



Eventos extremos a partir de **escenarios climáticos**

Análisis en municipios rurales de Bolivia
- zonas andinas y valles



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Cooperación Suiza en Bolivia

Reducción del riesgo de desastres

Eventos extremos a partir de escenarios climáticos

Análisis en municipios rurales de Bolivia
- zonas andinas y valles

Créditos

Eventos extremos a partir de escenarios climáticos Análisis en municipios rurales de Bolivia - zonas andinas y valles

Reducción del riesgo de desastres de la Cooperación Suiza en Bolivia.
HELVETAS Swiss Intercooperation.

Autores	Magalí García (principal) Omar Pozo Katherine Rojas
Revisión tematica	Ivar Arana Oscar Paz
Comentarios	Javier Gonzáles Ivy Beltrán
Edición general	Claudia Rivadeneira Oscar Paz
Fotos	PRRD
Depósito legal	4-1-845-14
Diseño gráfico	Aldo Sánchez, Teleioo SRL.
Impresión	Teleioo SRL.

Abril 2014

Este documento es de plena responsabilidad de los autores.

Contenido

Prólogo	15
Capítulo 1: Cambio climático y uso de Modelos de Circulación General en los Andes bolivianos	17
1.1. Introducción	18
1.2. El clima en Bolivia	19
1.3. Cambio climático	22
1.4. Aplicación de Modelos de Circulación General (MCG)	30
1.5. Conclusiones	37
1.6. Bibliografía	38
Capítulo 2: Evaluación de la información climática de las estaciones meteorológicas cercanas a las zonas de influencia del PRRD	43
2.1. Introducción	44
2.2. Área de estudio	44
2.3. Estaciones meteorológicas incluidas en el estudio	44
2.4. Control de calidad de la información climática	46
2.5. Resultados	49
2.6. Conclusiones	66
Capítulo 3: Evaluación del comportamiento predictivo de las condiciones climáticas de las zonas de trabajo del PRRD por parte de tres Modelos de Circulación General	67
3.1. Introducción	68
3.2. Metodología	68
3.3. Resultados	73
3.4. Proyección del cambio de las variables termo-pluviométricas a 2050	78
3.5. Conclusiones	88
Capítulo 4: Aplicación y calibración de técnicas de downscaling estadístico para el análisis de riesgos en las zonas de intervención del PRRD	91
4.1. Introducción	92
4.2. La función del downscaling (regionalización)	92
4.3. Generadores de tiempo como herramientas de downscaling	93
4.4. Objetivos	95
4.5. Metodología	96
4.6. Resultados	96
4.7. Discusión	106
4.8. Conclusiones	107
Capítulo 5: Descripción de la base de datos climáticos futuros generados para las zonas de influencia del PRRD y variaciones esperadas	111
5.1. Introducción	112
5.2. Metodología	112
5.3. Resultados	113
Precipitación	121
• Norte Paceño Tropical	122

• Norte Potosí	129
• Aymaras Sin Fronteras (zona altiplánica)	136
• Gran Centro Potosí	143
• Cintis	150
• Región Andina de Cochabamba	157
• Caine	163
• Chaco Chuquisaqueño	170
• Héroes de la Independencia (valles de Tarija)	176
Temperatura	185
• Norte Paceño Tropical	186
• Norte Potosí	191
• Aymaras Sin Fronteras (zona altiplánica)	196
• Gran Centro Potosí	201
• Cintis	206
• Región Andina de Cochabamba	211
• Caine	216
• Chaco Chuquisaqueño	221
• Héroes de la Independencia (valles de Tarija)	226
5.4. Conclusiones	231

Capítulo 6: Evaluación descriptiva de las amenazas climáticas futuras en las zonas de análisis	233
6.1. Introducción	234
6.2. Metodología	234
6.3. Resultados	237
6.4. Conclusiones	249

Figuras

Figura 1.1.	Descripción esquemática de los patrones de circulación del aire en un corte latitudinal típico del Altiplano boliviano.	20
Figura 1.2.	Esquematzación de los elementos que determinan el régimen pluviométrico de Bolivia.	21
Figura 1.3.	Desviación de la temperatura anual de un promedio de 1961-1990 en los Andes Tropicales (latitud 1°N – 23°S) entre 1939 y 1998.	24
Figura 1.4.	Tendencia de temperatura media anual como función de la elevación (msnm) basado en la simulación ECHAM-4 (1978-1998).	25
Figura 1.5.	Diferencias en el promedio anual de las temperaturas máximas y mínimas para el Altiplano boliviano.	26
Figura 1.6.	Tendencias de temperaturas medias máximas mensuales °C (por cada 10 años) de 1965-2004.	26
Figura 1.7.	Diferencias en los registros promedio de temperatura antes y después de 1983 para el Altiplano boliviano	27
Figura 1.8.	Tendencia a la precipitación media (mm por cada 10 años).	29
Figura 1.9.	(a) Diagrama esquemático de las fuerzas motoras que rigen las emisiones de GEI. (b) Dirección cualitativa de los escenarios del IE-EE para diferentes indicadores.	31
Figura 1.10.	Estimación del incremento de la temperatura en caso de que la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera se duplique.	32
Figura 1.11.	Cambio de temperatura del aire cerca de la superficie (promedio anual) simulado por el modelo PRECIS-DGF entre fines de siglo (2070-2100 bajo escenario A2) y condición actual (1960-1990) para Chile.	34
Figura 1.12.	Cambio estandarizado de la temperatura (arriba) y de la precipitación previsto en la región, generados por 9 MCG	36
Figura 1.13.	Cambios en los patrones de precipitación de acuerdo al modelo PRECIS en los escenarios A2 y B2, nivel municipal.	37
Figura 2.1.	Observación visual de los registros de T _{máx} y T _{mín} de Capi- nota.	47
Figura 2.2.	Observación visual de los datos de PP anual de Capinota.	47
Figura 2.3.	Prueba de homogeneidad de PP anual de Capinota.	48
Figura 2.4.	Prueba de homogeneidad de la PP anual de Capinota.	48
Figura 2.5.	Promedio mensual de la T _{mín} en las estaciones consideradas.	49
Figura 2.6.	Evolución estacional de la Temperatura Mínima promedio mensual en las estaciones consideradas.	51
Figura 2.7.	Evolución mensual de la Temperatura Máxima promedio mensual en las estaciones consideradas.	61
Figura 2.8.	Serie de tiempo de la T _{máx} promedio anual en las estaciones consideradas.	63

Figura 2.9. Evolución anual de la precipitación en las estaciones consideradas en el estudio.	64
Figura 3.1. Comando <i>selyear</i> para seleccionar el periodo de corte de los modelos seleccionados.	70
Figura 3.2. Comando <i>sinfo</i> para conocer la resolución de los modelos seleccionados.	70
Figura 3.3. Resultados del comando <i>sinfo</i> que muestran los detalles geográficos de la grilla con la que se trabaja.	70
Figura 3.4. Comando que permite identificar los vértices de las grillas.	71
Figura 3.5. Cobertura de la grilla del Modelo HADGEM, (Izq.) Precipitación-Der.) Temperaturas, abajo sus estaciones correspondientes.	71
Figura 3.6. Cobertura de la grilla del Modelo MIROC a alta resolución.	72
Figura 3.7. Cobertura de la grilla del Modelo ECHAM5.	73
Figura 3.8. PP mensual media (mm) observada y simulada por tres MCG para: superior derecha, Anzaldo; superior izquierda, Culpina; inferior derecha, Rurrenabaque; inferior izquierda, ToroToro.	74
Figura 3.9. Temperatura máxima mensual media (°C) observada y simulada por tres MCG: superior derecha, Anzaldo; superior izquierda, Culpina; inferior derecha, Rurrenabaque; inferior izquierda, ToroToro.	75
Figura 3.10. Temperatura mínima mensual media (°C) observada y simulada por tres MCG para: superior derecha, Anzaldo; superior izquierda, Culpina; inferior derecha, Rurrenabaque; inferior izquierda, ToroToro.	75
Figura 4.1. Simulación de la variación de la función de probabilidad de la T _{máx} de un punto cualquiera mostrando las variaciones que podrían ser identificadas en sus medias y sus colas.	95
Figura 4.2. a) Gráfico 1:1 del percentil 95 de la precipitación máxima mensual observada (eje x) vs. simulada (eje y) en mm/día para las estaciones incluidas en el estudio y presentadas en la Tabla 1.1. b) lo mismo pero para la precipitación máxima mensual absoluta.	99
Figura 4.3. (1ra) Mediana de precipitación máxima absoluta anual observada (mm/día) comparada con el mismo valor pero del registro generado por LARS-WG para cada estación citada en el eje x. (2da) lo mismo pero para la máxima del registro. (3ra) lo mismo pero para la mínima del registro.	99
Figura 4.4. a) Gráfico 1:1 del percentil 95 de la T _{máx} mensual observada (eje x) vs. simulada (eje y) en °C para las estaciones incluidas en el estudio y presentadas en la Tabla 1. b) lo mismo pero para el percentil 5.	102
Figura 4.5. (1ra) Mediana del registro de los valores máximos anuales de la temperatura máxima observada (°C) comparada con el registro generado por LARS-WG para cada estación citada en el eje x. (2da) lo mismo pero para la máxima del registro. (3ra) lo mismo pero para la mínima del registro.	103
Figura 4.6. (1ra) Mediana del registro de los valores mínimos anuales de la temperatura máxima observada (°C) comparada con el mismo valor pero del registro generado por LARS-WG para cada estación citada en el eje x. (2da) lo mismo pero para la máxima del registro. (3ra) lo mismo pero para la mínima del registro.	104

Figura 4.7. Gráfico 1:1 del percentil 95 de la T _{mín} mensual observada (eje x) vs. simulada (eje y) en °C para las estaciones incluidas en el estudio y presentadas en la Tabla 1. b) Lo mismo pero para el percentil 5.	107
Figura 4.8. (1ra) Mediana del registro de los valores mínimos anuales de la T _{mín} observada (°C) comparada con el mismo valor pero del registro generado por LARS-WG para cada estación citada en el eje x. (2da) lo mismo pero para la máxima del registro. (3ra) lo mismo pero para la mínima del registro.	108
Figura 4.9. (1ra) Mediana del registro de los valores máximos anuales de la T _{mín} observada (°C) comparada con el mismo valor pero del registro generado por LARS-WG para cada estación citada en el eje x. (2da) lo mismo pero para la máxima del registro. (3ra) lo mismo pero para la mínima del registro.	109
Figura 5.1. Dispersión interanual representada en boxplots de los registros de precipitación mensual para 2020 (arriba) y 2050 (abajo) para San Buenaventura (Estación de referencia en Rurrenabaque).	123
Figura 5.2. Dispersión interanual representada en boxplots de los registros de precipitación mensual en Apolo para 2020 (arriba) y 2050 (abajo). Estación de referencia en Sapecho.	124
Figura 5.3. Dispersión interanual de la precipitación mensual en Acasio, representada en boxplots para 2020 (arriba) y 2050 (abajo).	130
Figura 5.4. Dispersión interanual de la precipitación mensual en San Pedro de Buenavista, representada en boxplots para 2020 (arriba) y 2050 (abajo).	131
Figura 5.5. Dispersión interanual de precipitación mensual en Charaña, representada en boxplots para 2020 (arriba) y 2050 (abajo).	137
Figura 5.6. Dispersión interanual representada en boxplots de los registros de precipitación acumulada mensual previstos para 2020 (arriba) y 2050 (abajo) para Curahuara de Carangas.	138
Figura 5.7. Dispersión interanual de la precipitación mensual en Chaquí, representada en boxplots para 2020 (arriba) y 2050 (abajo).	144
Figura 5.8. Dispersión interanual de la precipitación mensual de Yocalla, representada en boxplots para 2020 (arriba) y 2050 (abajo).	145
Figura 5.9. Dispersión interanual de la precipitación mensual en Culpina, representada en boxplots para 2020 (arriba) y 2050 (abajo).	151
Figura 5.10. Dispersión interanual de la precipitación mensual en Las Carreras, representada en boxplots para 2020 (arriba) y 2050 (abajo).	152
Figura 5.11. Dispersión interanual de la precipitación mensual en Bolívar representada en boxplots para 2020 (arriba) y 2050 (abajo).	158
Figura 5.12. Dispersión interanual de la precipitación mensual en Anzaldo, representada en boxplots en 2020 (arriba) y 2050 (abajo).	164
Figura 5.13. Dispersión interanual de la precipitación mensual de Tarata, representada en boxplots en 2020 (arriba) y 2050 (abajo).	165
Figura 5.14. Dispersión interanual de la precipitación mensual en Monteagudo, representada en boxplots para 2020 (arriba) y 2050 (abajo).	171
Figura 5.15. Dispersión interanual de la precipitación mensual en San Lorenzo, representada para 2020 (arriba) y 2050 (abajo).	177

Tablas

Tabla 1.1.	Percepción local de los impactos climáticos a nivel nacional en base a cuestionarios.	23
Tabla 1.2.	Cambios proyectados en la temperatura (°C) y la precipitación (%) para grandes regiones del Centro y el Sur de América basados en Ruosteenoja.	33
Tabla 2.1.	Localización de las estaciones de trabajo, longitud y calidad del registro disponible en periodo de observación.	45
Tabla 3.1.	Coeficientes de correlación entre los valores de PP media mensual observada y simulada por tres MCG para el periodo histórico de estaciones situadas en diferentes áreas del país.	76
Tabla 3.2.	Coeficientes de correlación entre los valores de T _{máx} media mensual observada y simulada por tres MCG para el periodo histórico de estaciones situadas en diferentes áreas del país.	77
Tabla 3.3.	Coeficientes de correlación entre los valores de T _{mín} media mensual observada y simulada por tres MCG, periodo histórico para estaciones situadas en diferentes áreas del país.	78
Tabla 4.1.	Promedio y desviación estándar de los promedios mensuales de las precipitaciones diarias generadas por el modelo LARS-WG para las estaciones meteorológicas, consideradas dentro del área de influencia del PRRD.	96
Tabla 4.2.	Promedio y desviación estándar de los promedios mensuales de las T _{máx} diarias generadas por el modelo LARS-WG para las estaciones meteorológicas, consideradas dentro del área de influencia del PRRD.	100
Tabla 4.3.	Media y desviación estándar de los valores mensuales de las T _{mín} diarias generadas por el modelo LARS-WG para las estaciones meteorológicas consideradas dentro del área de influencia del PRRD.	105
Tabla 5.1.	Precipitación acumulada (mm) del registro histórico en los puntos analizados. Se presentan los datos promedio para los trimestres de enero a marzo (E-M), abril a junio (A-Jn), julio a septiembre (Jl-S), octubre a diciembre (O-D) y el promedio anual.	114
Tabla 5.2.	Porcentaje de cambio de precipitación trimestral (%) que sería recibida en el futuro cercano y a mediados de siglo.	115
Tabla 5.3.	Registro de precipitación acumulada (mm) en las décadas de 2020 y de 2050.	118
Tabla 5.4.	Tasa de ascenso en °C de los valores promedio mensuales simulados para el futuro.	182
Tabla 6.1.	Índices climáticos definidos por el ETCCDI y usados en el presente estudio, donde T _{mín} es la temperatura mínima, T _{máx} es la temperatura máxima y P la precipitación.	236
Tabla 6.2.	Agrupación de municipios mostrados en los mapas del presente informe.	237
Tabla 6.3.	Descripción cualitativa de los cambios esperados en los extremos climáticos hacia el 2050 para las mancomunidades analizadas.	250

Mapas

Mapa 2.1.	Tendencias de cambio de la temperatura en °C por cada 10 años desde 1960 y de la precipitación en mm/año para la Mancomunidad del Norte Paceño Tropical.	52
Mapa 2.2.	Tendencias de cambio de la temperatura en °C por cada 10 años desde 1960 y de la precipitación en mm/año para la Mancomunidad Norte Potosí.	53
Mapa 2.3.	Tendencias de cambio de la temperatura en °C por cada 10 años desde 1960 y de la precipitación en mm/año para la Mancomunidad Aymaras Sin Fronteras.	54
Mapa 2.4.	Tendencias de cambio de la temperatura en °C por cada 10 años desde 1960 y de la precipitación en mm/año para la Mancomunidad Gran Centro Potosí.	55
Mapa 2.5.	Tendencias de cambio de la temperatura en °C por cada 10 años desde 1960 y de la precipitación en mm/año para la Mancomunidad Cintis.	56
Mapa 2.6.	Tendencias de cambio de la temperatura en °C por cada 10 años desde 1960 y de la precipitación en mm/año para la Mancomunidad Región Andina de Cochabamba.	57
Mapa 2.7.	Tendencias de cambio de la temperatura en °C por cada 10 años desde 1960 y de la precipitación en mm/año para la Mancomunidad del Caine.	58
Mapa 2.8.	Tendencias de cambio de la temperatura en °C por cada 10 años desde 1960 y de la precipitación en mm/año para la Mancomunidad Chaco Chuquisaqueño.	59
Mapa 2.9.	Tendencias de cambio de la temperatura en °C por cada 10 años desde 1960 y de la precipitación en mm/año para la Mancomunidad Héroes de la Independencia.	60
Mapa 3.1.	Incrementos térmicos (°C) y cambios de PP (%) previstos por el MCG ECHAM5 para 2050 para el pixel que engloba la Mancomunidad Norte Paceño Tropical.	79
Mapa 3.2.	Incrementos térmicos (°C) y cambios de PP (%) previstos por el MCG ECHAM5 para 2050 para el pixel que engloba la Mancomunidad del Norte Potosí.	80
Mapa 3.3.	Incrementos térmicos (°C) y cambios de PP (%) previstos por el MCG ECHAM5 para 2050 para el pixel que engloba la Mancomunidad Aymaras Sin Fronteras.	81
Mapa 3.4.	Incrementos térmicos (°C) y cambios de PP (%) previstos por el MCG ECHAM5 para 2050 para el pixel que engloba la Mancomunidad Gran Centro Potosí.	82
Mapa 3.5.	Incrementos térmicos (°C) y cambios de PP (%) previstos por el MCG ECHAM5 para 2050 para el pixel que engloba la Mancomunidad Cintis.	83
Mapa 3.6.	Incrementos térmicos (°C) y cambios de PP (%) previstos por el MCG ECHAM5 para 2050 para el pixel que engloba la Mancomunidad de la Región Andina de Cochabamba.	84
Mapa 3.7.	Incrementos térmicos (°C) y cambios de PP (%) previstos por el MCG ECHAM5 para 2050 para el pixel que engloba la Mancomunidad del Caine.	85

Mapa 3.8.	Incrementos térmicos (°C) y cambios de PP (%) previstos por el MCG ECHAM5 para 2050 para el pixel que engloba la Mancomunidad del Chaco Chuquisaqueño.	86
Mapa 3.9.	Incrementos térmicos (°C) y cambios de PP (%) previstos por el MCG ECHAM5 para 2050 para el pixel que engloba la Mancomunidad Héroes de la Independencia.	87
Mapa 5.1.	Variación porcentual de la precipitación (%) anual 2020. Norte Paceño Tropical	125
Mapa 5.2.	Variación porcentual de la precipitación por trimestres en 2020. Norte Paceño Tropical	126
Mapa 5.3.	Variación porcentual de la precipitación (%) anual 2050. Norte Paceño Tropical	127
Mapa 5.4.	Variación porcentual de la precipitación por trimestre en 2050. Norte Paceño Tropical	128
Mapa 5.5.	Variación porcentual de la precipitación (%) anual 2020. Norte Potosí	132
Mapa 5.6.	Variación porcentual de la precipitación por trimestre en 2020. Norte Potosí	133
Mapa 5.7.	Variación porcentual de la precipitación (%) anual 2050. Norte Potosí	134
Mapa 5.8.	Variación porcentual de la precipitación por trimestre en 2050. Norte Potosí	135
Mapa 5.9.	Variación porcentual de la precipitación (%) anual 2020. Aymaras Sin Fronteras	139
Mapa 5.10.	Variación porcentual de la precipitación por trimestre en 2020. Aymaras Sin Fronteras	140
Mapa 5.11.	Variación porcentual de la precipitación (%) anual 2050. Aymaras Sin Fronteras	141
Mapa 5.12.	Variación porcentual de la precipitación por trimestre 2050 Aymaras Sin Fronteras	142
Mapa 5.13.	Variación porcentual de la precipitación (%) anual 2020. Gran Centro Potosí	146
Mapa 5.14.	Variación porcentual de la precipitación por trimestre en 2020. Gran Centro Potosí	147
Mapa 5.15.	Variación porcentual de la precipitación (%) anual 2050. Gran Centro Potosí	148
Mapa 5.16.	Variación porcentual de la precipitación por trimestre en 2050. Gran Centro Potosí	149
Mapa 5.17.	Variación porcentual de la precipitación (%) anual 2020. Cintis	153
Mapa 5.18.	Variación porcentual de la precipitación por trimestre en 2020. Cintis	154
Mapa 5.19.	Variación porcentual de la precipitación (%) anual 2050. Cintis	155
Mapa 5.20.	Variación porcentual de la precipitación por trimestre 2050. Cintis	156
Mapa 5.21.	Variación porcentual de la precipitación (%) anual 2020. Región Andina de Cochabamba	159
Mapa 5.22.	Variación porcentual de la precipitación por trimestre 2020. Región Andina de Cochabamba	160

