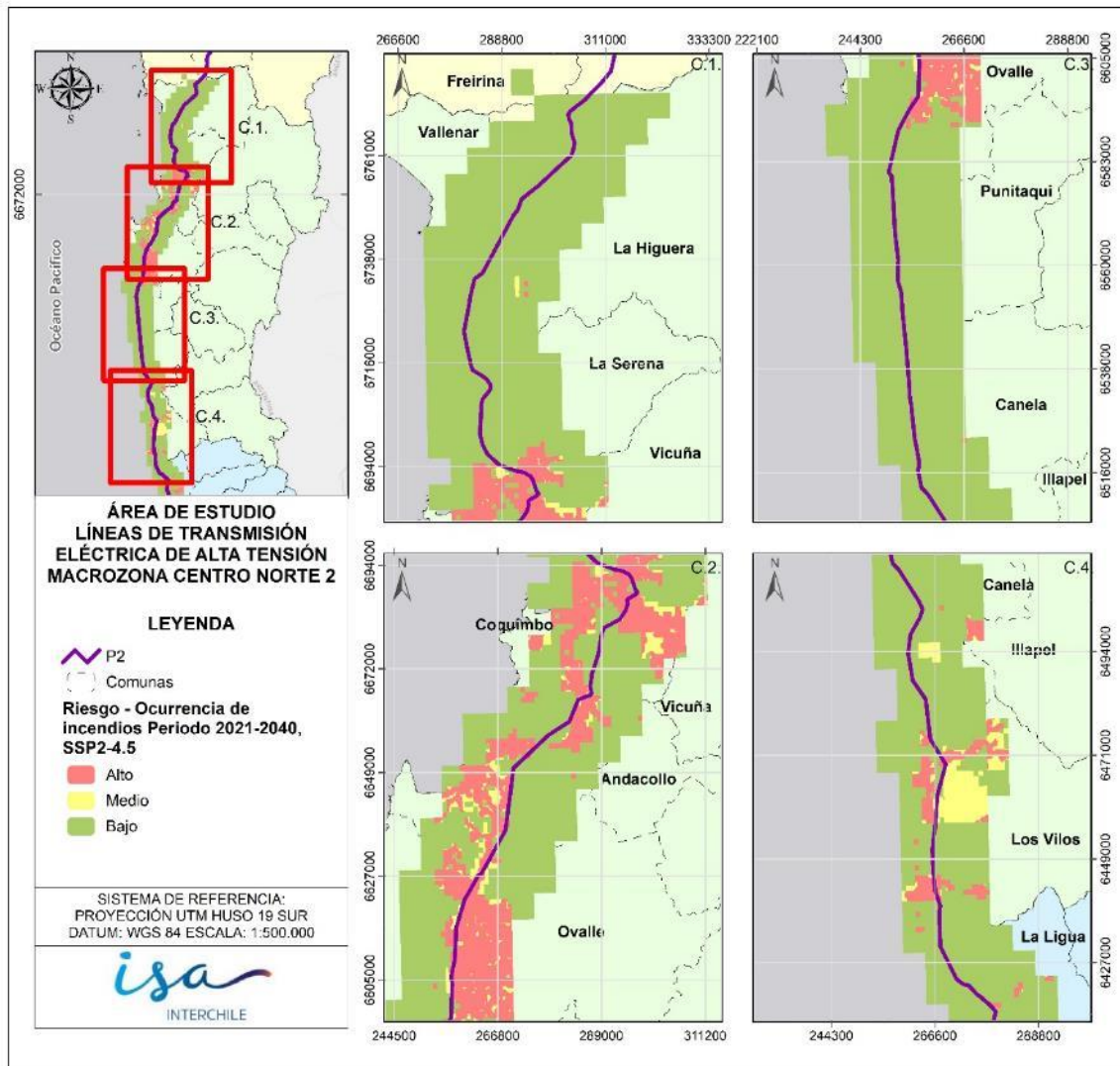


Figura 2-125: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro cercano (2020-2040) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

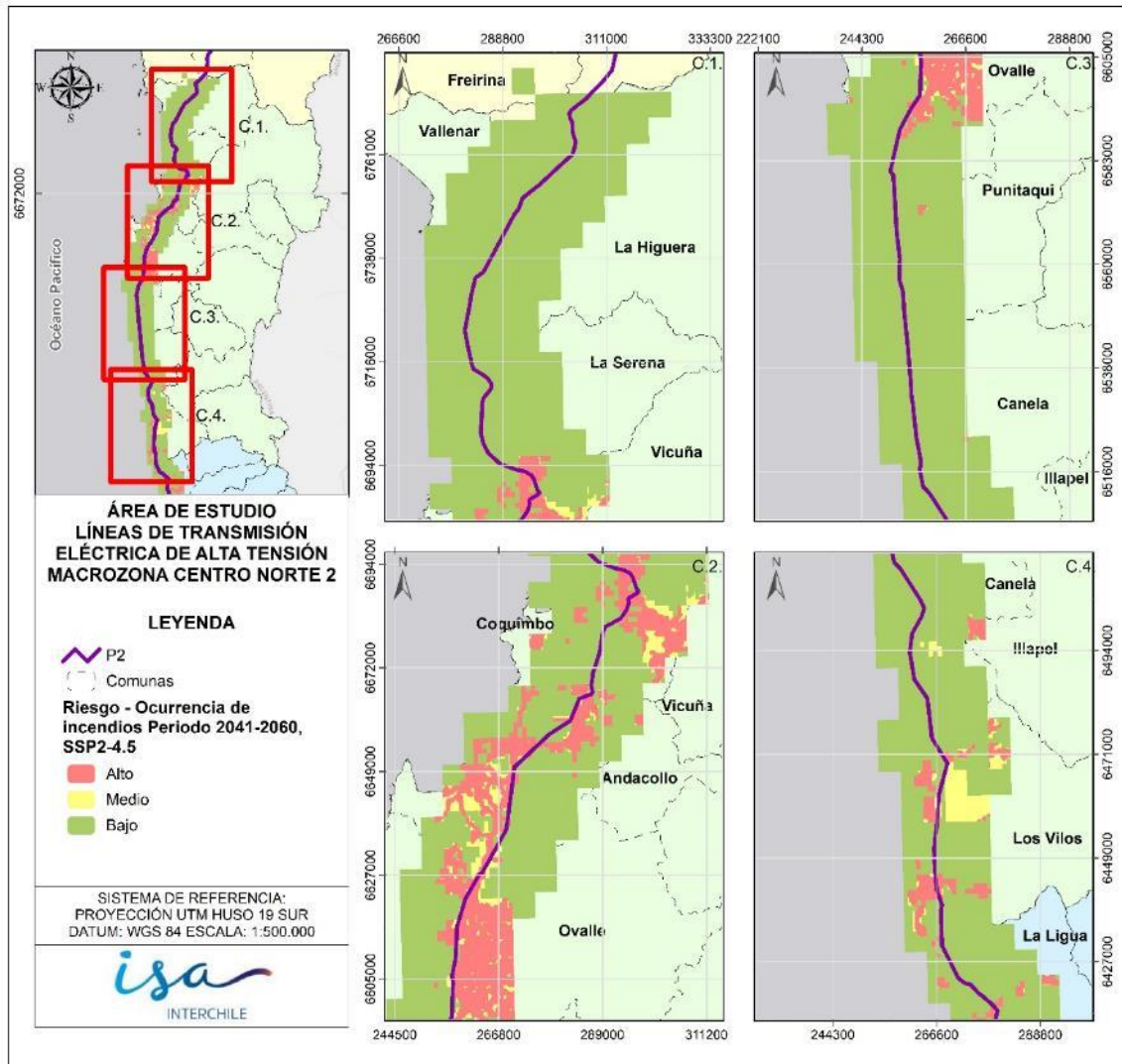


Figura 2-126: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro medio (2040-2060) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

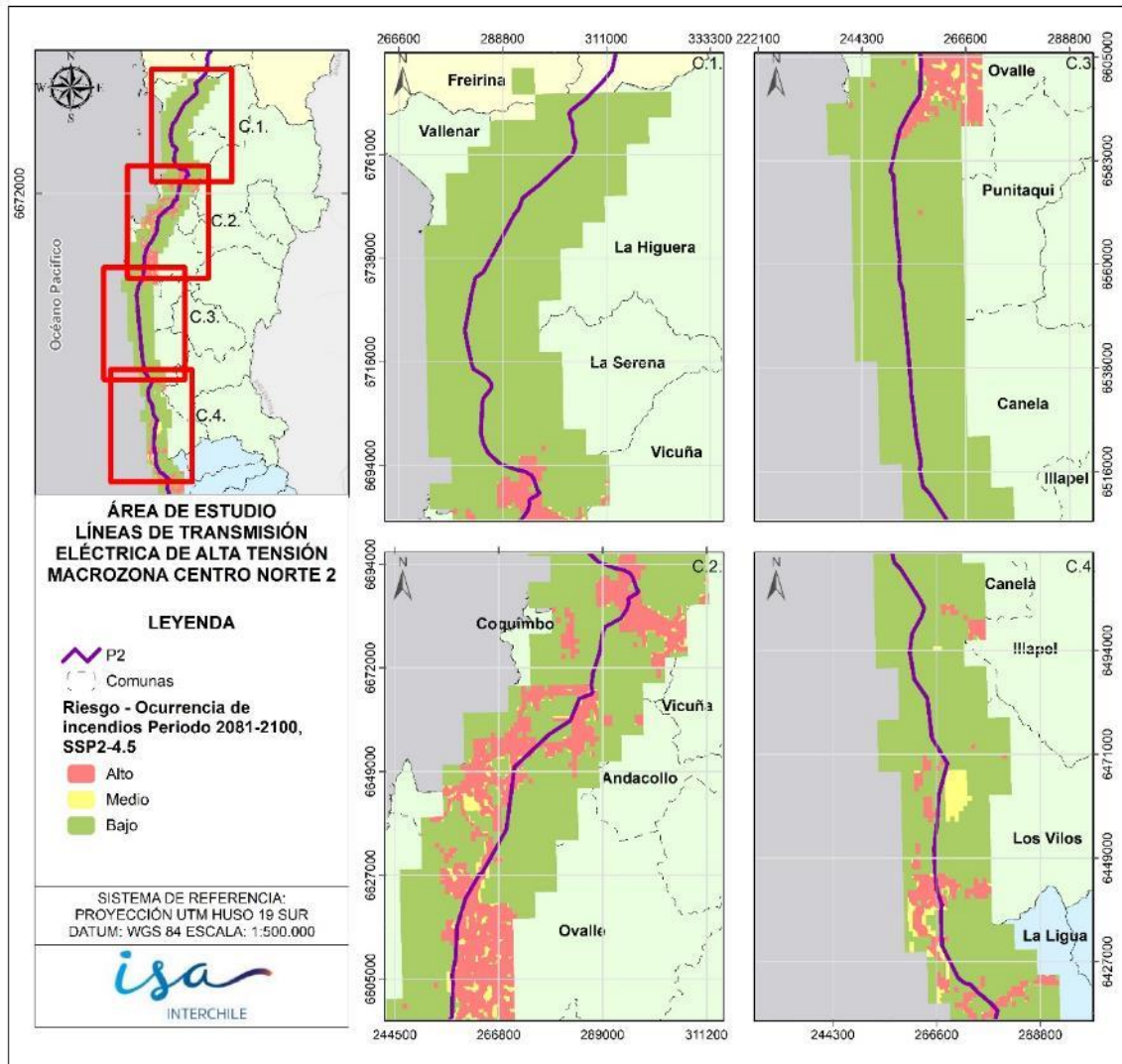


Figura 2-127: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro lejano (2080-2100) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el escenario SSP1-2.6, la tendencia del riesgo alto migra hacia el sur en los escenarios futuros, pero en esta oportunidad con una tendencia levemente más acelerada. La comuna de Ovalle mantiene su tendencia de riesgo alto en el área derecha de la línea de transmisión, y la comuna de los Vilos, de tener riesgos altos y medios en la zona costera norte, migra hacia el sur, más a la frontera con la comuna de La Ligua.

En las siguientes figuras (Figura 2-128, Figura 2-129, Figura 2-130 y Figura 2-131) se presenta el riesgo de ocurrencias de incendios en el escenario SSP5-8.5 en la macrozona Centro.

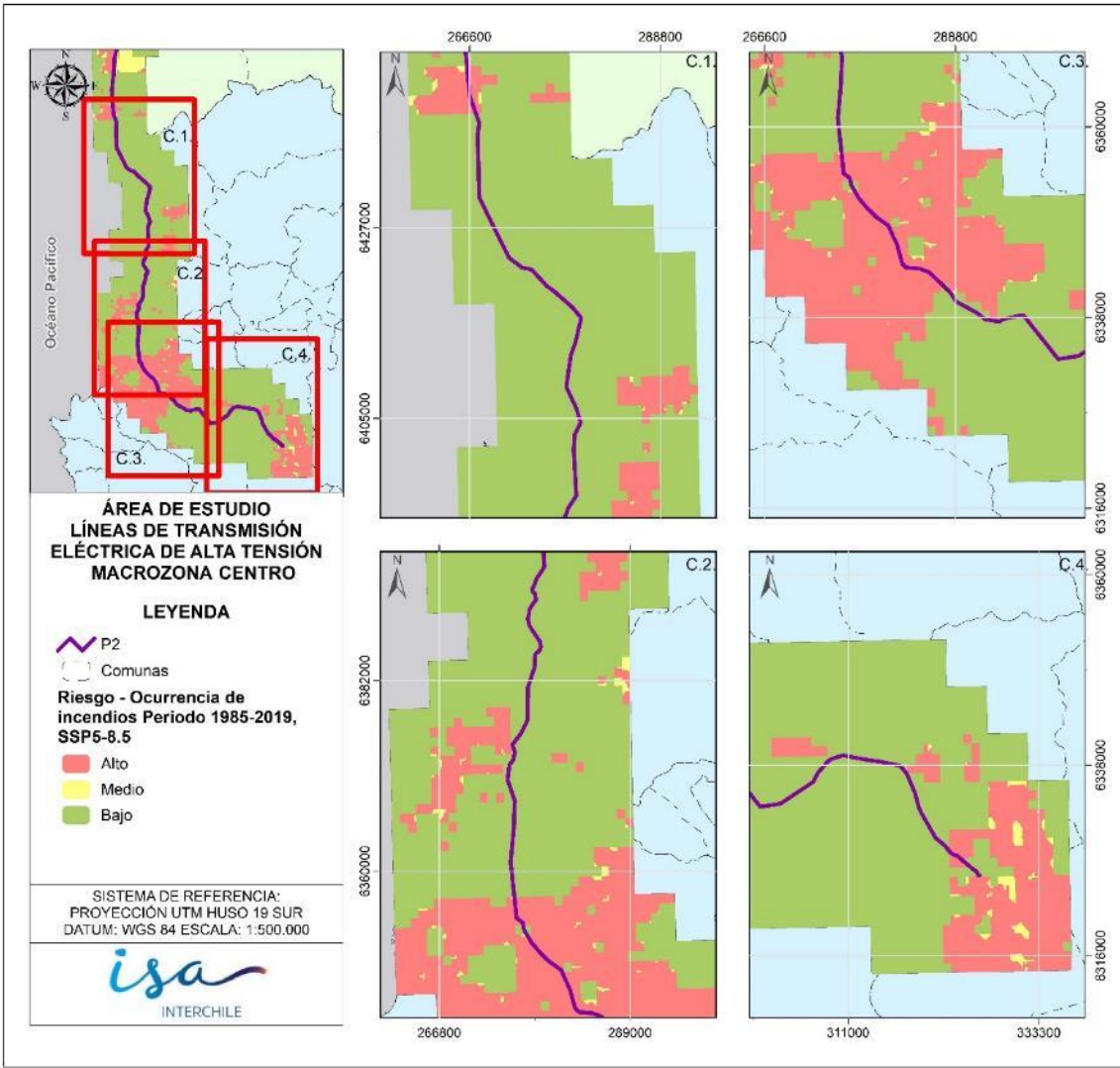


Figura 2-128: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período histórico (1985-2019) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

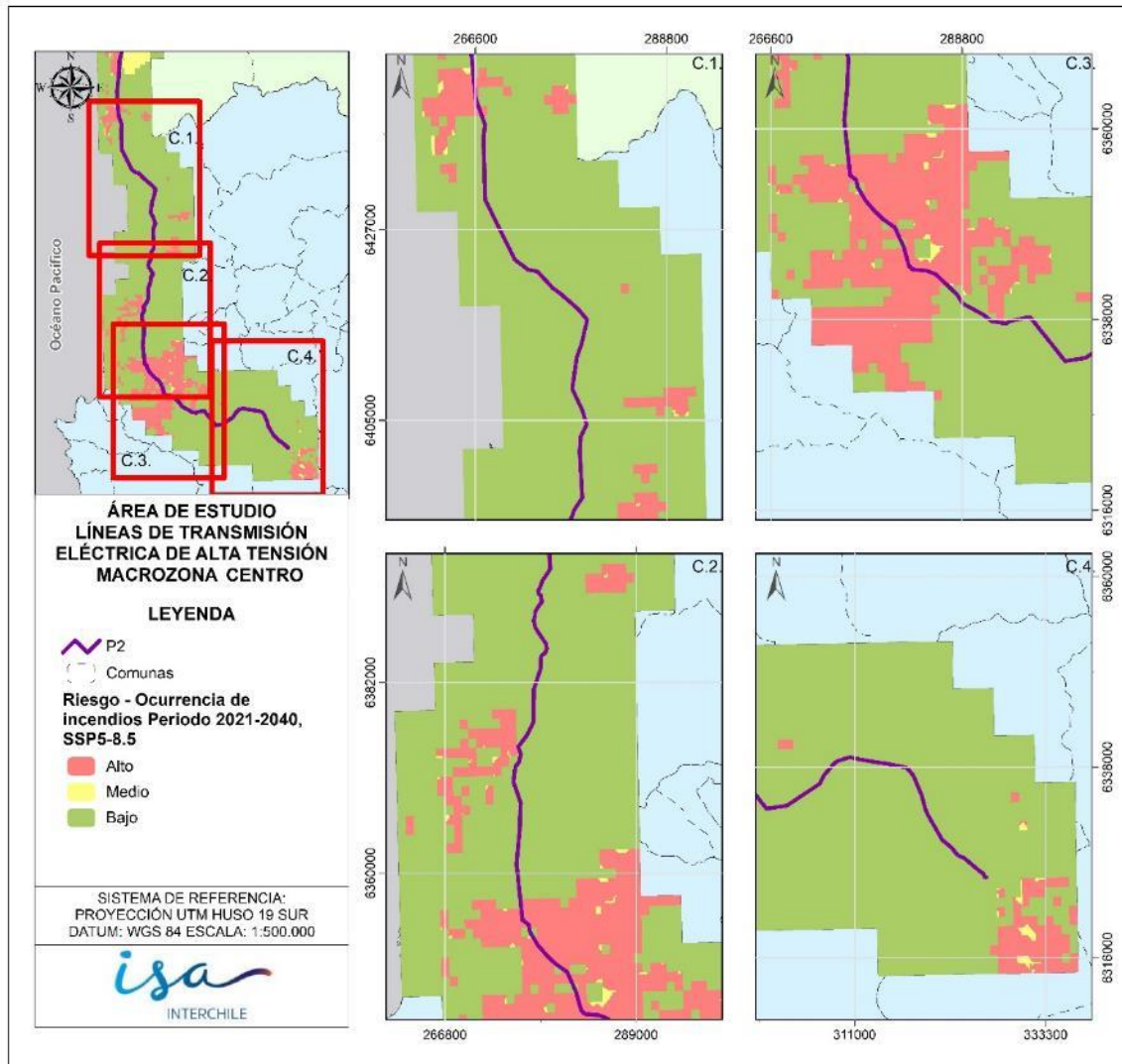


Figura 2-129: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro cercano (2020-2040) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

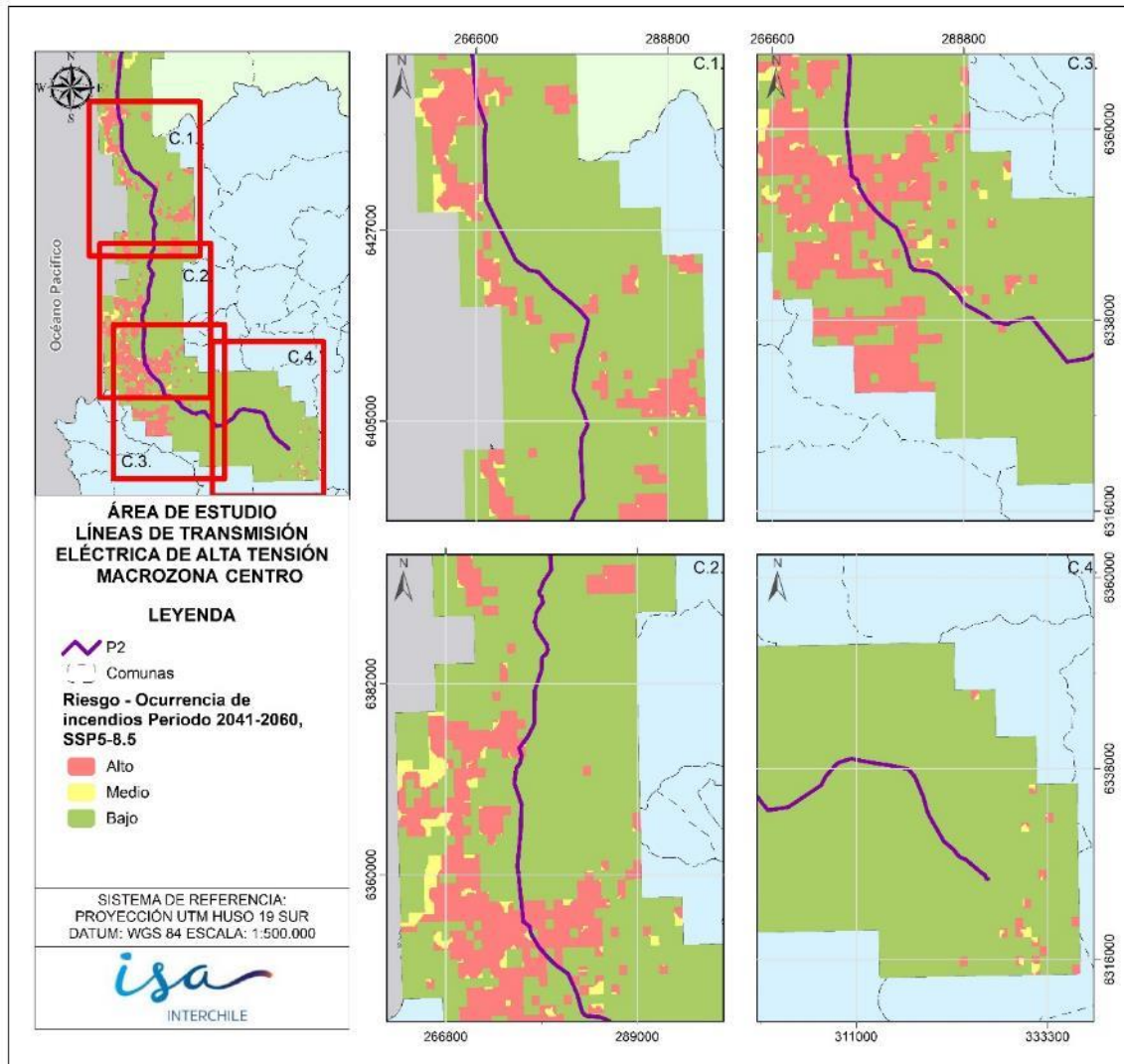


Figura 2-130: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro medio (2040-2060) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

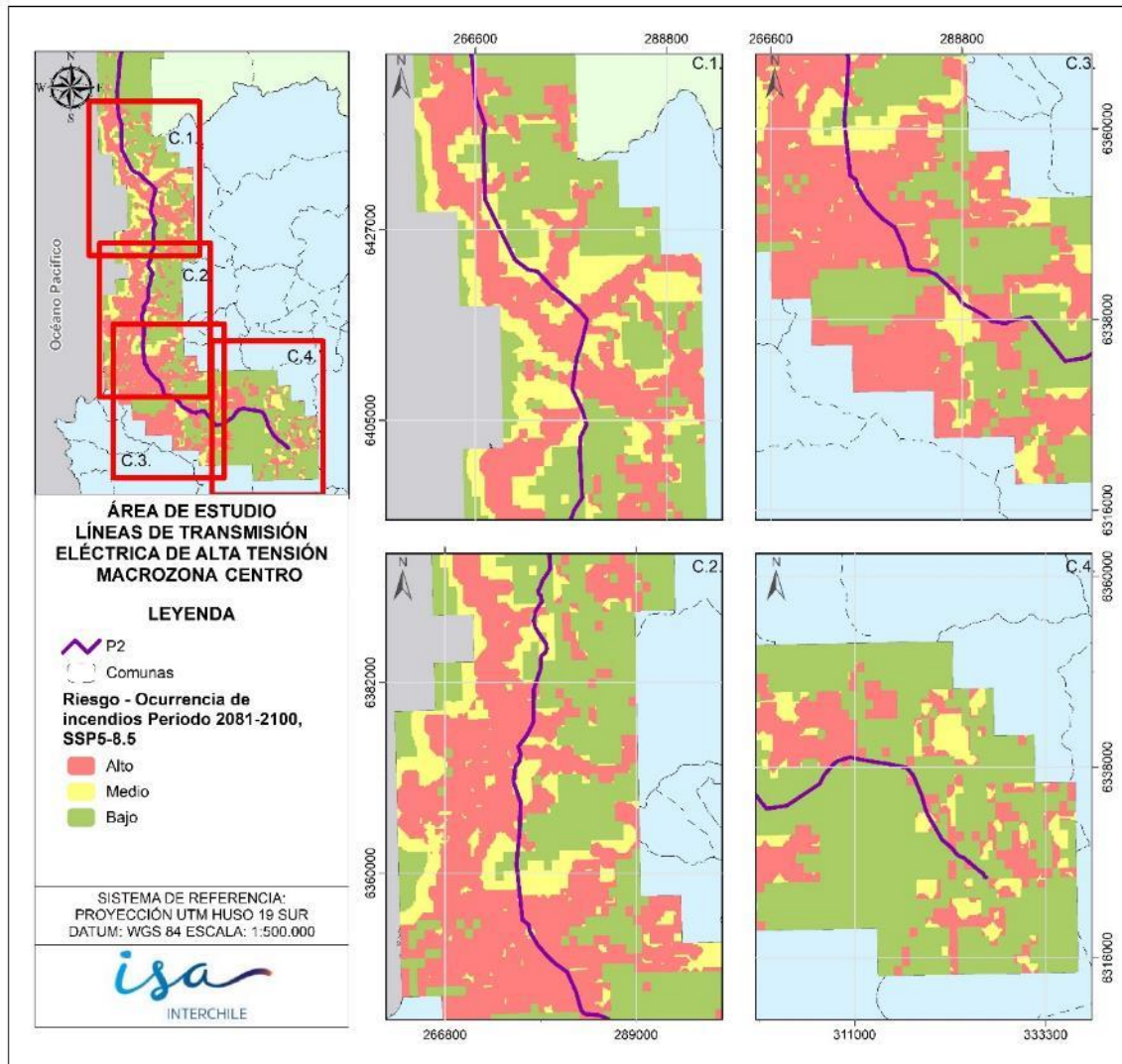


Figura 2-131: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro lejano (2080-2100) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro.

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en los otros modelos presentados, el riesgo alto disminuye de manera generalizada en toda la macrozona en el período futuro cercano (2020-2040), en especial en las comunas de Tiltil y Lampa, sin embargo, se ve un crecimiento del riesgo en el período futuro medio (2040-2060) el cual se exagera en el periodo futuro lejano (2080-2100), donde la gran mayoría de la macrozona aumenta considerablemente su riesgo alto, y se rodea de riesgo medio. A su vez, el riesgo en las comunas de la Región Metropolitana mencionadas previamente vuelve a

aumentar su riesgo de incendios, de manera menos unificada, dispersa pero distribuida de manera medianamente uniforme.

Finalmente, en las figuras a continuación (Figura 2-132, Figura 2-133, Figura 2-134 y Figura 2-135) se muestra el riesgo para el escenario SSP5-8.5 para la macrozona CentroNorte2.

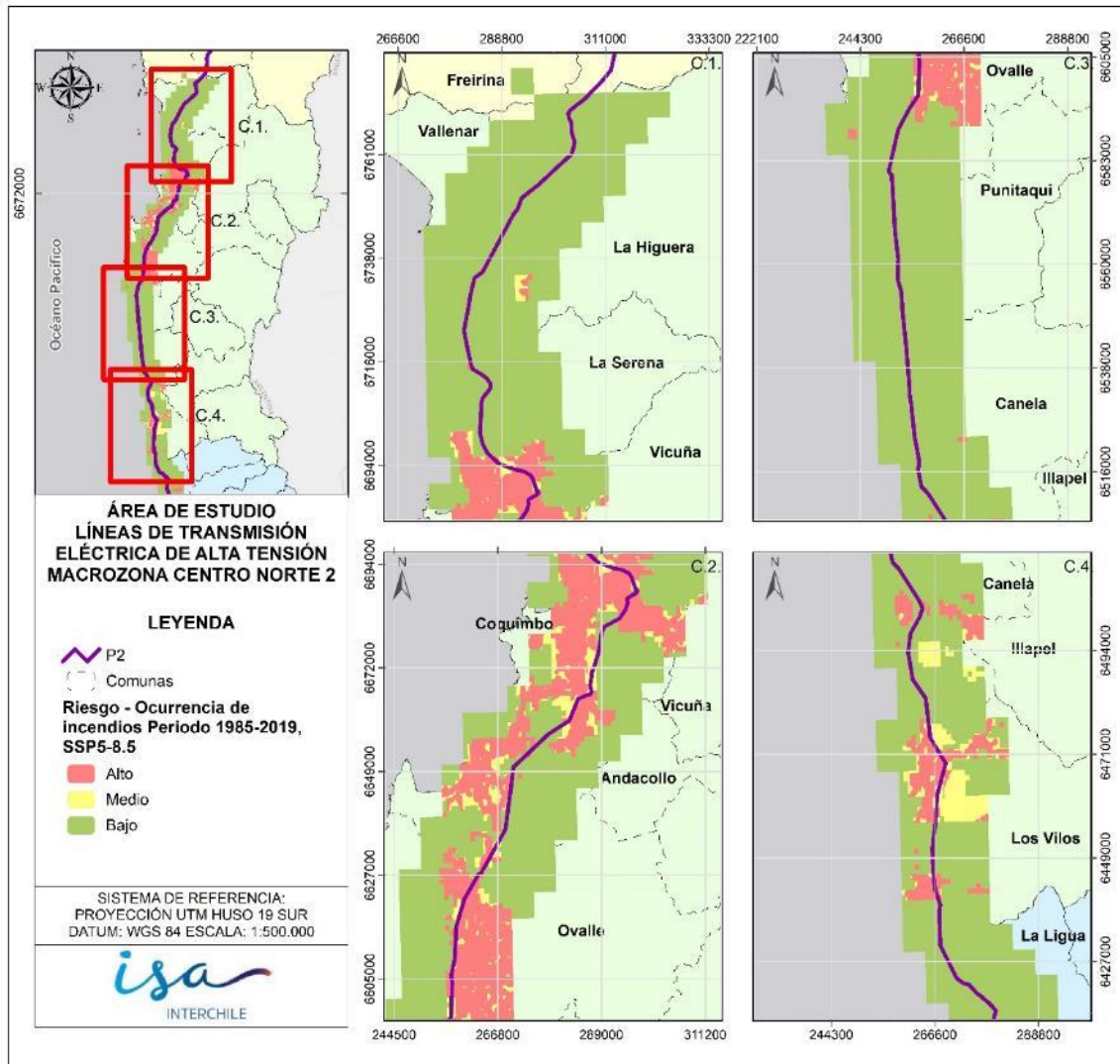


Figura 2-132: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período histórico (1985-2019) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

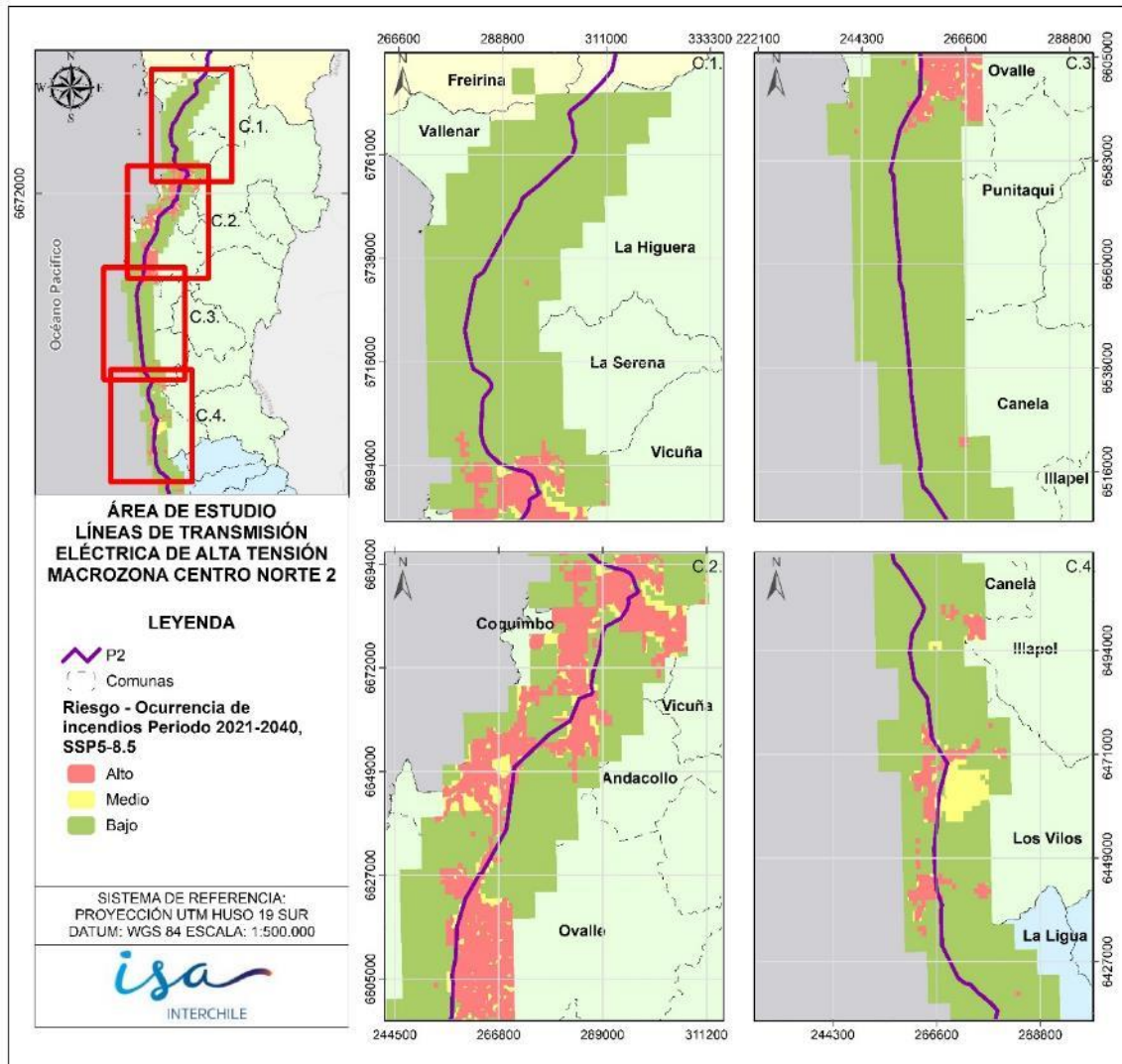


Figura 2-133: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro cercano (2020-2040) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona CentroNorte2.
 Fuente: Elaboración propia.

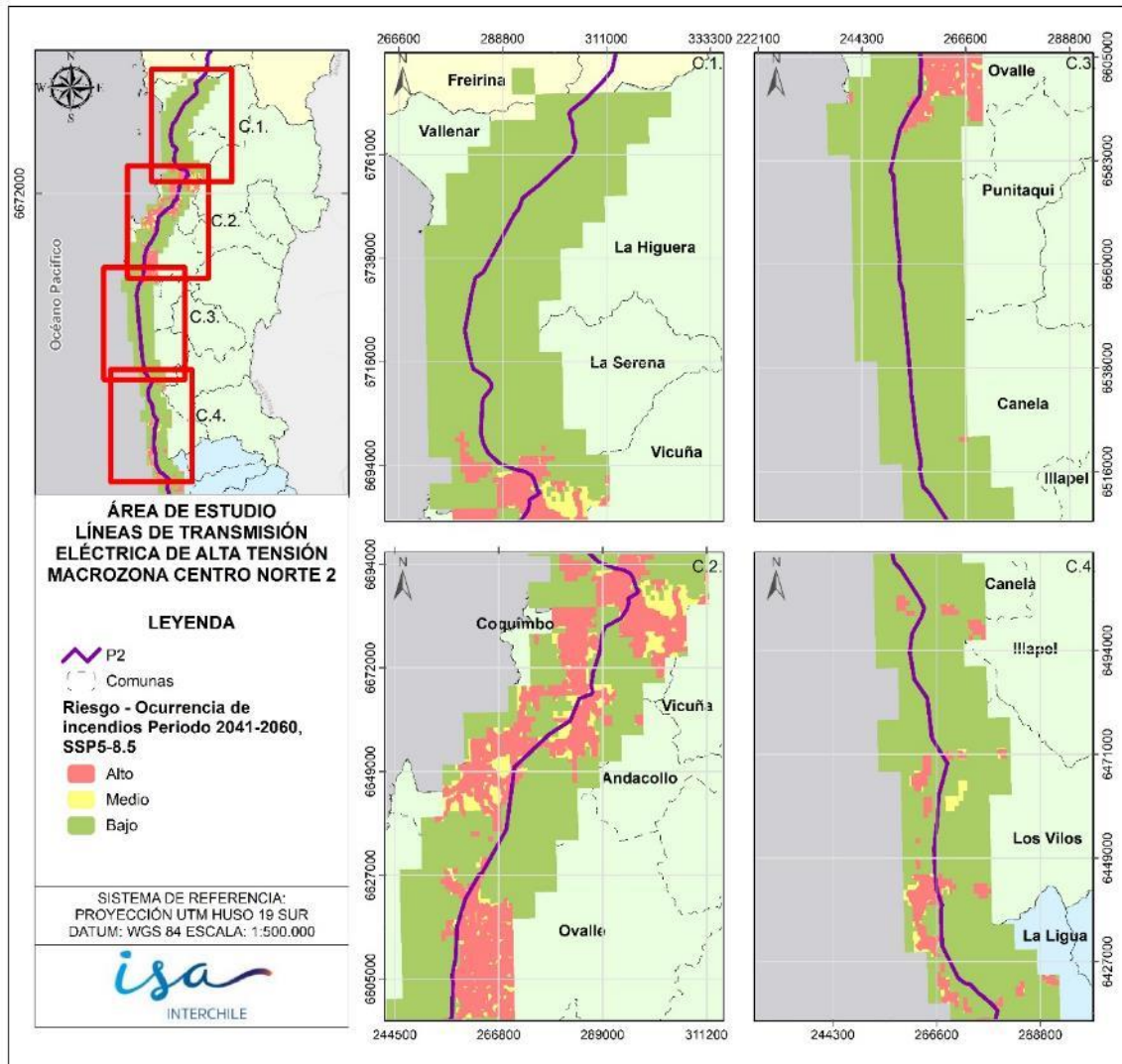


Figura 2-134: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro medio (2040-2060) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

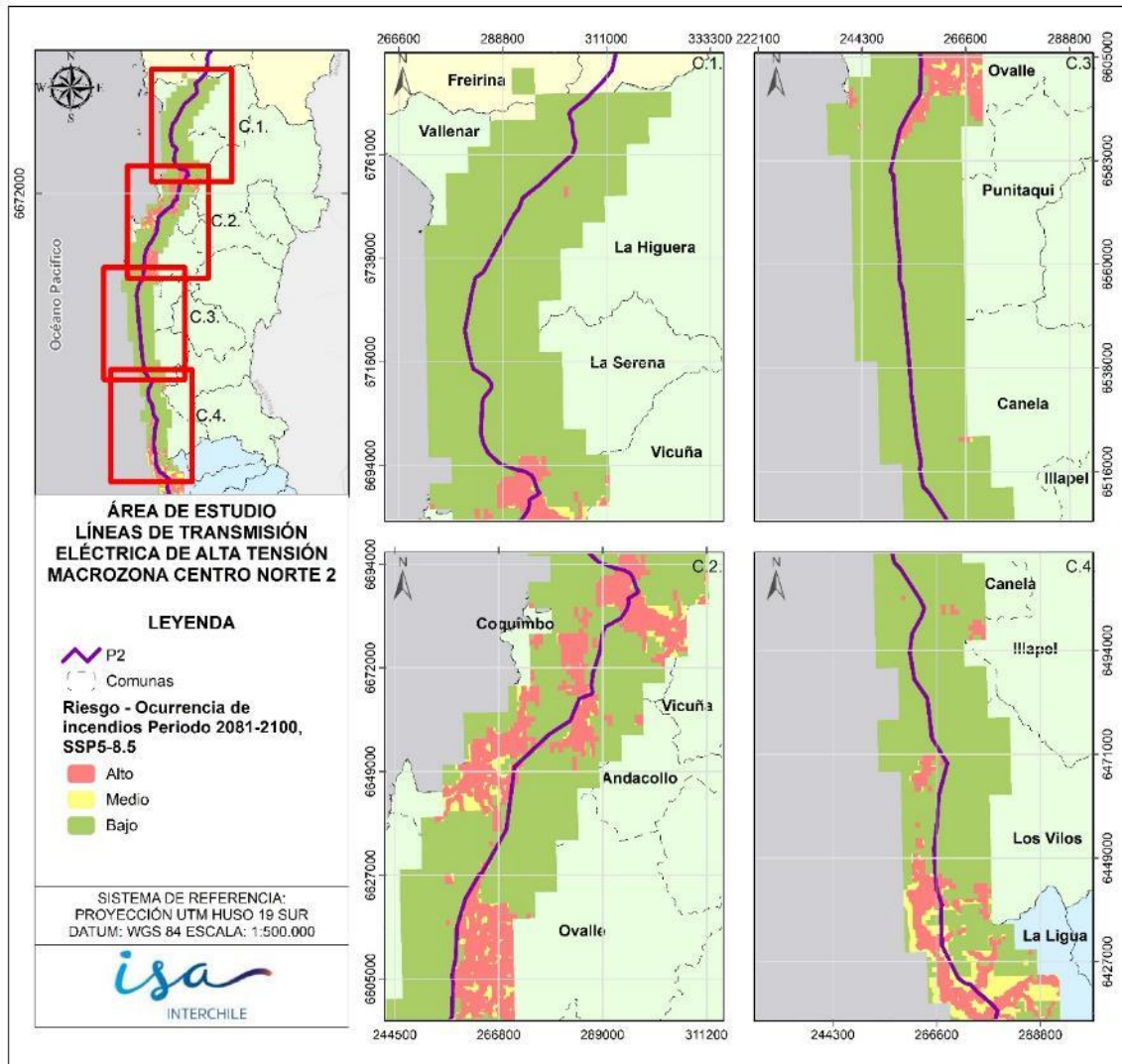


Figura 2-135: Riesgo de ocurrencia de incendios en los activos de INTERCHILE para el período futuro lejano (2080-2100) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

La tendencia que se vio en los otros SSPs presentados anteriormente se mantiene para el periodo futuro cercano (2020-2040), con una disminución y migración del riesgo hacia el sur, esta vez con una disminución menor que lo presentado anteriormente para la macrozona, tendencia que se mantiene en el periodo futuro medio, con leves cambios, como aumento de las áreas de riesgo medio en las comunas de Vicuña y Coquimbo, y una disminución del riesgo medio en Los Vilos. En el futuro lejano (2080-2100) se ve una disminución del riesgo alto y medio

en la zona de La Serena sur, Coquimbo, Vicuña y Andacollo; como también un aumento significativo del riesgo medio y alto en el sur de Los Vilos.