Mapa 5.23. Variación porcentual de la precipitación (%) anual 2050. Región Andina de Cochabamba	161
Mapa 5.24. Variación porcentual de la precipitación por trimestre 2050. Región Andina de Cochabamba	162
Mapa 5.25. Variación porcentual de la precipitación (%) anual 2020. Caine.	166
Mapa 5.26. Variación porcentual de la precipitación por trimestre 2020. Caine	167
Mapa 5.27. Variación porcentual de la precipitación (%) anual 2050. Caine.	168
Mapa 5.28. Variación porcentual de la precipitación por trimestre 2050. Caine	169
Mapa 5.29. Variación porcentual de la precipitación (%) anual 2020. Chaco Chuquisaqueño	172
Mapa 5.30. Variación porcentual de la precipitación por trimestre 2020. Chaco Chuquisaqueño	173
Mapa 5.31. Variación porcentual de la precipitación (%) anual 2050. Chaco Chuquisaqueño	174
Mapa 5.32. Variación porcentual de la precipitación por trimestre en 2050. Chaco Chuquisaqueño	175
Mapa 5.33. Variación porcentual de la precipitación (%) anual 2020. Héroes de la Independencia	178
Mapa 5.34. Variación porcentual de la precipitación por trimestre en 2020. Héroes de la Independencia	179
Mapa 5.35. Variación porcentual de la precipitación (%) anual 2050. Héroes de la Independencia	180
Mapa 5.36. Variación porcentual de la precipitación por trimestre en 2050. Héroes de la Independencia	181
Mapa 5.37. Incremento de la temperatura anual 2020. Norte Paceño Tropical	187
Mapa 5.38. Incremento de la temperatura por trimestre en 2020. Norte Paceño Tropical	188
Mapa 5.39. Incremento de la temperatura anual 2050. Norte Paceño Tropical	189
Mapa 5.40. Incremento de la temperatura por trimestre en 2050. Norte Paceño Tropical	190
Mapa 5.41. Incremento de la temperatura anual 2020. Norte Potosí	192
Mapa 5.42. Incremento de la temperatura por trimestre en 2020. Norte Potosí	193
Mapa 5.43. Incremento de la temperatura anual 2050. Norte Potosí	194
Mapa 5.44. Incremento de la temperatura por trimestre en 2050. Norte Potosí	195
Mapa 5.45. Incremento de la temperatura anual 2020. Aymaras Sin Fronteras	197
Mapa 5.46. Incremento de la temperatura por trimestre en 2020. Aymaras Sin Fronteras	198
Mapa 5.47. Incremento de la temperatura anual 2050. Aymaras Sin Fronteras	199
Mapa 5.48. Incremento de la temperatura por trimestre en 2050. Aymaras Sin Fronteras	200
Mapa 5.49. Incremento de la temperatura anual 2020. Gran Centro Potosí	202

Mapa 5.50. Incremento de la temperatura por trimestre en 2020. Gran Centro Potosí	203
Mapa 5.51. Incremento de la temperatura anual 2050. Gran Centro Potosí	204
Mapa 5.52. Incremento de la temperatura por trimestre en 2050. Gran Centro Potosí	205
Mapa 5.53. Incremento de la temperatura anual 2020. Cintis	207
Mapa 5.54. Incremento de la temperatura por trimestre en 2020. Cintis	208
Mapa 5.55. Incremento de la temperatura anual 2050. Cintis	209
Mapa 5.56. Incremento de la temperatura por trimestre en 2050. Cintis	210
Mapa 5.57. Incremento de la temperatura anual 2020. Región Andina de Cochabamba	212
Mapa 5.58. Incremento de la temperatura por trimestre en 2020. Región Andina de Cochabamba	213
Mapa 5.59. Incremento de la temperatura anual 2050. Región Andina de Cochabamba	214
Mapa 5.60. Incremento de la temperatura por trimestre en 2050. Región Andina de Cochabamba	215
Mapa 5.61. Incremento de la temperatura anual 2020. Caine	217
Mapa 5.62. Incremento de la temperatura por trimestre en 2020. Caine	218
Mapa 5.63. Incremento de la temperatura anual 2050. Caine	219
Mapa 5.64. Incremento de la temperatura por trimestre en 2050. Caine	220
Mapa 5.65. Incremento de la temperatura anual 2020. Chaco Chuquisaqueño	222
Mapa 5.66. Incremento de la temperatura por trimestre en 2020. Chaco Chuquisaqueño	223
Mapa 5.67. Incremento de la temperatura anual 2050. Chaco Chuquisaqueño	224
Mapa 5.68. Incremento de la temperatura por trimestre en 2050. Chaco Chuquisaqueño	225
Mapa 5.69. Incremento de la temperatura anual 2020. Héroes de la Independencia	227
Mapa 5.70. Incremento de la temperatura por trimestre en 2020. Héroes de la Independencia	228
Mapa 5.71. Incremento de la temperatura anual 2050. Héroes de la Independencia	229
Mapa 5.72. Incremento de la temperatura por trimestre en 2050. Héroes de la Independencia	230

Poster

Poster 6.1a.	Ocurrencia de extremos climáticos relacionados con la temperatura en la Mancomunidad Norte Paceño Tropical	251
Poster 6.1b.	Ocurrencia de extremos climáticos relacionados con la precipitación en la Mancomunidad Norte Paceño Tropical	252
Poster 6.2a.	Ocurrencia de extremos climáticos relacionados con la temperatura en la Mancomunidad Norte Potosí	253
Poster 6.2b.	Ocurrencia de extremos climáticos relacionados con la precipitación en la Mancomunidad Norte Potosí	254
Poster 6.3a.	Ocurrencia de extremos climáticos relacionados con la temperatura en la Mancomunidad Aymaras Sin Fronteras	255
Poster 6.3b.	Ocurrencia de extremos climáticos relacionados con la precipitación en la Mancomunidad Aymaras Sin Fronteras	256
Poster 6.4a.	Ocurrencia de extremos climáticos relacionados con la temperatura en la Mancomunidad Gran Centro Potosí	257
Poster 6.4b.	Ocurrencia de extremos climáticos relacionados con la precipitación en la Mancomunidad Gran Centro Potosí	258
Poster 6.5a.	Ocurrencia de extremos climáticos relacionados con la temperatura en la Mancomunidad Cintis	259
Poster 6.5b.	Ocurrencia de extremos climáticos relacionados con la precipitación en la Mancomunidad Cintis	260
Poster 6.6a.	Ocurrencia de extremos climáticos relacionados con la temperatura en la Mancomunidad Región Andina de Cochabamba	261
Poster 6.6b.	Ocurrencia de extremos climáticos relacionados con la precipitación en la Mancomunidad Región Andina de Cochabamba	262
Poster 6.7a.	Ocurrencia de extremos climáticos relacionados con la temperatura en la Mancomunidad Caine	263
Poster 6.7b.	Ocurrencia de extremos climáticos relacionados con la precipitación en la Mancomunidad Caine	264
Poster 6.8a.	Ocurrencia de extremos climáticos relacionados con la temperatura en la Mancomunidad del Chaco Chuquisaqueño	265
Poster 6.8b.	Ocurrencia de extremos climáticos relacionados con la precipitación en la Mancomunidad del Chaco Chuquisaqueño	266
Poster 6.9a.	Ocurrencia de extremos climáticos relacionados con la temperatura en la Mancomunidad Héroes de la Independencia	267
Poster 6.9b.	Ocurrencia de extremos climáticos relacionados con la precipitación en la Mancomunidad Héroes de la Independencia	268

Prólogo

De un tiempo a esta parte se ha estado manejando de manera cada vez más continua el término de escenarios climáticos, que se entiende como un futuro probable del clima ante factores subyacentes del desarrollo y las emisiones de gases de efecto invernadero que eso implicaría. Primero, fueron los Modelos de Circulación General que sirvieron para recrear posibles estados futuros del clima global que sirvieron para las discusiones de política climática global. Posteriormente, se demandaron aproximaciones más locales de estos escenarios y fueron varios los esfuerzos de los centros de investigación mundial que fueron desarrollando Modelos de Circulación Regional que aproximaron mejor las estimaciones a escalas de 20 x 20 Km.

Sin embargo, la demanda de conocer estos escenarios en los niveles locales se ha tornado cada vez más fuerte ya que es en estos ámbitos donde los impactos del cambio climático se hacen más evidentes y donde se deben producir los procesos de adaptación a los impactos del cambio climático, siendo que los Modelos de Circulación no responden a dudas y problemas locales. Ante eso, dos corrientes de desarrollo de escenarios han surgido y se los ha denominado de reducción de escala (downscaling): uno denominado dinámico, que hace uso de ecuaciones complejas y de interacciones con el uso de supercomputadoras que no necesariamente se cuentan en países como Bolivia; y el otro llamado estadístico, mucho más accesible a las condiciones locales y que considera salidas de los modelos regionales y la estadística histórica de los datos existentes a nivel local.

Por ello, en un esfuerzo de aportar a un proceso de discusión de escenarios climáticos locales y que sirvan para entender mejor los niveles de implicancia en los municipios, no sólo en las variaciones promedios de precipitación y de temperatura, sino en otros factores que hacen al incremento o decremento de las amenazas climáticas, es que el Programa de Reducción del Riesgo de Desastres (PRRD) de la Cooperación Suiza, implementado por HELVETAS Swiss Intercooperation, ha llevado adelante este estudio en los municipios que conforman nueve de las mancomunidades con las que se ha estado trabajando.

El valor agregado del estudio radica en que a partir de los escenarios climáticos generados con el downscaling estadístico, se establece un análisis de las incidencias sobre los factores de riesgo que podrían darse en los diferentes municipios y mancomunidades, constituyéndose en una herramienta importante para redefinir con el tiempo los mapas de riesgo en las zonas de intervención. Con esta herramienta y análisis de sus realidades socio-económicas locales, los municipios pueden generar nuevos mapas de riesgo y, por lo tanto, iniciar acciones de adaptación a las nuevas condiciones climáticas considerando factores positivos y negativos.

Este documento servirá a los investigadores como material de estudio y controversia ya que los resultados alcanzados ponen, en algunos casos, en duda ciertos paradigmas del cambio climático por lo menos a nivel de impacto. Desde el PRRD, somos conscientes que el proceso de desarrollo del conocimiento se basa en un constante devenir que se nutre de estudios como el presente.

Debemos agradecer la experiencia y el apoyo de la Dra. Magalí García en la elaboración del análisis, así como la discusión en torno a los resultados por parte de Ivar Arana, Claudia Rivadeneira, y naturalmente, a la Cooperación Suiza por apoyar este tipo de iniciativas.

Oscar Paz Rada
Coordinador del PRRD



Capítulo 1

Cambio climático y uso de Modelos de Circulación General en los Andes bolivianos



1.1. INTRODUCCIÓN

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) describe a este proceso como la variación climática atribuida directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que viene a sumarse a la variabilidad climática natural observada en periodos de tiempo comparables. Para el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), el cambio climático es el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante análisis estadísticos) a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un periodo prolongado, generalmente cifrado en decenios o en periodos más largos. Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana. La CMNUCC hace también una distinción entre “cambio climático”, atribuible a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera, y “variabilidad del clima”, atribuible a causas naturales (IPCC, 2007).

En los últimos 150 años se evidenció una elevación de la temperatura superficial promedio del planeta. Desde 1850, los años más cálidos en el registro de temperatura del aire superficial mundial fueron 1998 y 2005. El periodo 1995 - 2006 se clasifica como uno de los de mayor grado de calor. La temperatura superficial media mundial aumentó a partir de 1950 en $0,76 \pm 0,19^{\circ}\text{C}$ y la tendencia lineal del calentamiento global muestra que este fenómeno se ha acelerado en los últimos 50 años.

Los impactos presumibles y observados del cambio climático son entre otros (Aliaga, J y Paredes, M. 2010):

- Incremento de la temperatura.
- Elevación del nivel del mar (9-88 cm para el 2100), los que causarían inundaciones en zonas bajas y variación en la intensidad y frecuencia de eventos climáticos extremos.
- Desplazamiento de zonas climáticas de mayor altitud o latitud, perturbando bosques, desiertos, praderas y otros ecosistemas.
- Desaparición de importantes superficies de nieve y hielo.
- Incremento de los impactos negativos de enfermedades y pestes en animales y plantas, con efectos adversos sobre la producción. La distribución geográfica de enfermedades transmitidas por vectores y de enfermedades infecciosas, podrían expandirse hacia el Sur y hacia alturas mayores si la temperatura y la precipitación aumentaran por los muy probables efectos del cambio climático.
- Reducción de sistemas de agua dulce y sus ecosistemas que son potencialmente sensibles a los cambios climáticos y vulnerables a las fluctuaciones climáticas de corto tiempo.
- Impactos potenciales futuros del clima y de los cambios en el uso de la tierra podrían ser extensos y costosos.

Sin embargo, estos impactos pueden ser extremadamente variables en función de la exposición de la comunidad en análisis. En el caso específico de Bolivia, la evaluación de estos cambios e impactos es muy compleja pues la fisiografía del país provoca dinámicas atmosféricas muy especiales que



se reflejan en macro y microclimas específicos que son difíciles de analizar. El IPCC (2007) estima que el aumento de la temperatura para Sudamérica será de entre 1,8 a 4,5°C con cambios en las precipitaciones entre -12 a +12% para el 2080. Se aprecia que estos rangos son muy amplios y entrañan generalizaciones que son difíciles de convertir en acciones concretas para decisores y para propuestas de trabajos de adaptación.

Por ello, es importante evaluar en forma puntual, cuáles son los escenarios de cambio de las variables climáticas más probables para Bolivia y para las comunidades de interés. En la actualidad, se han generado numerosos estudios que han descrito la dinámica climática y el comportamiento probable del clima futuro para Bolivia y Sur América. En este capítulo, los principales conceptos desarrollados en dichos estudios serán descritos y sintetizados con un resumen sintético de sus resultados y previsiones para el futuro.

1.2. EL CLIMA EN BOLIVIA

Para comprender los resultados de los estudios del comportamiento climático en el futuro, primeramente se requiere describir en forma sucinta los mecanismos que definen el clima de Bolivia, los que ayudarán al análisis de los resultados provistos por los estudios.

Gran parte del territorio boliviano se origina fisiográficamente como consecuencia de la formación de la cordillera de los Andes. Esta se constituye en una formidable barrera para la circulación atmosférica actuando como obstáculo para la circulación entre las áreas amazónicas de baja altitud al Este y las características zonas de baja precipitación del Pacífico al Oeste. Esta particular posición entre dos sistemas climáticos de magnitud hace que sea pro-

pensa a situaciones climáticas muy variables originadas en la contraposición y magnitud de fuerzas de ambas. En la parte central de esta cordillera, se extiende la planicie que da lugar al Altiplano y en sus estribaciones se origina una serie de microclimas que, gracias a su altitud y cercanía con el Ecuador, presenta combinaciones climáticas únicas en el mundo. La orografía entonces juega un papel importante en el clima de Bolivia pues su temperatura y precipitación dependen fuertemente de la distribución altitudinal y en menor intensidad de la latitud de su territorio. Casi dos tercios de Bolivia (60% aproximadamente) se hallan en regiones con alturas menores a 500 msnm, 24% del territorio se encuentra entre 500 y 3.500 msnm y el restante 16% por encima de esa altura en la zona Andina.

Esta climatología tiene un fuerte impacto sobre la disponibilidad de recursos hídricos en las tierras bajas, tanto al Este como al Oeste y podría estar ligada con la climatología a nivel continental y quizás hasta hemisférica (Garreaud et al, 2003, Zhou and Lau, 1998).

Un análisis detallado muestra que el clima de Bolivia se determina principalmente por:

- La posición geo-astronómica entre los 10 y 22° LS, la cual determina las condiciones climáticas de trópico, con moderada estacionalidad media térmica y radiativa.
- La topografía y la altitud (desde los 200 hasta por encima de los 3.800 msnm), la cual determina claros gradientes de temperaturas.

1.2.1. Precipitación en Bolivia

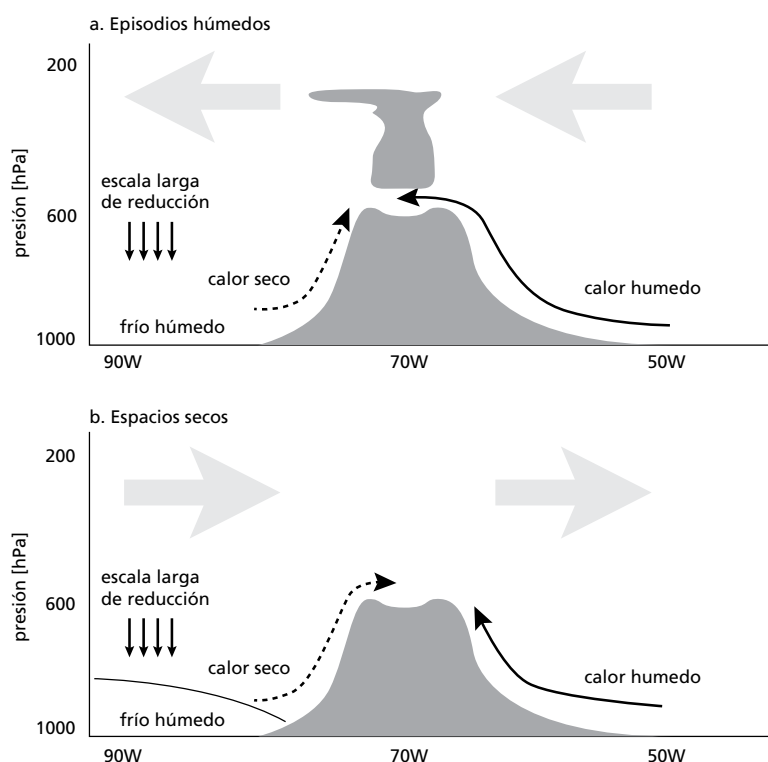
Con respecto a la lluvia, la circulación atmosférica zonal determina en gran parte la distribución

temporal y espacial de las precipitaciones. El continente sudamericano y dentro de él, el territorio boliviano, se encuentran bajo la influencia de tres sistemas semi-permanentes de presión alta (baja precipitación) y uno de presión baja (precipitaciones elevadas). Los sistemas de presión alta son los anticiclones del Atlántico, del Pacífico Sur y del Caribe, los cuales casi rodean el continente. El sistema de baja presión corresponde a la Zona de Convergencia Inter-Tropical (ZCIT), la cual se encuentra en movimiento entre los 15° Norte y 15° Sur siguiendo el movimiento aparente del sol o el verano de cada hemisferio. Las diferencias de presión entre los sistemas anticiclónicos y la ZCIT, generan flujos de aire, los cuales se mueven hacia la izquierda por la rotación de la Tierra, y dan origen a los vientos alisios del Sureste. Durante el invierno del hemisferio Sur (mayo a septiembre), la ZCIT se retira hacia el hemisferio Norte y los anticiclones penetran más hacia el continente, debilitando la influencia de los vientos alisios de componente Este (Figura N° 1.1.), y dando lugar a la época seca en la mayor parte del territorio de Bolivia y del Perú.

En el caso específico de Bolivia, especialmente en invierno, es principalmente el Anticiclón del Pacífico con sus vientos secos provenientes del Oeste, el que previene a la zona de recibir precipitación en invierno (Garreaud, 2003). Durante el verano (octubre a marzo), el fuerte calentamiento terrestre genera una diferencia térmica que favorece el movimiento hacia el hemisferio Sur de la ZCIT (precipitación abundante) hasta los 15° de latitud Sur y este desplazamiento arrastra a lo largo aire húmedo y caliente desde la zona amazónica y/o atlántica (Marengo, *et al.* 2004) debilitando la presencia del seco Anticiclón del Pacífico. Los movimientos convectivos combinados con la humedad continental recibida, dan lugar a la formación de una gran acumulación nubosa y el inicio de la época lluviosa (Garreaud, 2003). Dado que gran parte de esa precipitación se concentra entre diciembre y febrero, se conoce que la lluvia en Bolivia tiene una típica característica monomodal.

Figura 1.1.

Descripción esquemática de los patrones de circulación del aire en un corte latitudinal típico del Altiplano boliviano. a) Episodios de lluvia. b) Episodios secos. Las flechas grandes sin color indican la dirección predominante de la circulación troposférica. Las flechas sólidas describen la circulación del aire húmedo de componente Este. Las flechas punteadas describen la circulación del aire seco de componente Oeste. Las flechas verticales muestran la elevada presión sobre el Pacífico. (Extraído de Garreaud, *et al.*, 2003).



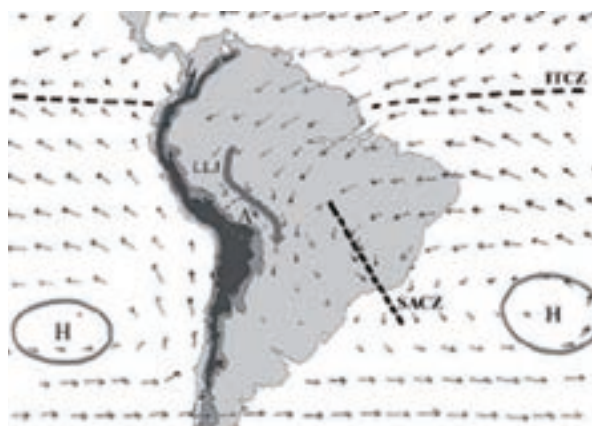
Durante la época de lluvias, el denominado Monzón sudamericano (SAMS, *South American Monsoon System*, por sus siglas en inglés) controla ese transporte de humedad que se genera por la intensa actividad convectiva en la zona central-Oeste de Brasil y que posteriormente es transportada hacia Bolivia por los vientos alisios (Marengo, *et al.* 2004). Debido a que la cordillera de los Andes actúa como una barrera por la gran gradiente altitudinal, el viento proveniente del Este se desvía hacia el Sur o es forzado a elevarse hacia los valles y la zona andina dejando en el camino la humedad transportada en forma de lluvia (Marengo, *et al.* 2002). Este comportamiento está modulado por características de escala sinóptica como la llamada “Alta de Bolivia”, que es un anticiclón estacionario ubicado a una altura aproximada de 200 hPa cuya posición varía dependiendo de la emisión de calor latente en el Amazonas (Lenters & Cook, 1997 y Vizy & Cook, 2006) de la región de baja presión de origen térmico en el Chaco, y principalmente, del comportamiento de la corriente en chorro de bajo nivel de Sudamérica (SALLJ, *South American Low Level Jet* por sus siglas en inglés) al Este de los Andes (Vera, *et al.* 2006).

Un retraso en los procesos convectivos en el Amazonas provoca lluvias de mayor magnitud y corta duración que lo normal en los Andes. De esta manera, se deduce que parte de la humedad en la zona andina boliviana y del inicio de la época de lluvias depende de su transporte desde las tierras bajas al Este, por lo que alteraciones locales en ella -como el intenso cambio de uso de la tierra, fragmentación de ecosistemas u obras de magnitud- podrían provocar impactos de consideración en la precipitación de la zona andina.

El SALLJ es una corriente de vientos que transportan humedad hacia el Sureste y que tiene un marcado comportamiento estacional siendo más prominente durante el verano del hemisferio Sur y más débil en el invierno correspondiente (Marengo, *et al.* 2002). El SALLJ alimenta la cuenca de El Plata al proveer gran cantidad de humedad a esa región. Sin embargo, muy poca humedad se precipita en la zona del Chaco boliviano (Marengo, *et al.* 2004).

Figura 1.2.