INTERCHILE, como empresa responsable de activos de transmisión eléctrica, enfrenta desafíos significativos en la gestión de riesgos asociados a las secciones que atraviesan las comunas de Coquimbo y Ovalle, así como en la zona de Los Vilos para la macrozona Centro Norte 2. Los mapas de riesgo indican que estas áreas presentan un grado alto de riesgo en términos de ocurrencia de incendios forestales, sobre todo en escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Además, en la macrozona Centro, se identifican comunas con mayor riesgo, especialmente aquellas cercanas a la zona costera, como La Ligua, Papudo, Zapallar, Puchuncaví, Quintero y Concón. También se destacan las áreas de Nogales, La Cruz, Quillota, Hijuelas y Limache, más hacia el interior, cabe reiterar que en el caso del escenario SSP5-8-5, toda esta macrozona está en un riesgo alto de ocurrencia de incendios, lo que puede conllevar a problemas en la continuidad de la transmisión eléctrica. En este sentido, INTERCHILE enfrenta el desafío de implementar medidas preventivas y de gestión de riesgos específicas en estas áreas críticas, considerando las condiciones únicas de cada región y la necesidad de garantizar la seguridad de la infraestructura eléctrica y la prevención de posibles incendios forestales.

La experiencia de incendios catastróficos en lugares como California y Australia (Nueva Gales del Sur), destacan la necesidad urgente de adoptar medidas preventivas para evitar un daño en los equipos eléctricos. Factores como la acumulación de cenizas de incendios anteriores, pueden comprometer la aislación y propiciar el arqueo en seco (*dry-band arcing*) (Drouin, 2021). Para evitar esto, algunas compañías realizan inspecciones y lavado de aislación regular del hardware aislante, sobre todo posterior a eventos de incendios, aunque este método es intensivo en mano de obra (Drouin, 2021).

INTERCHILE, como titular de activos de transmisión eléctrica, se encuentra enfrentando riesgos significativos asociados a la creciente amenaza de incendios forestales en áreas montañosas donde están sus líneas de transmisión. La incidencia de incendios es tanto regional como estacional, siendo los meses secos y las zonas montañosas con vegetación escasa los más propensos a estos riesgos (Zhicheng, 2021). Esta situación se agrava debido a factores relacionados con el cambio climático en todos los escenarios y en todos los futuros analizados. Además, las líneas de transmisión en estas áreas están expuestas a diversas amenazas, como arcos eléctricos generados por la interacción de las llamas con

los conductores que de acuerdo a los criterios de diseño para las Líneas de Transmisión (LT) de 500 kV, la temperatura máxima en el conductor será de 60,7°C, estando la LT a su capacidad máxima (1700 MVA por circuito) (Consultoría Colombiana S.A., 2013).

El riesgo de incendios en áreas montañosas no es exclusivo de Chile, como lo demuestran experiencias similares en regiones como el sur de China, donde la temporada seca propicia incendios que representan una proporción significativa de las fallas en líneas de alto voltaje. Las investigaciones realizadas por diversas instituciones han demostrado que los incendios pueden afectar la capacidad de aislamiento externo y las descargas en el espacio de aire en líneas de alta tensión, lo que complica la recuperación del sistema eléctrico después de una interrupción (Zhicheng, 2021).

Frente a estos desafíos, es imperativo para INTERCHILE considerar medidas preventivas específicas, como la instalación de sistemas de monitoreo en tiempo real en áreas propensas a incendios y medidas de prevención en los trazados.

2.6.4 Vulnerabilidad y riesgo asociado a lavado por precipitaciones

La vulnerabilidad del sistema viene dada por la sensibilidad del sistema a cortes en el servicio que se atribuyan a condiciones forzadas por el clima, en este caso, la presencia de largos periodos de ausencia de precipitaciones.

En ese sentido, la vulnerabilidad tiene una componente binaria en aquellas zonas en donde el trazado de la línea se encuentre a expuesta a periodos prolongados de *Dry spell*, lo que produce directamente un evento de corte en el servicio si no se controla. Esto, por su parte, puede impactar en mayores costos de operación de sistema. En este sentido, la vulnerabilidad en el caso de Líneas de Transmisión eléctrica puede vincularse con tres factores principales:

- La contaminación de aisladores se da principalmente en zonas costeras (niebla salina), zonas de contaminación atmosférica, o zonas en donde las condiciones de viento favorezcan el levantamiento de polvo.
- El lavado de líneas es uno de los principales costos de Operaciones.
- Norte Grande y Chico, se considera que no llueve y por eso se debe lavar con mayor frecuencia. En requerimientos formales no se hace referencia a que existan sesiones de lavado en el tramo Cardones-Polpaico.

2.7 Riesgos en comunidades de interés para INTERCHILE

2.7.1 Disponibilidad de agua en las comunidades

Diversos estudios han aportado evidencia de que el Cambio Climático impactará las condiciones hidrológicas y de uso del agua en Chile, especialmente en la zona centro sur del país (Demaria et al., 2013; Meza et al., 2014; Bozkurt et al., 2018).

Por lo expuesto en la sección de cambios esperados en condiciones medias de temperatura y precipitación, es esperable que existan aumentos relativos de la precipitación en la macrozona Norte. A su vez, se prevén cambios relativamente neutros a disminuciones en las macrozonas Centro Norte 1 y 2 y disminuciones de precipitaciones medias anuales en macrozona Centro que son significativas.

Respecto de las temperaturas, hay evidencia de aumentos de al menos 0,7°C hacia el periodo 2020-2040 en el escenario más severo, lo que es consistente tanto en todos los modelos como en todas las macrozonas analizadas.

Por su parte, analizando los resultados de la homologación del balance hídrico nacional, se espera una disminución en los caudales medios producto del aumento de evapotranspiración potencial (ETP, la cantidad de agua que la atmósfera demanda), debido a un clima cada vez más cálido. A su vez, se proyectan cambios en la estacionalidad de los caudales debido al aumento de temperatura y la menor acumulación de nieve en cuencas nivales (Vicuña et al, 2011), lo que repercutirá en la oferta de agua para la población en sus distintos usos, bajo condiciones naturales.

A nivel de riesgo, la Figura 2-136 muestra el cambio (%) en las condiciones medias de escorrentía (disponibilidad hídrica superficial como resultado de la precipitación) más Flujo Base (el caudal de agua que se mantiene de forma continua fuera del periodo de lluvias). Esta variable combinada es un indicativo de la oferta de agua futura, o dicho de otra forma un indicador de disponibilidad hídrica. Se observan, por SHAC analizado, los siguientes resultados:

- **SHAC Pampa del Tamarugal (Macrozona Norte):** Se prevé disminución de la disponibilidad hídrica superficial en magnitudes desde el -3% respecto del periodo histórico de Balance Hídrico (1985-2015), existen disminuciones menos marcadas e incluso celdas con aumento en la oferta hídrica hacia

el este del SHAC, lo que puede ser concordante con el incremento relativo de precipitaciones esperada para la zona según los modelos.

- **SHAC´s Freirina Bajo, Freirina Alto, Vallenar Bajo, y Vallenar Alto (Macrozona Centro Norte 1):** Se estiman disminuciones inferiores a -15% en la mayoría de las celdas de los SHACs, sobre todo en las zonas vinculadas a las comunidades y los servicios sanitarios rurales respectivos. No obstante, se aprecian celdas con cambios positivos en la oferta hídrica, pero parecen ser anomalías dentro del modelo.
- **SHAC´s Serena Norte, Santa Gracia, Peñuelas, Elqui Bajo, Culebrón, Lagunillas (Macrozona Centro Norte 2):** Se aprecian disminuciones severas de oferta hídrica en todos los sectores, con excepción de algunas celdas al norte de La Serena. Esto afecta a todas las comunidades de interés vinculadas a estos sitios y a los SSR que se encuentran en la zona.
- **SHAC´s Estero Catapilco, Estero Puchuncaví, Estero Pucalán, Acuífero 7 – Quillota, Acuífero 9 – Limache, Tilti, Puangue Alto (Macrozona Centro):** Se prevén disminuciones severas de al menos -12% hacia 2030-2060 respecto del periodo histórico de Balance Hídrico (1985-2015) en todas las celdas que caracterizan a los SHAC´s. Esto se vincula directamente a una disminución de la seguridad hídrica por concepto de agua superficial en las comunidades de interés para INTERCHILE.

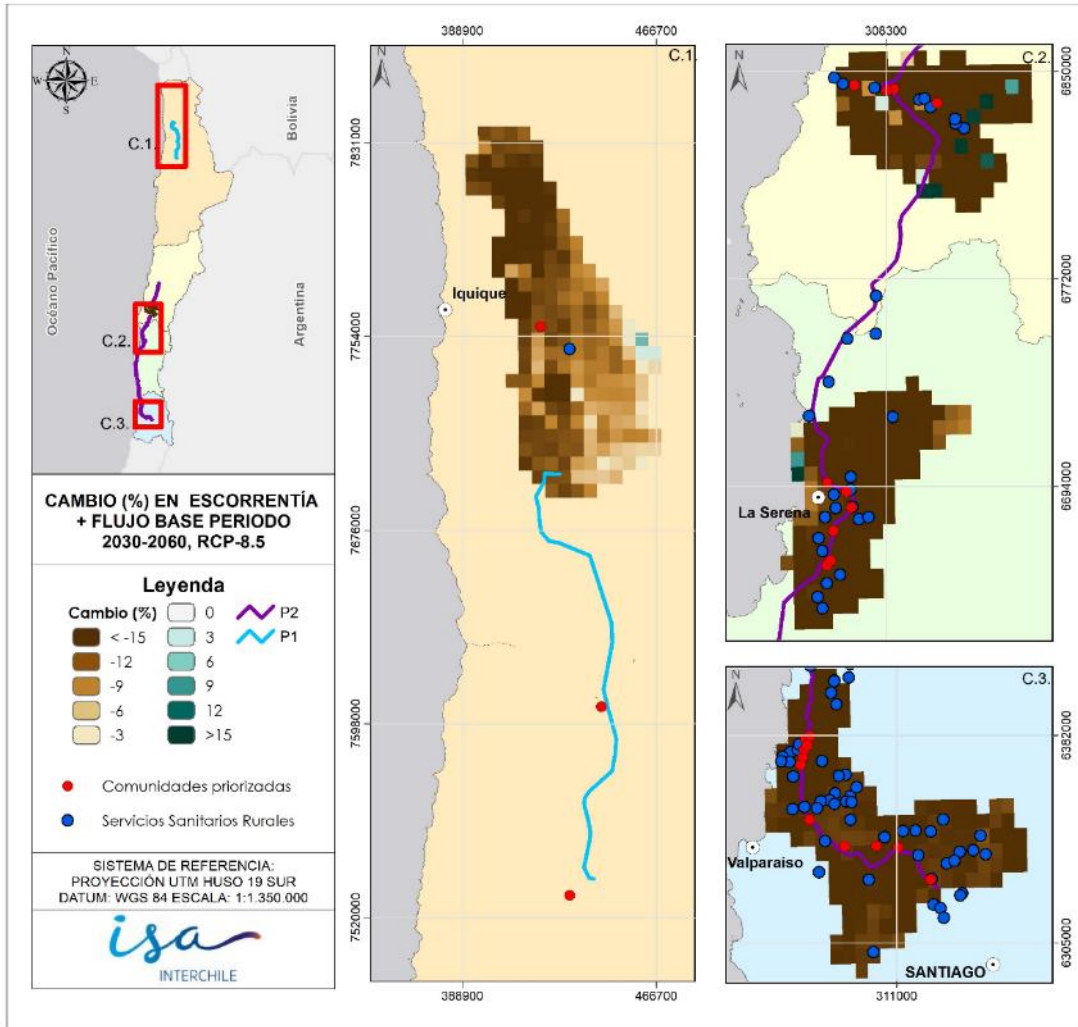


Figura 2-136: Cambio en la escorrentía más flujo base en Sitios Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC's) vinculados a las comunidades de interés para INTERCHILE y los Servicios Sanitarios Rurales.

Fuente: Elaboración propia.

2.7.2 Disponibilidad de agua sobre actividades agrícolas

Selección de cultivos

Considerando todas las comunas en las cuales se encuentran presentes las líneas de transmisión, se hace una revisión del VIII Censo Agropecuario y Forestal, año agrícola 2020 – 2021 (INE, 2021) para determinar la superficie de cultivos presentes en las comunas La Serena, Coquimbo, Ovalle, Quillota, Limache, Villa Alemana y

Tiltil. En la Tabla 2-26 se presentan las superficies cultivadas en las comunas antes mencionadas. En esta tabla se puede ver que del grupo Cereales, el cultivo con mayor superficie cultivada corresponde al maíz, para el grupo Forrajeras el cultivo con mayor superficie es la alfalfa, para el grupo Leguminosas y tubérculos corresponde a la papa y para el grupo Frutales corresponde al Olivo.

Tabla 2-26: Superficie total (ha) por cultivo presentes en las comunas de interés.

Tipo de cultivo	Especie	Superficie total cultivo (ha)
Cereales	Maíz	90
	Avena (Grano Seco)	56
	Trigo Blanco	8
	Cebada Cervecera	4
	Otros Cereales	40
Forrajeras	Sin Clasificar	2
	Alfalfa	857
	Arveja Forrajera	6
	Avena (Forrajera) Sola	184
	Mezcla de Forrajeras	1
	Otras Forrajeras Permanentes	1
	Cebada Forrajera (incluye silo)	68
	Pasto Ovillo	1
	Trébol Rosado	1
	Centeno Forrajero	3
	Maíz Para Silo	68
Leguminosas y Tubérculos	Poroto (Grano Seco)	31
	Otras Leguminosas	10
	Mandioca (Yuca)	7
	Papa	1,229
	Otras Raíces y Tubérculos	2
	Arveja (Grano Seco)	1
Vides para vinificación y uvas pisqueras	Tintas	604
	Blancas	1,024
	Pisqueras	1,678
Frutales	Clementina	92
	Limonero	1,657
	Naranja	381
	Palto	3,181
	Papayo	63
	Berries	132

Tipo de cultivo	Especie	Superficie total cultivo (ha)
	Chirimoyo	91
	Olivo	3,344
	Almendro	1,034
	Mandarina	1,216
	Uva de Mesa	1,669
	Cerezo	178
	Nogal	655
	Quinta Frutal	1.9
	Duraznero (Tipo Conservero)	69
	Tuna	191

Fuente: INE, 2021.

En la Tabla 2-26 se encuentran marcadas en negrita los cultivos seleccionados para su evaluación de requerimientos hídricos en las diferentes proyecciones. A continuación, se presentan los supuestos de coeficiente de cultivo (Kc) asumidos para cada cultivo seleccionado, duraciones por etapa y fecha de siembra (Tabla 2-27 y Tabla 2-28). Con esta información y con el valor de evapotranspiración potencial dado por la fórmula de Hargreaves, se puede calcular los cambios en requerimientos hídricos de estos cultivos (ETc).

Tabla 2-27: Valores de coeficiente de cultivo (Kc) para frutales como Cítrico, Palto y Olivo.

Mes	Limonero (Cítrico)	Palto	Olivo
Enero	0,75	0,75	0,55
Febrero	0,75	0,75	0,55
Marzo	0,8	0,8	0,55
Abril	0,8	0,8	0,6
Mayo	0,8	0,8	0,65
Junio	0,85	0,85	0,5
Julio	0,85	0,85	0,5
Agosto	0,85	0,85	0,65
Septiembre	0,85	0,85	0,6
Octubre	0,85	0,85	0,55
Noviembre	0,8	0,8	0,55
Diciembre	0,8	0,8	0,55

Fuente: Jara y Valenzuela (1998).

Tabla 2-28: Parámetros coeficiente de cultivo (Kc), duración y fecha de siembra para cultivos Maíz y Papa.

Parámetros	Maíz	Papa
Kc inicial	0,4	0,45
Kc desarrollo	0,8	0,75
Kc media	1,15	1,15
Kc maduración	0,7	0,85
Duración inicial (días)	30	30
Duración desarrollo (días)	40	35
Duración media (días)	50	50
Duración fin (días)	30	25
Fecha de siembra	01 septiembre	01 agosto

Fuente: Jara y Valenzuela (1998), Allen et al. (2006), Inostroza et. al. (2017).

Estaciones meteorológicas

Se consultó la página de la Red Agrometeorológica INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias) para revisar la información de las estaciones meteorológicas. Se realizó un filtro, el cual corresponde a la selección de la estación en caso de contar con 5 años o más de información registrada (Tabla 2-29). Los datos fueron descargados el 5 de septiembre de 2023.

Tabla 2-29: Listado de estaciones meteorológicas de la Red Agrometeorológica INIA presentes en el área de estudio.

Nombre estación	Latitud	Longitud	Elevación (m)	Año inicial de registro	Año final de registro ¹	Selección de la estación
Aeródromo La Florida, La Serena	-29,91	-71,2	142	2018 enero 01	2023 agosto 31	Sí
Aerodromo Torquemada	-32,94	-71,47	141	2019 marzo 12	2023 agosto 31	No
Cachiyuyo, Vallenar	-29,05	-70,9	950	2013 septiembre 06	2023 agosto 31	Sí
Camarico	-30,69	-71,62	187	2022 enero 01	2023 agosto 31	No
Canela, Canela	-31,39	-71,41	350	2013 julio 09	2023 agosto 31	Sí
Catapilco	-32,56	-71,29	81	2018 diciembre 11	2023 agosto 31	No

Nombre estación	Latitud	Longitud	Elevación (m)	Año inicial de registro	Año final de registro ¹	Selección de la estación
CE Huasco, Vallenar	-28,58	-70,79	470	2011 febrero 01	2023 agosto 31	Sí
Cerro Grande, La Serena	-29,93	-71,22	513	2015 agosto 06	2023 agosto 31	Sí
Colliguay, Quilpué	-33,16	-71,15	580	2017 agosto 06	2023 agosto 31	Sí
El Maqui, Puchuncaví	-32,75	-71,34	179	2017 enero 01	2023 agosto 31	Sí
El Romeral, La Serena	-29,75	-71,25	162	2009 junio 01	2023 agosto 31	Sí
Freirina	-28,51	-71,01	156	2018 diciembre 11	2023 agosto 31	No
Gabriela Mistral, La Serena	-29,97	-71,08	198	2009 junio 01	2023 agosto 31	Sí
Huentelauquén, Canela	-31,58	-71,6	22	2017 septiembre 01	2023 agosto 31	Sí
Liceo padre Jose Herde	-31,39	-71,41	343	2019 marzo 12	2023 julio 30	No
Lo Pinto	-33,26	-70,73	512	2018 diciembre 12	2023 agosto 31	No
Mincha Sur, Canela	-31,59	-71,42	50	2013 julio 24	2023 agosto 31	Sí
Pan de Azúcar, Coquimbo	-30,07	-71,23	135	2009 junio 01	2023 agosto 31	Sí
Punta Colorada	-29,35	-71,03	379	2013 diciembre 11	2022 diciembre 13	No
Quebrada Seca	-30,49	-71,49	183	2012 diciembre 12	2023 agosto 31	Sí
Universidad de la Serena	-29,91	-71,24	90	2014 julio 14	2023 agosto 31	Sí

¹Fecha de descarga de datos corresponde al 5 de septiembre de 2023.

Fuente: Red Agrometeorológica INIA (datos consultados el 05 de septiembre de 2023).

En la Figura 2-137 se puede ver la serie de tiempo de la temperatura promedio a nivel mensual de los registros de las estaciones seleccionadas (Tabla 2-29). El valor promedio máximo se registra en la estación CE Huasco, Vallenar con 25,1 °C en diciembre de 2017, mientras que el valor promedio mínimo se registra en la estación Colliguay, Quilpué con 7,9 °C en julio de 2022.

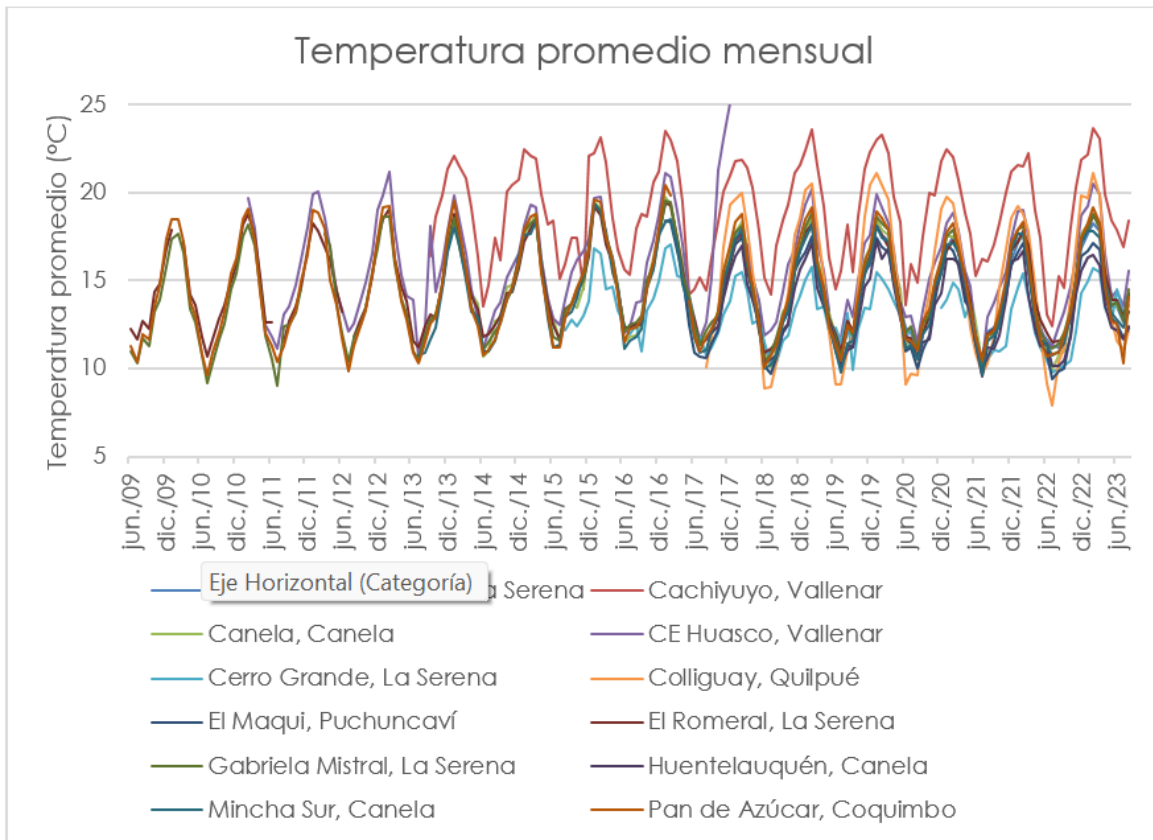


Figura 2-137: Valor promedio mensual de las temperaturas registradas en las estaciones seleccionadas.

Fuente: Red Agrometeorológica INIA (datos consultados el 05 de septiembre de 2023).

Proyecciones de evapotranspiración

Para el cálculo de evapotranspiración potencial se utilizó la fórmula de Hargreaves (sección 2.3.2). En la Figura 2-138 se puede ver el valor promedio anual proyectado para cada macrozona, siendo la macrozona norte la que presenta mayor diferencia entre el año con menor evapotranspiración potencial anual estimada en comparación con el año con mayor evapotranspiración potencial anual estimada (diferencia de 309 mm).

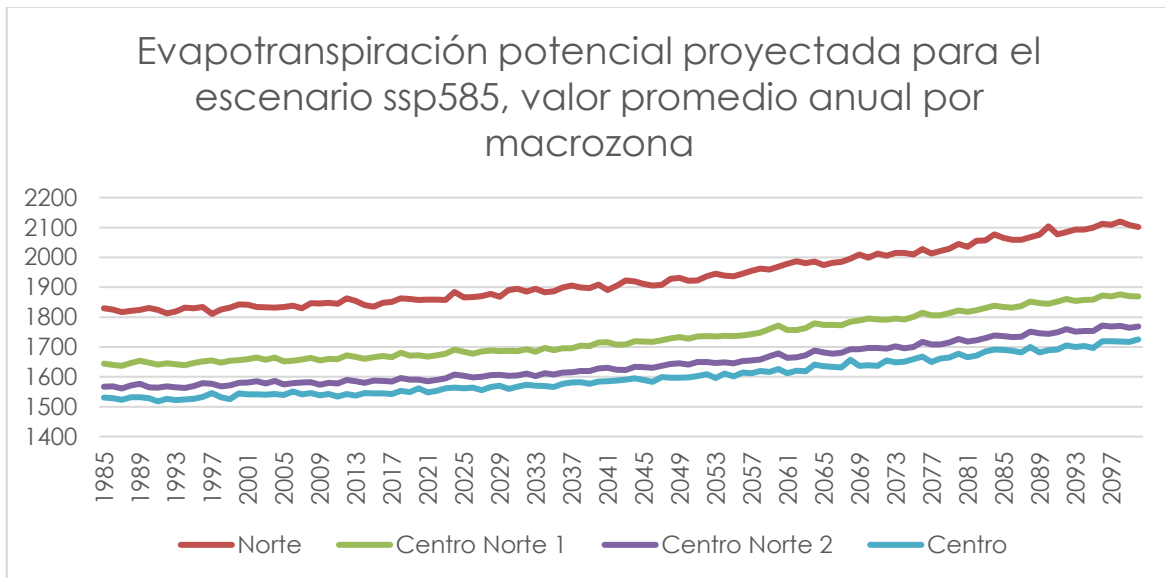


Figura 2-138: Evapotranspiración potencial según fórmula de Hargreaves proyectada para el escenario SSP5-8.5. Valor promedio anual por macrozona.

Fuente: Elaboración propia.

Proyecciones de evapotranspiración potencial del cultivo Olivo

A continuación, se presentan los resultados de los requerimientos hídricos proyectados para el cultivo Olivo. El detalle de este y los demás cultivos a evaluar se presentan en Anexos.

En la Figura 2-139 se presenta la proyección la evapotranspiración de cultivo proyectada para el Olivo, como el valor promedio anual estimado, por macrozona.

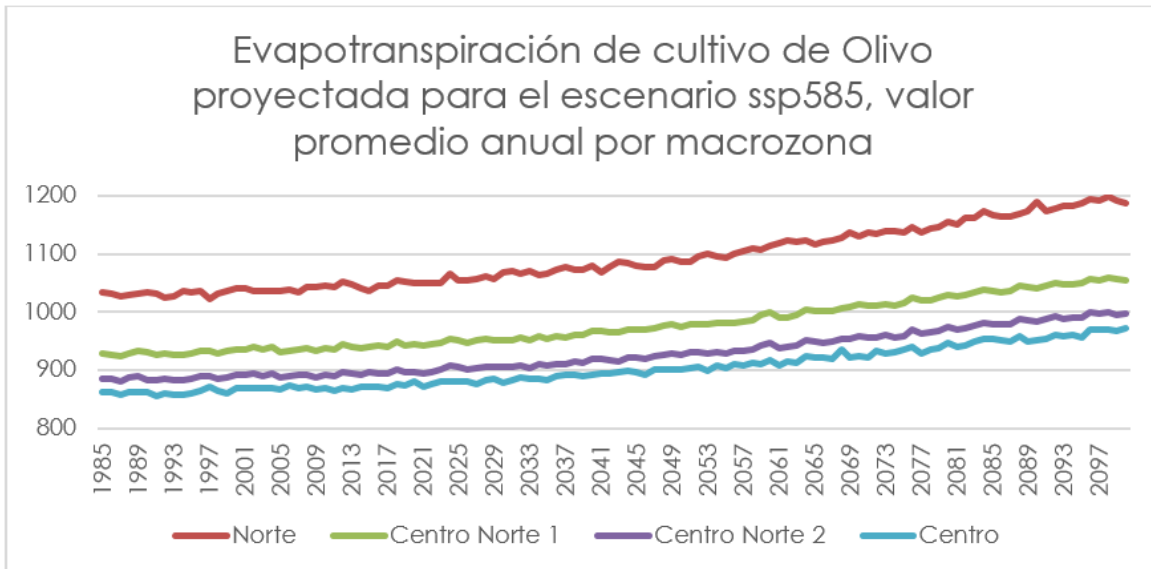


Figura 2-139: Evapotranspiración de cultivo de Olivo según fórmula de Hargreaves proyectada para el escenario SSP5-8.5. Valor promedio anual por macrozona.

Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 2-140 a la Figura 2-142, se puede ver la cartografía de la diferencia promedio anual de la evapotranspiración para el cultivo olivo calculada para el escenario SSP5-8.5. Se presenta la diferencia de evapotranspiración potencial de cultivo para el periodo futuro cercano versus el periodo histórico (Figura 2-140), en donde los valores van de 14 a 28 mm promedio anual. Para el periodo futuro medio versus el periodo histórico (Figura 2-141), en donde los valores van de 30 a 55 mm promedio anual. Y donde mayormente se ven diferencias, corresponde al periodo futuro lejano versus el periodo histórico (Figura 2-142), en donde los valores van de 75 a 142 mm promedio anual.

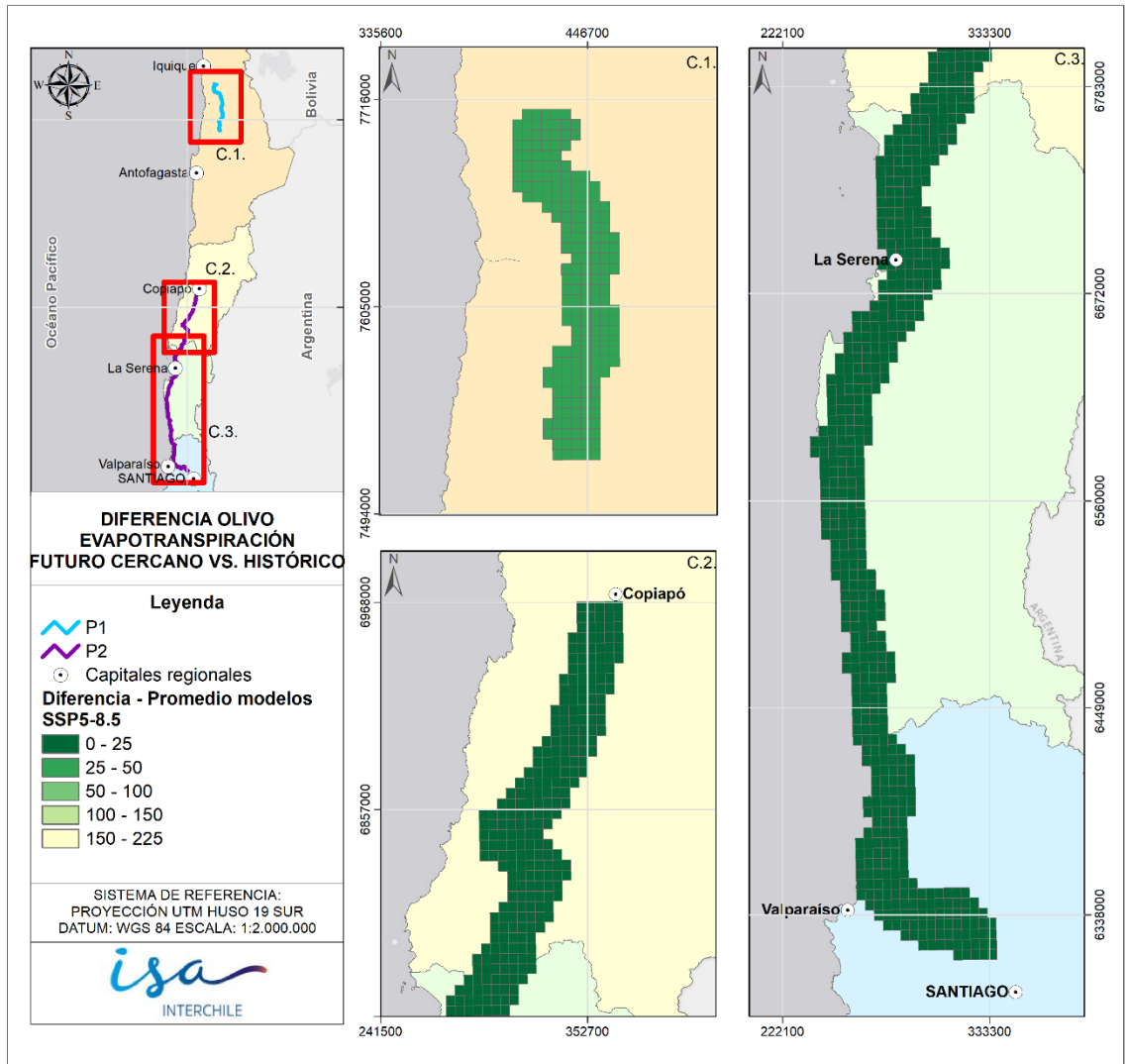


Figura 2-140: Diferencia evapotranspiración potencial del cultivo Olivo, periodo futuro cercano versus periodo histórico del promedio modelos.
Fuente: Elaboración propia.

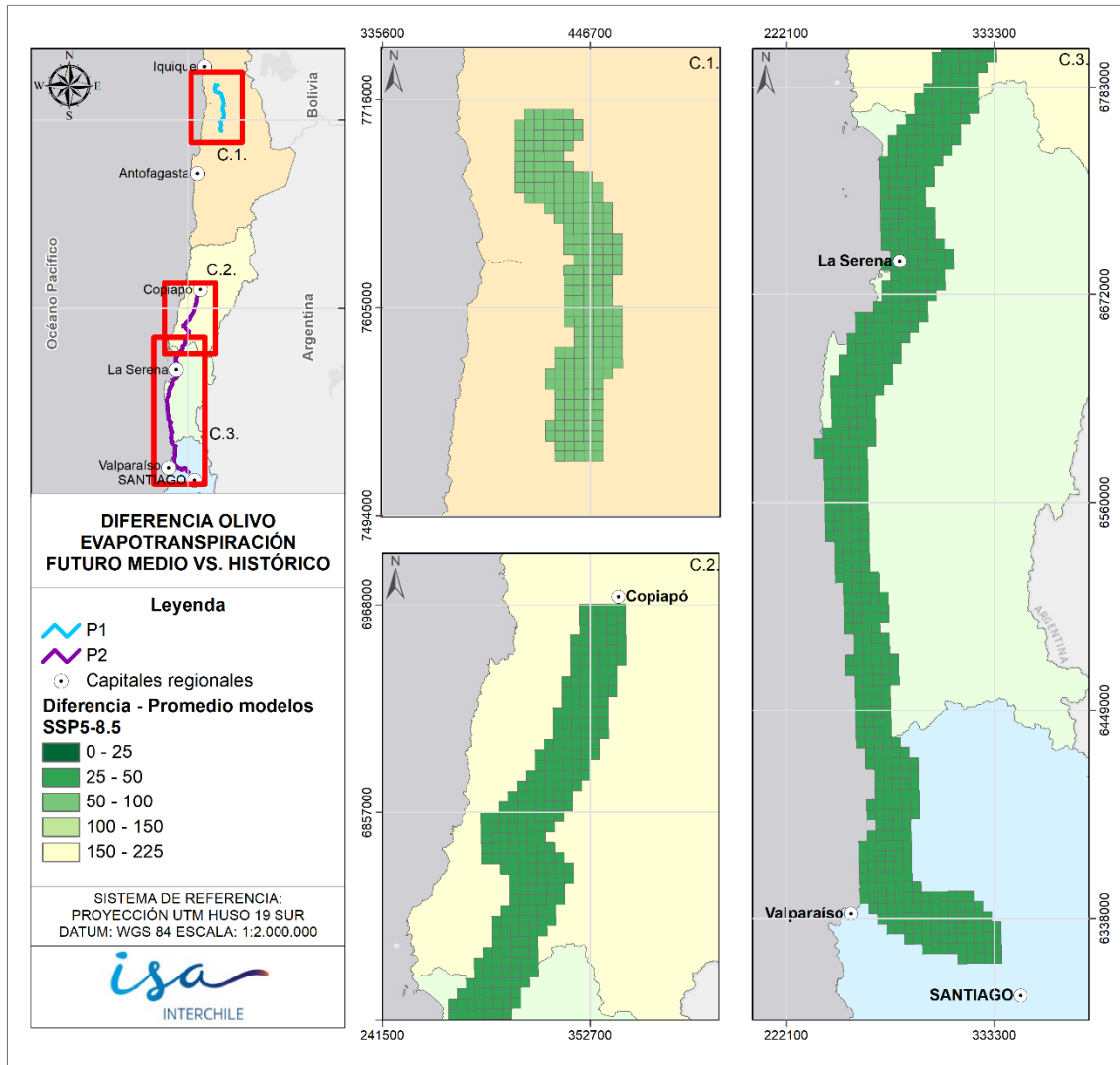


Figura 2-141: Diferencia evapotranspiración potencial del cultivo Olivo, periodo futuro medio versus periodo histórico del promedio modelos.
Fuente: Elaboración propia.

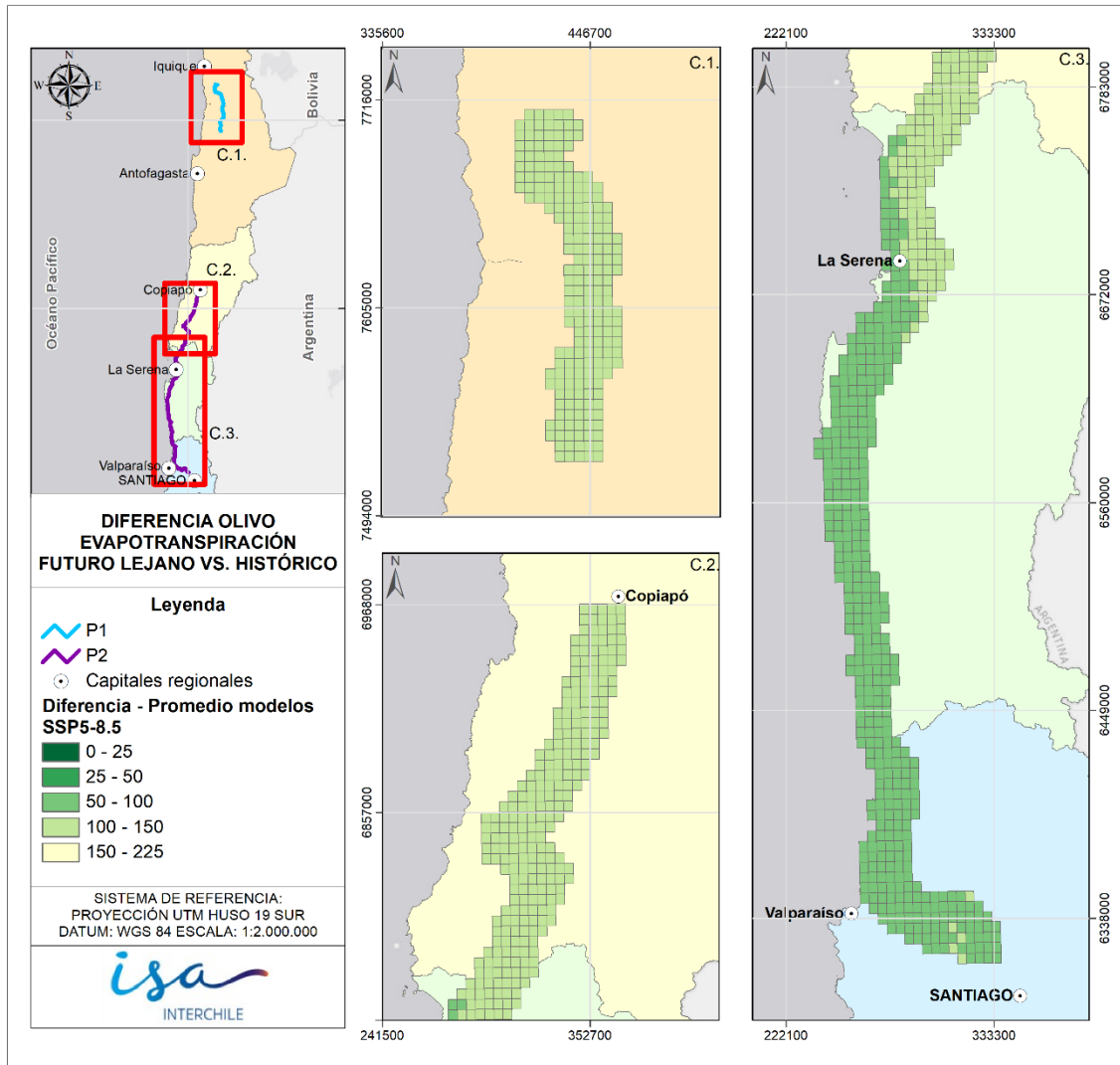


Figura 2-142: Diferencia evapotranspiración potencial del cultivo Olivo, periodo futuro lejano versus periodo histórico del promedio modelos.
Fuente: Elaboración propia.

2.7.3 Incendios

La vulnerabilidad en los riesgos de ocurrencia de incendios en comunidades se caracteriza como la Interfase Urbano-Rural (WUI), en base a la metodología de Miranda et al. (2020).

Para el cálculo de la WUI, a diferencia de la metodología de Miranda, que en sus mapas une el *Intermix* con la *Interface*, en este caso mantuvimos la clasificación

separada para poder, en el análisis de riesgo, tener 3 categorías de Vulnerabilidad.

Intermix queda definido como el área donde las viviendas se entremezclan con los combustibles de la zona salvaje e *Interface* donde las viviendas se encuentran con los combustibles de la zona salvaje

Para el cálculo de la cantidad de hogares, se utilizó primeramente las capas de población que entrega WorldPop, en particular el conteo de población (*Population Count*)⁴, que permite espacializar de mejor forma la distribución poblacional ya que el píxel de los ráster es de 100m. esta capa, en específico la del año 2020, fue cruzada con información del censo 2017 del INE, que por comuna, tiene los datos de personas y de viviendas, que, al convertirlo en un índice, dio por resultado la cantidad de personas por hogar, que fue utilizado luego con la capa de conteo de población. Finalmente, para los *thresholds* usados para definir que es *Interface* y que es *Intermix*, se utilizaron los valores entregados por Miranda et al. (2020), asociados a la macrozona SNZ1.

Al igual que para el riesgo de ocurrencia de incendios, en el riesgo en comunidades también se definieron rangos que permiten posteriormente categorizar el riesgo, a continuación, en la Tabla 2-30 se muestran los rangos definidos.

Tabla 2-30: Rangos que categorizan Exposición, Amenaza y Vulnerabilidad, Riesgo de incendios en comunidades.

Componente del riesgo	Rangos		
	Bajo	Medio	Alto
Exposición	0 a 20%	20 a 50%	> 50%
Amenaza	0 a 10%	10 a 40%	> 40%
Vulnerabilidad	No WUI	<i>Intermix</i>	<i>Interface</i>

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Figura 2-143 se muestra la distribución de la Vulnerabilidad para las macrozonas Centro y CentroNorte2.

⁴ Disponible en: <https://hub.worldpop.org/geodata/listing?id=29>

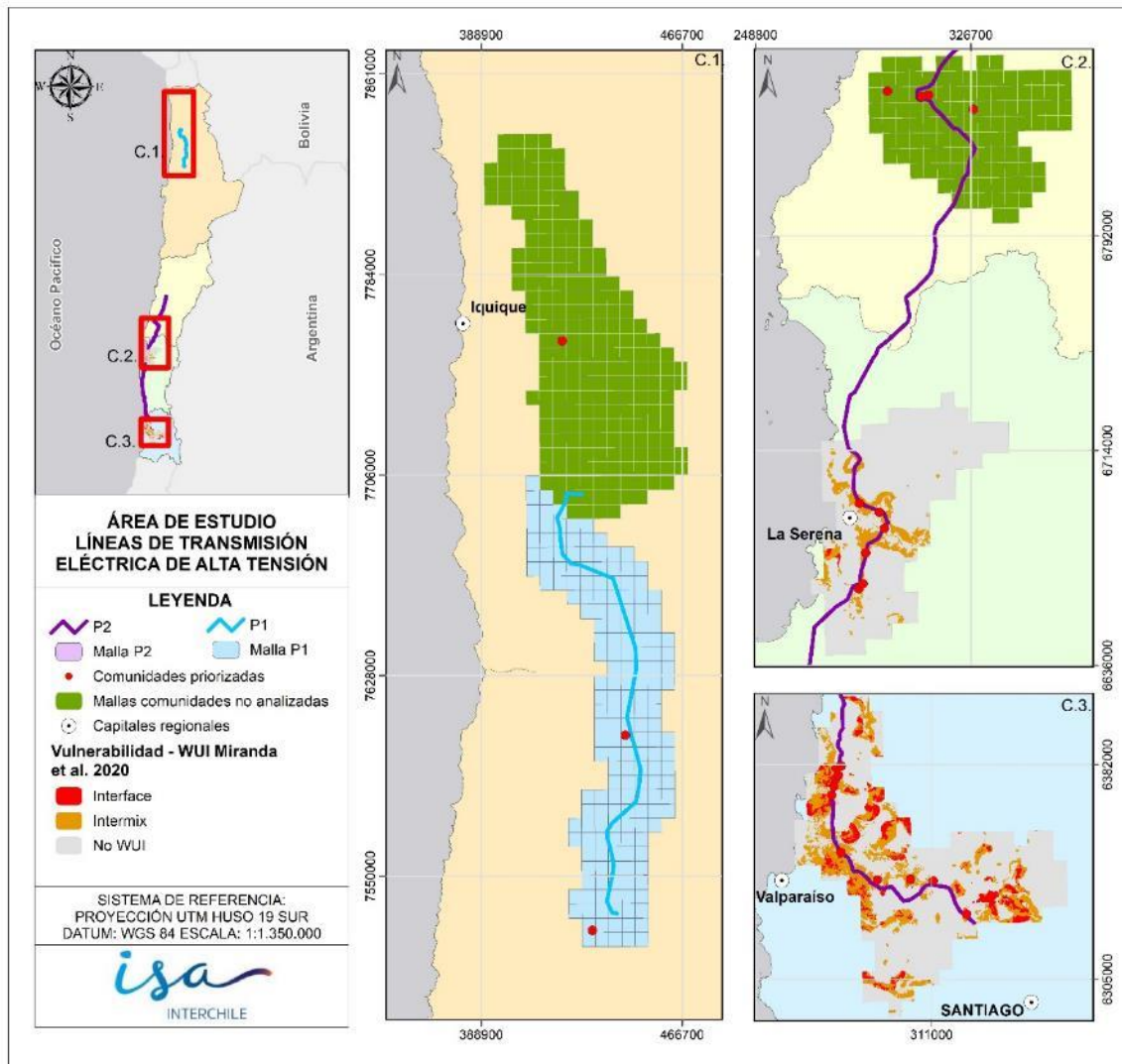


Figura 2-143: Distribución de la Vulnerabilidad a la ocurrencia de incendios en comunidades, macrozona Centro y CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

En las figuras a continuación (Figura 2-144, Figura 2-145, Figura 2-146 y Figura 2-147), se muestra el riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el escenario SSP1-2.6 para las macrozonas Centro y CentroNorte2.

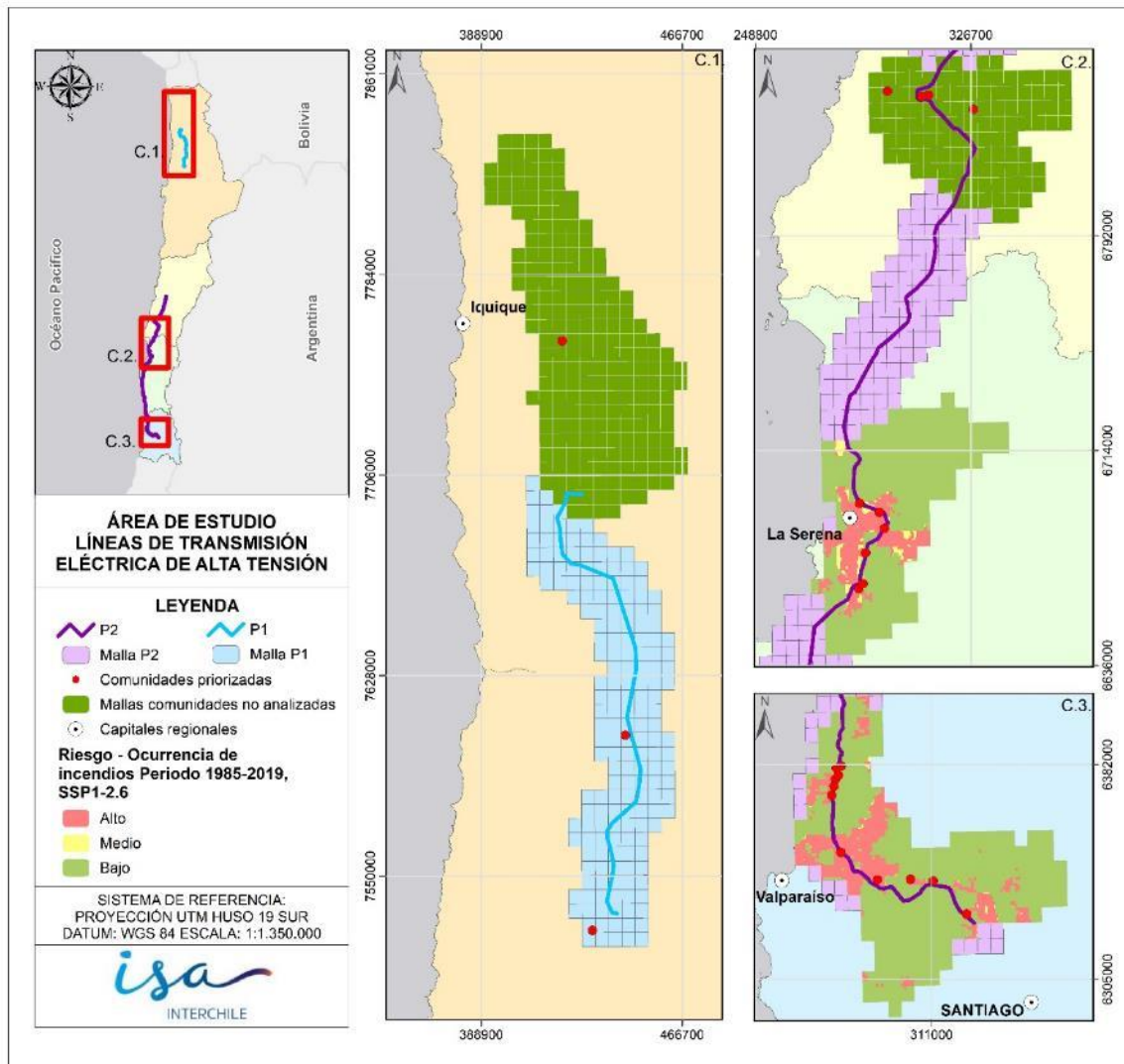


Figura 2-144: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período histórico (1985-2019) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro y CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

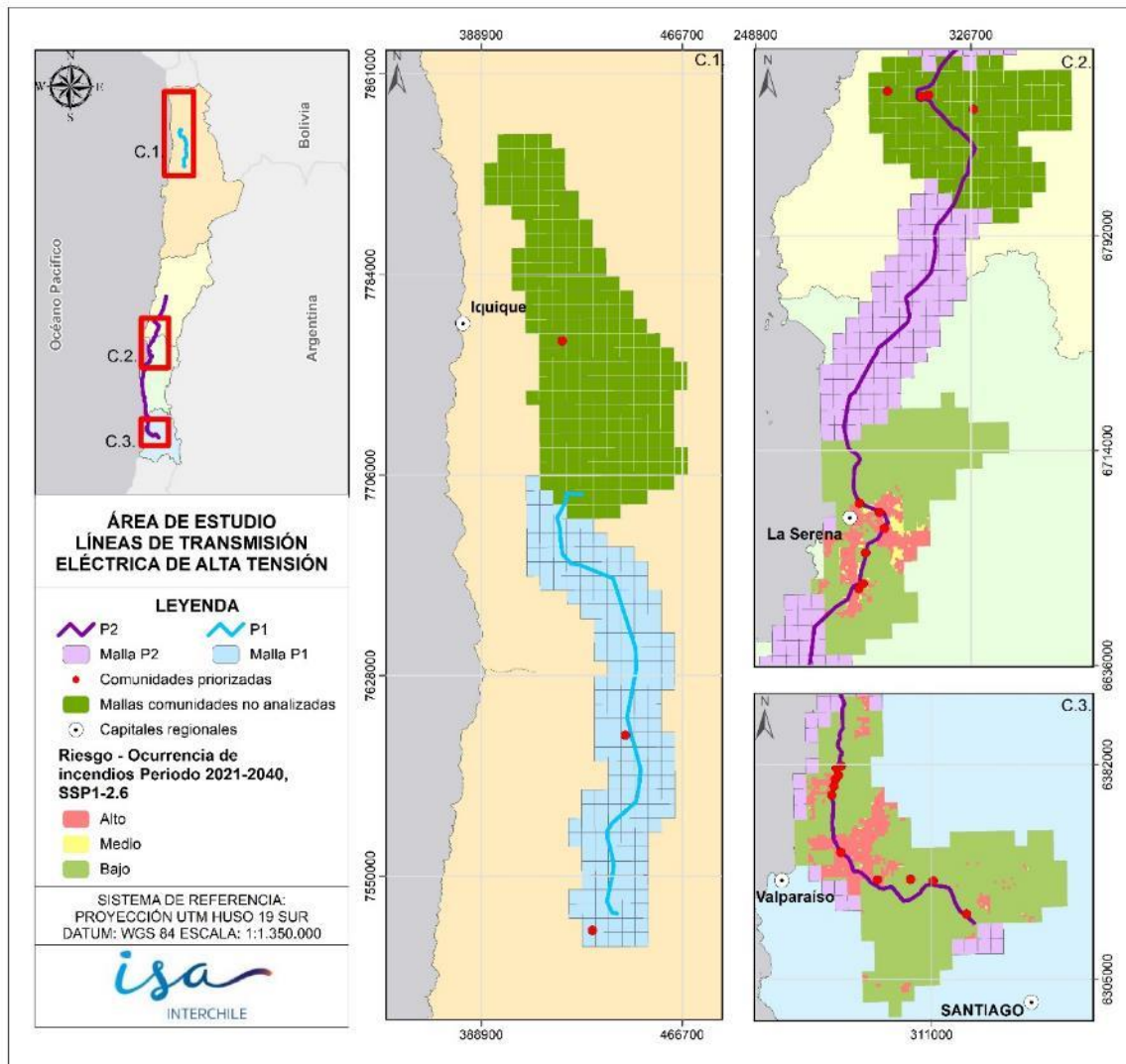


Figura 2-145: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período futuro cercano (2020-2040) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro y CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

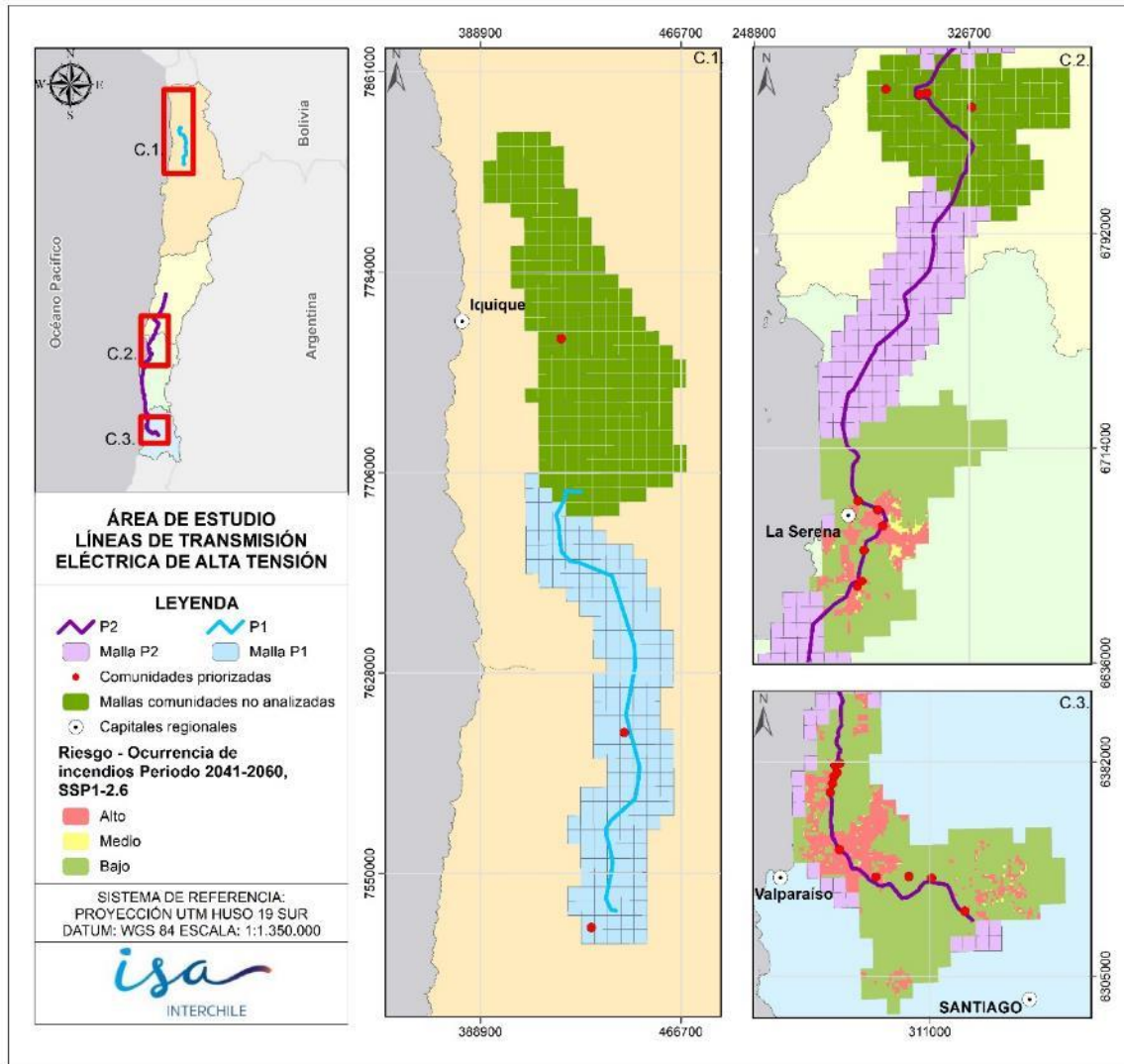


Figura 2-146: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período futuro medio (2040-2060) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro y CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

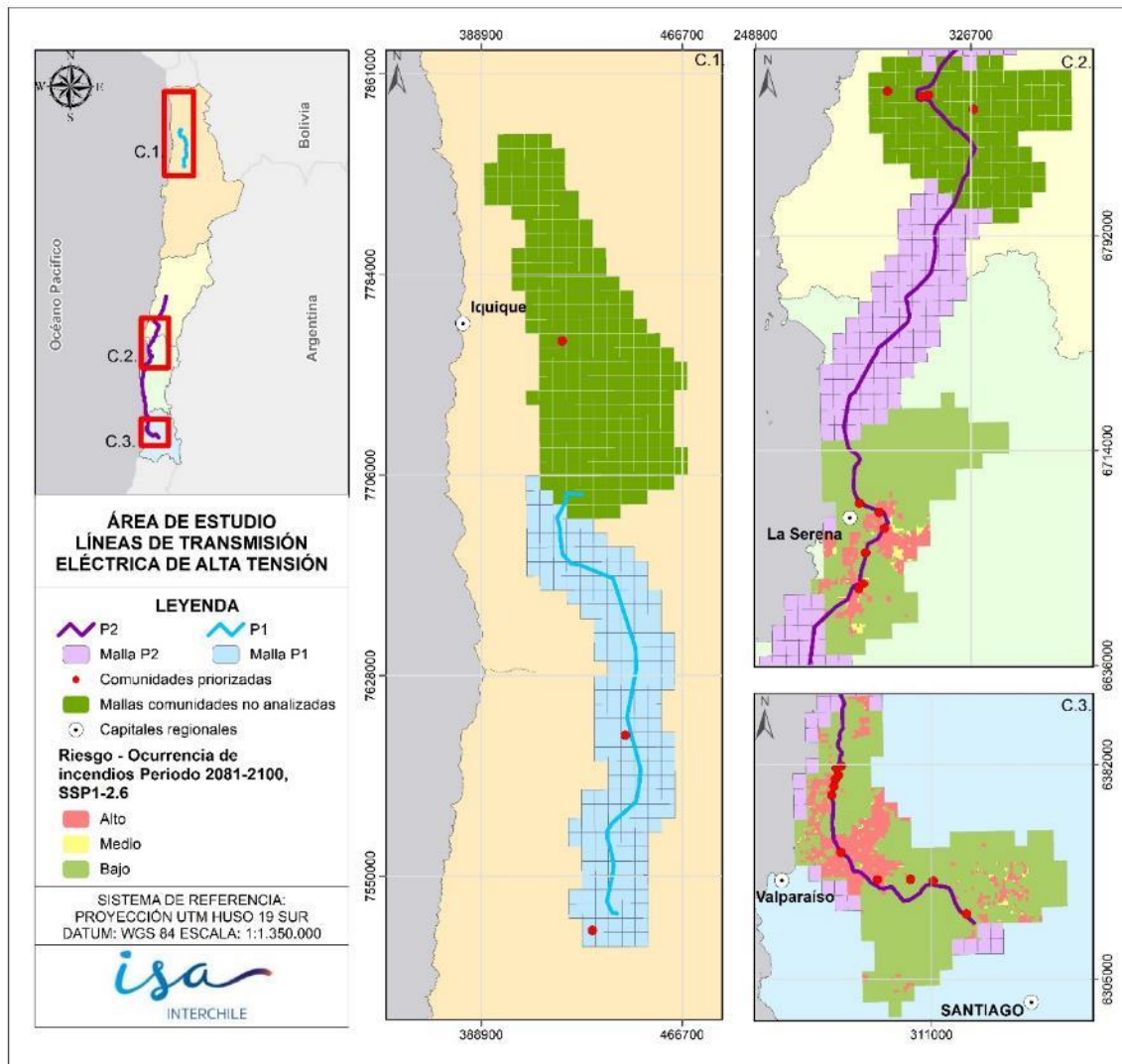


Figura 2-147: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período futuro lejano (2080-2100) y media de los modelos, escenario SSP1-2.6, macrozona Centro y CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

El riesgo de ocurrencia de incendios en el período histórico es alto en las comunidades de Los Leones - Lliu Lliu y Los Laureles-El Maqui, Quebrada de Alvarado y Polpaico sobre todo porque se encuentran insertas en un gran parche de riesgo alto, el cual no varía para los primeros dos (Los Leones - Lliu Lliu y Los Laureles-El Maqui) y solo aumenta a medida que vemos los escenarios futuros, Las Melosillas y La Estancilla están cerca o sobre píxeles de riesgo alto, los cuales no

cambian para estas dos últimas. Quebrada de Alvarado pierde su riesgo alto en los periodos futuros al igual que Polpaico, quedando rodeados de riesgo bajo.

De similar forma, todas las comunidades de la macrozona norte están rodeadas de píxeles de riesgo alto en el período histórico (Compañías Altas, Altovalsol, El Romero, El Peñon, Quebrada Martínez), con excepción de Cruz de Caña que tiene riesgo bajo pero sus píxeles vecinos son de riesgo medio y alto, sin embargo, con la tendencia a la migración del riesgo alto hacia el sur en los periodos futuros, Compañías Altas pasa a tener riesgo bajo a partir del periodo futuro medio (2040-2060) preservándolo hasta el periodo futuro lejano (2080-2100), de la misma forma Cruz de Caña pierde los píxeles de riesgo alto a su alrededor en los periodos futuro medio y lejano.

En las siguientes figuras (Figura 2-148, Figura 2-149, Figura 2-150 y Figura 2-151), se presenta el riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el escenario SSP2-4.5 para las macrozonas Centro y CentroNorte2.

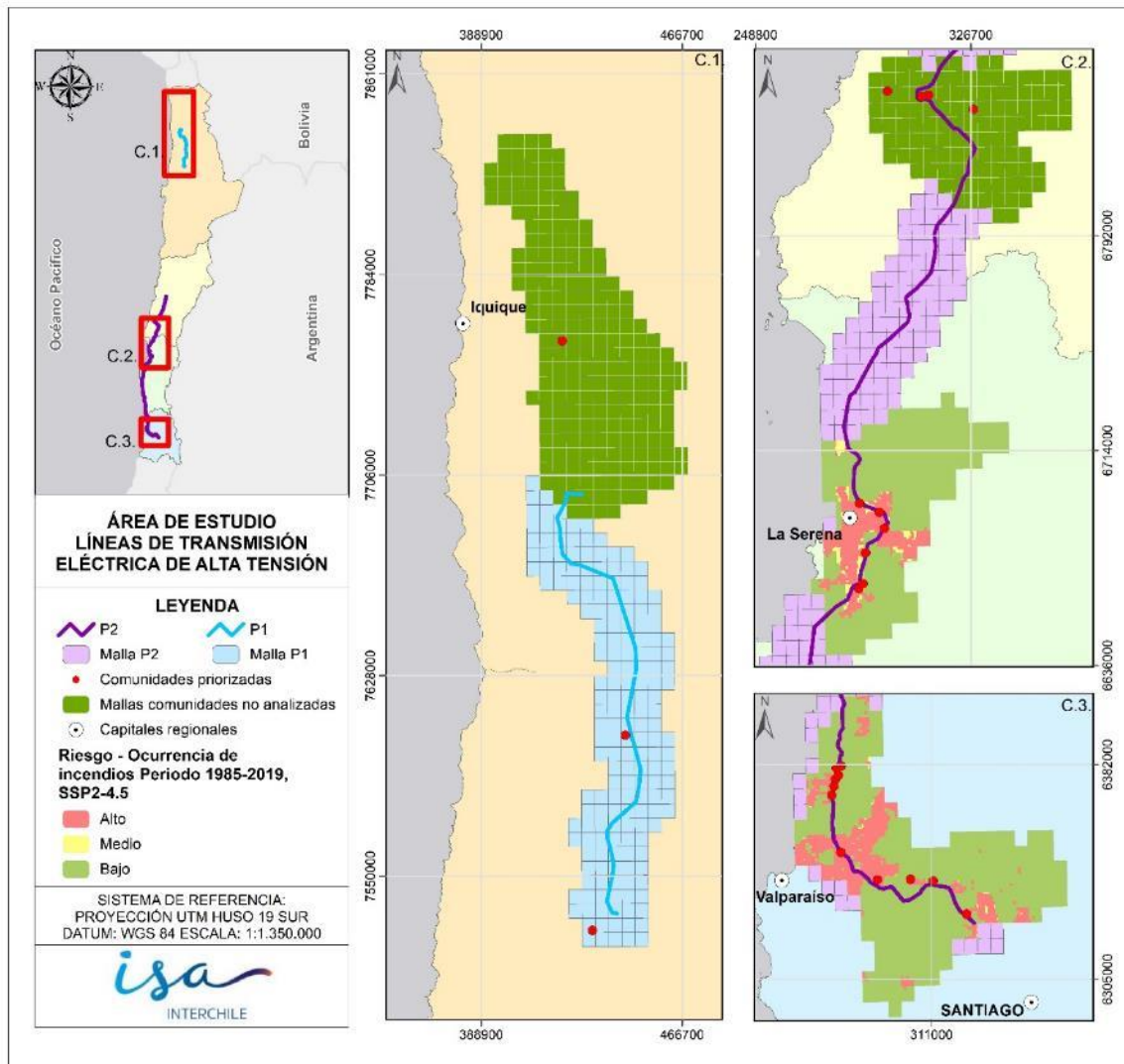


Figura 2-148: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período histórico (1985-2019) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro y CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

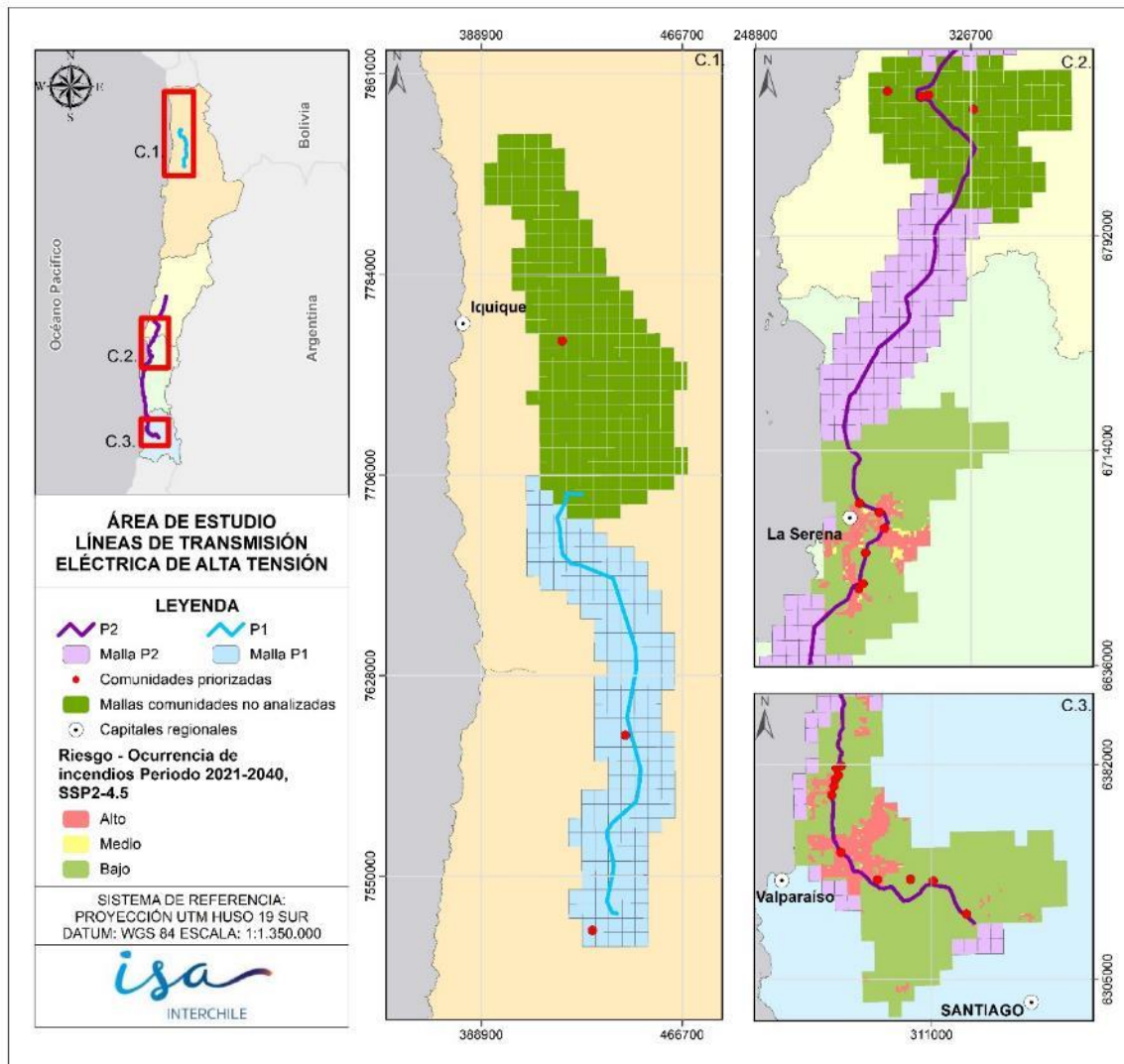


Figura 2-149: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período futuro cercano (2020-2040) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro y CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

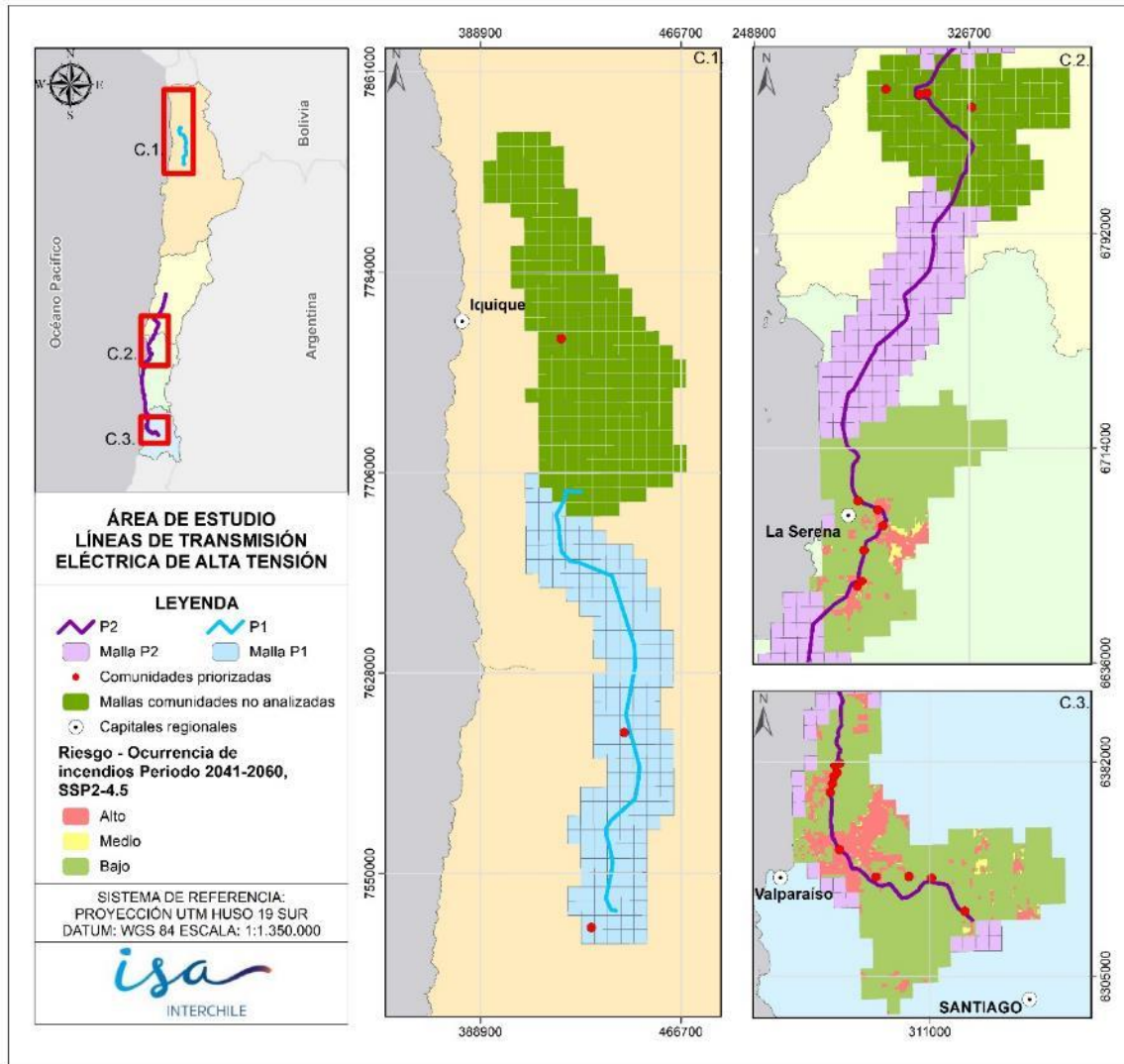


Figura 2-150: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período futuro medio (2040-2060) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro y CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

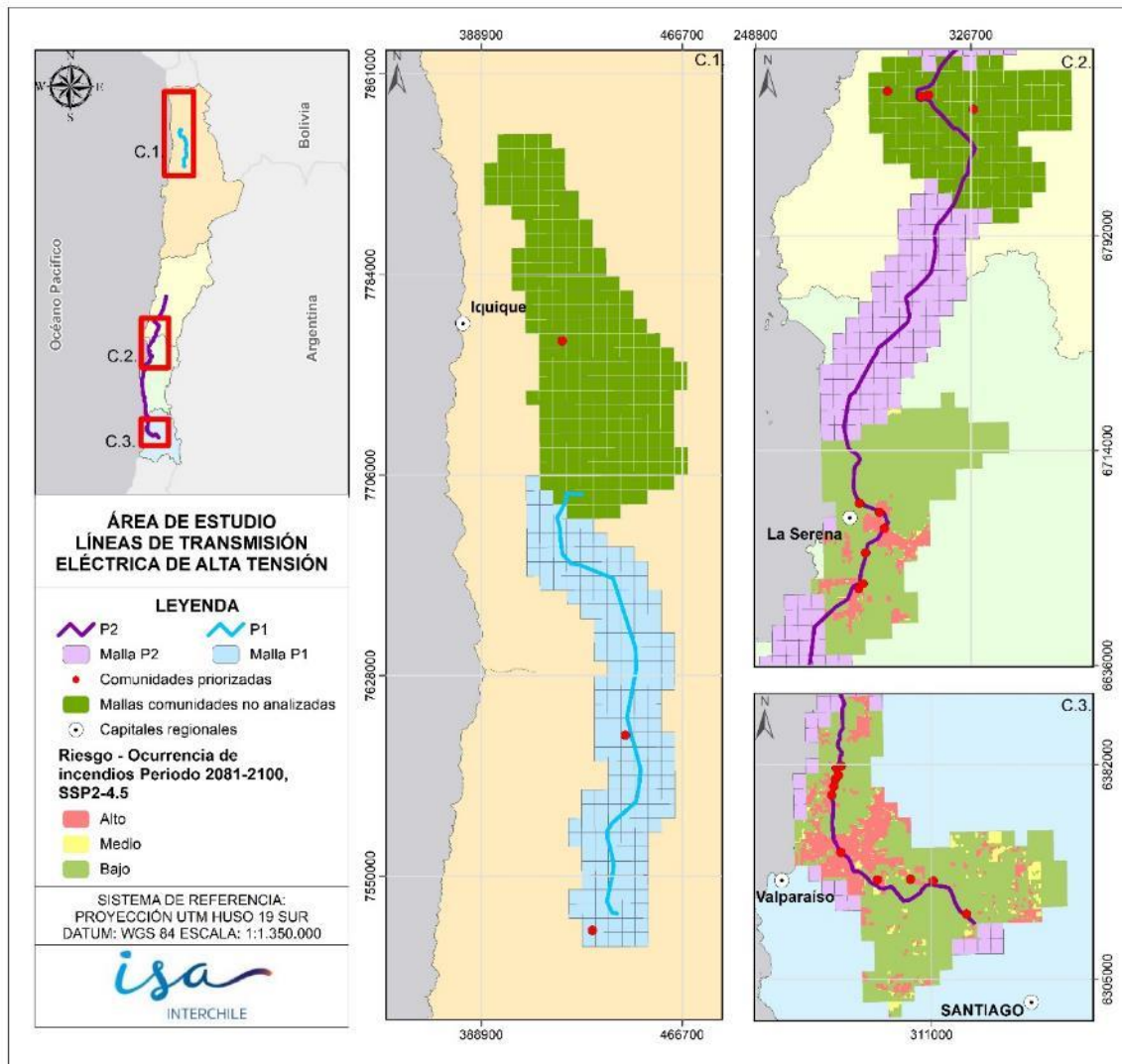


Figura 2-151: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período futuro lejano (2080-2100) y media de los modelos, escenario SSP2-4.5, macrozona Centro y CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en los modelos anteriores, en la macrozona centro, las comunidades de Los Leones - Lliu Lliu y Los Laureles-El Maqui están rodeadas por un extenso parche de riesgo alto. Otras localidades con riesgo alto en sus proximidades, pero en menor extensión, son Quebrada de Alvarado, Polpaico y La Estancilla.

En el futuro cercano, el panorama cambia: Polpaico y Quebrada de Alvarado pasan a tener riesgo bajo. En el futuro medio (2040-2060), Quebrada de Alvarado vuelve a estar rodeada de riesgo alto. Aunque Los Leones - Lliu Lliu mantiene un riesgo alto en su entorno, también aparecen áreas significativas de riesgo bajo en sus cercanías. Esta tendencia se intensifica levemente en el futuro lejano, rodeando a Quebrada de Alvarado y Los Leones - Lliu Lliu con más píxeles de riesgo alto, así como también de riesgo medio. Finalmente, aunque el riesgo de El Rincón es bajo en todos los escenarios, en los futuros medio y lejano, píxeles de riesgo alto aparecen en su vecindad.

En el periodo histórico de la macrozona CentroNorte2, todas las comunidades (Compañías Altas, Altovalsol, El Romero, El Peñón, Quebrada Martínez y Cruz de Caña) presentan riesgo alto de incendios o se encuentran muy cerca de un parche de alto riesgo (Cruz de Caña). En el futuro cercano (2020-2040), Compañías Altas pasan a tener riesgo bajo, aunque siempre con píxeles de riesgo medio y bajo en las cercanías, a su vez, los píxeles de riesgo alto desaparecen en las cercanías de Cruz de Caña. Sin embargo, en los periodos futuro medio (2040-2060) y lejano (2080-2100), estos píxeles medios y altos disminuyen por completo, dejando a las comunidades en riesgo bajo, con excepción de Quebrada Martínez, que mantiene sus píxeles de riesgo alto y medio en el período futuro medio (2040-2060), y en el futuro lejano (2080-2100) pasa a riesgo alto.

Para finalizar, se presenta a continuación (Figura 2-152, Figura 2-153, Figura 2-154 y Figura 2-155) el riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el escenario SSP5-8.5.