Esquematización de los elementos que determinan el régimen pluviométrico de Bolivia. (Andrade & Blacutt, 2010).



De esta manera, se tiene la zonificación pluvial de Bolivia que ocurre de la siguiente forma:

1. El Altiplano y las cabeceras de valle se caracterizan por épocas secas y lluviosas muy marcadas, motivadas por el transporte de humedad del Este. En verano, debido al calentamiento de la superficie, se inician procesos convectivos de gran intensidad que dan origen a tormentas eléctricas de moderada y elevada intensidad (Garreaud, 1999), lo cual en muchos casos provoca severas inundaciones y crecidas. Se estima que más del 80% de la precipitación total del año que ocurre en el Altiplano se da entre diciembre y marzo (Vuille, 1999). En invierno, el empuje del Anticiclón del Pacífico hace que la zona enfrente un periodo de mucha sequedad, sólo alterada por las nevadas provocadas por la invasión de frentes fríos.
2. La parte baja se puede dividir en por lo menos dos regiones: a) una húmeda con alta precipitación, ligada a la región amazónica hacia el Norte donde el problema de extremos más frecuente se concentra en las inundaciones y b) otra hacia el Sur, mucho más seca en la zona denominada Chaco alrededor de 20° S donde la sequía es el problema persistente más importante.

3. La región de altura intermedia se caracteriza por tener un alto gradiente altitudinal que produce elevadas precipitaciones por convección orográfica durante todo el año. Gracias a esta característica, en la región hay alta biodiversidad.
4. Aunque toda la descripción sinóptica previa está presente la mayor parte del año, la intensidad relativa de sus componentes varía a lo largo de este periodo permitiendo producción y transporte de humedad de una región a otra o inhibiendo la misma. Adicionalmente, eventos como El Niño y La Niña, que son las fases positivas (calientes) y negativas (frías) de un fenómeno conocido como *El Niño Southern Oscillation* (ENSO, por sus siglas en inglés) modifican drásticamente el comportamiento climático en muchas regiones del territorio boliviano (Garreaud & Aceituno, 2001).

1.2.2. Radiación y temperatura en Bolivia

El régimen anual de la radiación solar disponible y la variación térmica en la superficie boliviana están condicionados por factores geográficos y meteorológicos. Entre los principales, destacan la localización de Bolivia en la franja tropical, su gran variabilidad altitudinal y el régimen de nubosidad de la zona. La localización en latitudes relativamente bajas implica una amplitud moderada del ciclo anual de radiación solar disponible durante días despejados. La radiación solar diaria en el límite externo de la atmósfera en diciembre es aproximadamente de 70%, superior al valor que ocurre en junio. Sin embargo, dado que la precipitación ocurre en el verano, la elevada nubosidad durante estos meses reduce la disponibilidad energética en la superficie, por lo que la máxima disponibilidad radiativa se alcanza durante el periodo de transición primavera-verano o verano-otoño.

En zonas del Altiplano y valles interandinos los principios del gradiente térmico negativo, prevalente en la tropósfera, incide en las bajas temperaturas comparadas con puntos ubicados en la misma latitud pero a altitudes menores. El menor espesor de la columna atmosférica con poca can-

tidad de moléculas gaseosas sobre las regiones de altitud moderada a elevada, disminuye la radiación neta disponible en la superficie. Colabora a este fenómeno la baja cantidad de vapor de agua existente en el aire que favorece una mayor pérdida radiativa nocturna desde la superficie y, por lo tanto, un rápido enfriamiento del aire luego de la puesta de sol, particularmente durante el invierno cuando la atmósfera es comparativamente más seca y con menor nubosidad. Por esta razón, las zonas de mayor altitud son altamente propensas a sufrir heladas en invierno y moderadamente propensas a ello en verano. El aumento de la humedad atmosférica y de la nubosidad durante el verano, contribuyen a un enfriamiento nocturno más moderado durante esta época del año.

La variación anual de la temperatura máxima diaria está fuertemente condicionada por los cambios estacionales de la radiación solar disponible a nivel de superficie. Por ello la temperatura máxima presenta una amplitud relativamente pequeña con sus valores máximos, inmediatamente antes del inicio de la temporada de lluvias. La amplitud del ciclo anual de la temperatura mínima es comparativamente mayor, condicionada principalmente por el fuerte enfriamiento radiativo nocturno durante el invierno, produciéndose elevados riesgos de heladas cuanto mayor la altitud del punto y observándose en invierno el mayor contraste entre las condiciones diurna y nocturna.

1.3. CAMBIO CLIMÁTICO

En las últimas décadas, el cambio climático ha sido tema de numerosos estudios por la influencia que podría tener hacia la humanidad. En Bolivia sus efectos se han ido sintiendo desde hace tres décadas y cada vez con mayor intensidad. Los parámetros de mayor cambio son los térmicos. Sin embargo, la precipitación podría también tener variaciones. Los cambios en la temperatura global registrada asociados al retroceso y a la desaparición de los glaciares y a la alteración de los caudales, podría afectar el acceso a fuentes de agua para el mantenimiento de los ecosistemas, la producción agrícola y el consumo humano.

En la actualidad, los sistemas agrícolas ya se ven afectados por los patrones anómalos de lluvia y la subida de temperaturas. Los ecosistemas montañosos típicos de Bolivia (páramos, humedales de altitud, bosques nublados) se encuentran entre los ecosistemas más sensibles a los cambios climáticos, pues su ubicación altitudinal determina una fuerte dependencia de la variabilidad térmica. Aunque no existen evidencias científicas probadas, hay datos recientes que sugieren que la alteración de los ciclos hidrológicos de los ecosistemas de altitud, podrían estar relacionados con la alta incidencia de incendios forestales ocurridos en la última década. Dicha alteración de los ciclos hidrológicos causaría desequilibrios que pueden repercutir incluso en la región amazónica.

Como se mencionó, La Niña y El Niño (Oscilación del Sur - ENOS) son alteraciones climáticas periódicas que representan una amenaza por los impactos recurrentes sobre el sistema climático de Bolivia. Estudios realizados en Perú sugieren que, a consecuencia del cambio climático, este fenómeno podría aumentar en intensidad y, probablemente, en frecuencia. Como indicador se menciona que en los últimos siete años, las emergencias por inundaciones, sequías, deslizamientos y heladas, entre otros, se han duplicado mostrando la vulne-

rabilidad de la región y la necesidad de respuesta a dichos eventos (AGRIFOR, 2009), las que, sin embargo, también podrían deberse a un incremento en el nivel de exposición de las poblaciones, por lo que se requiere profundizar el análisis con más investigación.

Una de las regiones más importantes en las que se han desarrollado estudios del cambio climático es la región de Atacama, pues su hiperaridez puede dar datos acerca de las variaciones climáticas observadas. En esta región las condiciones ambientales han cambiado afectando sistemas abióticos como el ciclo del agua, y bióticos que responden rápidamente al cambio climático.

La Tabla 1.1 muestra la percepción de cuáles son los indicadores más evidentes del cambio climático en diferentes países sudamericanos, obtenida en base a cuestionarios. Como se aprecia, para los países de la región, el indicador común y más importante de cambio climático, se relaciona con el retroceso de glaciares, mientras que las percepciones de peligro de sequía y/o inundaciones son dispersas (AGRIFOR, 2009).

Tabla 1.1.

Percepción local de los impactos climáticos a nivel nacional en base a cuestionarios

País	Efectos			
	Variaciones térmicas	Variación precipitaciones	Fenómenos extremos	Aumento del nivel del mar
Bolivia	Retroceso glaciares	Inundaciones/Sequías Granizadas	Intensificación El Niño y La Niña	—
Chile	Retroceso glaciares	Sequías	—	—
Colombia	Retroceso glaciares	—	—	Inundaciones/Salinización de acuíferos
Ecuador	Retroceso glaciares	Inundaciones/Lluvias	—	—
Perú	Retroceso glaciares	Lluvias/Desertificación	Intensificación El Niño y La Niña/Emergencias por desastres naturales	Aumento del nivel del mar/ Cambios de temperatura/ Corriente Humbolt

Fuente: AGRIFOR, (2009)

1.3.1. Impactos observados del cambio climático en Bolivia

a. Temperatura

Los impactos del cambio climático no son iguales para todas las regiones del planeta. En Bolivia por ejemplo, parecería que los impactos son más notorios, especialmente en los lugares de mayor altitud. AGRIFOR, (2009) reporta que hasta 1990 se registraron a nivel mundial cambios en la temperatura global de 0,2 °C por década, mientras que entre 1974 y 1998, este incremento en la región de los Andes Centrales fue de 0,34 °C/década; es decir, un 70% más que el promedio mundial.

Vuille y Bradley (2000) en un estudio que involucró los datos térmicos de estaciones meteorológicas obtenidos durante seis décadas (1939 – 1998) en los Andes Tropicales (1°N – 23°S; 0 – 5.000 msnm) evaluaron la inconsistencia que existía entre el retroceso de los glaciares y el leve enfriamiento reportado en las capas inferiores de la tropósfera después de 1979. Sus resultados muestran que la temperatura media anual se incrementó de 0.10° a 0.11°C /década desde 1939, y se acentúa más a mediados de los años 70 cuando las temperaturas, repentinamente, empezaron a aumentar más rápidamente que

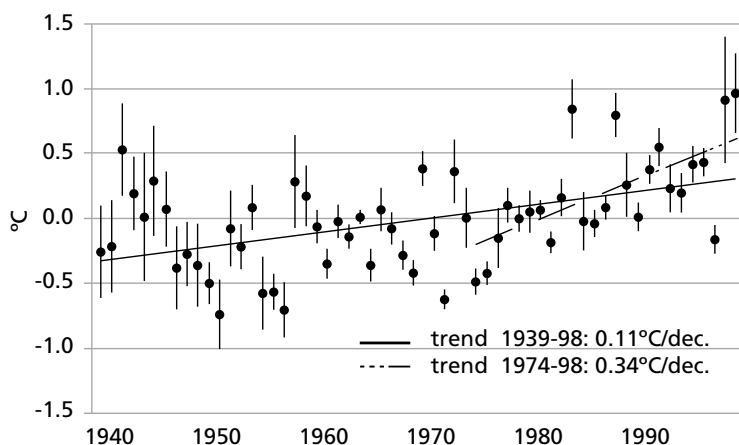
las observaciones globales. Por ejemplo en los últimos 40 años del análisis, el incremento se ha duplicado a 0.20°C/década y triplicado en los últimos 25 años con 0.34°C/década, como se muestra en la Figura 1.3.

Vuille *et al.*, (2003) indican un calentamiento promedio de 0,09° - 0,15°C/década entre 1950 y 1994, resultados muy similares a Vuille y Bradley (2000) y que las elevaciones bajas del Oeste han experimentado un mayor calentamiento, mientras que el calentamiento en el Este se redujo (Figura 1.4.). Así también, estudios publicados por Garreaud (2010) encontraron, a través de información de radiosondas y satélites a lo largo de la costa Norte y centro de Chile, un enfriamiento significativo (-0.25°C/década) desde 1979, presumiblemente debido al incremento de los vientos, efecto que no fue percibido en zonas altas.

En la variabilidad a corto plazo, Vuille y Bradley (2000) afirman que la temperatura es controlada especialmente por los eventos ENOS. En efecto, las anomalías de temperatura registradas a nivel de suelo son precedidas por anomalías en la temperatura superficial del Pacífico central y curiosamente están asociadas a un aumento de entre 1 y 3°C en la temperatura atmosférica en los Andes.

Figura 1.3.

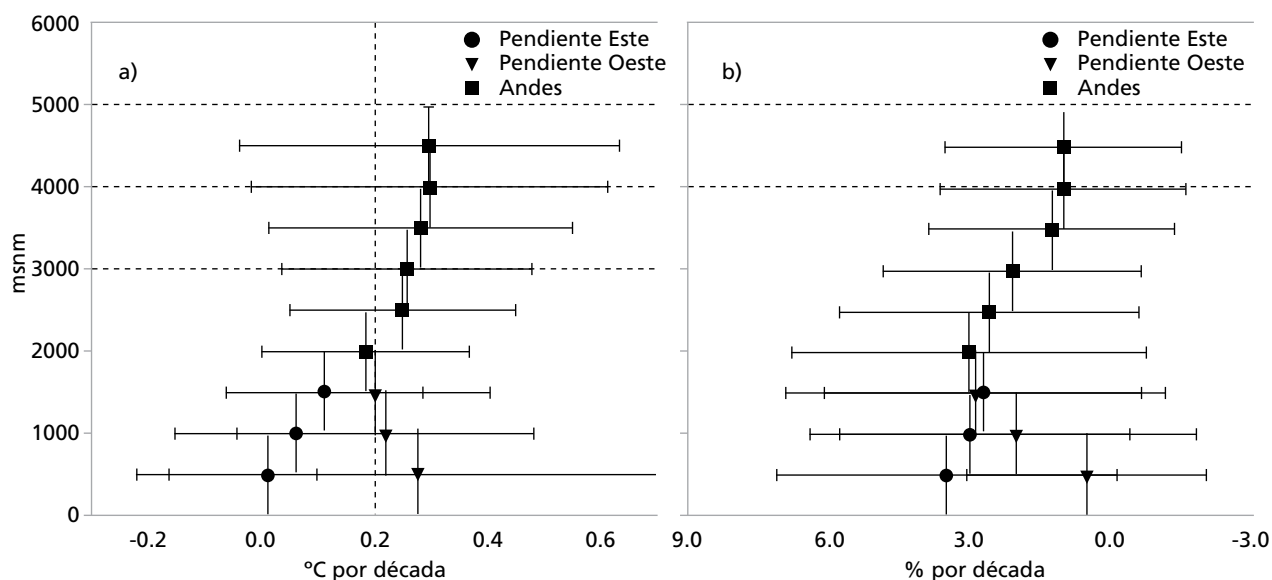
Desviación de la temperatura anual de un promedio de 1961-1990 en los Andes Tropicales (latitud 1°N – 23°S) entre 1939 y 1998. Tendencias basadas en la regresión OLS (Ordinary Least Squares por sus siglas en inglés). Las barras verticales muestran 2 errores estándar de la media del promedio anual.



Fuente: Vuille y Bradley (2000).

Figura 1.4.

Tendencia de temperatura media anual como función de la elevación (msnm) basado en la simulación ECHAM-4 (1978-1998). Las barras verticales indican el rango de elevación (1000 m) para el cual la tendencia es válida. Las barras horizontales son los límites de la tendencia al 95% de significancia. (a) (°C década⁻¹), (b) %. Notar que la escala para el eje x es contraria a la Figura 1.4.b.



Fuente: (Vuille *et al.*, 2003).

Desde un punto de vista térmico y basados en observaciones históricas, varios autores mencionan que aunque en la zona el aumento de temperatura fue significativo a cualquier altitud, éste podría ser menos importante en la parte oriental de los Andes Centrales y a más de 3.500 msnm. Esto podría ser explicado por la cobertura vegetal, pues de acuerdo a Soria (2010), a escala regional, en la Cordillera Real (15.8° a 16.7° Latitud Sur), el análisis de observaciones en tierra e imágenes satelitales a resolución 30 m, demuestran que los impactos de cambio climático son más relevantes en regiones con pobre cobertura vegetal y cobertura glaciar.

En Bolivia, el PNCC (2006 y 2007) inició los estudios de análisis de tendencias de cambios térmicos y encontró incrementos térmicos sostenidos en la mayor parte del país, especialmente en las temperaturas máximas. Las temperaturas mínimas mostraron comportamientos diferentes en función de la localización del punto y del manejo local. Se percibió que algunas zonas especialmente andinas e interandinas mostraron cierta tendencia al descenso de la temperatura mínima, especialmente en invierno, debido

probablemente al mal manejo y tendencia a la desertificación local. Valdivia *et al.* (2013) confirman estas tendencias para el Altiplano boliviano, mostrando que en promedio, las temperaturas máximas después de 1983 fueron sostenidamente superiores en la zona, mientras que las mínimas pudieron reducir en el Sur (Figura 1.5.).

Un estudio reciente de Seiler *et al.*, (2013) demuestra que en los Andes bolivianos existe una relación entre el incremento de la temperatura del aire y los eventos ENSO siendo que también la Oscilación Decadal del Pacífico presenta influencias en estos valores. Los autores mencionan que las temperaturas máximas en Bolivia se incrementaron en promedio a una tasa de 0.1°C/decada con mayor intensidad en la zona andina y en el invierno (Figura 1.6.), aunque no presentan información sobre la variación de las temperaturas mínimas.

b. Precipitación

Como fue descrito en 1.2.1., la influencia de las montañas sobre la intensidad, posición y duración de las precipitaciones convectivas es ampliamente

Figura 1.5.

Diferencias en el promedio anual de las temperaturas máximas y mínimas para el Altiplano boliviano. Valdivia, *et al.*, (2013).

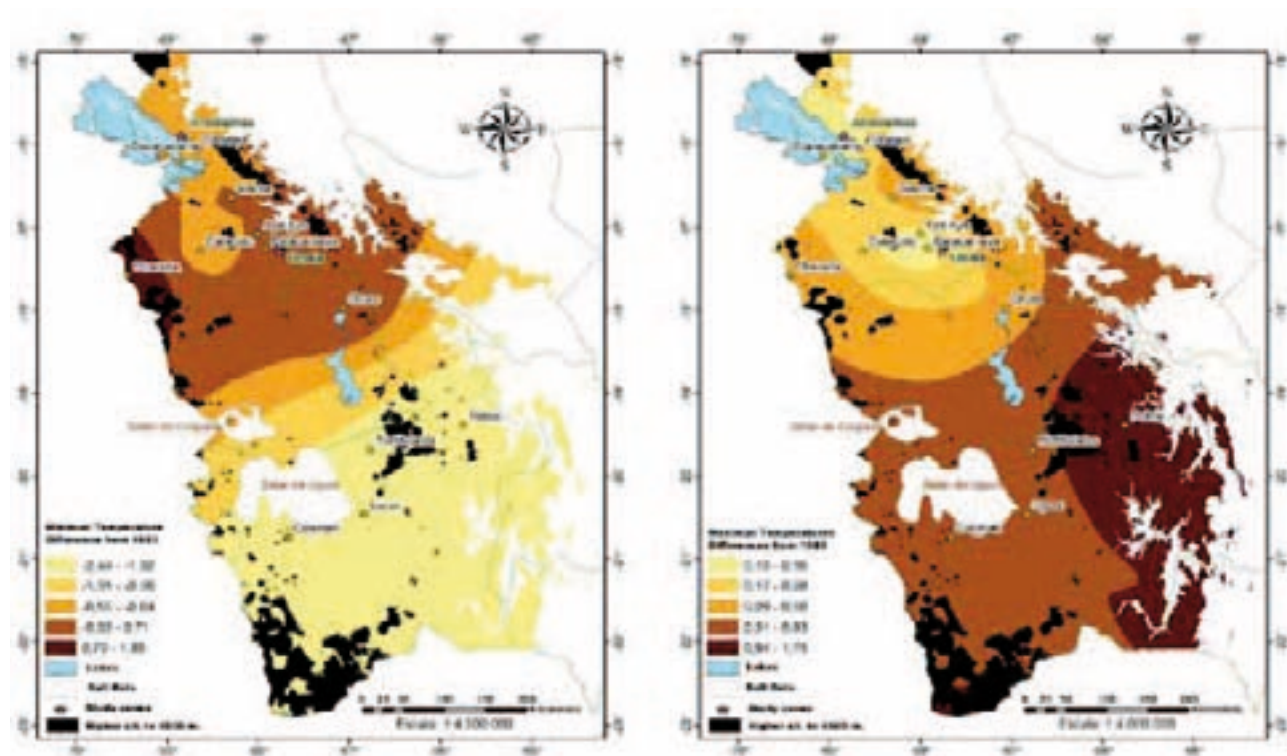
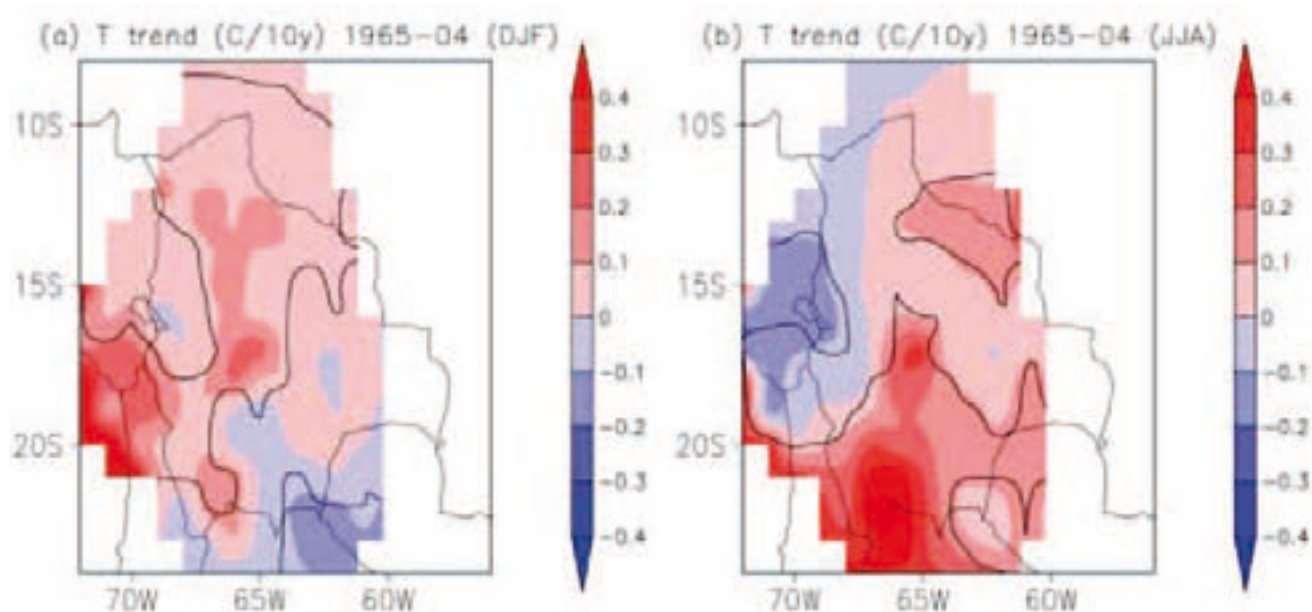


Figura 1.6.