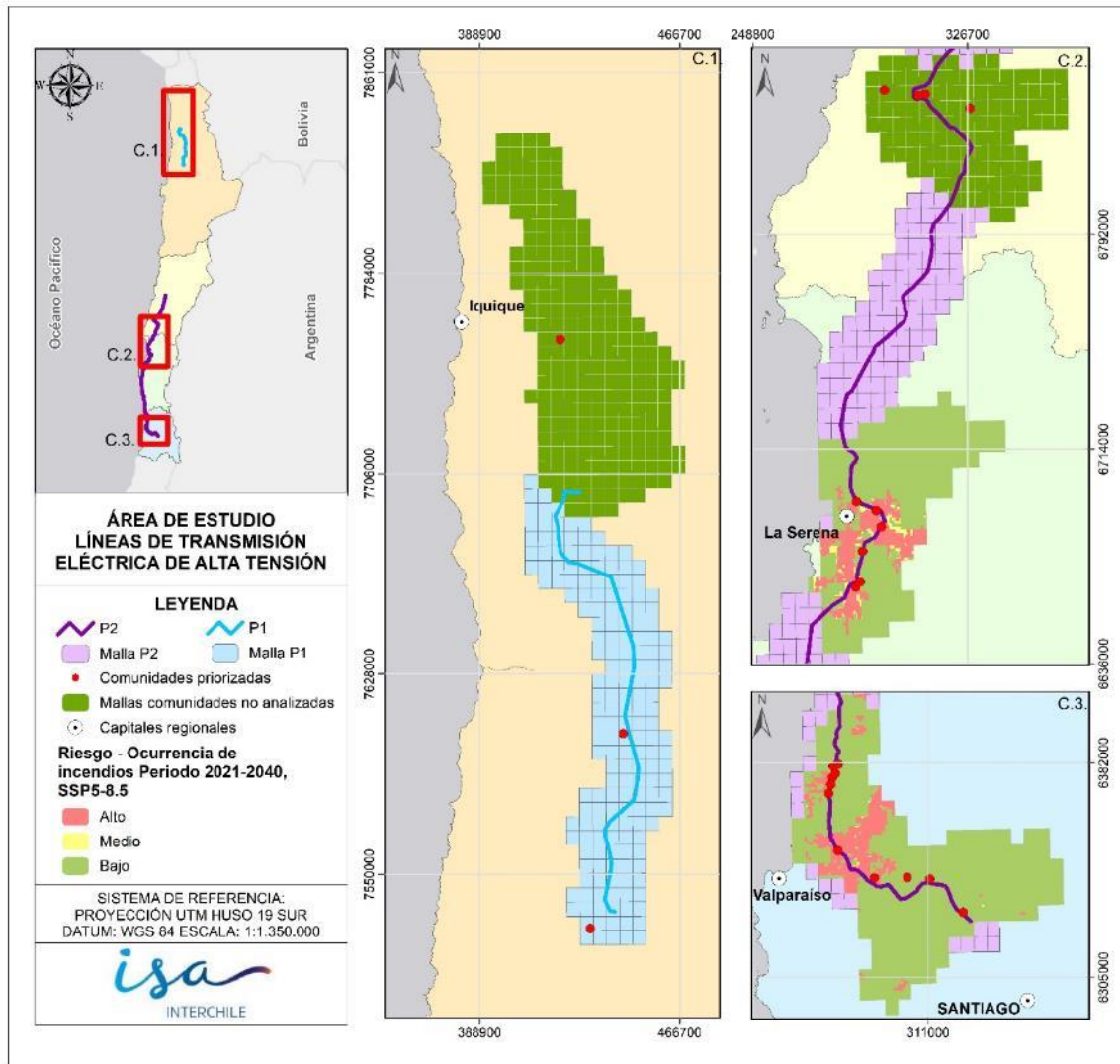


Figura 2-153: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período futuro cercano (2020-2040) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro y CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

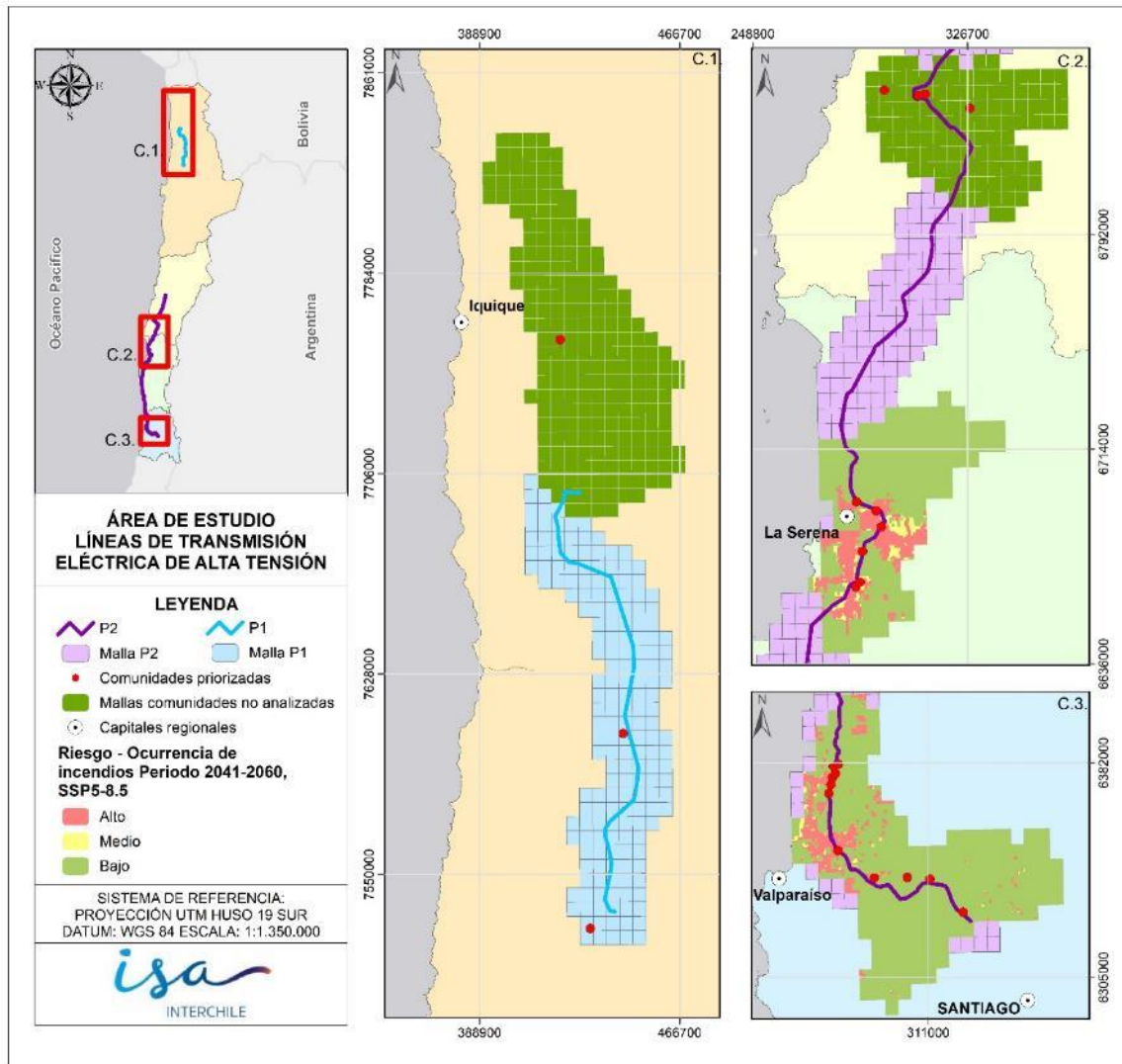


Figura 2-154: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período futuro medio (2040-2060) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro y CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

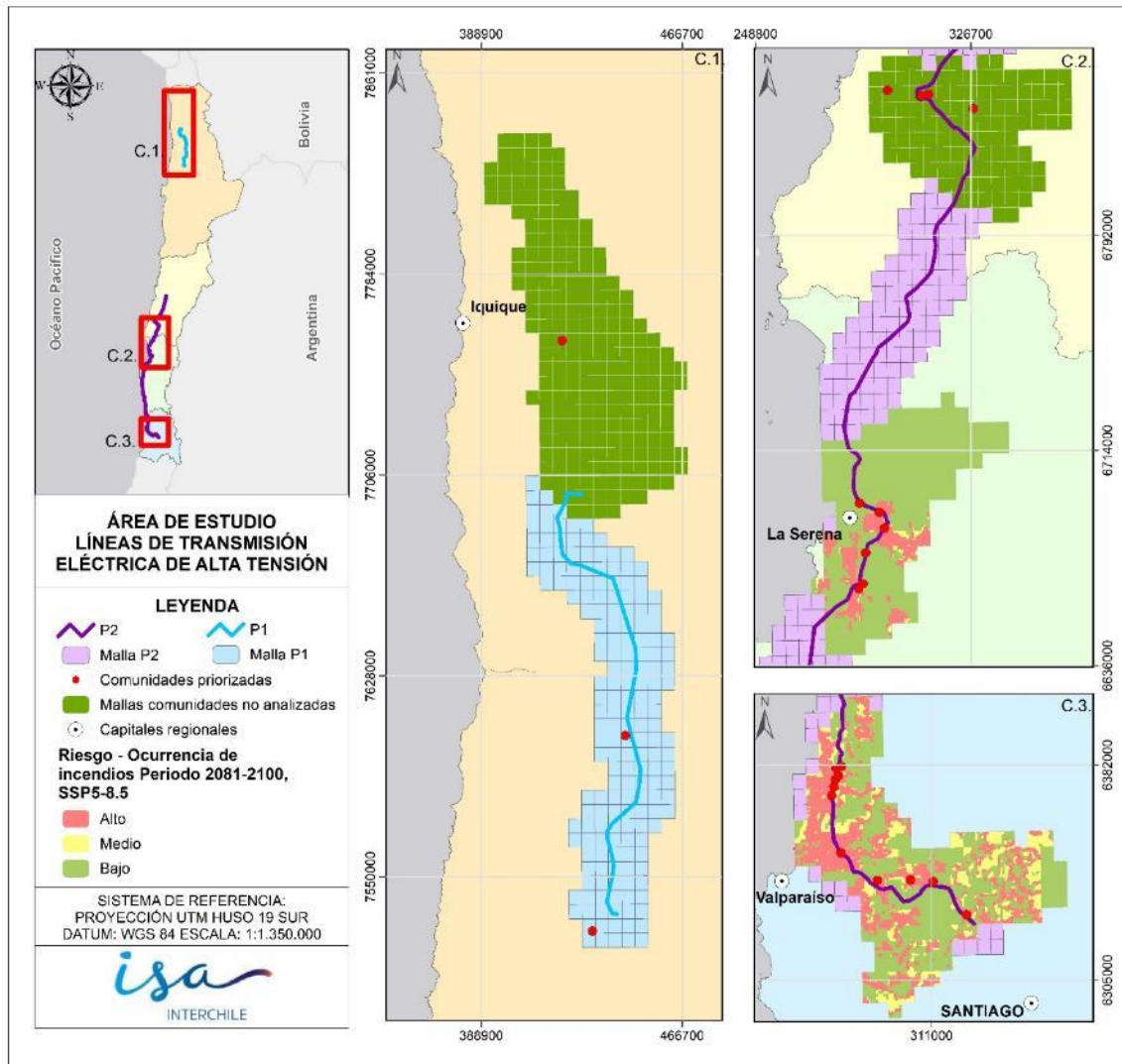


Figura 2-155: Riesgo de ocurrencia de incendios en comunidades para el período futuro lejano (2080-2100) y media de los modelos, escenario SSP5-8.5, macrozona Centro y CentroNorte2.

Fuente: Elaboración propia.

En la macrozona Centro, se observa, en los resultados para el futuro cercano (2020-2040), una disminución general del riesgo alto y medio, especialmente en las áreas de Tilfil y Lampa. Las comunidades cercanas a riesgos altos en este período son en particular Los Laureles-El Maqui, La Estancilla y Los Leones - Lliu Lliu, sin embargo, esta última disminuye en este período su riesgo de alto a bajo.

Al analizar el futuro medio (2040-2060), el escenario de riesgo alto se desplaza hacia la zona costera de la Región de Valparaíso, afectando principalmente a las comunas de Los Laureles-El Maqui, La Estancilla y El Rincón, en donde La estancilla sube su categoría a riesgo alto, y El Rincón se encuentra rodeada por riesgo alto y medio.

En cuanto al futuro lejano (2080-2100), se observa un aumento generalizado del riesgo alto y medio. Las comunidades cercanas a la costa, como Las Melosillas, La Estancilla, El Rincón, Potrerillos, y San Antonio, experimentan un considerable aumento en su riesgo (Alto), tanto en píxeles de riesgo alto como de medio. La Quebrada, junto con Polpaico son las únicas comunidades que mantienen el riesgo bajo, sin embargo, se ven rodeadas de píxeles de riesgo medio y alto. Quebrada de Alvarado, La Dormida, Los Leones - Lliu Lliu y Los Laureles-El Maqui también experimentan un aumento significativo en la cantidad de píxeles con riesgo alto y medio de ocurrencia de incendios en su vecindad para este período. Para finalizar, la comunidad de Polpaico aumenta también su riesgo, mostrando píxeles distribuidos uniformemente de riesgo bajo, medio y alto a su alrededor.

Para la macrozona CentroNorte2, todas las comunidades presentan riesgos altos y medios en su entorno en el período histórico (1985-2019). En el periodo futuro cercano (2020-2040), las comunidades de Compañías Altas y Cruz de Caña experimentan una ligera disminución en los píxeles circundantes con riesgo medio y alto. Esta tendencia se mantiene en el futuro medio (2040-2060). En el futuro lejano (2080-2100), Compañías Altas y Altovalsol y Quebrada Martínez pasa a tener un riesgo bajo, mientras que las demás comunidades (El Romero y El Peñon) conservan su tendencia.

A modo de resumen, en las siguientes tablas (Tabla 2-31, Tabla 2-32 y Tabla 2-33) se muestran los resúmenes de los riesgos en comunidades para los escenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5 respectivamente

Tabla 2-31: Riesgo de ocurrencia de incendios por comunidad, Macrozona y períodos histórico y futuros para el escenario SSP1-2.6.

Macrozona	Comunidad	Riesgo SSP1-2.6			
		Histórico	Futuro cercano	Futuro medio	Futuro lejano
Centro	Las Melosillas	Bajo (Píxeles vecinos Alto)	Bajo	Bajo	Bajo
	La Estancilla	Bajo (Píxeles vecinos Alto)	Bajo (Píxeles vecinos Alto)	Bajo (Píxeles vecinos Alto)	Alto
	El Rincón	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
	Potrerillos	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo

		Riesgo SSP1-2.6			
Macrozona	Comunidad	Histórico	Futuro cercano	Futuro medio	Futuro lejano
	La Quebrada	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
	Quebrada de Alvarado	Alto	Alto	Bajo	Bajo (Píxeles vecinos Alto)
	La Dormida	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
	Los Leones - Lliu Lliu	Alto	Alto	Alto	Alto
	Los Laureles-El Maqui	Alto	Alto	Alto	Alto
	San Antonio	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
	Polpaico	Alto	Bajo	Bajo	Bajo (Píxeles vecinos Alto)
CentroNorte2	Compañías Altas	Alto	Bajo (Píxeles vecinos Alto)	Bajo	Bajo
	Altovalsol	Alto	Alto	Alto	Alto
	El Romero	Alto	Alto	Alto	Alto
	El Peñón	Alto	Alto	Alto	Alto
	Quebrada Martínez	Alto	Bajo (Píxeles vecinos Alto y Medio)	Alto	Alto
	Cruz de Caña	Bajo (Píxeles vecinos Alto y Medio)	Bajo (Píxeles vecinos Alto)	Bajo	Bajo

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2-32: Riesgo de ocurrencia de incendios por comunidad, Macrozona y períodos histórico y futuros para el escenario SSP2-4.5.

		Riesgo SSP1-2.6			
Macrozona	Comunidad	Histórico	Futuro cercano	Futuro medio	Futuro lejano
Centro	Las Melosillas	Bajo (Píxeles vecinos Alto)	Bajo (Píxeles vecinos Alto)	Bajo (Píxeles vecinos Alto)	Bajo (Píxeles vecinos Alto)
	La Estancilla	Bajo (Píxeles vecinos Alto)	Bajo (Píxeles vecinos Alto)	Bajo (Píxeles vecinos Alto)	Bajo (Píxeles vecinos Alto)
	El Rincón	Bajo	Bajo	Bajo (Píxeles vecinos Alto)	Bajo (Píxeles vecinos Alto)
	Potrerosillos	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
	La Quebrada	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
	Quebrada de Alvarado	Alto	Bajo	Alto	Alto
	La Dormida	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
	Los Leones - Lliu Lliu	Alto	Alto	Alto	Alto
	Los Laureles-El Maqui	Alto	Alto	Alto	Alto
	San Antonio	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
	Polpaico	Alto	Bajo	Bajo	Bajo

		Riesgo SSP1-2.6			
Macrozona	Comunidad	Histórico	Futuro cercano	Futuro medio	Futuro lejano
CentroNorte2	Compañías Altas	Alto	Bajo (Píxeles vecinos Alto y Medio)	Bajo	Bajo
	Altovalsol	Alto	Alto	Alto	Alto
	El Romero	Alto	Alto	Alto	Alto
	El Peñón	Alto	Alto	Alto	Alto
	Quebrada Martínez	Alto	Bajo (Píxeles vecinos Alto y Medio)	Bajo (Píxeles vecinos Alto y Medio)	Alto
	Cruz de Caña	Bajo (Píxeles vecinos Alto y Medio)	Bajo (Píxeles vecinos Alto y Medio)	Bajo	Bajo

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2-33: Riesgo de ocurrencia de incendios por comunidad, Macrozona y períodos histórico y futuros para el escenario SSP5-8.5.

		Riesgo SSP1-2.6			
Macrozona	Comunidad	Histórico	Futuro cercano	Futuro medio	Futuro lejano
Centro	Las Melosillas	Bajo (Píxeles vecinos Alto)	Bajo	Bajo	Alto
	La Estancilla	Bajo (Píxeles vecinos Alto)	Bajo (Píxeles vecinos Alto)	Alto	Alto
	El Rincón	Bajo	Bajo	Bajo (Píxeles vecinos Alto)	Alto
	Potrerosillos	Bajo	Bajo	Bajo	Alto
	La Quebrada	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo (Píxeles vecinos Alto)
	Quebrada de Alvarado	Alto	Alto	Bajo	Alto
	La Dormida	Bajo	Bajo	Bajo	Alto
	Los Leones - Lliu Lliu	Alto	Bajo (Píxeles vecinos Alto)	Alto	Alto
	Los Laureles-El Maqui	Alto	Alto	Alto	Alto
	San Antonio	Bajo	Bajo	Bajo	Alto
CentroNorte2	Polpaico	Alto	Bajo	Bajo	Bajo (Píxeles vecinos Alto y Medio)
	Compañías Altas	Alto	Bajo (Píxeles vecinos Alto y Medio)	Bajo (Píxeles vecinos Alto y Medio)	Bajo
	Altovalsol	Alto	Alto	Alto	Bajo
	El Romero	Alto	Alto	Alto	Alto
	El Peñón	Alto	Alto	Alto	Alto

		Riesgo SSP1-2.6			
Macrozona	Comunidad	Histórico	Futuro cercano	Futuro medio	Futuro lejano
	Quebrada Martínez	Alto	Alto	Alto	Bajo (Píxeles vecinos Alto y Medio)
	Cruz de Caña	Bajo (Píxeles vecinos Alto y Medio)	Bajo (Píxeles vecinos Alto)	Alto	Bajo (Píxeles vecinos Alto y Medio)

Fuente: Elaboración propia.

2.7.4 Efectos de la temperatura extrema sobre la salud de la población

La metodología utilizada permite estimar la proporción del riesgo de muerte que se atribuye directamente a la exposición, estableciendo como punto de partida la temperatura de mínimo riesgo de muerte, la cual corresponde a 17,2°C.

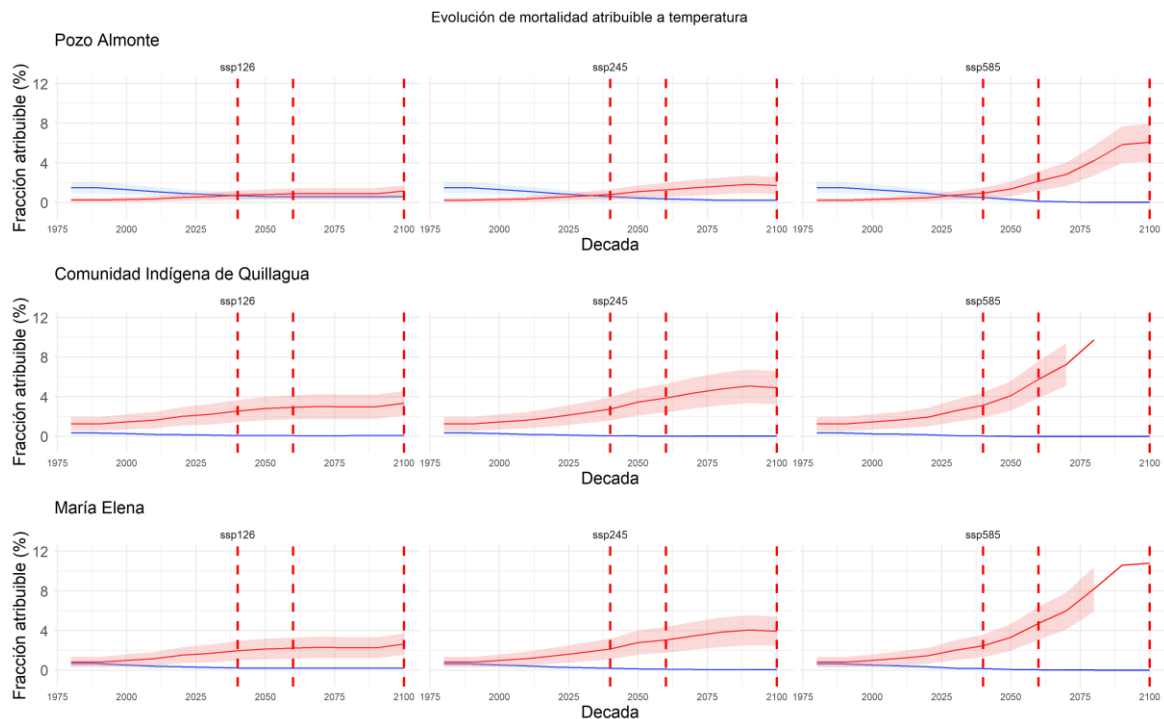


Figura 2-156: Evolución exceso de riesgo de muerte, comunidades macrozona Norte.

Fuente: Elaboración propia.

Para la macrozona norte se observa un incremento en el riesgo a partir del aumento de las temperaturas, riesgo diferenciado según el escenario sobre el cual se modela. Para las tres comunidades el peor escenario de cambio climático es el que genera el mayor riesgo de muerte, llegando a un incremento de 10,7% para la comunidad de María Elena.

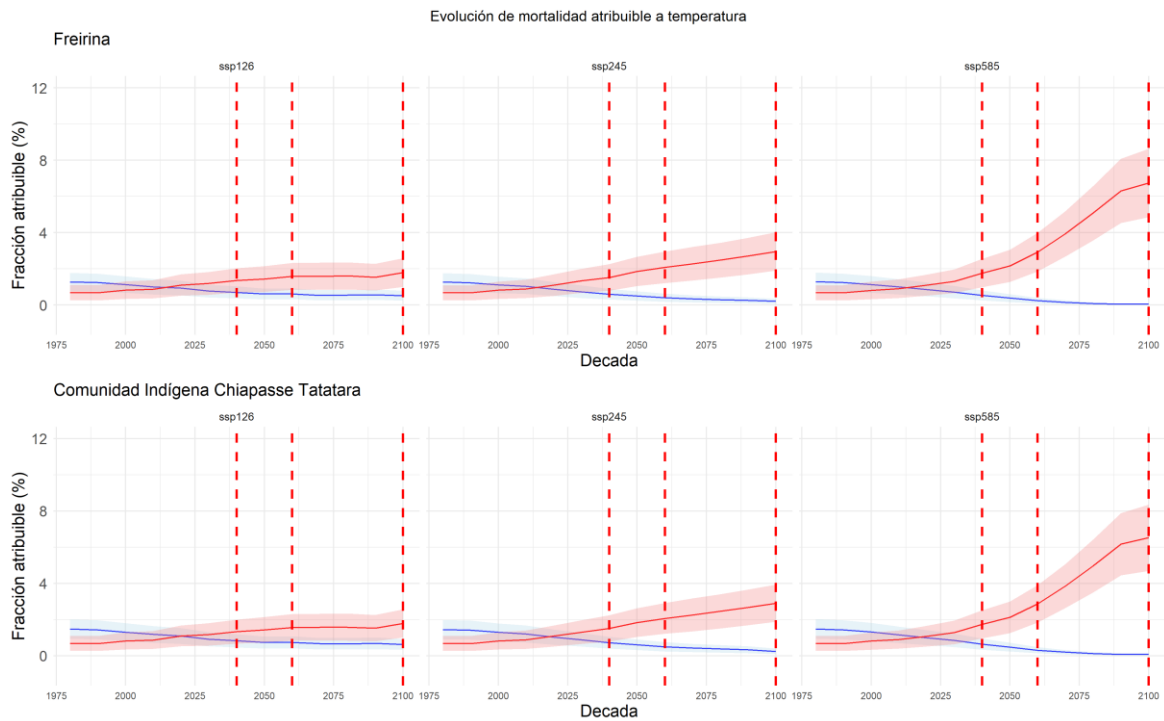


Figura 2-157: Evolución exceso de riesgo de muerte, comunidades macrozona Centro Norte 1, parte 1.

Fuente: Elaboración propia.

La comunidad de Freirina y la Comunidad Indígena Chiapasse Tatatara, de la macrozona centro Norte 1, muestran incrementos de riesgo para las temperaturas altas, mientras que el incremento de temperaturas bajas provoca una disminución del riesgo de muerte. Para el caso de Freirina, el riesgo proyecto aumenta a 6,5% para el final del periodo de estudio.

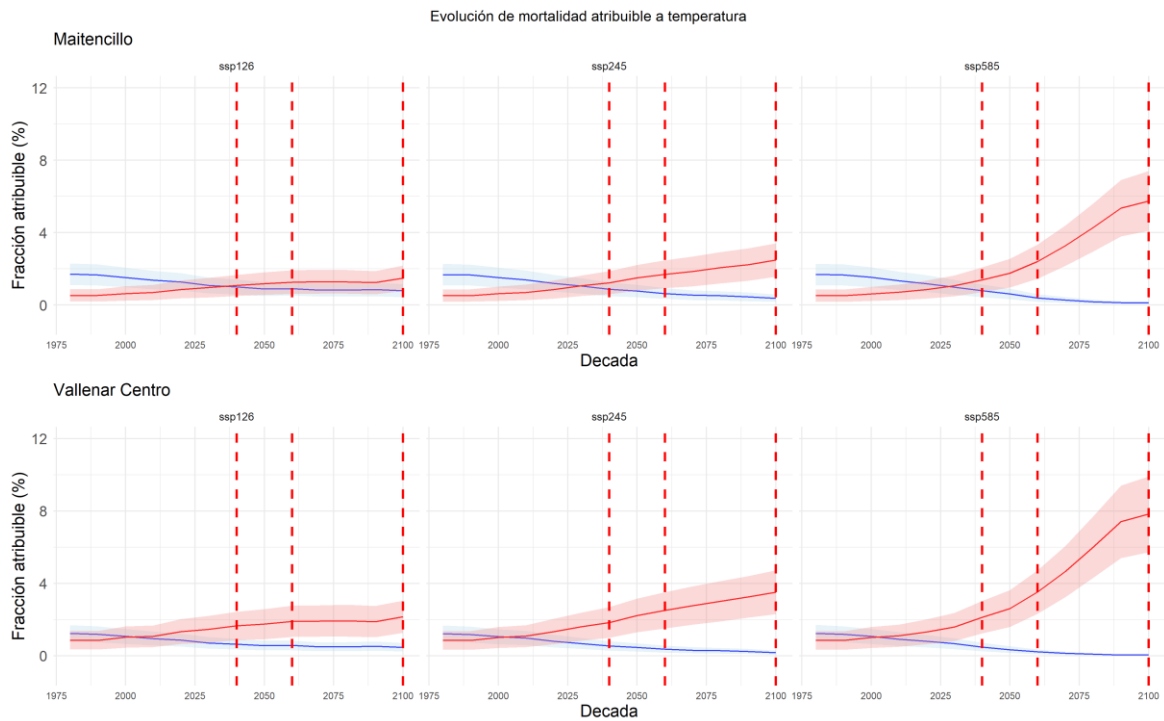


Figura 2-158: Evolución exceso de riesgo de muerte, comunidades macrozona Centro Norte 1, parte 2.

Fuente: Elaboración propia.

Para las comunidades de Maitencillo y Vallenar centro, los excesos de riesgos son concordantes con lo observado para toda la macrozona norte y la macrozona centro norte, evidenciando un incremento de hasta un 7,6% extra para el final del periodo en la comunidad de Vallenar Centro. Respecto a las temperaturas bajas, al incrementar estas, se evidencia una disminución palatina hasta alcanzar temperaturas moderadas al final del siglo.

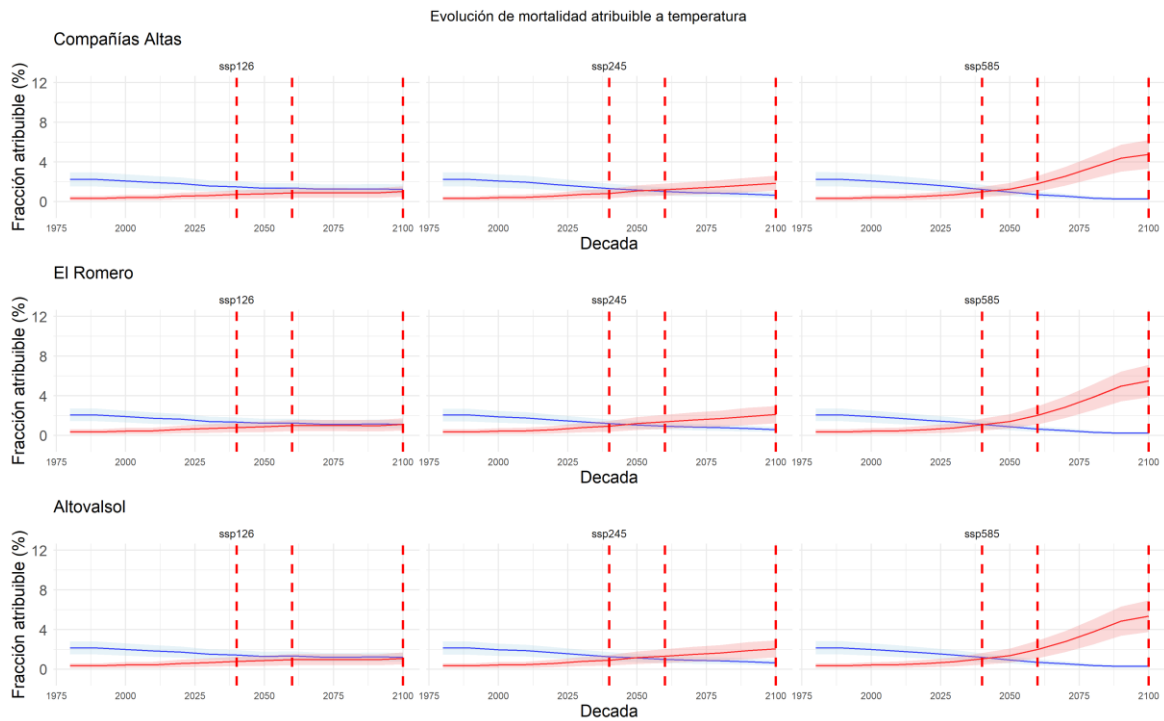


Figura 2-159: Evolución exceso de riesgo de muerte, comunidades macrozona Centro Norte 2, parte 1.

Fuente: Elaboración propia.

Para la macrozona centro norte 2, las comunidades de Compañías Altas, El Romero y Altovalsol muestran exceso de riesgo cercanas al 5% para el fin del periodo con las proyecciones más severas. Bajo los escenarios más conservadores, el exceso de riesgo solo sobrepasa el 2% al final del periodo.

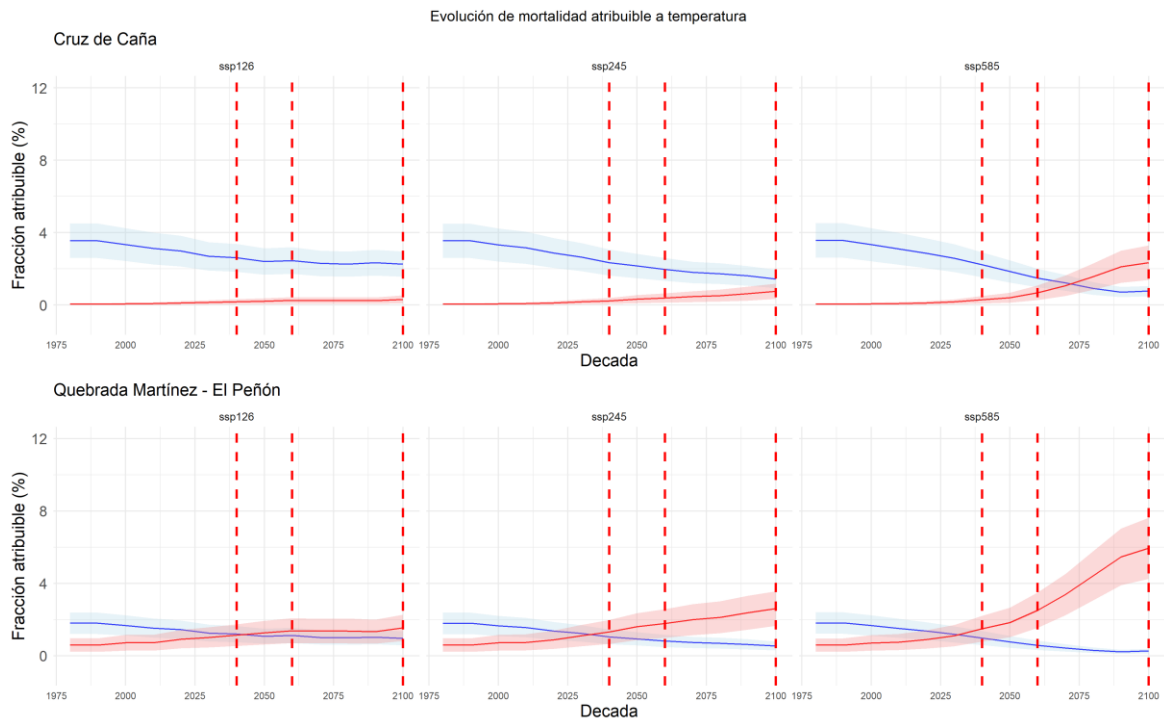


Figura 2-160: Evolución exceso de riesgo de muerte, comunidades macrozona centro Norte 2, parte 2.

Fuente: Elaboración propia.

De igual modo, para la macrozona centro Norte 2.2, el exceso de riesgo alcanza el 5,7% para las comunidades de Quebrada Martínez y El Peñón al finalizar el periodo de estudio, asumiendo el peor escenario proyectado. Se observa un mayor descenso del riesgo producto a las temperaturas frías en estas comunidades.

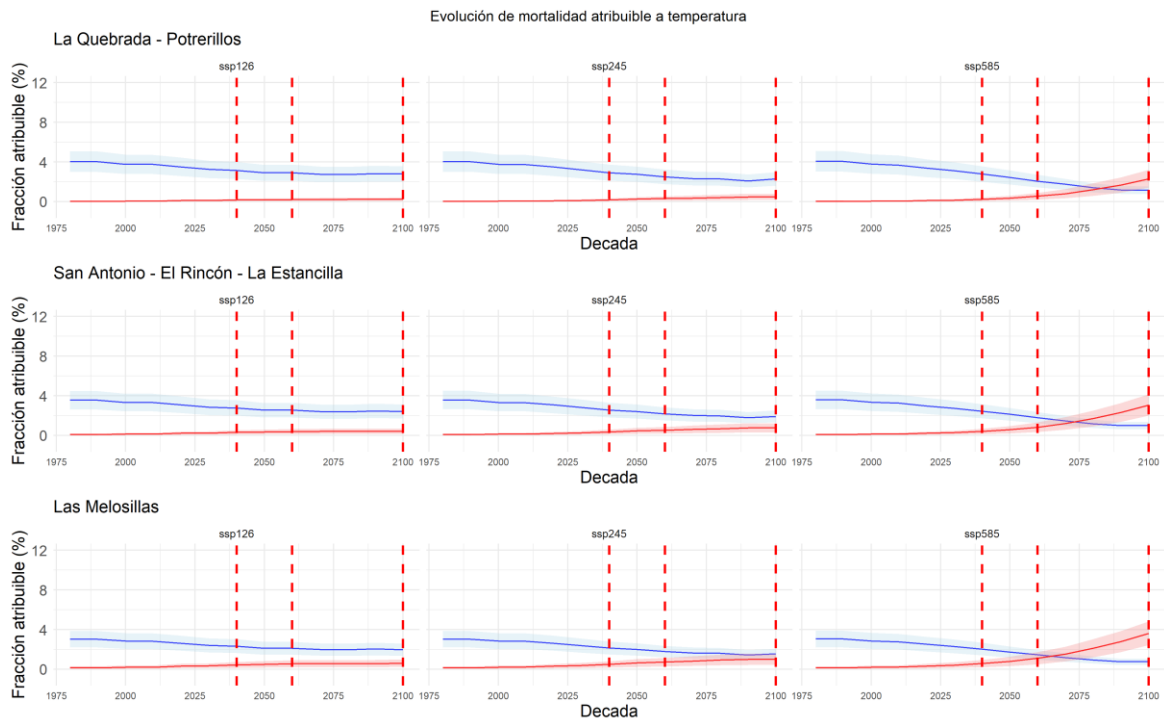


Figura 2-161: Evolución exceso de riesgo de muerte, comunidades macrozona Centro, parte 1.

Fuente: Elaboración propia.

Para la macrozona Centro, el incremento de las temperaturas bajo el peor escenario generará un incremento moderado del riesgo, alcanzando un 3,2% de riesgo extra para la comunidad de Las Melosillas al finalizar el periodo de estudio. Al evaluar los escenarios conservadores, el exceso de riesgo sería equivalente a un 1%.

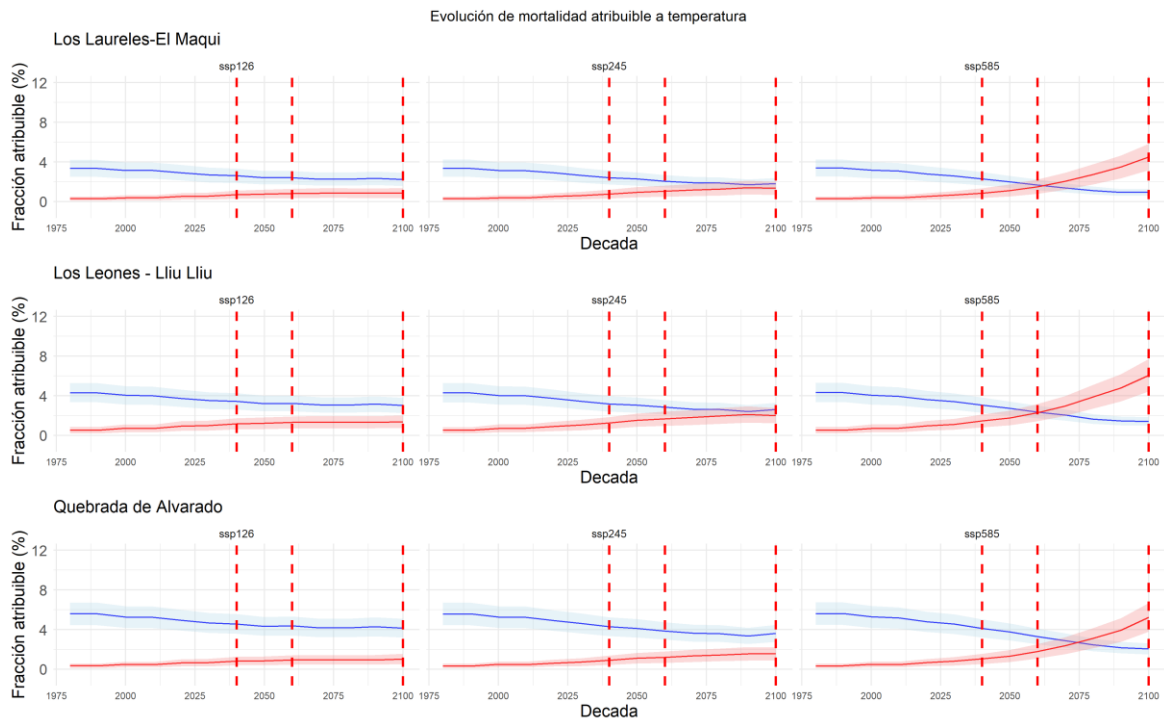


Figura 2-162: Evolución exceso de riesgo de muerte, comunidades macrozona Centro, parte 2.

Fuente: Elaboración propia.

Al evaluar las comunidades Los Laureles – El Maqui, Los Leones – Lliu Lliu y Quebrada de Alvarado, también pertenecientes a la macrozona centro, se observa un incremento equivalente a 4,6% de riesgo al finalizar el periodo y bajo el peor escenario. Nuevamente, bajo los escenarios más conservadores, el exceso de riesgo pareciera ser mucho menor. No obstante, se observa una disminución del riesgo producto del incremento de las temperaturas bajas.

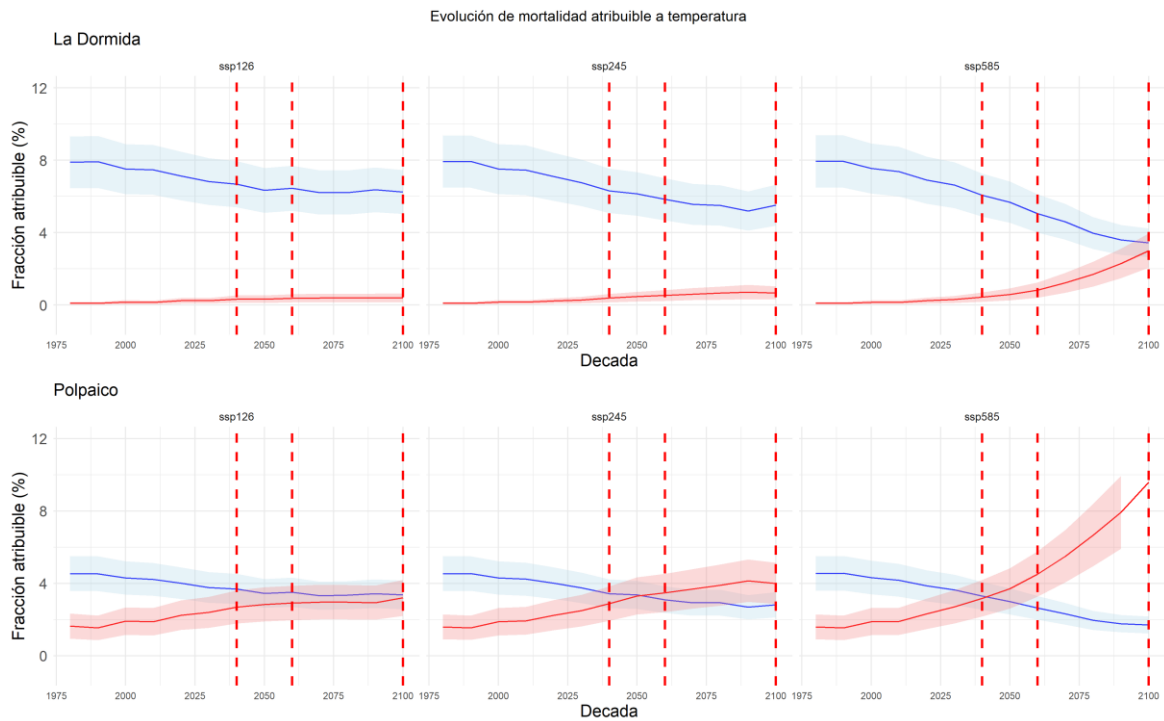


Figura 2-163: Evolución exceso de riesgo de muerte, comunidades macrozona Centro, parte 3.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, al evaluar las últimas comunidades de la macrozona centro, se observan diferencias significativas respecto al momento presente. Para Polpaico el incremento de riesgo alcanza el 8,6% para el final del periodo bajo el escenario más pesimista. Si se analizan los escenarios conservadores, el incremento equivale a un 4,1% y 3,1% respectivamente. Así mismo, se observa una disminución sostenida del riesgo producto del incremento de las temperaturas bajas.