Tendencias de temperaturas medias máximas mensuales ($^{\circ}\text{C}$ (por cada 10 años) de 1965-2004. Durante a) DJF y (b) JJA (publicado por Seiler *et al.*, 2013)



reconocida particularmente para la región y esto es cierto cuando se evalúa la presencia de nubosidad como indicador de la precipitación, pues su formación muy frecuentemente tiene una fuerte correlación con la precipitación.

La OLR (Outgoing Longwave Radiation, por sus siglas en inglés) es la medida de la radiación de onda larga emitida por la superficie de la tierra y la atmósfera suprayacente y es monitoreada constantemente por un número de satélites polares que orbitan desde 1974. La OLR es sensible a la cantidad y altura de las nubes sobre una determinada región y tiempo, y fue estudiada para investigar la convección tropical y las nubes convectivas sobre Sur América tropical (Vuille, *et al.*, 2003a). Valores bajos de OLR sugieren nubosidad intensa. En el caso de cielos despejados se emiten valores altos de OLR desde la superficie terrestre (Vuille, *et al.*, 2008).

Los datos de OLR indican que la cubierta de nubes convectivas se incrementó levemente en verano, especialmente en los trópicos inferiores, pero también en invierno lo que es difícil de interpretar. La significancia de los resultados es mucho más limitada por las series cortas de tiempo disponible entre 1979 y 1998 (Vuille *et al.*, 2003). La tendencia positiva durante la época seca es probablemente menos importante porque la cobertura de nubes es mínima en esta época. La mayor cantidad de nubes entre diciembre y febrero podría sugerir un incremento en la lluvia en ese trimestre, lo que coincide con reportes que indican incremento en la precipitación en la escala regional en el Este de los Andes, durante las épocas lluviosas (Vuille *et al.*, 2003).

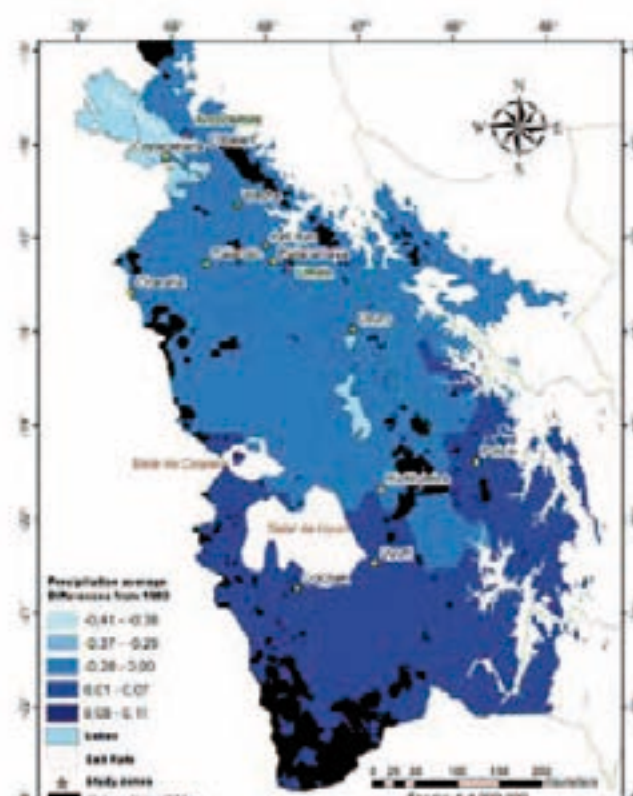
En el mismo análisis Vuille, *et al.*, (2003) en base a 42 estaciones en los Andes Tropicales entre 1950 y 1994 (45 años), encontraron poca coherencia espacial entre las diferentes tendencias de las estaciones y que no hay un patrón claro de aumento o disminución de la precipitación. Al Sur del Perú y a lo largo de la frontera Perú/Bolivia muchas de las estaciones indican la reducción de la precipitación para el total anual y durante la época de lluvias DEF. En JJA la mayoría de las estaciones indican un incremento en la precipitación, especialmente en las estaciones de las tierras bajas del Oeste de los Andes y el Altiplano,

región Norte de Bolivia y Sur del Perú, todo esto a nivel de regiones pero siempre en base a estaciones individuales. De las 42 estaciones analizadas sólo 5 mostraron incrementos significativos y otras 2 reducciones significativas, siendo las restantes estables. Por lo tanto se llegó a la conclusión de que los cambios en cantidad de precipitación y de nubosidad son mínimos en la mayoría de la región, por lo que también es bastante improbable que estos factores hayan causado el retroceso de glaciares.

Al igual que la temperatura, se presume que los cambios en la precipitación podrían tener variaciones por efecto de la elevación. Sin embargo, nuevamente Vuille, *et al.*, (2003) muestran que no existen signos de dependencia, lo que en parte podría deberse a información faltante que amerita otros estudios.

Según Valdivia, *et al.*, (2013) los registros anuales de la cantidad de precipitación recibida en distintas zonas del Altiplano boliviano, muestran estabilidad relativa (Figura 1.7.).

Figura 1.7.
Diferencias en los registros promedio de temperatura antes y después de 1983 para el Altiplano boliviano (publicado por Valdivia, *et al.*, 2013).



Adicionalmente, los autores dividieron el periodo de registros en dos, antes y después de 1983, pues detectaron un corte en tal año, muy probablemente debido a la presencia del mega evento de El Niño. Bajo el mismo concepto, Seiler, *et al.* (2013) consideran que 1984 se constituye un año de cambio en la tendencia de precipitación. Estos últimos autores van más allá y exploran las diferencias en tendencias entre épocas del año, encontrando que en esta discriminación, efectivamente puede ser observado un cambio. En las tierras bajas, las cantidades totales de precipitación así como el número de eventos extremos, fueron mayores durante los eventos de El Niño. Durante el verano Austral (diciembre a febrero), este evento causó condiciones más secas en los Andes, con precipitaciones más variables. Los autores encuentran que las precipitaciones pluviales se incrementaron desde 1965 a 1984 (12% en DEF y 18% entre junio y agosto) y decrecieron luego (-4% en verano y -10% en invierno) (Figura 1.8).

Con respecto a las tendencias de cambio encontradas en la precipitación, se puede percibir poco cambio total anual de ésta.

c. Nubosidad

La nubosidad convectiva es aquella que se forma con los movimientos ascendentes del aire sobre una superficie cálida en presencia de humedad. Estos movimientos son generadores de nubes (cúmulos-nimbos) que tienen un alto poder reflejante. La radiación de onda larga reflejada por las nubes (OLR) es un buen indicador tanto de la precipitación (como se mencionó anteriormente) como de la nubosidad convectiva. Vuille *et al.* (2003) analizaron la evolución de esta variable entre 1979 y 1998 entre los paralelos 1°N-23°S y entre 0-5,000 msnm. Los resultados muestran que la OLR se redujo ligeramente al Norte del paralelo 10°S, lo que indicaría un ligero aumento de la nubosidad convectiva. Este aumento se produjo especialmente durante la temporada húmeda (diciembre-febrero). Al Sur de este paralelo 10°S, por el contrario, se observó que la nubosidad convectiva decreció (CAN, 2007). Estos resultados podrían tener una significancia hacia la mayor

cantidad de avenidas (caudales extraordinarios) en estas zonas, pues la nubosidad convectiva puede producir precipitaciones más agresivas.

No se encontraron estudios específicos sobre el comportamiento de la nubosidad en Bolivia. El IPCC (1997) recomienda realizar estudios en los cambios de nubosidad ya que la cantidad, el lugar, la altura, la duración y las propiedades ópticas de las nubes ejercen controles importantes sobre el clima de la Tierra, por lo que los cambios de esas propiedades podrían tener una función importante en el cambio climático.

Dado que la formación de nubosidad convectiva es muy importante para la formación y cantidad de precipitación en Bolivia, por el tipo de relieve que la cubre, sería muy importante adicionar esta variable para análisis futuros, pues además otorgaría información sobre la violencia de los eventos extremos pluviométricos, lo cual es de suma importancia para el análisis de riesgos, considerando el cambio en las amenazas.

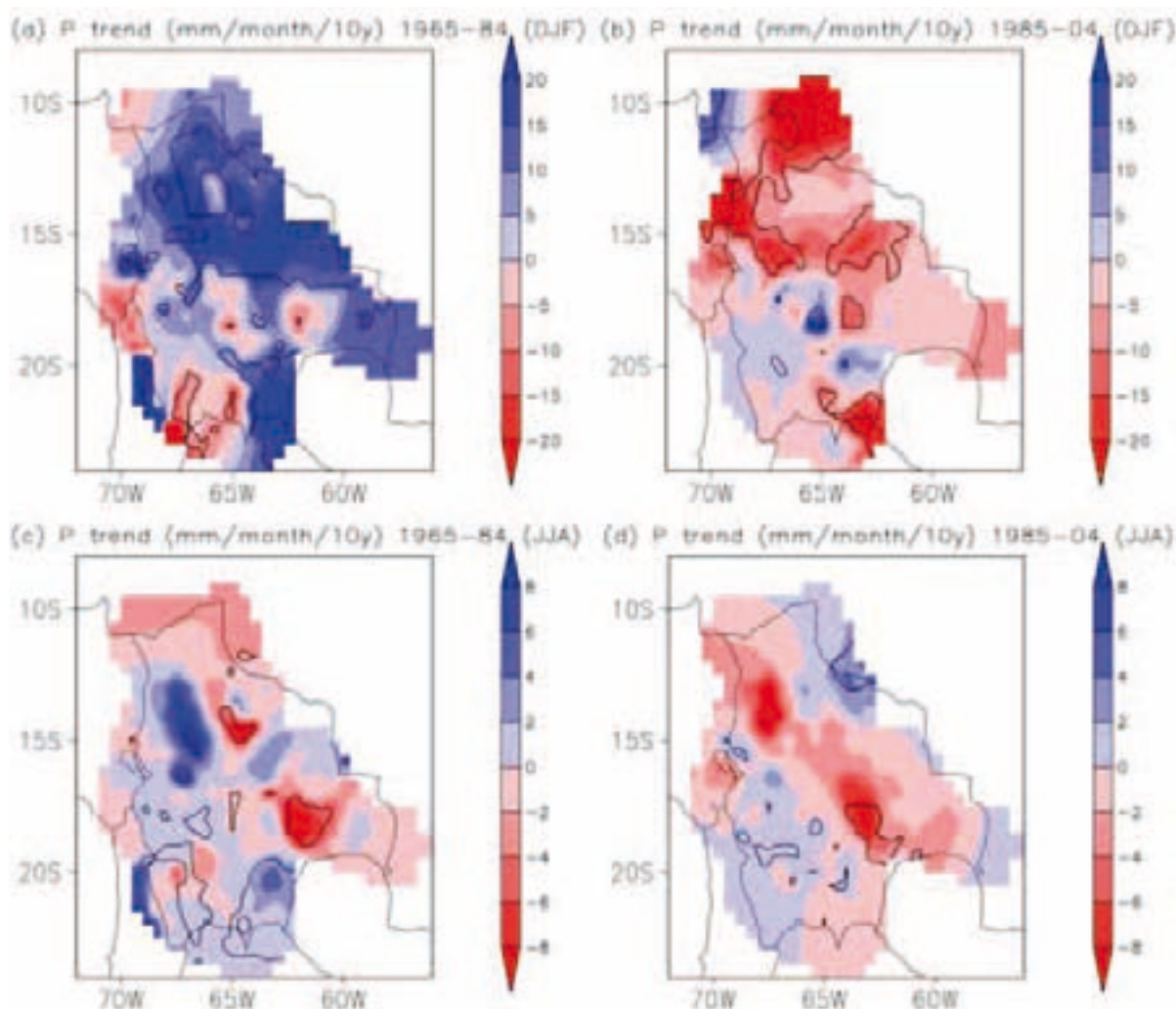
d. Humedad

Vuille, *et al.* (2003) y Vuille y Garreaud (2009), basados en datos derivados del Climatic Research Unit, indican que la humedad relativa incrementó de 0.0 a 2.5%/década con las tendencias más positivas en el Norte del Ecuador y Sur de Colombia, mientras que en el Sur del Perú, Oeste de Bolivia y extremo Norte de Chile el incremento es moderado (0.5-1.0%/década) entre el periodo de 1950 y 1994. Los resultados sugieren que el incremento de la humedad atmosférica, podría ser producto del arrastre de masas de aire que contienen mayor cantidad de humedad. En general, las tendencias son muy similares en todas las estaciones con leves modulaciones durante el invierno y verano.

A pesar de que los estudios fueron realizados en base a mediciones térmicas indirectas, en caso de que se haya incrementado el vapor de agua en la atmósfera, esta cantidad de agua debe liberarse, pudiendo haberse incrementado también el número de eventos extremos pluviométricos por esta razón directa.

Figura 1.8.

Tendencia a la precipitación media (mm por cada 10 años) de (a) 1965-1984 y (b) 1985-2004 en DJF. (c) y (d) son lo mismo que (a) y (b) pero para JJA (publicado por Seiler *et al.*, 2013).



e. Vientos

Las características locales del régimen de viento cerca de la superficie están fuertemente determinadas por la topografía. El desarrollo de brisas en áreas con relieve significativo y en las zonas con lagos y salares, definen sistemas de circulación local con un marcado ciclo diario, los cuales pueden adaptarse significativamente a los esquemas de gran escala (Aceituno, 1996).

Es interesante mencionar que no se encontró información acerca del comportamiento de los vientos alrededor del país, lo cual debería considerarse para futuros estudios, mucho más si se toma en cuenta su importancia en el restablecimiento del equilibrio en la atmósfera y, lógicamente, para la producción del ciclo hidrológico.

El viento constituye uno de los factores esenciales que explican la vida sobre la superficie terrestre.

f. Glaciares

La región andina concentra el 95% de los glaciares tropicales del mundo, cubriendo una superficie estimada hoy en 2.500 km², de los cuales el 71% de ellos están ubicados en Perú, 22% en Bolivia, 4% en Ecuador y 3% en Colombia. En ellos se observa un franco retroceso atribuible al calentamiento global, como fue estimado por el IPCC (1996) al señalar que el calentamiento en las regiones de alta montaña generaría la reducción o desaparición significativa de las superficies de nieve y hielo (CAN, 2007).

Por su gran sensibilidad al cambio climático, los glaciares tropicales son excelentes indicadores de la evolución del clima; el dramático retroceso que vienen sufriendo en todo el mundo, sugieren que otros parámetros hidrometeorológicos podrían estar también sufriendo cambios significativos en la actualidad y, probablemente, podrían acentuarse en las próximas décadas (SENAMHI, 2005).

Recientes investigaciones muestran que el cambio climático será aún más percibido en las cordilleras de mayor altitud (Bradley, *et al.*, 2006). Si bien se prestó mucha atención al cambio climático en la región polar, las montañas que se extienden hacia la tropósfera se han calentado más rápidamente que las tierras bajas. El clima en zonas altas de gran densidad poblacional en los trópicos, como los Andes Tropicales, está padeciendo cambios dramáticos. El calentamiento global estuvo asociado al acelerado retroceso de los glaciares tropicales en los Andes, así como al aumento en la variabilidad del clima y los extremos climáticos que afectan los ecosistemas andinos, con considerables repercusiones en la integridad del ecosistema y en el bienestar de las poblaciones locales (Torrez, 2011).

El derretimiento de los glaciares tropicales está generando alarma en los países andinos, donde expertos y ambientalistas coinciden en que su rápido retroceso amenaza su desarrollo. Este fenómeno lo evidencian tanto los expertos como los pobladores (Torrez, 2011).

1.4. APLICACIÓN DE MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL (MCG)

1.4.1. Escenarios climáticos

El estudio de los futuros impactos del cambio climático requiere estimar “escenarios” posibles de comportamiento de la actividad humana, pues es ésta la que determinará en gran medida el comportamiento del clima global futuro. Los “escenarios climáticos” son descripciones coherentes, plausibles e internamente consistentes del clima futuro del planeta (IPCC, 2000).

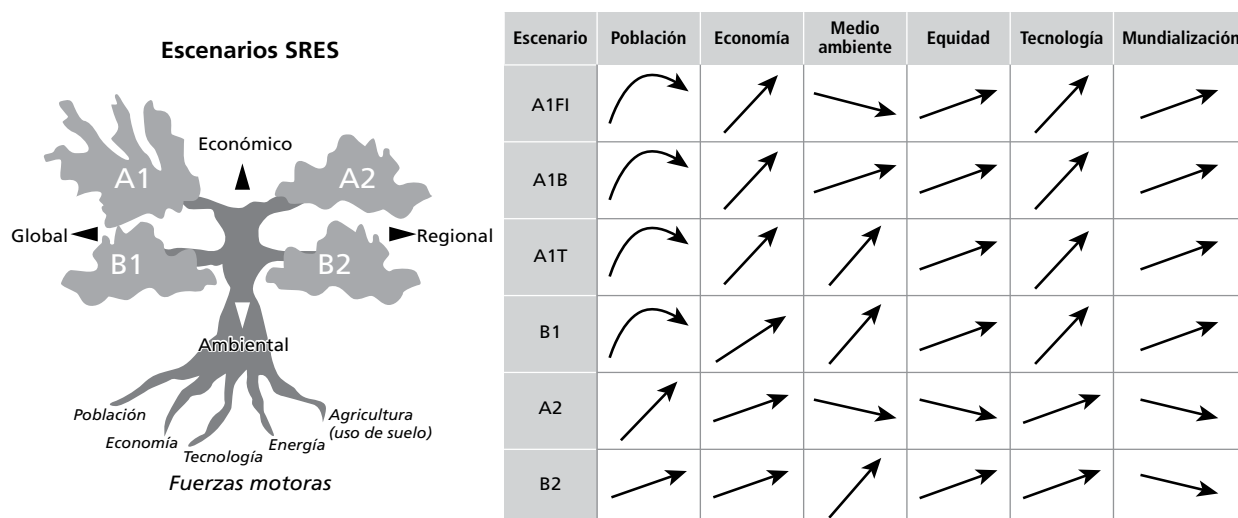
Existen dos grandes familias de escenarios. Los escenarios “A” describen un mundo futuro con alto crecimiento económico, mientras que en los “B” ese crecimiento es moderado. Los escenarios comprenden una línea evolutiva similar en lo que respecta a sus características demográficas, sociales, económicas y de cambio tecnológico y está constituido por cuatro familias de escenarios: A1, A2, B1 y B2 (SENAMHI, 2005; IPCC, 1997). El escenario A2, el más pesimista, contempla una población creciente y un desarrollo económico regionalizado, mientras que el escenario B2, más optimista, contempla un menor crecimiento poblacional y un desarrollo económico moderado. Bajo A2 se espera que la concentración de dióxido de carbono para 2100 sea de 850 ppm (partes por millón) mientras que bajo B2 se estima que la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera será de 600 ppm (Andersen, 2009).

Las cuatro familias de escenarios se muestran, de manera muy simple, como ramas de un árbol bidimensional (Fig. 1.9.). En realidad, estas cuatro familias de escenarios comparten un espacio dimensional mucho más amplio, dadas las numerosas suposiciones necesarias para definir cada escenario dentro de cada modelo. El diagrama esquemático ilustra las principales fuerzas motoras que rigen las emisiones de GEI. Cada familia de escenarios se basa en especificaciones comunes de estas fuerzas motoras (Nakicenovic *et al.*, 2000, mencionado por Magaña *et. al.* s/a).

La construcción de estos escenarios fue llevada adelante y consensuada por el IPCC con el fin de guiar los estudios de evaluación de impacto del cambio climático, bajo condiciones que son probables a futuro en función del comportamiento social y demográfico del planeta. En este sentido, se constituye en la guía y base sobre la cual se desarrollan los modelos, pues estos incorporan las consecuencias del forzamiento radiativo producido por las variables condiciones previstas por los escenarios SRES.

Figura 1.9.

(a) Diagrama esquemático de las fuerzas motoras que rigen las emisiones de GEI. (b) Dirección cualitativa de los escenarios del IE-EE para diferentes indicadores. Fuente Magaña et. al., s/a; IPCC, 2001b.



1.4.2. Resultados de la aplicación de Modelos de Circulación General para Bolivia

Los Modelos de Circulación General (MCG) de la atmósfera son algoritmos matemáticos que intentan simular el sistema climático de la tierra. Se encuentran en el extremo superior de la jerarquía de modelos del clima, son acoplados (incorporan el estudio del sistema atmósfera-oceano y suelo) y predicen cambios de las variables en un tiempo largo y bajo escenarios futuros. Las expresiones matemáticas que configuran un MCG se pueden analizar por separado dentro de las tres principales partes que constan estos modelos: (1) la dinámica del sistema climático describe el movimiento de masas de aire a gran escala y el transporte de la energía y momentum; (2) la física del sistema climático tal como la transmisión de la radiación a través de la atmósfera, la termodinámica y la evaporación; y (3) otros factores tales como la interacción: océano, atmósfera, topografía y parámetros de la vegetación. Estas expresiones están basadas en las leyes físicas, tales como la conservación de energía y masa, así como de las relaciones empíricas basadas en características y tendencias observadas, tales como fórmulas que relacionen temperatura y humedad con la formación de la nube.

Los MCG utilizan las mismas ecuaciones de movimiento que un modelo de Predicción Numérica del

Tiempo (PNT), siendo su propósito simular, numéricamente, los cambios en el clima como resultado de cambios lentos en algunas condiciones de frontera (tales como la constante solar) o parámetros físicos (tal como la concentración de los gases de efecto invernadero). Los modelos PNT se utilizan para predecir el tiempo futuro a corto plazo (1-3 días) y mediano plazo (de 4-10 días). Los modelos MCG sirven por años, tiempo suficiente para aprender sobre el clima en un sentido estadístico (es decir la media y la variabilidad).

Los MCG por ser globales tienen una baja resolución por lo cual no son muy indicados para estudios e investigación de zonas específicas, en ese sentido es necesario el uso de un modelo regional el cual puede tomar mayores resoluciones y ser más hábil en la determinación del clima de una zona, pero siempre basado en los resultados de borde del MCG y aprovechando su capacidad para describir el clima global que siempre determinará de alguna forma el clima local. Entonces, para determinar el clima en forma puntual es necesario utilizar dos modelos: uno global, el cual da las condiciones de frontera al otro modelo regional, denominándose a este proceso "regionalización".