3 RIESGOS Y OPORTUNIDADES DE TRANSICIÓN PARA INTERCHILE

3.1 Riesgos y oportunidades

3.1.1 Reputacionales

El cambio climático representa un desafío global que tiene implicaciones significativas en la agricultura y la disponibilidad de agua en muchas regiones del mundo. La vinculación de líneas de transmisión eléctrica con comunidades aledañas en estas infraestructuras puede aumentar los riesgos de transición de reputacionales para INTERCHILE. En este estudio, respecto de este riesgo de transición, se han propuesto metodologías para abordar los efectos del cambio climático en la agricultura y la disponibilidad de agua en las comunidades aledañas de interés para INTERCHILE, de forma de considerar factores clave para evaluar los riesgos de reputación y las oportunidades para una transición sostenible.

En ese sentido, y a modo de síntesis de lo ya expuesto en la sección 3.7, la vinculación al riesgo reputacional se consiste en un primer paso, en realizar un análisis detallado de las vulnerabilidades climáticas específicas de la región donde se pretende construir la línea de transmisión (sección 2). Se deben identificar los posibles cambios en los patrones climáticos, como el aumento de temperaturas, cambios en las precipitaciones y eventos climáticos extremos, y cómo estos afectarán a la agricultura y la disponibilidad de agua en la zona.

Una vez identificadas las vulnerabilidades climáticas y los posibles impactos en la agricultura y el acceso al agua, se debe realizar un mapeo de las comunidades aledañas que podrían verse afectadas directa o indirectamente por el proyecto de la línea de transmisión eléctrica. Es fundamental identificar a los grupos más vulnerables, como agricultores, ganaderos o comunidades que dependen directamente de fuentes de agua locales.

Además, se contempla un trabajo en terreno con miembros de estas comunidades para comprender sus preocupaciones y expectativas con respecto al proyecto y cómo perciben el riesgo de transición de reputación.

Finalmente, respecto de la evaluación de medidas de adaptación y mitigación, una vez que se hayan identificado las comunidades afectadas y sus preocupaciones con base en los análisis realizados, se deben evaluar medidas

correspondientes para reducir los riesgos de transición de reputación y promover una transición más sostenible. Estas medidas podrían incluir:

- Diseño de planes de manejo ambiental y social que minimicen los impactos negativos en la agricultura y el acceso al agua de las comunidades locales.
- Implementación de programas de responsabilidad social corporativa que brinden beneficios tangibles a las comunidades afectadas, como proyectos de conservación de agua, capacitación en prácticas agrícolas resilientes al clima o acceso a fuentes alternativas de ingresos.
- Desarrollo de estrategias de comunicación transparente y efectiva para informar a las comunidades sobre el proyecto, sus beneficios y riesgos potenciales, y fomentar la participación activa en el proceso de toma de decisiones.

3.1.2 Riesgos normativos, tecnológicos y de mercado

Clasificación de riesgos identificados en la revisión bibliográfica y de experiencia internacional

En función de los diferentes elementos identificados en la revisión bibliográfica y de experiencia internacional expuestos en la sección 1, se presenta un cuadro resumen respecto de los principales riesgos y oportunidades normativos, tecnológicos y de mercado asociados con el rubro de la transmisión eléctrica, los cuales surgen como necesidades para habilitar una transición hacia sistemas energéticos más sustentables.

Tabla 3-1: Resumen identificación y clasificación de riesgos de transición normativos, tecnológicos y de mercado.

Categoría	Evento de Riesgo	Causas	Consecuencias	Probabilidad [baja, media, alta]
Normativo	Modificaciones consideradas en el PdL de Transición Energética	De manera preliminar, el PdL presenta oportunidades relevantes para el segmento transmisión al posicionarlo como un sector habilitante para la carbono neutralidad. Sin embargo, existen aspectos que pueden representar eventuales riesgos a futuro. Por ejemplo, la PdL tiene por objetivo explicitar las condiciones, bajo las cuales empresas que posean sistemas de transmisión, puedan incorporar sistemas de almacenamiento como infraestructura asociada a dichos sistemas, sin embargo, almacenamiento destinado a arbitraje de precios debe ser incorporado a través de sociedades anónimas filiales o coligadas, como indica el Art.- 7 de la LGSE.	Este ejemplo supone interrogantes respecto de alternativas posibles y de menor incertidumbre de participación en la explotación de proyectos de almacenamiento, particularmente, a través de una filial o coligada en el "segmento" de almacenamiento. Por otro lado, si bien se busca un rol complementario entre Coordinador, Comisión y Ministerio dentro de este proceso, resulta esencial que en la práctica exista una coordinación entre estos procesos, que actualmente presentan diferencias relevantes en sus supuestos. Adicionalmente, mecanismos que buscan un desarrollo eficiente de la transmisión podrían tener mayor impacto en aquellas obras que	Alta

Categoría	Evento de Riesgo	Causas	Consecuencias	Probabilidad [baja, media, alta]
			presentan atrasos o paralizaciones.	
Normativo	Evaluación multi-valor en procesos de planificación de la transmisión	<p>Para adaptar los sistemas eléctricos a las necesidades de descarbonización, se necesitará contar con un sistema de transmisión que permita acceder a zonas con un elevado potencial renovable, sin disminuir la seguridad en el suministro y garantizando siempre que las soluciones que se implementen tengan como principal objetivo reducir los costos sistémicos. En este contexto, existe un consenso internacional y en particular en Chile, respecto al importante rol que jugarán los sistemas de transmisión en la transición energética. Es por esto que, es de esperar que los procesos de planificación de la transmisión en Chile ponderen dicha importancia a través de evaluar la multiplicidad de beneficios que aportan los sistemas de transmisión, y con esto aumenten el</p>	Oportunidad para que empresas de transmisión propongan o se adjudiquen nuevas obras de licitación, que respondan a la multiplicidad de necesidades de los sistemas eléctricos del futuro, tomando un rol clave en el desarrollo de la transición energética.	Alta

Categoría	Evento de Riesgo	Causas	Consecuencias	Probabilidad [baja, media, alta]
		número de licitaciones para el desarrollo de nuevas obras de transmisión.		
Normativo	Impuestos a las emisiones y metas de política pública	En la misma línea que la evaluación multi-valor, es importante destacar el aporte que los sistemas de transmisión pueden proveer para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y su aporte al cumplimiento de otras metas de política pública como la integración de un porcentaje determinado de energías renovables.	Oportunidad para que empresas de transmisión propongan o se adjudiquen nuevas obras de licitación, que busquen disminuir emisiones de gases de efecto invernadero o el cumplimiento de metas de política pública, a través de la integración de un mayor volumen de generación renovable.	Media-Alta
Normativo	Restricciones de gases tipo F	Debido a la creciente preocupación por contener los impactos negativos que diferentes industrias generan en el clima, la Comisión Europea ha establecido metas claras respecto al abandono progresivo de soluciones tecnológicas que utilicen gases tipo F, los cuales presentan un elevado potencial de calentamiento global, mucho más alto que el dióxido de carbono. En el caso particular de los	Una eventual legislación que restrinja o prohíba el uso de este tipo de gases en la infraestructura de transmisión, corresponde a un riesgo para empresas del rubro. En este sentido, las empresas de transmisión deberían promover el uso de tecnologías alternativas con menores impactos al medioambiente, de tal manera de perfilarse con	Media

Categoría	Evento de Riesgo	Causas	Consecuencias	Probabilidad [baja, media, alta]
		sistemas de transmisión, se utiliza SF6 como aislante en elementos de switcheo, transformadores y en algunas líneas de transmisión.	ventajas competitivas pensando en mercados futuros.	
Normativo	Coordinación entre redes de transmisión y distribución	Una mejor coordinación en la operación y planificación entre las redes de distribución y transmisión (a través de un adecuado diseño de mercado), podría facilitar e incentivar el ingreso de recursos energéticos distribuidos (DERs) a los distintos segmentos de la industria eléctrica, tanto a nivel de transmisión como de distribución.	Potencial riesgo para empresas de transmisión, en cuanto los DERs sean capaces de asumir mayores responsabilidades que permitan solucionar problemas de congestión, reemplazando con esto alternativas de expansión de transmisión.	Baja-Media
Normativo	Ajustes en mercados de energía, SSCC y potencia	La transición desde un mercado de la energía basado en costos auditados a un mercado basado en ofertas, la transición hacia un mercado de SSCC basado en costos uniformes y la implementación de un mercado de capacidad que premie los atributos de suficiencia y flexibilidad, debiese generar mejores	Estos ajustes a los mercados impulsarán un cambio importante en el paradigma tecnológico que se ha considerado hasta la fecha en los diferentes niveles de mercado, implicando un potencial riesgo para empresas del sector de transmisión, las	Alta

Categoría	Evento de Riesgo	Causas	Consecuencias	Probabilidad [baja, media, alta]
		<p>señales para las tecnologías que serán habilitantes para lograr las metas de descarbonización.</p>	<p>cuales podrían entrar a competir fuertemente con soluciones alternativas como la generación distribuida o la gestión de la demanda.</p>	
<p>Tecnológico</p>	<p>Irrupción de sistemas de almacenamiento a nivel de transmisión</p>	<p>La integración de generación renovable variable en los sistemas eléctricos ha generado diversos problemas de adecuación temporal y congestiones en las redes de transmisión a lo largo del mundo. En este sentido, tecnologías de almacenamiento como baterías de ion de litio, las cuales han presentado una baja importante en sus costos de desarrollo, se perfilan como una atractiva alternativa para resolver dichos problemas. En particular, sistemas de almacenamiento conectados a nivel de transmisión podrían resolver problemas de congestión mucho más rápido que nuevas líneas de transmisión.</p>	<p>Potencial riesgo si es que las empresas de transmisión no son capaces de adaptarse y desarrollar experiencia en esta nueva tecnología, la cual podría reemplazar alternativas de expansión de líneas de transmisión en futuras licitaciones. Por el contrario, si es que las empresas de transmisión se adaptan de forma adecuada a este nuevo paradigma tecnológico, lo anterior corresponde a una potencial oportunidad de construir ventajas que les permitan generar ofertas más competitivas en futuras licitaciones.</p>	<p>Alta</p>

Categoría	Evento de Riesgo	Causas	Consecuencias	Probabilidad [baja, media, alta]
Tecnológico	Mayor electrificación de consumos	La electrificación de consumos energéticos, como la calefacción o la electromovilidad, puede tener un impacto relevante en la localización, temporalidad y magnitud de la demanda energética del futuro.	Una mayor demanda eléctrica por electrificación de consumos corresponde a una oportunidad para empresas de transmisión, ya que esto se debería materializar en los procesos de la planificación de la transmisión a través de un aumento del número de licitaciones para expansiones o proyectos nuevos.	Alta
Tecnológico	Mayor presencia de recursos distribuidos y digitalización de redes de distribución	La rápida expansión de recursos energéticos distribuidos, tales como la generación distribuida, el almacenamiento y la electrificación de diferentes consumos, está generando una transformación no solo en la forma en que la electricidad es generada, sino también en cómo se comercializa, se transporta y se consume. En primer lugar, una mayor participación de recursos de generación distribuida genera el efecto directo de un menor consumo	Una mayor integración de recursos distribuidos representa un riesgo para las empresas de transmisión, ya que podrían entregar una alternativa sustituta o complementaria, permitiendo cubrir de forma efectiva y en menores plazos necesidades de mayor capacidad de transmisión asociadas generalmente a una congestión de los sistemas actuales.	Media-Alto

Categoría	Evento de Riesgo	Causas	Consecuencias	Probabilidad [baja, media, alta]
		<p>eléctrico por parte de estos clientes. En segundo lugar, la forma en que estos recursos distribuidos produzcan y consuman energía, permite contar con grandes bloques de potencia gestionable desde el lado de la demanda, con lo cual se podría prestar múltiples servicios al sistema eléctrico.</p>		
<p>Tecnológico</p>	<p>Irrupción de tecnologías de mejoramiento de redes de transmisión</p>	<p>En el proceso de expansión de las redes de transmisión actuales para lograr las metas de descarbonización, sin duda existirán muchos desafíos y problemas de congestión, especialmente relacionados con los tiempos de construcción de estos proyectos. Por esta razón, las tecnologías de mejoramiento de red (GETs por grid enhancing technologies), como los FACTS o el Dynamic Line Rating, podrían contribuir de forma significativa a cubrir o aliviar necesidades de transmisión a la espera que las nuevas inversiones en</p>	<p>En este sentido, es de esperar que futuras versiones de los procesos de planificación de la transmisión consideren y modelen este tipo de tecnologías como solución alternativa o complementaria a líneas de transmisión, generando una oportunidad para que las empresas del rubro compitan por adjudicarse dichas licitaciones.</p>	<p>Alta</p>

Categoría	Evento de Riesgo	Causas	Consecuencias	Probabilidad [baja, media, alta]
		líneas de transmisión se concreten.		
Tecnológico	Tecnologías de transmisión HVDC	Los sistemas de alto voltaje en corriente continua (HVDC) pueden ser una potencial solución para transferir grandes cantidades de potencia sobre largas distancias y con menores pérdidas de energía. Adicionalmente, pueden ser utilizados para transferir potencia entre redes AC sin necesidad de sincronizar sus frecuencias de operación.	El auge de este tipo de tecnologías podría significar un mayor número de licitaciones de sistemas HVDC en los procesos de planificación del futuro, por lo que representa una potencial oportunidad para las empresas de transmisión, en tanto que desarrollen experiencia y conocimiento que les permitan entregar ofertas más competitivas en este tipo de tecnologías.	Alta
Tecnológico	Integración del hidrógeno verde	La consecuencia directa de una mayor integración de hidrógeno verde corresponde a una mayor demanda eléctrica y con esto un mayor requerimiento de capacidad de generación renovable para suplir esa demanda. Lo anterior podría significar un aumento	El despliegue del hidrógeno como nuevo vector energético podría ser un riesgo u oportunidad para empresas de transmisión, dependiendo de la evolución en el costo de las distintas tecnologías involucradas en la cadena de valor	Media

Categoría	Evento de Riesgo	Causas	Consecuencias	Probabilidad [baja, media, alta]
		<p>importante en los requerimientos de capacidad de transmisión para mover dicha electricidad desde los mejores polos de generación renovable a los puntos donde se encuentren los electrolizadores. No obstante, no todos los proyectos de producción de hidrógeno se conectarán al sistema eléctrico, sino que una parte importante podrían ser proyectos off-grid los cuales producirían su propia electricidad cerca del punto de consumo, evitando así recargos en los costos de la electricidad por cargos de transmisión. Por otro lado, el transporte de hidrógeno a través de tuberías podría ser un sustituto o complemento a los sistemas de transmisión, moviendo energía en forma de hidrógeno y luego volviendo a generar electricidad a través de sistemas Gas to Power (G2P).</p>	<p>del hidrógeno, versus el costo de desarrollar expansiones o nuevos sistemas de transmisión.</p>	

Categoría	Evento de Riesgo	Causas	Consecuencias	Probabilidad [baja, media, alta]
Mercado	Shocks de precios de los combustibles	Frente a una eventual alza en los precios de combustibles, lo que en consecuencia aumentaría los costos de la electricidad, se podrían generar incentivos para que los clientes se muevan hacia esquemas de autoconsumo para disminuir sus costos.	Riesgo importante para las empresas de transmisión, ya que como se explicó anteriormente, podrían incentivar el autoconsumo a través de proyectos de generación distribuida o disminuir la demanda eléctrica a través de programas de eficiencia energética. Lo anterior generaría una disminución en la necesidad de nuevas expansiones de los sistemas de transmisión y con esto reduciría las oportunidades de negocio para las empresas que participan en este mercado.	Alta
Mercado	Recesiones económicas	Una recesión económica podría afectar de forma importante las tasas de crecimiento de demanda eléctrica y la integración de mayor generación renovable. Respecto al primer punto, un menor crecimiento económico de los países podría estancar los	Riesgo para empresas transmisoras, debido a una menor demanda de energía eléctrica lo que podría reducir las oportunidades futuras de nuevas inversiones de transmisión.	Alta

Categoría	Evento de Riesgo	Causas	Consecuencias	Probabilidad [baja, media, alta]
		<p>crecimientos de la demanda eléctrica o incluso reducir las ambiciones de electrificación en sectores como el transporte o la climatización.</p> <p>Respecto al segundo punto, una recesión también podría reducir las ambiciones de política pública y las inversiones privadas en capacidad de generación renovable variable, volcando la atención nuevamente en activos actuales de generación térmica.</p>		

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, en la Figura 3-1 se presenta un gráfico resumen con el mapeo de los diferentes riesgos identificados, clasificados en riesgos normativos, tecnológicos y de mercado. En particular, se consideran tres niveles de probabilidad: bajo, media y alta, donde cada riesgo y oportunidad se clasificó en dichos niveles según la información recopilada en la revisión bibliográfica, en conjunto con la experiencia del equipo consultor.

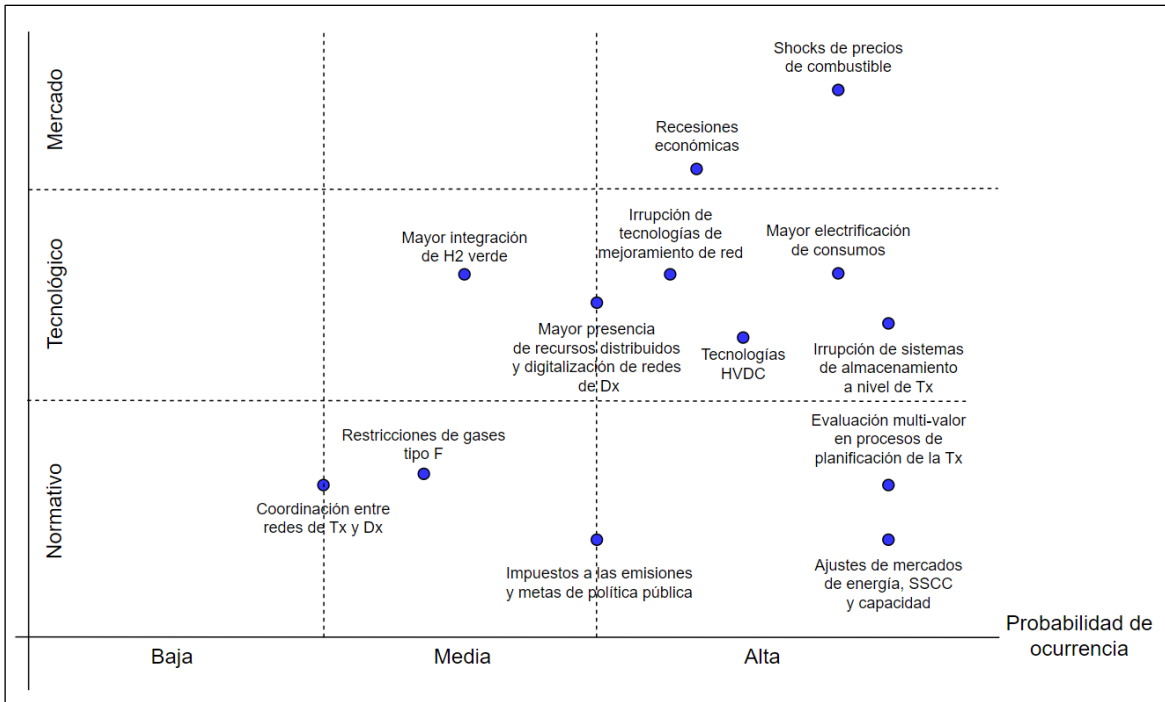


Figura 3-1: Clasificación de riesgos de transición y sus probabilidades de ocurrencia.

Fuente: Elaboración propia.

Metodología para cuantificación de riesgos de transición

A partir de la identificación de riesgos normativos, tecnológicos y de mercado asociados con el rubro de la transmisión eléctrica en un contexto de transición hacia sistemas energéticos más sustentables, resulta de interés cuantificar el impacto que estos riesgos u oportunidades podrían tener para los actuales y futuros activos de INTERCHILE SA, así como también para el sistema eléctrico y su desarrollo durante los próximos años.

Una metodología para cuantificar estos riesgos y oportunidades se basa en la utilización de un modelo de planificación de largo plazo, el cual permite encontrar una solución costo-eficiente para la evolución del sistema eléctrico chileno, considerando diferentes realizaciones potenciales de escenarios futuros. Este modelo se basa en herramientas de optimización y permite determinar las expansiones de generación y transmisión que son necesarias para cumplir la demanda eléctrica en cada año del horizonte evaluado, de tal manera que se minimicen los costos de inversión y operación del sistema eléctrico. En particular, el modelo determina los niveles de inversión en capacidades de generación (MW) de cada tecnología de generación en las distintas zonas del país, así como

también las expansiones en capacidad de transmisión que permiten transportar la energía entre los distintos puntos del sistema. En este sentido, a partir de generar diferentes parámetros de entrada para dicho modelo, que reflejen la materialización de riesgos y oportunidades de transición identificados anteriormente, es posible cuantificar los impactos que dichos riesgos podrían generar en las inversiones en capacidad de transmisión eléctrica. Por ejemplo, a partir de la construcción de un escenario futuro que considere una elevada penetración de generación distribuida, el modelo entregaría como resultado los impactos que esto último tendría en las inversiones en nueva capacidad de transmisión.

De esta manera, el objetivo es cuantificar cómo la materialización de los riesgos y oportunidades de transición impactan las inversiones en capacidades de transmisión a lo largo del país, junto con analizar las respectivas complementariedades de líneas de transmisión con otras tecnologías alternativas, considerando un horizonte de estudio desde el año 2028-2040. Para cumplir con este objetivo, se considera la siguiente metodología:

- **Construcción de Escenario “Business As Usual” (BAU):** corresponde a un escenario donde las condiciones actuales del sistema eléctrico se mantienen, considerando una baja irrupción de nuevas tecnologías producto de reducciones en costos de inversión que no se materializan. Para la construcción de este escenario se considera información de estudios públicos de largo plazo desarrollados por el Ministerio de Energía, Comisión Nacional de Energía, y el Coordinador Eléctrico Nacional. En particular el Escenario BAU considera:
 - Proyección baja de demanda eléctrica, producto de bajos niveles de electrificación.
 - Proyección alta de costos de inversión en nuevas tecnologías.
 - Proyección media de costos de combustibles.
 - Bajas adopciones de generación distribuida y gestión de demanda.
 - Proyección baja de impuestos a las emisiones.
 - Integración baja del hidrógeno verde.
- **Construcción de Escenarios Alternativos:** corresponden a escenarios futuros contruidos a partir del Escenario BAU pero además donde se materializan los riesgos y oportunidades de transición identificados anteriormente, bajo distintos niveles de materialización. En particular, lo anterior considera los siguientes escenarios:

- Mayor electrificación de consumos.
 - Mayor integración de generación distribuida.
 - Mayor integración de sistemas de almacenamiento.
 - Mayor integración de hidrógeno verde.
 - Aumento del impuesto a las emisiones de gases de efecto invernadero.
 - Mayores costos de inversión en sistemas de transmisión producto de normativas medioambientales más exigentes.
 - Menores costos de tecnologías HVDC y tecnologías de mejoramiento de red.
 - Descarbonización al 2030.
 - Operación Estresada de la infraestructura de Transmisión.
 - Distintas hidrologías.
- **Construcción de Escenario de Transición Energética Acelerada:** corresponde a un escenario futuro, donde los ajustes regulatorios y las reducciones en costos de desarrollo de nuevas tecnologías se materializan bajo el objetivo de experimentar una transición energética acelerada. Para la construcción de este escenario se considera información de estudios públicos de largo plazo desarrollados por el Ministerio de Energía, Comisión Nacional de Energía, y el Coordinador Eléctrico Nacional. Adicionalmente, también considera la materialización de los riesgos y oportunidades de transición con mayor probabilidad de ocurrencia. En particular este escenario considera:
 - Proyección alta de demanda eléctrica producto de elevados niveles de electrificación.
 - Proyección media de costos de inversión en nuevas tecnologías.
 - Proyección media de costos de combustible.
 - Elevada participación de generación distribuida y gestión de demanda.
 - Proyección alta del impuesto a las emisiones.
 - Integración media del hidrógeno verde.

Cuantificación de impacto en infraestructura de transmisión e inversiones en tecnologías alternativas: a partir de los resultados obtenidos para el Escenario BAU, los Escenarios Alternativos, y el Escenario de Transición Energética Acelerada, se cuantifican los impactos a nivel de inversión en nueva capacidad de transmisión eléctrica, calculados como las diferencias entre los resultados para cada

Escenario Alternativo con sus distintos niveles de materialización versus los resultados obtenidos en el Escenario BAU, junto con la respectiva comparación entre el Escenario de Transición Energética Acelerada y el Escenario BAU (Figura 3-2).

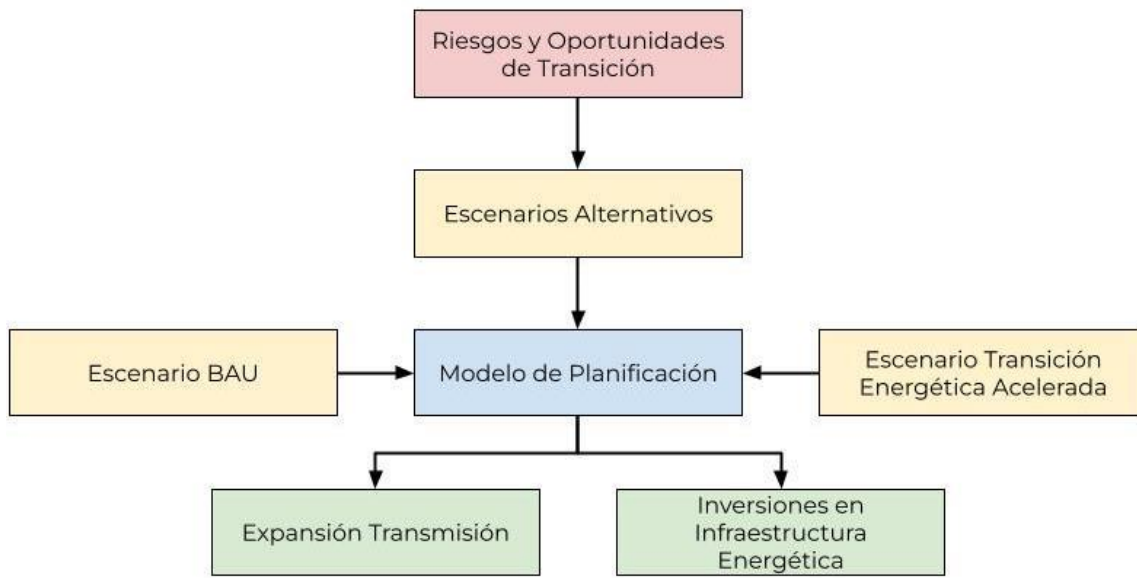


Figura 3-2: Resumen metodología de cuantificación de riesgos y oportunidades de transición.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que a partir del Escenario de Transición Energética Acelerada se busca representar los riesgos y oportunidades normativos que no necesariamente corresponden a un efecto a nivel de costos de inversión y operación del sistema eléctrico, como lo son los ajustes regulatorios a los mercados eléctricos en Chile, la coordinación entre redes de transmisión y distribución y la evaluación multidimensional en procesos de planificación de la transmisión. Estos riesgos y/o oportunidades se materializan en dicho escenario a través de asumir que existen los diferentes incentivos para que se logren los objetivos de la Transición Energética Acelerada.

Para la planificación del sistema eléctrico se utiliza una herramienta de optimización de largo plazo, que se caracteriza por ser capaz de capturar distintas dimensiones de flexibilidad y restricciones intertemporales, como rampas y tiempos mínimos de encendido y apagado. Esta herramienta ha sido utilizada junto al Ministerio de Energía y en diversas publicaciones de revistas científicas, tales como:

- “Evaluación de la Industria de Generación Distribuida como Motor de Empleo y Desarrollo Económico Eficiente y Sustentable en Chile Post COVID-19” para el Ministerio de Energía en 2020. Disponible en: <https://isci.cl/wp-content/uploads/2021/08/Informe-Final-Definitivo-Proyecto-ISCI-MEN-GDx-Covid-19.pdf>
- F. Verástegui, A. Lorca, M. Negrete-Pincetic, D. Olivares. “Firewood heat electrification impacts in the Chilean power system”. Energy Policy, Volume 144, 2020, 111702, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111702.
- F. Verástegui, A. Lorca, D. Olivares, M. Negrete-Pincetic. “Optimization-Based Analysis of Decarbonization Pathways and Flexibility Requirements in Highly Renewable Power Systems”. Energy, Volume 234, 2021, 121242, doi: 10.1016/j.energy.2021.121242.

3.2 Supuestos e Información de Entrada

Las simulaciones elaboradas en base a la metodología mencionada se construyeron a partir de los datos del repositorio elaborado para el proceso de Planificación Energética de Largo Plazo (PELP) por el Ministerio de Energía. Este proceso busca proyectar la demanda y oferta energética del país para distintos escenarios futuros, en un horizonte de al menos 30 años, de forma que sean considerados en el proceso de planificación de los sistemas de transmisión eléctrica que lleva a cabo la Comisión Nacional de Energía.

Para mantener una trazabilidad de los supuestos utilizados, para formular los escenarios simulados se utilizan los datos publicados por el Ministerio basados en los distintos escenarios en los procesos quinquenales y sus correspondientes actualizaciones de antecedentes.

Dentro de los principales datos utilizados se encuentran el portafolio de generadores e infraestructura existentes, en plan de obras y los candidatos con sus respectivos parámetros, las líneas de transmisión que conectan las principales barras definidas. También están definidas las demandas eléctricas para cada barra, formadas a partir de proyecciones de consumo de los principales sectores (base, industrial, transporte) y la electrificación progresiva de otros (calefacción, por ejemplo) y sus correspondientes perfiles asociados a doce días representativos (uno mensual). Además, se incluyen los costos de inversión para las distintas tecnologías proyectados para cada escenario basados en distintos supuestos de

desarrollo nacional y mundial en el horizonte de tiempo, los cuales están basados en fuentes internacionales disponibles (Bloomberg New Energy Finance, NREL, U.S. Energy Information Administration) así como también se dispone de los costos de los combustibles y sus distintas trayectorias para cada escenario. Adicionalmente, se consideran distintos escenarios de evolución para los impuestos al carbono y el retiro de las plantas de generación en base a carbón.

La herramienta de optimización de largo plazo utilizada en este caso fue Switch. Switch es un modelo de planificación de sistemas de energía diseñado para abordar la transición hacia futuros sistemas energéticos con alta participación de energía renovable, almacenamiento y otras tecnologías. Utiliza una formulación matemática que considera múltiples períodos de inversión y secuencias cronológicas de horas, permitiendo optimizar decisiones de inversión para infraestructura energética (generación y almacenamiento) y transmisión considerando cómo se usarían hora a hora en días representativos de los años futuros.

Particularmente, para la inversión el modelo utilizado permite construir capacidad de esta infraestructura en los distintos periodos de inversión definidos. Para la operación del sistema, el modelo utiliza restricciones operativas que definen variables básicas pero importantes para el análisis, como la potencia despachada por cada proyecto de generación en cada hora, y el consumo de combustible cuando corresponda, además de restricciones de rampa, diferentes para cada tecnología de generación. Para la generación renovable variable se asumieron factores de capacidad horarios, asociados para cada proyecto, con el objetivo de capturar el carácter operativo del sistema dada la relevancia que esto tiene al analizar la expansión de la transmisión.

Complementario a esto, se sabe que el sistema hídrico es muy relevante en el sistema eléctrico nacional, por lo que para estas simulaciones se considera un sistema hídrico que funciona en paralelo con el eléctrico, vinculándose a través del proceso de generación de energía en generadores hidroeléctricos. El sistema se basa en generadores y componentes que vinculan la generación de energía con el uso y la disponibilidad del agua.

Cabe destacar que, si bien los parámetros de entrada para definir cada uno de los escenarios fue elaborado en base a los disponibles en el repositorio de la PELP, los resultados no necesariamente serán idénticos a los obtenidos en el informe publicado por el Ministerio de Energía, dado que algunos supuestos,

consideraciones operacionales del sistema y métodos de modelación no son los mismos. Sin embargo, el modelo fue calibrado para representar el Sistema Eléctrico Nacional de una manera similar a lo que la PELP presenta en los diversos resultados de los escenarios, a través de la inclusión de restricciones operativas y requerimientos del sistema, como las restricciones de rampa de subida y bajada mencionadas anteriormente.

3.2.1 Escenarios de Referencia: BAU y Transición Acelerada

Los escenarios de BAU y de Transición Acelerada son elaborados principalmente a partir de los datos disponibles en la PELP y del Coordinador Eléctrico Nacional, con el objetivo de representar y modelar la evolución del sistema eléctrico en el horizonte de tiempo definido para este estudio, que es desde el 2028 al 2042. Los escenarios de referencia seleccionados en este caso son construidos considerando 8 periodos de inversión (del 2028 al 2042 con periodos intermedios separados por dos años), con 12 días representativos (uno para cada mes) de 24 horas cada uno para cada periodo de inversión mencionado. La utilización de días representativos es una práctica recomendada al desarrollar estos modelos de largo plazo, entregando resultados más acertados que los obtenidos a través de bloques, por ejemplo (SPEC, 2023).

A grandes rasgos, la red eléctrica considerada en estas simulaciones contiene 26 nodos y 28 líneas de transmisión, donde cada línea puede ampliarse en términos de capacidad, mostrado en la Figura 3-3. Respecto al parque de generación y el almacenamiento, la capacidad inicial que se considera corresponde a la información de la infraestructura actual, en los que se incluyen sus parámetros operativos, capacidad instalada, ubicación y fecha de conexión Figura 3-4. Finalmente, respecto a la demanda eléctrica, se considera el perfil de carga horaria utilizado por el CEN y es proyectado utilizando la base de datos de la PELP, según corresponda dependiendo del escenario (BAU o Acelerada).

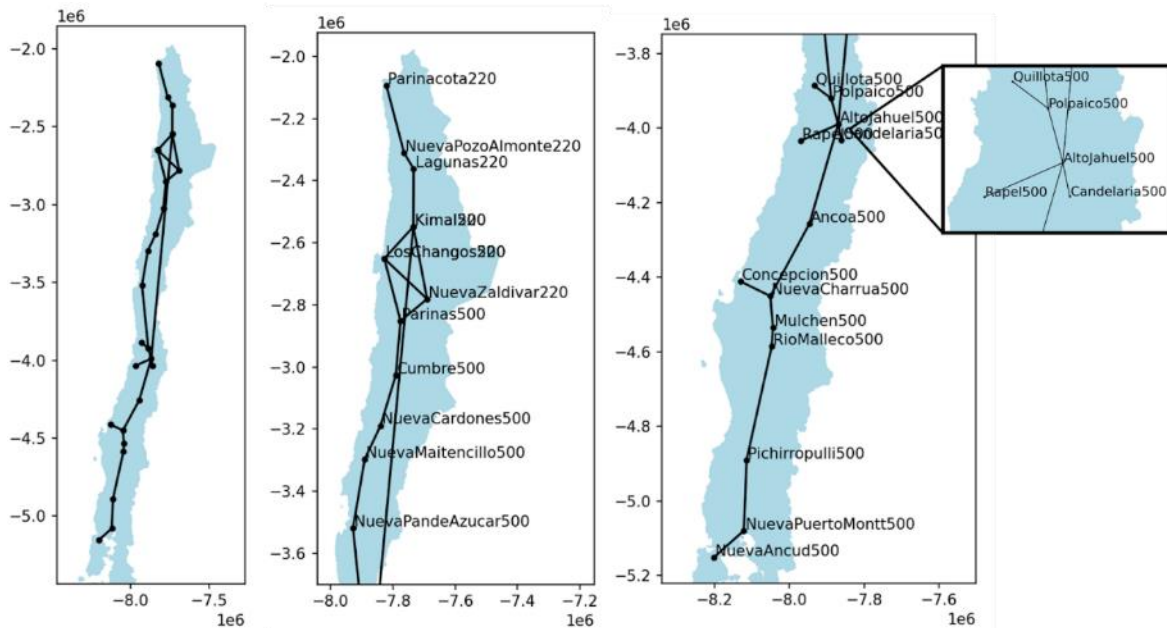


Figura 3-3: Sistema eléctrico considerado.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la infraestructura energética existente en 2028, para los escenarios se consideran tanto las plantas que actualmente se encuentran en operación como las que están en plan de obras y que seguirán disponibles durante su vida útil hasta el mencionado año. Según avanza en el horizonte de tiempo, el modelo retira la infraestructura que cumple su vida útil, por lo que deja de considerarse dentro de la generación disponible. Para la capacidad candidata se utiliza la información disponible en la PELP, con sus correspondientes parámetros de inversión, operación y ubicación.

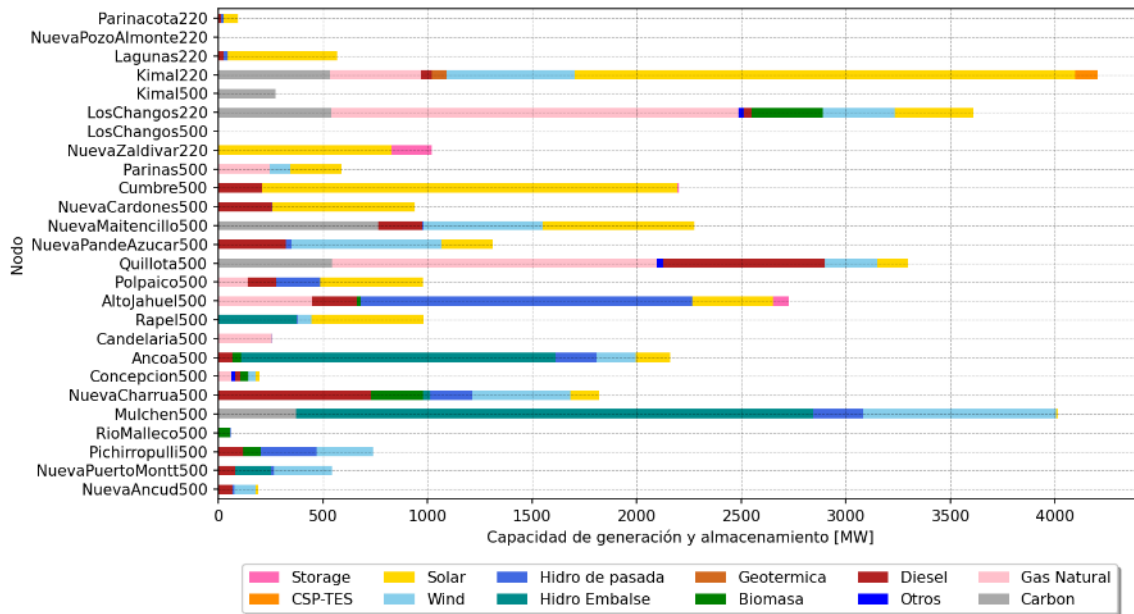


Figura 3-4: Infraestructura energética instalada predeterminada.

Fuente: Elaboración propia.

La generación variable para la definición de este caso de estudio fue modelada considerando factores de planta variables elaborados en base a la disponibilidad horaria de los generadores renovables existentes utilizados por el CEN y se utilizó la base de datos PELP para la disponibilidad horaria de generadores candidatos.

Respecto a la modelación de la generación hídrica, se considera que esta está disponible durante todo el horizonte de tiempo, asumiendo que se renueva constantemente para poder entregar energía. En particular, en ambos escenarios principales, la modelación de generación hidroeléctrica de embalse es a partir de un sistema hídrico que funciona en paralelo con el eléctrico, vinculados a través del proceso de generación de energía en las plantas hidroeléctricas. Este sistema incluye en su definición los componentes que vinculan la generación de energía con el uso y disponibilidad del agua a partir de la especificación de la topología del sistema de agua, como los nodos, embalses, conexiones de agua y proyectos hidroeléctricos. Para definir los parámetros de esta red junto con la disponibilidad del recurso hídrico, se utilizó como input el flujo real de agua del año 2022, un año relativamente seco en comparación con las dos últimas décadas con una probabilidad de excedencia de aproximadamente un 80%. Complementando la generación de embalses, la generación hídrica de pasada se asume como generación variable, con un factor de capacidad variable horario.

Respecto a la demanda eléctrica utilizada para ambos escenarios, se considera el perfil de carga horario utilizado por el CEN, que es proyectado a nivel nodal a lo largo del horizonte de tiempo definido utilizando la base de datos de la PELP, dependiendo del escenario y el nivel de electrificación asociado a cada escenario.

La evolución de los costos de inversión es también uno de los parámetros más relevantes al momento de definir los escenarios dado que impactará fuertemente las decisiones de inversión y por ende tanto el mix de generación y almacenamiento como la necesidad de transmisión. En particular, la PELP elabora proyecciones respecto a los cambios de estos costos en base a distintos supuestos y fuentes de datos, elaborando diferentes caminos dependiendo de las realizaciones esperadas en cada uno de los escenarios que definen, tanto para los mencionados costos de inversión como para el de los combustibles. En el caso del escenario BAU, se utiliza una proyección alta de costos de inversión en nuevas tecnologías y una media para los costos de combustibles. Para el caso de Transición Acelerada (diferente del igual llamado en la PELP) se utiliza una proyección media tanto para los costos de inversión en nuevas tecnologías como para los costos de combustible.