De esta manera, para Bolivia y/o para el continente sudamericano se han realizado diversos estudios de aplicación de los MCG los cuales en muchos casos coinciden ampliamente en sus

resultados. El Programa Nacional de Cambios Climáticos de Bolivia fue el primero en establecer este tipo de estudios cuando en 1997 y 1998, realiza estudios para establecer la tasa esperada de cambio en las variables termo-pluviométricas. En ese entonces se estableció que los modelos GISS (Goddard Institute Space Studies), UK89 (United Kingdom) y Hadley (HADCM2) eran los modelos que mejor representaban la realidad boliviana.

1.4.2.1. Temperatura

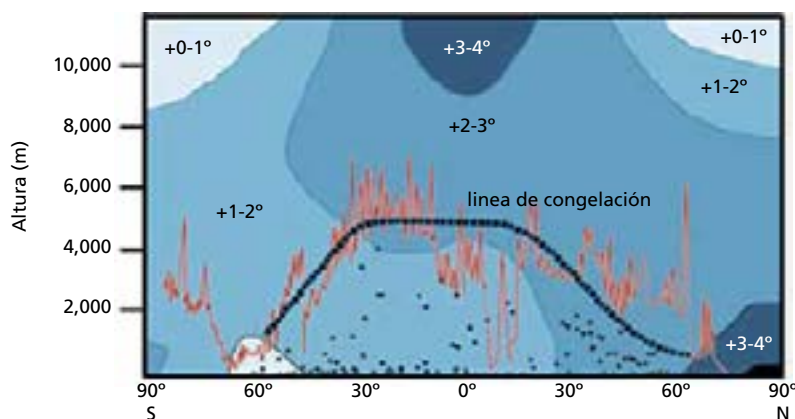
Un resultado en el que coinciden la mayor parte de los estudios es que en general los MCG prevén un aumento sostenido de la temperatura en los Andes Centrales (PNCC, 1997), SENAMHI (1998), el cual se muestra más elevado cuanto más sea la altitud del punto considerado, diferencia que se acentúa a partir de los 4.000 msnm. La Figura 1.10 presenta un modelo de evolución de la temperatura a lo largo de la longitud de los Andes Centrales. El escenario se basa en una duplicación de los gases de efecto invernadero en la atmósfera. Se observa que el incremento de temperatura sería mayor al Norte del paralelo 30°N, con un máximo al Norte del paralelo 60°N. En el trópico (entre 30°N y 30°S), el incremento sería mayor por encima de los 4.000 msnm. De esta forma se deduce que los Andes Centrales y sus estribaciones, por su ubicación y altitud, serían fuertemente afectados por el calentamiento. Este aumento en la temperatura produciría un incremento temporal de los caudales de los ríos

ubicados en las cuencas abastecidas por glaciares, seguidos de una disminución drástica del volumen y regularidad de los recursos hídricos. Bajo estas condiciones de calentamiento, se prevé que el régimen hidrológico se volvería cada vez más niveo-pluvial a medida que avance la desaparición de sus glaciares reguladores, empezando por los más pequeños y por los que nacen a menor altura.

En referencia a la climatología, en la región dominada por formaciones de la cordillera, el análisis de las variables estimadas por los modelos MIROC Hi-res 3.2¹ y CCSM 3.0² muestra una tendencia positiva en la temperatura del aire de +0.035 °C por año. Complementando los datos anteriores, observaciones por sensores remotos identificaron a la Temperatura de superficie (Ts) y albedo superficial (α) como los factores dominantes en la ecuación del balance de energía. Específicamente, los resultados permiten inferir que los cambios en regiones con baja cobertura vegetal son más notorios que los cambios en zonas ricas en vegetación o con cobertura forestal. Al respecto, el estancamiento en la tendencia en la variable temperatura del aire en zonas forestadas sugiere el importante rol de este tipo de cobertura vegetal en la mitigación del cambio climático, no sólo por el incremento de la capacidad de convertirse en sumideros de dióxido de carbono sino por el rol regulador de la temperatura (Soria, 2010). Sin embargo, se debe tomar en cuenta que las estaciones que miden la tempe-

Figura 1.10.

Estimación del incremento de la temperatura en caso de que la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera se duplique.



1 Modelo acoplado Océano-Atmósfera desarrollado por el Instituto Japonés para Estudios Ambientales.

2 El Community Climate System Model (CCSM) es un modelo climático acoplado que simula el sistema climático terrestre. Fue desarrollado por el Instituto NCAR

ratura son escasas en altitudes superiores y que cubren el territorio de una manera heterogénea, lo cual podría incrementar la incertidumbre a los datos utilizados. A pesar de ello, en base a simulaciones con el modelo ECHAM-4³ que reproduce la tendencia de calentamiento observado también como la tendencia de patrón espacial (Vuille, *et. al.*, 2003; CAN, 2007) se reporta que la diferencia del incremento de la temperatura continuaría notablemente entre el Este y Oeste andino, probablemente por el incremento concurrente de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en el Pacífico ecuatorial, de las tendencias considerablemente diferentes en nubosidad entre el Este y Oeste de los Andes y de la mayor cobertura vegetal del Este, todo lo que contribuye a su menor calentamiento, efecto que podría incrementarse en el futuro debido a la intensificación de dichas condiciones.

La Tabla 1.2 presenta los rangos de cambio en temperatura y precipitación a nivel continental proyectados para 2020, 2050 y 2080, provenientes de las estimaciones de varios MCG y cuatro

de los principales familias de escenarios de emisiones (IPCC, 2008).

En base a los escenarios indicados anteriormente, otro estudio para el periodo 2071-2100 en Bolivia (en base a la serie 1961-1990) que aplicó el modelo PRECIS, indica que la temperatura se incrementará para el escenario A2 en 3.4°-5.1°C y, para el escenario B2, el incremento se dará en 2.4°-3.7°C; al mismo tiempo indica que los mayores incrementos de la temperatura media se observarían al Sur del Altiplano y el Norte del país para ambos escenarios (Andersen, 2009). Es notorio el consistente incremento en precipitación anual que es esperado de acuerdo a los resultados del IPCC. Sin embargo, las tendencias han mostrado un leve pero sostenido descenso de las precipitaciones en Bolivia. Al respecto Minvielle y Garreaud (2011), combinando los resultados de MCG y de datos de estaciones meteorológicas del Altiplano, sugieren que el incremento y fortalecimiento de los vientos de Oeste producirán descenso de las precipitaciones a futuro en el territorio boliviano.

Tabla 1.2.

Cambios proyectados en la temperatura (°C) y la precipitación (%) para grandes regiones del Centro y el Sur de América basados en Ruosteenoja *et al.* (2003). El rango de valores proviene de las estimaciones de siete MCG y los cuatro escenarios SRES más importantes.

	Estación	2020	2050	2080
Cambio en temperatura (°C)				
América Central	Seca	+0.4 a +1.1	+1.0 a +3.0	+1.0 a +5.0
	Húmeda	+0.5 a +1.7	+1.0 a +4.0	+1.3 a +6.6
Amazonía	Seca	+0.7 a +1.8	+1.0 a +4.0	+1.8 a +7.5
	Húmeda	+0.5 a +1.5	+1.0 a +4.0	+1.6 a +6.0
Sur de Sudamérica	Invierno(JJA)	+0.6 a +1.1	+1.0 a +2.9	+1.8 a +4.5
	Verano (DEF)	+0.8 a +1.2	+1.0 a +3.0	+1.8 a +4.5
Cambio en precipitación (%)				
América Central	Seca	-7 a +7	-12 a +5	-20 a +8
	Húmeda	-10 a +4	-15 a +3	-30 a +5
Amazonia	Seca	-10 a +4	-20 a +10	-40 a +10
	Húmeda	-3 a +6	-5 a +1	-10 a +10
Sur de Sudamérica	Invierno(JJA)	-5 a +3	0-12 a +10	-12 a +12
	Verano (DEF)	-3 a +5	-5 a +10	-10 a +10

Fuente: IPCC, 2008.

DEF=Diciembre/Enero/Febrero, JJA=Junio/Julio/Agosto.

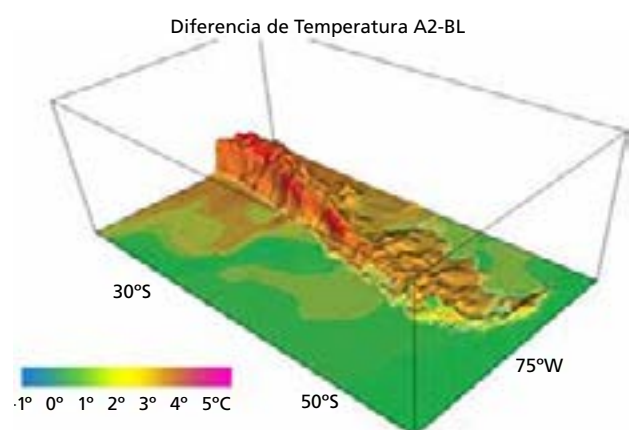
³ Es un modelo de circulación general acoplado atmósfera-oceano, desarrollado en el Instituto Max Planck de Meteorología.

Para el Perú en el periodo 2071-2100 (en base a la serie 1961-1900) con los modelos ETA CSS y HadRM3 se proyectaron, tanto para el escenario A2 y el escenario B2, incrementos de temperatura entre 2°C a 4°C, excepto para algunas áreas localizadas al Norte del lago Titicaca, donde el escenario A2 proyectó incrementos de hasta 6°C (Sanabria, et al., 2009).

Garreaud (2011) en un estudio realizado en Chile con el modelo PRECIS, muestra el cambio de temperatura superficial del aire para el periodo 2070-2100 (promedio anual) sobrepuesto a la topografía de Chile (Figura 1.11.). Se observa calentamiento sobre todo de Chile continental y el océano adyacente, pero con magnitudes variables. El calentamiento es modesto (0.5 ~1°C) sobre la costa, pero este se incrementa rápidamente sobre la cordillera con cambios de hasta 5°C en las tierras altas del Norte y centro de Chile. Existe una leve diferenciación entre las estaciones del año: durante los meses de verano el mayor calentamiento (>4°C) se extiende sobre los Andes hasta la Patagonia, mientras que en el invierno el calentamiento es más intenso (>5°C) pero concentrado en los Andes de la zona Norte de Chile (Fuenzalida et al. 2007). Es importante destacar que el calentamiento sobre la costa del Pacífico con influencia en los Andes es consistente con los cambios observados en las últimas décadas, probablemente debido al descenso de temperatura en zonas costeras, por un aumento de los vientos del Sur (Garreaud & Falvey, 2009).

Figura 1.11.

Cambio de temperatura del aire cerca de la superficie (promedio anual) simulado por el modelo PRECIS-DGF entre fines de siglo (2070-2100 bajo escenario A2) y condición actual (1960-1990) para Chile.



1.4.2.2. Precipitación

El nivel de precipitaciones futuras es una variable difícil de predecir, ya que los factores regionales dependientes de la circulación atmosférica, tales como los eventos ENSO o la actividad del frente polar Sur son difíciles de modelar.

Solman, et al. (2003), evaluaron el modelo de circulación general de la atmósfera, HADAM2B, del Hadley Centre, con énfasis en la actividad sinóptica del hemisferio Sur. Asimismo, se realizó una evaluación del efecto de la resolución horizontal en la calidad de la simulación. Se compararon las simulaciones realizadas para el periodo AMIP⁴ con el modelo de la resolución estándar (2.5° de latitud por 3.75° de longitud) y de alta resolución (0.833° de latitud por 1.23° de longitud), en los cuales ambos modelos fueron forzados con la climatología observada de temperatura de superficie del mar, con los re-análisis de NCEP⁵ para el periodo 1979-1988. Los resultados obtenidos mostraron que el modelo de ambas resoluciones reproduce considerablemente bien los patrones básicos observados del campo de presión de superficie y la corriente en chorro de niveles superiores, pero con subestimaciones de temperatura y sobreestimaciones de precipitación. En base a sus resultados, los investigadores concluyen que, en general, los cambios debido al aumento de la resolución no presentan una mejora significativa en la calidad de la simulación de la precipitación. Igualmente Buytaert, et al. (2010), en un estudio realizado en los Andes tropicales de Ecuador, encontraron que, aunque el modelo PRECIS representa mejor los gradientes de precipitación que los modelos globales del IPCC, las discrepancias son grandes, concluyendo que se requieren datos con mayor resolución u otro tipo de técnicas para representar bien la climatología de los Andes.

Confirmando los resultados previos, Seiler (2009) y Andrade y Blacutt (2010), en diferentes trabajos para Bolivia que estudiaron el desempeño del modelo climático regional PRECIS (*Providing Regional Climates for Impacts Studies*) del Hadley

4 Según el Protocolo del Proyecto de Intercomparación de Modelos Atmosféricos (AMIP por sus siglas en inglés), se conoce como Línea de comparación o Línea Base al periodo comprendido entre 1960-1990.

5 National Center for Environmental Prediction. United States.

Centre de la Oficina Meteorológica del Reino Unido y aplicado con diferentes MCG como condiciones de borde, encontraron que los resultados del modelo comparados con datos mensuales observados de temperatura y precipitación en el periodo 1961-1990 muestran que ambos parámetros tienen un buen desempeño en zonas bajas (regiones con altura menor a 500 *msnm*) pero que sobreestiman la precipitación tanto en zonas de altura intermedia (entre 500 y 3.500 *msnm*) como en la zona andina (situada a una altura mayor a 3.500 *msnm*). A su vez, la comparación muestra que el modelo subestima la temperatura (máxima, media y mínima) en las regiones con altitudes mayores a 500 *msnm*, mientras que realiza un trabajo aceptable en las zonas bajas. Este efecto puede ser parcialmente explicado por los parámetros del modelo que no reflejan adecuadamente la fisiografía de Bolivia, ni las variaciones del gradiente térmico que, si bien existen en las zonas montañosas, es parcialmente compensado en la realidad por la gran cantidad de recepción de energía debido a la cercanía con el Ecuador.

En otros trabajos que aplicaron los MCG para el subcontinente (Marengo, *et al.*, 2003) se muestran las tendencias de los modelos en sobreestimar o subestimar la lluvia en función de la zona analizada. Todos los modelos subestiman la lluvia sobre la Amazonia en el verano y la sobreestiman en las zonas altas. Entre los modelos analizados, el HadCM3 y el Echam 4.5 simulan la circulación de verano y primavera de forma más próxima a las observadas. En estos estudios se reporta que todos los modelos presentaron dificultades en generar la Zona de Convergencia con su tendencia de lluvia extendiéndose desde la Amazonia hasta el Sureste de Brasil, así como el inicio del periodo lluvioso en la primavera. En general, los modelos concentraron la mayor cantidad de lluvia al Este del continente, lo que originó en menor o mayor grado, la disminución de la lluvia sobre la Amazonia. Esto puede estar asociado también a la dificultad de los modelos en simular las posiciones climatológicas de la "Alta de Bolivia". Para el futuro, los cambios más significativos en la tendencia de la circulación y en la distribución de las lluvias ocurrirían a partir de la climatología de 2041-2070, y se intensificarían hasta el final

del Siglo XXI. De todos los modelos analizados en los estudios, el HadCM3 y el ECHAM presentaron un patrón de circulación y una distribución de lluvias más próximas a las observadas tanto para el verano, como para la primavera. Para el futuro, estos modelos mostraron disminución de las lluvias en el Noreste durante el verano y para la Amazonia durante la primavera.

En general, en la zona central y tropical de Sudamérica, las predicciones para el 2080 varían entre reducciones del 20% al 40% y aumentos del 5% al 10%. La incertidumbre es aún mayor para el Sur de Sudamérica, tanto en invierno como en verano, aunque la magnitud del cambio es menor que en las zonas tropicales, (IPCC, 2008).

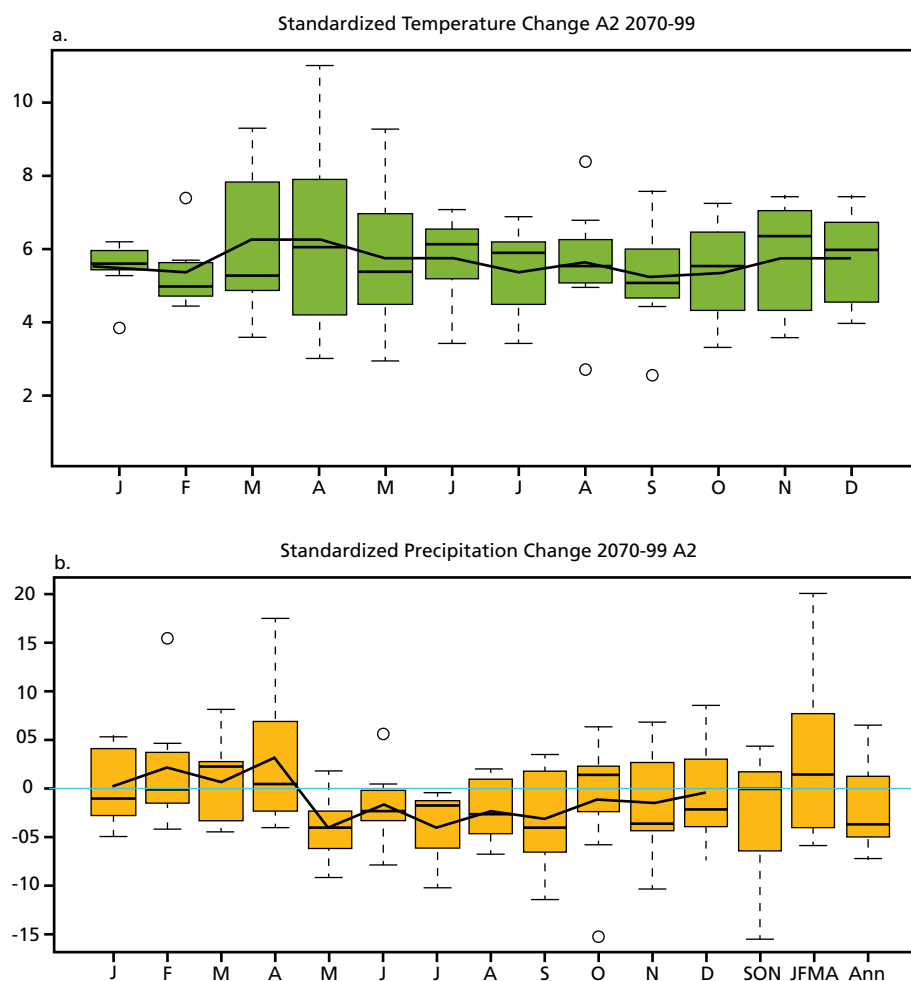
Seth, *et al.* (2010) y Thibeault, *et al.* (2010) examinaron nueve modelos de circulación general en los Andes Centrales y encontraron una tendencia a un ligero aumento en las precipitaciones durante la estación lluviosa y un ligero descenso durante el inicio de temporada (Figura 1.12.).

Los resultados sugieren que, si bien los modelos muestran un sesgo cálido y húmedo en el Altiplano, la dinámica del ciclo anual es bien simulada. Los cambios de precipitación en el Altiplano representados por los modelos parecen ser poco significativos en la media anual, pero con un posible cambio en la distribución estacional de precipitación. La estación de lluvias parece retrasarse pero también ser más intensa, con un largo periodo seco y un debilitamiento de la época de lluvias a principios de temporada. Seth, *et al.* (2010) proponen un mecanismo para explicar los cambios en el ciclo anual de precipitación que ocurrirían en el futuro, que considera los cambios esperados en la circulación global:

1. El aumento de las temperaturas provocará mayor evapotranspiración y secado de la superficie.
2. Como la recepción de radiación solar aumenta en la primavera y habrá menor humedad en la atmósfera, la constitución de energía estática húmeda necesaria para iniciar la convección demoraría en ocurrir (Lintner y Neelin, 2006).

Figura 1.12.

Cambio estandarizado de la temperatura (arriba) y de la precipitación previsto en la región, generados por 9 MCG (Seth *et al.*, 2010)



3. El debilitamiento de la circulación tropical (aumento de la estabilidad) además inhibiría el desarrollo de convección (Vecchi y Soden, 2007).
4. Una vez que el umbral de la energía estática húmeda se logra, el contenido de humedad atmosférica sería mayor, generando las condiciones para precipitaciones más intensas.
5. Cuando termine el efecto "Monzón Sudamericano" siguiendo la radiación solar, las elevadas temperaturas incrementarían la evapotranspiración, provocando mayor pérdida de humedad del suelo que intensificaría la estación seca.

En función al mecanismo propuesto, (Seth, *et al.* 2010) se espera en todo el periodo de lluvias

mayor precipitación, pero déficit al iniciarse. La coherencia implica que en estas zonas estacionalmente secas (el Altiplano y las regiones del Monzón) la transición de la época seca a la húmeda puede demorar más, mientras que la transición inversa (de húmeda a seca) sería más rápida. Es interesante notar también que en relación con el mecanismo propuesto, desde 1991 el mayor balance negativo de masa del glaciar Chacaltaya, se ha producido durante los meses de octubre a diciembre a principios de la temporada de lluvias (Vuille, *et al.*, 2008).

En el reporte de *Cambio Climático en Bolivia hasta 2100* se indica que los impactos más fuertes del cambio climático previstos por el modelo PRECIS se producen a través de cambios en los patrones de precipitación, es decir que los cam-

bios son más significativos en el escenario A2 que en el B2 (Andersen, 2009).

En la Figura 1.13 se observa que las áreas inicialmente secas se vuelven aún más secas y áreas inicialmente húmedas tendrán más precipitación al final del presente siglo. Además, se nota que los cambios son más drásticos en el escenario A2 que en el B2.

Adicionalmente, el autor indica que la precipitación muestra un cuadro muy variable. Bajo los dos escenarios estudiados, la precipitación promedio disminuye moderadamente en la zona altiplánica y se incrementa casi en el mismo orden en las zonas bajas. Dado que la precipitación promedio es normalmente baja en el Altiplano, el descenso de precipitación observado en los resultados del modelo podría llegar a impactar fuertemente a la productividad de la región.

Burgoa (2010) realizó estudios puntuales en comunidades altiplánicas de Bolivia, (Patacamaya y Calacoto). En este análisis señala la relación entre escenarios actuales y futuros para 2020 (que es un promedio de 2006-2035), observándose que no habrá para el año 2020 ningún cambio significativo en el patrón de lluvias mensual. Hacia finales del presente Siglo XXI (2085), los escenarios futuros y actuales siguen el mismo

patrón de comportamiento mensual en las precipitaciones, excepto en el escenario SRES B2. Sin embargo, el autor coincide con Seth, *et al.*, (2010) en encontrar evidencias de reducciones en la lluvia durante la primavera y verano Austral, en especial para el mes de diciembre. Dichas reducciones alcanzan su pico en un 5, 8% en el escenario A2 (2085).

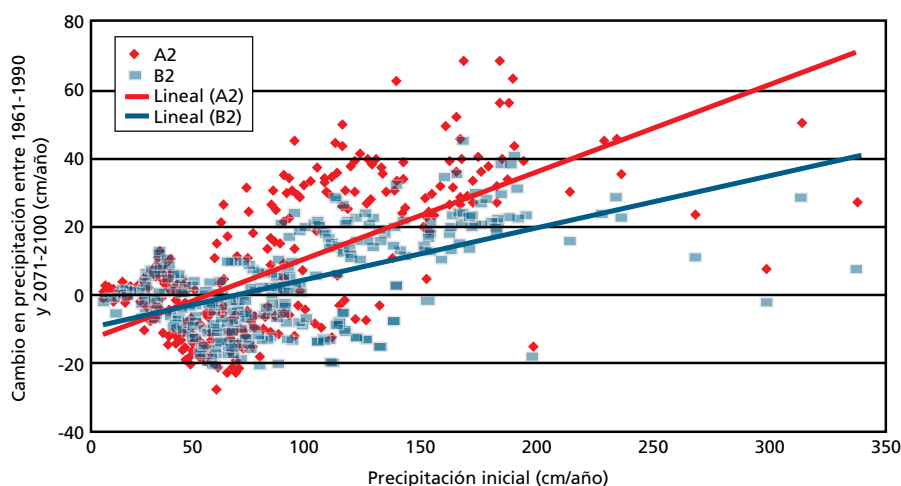
1.5. CONCLUSIONES

El documento presenta inicialmente una descripción de la climatología de Bolivia y en particular de la zona andina. Este capítulo demuestra la complejidad de los factores que interactúan permanentemente determinando las características climáticas del país, pero más aún muestran la extrema vulnerabilidad de su climatología, pues cualquiera de los factores atmosféricos que resulten afectados por impacto del cambio climático, determinará cambios que no son fácilmente pre-visibles.

También se presentan los avances en los reportes de las evaluaciones existentes sobre las tendencias climáticas desde la última parte del siglo pasado, hasta el presente; mostrando que el impacto no fue homogéneo; sino que éste presentó variaciones en función de la altitud, de la exposición de la pendiente e incluso de la

Figura 1.13.

Cambios en los patrones de precipitación de acuerdo al modelo PRECIS en los escenarios A2 y B2, nivel municipal. Fuente: Andersen (2009).



Fuente: Vuille y Bradley (2000).

cobertura vegetal. De esta manera, se reporta que las vertientes occidentales de la Cordillera de los Andes se han calentado más que sus similares al Este y que esta tendencia podría prolongarse hacia el futuro. Se considera que el rol regulador de la mayor cobertura vegetal ha permitido que el Este se caliente menos y esto podría enfocarse como acciones muy importantes de adaptación local. Igualmente se reporta que a mayor altitud, la tasa de calentamiento es mayor y que esto podría continuar aunque no está claramente establecido. Sobre la precipitación, las tendencias no muestran variaciones significativas, por lo que no se encuentran variaciones de magnitud, aunque se percibe que estacionalmente se podrían percibir reducciones importantes especialmente en invierno y que las últimas dos décadas podrían haber sido de reducción más importante. Adicionalmente, las mayores temperaturas podrían inducir a una tendencia a menor humedad, tanto en el aire, como en el suelo.

En términos generales, se puede decir que el conocimiento referido al cambio climático en los Andes sudamericanos es insuficiente en ciertos factores importantes como la nubosidad, humedad y vientos que son indicadores muy importantes en las interacciones para establecer características del clima, tanto en la reducción del impacto a través de la adaptación al cambio climático como en la mayor o menor frecuencia de eventos extremos. Tampoco se ha llevado adelante estudios microclimáticos, los que son de mucho interés debido a la complejidad fisiográfica del país.

Muchos de los estudios de escenarios en Sur América se hacen a nivel nacional, por lo que principalmente se extrajo estudios de Bolivia, Perú y Chile. Pero se tiene bastante información respecto a que en el país se tendrán variaciones en precipitación estacional siendo que el total no variará significativamente.

En el caso de la temperatura, en base a toda la información encontrada se asume que en el último siglo en Bolivia, se ha incrementado sostenidamente y mucho más en las últimas cuatro décadas (+ 0.34°C) superando el promedio de incremento mundial (+ 0.18°C), especialmente en

las zonas de altitud media a elevada. Los datos entregados a nivel continental, muestran que el país podría sufrir incrementos térmicos entre 0.8° y +4.5° para 2080. Finalmente, varios estudios evidencian que los modelos ECHAM y HADGEM son los que mejor representan la climatología boliviana y que la reducción de escala utilizando modelos regionales dinámicos no mejora sustancialmente la precisión de los datos estimados en comparación a los modelos globales. De esta manera y bajo las indicaciones del Informe de Expertos del IPCC para la evaluación de la incertidumbre de la proyección y uso de multi-modelos, es posible utilizar un solo modelo para estudios de regionalización local, aunque esto debe estar claramente explicitado en dichos estudios.

1.6. BIBLIOGRAFÍA

Aceituno, P. 1988. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector Parte I. Department of Meteorology, University of Wisconsin, Madison. American Meteorological Society, 116, 20 pp.

Aceituno, P. 1993. Actas del II Simposio Internacional de Estudios Altiplánicos: Aspectos generales del clima en el Altiplano sudamericano. Santiago - Chile. 10 pp.

Aceituno P., Fuenzalida H. y Rosenbluth B. 1993. Climate along the Extratropical West Coast of South America. Journal of Earth System Response to Global Change. 9 pp.

Aceituno, P. 1996. Elementos clima en el Altiplano sudamericano. Revista de Geofísica. 19 pp.

AGRIFOR Consult. 2009. Cambio Climático en América Latina. 120 pp.

Aliaga, J. y Paredes, M. 2010. Cambio Climático, Desarrollo Económico y Energías Renovables: Estudio exploratorio de América Latina. Instituto de Investigaciones Socio Económicas. 34 pp.

Andersen, L. y Mamani, R. 2009. Cambio Climático en Bolivia hasta 2100: Síntesis de Costos y Oportunidades. Bolivia. 41 pp.

- Andrade, M. & Blacutt, L. 2010. Evaluación del modelo climático regional PRECIS para el área de Bolivia: Comparación con datos de superficie. *Revista Boliviana de Física* Vol 16. Número 16.
- Bradley, R. Vuille, M. Diaz, H. y Vergara, W. 2006. Threats to water supplies in the Tropical Andes climatic change. 2 pp.
- Burgoa, A. 2010. Escenarios de cambio climático en el Sur del departamento de La Paz: Patacamaya y Calacoto. La Paz-Bolivia. *Revista Boliviana de Física*, 17, 6 pp.
- Buytaert, W. Vuille, M. DeWulf, A. Urrutia, R. Karmalkar, A. y Celleri, R. 2010. Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: implications for water resources management. *Journal of hydrology and Earth System Sciences*, 14, 12 pp.
- CAN. 2007. ¿El fin de las cumbres nevadas? Glaciares y Cambio Climático en la Comunidad Andina. Lima – Perú. Secretaría General de la Comunidad Andina, Instituto de Investigación para el Desarrollo, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Oficina Regional para América Latina y el Caribe y la Agencia Española de Cooperación Internacional. 104 pp.
- Chavez, R. Trujillo, F. y Halvorsen, K. 2006. Mancomunidad de Carabuco y Vallegrande. Bolivia. 48 pp.
- Francou, B. Vuille, M. Favier, V. y Caceres, B. 2004. New evidence for an ENSO impact on low-latitude glaciers: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28'S. *Journal of Geophysical Research*, 109, 17 pp.
- Fuenzalida, H., P. Aceituno, M. Falvey, R. Garreaud, M. Rojas & R. Sánchez. 2007. Study on climate variability for Chile during the 21st century. In: Technical Report Environmental Committee, Santiago, Chile. <http://www.dgf.uchile.cl/PRECIS>.
- Garreaud, R. 1999. Multiscale Analysis of the Summertime Precipitation over the Central Andes. *American Meteorological Society*, 127, 21 pp.
- Garreaud, R. y Aceituno P. 2001, Interannual Rainfall Variability over the South American Altiplano. Chile. *American Meteorological Society*, 14, 11 pp.
- Garreaud, R. Vuille, M. Clement, A. 2003, The climate of the Altiplano: Observed current conditions and mechanisms of past changes. Elsevier Science B.V. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 194 (2003) 5-22.
- Garreaud, R. y Aceituno, P. 2007. Chapter 3 The Physical Geography of South America: Atmospheric Circulation and Climatic Variability. 15 pp.
- Garreaud, R. Vuille, M. Compagnucci, R. y Marengo, J. 2009 Present-day South American climate - *Journal of Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281, 16 pp.
- Garreaud, R. and M. Falvey, 2009: The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios. *Int. J. of Climatology*, 29, 543-554. doi: 10.1002/joc.1716
- Garreaud, R. 2010 The Climate of Northern Chile: Mean State, Variability and Trends In "Astronomical Site Testing Data Conference In Chile (2010)". *Rev Mex AA*. 7 pp.
- Garreaud, R. 2011. Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro – INIA*, 93, 14 pp.
- IPCC. 1997. Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC. Houghton, J. y Gylvan, L. eds. 60 pp.
- IPCC. 2001a. Tercer Informe de Evaluación. Cambio Climático 2001. La base científica. Resumen. 94 pp.
- IPCC. 2001b. Tercer Informe de Evaluación. Cambio Climático 2001. Mitigación. 95 pp.
- IPCC. 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal:

- Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación). IPCC, Ginebra, Suiza, 104 pp .
- IPCC. 2008. Evaluación de la vulnerabilidad e impactos del cambio climático y del potencial de adaptación en América Latina. Lima-Perú. Ed. Pull Creativo S.R.L. 68 pp.
- Kaser G. 1999. A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change* 22: 93–103.
- Lenters, J. & Cook, K. 1997 On the origin of the Bolivian high and related circulation features of the South American Climate. *Journal of the Atmospheric Sciences*. Vol 54.
- Lintner, B. R., and J. D. Neelin. 2006. A prototype for convective margin shifts. *Geophysical Research Letters* 34:L05812. <http://www.agu.org/pubs/crossref/2007/2006GL027305.shtml>
- Magaña, V. Graizbord, B. Buenfil, J. y Gómez, L. s/a. Escenarios de cambio climático y tendencias en la zona del Golfo de México. 106 pp.
- Marengo J, Silva, P. 2002. Report of the Group of Land Surface Processes. IAI Project PROSUR.
- Marengo J., Cavalcanti IFA., Satyamurty P., Trosnikov I., Nobre CA., Bonatti JP., Camargo H., Sampaio G., Sanchez MB., Manzi AO., Castro CAC. , D'almeida C., Pezzi LP., Candido L, (2003), "Assessment of regional seasonal rainfall predictability using the CPTEC/COLA atmospheric GCM", *Clim. Dym.*, 21:459
- Marengo J, Soares, W. Saulo, C. Nicolini, M. 2004. Climatology of the low level Jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalysis: Characteristics and temporal variability. *Journal of Climate*. Vol, 17. Número 12.
- Martínez, R. Ruiz, D. Andrade, M. Blacutt, L. Pabón, D. Jaimes, E. León, G. Villacís, M. Quintana, J. Montealegre, E. y Euscátegui, C. s/a. Synthesis of the Climate of the Tropical Andes. 13 pp.
- Marwan, M. Trauth, H. Vuille, M. Kurths, J. 2003. Comparing modern and Pleistocene ENSO-like influences in NW Argentina using nonlinear time series analysis methods. *Journal of Climate Dynamics*, 21, 10 pp.
- Minvielle m., and Garreaud R. 2011. Projecting Rainfall Changes over the South American Altiplano. *Journal of the American Meteorological Society*. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00051.1.
- Nordgren, M. 2011. Cambio Climático, percepciones, efectos y respuestas en cuatro regiones de Bolivia. La Paz-Bolivia. CIPCA Cuadernos de Investigación Nro. 73, 158 pp.
- PNCC-MMAyA. 2006. Tendencias de Balance Hídrico como indicador del Cambio Climático.
- PNCC. 2009. El CC en Bolivia. Análisis, Síntesis de Impactos y Adaptación.
- Saavedra, C y García, M. 2011. Impacto del cambio climático y su posible efecto sobre el cultivo de quinua en el altiplano boliviano. La Paz-Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés - Proyecto Quinagua. 8 pp.
- Sanabria, J. Marengo J. y Valverde, M. 2009. Escenarios de cambio climático con modelos regionales sobre el Altiplano peruano (Departamento de Puno). Perú. *Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA*, 1, 16 pp.
- Seiler C., 2009. Implementation and validation of a Regional Climate Model for Bolivia. Fundación Amigos de la Naturaleza, Santa Cruz, Bolivia.
- Seiler C., Hutjes R., Kavat P., 2013, Climate variability and trends in Bolivia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52, 130-146.
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). 2005. Escenarios Climáticos Futuros y Disponibilidad del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río Santa. Perú. Consejo Nacional del Ambiente – CONAM. 32 pp.
- Seth, A., M. Rojas, and S. A. Rauscher. 2010. CMIP3 projected changes in the annual cycle of the South American Monsoon. *Climatic Change* 98:331– 57.

- Seth, A, Thibeault, J, Garcia, M and Valdivia, C. (2010). Making Sense of Twenty- First-Century Climate Change in the Altiplano: Observed Trends and CMIP3 Projections, *Annals of the Association of American Geographers*: DOI: 10.1080/00045608.2010.500193.
- Solman, S., M. N. Nuñez and P. Rowntree. 2003. On the evaluation of the representation of mid – latitude transients in the Southern Hemisphere by HADAM2B GCM and the impact of horizontal resolution. *Atmósfera*. Vol. 16, N° 4, 245-272.
- Soria, F. 2010. Respuestas al cambio climático del escurrimiento y del flujo en ríos en cuencas altas. Tesis doctoral. Universidad de Tohoku, Japón.
- Thibeault, J., A. Seth, and M. Garcia.2010. Changing climate in the Bolivian Altiplano: CMIP3 projections for extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres* 115: D08103. [http:// www.agu.org/pubs/crossref/2010/2009JD012718.shtml](http://www.agu.org/pubs/crossref/2010/2009JD012718.shtml)
- Torres, J. 2011. Cambio climático, conocimientos ancestrales y contemporáneos en la región andina. Alcances y limites parte del taller internacional clima andino. Bolivia. 88 pp.
- Valdivia C., Thibeault J., Gilles J. L., Garcia M., Seth, A., 2013. Climate trends and projections for the Andean Altiplano and strategies for adaptation. *Adv. Geosci.*, 33, 69–77, 2013.
- Vecchi,G.A., and B. J. Soden. 2007. Global warming and the weakening of the tropical circulation. *Journal of Climate* 20:4316–40.
- Vera, C., Higgins, W., Amador, J., Ambrizzi, T., Garreaud, R., Gochis, D., Gutzler, D., Lettenmaier, D., Marengo, J., Mechoso, C.R., Nogues-Paegle, J., Silva Diaz, P.L., Zhang, C., 2006. Towards a unified view of the American Monsoon System.*Journal of Climate* 19, 4977–5000.
- Vergara, W. Deeb, A. Valencia, A. Bradley, R. Francou, B. Zarzar, A. Grünwaldt, A. y Haeussling S. 2007. Economic Impacts of Rapid Glacier Retreat in the Andes. *EOS*, 88, No. 25, 3 pp.
- Vizy, E & Cook, K. 2006. Relationship between Amazon and High Andes rainfall.*Journal of geophysical research*.
- Vuille, M., 1999: Atmospheric circulation over the Bolivian Altiplano during dry and wet periods and extreme phases of the Southern Oscillation. *Int. J. Climatol.*, 19, 1579-1600.
- Vuille, M.Bradley, R. 2000. Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes. *Journal of Geophysical Research Letters* 27, Nro 23, 4 pp.
- Vuille, M. Bradley, R. Werner, M. y Keimig, F. 2003. 20th Century climate change in the tropical Andes: observations and model results. Netherlands. *Journal of Climatic Change*, Kluwer Academic Publishers, 59, 25 pp.
- Vuille, M., Francou, B. Wagnon, P. Juen, I. Kaser, G. Mark, B. y Bradley, R. 2008. Climate change and tropical Andean glaciers – Past, present and future. *Journal of Earth Science*, 89, 18 pp.
- Vuille M. y Garreaud R. 2009. Chapter 22: Ocean-Atmosphere interactions on interannual to decadal timescales. 60 pp.
- Wagnon, P. Ribstein, P. Kaser, G. y Berton, P. 1999. Energy Balance and Runoff Seasonality of a Bolivian Glacier.*Global and Planetary Change* Vol 22.
- Zhou, J., Lau, K.M., 1998. Does a monsoon climate exist over South America? *Journal of Climatology* 11, 1020-1040.



Capítulo 2

Evaluación de la información climática de las estaciones meteorológicas cercanas a las zonas de influencia del PRRD



2.1. INTRODUCCIÓN

Se define como clima al conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan a una región. Este estado medio del tiempo se deduce a partir de los datos correspondientes a los estados del tiempo en ese lugar durante un prolongado periodo, generalmente no menor a 20 años. El clima tiene fundamental importancia sobre el planeta, especialmente sobre la vida que existe en él ya que modela el relieve e incide en la distribución de las aguas continentales, determina el crecimiento y/o existencia de vegetales y animales (biomasa) y condiciona las actividades económicas y la migración humana. Los factores meteorológicos que son los principales indicadores del clima en una zona son la temperatura y la precipitación, pues en el primero se refleja principalmente el balance energético a nivel superficial y el segundo determina y es determinado por la circulación general de la atmósfera y por la humedad atmosférica, por lo tanto, son ellos también los indicadores principales del cambio climático. Es por esta razón que las descripciones climáticas se basan principalmente en la descripción de estos parámetros.

En el presente documento se intenta hacer una descripción de las condiciones climáticas medias de las estaciones incluidas en el estudio de Downscaling para áreas de influencia del Programa de Reducción del Riesgo de Desastres (PRRD) de la Cooperación Suiza, implementado por la Fundación HELVETAS Swiss Intercooperation en las mancomunidades: Norte Paceño Tropical, Aymaras Sin Fronteras, Norte Potosí, Gran Centro Potosí, Región Andina, Caine, Cintis, Héroes de la Independencia y Chaco Chuquisaqueño.

2.2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de análisis incluye los municipios presentados en la Tabla 2.1, de los cuales se seleccionó las estaciones con mejor registro.

El área analizada se encuentra distribuida en el área centro occidental del territorio boliviano e incluye básicamente a los municipios apoyados por el PRRD.

2.3. ESTACIONES METEOROLÓGICAS INCLUIDAS EN EL ESTUDIO

La Tabla 2.1 presenta las características geográficas de las estaciones meteorológicas incluidas en el estudio. Se intentó trabajar con datos de estaciones ubicadas en el mismo municipio y con un registro rescatable de años de Temperaturas Mínimas ($T_{\min}$) y Máximas ($T_{\max}$) y Precipitaciones (PP). Sin embargo, en algunos casos se incluyeron estaciones con registros de series cortas debido a los vacíos de información climática en la base de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología- SENAMHI ya que se requería contar al menos con datos referenciales del comportamiento climático medio de las zonas. En otros casos, se acudió a estaciones cercanas con mejor registro climático para representar la realidad de la zona o municipio estudiado. La Tabla 2.1 presenta la descripción geográfica de las estaciones incluidas en el estudio con el registro disponible. También se presentan casos con información de estaciones cercanas, utilizadas para municipios sin cobertura de estaciones meteorológicas.



Tabla 2.1.