3.2.2 Escenarios a partir de Sensibilidades

A parte de los escenarios de referencia basados en los parámetros disponibles en la PELP, se construyeron escenarios adicionales, específicamente a partir del escenario BAU. Estos escenarios se definieron según los riesgos identificados, materializados mediante la variación de los parámetros relacionados a cada riesgo en la correspondiente simulación. En los siguientes puntos se explicitan cada uno de estos junto a la sensibilización realizada:

- **Mayor electrificación del Consumo (BAU_MayorElec):** Este escenario está basado en el BAU, en el cual se considera una mayor electrificación de los distintos sectores que participan en la demanda, como son los sectores residenciales, transporte e industriales. En este caso, utilizando las mismas proyecciones de largo plazo entregadas en la PELP, se incrementa la demanda en los distintos nodos en base a la tasa de crecimiento definida para cada uno de ellos.
- **Mayor integración de Hidrógeno Verde (BAU_MayorH2):** Para poder considerar una importante producción de hidrógeno verde en el país y representar su correspondiente consumo energético en este escenario, se

utiliza la información contenida en la PELP y los resultados obtenidos en "Impacts of different hydrogen demand levels and climate policy scenarios on the Chilean integrated hydrogen–electricity network".

En particular, se considera una demanda de hidrógeno tanto a nivel de consumo nacional como de exportación, definido en base a las proyecciones de la PELP. Además, como se indica en esta misma, la producción de hidrógeno puede ser realizada tanto a nivel on-grid como off-grid, por lo que en este escenario se considera como demanda extra de energía la consumida por la producción on-grid, que representa aproximadamente casi un 40% de la producción total, como se observa en la Figura 3-5.

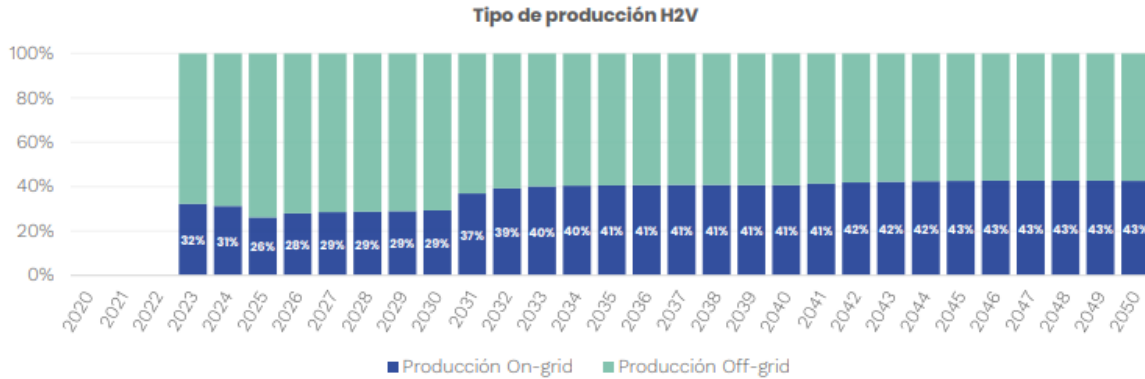


Figura 3-5: Tipo de producción H2V.
Fuente: Elaboración propia.

Con esta proyección de demanda de consumo de hidrógeno, y considerando los nodos en los que la transición eficiente del sistema eléctrico estudiado en (Jorquera et al., 2024) identifica que las plantas de producción de hidrógeno se ubicarán, se agrega la demanda añadida a la demanda neta considerada sin integración del hidrógeno, con lo que se define el escenario de Mayor H2.

- **Aumento del Impuesto a las emisiones de gases de efecto invernadero:** Con el objetivo de cuantificar y representar un escenario más estricto respecto en realización a las medidas relacionadas a la emisiones se elaboran dos sensibilidades en las cuales la trayectoria del Impuesto a las emisiones de gases de efecto invernadero se incrementa en mayor medida durante los años venideros, basados en lo definido en la PELP, definiéndose así los

escenarios Tax+ y Tax++, los cuales utilizan la proyección Media y Alta, como se observa en la Figura 3-6.

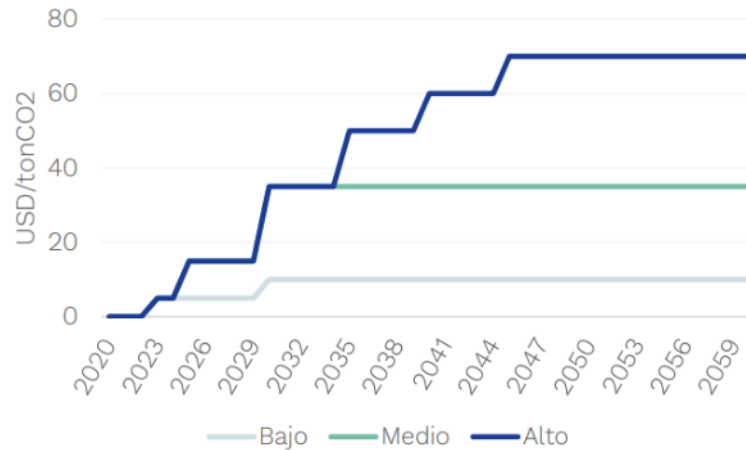


Figura 3-6: Trayectoria del impuesto verde definida en la PELP.

Fuente: Elaboración propia.

- **Menores costos en tecnologías HVDC y tecnologías de mejoramiento de red (BAU_TxCost-):** Para este caso, para representar el efecto que tienen menores costos en tecnologías HVDC y tecnologías de mejoramiento de la red, se sensibiliza el costo de inversión en Tx para los cuales se considera una disminución del 20% de estos en comparación a los utilizados en el caso BAU.
- **Mayores costos de inversión en sistemas de transmisión (BAU_TxCost+):** De igual forma que en el caso anterior, para cuantificar cómo cambia la transmisión y los costos del sistema cuando los costos de inversión en transmisión aumentan, se define un escenario en el que se aumentan los costos de transmisión en un 20%.
- **Mayor integración de generación distribuida (BAU_GenDx):** El efecto de mayor generación distribuida es capturado en esta sensibilidad, en la que, basados también en la información disponible en la PELP (Figura 3-7), se disminuye la demanda nodal considerando una integración alta de generación distribuida, particularmente en base a tecnología solar fotovoltaica. En este caso se considera el escenario de Alta capacidad de generación distribuida.

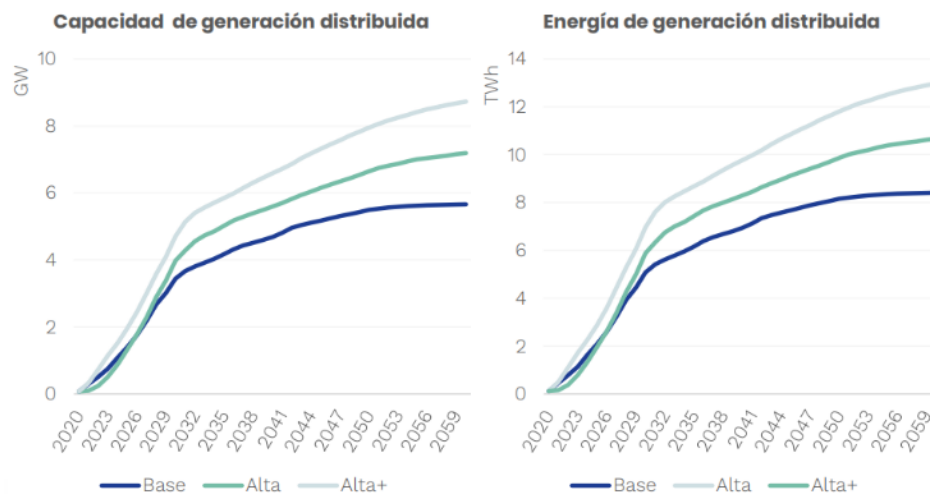


Figura 3-7: Escenarios de integración de generación distribuida de la PELP.

Fuente: Elaboración propia.

- Mayor integración de sistemas de almacenamiento (BAU_MayorStorage):** Entendiendo que la penetración del almacenamiento puede tener un rol importante en el sistema eléctrico a nivel de planificación y de operación, se toma el escenario BAU y se disminuyen los costos de inversión del almacenamiento en la forma de BESS y CSP-TES en un 50% respecto al caso BAU. En este caso, para identificar y cuantificar un efecto de una realmente alta integración del almacenamiento, se disminuyen los costos de inversión a la mitad para ambas tecnologías.
- Descarbonización al 2030 (BAU_Decarb2030):** Para la elaboración de este escenario se utilizan los mismos parámetros que en el caso BAU, modificando únicamente los parámetros de la vida útil de las plantas de generación a carbón. Para esto, se utilizó el cronograma de retiro considerado en los resultados del escenario A (BAU) correspondiente al estudio “Plan de Obras de Generación 2022” del Coordinador, el cual considera un cierre total de centrales a carbón al año 2030. El cronograma específico puede ser encontrado en la Tabla 42, presentada a continuación.

Tabla 3-2: Cronograma considerado para el cierre y reconversión de centrales térmicas a carbón.

Central	Zona	Retiro	Capacidad [MW]	Fecha retiro
Ventanas 1	Centro	Retirada	120	2021
Bocamina	Sur	Retirada	130	2021

Tocopilla U12	Norte	Retirada	87	2019
Tocopilla U13	Norte	Retirada	86	2019
Tocopilla U14	Norte	Retirada	136	2022
Tocopilla U15	Norte	Retirada	132	2022
Tarapacá	Norte	Retirada	158	2020
Bocamina II	Sur	Retirada	350	2022
Ventanas 2	Centro	Comprometido	220	2022
Mejillones 1	Norte	Comprometido	160	2025
Mejillones 2	Norte	Comprometido	174	2025
Nueva Ventanas	Centro	Comprometido	272	2029
Andina	Norte	Reconversión	177	2025
Angamos 1	Norte	Comprometido	277	2026
Angamos 2	Norte	Comprometido	281	2026
Hornitos	Norte	Reconversión	178	2025
Campiche	Centro	Comprometido	272	2029
IEM	Norte	Reconversión	375	2025
Norgener 1	Norte	*	140	2026
Guacolda 1	Norte	*	152	2028
Guacolda 2	Norte	*	152	2028
Norgener 2	Norte	*	136	2026
Guacolda 3	Norte	*	152	2028
Guacolda 4	Norte	*	152	2029
Guacolda 5	Norte	*	152	2029
Santa María	Sur	*	370	2030
Cochrane 1	Norte	*	275	2027
Cochrane 2	Norte	*	275	2027

Fuente: Elaboración propia.

- **Operación Estresada de la infraestructura de Tx (BAU_OpEstresada):** Con el objetivo de cuantificar el impacto de una operación del sistema "estresada" debido al uso de automatismos en la red de transmisión para

el aumento de transferencias fuera del criterio N-1, lo cual se estima de gran relevancia. En este escenario, la capacidad de transmisión disponible se ha reducido al 85% de su valor originalmente disponible en el escenario BAU.

- **Hidrologías Seca y Media acompañadas de un aumento en la generación térmica (BAU_PE90 y BAU_PE50):** En este caso, para representar el efecto que la hidrología y disponibilidad hídrica tiene en la operación e inversión en infraestructura en el sistema eléctrico, se modelan dos sensibilidades particulares, en las que se varía la disponibilidad hídrica a través de un cambio en los afluentes que llegan a los distintos nodos hídricos modelados en la red hídrica. Así, se construye un escenario seco con una probabilidad de excedencia de alrededor de un 90 %, y otro medio, en el que se considera una probabilidad de excedencia de aproximadamente un 50 %. Además, en cada escenario se disminuye el precio del gas para presentar una mayor participación de la generación térmica según esta tecnología. Los datos relativos a la hidrología se obtuvieron del CEN (CEN, 2023).
- **Hidrología Húmeda acompañada de un aumento en la generación eólica (BAU_PE30):** Al igual que las dos sensibilidades anteriores, se define un escenario con años más bien húmedos, considerando hidrologías con probabilidad de excedencia de aproximadamente 30%. Además, se considera un aumento en la generación eólica materializado a través de una disminución en los costos de inversión para esta tecnología.

3.3 Resultados

En esta sección se presentan los principales resultados obtenidos para los escenarios definidos, donde se muestra la capacidad de generación eléctrica instalada para cada periodo, la participación de cada tecnología en el portafolio, el despacho para dos días representativos en 2028 y 2040 y la energía total suministrada cada año. En particular, para la transmisión, en primer lugar se muestra a nivel de líneas la capacidad construida en cada corredor para cada escenario y, a partir de los resultados obtenidos para el Escenario BAU, los Escenarios Alternativos, y el Escenario de Transición Energética Acelerada, se cuantifican los impactos a nivel de inversión en nueva capacidad de transmisión eléctrica, calculados mediante la comparación de los resultados de cada Escenario Alternativo, que varían en sus niveles de materialización, con los resultados obtenidos en el Escenario BAU. Esto incluye la correspondiente evaluación entre el Escenario de Transición Energética Acelerada y el Escenario BAU, considerando las diferencias en los resultados, como se mencionó en la metodología.

3.3.1 Resultados BAU y Transición Acelerada

En este primer apartado, se presentan los resultados de los dos escenarios principales descritos, BAU y Transición Acelerada, para entregar un contexto comparativo entre ambas realizaciones iniciando con una breve descripción de la evolución del parque de generación en base a los supuestos mencionados y continuando con una comparación de los resultados asociados al desarrollo de la transmisión en el sistema.

Inversión en Capacidad de Generación

En la Figura 3-8 se presenta la evolución de la capacidad de generación y almacenamiento a nivel agregado por tecnología, en la que se observa la penetración principalmente de las tecnologías eólicas, solar y de almacenamiento a través de BESS, en mayor medida en el caso de Transición Acelerada debido a la disminución de los costos de la tecnología respecto al caso de referencia (BAU).

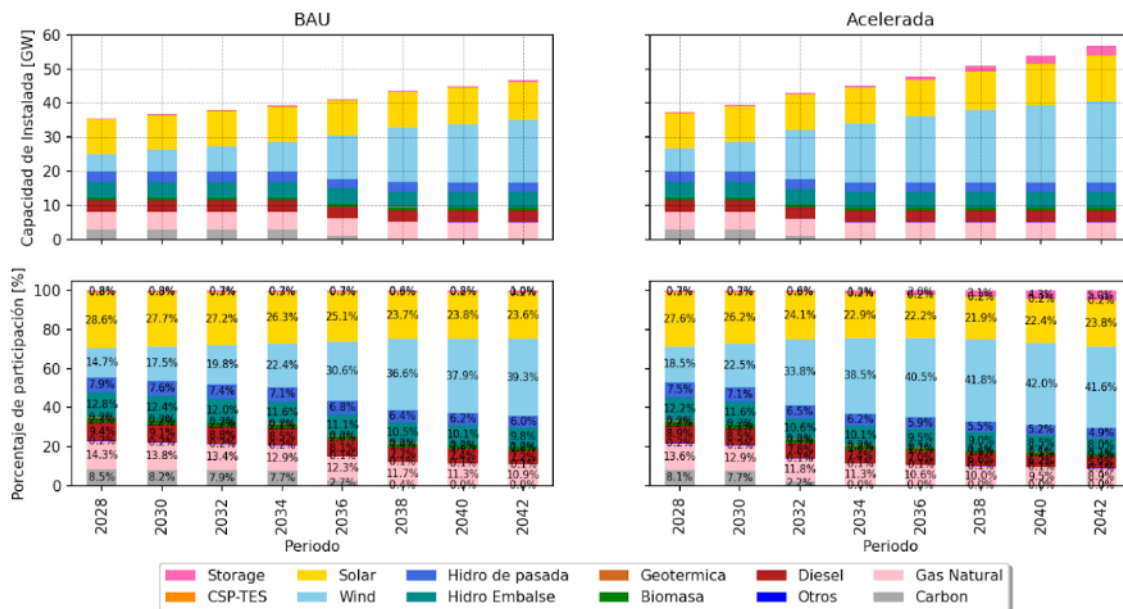


Figura 3-8: Evolución de la capacidad instalada de generación y almacenamiento del escenario BAU y de T. Acelerada.

Fuente: Elaboración Propia.

Despacho de la Generación y Almacenamiento

Además, en las Figura 3-9 y Figura 3-10 se muestra el despacho de la generación para dos de los 12 días representativos definidos, correspondientes a enero y julio del 2028 y 2040, para los escenarios de BAU y de Transición Acelerada. En esta se observa principalmente la salida del carbón del parque de generación en el año 2040, que es suplido con las tecnologías entrantes mencionadas anteriormente. Además, se observa una presencia del gas en ambos escenarios con una mayor generación durante los meses de invierno donde la disponibilidad solar disminuye.

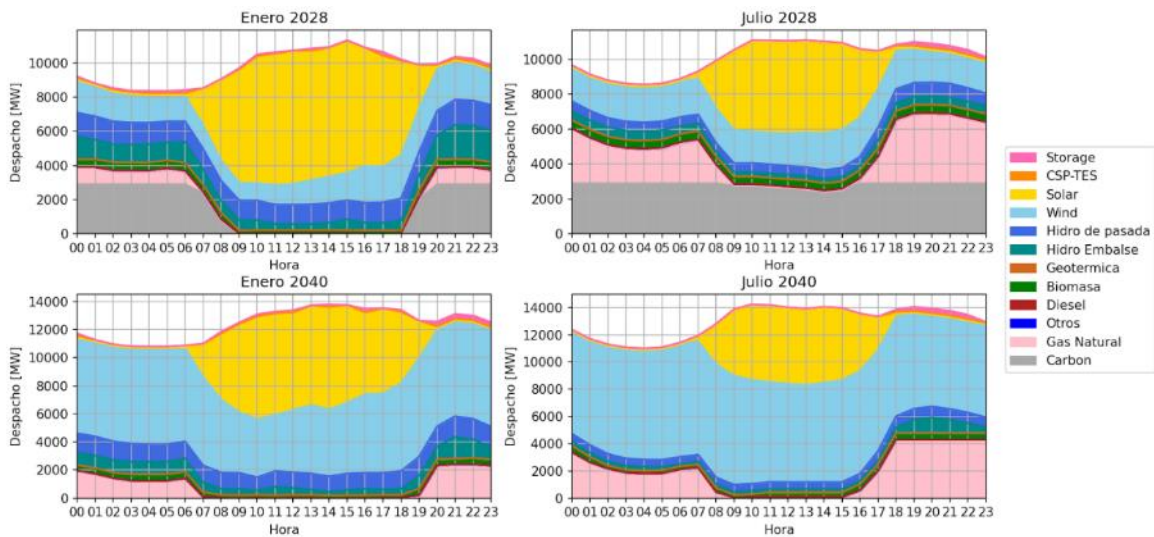


Figura 3-9: Despacho de la generación para días representativos de enero y julio en 2028 y 2040, escenario BAU.

Fuente: Elaboración Propia.

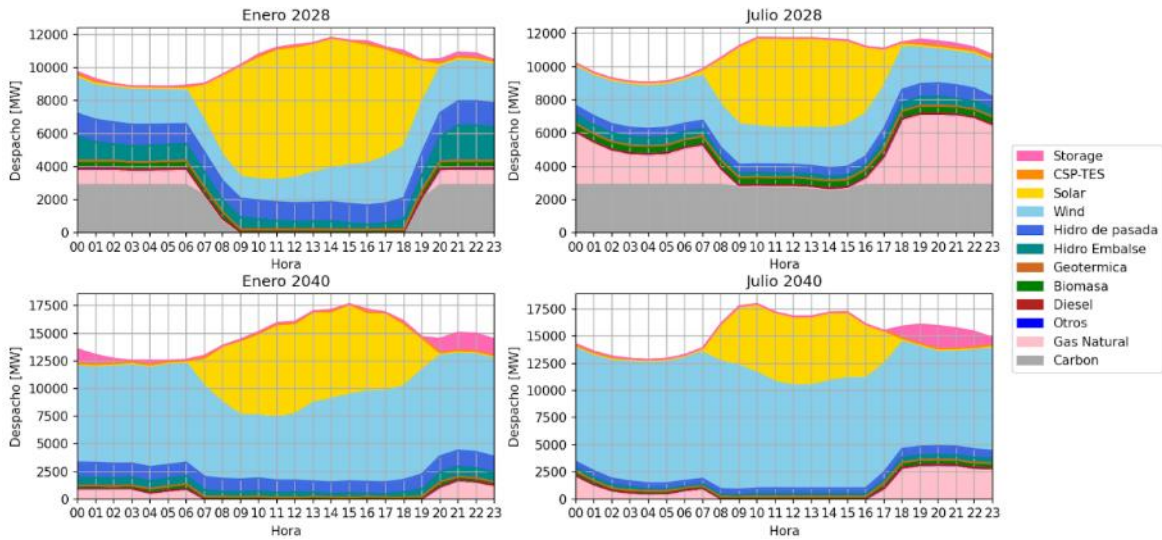


Figura 3-10: Despacho de la generación para días representativos de enero y julio en 2028 y 2040, Transición Acelerada.
Fuente: Elaboración Propia.

Para complementar la información respecto al despacho de la generación, en las Figura 3-11 y Figura 3-12 se muestra el vertimiento para los mismos días presentados, con el fin de ilustrar el aumento en el vertimiento a medida que mayor capacidad solar y eólica se instala. Finalmente, a modo de resumen global del vertimiento observado en ambos escenarios, se presenta la Tabla 3-3 en la que se muestra el vertimiento solar y eólico por separado, el total y el porcentaje al que equivale este respecto al total disponible para el año 2040.

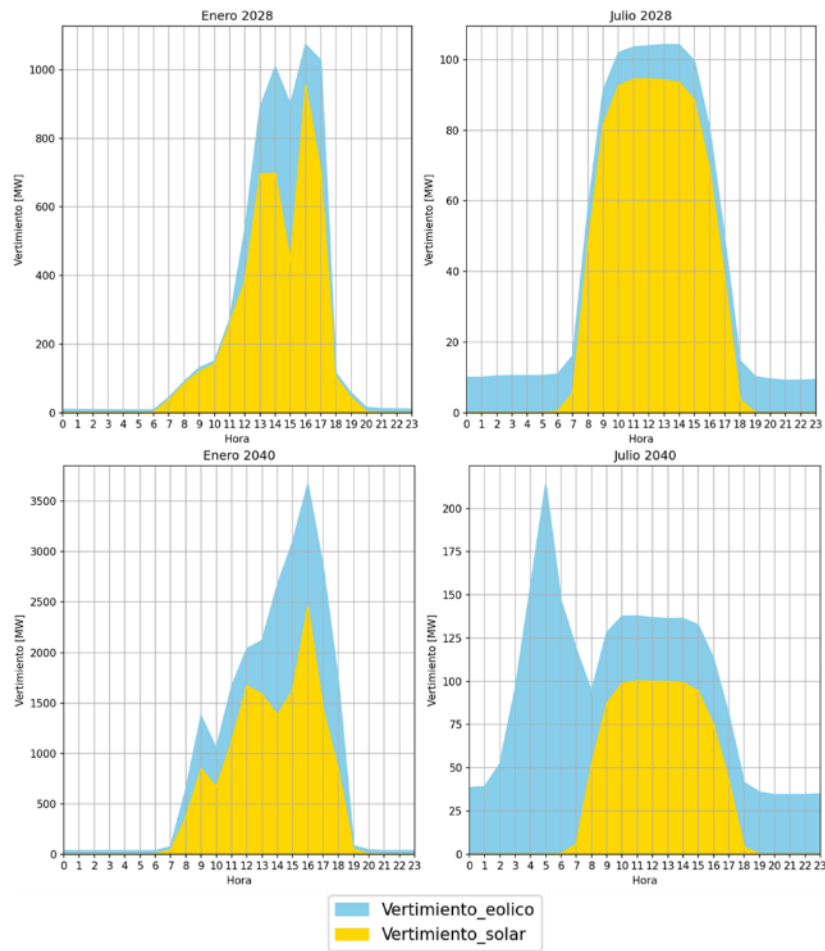


Figura 3-11: Vertimiento de generación eólica y solar para días representativos de enero y julio en 2028 y 2040, escenario BAU.

Fuente: Elaboración Propia.

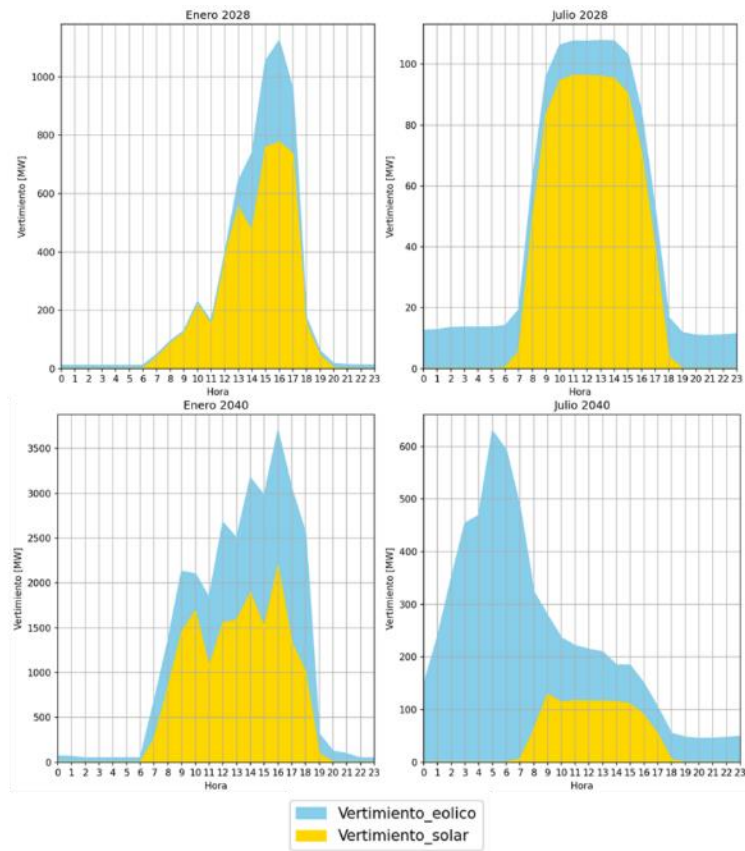


Figura 3-12: Vertimiento de generación eólica y solar para días representativos de enero y julio en 2028 y 2040, escenario T. Acelerada.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3-3: Resumen de la energía vertida en los escenarios BAU y T. Acelerada durante los 12 días representativos de 2040.

Escenario	Vertimiento Solar [MWh]	Vertimiento Eólico [MWh]	Vertimiento total [MWh]	Porcentaje de energía vertida
BAU	51.089	27.427	78.516	3,14%
T. Acelerada	54.830	47.276	102.106	3,20%

Fuente: Elaboración Propia.

Evolución de la Inversión en Capacidad de Transmisión

En las Figura 3-13 y Figura 3-14 se resume la evolución de la capacidad instalada de transmisión durante el 2028 y 2040 para ambos escenarios. En este caso, se observa que principalmente existe un requerimiento de transmisión en las líneas entre los nodos de la zona centro sur del país, particularmente en las líneas que conectan Alto Jahuel, Ancoa, Nueva Charrúa y Mulchén, así como también en

las zonas cercanas a Parinas en el centro norte, cuyo aumento se ve aumentado también en las líneas cercanas en el escenario de Transición Acelerada.

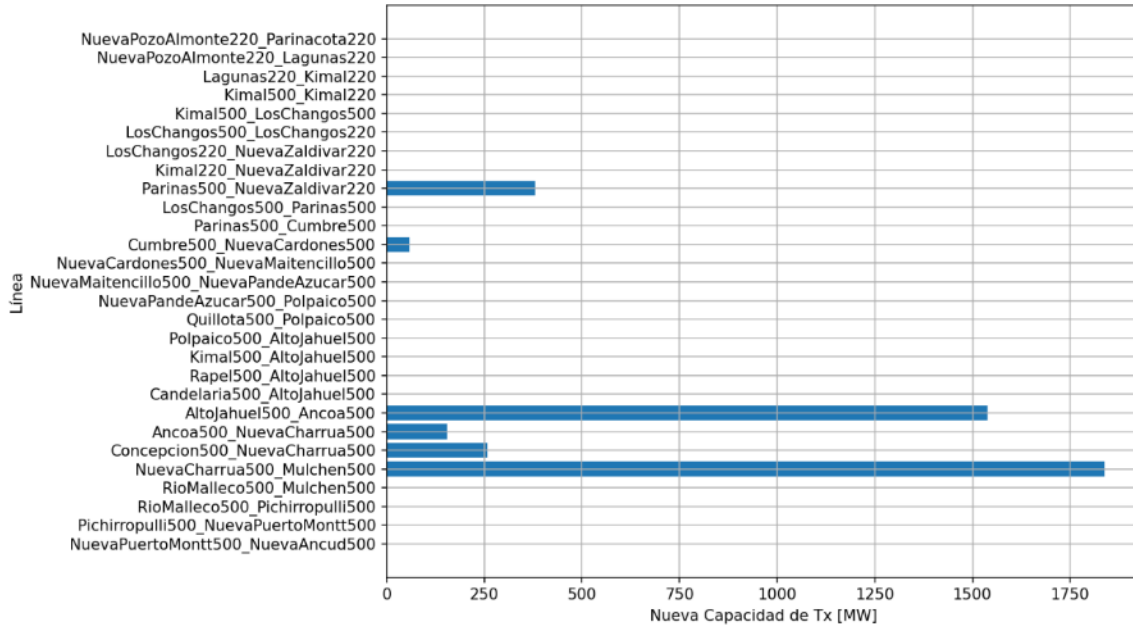


Figura 3-13: Evolución de la capacidad de Transmisión, BAU.
Fuente: Elaboración Propia.

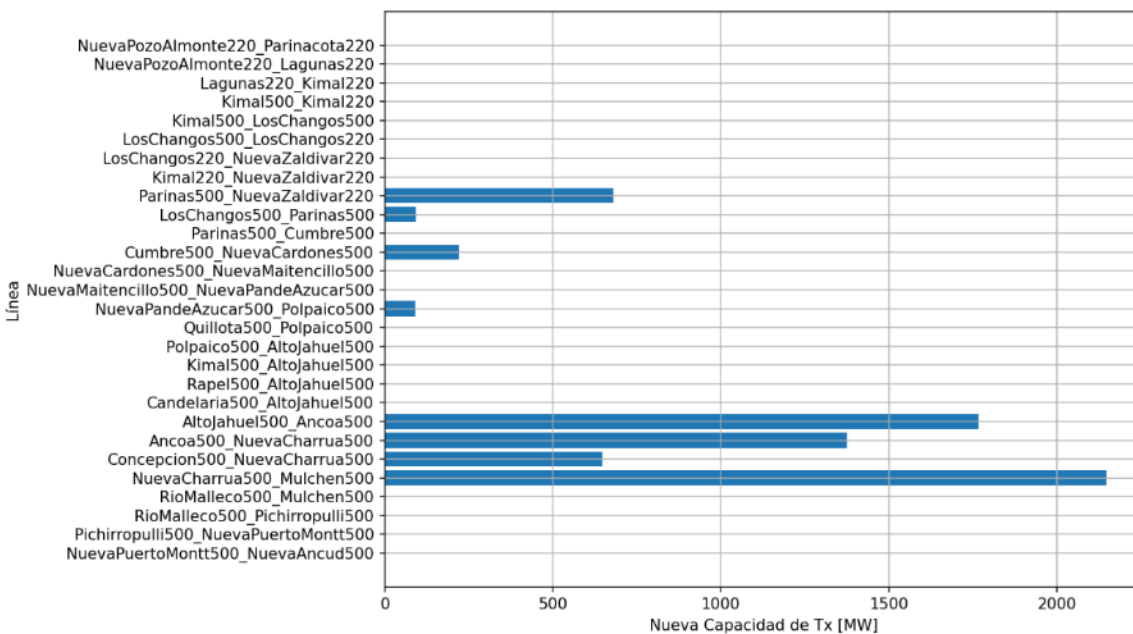


Figura 3-14: Evolución de la capacidad de Transmisión, Transición Acelerada.
Fuente: Elaboración Propia.

Reemplazo de la Transmisión con capacidad de Generación

Para concluir este subcapítulo, se elabora sobre cómo la inversión en infraestructura energética podría reemplazar la inversión en transmisión. Para esto, se generan dos sensibilidades (una para BAU y otra para el de Transición Acelerada) en las que solo se permite la inversión en generación y almacenamiento con las que se puede comparar a nivel general y local el impacto que puede invertir en transmisión a nivel de costos y por capacidad de generación.

A nivel de transición general, el impacto de no expandir la transmisión actual se traduce en un aumento de los costos totales, dado que se reemplaza la energía transportada por la capacidad extra de transmisión a una configuración distinta de los proyectos de generación y almacenamiento en cada nodo. En la Tabla 44 se presenta un resumen de los costos totales resultantes de las simulaciones, y las diferencias netas de inversión en transmisión (Tx), generación (Gx) y almacenamiento. En las Figura 3-15 y Figura 3-16 se presenta el cambio de inversión en capacidad de infraestructura energética por tecnología a nivel de nodos para los escenarios BAU y Transición Acelerada, respectivamente. En primer lugar, se observa que para el caso BAU la infraestructura necesaria para suplir la falta de transmisión extra disminuye a nivel neto, redistribuyendo la inversión en otros nodos, particularmente en la zona sur, donde la inversión en la tecnología eólica disminuye al no poder ser transportada a las zonas de mayor consumo.

Tabla 3-4: Cambios en los Costos Totales e inversión en Generación, Almacenamiento y Transmisión.

Escenario	Cambio en Costos Totales [mill. USD]	Cambio en Tx [MW]	Cambio en Gx [MW]
BAU	445.38 (+2.71%)	4,228.48	-300.39
T. Acelerada	594.88 (+4.34%)	7,016.09	1,942.59

Fuente: Elaboración Propia.

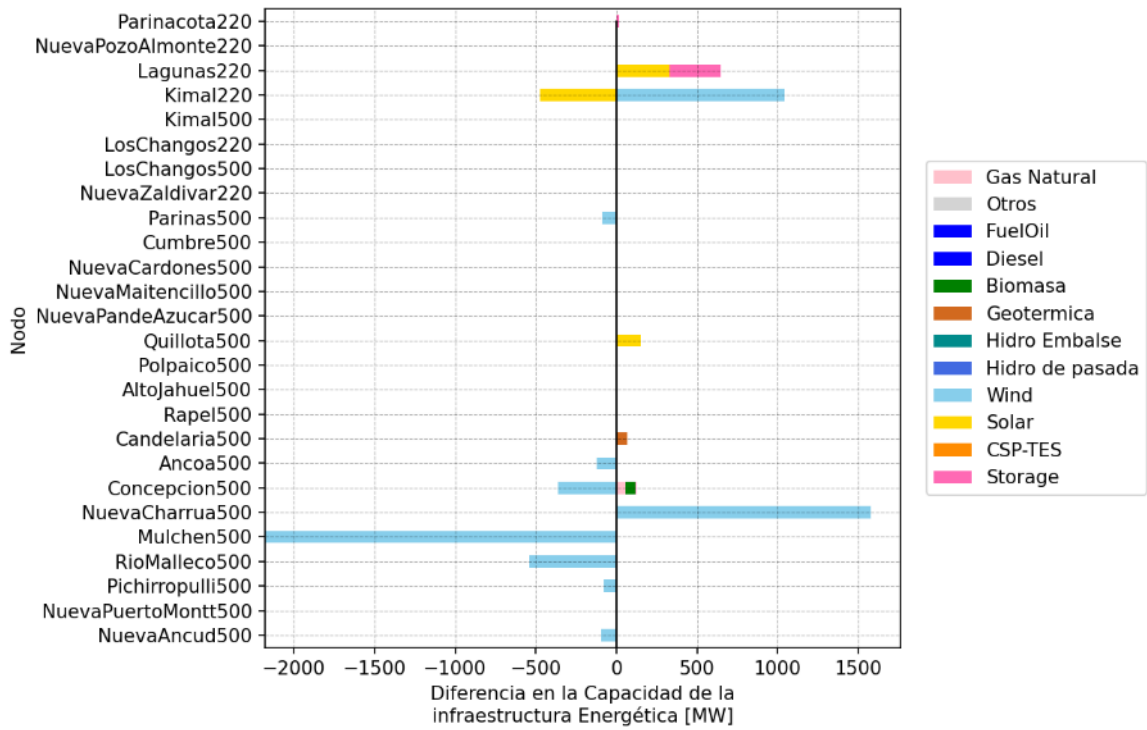


Figura 3-15: Cambio en la infraestructura energética cuando no se consideran expansiones de transmisión, BAU.

Fuente: Elaboración Propia.

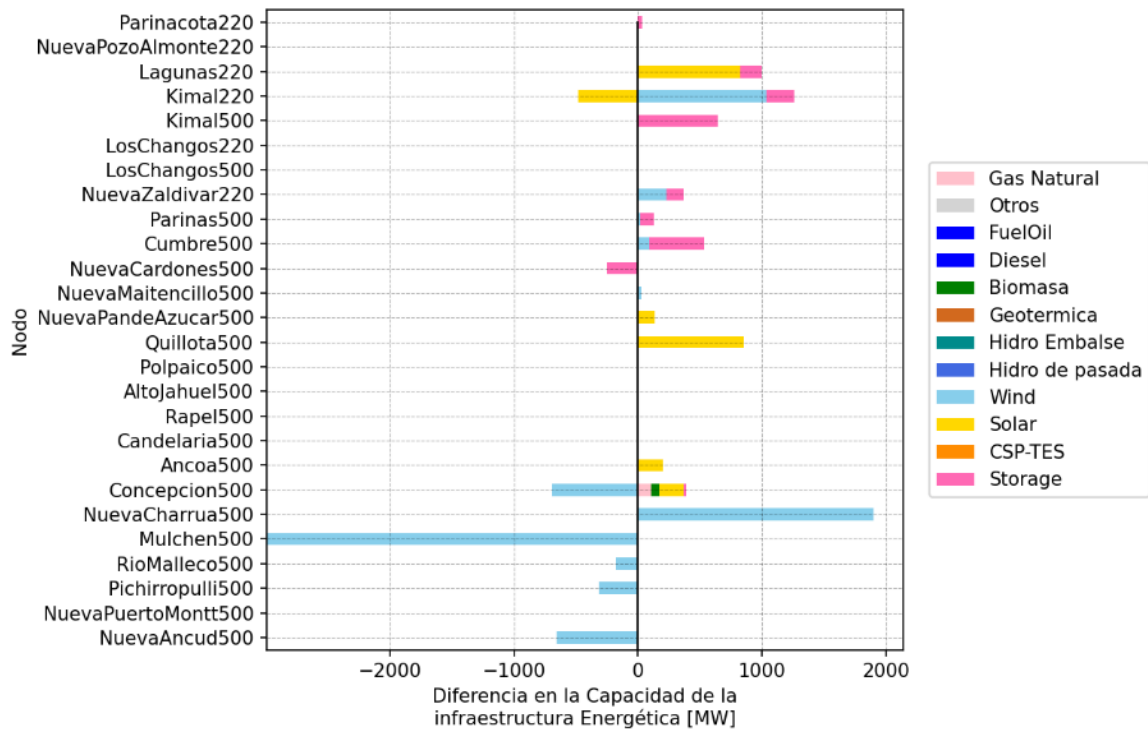


Figura 3-16: Cambio en la capacidad de generación cuando no se consideran expansiones de transmisión, Transición Acelerada.

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.2 Cuantificación del Impacto en Infraestructura de Transmisión

En este apartado, se presenta una comparación más exhaustiva de los resultados asociados a la transmisión para los dos principales escenarios, incluyendo además las sensibilidades mencionadas en la metodología, con el fin de cuantificar e identificar el impacto de los riesgos y su materialización en cambios en las inversiones de transmisión.

Inversión acumulada en Capacidad de Transmisión

Como primera instancia comparativa se presentan en la Figura 3-17 los resultados respecto a la capacidad total de transmisión instalada al 2040 en cada una de las sensibilidades en comparación a la inicialmente disponible en 2028. Además, en la Tabla 3-5 se presenta un resumen del aumento en cada escenario junto al cambio porcentual. A grandes rasgos se observa que el desarrollo de la transmisión independiente del escenario (con excepción de los sin posibilidad de expansión) es relevante para una eficiente transición del sistema eléctrico, viéndose potenciado particularmente en escenarios donde un mayor

requerimiento energético es previsto, ya sea por una mayor electrificación del consumo o una transición acelerada del sistema a nivel general materializada, además de un mayor crecimiento en la energía demandada, de una mayor penetración de tecnologías renovables y almacenamiento producto de la disminución en los costos de inversión.

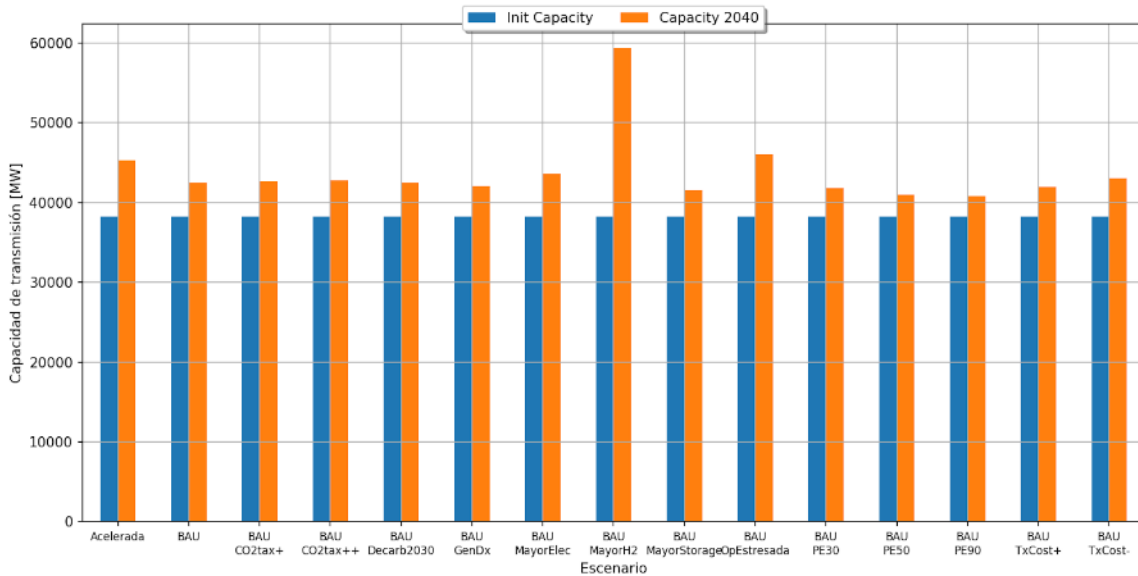


Figura 3-17: Cambio en la capacidad de transmisión para las distintas sensibilidades.
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3-5: Aumento en la capacidad total de Transmisión en los distintos escenarios.