Localización de las estaciones de trabajo, longitud y calidad del registro disponible en periodo de observación

Estación	Latitud Sud	Longitud Oeste	Lambert WGS84		Altitud (mts)	Periodo de Precipitación	Temperatura Máxima	Temperatura Mínima	Observaciones
			Y	X					
Acasio	18° 10' 00"	66° 50' 00"	-18,167	-66,833	3020	1979 al 1994	Solo 93 y 94	Solo 93 y 94	En PP, faltan 81 y 88
Anzaldo	17° 47' 10"	65° 55' 58"	-17,786	-65,933	3032	1970 al 2009	97 al 2010	97 al 2009	En PP, faltan 84 al 88
Apolo	-	-	-	-	-	-	-	-	Sin observación
Betanzos	19° 33' 00"	65° 27' 00"	-19,550	-65,450	3320	1978 al 1992	Sin registro	Sin registro	En PP faltan 85 87 y 93
Bolívar	17° 58' 00"	66° 32' 00"	-17,967	-66,533	2813	1969 al 1994	Sin registro	Sin registro	
Caiza D	20° 00' 00"	65° 39' 00"	-20,000	-65,650	3880	1977 al 1999	Solo 2002	Solo 2002	
Calacoto	17° 16' 37"	68° 38' 02"	-17,277	-68,634	3826	1960 al 2010	72 al 2010	72 al 2010	
Camargo	20° 38' 00"	65° 12' 00"	-20,633	-65,200	2440	1975 al 1984	Sin registro	Sin registro	En PP, solo es homogéneo de 75-1984
Capinota	17° 42' 36"	65° 15' 55"	-17,710	-65,265	2406	1960 al 2009	60 al 2009	60 al 2009	Faltan 98 99, 01 02. Presenta problemas de homogeneidad
Chaquí	19° 35' 00"	65° 33' 00"	-19,583	-65,550	3550	1980 al 2007	82 al 2010	82 al 2010	
Charaña	17° 35' 0"	69° 27' 0"	-17,583	-69,450	4057	1979 al 2008	79-2008	79-2008	
Corque	18° 20' 38"	67° 40' 42"	-18,344	-67,678	3758	1989 al 1998	solo 95 al 97	solo 95 al 97	En PP, faltan 91 y 96
Culpina	20° 49' 06"	64° 56' 52"	-20,818	-64,948	2970	1974 al 2010	75 al 2010	74 al 2010	Falta 85, 96 y 97
Curahuara de Carangas	17° 50' 33"	68° 24' 59"	-17,843	-68,416	3906	1976 al 1981	76 al 81	77 al 81	Registro corto
El Puente	14° 43' 00"	68° 31' 00"	-14,717	-68,517	1383	1976 al 1987	75 al 87	75 al 87	Con irregularidades
Guanay	15° 30' 11"	67° 53' 90"	-15,503	-67,908	420	1989 al 1993	07 al 10	07 al 10	
Huacareta	20° 21' 40"	64° 00' 80"	-20,361	-64,022	1140	1975 al 2000	Sin registro	Sin registro	
Ixiamas	13° 46' 00"	68° 08' 00"	-13,767	-68,133	254	1977 al 1980	Sin registro	Sin registro	
Las Carreras	21° 11' 00"	65° 12' 00"	-21,183	-65,200	2310	1979 al 1999	Sin registro	Sin registro	
Llallagua	18° 28' 00"	66° 33' 00"	-18,467	-66,550	3792	2003 al 2009	03 al 09	03 al 08	Referencia para estaciones de zona andina de Cbba.
Machareti	20° 48' 49"	63° 21' 36"	-20,814	-63,360	660	1987 al 1994	91 al 94	91 al 94	
Montea-gudo	19° 46' 10"	63° 57' 10"	-19,769	-63,953	1117	1973 al 2009	69 al 08	69 al 08	Deficiente del 86 al 97
Muyu-pampa	19° 52' 00"	63° 46' 00"	-19,867	-63,767	1090	1975 al 1993	83 al 90	83 al 90	Temperaturas con inconsistencias

Continúa

Estación	Latitud Sud	Longitud Oeste	Lambert WGS84		Altitud (mts)	Precipitación	Temperatura Máxima	Temperatura Mínima	Observaciones
			Y	X					
Pocoata	18° 42' 00"	66° 10' 00"	-18,700	-66,167	3360	2004 al 2006	04 al 06	04 al 06	Registro muy corto
Poroma	18° 32' 03"	65° 25' 33"	-18,534	-65,426	2300	1974 al 2010	Sin registro	Sin registro	
Puna	19° 48' 00"	65° 30' 00"	-19,800	-65,500	3420	1961 al 2005	76 al 2005	76 al 2005	
Rurrenabaque (para San Buenaventura)	14° 25' 44"	67° 30' 10"	-14,429	-67,503	204	1960 al 2010	60 al 2010	60 al 2010	
Sacabamba	17° 48' 00"	65° 53' 00"	-17,800	-65,883	3174	1976 a 2010	Sin registro	Sin registro	
Sacaca	18° 01' 00"	66° 20' 00"	-18,017	-66,333	3700	2006 al 2010	2006 al 10	2006 al 10	
San Lorenzo	21° 25' 00"	64° 45' 00"	-21,417	-64,750	1900	1976 al 1992	Sin registro	Sin registro	
San Lucas	20° 05' 00"	65° 08' 02"	-20,083	-65,134	3055	1995 al 2010	95 al 2010	95 al 2010	Registro corto
San Pedro de Buena-vista	18° 16' 00"	65° 59' 00"	-18,267	-65,983	2743	1971 al 1983	72 al 75	72 al 75	Registro corto
Sapecho	15° 33' 56"	67° 19' 30"	-15,566	-67,325	410	1972 al 2010	74 al 2010	74 al 2010	
Tacacoma	15° 35' 00"	68° 43' 00"	-15,583	-68,717	3330	1976 al 1987	Sin registro	Sin registro	
Tarata	17° 36' 31"	66° 10' 22"	-17,609	-66,173	2775	1964 al 2009	64 al 2009	64 al 2009	
Tarija (para San Lorenzo)	21° 54' 67"	64° 71' 08"	-21,919	-65,186	1849	1985 al 2010	85 al 2010	85 al 2010	
Tinquipaya	19° 13' 00"	65° 49' 00"	-19,217	-65,817	3200	1977 al 2009	77 al 2010	77 al 2010	Consistente desde 1995
Tipuani	15° 30' 00"	68° 00' 00"	-15,500	-68,000	560	1972 al 1978	76 al 78	76 al 78	Registro corto
Tomave	20° 60' 00"	66° 34' 00"	-21,000	-66,567	3920				Pocos datos e irregular
Toro Toro	18° 11' 00"	65° 43' 00"	-18,183	-65,717	2700	1992 al 2000	92 al 2000	82 al 2000	
Villa Abecia	20° 58' 00"	65° 13' 00"	-20,967	-65,217	2280	1979 al 2002	Sin registro	Sin registro	En PP falta del 1985 al 1988
Yocalla	19° 23' 00"	65° 44' 00"	-19,383	-65,733	3450	1976 al 2010	76 al 2010	76 al 2010	

2.4. CONTROL DE CALIDAD DE LA INFORMACIÓN CLIMÁTICA

Con el fin de presentar el producto de la caracterización climática y la evaluación de tendencias históricas climáticas, fue necesario realizar un análisis de consistencia sobre la base de datos mostrada, siguiendo las pautas establecidas en la guía de control de calidad de datos climatológicos de superficie publicada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en el Programa Mundial de Datos Climáticos (1984) y teniendo en cuenta experiencias previas.

El análisis de consistencia para la temperatura se dividió en tres etapas: lectura de datos y control de formatos, eliminación de errores "indiscutibles" (por ej. casos con temperatura máxima inferior a la mínima, secuencias de temperaturas

de 0° C irreales y "outliers") y finalmente, controles sobre diferencias de temperaturas entre dos días consecutivos.

La precipitación se evaluó analizando extremos, datos imposibles y datos repetidos. Adicionalmente, se evaluó su homogeneidad aplicando el software Rainbow (Raes *et al.*, 2006) de tal manera de demostrar su independencia. Este software ofrece un test de homogeneidad que se basa en las desviaciones acumuladas de la media. El test, además, permite evaluar su Función de Densidad de Probabilidad.

Como ejemplo del análisis de consistencia se presentarán los resultados de la estación de Capi- nota. En esta estación se contaba inicialmente con 50 años de información diaria de precipitación, temperaturas máximas y mínimas.

En primera instancia se realizó la observación visual de la estructura de los datos, de $T_{\text{máx}}$ y $T_{\text{mín}}$ en la que son fácilmente observables los saltos que ocurrieron en ambas variables como se aprecia en la Figura 2.1.

Para el caso de la precipitación, se realizó similar análisis con los valores de la precipitación anual en mm, observándose un fuerte salto desde 1985 y que los registros previos muestran un promedio menor que los posteriores. Para establecer el periodo a analizarse, los datos anuales se introdujeron al software RAINBOW, que realizó el análisis de homogeneidad.

El primer periodo hasta 1984 muestra una falta de homogeneidad con el resto del registro, lo que hace deducir que por algún factor externo este observatorio tuvo un corte precisamente a partir de 1984 (Figura 2.3.).

Una vez cortado el registro hasta 1984, se pudo identificar el periodo homogéneo que se

extiende entre 1984-2009 y que también muestra una clara homogeneidad estadística (Figura 2.4.).

El mismo análisis se realizó a todas las estaciones para filtrar los datos no consistentes y/o imposibles, llegando a los registros que se presentan en la Tabla 2.1.

Una vez concluido, se procedió a la evaluación agroclimática de los registros disponibles en la zona de estudio y el análisis de tendencias de variación térmica y pluviométrica en las estaciones que contaban con registros suficientes. Es necesario mencionar que en el caso de temperaturas, de las 46 estaciones incluidas en el estudio, solamente 9 presentaban registros lo suficientemente consistentes y de longitud adecuada para realizar un análisis de tendencias, lo que llama poderosamente la atención para estudios más generales del cambio climático. Afortunadamente, estas estaciones son representativas de las macrozonas ecológicas donde se realiza el trabajo y otorgaron una referencia de análisis para ellas.

Figura 2.1.
Observación visual de los registros de $T_{\text{máx}}$ y $T_{\text{mín}}$ de Capinota.

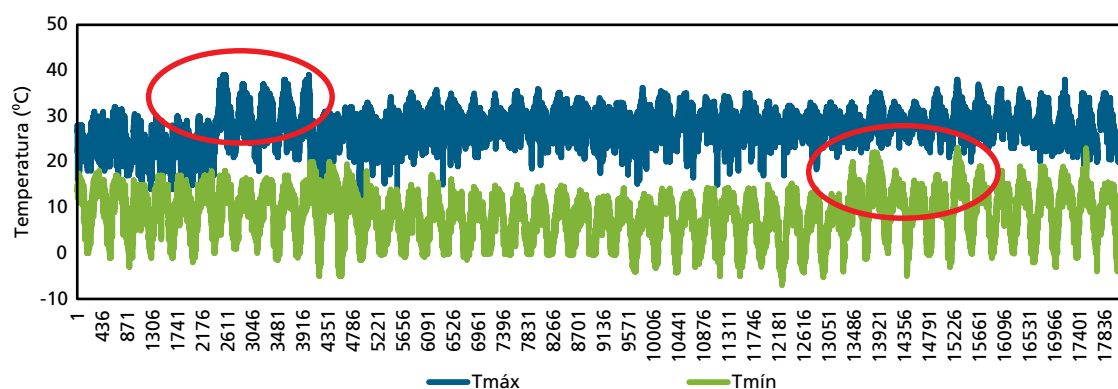


Figura 2.2.
Observación visual de los datos de PP anual de Capinota.

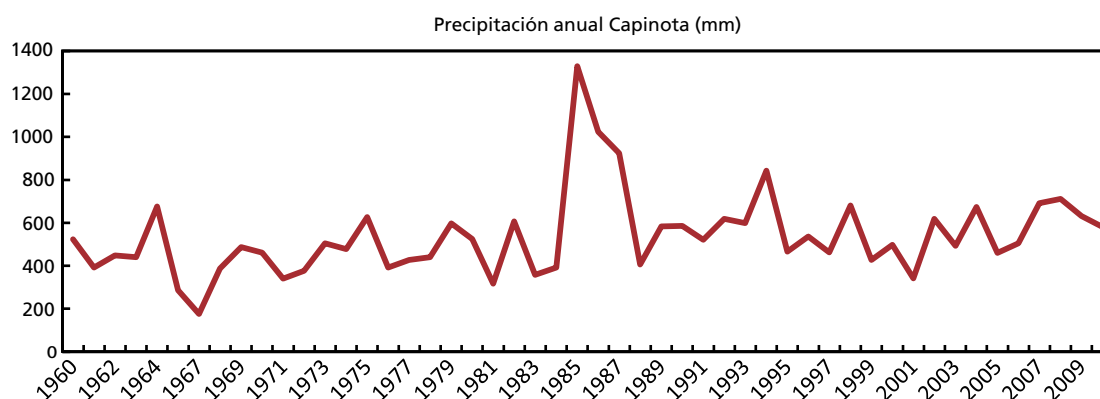


Figura 2.3.
Prueba de homogeneidad de PP anual de Capinota. Nótese el alto nivel de dispersión de los registros previos a 1984.

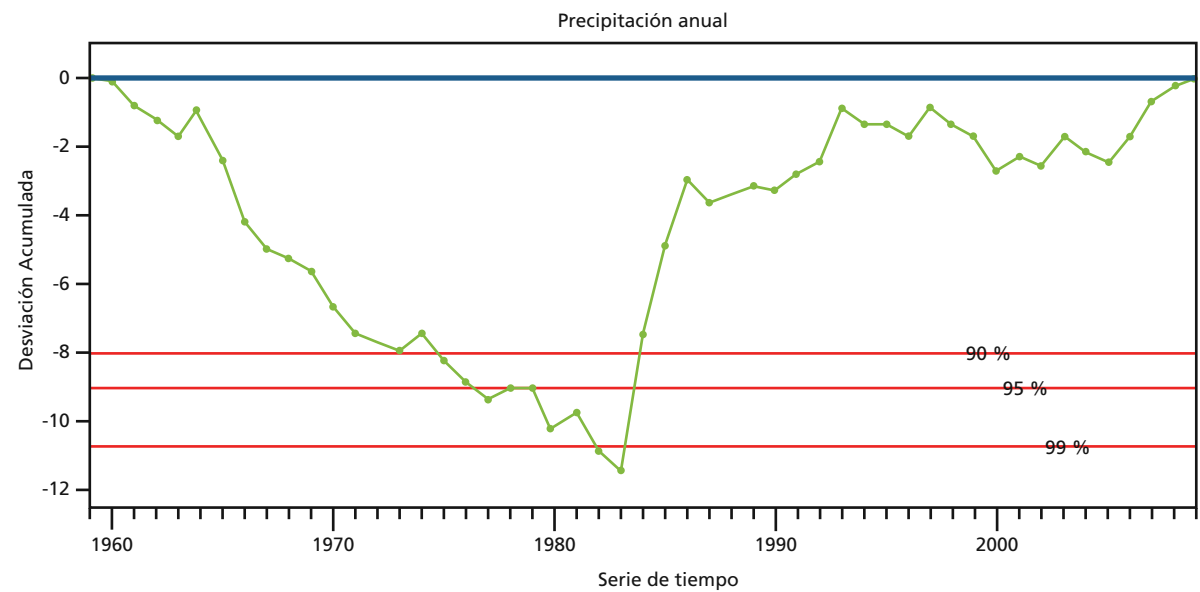
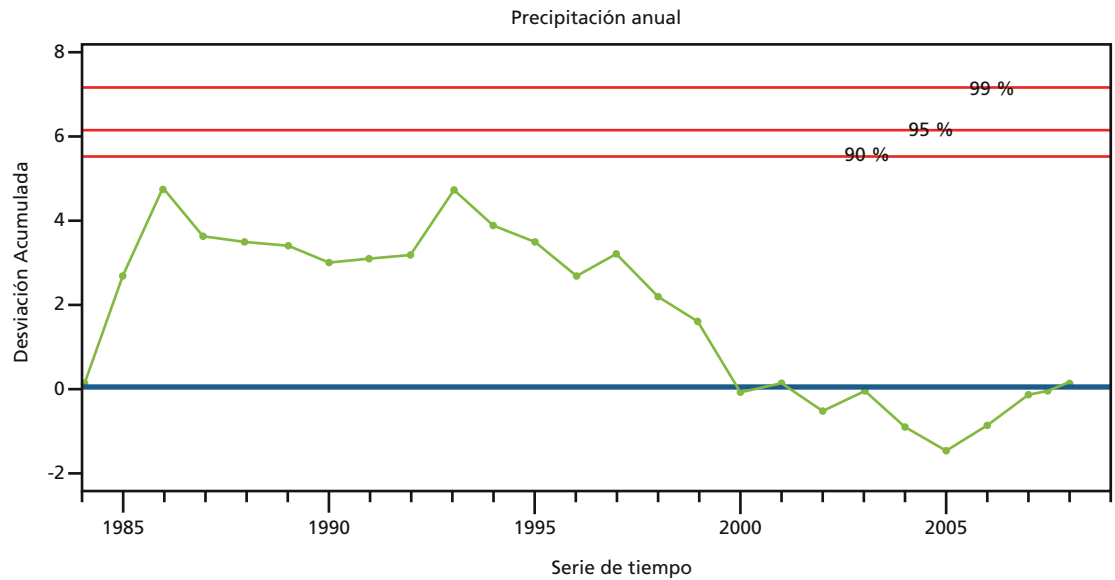


Figura 2.4.
Prueba de homogeneidad de la PP anual de Capinota. Nótese que los registros y su secuencia no entran al rango de rechazo estadístico.



2.5. RESULTADOS

2.5.1. Temperatura Mínima (T_{mín})

2.5.1.1. Variaciones promedio mensuales

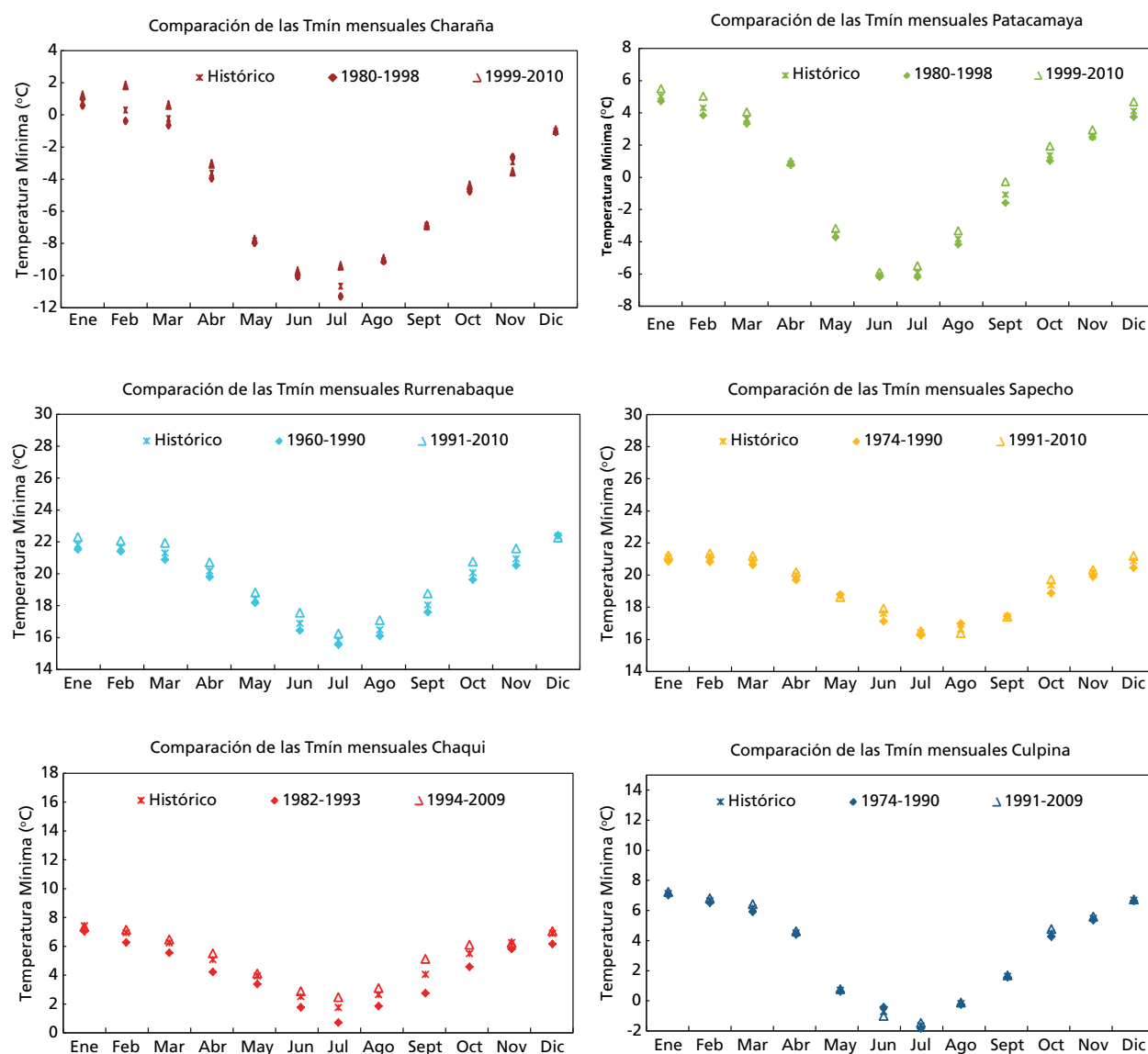
La T_{mín} es una de las mayores limitantes para el desarrollo de cultivos anuales en muchas zonas del país. Esta limitación es mayor cuanto mayor es la altitud del punto considerado. Los reportes de cambio climático indican que uno de los mayores impactos de éste se expresa en la ele-

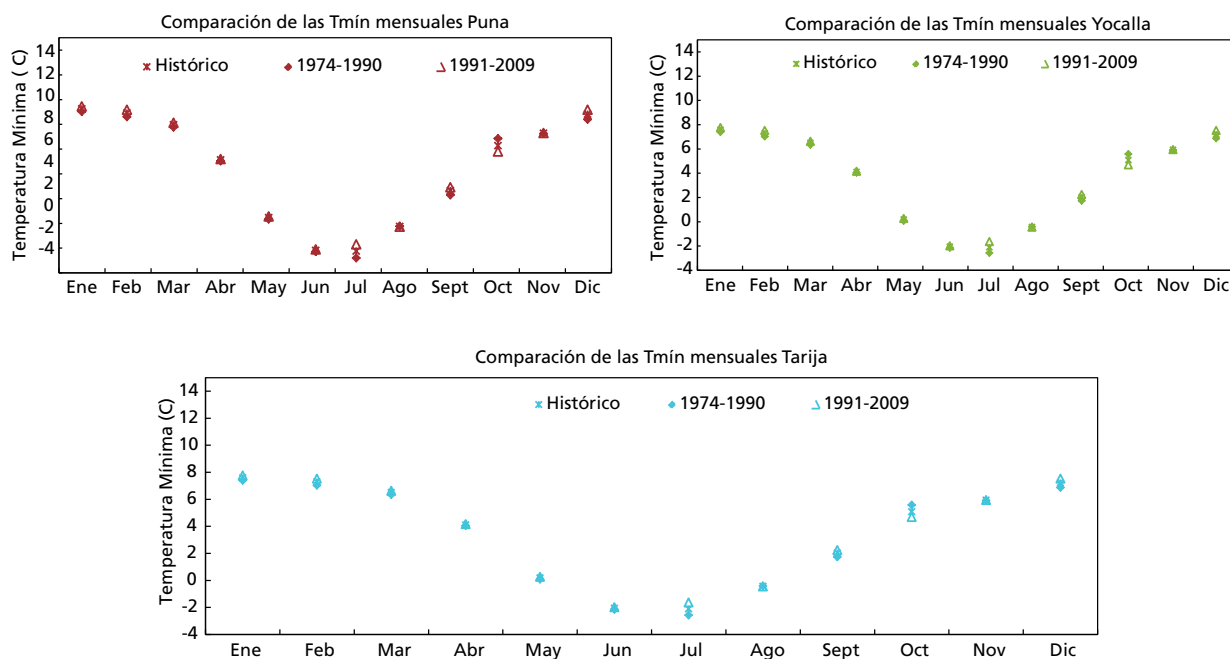
vación de la T_{mín}, por lo que esto será evaluado para las estaciones que permiten el análisis.

La Figura 2.5 describe las diferencias en calentamiento de las estaciones estudiadas. Se aprecia que la estación que sufrió menos cambios en sus T_{mín} fue la zona de Sapecho en forma homogénea para todos los meses, mientras que Chaquí presenta incrementos cercanos a 1°C en todos los meses. Las restantes estaciones muestran un calentamiento menor de la T_{mín}.