Escenario	Capacidad Inicial	Capacidad Total (2040)	Cambio Porcentual
BAU	38.262	42.490,48	+11,05%
T.Acelerada	38.262	45.278,09	+18,33%
BAU - Carbon Tax+	38.262	42.646,01	+11,45%
BAU - Carbon Tax++	38.262	42.766,38	+11,77%
BAU - Descarbonización 2030	38.262	42.473,76	+11,01%
BAU - GenDx	38.262	42.047,40	+9,89%
BAU - Mayor Electrificación	38.262	43.608,27	+13,97%
BAU - Mayor H2	38.262	59.390,85	+55,22%
BAU - Mayor Almacenamiento	38.262	41.562,92	+8,63%
BAU - Op. Estresada	38.262	46.004,16	+20,23%

Escenario	Capacidad Inicial	Capacidad Total (2040)	Cambio Porcentual
BAU - PE30	38.262	41.817,09	+9,29%
BAU - PE50	38.262	40.982,3	+7,11%
BAU - PE90	38.262	40.804,8	+6,65%
BAU - Mayor Costo Tx	38.262	41.925,01	+9,57%
BAU - Menor Costo Tx	38.262	43.060,07	+12,54%

Fuente: Elaboración Propia.

Es también relevante e interesante enfatizar en el impacto en expansión de transmisión que se observa en los escenarios con mayor almacenamiento y de mayor generación distribuida, donde la inversión en transmisión se ve mermada en cierto porcentaje dado que estas tecnologías permitirían suplir la energía necesaria en los nodos con la energía almacenada (caso con mayor almacenamiento) o disminuyendo el requerimiento energético en cada nodo producto de la disminución en la demanda neta suplida por la generación local. Ahora bien, respecto a este punto, se asume que la generación distribuida no contribuye con energía a nivel de transmisión, por lo que no usaría su capacidad, pero también se identifica que las relaciones entre los recursos en distribución y transmisión pueden manifestarse positiva o negativamente. Finalmente, se observa que al prever un escenario con una operación más estresada del sistema de transmisión la inversión de esta incrementa bastante más, debido al efecto que la disponibilidad de capacidad de transmisión está más restringida.

Para cerrar el subcapítulo, se muestra la evolución de la inversión en el horizonte de tiempo para cada escenario, para elaborar gráficamente sobre el evidente requerimiento de inversiones en nueva capacidad de transmisión y cómo este también puede crecer a una mayor o menor tasa dependiendo del escenario probable. En la Figura 3-18, se muestra el conjunto de trayectorias que los diversos escenarios simulados siguen (paleta de colores de tonalidad azul) junto con la trayectoria promedio de todas ellas (línea segmentada color naranja). La capacidad inicial se presenta con las barras azules y el incremento promedio en naranja. El área que se observa representa el espacio donde la mayoría de los escenarios están contenidos, a excepción del de mayor penetración de Hidrógeno verde. En particular, se observa que el incremento promedio es de un 14,45%, equivalente a una capacidad extra de 5528,51 MW en 2040. La evolución de esta capacidad en general no se desvía mucho de este promedio, mostrando

que el 66,67% (dos tercios) de los escenarios simulados se encuentran dentro del 5% de variación frente al promedio y prácticamente la totalidad de ellos dentro de un 10% (99%). Solamente el escenario de Mayor H2 se encuentra fuera de este rango, teniendo una variación del 35,62%, considerándose así como un *outlier* dentro de ellos. Sin embargo, este escenario es muy relevante para ilustrar el efecto que la importante participación de la producción de hidrógeno puede tener tanto a nivel de requerimiento de transmisión, como se muestra acá, como en generación y almacenamiento.

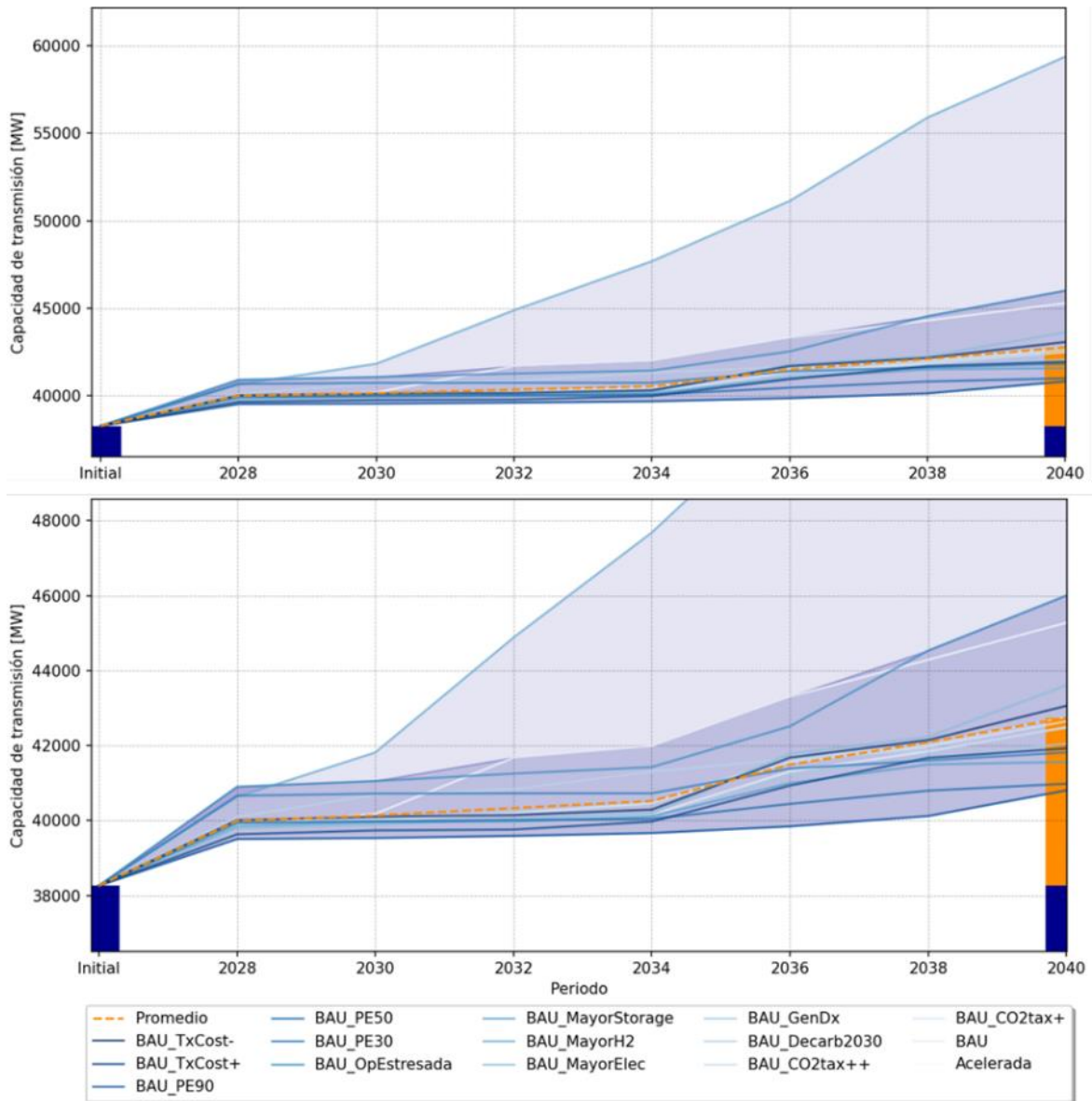


Figura 3-18: Trayectorias de la expansión de capacidad en transmisión para los distintos escenarios.

Fuente: Elaboración Propia.

Vertimiento de energía solar y eólica

Considerando la capacidad extra de transmisión que se construye en los distintos escenarios, en la Tabla 3-6 se presenta el vertimiento de energía en cada uno de ellos, con el fin de considerar cómo el vertimiento se ve afectado por una mayor presencia de transmisión o almacenamiento.

Tabla 3-6: Vertimiento de generación solar y eólica en los distintos escenarios.

Escenario	V. Solar	V. Eólico	V. Total	% del total	% respecto BAU
BAU	51.089	27.427	78.517	3,14%	-
T.Acelerada	54.830	47.277	102.107	3,20%	30,05%
BAU - Carbon Tax+	42.838	35.859	78.696	3,12%	0,23%
BAU - Carbon Tax++	45.440	33.388	78.827	3,11%	0,40%
BAU - Descarbonización 2030	49.879	27.734	77.613	3,11%	-1,15%
BAU - GenDx	42.549	41.332	83.881	3,52%	6,83%
BAU - Mayor Electrificación	46.222	35.068	81.290	3,02%	3,53%
BAU - Mayor H2	67.367	26.199	93.565	2,13%	19,17%
BAU - Mayor Almacenamiento	47.580	25.543	73.123	2,85%	-6,87%
BAU - Op. Estresada	50.451	26.760	77.211	3,08%	-1,66%
BAU - PE30	23.070	21.915	44.985	2,00%	-42,71%
BAU - PE50	17.158	5.156	22.314	1,30%	-71,58%
BAU - PE90	18.168	7.925	26.093	1,32%	-66,77%
BAU - Mayor Costo Tx	46.879	30.936	77.816	3,12%	-0,89%
BAU - Menor Costo Tx	43.840	28.979	72.819	2,90%	-7,26%

Fuente: Elaboración Propia.

Variabilidad e incremento neto de la inversión en capacidad a nivel de línea

Ahora, analizando en mayor detalle la inversión en cada una de las líneas utilizadas en los distintos escenarios, se estudia la sensibilidad que cada una de estas tiene frente a los distintos escenarios, con el objetivo de identificar la o las zonas más dependientes a la materialización de los distintos riesgos identificados en este estudio. En la Figura 3-19 se muestra como varía la capacidad total instalada en el año 2040 en cada una de las líneas a través del cálculo de la desviación estándar de los resultados y graficando su expresión a través del cambio de color. En esta se observa que la línea de la zona centro sur del país que une Ancoa con Nueva Charrúa es la más sensible al contexto del sistema, que inicialmente contaba con una capacidad de 3000 MW, seguidas de las líneas que conectan Alto Jahuel con Ancoa, y Nueva Charrúa con Mulchén. Como complemento, se presenta cómo cambia la capacidad total de transmisión para la línea con mayor desviación estándar observada (Ancoa500_NuevaCharrua500).

Las líneas del norte que también varían bastante son las que une Los Changos con Parinas y la que une los Changos con Nueva Zaldívar, sin embargo, esto ocurre en

pocos de los escenarios. En el caso de la primera línea, esta aumenta su capacidad considerablemente en el escenario de Mayor H2, pasando de una diferencia neta de prácticamente 0 a una de 1246 MW en este escenario. Esto se debe principalmente a que la producción del hidrógeno se prevé principalmente en la zona norte, en los nodos cercanos a la línea, por lo que, para poder trasladar la energía generada en la zona, esta línea debe expandirse casi el doble para poder asegurar el suministro de la demanda añadida asociada a este posible nuevo proceso.

Por otro lado, la línea ubicada entre los Changos y Nueva Zaldívar, que cuenta inicialmente con 525 MW, incrementa particularmente en los escenarios en los que se sensibiliza la disponibilidad hídrica junto con el precio del gas (PE50 y PE90) al doble aproximadamente, versus los restantes en los que no existe un incremento en su capacidad. Esto porque la generación a gas disponible en ese y otros nodos cercanos es más competitiva y, por ende, se vuelve más valioso reforzar la transmisión considerando la mayor disponibilidad del recurso térmico.

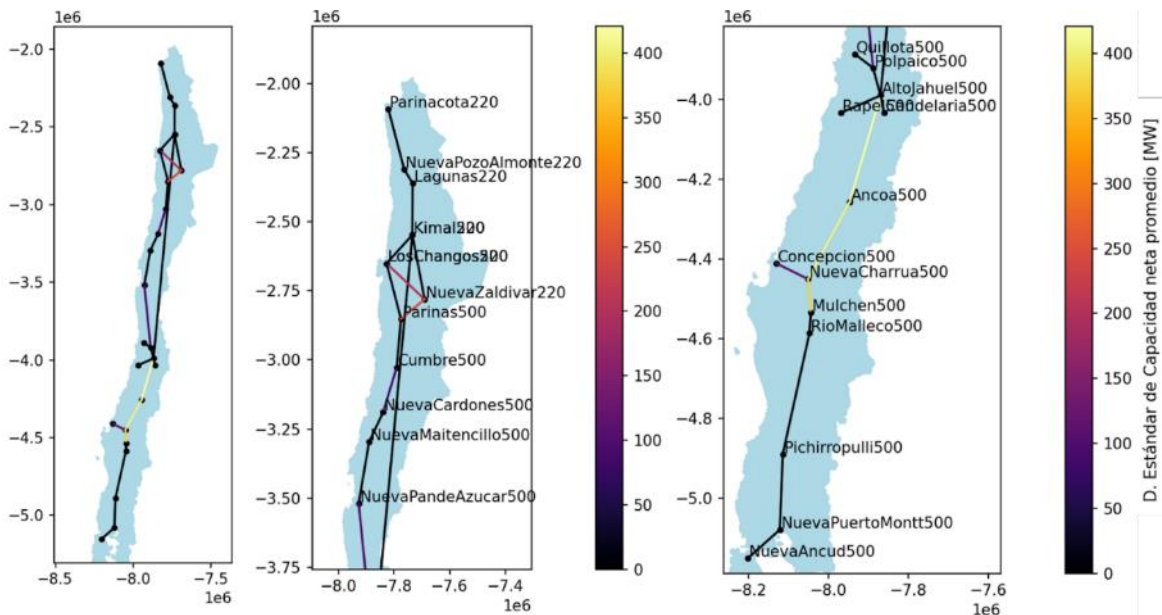


Figura 3-19: Desviación estándar para las líneas de transmisión definidas, en MW.

Fuente: Elaboración Propia.

Cabe destacar que en este análisis de la variación en la inversión en capacidad de las líneas no se consideró el escenario de Mayor integración de Hidrógeno, esto debido a que algunas líneas en el norte cambian mucho su capacidad debido al requerimiento de alimentar las plantas generadoras de hidrógeno on-grid cuya

demanda es muy alta solamente en este escenario, lo que opaca la sensibilidad que tienen las líneas del centro sur a la totalidad de los escenarios.

Si bien la línea entre Ancoa y Nueva Charrúa es la más sensible a los cambios de escenario, la capacidad inicial comparada con la construida en 2040 no es la que evidencia un mayor incremento neto. En la Figura 3-20 se muestra el mismo mapa elaborado, pero ahora cuantificando la variación promedio de la inversión neta en capacidad de cada una de las líneas, en donde se observa que el corredor con mayor requerimiento se encuentra también en la zona centro sur, particularmente entre las zonas Nueva Charrúa y Mulchén, con un incremento promedio de 1932 MW y también entre Alto Jahuel y Ancoa, con un incremento de 1617.9 MW. En la Figura 3-21 se muestra el incremento neto de capacidad para la línea NuevaCharrua500_Mulchen500.

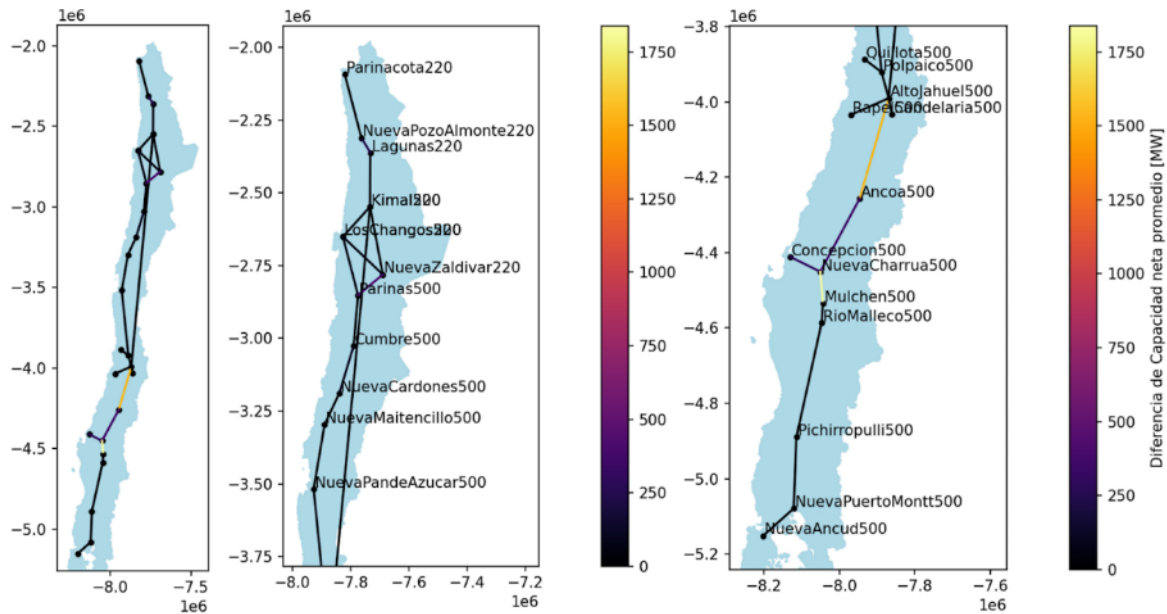


Figura 3-20: Promedio de la diferencia neta construida para las líneas de transmisión definidas, en MW.

Fuente: Elaboración Propia.

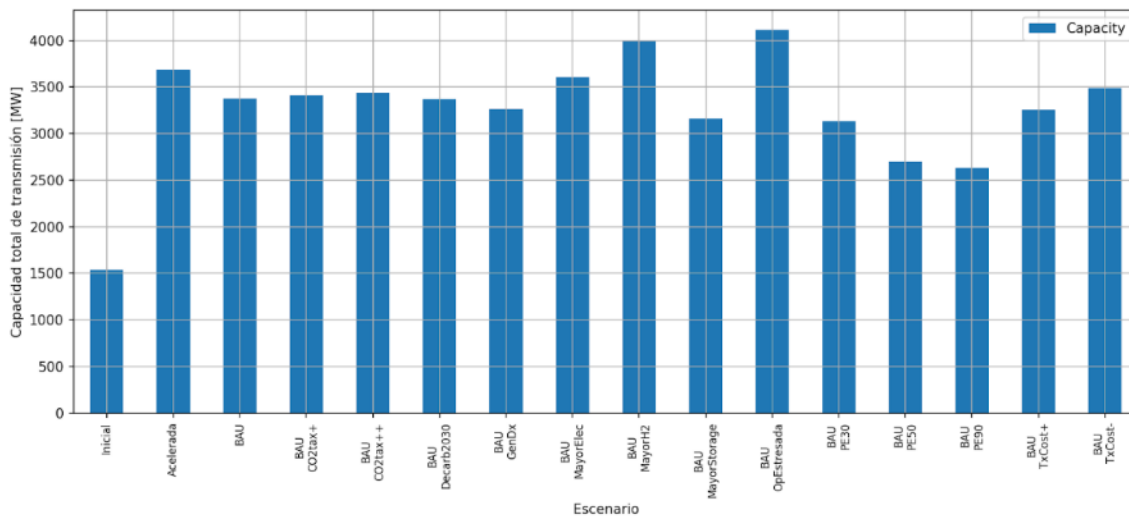


Figura 3-21: Cambio en la capacidad de transmisión para la línea NuevaCharrua500_Mulchen500.

Fuente: Elaboración Propia.

Una última idea importante de estos resultados es la importancia de la inversión en transmisión en las líneas del centro sur del país, donde los principales corredores del sur ven un incremento para transportar la energía necesaria a los puntos de consumo sin saturarse en los momentos de mayor demanda, conllevando un posible desacople de las zonas.

Uso de la capacidad de Transmisión

A continuación, se elabora sobre otro componente interesante a analizar, que es el uso que se le da a las líneas, definido como la energía transportada por cada una de ellas comparada con la energía que potencialmente podrían transportar. En las Figura 3-22 y Figura 3-23 se presenta un mapa de calor representando el uso promedio en horas de sol y en horas sin sol de cada una de las líneas en los distintos escenarios. En la Tabla 3-7 se resume este a través del promedio y su desviación estándar, con cada una de las líneas ordenadas de norte a sur.

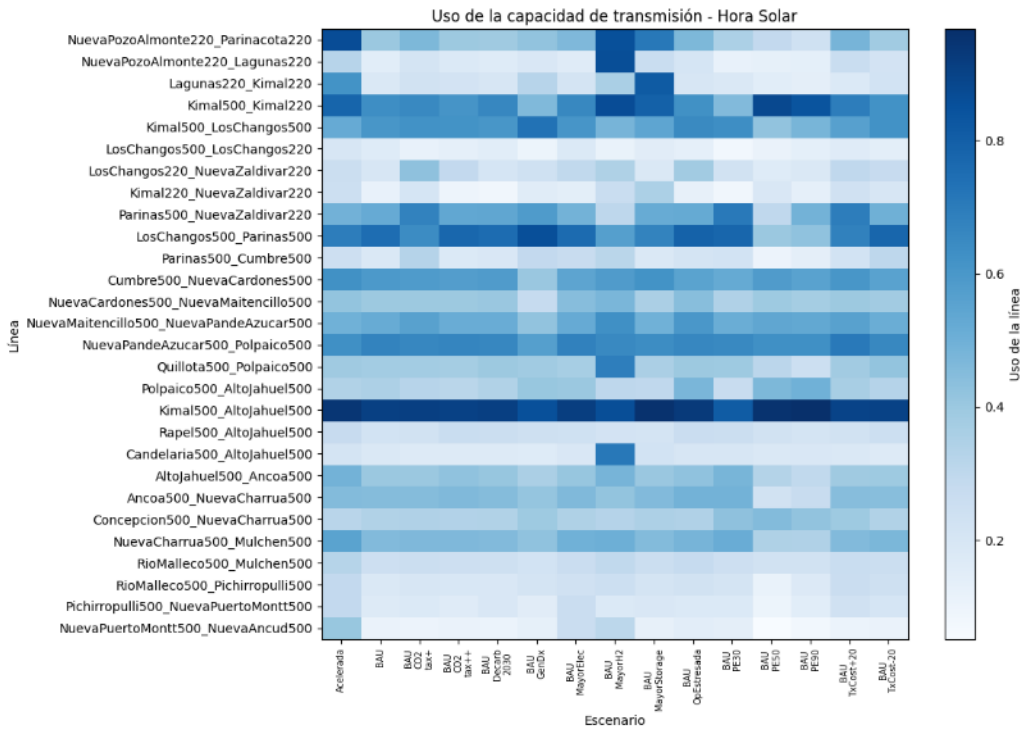


Figura 3-22: Uso promedio en horas de sol de la capacidad de transmisión de las líneas para los distintos escenarios.

Fuente: Elaboración Propia.

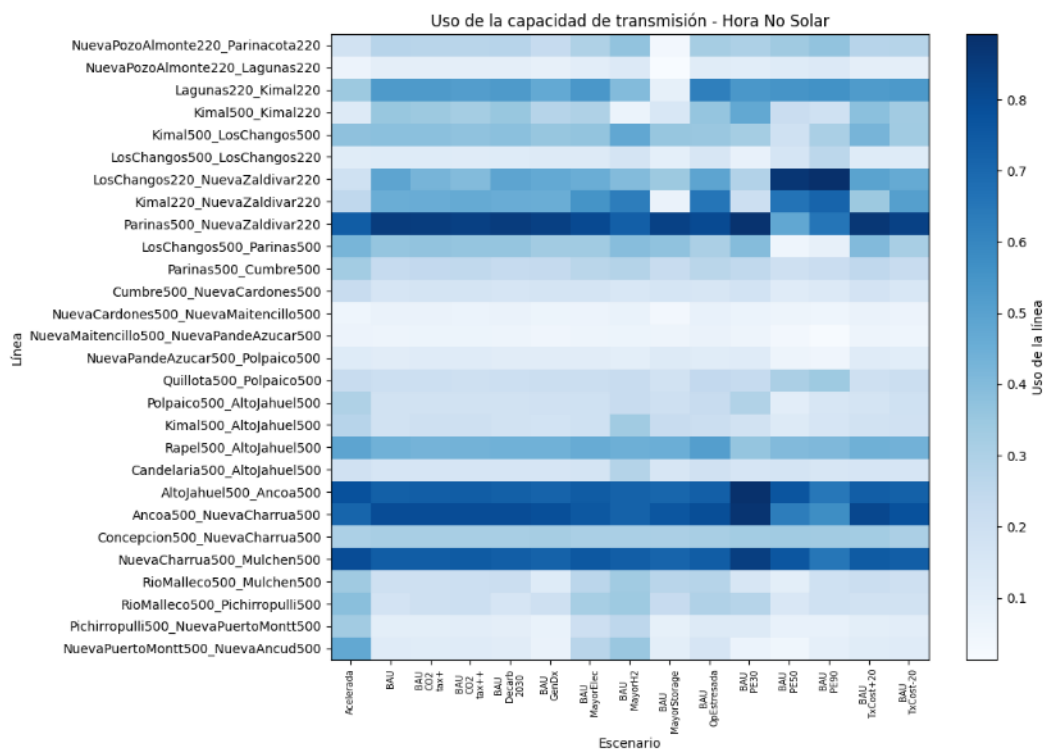


Figura 3-23: Uso promedio en horas sin sol de la capacidad de transmisión de las líneas para los distintos escenarios.
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3-7: Resumen del uso promedio diario de las líneas en el año 2040.

Línea	Uso promedio [%]	Desv. Est. Uso	Máximo	Mínimo
NuevaPozoAlmonte220_Parinacota220	37,00%	7,55%	59,97%	32,07%
NuevaPozoAlmonte220_Lagunas220	16,29%	8,40%	46,95%	11,47%
Lagunas220_Kimal220	41,05%	2,41%	47,62%	38,82%
Kimal500_Kimal220	47,62%	4,13%	53,81%	36,94%
Kimal500_LosChangos500	47,03%	5,31%	53,86%	30,64%
LosChangos500_LosChangos220	14,41%	2,64%	21,34%	8,48%
LosChangos220_NuevaZaldivar220	41,29%	9,74%	61,05%	23,05%
Kimal220_NuevaZaldivar220	35,07%	9,42%	48,54%	16,63%
Parinas500_NuevaZaldivar220	69,34%	10,31%	83,20%	41,18%
LosChangos500_Parinas500	49,33%	10,76%	57,53%	21,19%

Línea	Uso promedio [%]	Desv. Est. Uso	Máximo	Mínimo
Parinas500_Cumbre500	24,02%	3,97%	30,34%	16,04%
Cumbre500_NuevaCardones500	34,84%	2,70%	40,81%	27,72%
NuevaCardones500_NuevaMaitencillo500	21,98%	2,40%	26,37%	16,62%
NuevaMaitencillo500_NuevaPandeAzucar500	27,36%	2,31%	32,30%	22,31%
NuevaPandeAzucar500_Polpaico500	36,07%	2,09%	39,16%	31,82%
Quillota500_Polpaico500	30,98%	3,92%	44,63%	26,82%
Polpaico500_AltoJahuel500	27,77%	2,89%	34,15%	24,39%
Kimal500_AltoJahuel500	53,27%	2,93%	58,74%	47,72%
Rapel500_AltoJahuel500	37,02%	2,45%	42,48%	33,08%
Candelaria500_AltoJahuel500	20,18%	7,74%	48,83%	16,88%
AltoJahuel500_Ancoa500	62,52%	4,47%	73,93%	52,45%
Ancoa500_NuevaCharrua500	64,47%	7,26%	74,11%	46,68%
Concepcion500_NuevaCharrua500	35,25%	2,43%	40,48%	32,22%
NuevaCharrua500_Mulchen500	65,29%	4,19%	73,38%	54,91%
RioMalleco500_Mulchen500	24,25%	4,88%	34,34%	16,13%
RioMalleco500_Pichirropulli500	23,12%	5,53%	35,58%	13,52%
Pichirropulli500_NuevaPuertoMontt500	16,20%	5,77%	32,51%	9,16%
NuevaPuertoMontt500_NuevaAncud500	16,00%	10,88%	46,42%	5,07%

Fuente: Elaboración Propia.

Es importante recalcar que el uso de las líneas de transmisión varía significativamente según el escenario observado. La materialización de riesgos impacta principalmente ciertas zonas o nodos, dependiendo del contexto de consumo y las tecnologías involucradas en estas áreas y sus alrededores. En los escenarios de Transición Acelerada y Mayor H2, se observa un mayor uso de la capacidad de transmisión a lo largo del día. Esto se debe a que estos escenarios incluyen una mayor cantidad de fenómenos y realizaciones de los parámetros principales del modelo de planificación, como precios de combustible, costos de inversión en tecnologías, y la electrificación de diversos sectores del consumo, abarcando un conjunto más amplio de riesgos materializados.

Durante el día, las líneas en las zonas norte y centro-norte son cruciales para transportar la energía solar a los puntos de consumo. Aunque las líneas en el sur también son utilizadas, su relevancia es menor en comparación. En particular, la línea Kimal - Lo Aguirre (Kimal500_AltoJahuel500 en el modelo) es extremadamente importante para transportar energía hacia la zona centro, siendo la más utilizada en casi todos los escenarios. Esto subraya su importancia en la transición energética y la integración de energía renovable en el norte.

Por otro lado, al analizar el uso promedio de las líneas durante las horas sin sol destaca la necesidad de transmisión en la zona centro-sur, utilizada para transportar el alto potencial de recurso eólico en esa región. Además, se observa una disminución del uso de las líneas que conectan el centro con el norte, debido a la ausencia del recurso solar en el norte.

Ahora, se analiza en detalle la cantidad y sentido de flujo de la energía en dos líneas que son de particular relevancia en el sistema a través de las Figura 3-24 y Figura 3-25, que muestran la potencia hora a hora enviada durante los doce días representativos utilizados para el año 2040 en las líneas Kimal500_AltoJahuel500 y Ancoa500_NuevaCharrua500. En los casos presentados, el flujo negativo en la línea significa que el flujo va en sentido contrario según lo definido en el nombre de la línea, es decir, para el caso la primera el flujo positivo va desde Kimal a Alto Jahuel y en cuando es negativo, desde Alto Jahuel a Kimal (lo mismo aplica para la segunda). Por la ubicación y naturaleza de los recursos presentes en las macrozonas del sistema, se confirma que la línea que conecta el norte con el centro es principalmente utilizada para transportar y aprovechar la generación solar disponible durante gran parte del año, con un pequeño porcentaje de flujo inverso en horas de la noche. En un escenario de mayor almacenamiento, el flujo negativo en las horas de la noche ya no ocurre porque las baterías suministran el requerimiento energético en el norte y el excedente se envía al centro.

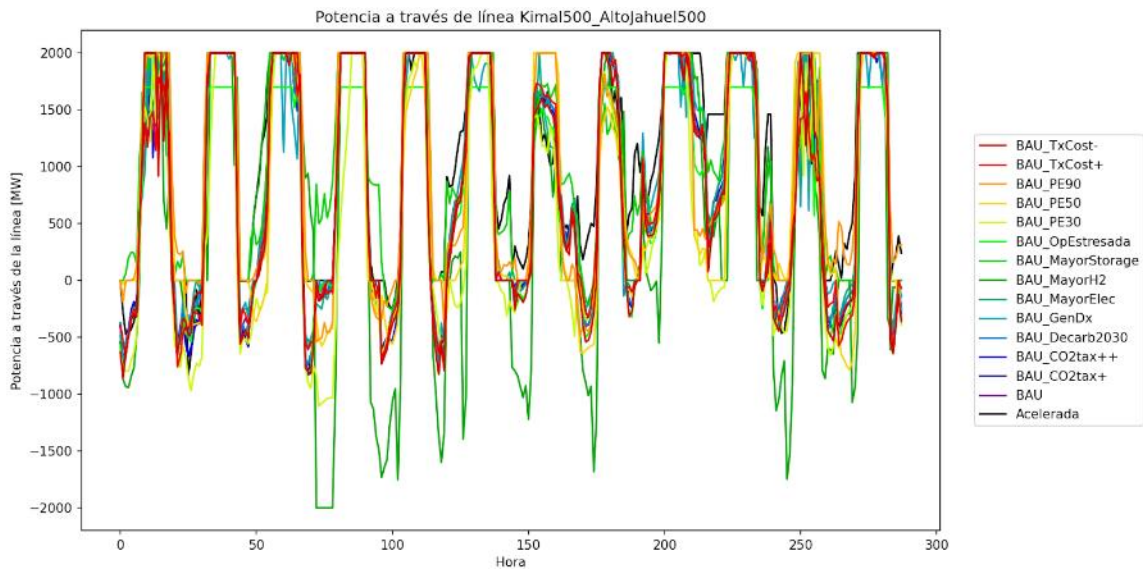


Figura 3-24: Flujo de energía a través de la línea Kimal500_AltoJahuel500 en 2040.
Fuente: Elaboración Propia.

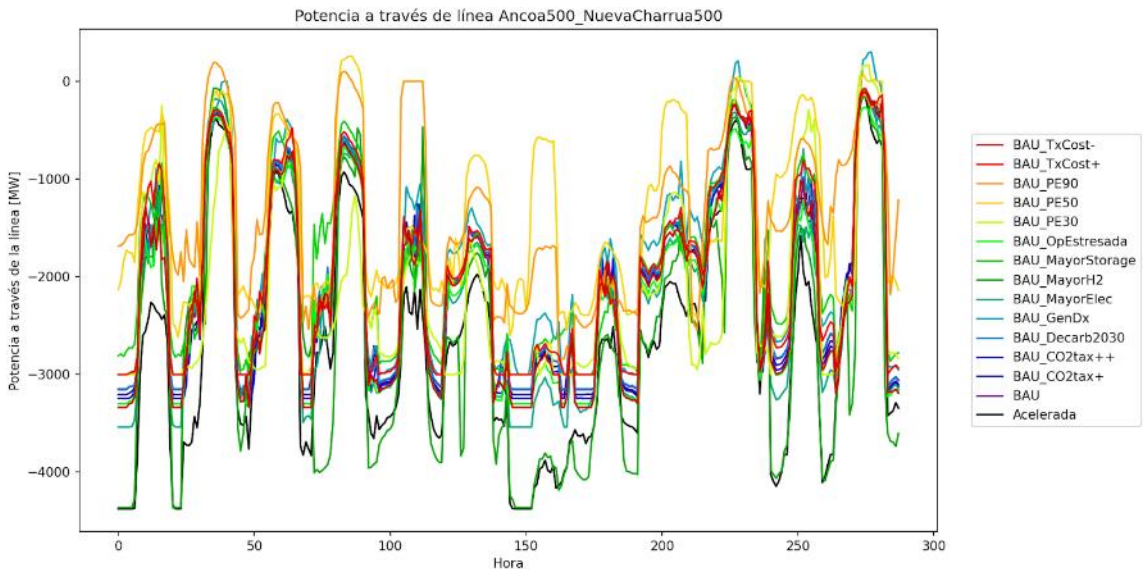


Figura 3-25: Flujo de energía a través de línea Ancoa500_NuevaCharrua500 en 2040.
Fuente: Elaboración Propia.

Por otro lado, para el caso de la línea que va desde Ancoa a Nueva Charrúa, se observa que esta es principalmente utilizada para enviar energía desde el nodo sur hacia el del norte supliendo y transportando energía en las horas en las que la disponibilidad solar no es suficiente, aumentando su uso aún más en los días representativos de invierno. Así, y con base en la evolución de la transmisión para las líneas del sur, se observa que el incremento de capacidad neta se debe principalmente al beneficio del recurso eólico en la operación eficiente del

sistema, complementando el aporte de la energía solar, demostrando la relevancia del desarrollo de la transmisión en los próximos años.

Un último comentario respecto al uso de la infraestructura de transmisión nace a partir de los escenarios con mayor almacenamiento, en donde se demuestra que la mayor capacidad de almacenamiento energético permite disminuir los requerimientos de energía importada a un nodo, permitiendo abastecer la demanda de forma local e incluso exportar los excedentes.

Comparación de los Costos Totales

En términos económicos, se presentan los costos totales obtenidos con las simulaciones para cada escenario elaborado y las correspondientes sensibilidades a través de la Figura 3-26, que expone gráficamente los componentes agregados forman los costos totales distribuyendo en subgrupos las sensibilidades para simplificar el análisis. Además, se elabora una Tabla (Tabla 3-8) resumen que detalla el valor del costo total, el cambio de este respecto al escenario BAU y además el cambio de los costos asociados a la transmisión.

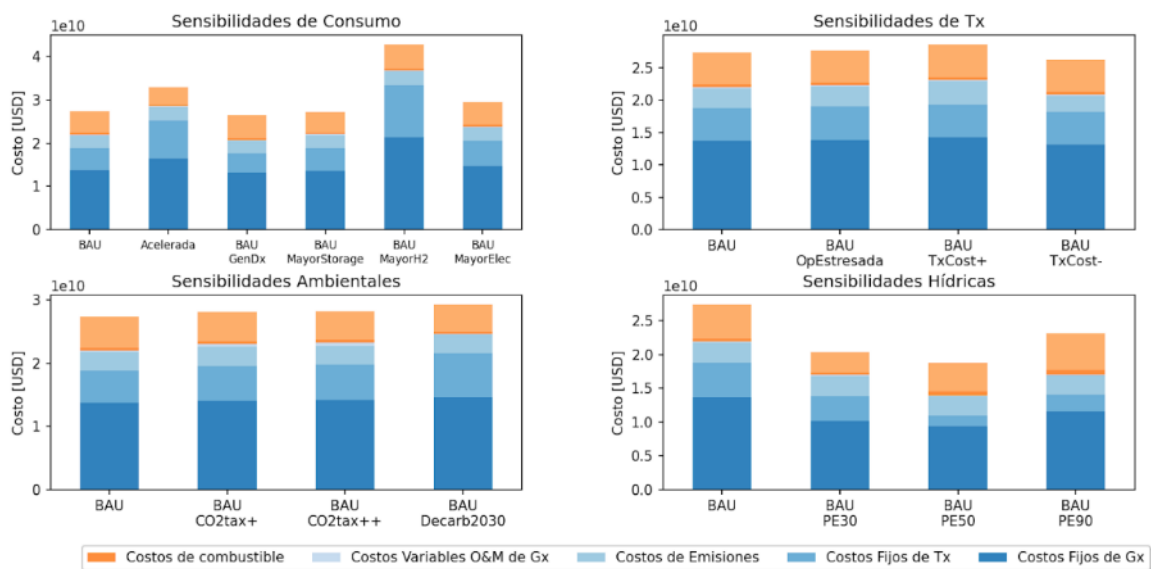


Figura 3-26: Flujo de energía a través de línea Ancoa500_NuevaCharrua500 en 2040.
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3-8: Resumen del costo total y de Tx para cada escenario.

Escenario	Costo total [miles mill. USD]	Cambio porcentual respecto a BAU	Costo asociado a Tx [miles mill. USD]	Cambio porcentual respecto a BAU
BAU	13.69	-	2.95	-
T.Acelerada	16.45	20.14%	3.05	3.32%
BAU - Carbon Tax+	14.06	2.69%	2.97	0.41%
BAU - Carbon Tax++	14.10	3.01%	2.97	0.51%
BAU - Descarbonización 2030	14.62	6.77%	2.99	1.20%
BAU - GenDx	13.18	-3.74%	2.94	-0.34%
BAU - Mayor Electrificación	14.72	7.54%	2.97	0.44%
BAU - Mayor H2	21.36	55.99%	3.20	8.44%
BAU - Moyer Almacenamiento	13.62	-0.49%	2.93	-0.68%
BAU - Op. Estresada	13.84	1.09%	3.07	4.07%
BAU - PE30	10.16	-25.77%	2.98	0.76%
BAU - PE50	9.39	-31.41%	2.91	-1.61%
BAU - PE90	11.56	-15.57%	2.88	-2.51%
BAU - Mayor Costo Tx	14.28	4.30%	3.52	19.21%
BAU - Menor Costo Tx	13.10	-4.33%	2.38	-19.50%

Fuente: Elaboración Propia.

A grandes rasgos, los costos varían en mayor o menor medida dependiendo del escenario que se observa, aumentando o disminuyendo en comparación al BAU, sin embargo no se observa un considerable cambio en los costos de transmisión a lo largo de los distintos escenarios, salvo por algunos en los cuales por ejemplo el parámetro sensibilizado era el costo de inversión de las líneas (BAU - Mayor y Menor Costo Tx), el caso de Mayor H2 en el que el requerimiento elevado de demanda implica una mayor necesidad de transmisión, generación y almacenamiento y, finalmente, el caso de una Operación Estresada, en donde por mantener la seguridad del sistema de transmisión, se invierte en mayor capacidad al tener que mantener cierto porcentaje de reserva por eventualidades.

Por otro lado, así como el escenario de Mayor H2 es notoriamente más costoso, los escenarios en donde se prevé un menor costo del gas junto con hidrologías más secas (PE90) y medias (PE50) resultan en escenarios considerablemente menos costosos, principalmente dada la importante disminución que hay en el costo del combustible, lo que aumenta su uso a lo largo de la ventana de optimización a un considerable menor costo tanto directamente de combustible como de emisiones.

Finalmente, un caso interesante a resaltar es el fenómeno que ocurre cuando se observa el escenario de mayor almacenamiento, en el que se observó un incremento en la inversión en capacidad de transmisión de un 2,42% menor que el del BAU y sin embargo en términos de costos solo un 0,49% menor en los costos totales y un 0,68% menos en el componente de transmisión.

Evolución de las Emisiones de carbono

A continuación, se elabora brevemente sobre el impacto que los distintos escenarios tienen sobre las emisiones de carbono para ilustrar cómo la materialización de los distintos riesgos identificados impacta en este ámbito, dado que es un componente muy relevante cuando se evalúa la transición eficiente del sistema en los diversos planes en el gobierno y la industria. En la Figura 3-27 se describe la evolución de las emisiones en el sistema a lo largo del horizonte de tiempo para los distintos escenarios simulados, destacándose el escenario de BAU y Transición Acelerada.

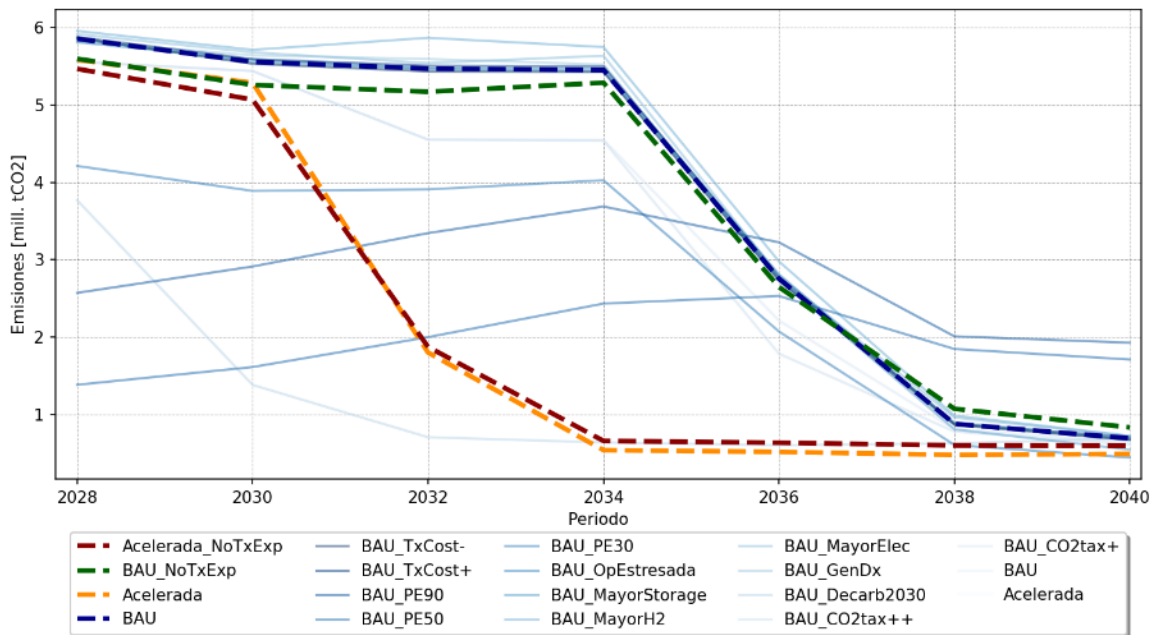


Figura 3-27: Flujo de energía a través de línea Ancoa500_NuevaCharrua500 en 2040.

Fuente: Elaboración Propia.

En particular, una mayor disponibilidad hídrica, menores costos de inversión para las centrales eólicas y una salida acelerada de las centrales térmicas a carbón permiten tener menores emisiones durante los primeros años del horizonte. Sin embargo, los menores costos del gas hacen que el uso de la tecnología perdure a lo largo del horizonte, implicando que las emisiones se mantengan hacia el 2040.

Finalmente se resalta el impacto que tiene la expansión de la transmisión en la disminución de las emisiones del sistema. En particular se observa que para el caso BAU cuando se expande la transmisión en conjunto con la generación y almacenamiento se genera un 16.97% menos de emisiones que lo que se hubiese emitido sin expandir en 2040, mientras que en el caso de una Transición Acelerada se genera un 21.85%. Cabe mencionar que, si bien al 2040 se emiten menos emisiones de carbono, el transiente a lo largo del horizonte de tiempo no se comporta de la misma manera, variando según el escenario en cuestión. Destacan por ejemplo los escenarios de mayor disponibilidad hídrica, menores costos de inversión para centrales eólicas y una salida acelerada de las centrales térmicas a carbón, pues permiten obtener una disminución en las emisiones durante los primeros años del horizonte. Este efecto también se observa en escenarios con menores costos del gas, pero el uso de la tecnología perdura a lo

largo del horizonte, por lo que hacia el año 2040 presenta mayores emisiones que el resto de los escenarios.

3.3.3 Principales Conclusiones

A través de los resultados presentados, se observa la importancia y necesidad del desarrollo de la transmisión para una transición eficiente del sistema eléctrico. Lo anterior pues, independiente de las condiciones particulares definidas para cada escenario, la mejora y fortalecimiento de las capacidades de transmisión son aspectos cruciales para garantizar un funcionamiento óptimo y fiable del sistema eléctrico en su conjunto. De esta manera, la atención dedicada al desarrollo de la transmisión subraya su papel fundamental en la facilitación de una transición fluida hacia un sistema eléctrico más eficiente y sostenible.

En particular, el análisis detallado revela una fuerte interdependencia entre la expansión de la transmisión y las diversas variables que representan los riesgos de transición identificados para el sistema eléctrico. A pesar de lo anterior, se observa un orden de magnitud similar en la mayoría de los casos, destacando la importancia de la infraestructura de transmisión en la planificación y adaptación del sistema.

La urgencia en las soluciones de expansión de la transmisión varía según el escenario analizado, siendo especialmente apremiante en situaciones como la Descarbonización al 2030 y con una hidrología PE30, donde se registra un significativo incremento de transmisión al inicio del horizonte, pese a que al final del horizonte temporal no exhiban la mayor capacidad añadida. Este hallazgo subraya la necesidad de una evaluación dinámica y adaptativa de las inversiones en transmisión para abordar los desafíos específicos de cada escenario.

Por otro lado, la falta de infraestructura de transmisión en la zona centro-sur del país se destaca como un punto crítico. En todos los escenarios analizados se evidencia la necesidad de reforzar esta región, con algunas líneas experimentando una expansión significativa en comparación con otros escenarios. Este fortalecimiento en la capacidad de transmisión en la zona centro-sur no solo facilita una mayor inversión en generación eólica más económica, sino que también posibilita el transporte eficiente de esta energía hacia áreas de mayor demanda. Además, se observa una sinergia beneficiosa con la energía generada por centrales hidroeléctricas en escenarios más húmedos. En conjunto, estos resultados destacan la importancia estratégica de desarrollar la

infraestructura de transmisión para mejorar la resiliencia y eficiencia del sistema eléctrico en diferentes escenarios futuros. A su vez, se observa que la presencia destacada de almacenamiento o generación distribuida en ciertos escenarios disminuye la necesidad de capacidad de transmisión, al igual que ocurre en contextos con una mayor disponibilidad hídrica y una participación significativa de la generación a gas.

La dependencia de ciertas líneas de transmisión a la materialización efectiva de los riesgos identificados se manifiesta claramente, volviéndolas más sensibles a la realización de los escenarios. En concreto, las líneas en la región norte muestran estabilidad ante la mayoría de los escenarios evaluados, manteniendo sus requerimientos de transmisión constantes entre diferentes situaciones. En contraste, algunas líneas en la zona centro-sur muestran una mayor sensibilidad a la mayoría de los escenarios, evidenciando un requerimiento particular en esta área que está muy vinculado al escenario evaluado. La cuantificación del incremento neto refleja la necesidad específica de adaptar la infraestructura de transmisión en la zona centro-sur de manera más dinámica y adaptable a las condiciones cambiantes.

En resumen, las necesidades de transmisión varían significativamente entre el norte y el sur debido a las características específicas de los recursos energéticos en cada zona. En el sur, el alto potencial eólico no ha sido acompañado por una expansión adecuada de la capacidad de transmisión, lo que resalta la necesidad de inversiones en esta área. Por otro lado, el norte ha visto un desarrollo continuo en infraestructura de transmisión para respaldar su gran potencial solar. Sin embargo, la introducción de almacenamiento de energía puede optimizar el uso de la capacidad existente, reduciendo la necesidad de nuevas líneas al permitir que la energía solar se almacene y se transporte en momentos de menor demanda. Estas dinámicas subrayan la importancia de una planificación flexible y adaptativa para gestionar la abundancia de energía solar y el eficiente aprovechamiento del recurso eólico, transformando las oportunidades de crecimiento en la transmisión para enfrentar los desafíos específicos de cada región.

Finalmente, cabe mencionar que los estudios de largo plazo suponen varios supuestos y enfoques abordables en distinto nivel de detalle dependiendo del enfoque que se tome. En este caso, no se evalúa una línea particular en detalle con un enfoque multivalor, sino que se analiza la evolución de la capacidad de transmisión. Así se presentan e identifican zonas donde existe un incremento

considerable en la infraestructura necesaria, que puede luego analizarse en detalle y a nivel local, a través de un estudio posterior con un enfoque más operacional que considere la infraestructura cercana a la línea evaluada de manera más desagregada, mediante modelos de operación que capturen las dinámicas y restricciones con mayor resolución a las que se puede lograr con el uso de un modelo de planificación. Así, el enfoque del estudio está en identificar los requerimientos de transmisión a nivel sistémico, para analizar posibles sinergias entre líneas y expansiones de estas, de manera tal de producir el mayor beneficio para los costos del sistema.

Actualmente, en el enfoque de planificación de transmisión, se aborda la incertidumbre a largo plazo mediante una heurística basada en soluciones deterministas para cada escenario futuro, permitiendo identificar inversiones recurrentes en distintos escenarios, sin embargo es necesario recalcar que podrían existir diferencias cuando se compara con resultados obtenidos de la gestión explícita de la incertidumbre mediante modelos probabilísticos y robustos, los que podrían encontrar un equilibrio óptimo entre costos y riesgos, particularmente en términos de posible subinstalación o sobreinstalación de infraestructura. En particular, la literatura respalda la importancia de apuntar a una sobreinstalación de infraestructura desde una perspectiva de riesgo, aún con costos menores de congestiones, en comparación con el riesgo de quedar subinstalado, lo que resultaría en mayores costos operativos del sistema eléctrico (SPEC, 2023). Sin embargo, lograr la representatividad adecuada del sistema eléctrico junto con considerar incertidumbre conlleva importantes requerimientos computacionales para su implementación.

4 CONCLUSIONES

En el presente estudio se han analizado las amenazas y riesgos sobre los tramos de la Línea de Trasmisión Eléctrica de INTERCHILE. El primer trazado, Encuentro-Lagunas, posee una extensión de casi 193 kilómetros, mientras que Cardones-Polpaico, el segundo trazado, una extensión total de 765 km.

Las principales conclusiones para cada uno de los análisis realizados se pueden mencionar como:

- Los riesgos sobre la infraestructura de trasmisión son más locales en el caso de aluviones, para el cual el mayor riesgo se concentra en la macrozona norte y parte de la macrozona Centro Norte 1, lo que también ocurre en el riesgo vinculado a olas de calor. En el caso del riesgo de incendios, por efectos del material combustible y la cercanía a centros urbanos, la macrozona Centro y la parte sur de la macrozona Centro Norte 1 presenta el mayor riesgo.
- En cuanto los riesgos vinculados a comunidades existen resultados que soportan la hipótesis de cambios severos en la disponibilidad y oferta hídrica, los cuales deben ser abordados a nivel de políticas públicas.
- Para el análisis de déficit hídrico, se concluye que esta deficiencia esperable en la cantidad de agua disponible respecto de lo demandado por la atmosfera se haga más severa en los polígonos de las regiones de Atacama, Coquimbo y Valparaíso, con una pequeña excepción (que, aunque positiva pequeña en magnitud) en los polígonos de la parte sur de la región de Coquimbo.
- En cuanto a riesgos de transición, se observa que la zona centro sur tiene un particular requerimiento de expansión para enviar a las zonas de mayor consumo la energía generada principalmente por la tecnología eólica.

5 REFERENCIAS

- Abraira, V. (2001). El índice kappa. *Medicina de Familia. SEMERGEN*, 27(5), 247-249. [https://doi.org/10.1016/S1138-3593\(01\)73955-X](https://doi.org/10.1016/S1138-3593(01)73955-X)
- AEMO. (2022). 2022 Integrated System Plan For the National Electricity Market. <https://aemo.com.au/-/media/files/major-publications/isp/2022/2022-documents/2022-integrated-system-plan-isp.pdf?la=en>.
- Agencia de Sostenibilidad Energética. (2023). Electromovilidad en Chile. https://lookerstudio.google.com/reporting/4a522b4d-2073-49ea-87209fdae7904eb6/page/p_jhyxfyrmsc?s=gtdAP8-UmOc.
- Aghahosseini, A., Bogdanov, D., Barbosa, L. S. N. S., & Breyer, C. (2019). Analysing the feasibility of powering the Americas with renewable energy and inter-regional grid interconnections by 2030. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 187–205. doi:10.1016/j.rser.2019.01.046.
- Akaike H (1974) A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans Autom Control* 19:716–722
- Aleotti, P. (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*, 73(3-4), 247-265. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.007>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje No. 56. Roma: FAO, 298 pp. ISBN 92-5-304219-2.
- Americans for a Clean Energy Grid. (2014). High Voltage Direct Current Transmission. <https://cleanenergygrid.org/wp-content/uploads/2014/08/High-Voltage-Direct-Current-Transmission.pdf>.
- Amulén, Centro de Cambio Global UC y Centro UC Derecho y Gestión de Aguas (Amulén, CCG-UC y CDGA-UC). (2019). Pobres de Agua. Recuperado de: <https://drive.google.com/file/d/1Bv6BoTX2xrFbp8meGFPjjigIStPPPZ-a/view>
- Arana, M. T., Casagrande, A., Cavieres, A., Espejo, S., Gilabert, H., León, J., & Robert, A. (2018). Prevención de incendios forestales: Propuestas para una mirada más efectiva e integral. Centro de Políticas Públicas UC. <https://repositorio.uc.cl/xmlui/bitstream/handle/11534/45740/N-1110%20Prevenci%20de%20incendios%20forestales.%20%20Propuestas%20para%20una%20mirada%20m%20b%20s%20efectiva%20e%20integral.pdf?sequence=1>

- Asociación Nacional Automotriz de Chile (ANAC). (2023). Ventas acumuladas de vehículos de cero y bajas emisiones. <https://www.anac.cl/wp-content/uploads/2023/07/06-ANAC-Informe-vehiculos-cero-y-bajas-emisiones-Junio-2023.pdf>.
- Barbosa L., Bogdanov D., Vainikka P., Breyer C. (2017). Hydro, wind and solar power as a base for a 100% renewable energy supply for South and Central America. *PLoS ONE* 12(3): e0173820. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173820>.
- Barría, P., Chadwick, C., Ocampo-Melgar, A., Galleguillos, M., Garreaud, R., Díaz-Vasconcellos, R., ... & Poblete-Caballero, D. (2021). Water management or megadrought: what caused the Chilean Aculeo Lake drying?. *Regional Environmental Change*, 21(1), 1-15.
- Beverly, J., McLoughlin, N., & Chapman, E. (2021). A simple metric of landscape fire exposure. *Landscape Ecology*, 36. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01173-8>
- Bjånes, A.; De La Fuente, R.; Mena, P. (2021). A deep learning ensemble model for wildfire susceptibility mapping. *Ecological Informatics* 65 (2021) 101397. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101397>
- Blanco, H., & Faaij, A. (2018). A review at the role of storage in energy systems with a focus on Power to Gas and long-term storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1049–1086. doi:10.1016/j.rser.2017.07.062.
- Børdal, E. F., Mallapragada, D., Botterud, A., & Korpås, M. (2020). Decarbonization synergies from joint planning of electricity and hydrogen production: A Texas case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(58), 32899–32915. doi:10.1016/j.ijhydene.2020.09.127.
- Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cordero, R. R., Damiani, A., Gallardo, L., Garreaud, R. D., ... & Rondanelli, R. (2018). Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6.
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes?. *Journal of Climate*, 28(17), 6938-6959.
- Cao, Y., Wang, M.; Liu, K. (2017). Wildfire Susceptibility Assessment in Southern China: A Comparison of Multiple Methods. *International Journal of Disaster Risk Science*, 8(2), 164–181. <https://doi.org/10.1007/s13753-017-0129-6>

- CEN (2022). Plan de Obras de Generación 2022. <https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2022/12/Apendice-II-Plan-de-Obras-de-Generacion-2022.pdf>.
- CEN. (2023). Información de Energía Afluente y Probabilidad de Excedencia del SEN. <https://www.coordinador.cl/operacion/graficos/operacion-real/informacion-condicion-hidrologica/>
- Chang J., Pfeifenberger J. (2013). The Benefits of Electric Transmission: Identifying and Analyzing the Value of Investments. Brattle Group. https://www.brattle.com/wp-content/uploads/2017/10/8223_the_benefits_of_electric_transmission_-_identifying_and_analyzing_the_value_of_investments_chang_pfeifenberger_hagerty_jul_2013.pdf.
- Chen, M., Gao, X., Wang, X., Luo, M., Lin, Y., Saarinen, N., Sun, Y., Cui, G., & Huang, Y. (2020). A Risk analysis framework for transmission towers under potential pluvial flood - LiDAR survey and geometric modelling. *International journal of disaster risk reduction*, 50, 101862. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101862>
- ChileAtiende. (2023). Subsidio al pago de consumo de agua potable y servicio de alcantarillado. Recuperado de: <https://www.chileatiende.gob.cl/fichas/51314-subsidio-al-pago-de-consumo-de-agua-potable-y-servicio-de-alcantarillado>
- Clack C., Choukulkar A., Coté B., McKee S. (2020). Why Local Solar For All Costs Less: A New Roadmap for the Lowest Cost Grid. https://www.vibrantcleanenergy.com/wp-content/uploads/2020/12/WhyDERs_TR_Final.pdf.
- CNE (2023a). Pequeños Medios de Generación en Chile. Energía Abierta. Recuperado de: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/pequenos-medios-de-generacion-en-chile/>.
- CNE (2023b). Informe Técnico Final Plan de Expansión Anual de Transmisión año 2022. <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2023/05/ITF-Plan-de-Expansion-de-la-Transmision-2022.pdf>.
- Comisión Nacional para los Derechos Humanos (CNDH). (2018). Impactos de Proyectos Energéticos en Comunidades Indígenas. Ciudad de México, México.

- CONAF. (2011). Catastro de los recursos vegetacionales nativos de Chile: Monitoreo de cambios y actualizaciones período 1997 – 2011
- Consultoría Colombiana S.A. (2013). DISEÑO NUEVA LÍNEA CARDONES – MAITENCILLO 2 x 500 kV , NUEVA LÍNEA MAITENCILLO –PAN DE AZÚCAR 2 x 500 kV Y NUEVA LÍNEA PAN DE AZÚCAR – POLPAICO 2 x 500 kV.
- Copernicus Climate Change Service (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
- Corominas, J.: Landslides and climate. Keynote lecture, in: Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides, edited by: Bromhead, E., Dixon, N., and Ibsen, M. L., A. A. Balkema, Cardiff, 4, 1–33, 2000.
- Cramer, M., McCray, J., Pater, M., & Sache, R. (2018). Wildfire and Electric Utility Infrastructure: Impacts and Mitigation Strategies. In: In: Brebbia C.A. (eds) WIT Transactions on Ecology and the Environment. WIT Press. doi: 10.2495/FRIAR180131
- Dasgupta, S., Qu, J. J., & Hao, X. (2006). Design of a susceptibility index for fire risk monitoring. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 3(1), 140–144. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2005.858484>
- DGA (2017). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro, sit n° 435. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios Planificación, Santiago, Chile. Realizado por Fundación para la Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica de Chile. Departamento de Administración de Recursos Hídricos. (2014). Redefinición de la clasificación red hidrográfica a nivel nacional. Desarrollado por el Centro de Información de Recursos Naturales. 370 p
- Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). (2022). Catastro de Operadores SSR. Recuperado de: https://doh.mop.gob.cl/SSR/docs/Catastro_organizaciones_nov22.xls
- Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). (2023). Programa de Agua Potable Rural MOP. Acerca del Programa APR. Recuperado de: <https://doh.mop.gob.cl/APR/AcercadeAPR/Paginas/acercaAPR.aspx>
- Dirección Meteorológica de Chile (DMC). Climatología de Chile. Dirección Meteorológica de Chile. Santiago, Chile. 2001

- Drouin, J. (2021). Understanding Wildfire Risks from Poles, Lines, And Substations. Power Engineers. <https://www.powereng.com/library/understanding-wildfire-risks-from-poles-lines-and-substations>
- E2BIZ (2021). Proyección de la Generación Distribuida en los sectores residencial, comercial e industrial en Chile. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/e2biz-2021_proyeccion_de_generacion_distribuida.pdf.
- EASE (2019). Maximising Social Welfare of Energy Storage Facilities through Multi-Service Business Cases. https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2019/04/2019.04_Multi-Service-Business-Models_Position-Paper.pdf.
- EIA (2023). Solar distributed generation capacity in Brazil is growing rapidly. Link: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=56200>.
- Elberry, A. M., Thakur, J., & Veysey, J. (2021). Seasonal hydrogen storage for sustainable renewable energy integration in the electricity sector: A case study of Finland. *Journal of Energy Storage*, 44, 103474. doi:10.1016/j.est.2021.103474.
- Electric Power Research Institute (EPRI). (2018). Transmission Line Flood Mitigation Solutions. EPRI.
- ENTSO-E (2021). Ten-Year Network Development Plan (TYNDP) 2020. https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/tyndp-documents/TYNDP2020/Forconsultation/TYNDP2020_Report_forconsultation.pdf.
- ENTSO-E (2023). ENTSO-E's position on the F-Gas Regulation Revision. https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12479-Fluorinated-greenhouse-gases-review-of-EU-rules-2015-20-/F3318600_en.
- European Commission (2015). Study on the effective integration of Distributed Energy Resources for providing flexibility to the electricity system.
- European Hydrogen Backbone Initiative (2022). European Hydrogen Backbone: A European hydrogen infrastructure vision covering 28 countries. <https://ehb.eu/files/downloads/ehb-report-220428-17h00-interactive-1.pdf>.

- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., ... & Voldoire, A. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)
- Frayser J., Wang E. (2014). Market resource alternatives: An Examination of New Technologies in the Electric Transmission Planning Process. <https://wiresgroup.com/wp-content/uploads/2020/12/Market-Resource-Alternatives-Sept-2014.pdf>.
- Galilea, S. (2019). La tormenta de fuego y la nueva Santa Olga. Instituto de Asuntos Públicos - Universidad de Chile. <https://doi.org/10.34720/dqyy-d706>
- Gerard, H., Puente, E. I. R., & Six, D. (2018). Coordination between transmission and distribution system operators in the electricity sector: A conceptual framework. *Utilities Policy*, 50, 40-48.
- Gils, H. C., Gardian, H., & Schmutz, J. (2021). Interaction of hydrogen infrastructures with other sector coupling options towards a zero-emission energy system in Germany. *Renewable Energy*, 180, 140–156. doi:10.1016/j.renene.2021.08.016.
- Global Transmission. (2023). EU's Revised F-gases Emissions Regulation: Focus on use of SF6-free technology in transmission. <https://globaltransmission.info/eus-revised-f-gases-emissions-regulation-focus-on-use-of-sf6-free-technology-in-transmission/>
- González, M.E., Sapiains, R., Gómez-González, S., Garreaud, R., Miranda, A., Galleguillos, M., Jacques, M., Pauchard, A., Hoyos, J., Cordero, L., Vásquez, F., Lara, A., Aldunce, P., Delgado, V., Arriagada, Ugarte, A.M., Sepúlveda, A., Farías, L., García, R., Rondanelli, R., J., Ponce, R., Vargas, F., Rojas, M., Boisier, J.P., C., Carrasco, Little, C., Osses, M., Zamorano, C., Díaz-Hormazábal, I., Ceballos, A., Guerra, E., Moncada, M., Castillo, I. (2020). Incendios forestales en Chile: causas, impactos y resiliencia. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Universidad de Chile, Universidad de Concepción y Universidad Austral de Chile.
- Gramlich R. and Caspary J. (2021). Planning for the Future: FERC's Opportunity to Spur More Cost-Effective Transmission Infrastructure. https://www.cleanenergygrid.org/wp-content/uploads/2021/01/ACEG_Planning-for-the-Future1.pdf.
- Greene AM, Hellmuth M, Lumsden T (2012) Stochastic Decadal Climate Simulation for the Berg and Breede Water Management Areas, Western Cape Province, South Africa. *Water Resour Res* 48(6). doi: 10.1029/2011WR011152

- Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., & Engen-Skaugen, T. (2012). Technical note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations--a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3383-3390.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2007a). The Rainfall Intensity–duration Control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, 5(1), 3-17. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0112-1>
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. P. (2007b): Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 98, 239–267, 2007b.
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R. G. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342(6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693><https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96-99.
- He G., Mallapragada D., Bose A., Heuberger-Austin C., Gencer E., Sector coupling via hydrogen to lower the cost of energy system decarbonization, *Energy Environ. Sci.* 14 (2021) 4635–4646. doi:10.1039/D1EE00627D.
- He, H., & Yan, J. (2016). Cyber-physical attacks and defences in the smart grid: a survey. *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications*, 1(1), 13-27.
- Hernández, H.J., Galleguillos, M & Estades, C. 2016. Mapa de Cobertura de Suelos de Chile 2014: Descripción del Producto. Laboratorio GEP, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile
- IEA (2021a). Net Zero by 2050, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>, License: CC BY 4.0.
- IEA (2021b). Global Hydrogen Review 2021, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>, License: CC BY 4.0.

- IEA (2023a). Tracking Clean Energy Progress 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>, License: CC BY 4.0.
- IEA (2023b). Renewable Energy Market Update - June 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-june-2023>, License: CC BY 4.0.
- INE (2007). Censo Agropecuario 2007. Cuadros estadísticos. Disponible en <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/censos-agropecuarios> [Consultado 30 de junio de 2023].
- INE (2021). Censo Agropecuario 2021. Cuadros estadísticos. Disponible en <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/censos-agropecuarios> [Consultado 30 de junio de 2023].
- Inostroza, J., Méndez, P., Espinoza, N., Acuña, I., Navarro, P., Cisternas, E. y Larraín, P. (2017). Manual del cultivo de la papa en Chile. Editor Víctor Kramm. Boletín INIA N°10. ISSN 0717-4829. INIA-INDAP, Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2018). Conceptos Indicadores Tablas y Gráficos. Resultados Censo 2017. Instituto Nacional de Estadísticas.
- IPCC (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA.
- IPCC. (2014). Cambio Climático 2014: Impacto, Adaptación y Vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del IPCC. Cambridge University Press.
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.
- IRENA (2019). Innovation landscape brief: Market integration of distributed energy resources, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

- IRENA (2020a). Virtual power lines, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2020b). Innovation landscape brief: Co-operation between transmission and distribution system operators, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA. (2020). Renewable Energy Market Analysis: Latin America and the Caribbean. International Renewable Energy Agency.
- ISCI, (2021). Evaluación de la Industria de Generación Distribuida como Motor de Empleo y Desarrollo Económico Eficiente y Sustentable en Chile Post COVID-19. <https://isci.cl/wp-content/uploads/2021/08/Informe-Final-Definitivo-Proyecto-ISCI-MEN-GDx-Covid-19.pdf>.<https://isci.cl/wp-content/uploads/2021/08/Informe-Final-Definitivo-Proyecto-ISCI-MEN-GDx-Covid-19.pdf>.
- Jara, D. y Valenzuela, A. (1998). Necesidades de Agua de los cultivos. CNR-U. de Concepción. Chillán, Chile. 24 p.
- Johnston, F. H., Purdie, S., Jalaludin, B., Martin, K. L., Henderson, S. B., Morgan, G. G., & Williams, G. M. (2012). Air pollution events from forest fires and emergency department attendances in Sydney, Australia 1996-2007: a case-crossover analysis. *Environmental Health*, 11(1), 1-10.
- Jorquera-Copier, J., Lorca, Á., Sauma, E., Lorenczik, S., & Negrete-Pincetic, M. (2024b). Impacts of different hydrogen demand levels and climate policy scenarios on the Chilean integrated hydrogen–electricity network. *Energy Policy*, 184, 113881. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113881>
- Joskow, P. (2021). Facilitating Transmission Expansion to Support Efficient Decarbonization of the Electricity Sector. MIT Center for Energy and Environmental Policy Research. Working paper. CEEPR WP 2021-009. <https://ceepr.mit.edu/wp-content/uploads/2021/09/2021-009.pdf>.
- Khan, A. U. R., Muhd Yasin, S. Z. M., Shaari, S., Mustafa, M. W., Rahman, T. K. A., & Sadiq, A. S. (2021). Impact of Long-Duration Dry Spells on Electrical Power Transmission in Arid Regions. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(3), 1596-1605. doi: 10.1109/TSTE.2020.2982947
- Knipling, J., Hu, M., Sharpe, A., & Farid, A. (2019). Impact of Extreme Temperatures on Electrical Transmission Conductors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(5), 2067-2073. doi: 10.1109/TPWRD.2019.2894597
- Kolhoff, A., Pistorius, T., & Runhaar, H. (2019). The social and environmental impacts of high-voltage transmission lines: A case study in the Netherlands. *Energy Policy*, 134, 110990.

- Kumar, A., & Sharma, B. (2014). Effects of Temperature on Insulator Flashover Voltage: A Review. *Electric Power Components and Systems*, 42(18), 2012-2020.
- Kumaraswamy K., Cabbabe J., Wolfschmidt H. (2020). Redrawing the Network Map: Energy Storage as Virtual Transmission. Whitepaper. <https://info.fluenceenergy.com/hubfs/Collateral/Storage%20as%20Transmission%20White%20Paper.pdf?hsLang=en>.
- Lall U, Sharma A (1996). A Nearest Neighbor Bootstrap for Resampling Hydrologic Time Series. *Water Resour Res* 32(3):679-693. doi: 10.1029/95WR02966
- Li, C., & Chen, L. (2018). Thermal Performance Analysis of Overhead Power Transmission Lines under High Ambient Temperatures. *Proceedings of the International Conference on Power System Technology*, 1-6.
- Li, J., Lin, J., Zhang, H., Song, Y., Chen, G., Ding, L., & Liang, D. (2020). Optimal Investment of Electrolyzers and Seasonal Storages in Hydrogen Supply Chains Incorporated With Renewable Electric Networks. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11(3), 1773–1784. doi:10.1109/TSTE.2019.2940604.
- Li, X., Balasubramanian, P., Sahraei-Ardakani, M., Abdi-Khorsand, M., Hedman, K. W., & Podmore, R. (2016). Real-time contingency analysis with corrective transmission switching. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(4), 2604-2617.
- Luebert, F., & Plissock, P. (2006). Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Editorial universitaria.
- Marmillo, J., Pinney, N., Mehraban, B., Murphy, S., Dumitriu, N., "Simulating the Economic Impact of a Dynamic Line Rating Project in a Regional Transmission Operator (RTO) Environment", CIGRE US National Committee 2018 Grid of the Future Symposium. 2018. <https://cigre-usnc.org/wp-content/uploads/2018/11/04-Simulating-the-Economic-Impact-of-a-Dynamic-Line.pdf>.
- Mehraban, B., Marmillo, J., Pinney, N., Bowman, D., Schope, R. (2018). An analysis on the economic impacts of dynamic line ratings on a congested transmission line in southwest power pool. <https://watt-transmission.org/wp-content/uploads/2018/10/cigre-gottf-2018-spp-aep-linevision-final1.pdf>.
- Miao, C., Sun, Q., Duan, Q., & Wang, Y. (2016). Joint analysis of changes in temperature and precipitation on the Loess Plateau during the period 1961–2011. *Climate Dynamics*, 47(9-10), 3221-3234. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3022-x>

Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MIDESO). (2017). Encuesta de caracterización socioeconómica nacional 2017. Recuperado de: <https://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/encuesta-casen-2017>

Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MIDESO). (2018). Síntesis de resultados: Vivienda y Entorno. Recuperado de: https://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/storage/docs/casen/2017/Resultados_vivienda_casen_2017.pdf

Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MIDESO). (2023a). Casen en Pandemia 2020. Recuperado de: https://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/storage/docs/casen/2022/Presentaci%C3%B3n_Resultados_Casen_2022%20_v20oct23.pdf

Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MIDESO). (2023b). Observatorio Social. Pobreza Multidimensional. Recuperado de: https://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/storage/docs/casen/2022/Resultados_Pobreza_Multidimensional_Casen_2022_v20oct23.pdf

Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MIDESO). (2023c). Observatorio Social. Resultados Casen Trabajo. Recuperado de: https://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/storage/docs/casen/2022/0231012_Resultados_Casen_Trabajo.pdf

Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MIDESO). (2023d). Observatorio Social. Estadísticas Trabajo Casen 2022. Recuperado de: <https://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/encuesta-casen-2022>

Ministerio de Energía. (2020a). Estrategia de Transición Energética Residencial. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/estrategia_de_transicion_energetica_residencial13082020.pdf.

Ministerio de Energía. (2020b). Informe Preliminar Planificación Energética de Largo Plazo PELP 2023-2027. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/pelp2023-2027_informe_preliminar.pdf.

Ministerio de Energía. (2020c). NDC y Plan de Carbono Neutralidad 2050. Recuperado de: https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/20200407_Ministro-Jobet_NDC_V5.pdf.

- Ministerio de Hacienda. (2023). Reporte de la estimación de los costos fiscales y económicos de la emergencia por los incendios forestales (p. 9). Ministerio de Hacienda. <https://www.hacienda.cl/areas-de-trabajo/politicas-macroeconomicas/informes/informe-de-costos-de-incendios-forestales-al-3-de-abril>
- Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. (2023). Proyecciones de Vehículos Eléctricos. <https://energia.gob.cl/electromovilidad/tendencias/proyecciones-de-vehiculos-electricos>.
- Miranda, A.; Carrasco, J.; González, M.; Pais, C.; Lara, A.; Altamirano, A. Weintraub, A.; Syphard, A.D. (2020). Evidence-based mapping of the wildland-urban interface to better identify human communities threatened by wildfires. *Environ. Res. Lett.* 15 (2020) 094069. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9be5>
- MISO. (2021). MISO's Renewable Integration Impact Assessment (RIIA). <https://cdn.misoenergy.org/RIIA%20Summary%20Report520051.pdf>.
- Naciones Unidas Chile. (2023, abril 10). Chile: Incendios forestales, 2023 - Sistema de Naciones Unidas, Reporte de Situación No. 5 (Al 30 de marzo de 2023) - Chile | ReliefWeb. <https://reliefweb.int/report/chile/chile-incendios-forestales-2023-sistema-de-naciones-unidas-report-de-situacion-no-5-al-30-de-marzo-de-2023>
- Nelsen, R.: An Introduction to Copulas, Springer New York, New York, NY, USA, 2006.
- Observatorio Valparaíso. (2015). Reconstrucción Gran Incendio de Valparaíso. <https://cdn.plataformaurbana.cl/wp-content/uploads/2016/01/informe-reconstruccion-observatorio-valparaiso.compressed.pdf>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Riahi, K. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482.
- Othman, A., El-Saoud, W. A., Habeebullah, T. M., Shaaban, F., & Abotalib, A. Z. (2023). Risk assessment of flash flood and soil erosion impacts on electrical infrastructures in overcrowded mountainous urban areas under climate change. *Reliability Engineering & System Safety*, 236, 109302. <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109302>
- Palma-Behnke, R., Abarca del Río, R., Agostini, C., Alvear, C., Amaya, J., Araya, P., Arellano, N., Arriagada, P., Avilés, C., Barría, C., Berg, A., Buchuk, D., Cardemil, J. M., Dall'Orso, F., Domínguez, M. P., Escauriaza, C., Feijoo, F., Figueroa, A., Flores, C.

... Vicuña, S. (2021). The Chilean Potential for Exporting Renewable Energy (Mitigation and Energy Working Group Report). Santiago: Comité Científico de Cambio Climático; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. https://comitecientifico.minciencia.gob.cl/wpcontent/uploads/2021/11/The_Chilean_Potential_for_Exporting_Renewable_Energy_web.pdf

Peruccacci, S., Brunetti, M. T., Gariano, S. L., Melillo, M., Rossi, M., & Guzzetti, F. (2017). Rainfall thresholds for possible landslide occurrence in Italy. *Geomorphology*, 290, 39-57. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.03.031>

Pfeifenberg J., Chang J. (2016). Well-Planned Electric Transmission Saves Customer Costs: Improved Transmission Planning Is Key to the Transition to a Carbon-Constrained Future. Brattle Group. <https://wiresgroup.com/wp-content/uploads/2020/06/2016-06-Brattle-Group-Well-Planned-Electrical-Transmission-Saves-Customers-Costs.pdf>.

Pfeifenberger, J., Spokas K., Hagerty M., Tsoukalis J. (2021). Transmission Planning for the 21st Century: Proven Practices that Increase Value and Reduce Costs. Brattle Group. https://www.brattle.com/wp-content/uploads/2021/10/2021-10-12-Brattle-GridStrategies-Transmission-Planning-Report_v2.pdf.

Pradhan, B., Suliman, M. D. H. Bin, & Awang, M. A. Bin. (2007). Forest fire susceptibility and risk mapping using remote sensing and geographical information systems (GIS). *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 16(3), 344–352. <https://doi.org/10.1108/09653560710758297>

Quiroga, D., Sauma, E., & Pozo, D. (2019). Power system expansion planning under global and local emission mitigation policies. *Applied Energy*, 239, 1250–1264. doi:10.1016/j.apenergy.2019.02.001.

Ricotta, C., Bajocco, S., Guglietta, D., & Conedera, M. (2018). Assessing the Influence of Roads on Fire Ignition: Does Land Cover Matter? *Fire*, 1(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/fire1020024>

Rosso, A., Uppalapati, A., Heidel, T. (2016). Use of New Generation of Power Flow Controllers to Defer Transmission Investment.

Ruiz, P. A., Caramanis, M., Goldis, E., Keshavamurthy, B., Li, X., Philbrick, R., ... & Tsuchida, B. (2013). Topology Control Algorithms (TCA). In Prepared for UVIG Spring Technical Workshop by the Brattle Group.

- Sauma, E., Jerardino, S., Barria, C., Marambio, R., Brugman, A., & Mejía, J. (2011). Electric-systems integration in the Andes community: Opportunities and threats. *Energy Policy*, 39(2), 936–949. doi:10.1016/j.enpol.2010.11.019.
- Scheidt, F., Qu, J., Staudt, P., Mallapragada, D. S., & Weinhardt, C. (2022). Integrating hydrogen in single-price electricity systems: The effects of spatial economic signals. *Energy Policy*, 161, 112727. doi:10.1016/j.enpol.2021.112727.
- Segoni, S., Piciullo, L., & Gariano, S. L. (2018). A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides*, 15(8), 1483-1501. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0966-4>
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2018, abril). *Glosario ilustrado para la comprensión básica de peligros geológicos*. Sernageomin. <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/04/Glosario-ilustrado-de-peligros-geologicos.pdf>
- Smith, J., & Johnson, R. (2015). Impact of Extreme Cold Weather on Power Transmission Lines. *Journal of Energy Engineering*, 30(2), 145-153.
- SPEC, ISCI. (2023). Identificación De Acciones Sistémicas De Corto Y Largo Plazo Para Un Desarrollo Adecuado De Los Sistemas De Transmisión Como Condición Habilitante De La Carbono Neutralidad. <https://www.spec.cl/SPEC-ISCI-PLANTX.pdf>
- Syphard, A. D., Radeloff, V. C., & Keeley, J. E. (2017). A global database of wildfires. In J. Goldammer (Ed.), *Vegetation Fires and Global Change*. Berlin: Springer.
- Teegavarapu, R. S. V., Salas, J. D., & Stedinger, J. R. (2019). Statistical Analysis of Hydrologic Variables. *Environmental and Water Resources Institute*. <https://doi.org/10.1061/9780784415177>
- The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC). (2009). *Principles of Geographic Information Systems: An introductory textbook (4.a ed.)*. Otto Huisman and Rolf A. de By. https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2009/general/principlesgis.pdf
- Tilloy, A., Malamud, B. D., Winter, H., & Joly-Laugel, A. (2020). Evaluating the efficacy of bivariate extreme modelling approaches for multi-hazard scenarios. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(8), 2091-2117. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2091-2020>

- Tirado, M. C., Clarke, R., Jaykus, L. A., McQuatters-Gollop, A., & Frank, J. M. (2010). Climate change and food safety: a review. *Food Research International*, 43(7), 1745-1765.
- Tsuchida B., Bai L., Grove J. (2023). Building a Better Grid: How Grid-Enhancing Technologies Complement Transmission Buildouts. Brattle Group. <https://www.brattle.com/wp-content/uploads/2023/04/Building-a-Better-Grid-How-Grid-Enhancing-Technologies-Complement-Transmission-Buildouts.pdf>.
- U.S Department of Energy (DOE). (2023). National Transmission Needs Study. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-02/022423-DRAFTNeedsStudyforPublicComment.pdf>.
- U.S Department of Energy. (2020). Advanced Transmission Technologies.
- UN-Water. (2018). Sustainable Development Goal 6 Synthesis Report 2018 on Water and Sanitation. United Nations.
- Urquiza, A., Billi, M., Calvo, R., Amigo, A., Navea, J., Monsalve, T., Álamos, N., Neira, C., Rauld, J., Allendes, Á., Arrieta, D., Barrera, V., Basoalto, J., Cárdenas, M., Contreras, M., Fleischmann, M., Horta, D., Labraña, J., Larragubel, C., ... Winckler, P. (2020). Informe Proyecto ARClím: Asentamientos Humanos. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Red de Pobreza Energética, Iniciativa ENEAS: Energía, Agua y Sustentabilidad y Núcleo de Estudios Sistémicos Transdisciplinarios.
- Valdez, M. C., Chang, K. T., Chen, C. F., Chiang, S. H., & Santos, J. L. (2017). Modelling the spatial variability of wildfire susceptibility in Honduras using remote sensing and geographical information systems. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 876–892. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1278404>
- Van, K., Horn, Pfeifenberger, J., & Ruiz, P. (2020). The value of diversifying uncertain renewable generation through the transmission system. Retrieved from <https://open.bu.edu/handle/2144/41451>.
- Verástegui, F., Lorca, Á., Negrete-Pincetic, M., & Olivares, D. (2020). Firewood heat electrification impacts in the Chilean power system. *Energy Policy*, 144, 111702.
- Wang, X., & Zhang, Y. (2011). Effects of Extreme Temperature on Transmission Line Conductors and Insulators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(4), 2805-2812.
- Wood, A. W., Maurer, E. P., Kumar, A., and Lettenmaier, D. P., (2002). Long-Range Experimental Hydrological Forecasting for the Eastern United States. *Journal of*

Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., Hernández, H. J., Galleguillos, M., Estades, C., Biging, G. S., Radke, J. D., & Gong, P. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment*, 183, 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.016>

Zhicheng, G. (2021, enero 15). Wildfire Hazard to Transmission Lines - [INMR Enriching Technical Knowledge of T&D Professionals]. <https://www.inmr.com/wildfire-hazard-to-transmission-lines/>