Figura 2.5.

Promedio mensual de la T_{mín} en las estaciones consideradas. Se compara el promedio histórico con el promedio de los dos medios de los registros con el fin de identificar cambios si los existiera.





2.5.1.2. Tendencias históricas

La Figura 2.6, muestra la evolución histórica de las Tmín promedio por estaciones en los registros de las estaciones seleccionadas para el caso. Es interesante mencionar que las temperaturas mínimas de las zonas más altas o intermedias muestran mayores ascensiones.

Este proceso podría confirmar lo encontrado por diversos autores (Capítulo No. 1) que mencionan que la magnitud del calentamiento depende también de la altitud del punto considerado, pues efectivamente los puntos que se encuentran a menor altitud, también demuestran una leve, pero menor tasa de calentamiento.

Es necesario poner atención en las características de altitud de las estaciones que aparentemente parecen tener coherencia con las tasas de calentamiento, pues las estaciones de zonas bajas no muestran elevaciones significativas de temperatura.

Con el fin de describir los cambios en las tendencias y en base a los resultados provistos por los registros disponibles y de estudios adyacentes de evaluación general de las tendencias de cambio de las variables climáticas en Bolivia (Seiler *et al.*,

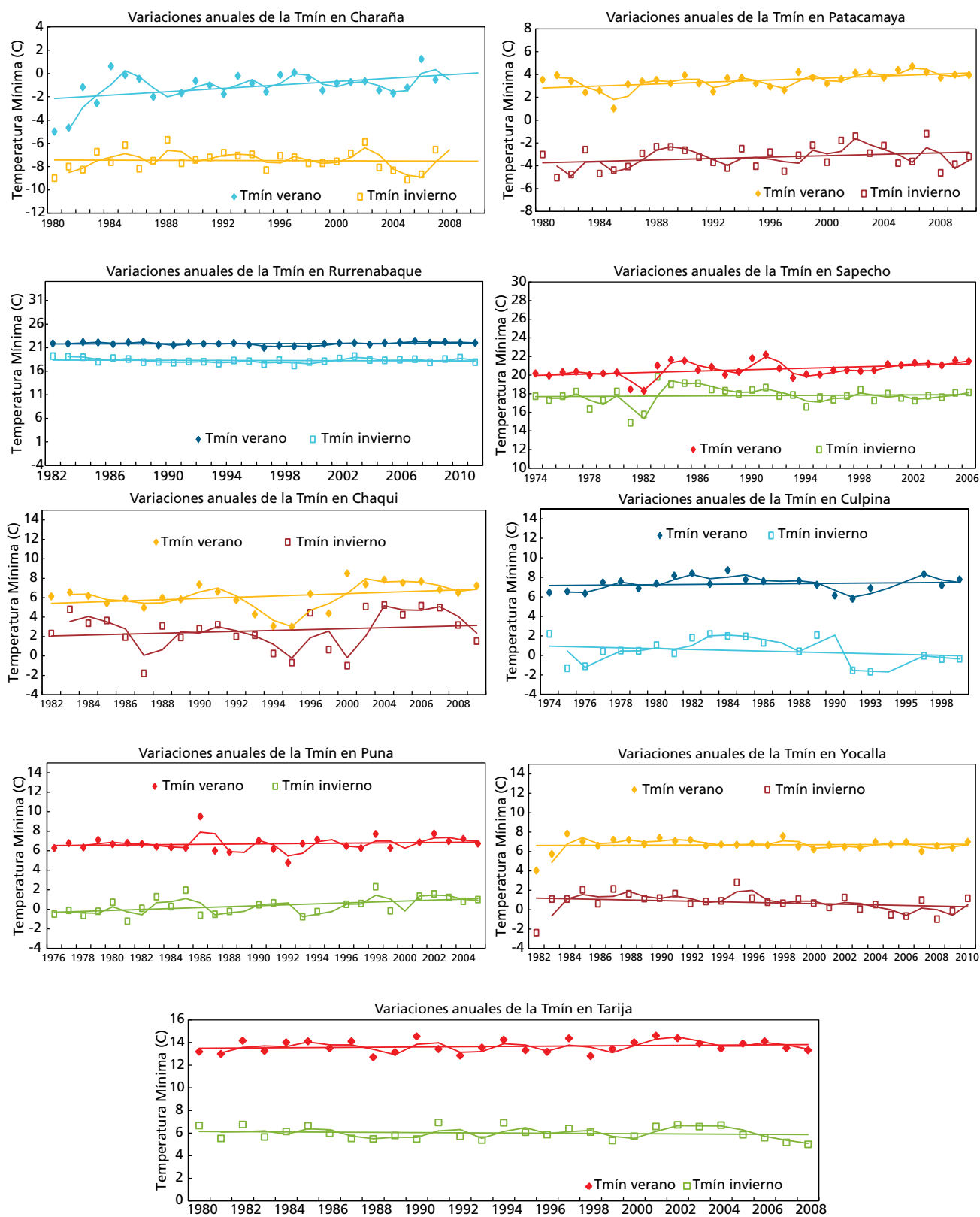
(2013)¹ y Climate Wizard (climatewizard.org), se procedió a identificar las tendencias medias de cambio, tanto de la temperatura mínima como de la máxima para los municipios estudiados (Mapas 2.1. al 2.9.).

Los mapas presentados muestran que los calentamientos son diferentes entre épocas del año. La zona del Norte Paceño Tropical, se presenta como la que menor calentamiento presenta tanto en invierno como en verano, siendo que en invierno el calentamiento es prácticamente nulo. Como se mencionó antes, la gran masa vegetacional podría modular la magnitud del calentamiento en esta zona. En el caso de Norte Potosí también se percibe un calentamiento diferente entre épocas aunque con mayor similitud y con mayor intensidad que en Norte Paceño Tropical. Las zonas del Altiplano y Región Andina de Cochabamba muestran calentamiento más notorio en verano que en invierno, pero no tan marcado como en los valles interandinos de altitud intermedia como los situados en el Centro de Potosí y en los Cintis. En todas las zonas mencionadas anteriormente se percibe mayor calentamiento en verano que en invierno.

¹ Seiler, Christian, Ronald W. A. Hutjes, Pavel Kabat, 2013: Climate Variability and Trends in Bolivia. J. Appl. Meteor. Climatol., 52, 130–146. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0105.1>

Figura 2.6.

Evolución estacional de la Temperatura Mínima promedio mensual en las estaciones consideradas.

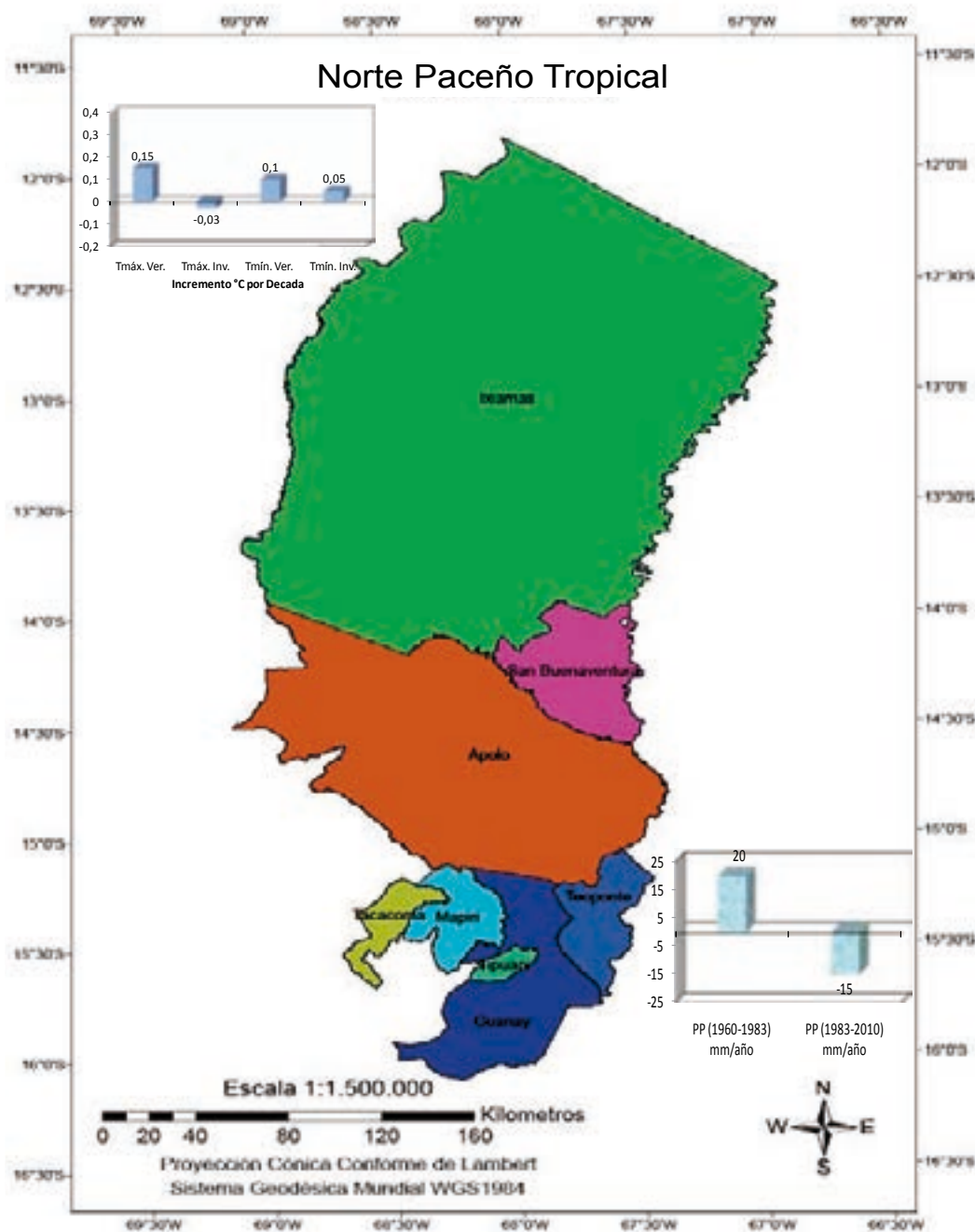


En el caso del Chaco Chuquisaqueño y de la cuenca del Caine, el calentamiento es levemente mayor en invierno que en verano, seguramente debido a características fisiográficas locales que provocan cierta acumulación de humedad en invierno, lo que favorece a que las temperaturas

nocturnas no desciendan. Finalmente la zona de Héroes de la Independencia no presenta calentamiento significativo que, igual que el Norte Paceño tendría que ver con su mayor presencia de stock de carbono en bosques.

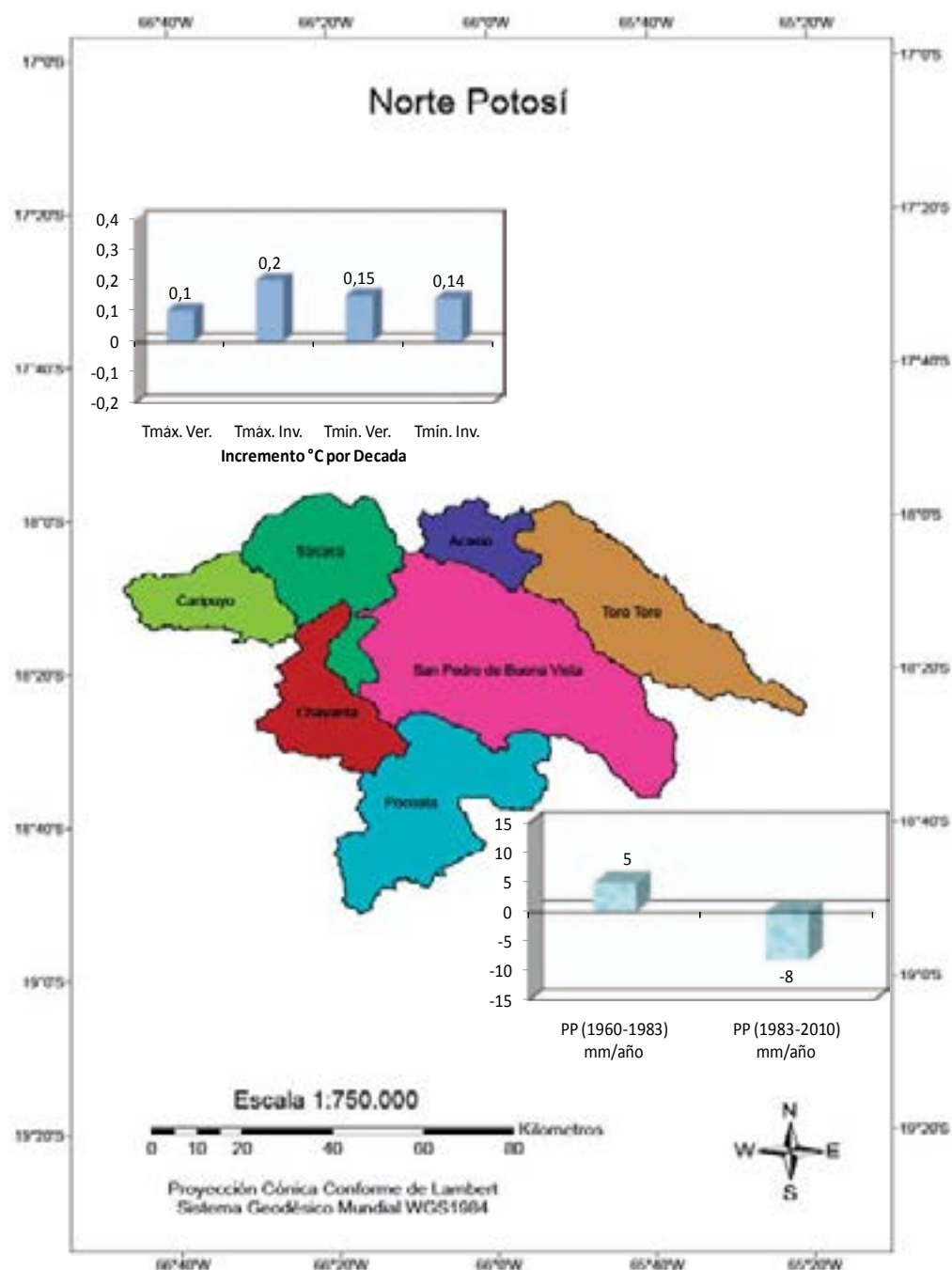
Mapa 2.1.

Tendencias de cambio de la temperatura en °C por cada 10 años desde 1960 y de la precipitación en mm/año para la Mancomunidad del Norte Paceño Tropical.



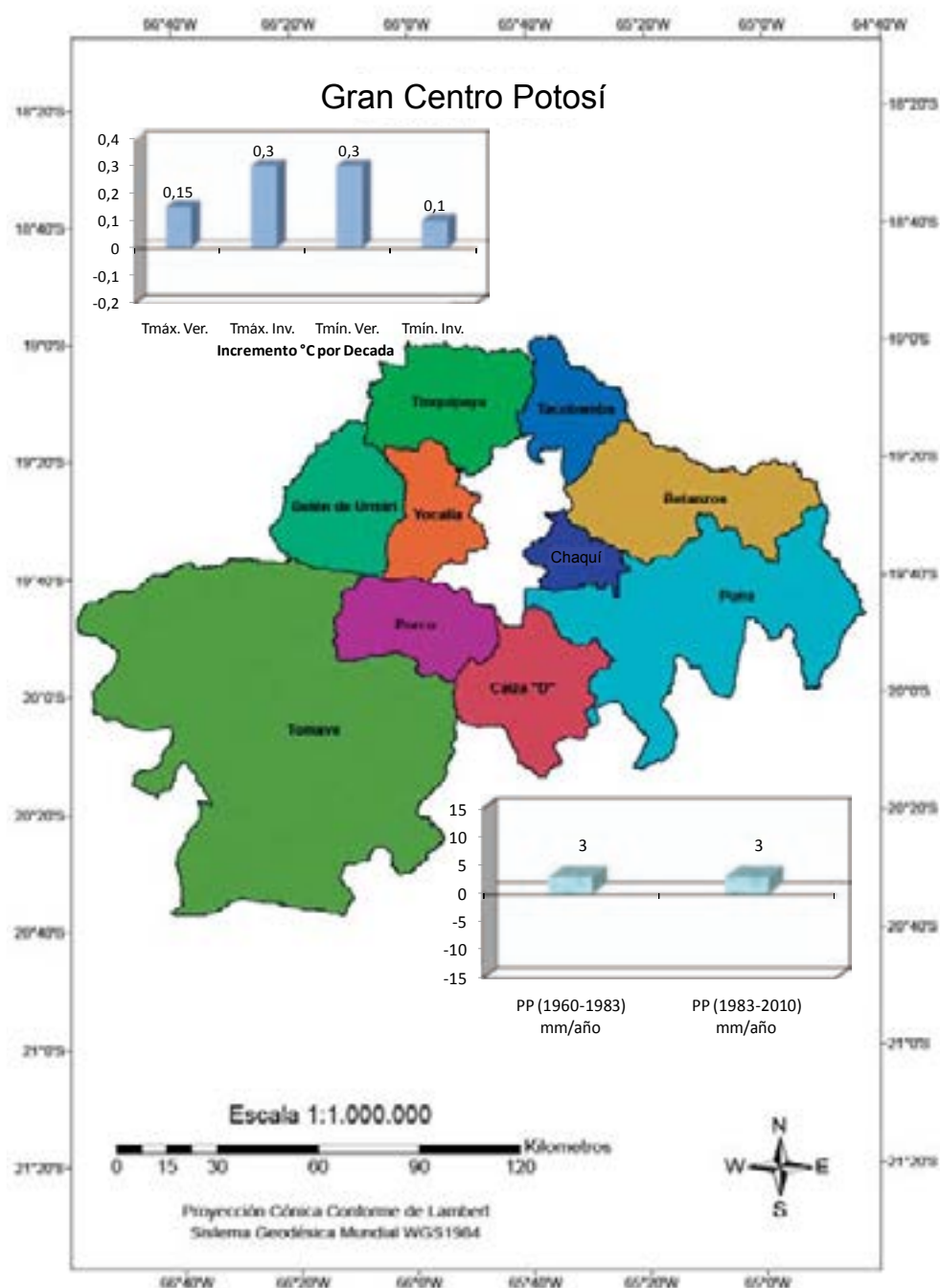
Mapa 2.2.

Tendencias de cambio de la temperatura en °C por cada 10 años desde 1960 y de la precipitación en mm/año para la Mancomunidad Norte Potosí.

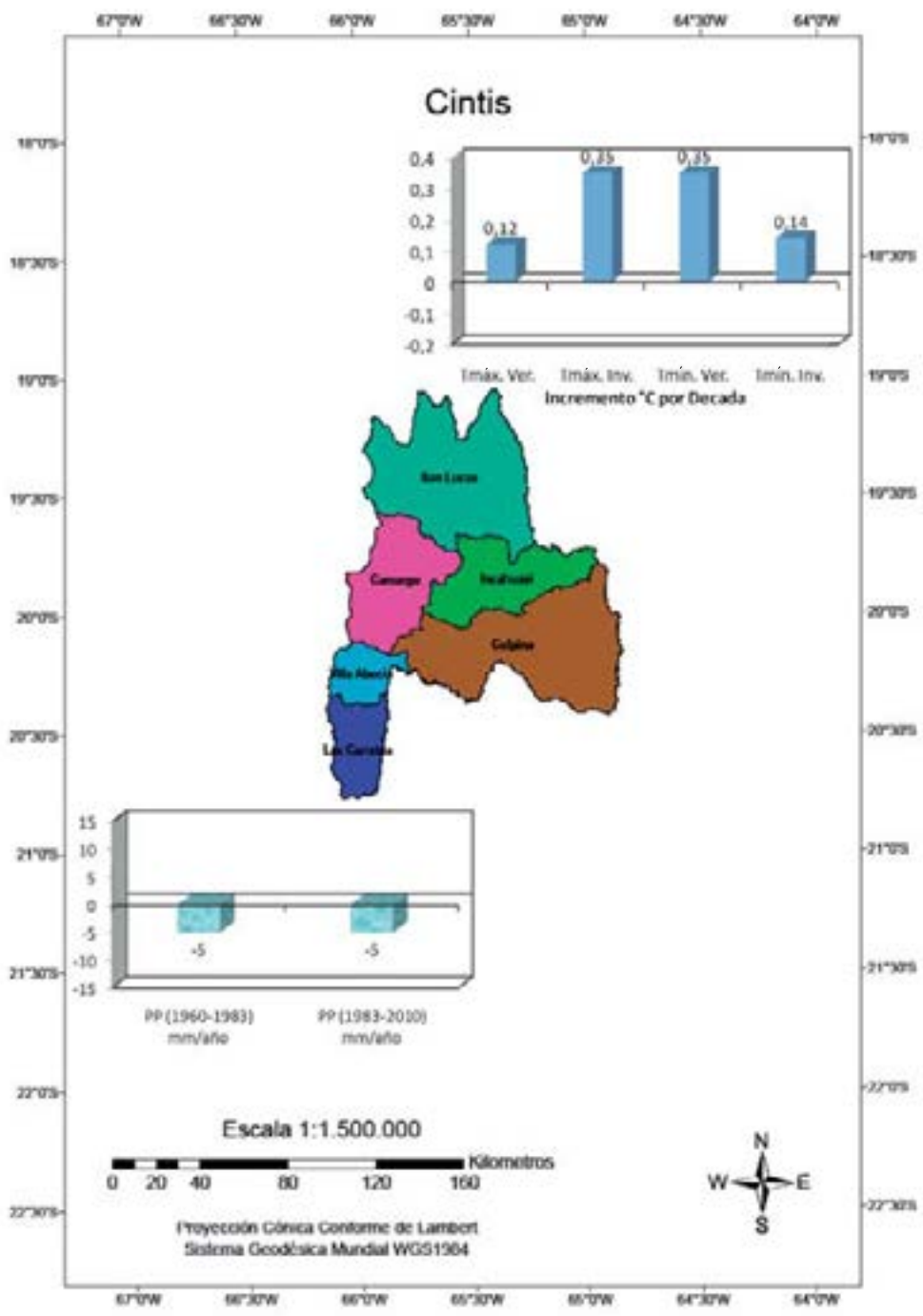


Mapa 2.4.

Tendencias de cambio de la temperatura en °C por cada 10 años desde 1960 y de la precipitación en mm/año para la Mancomunidad Gran Centro Potosí.

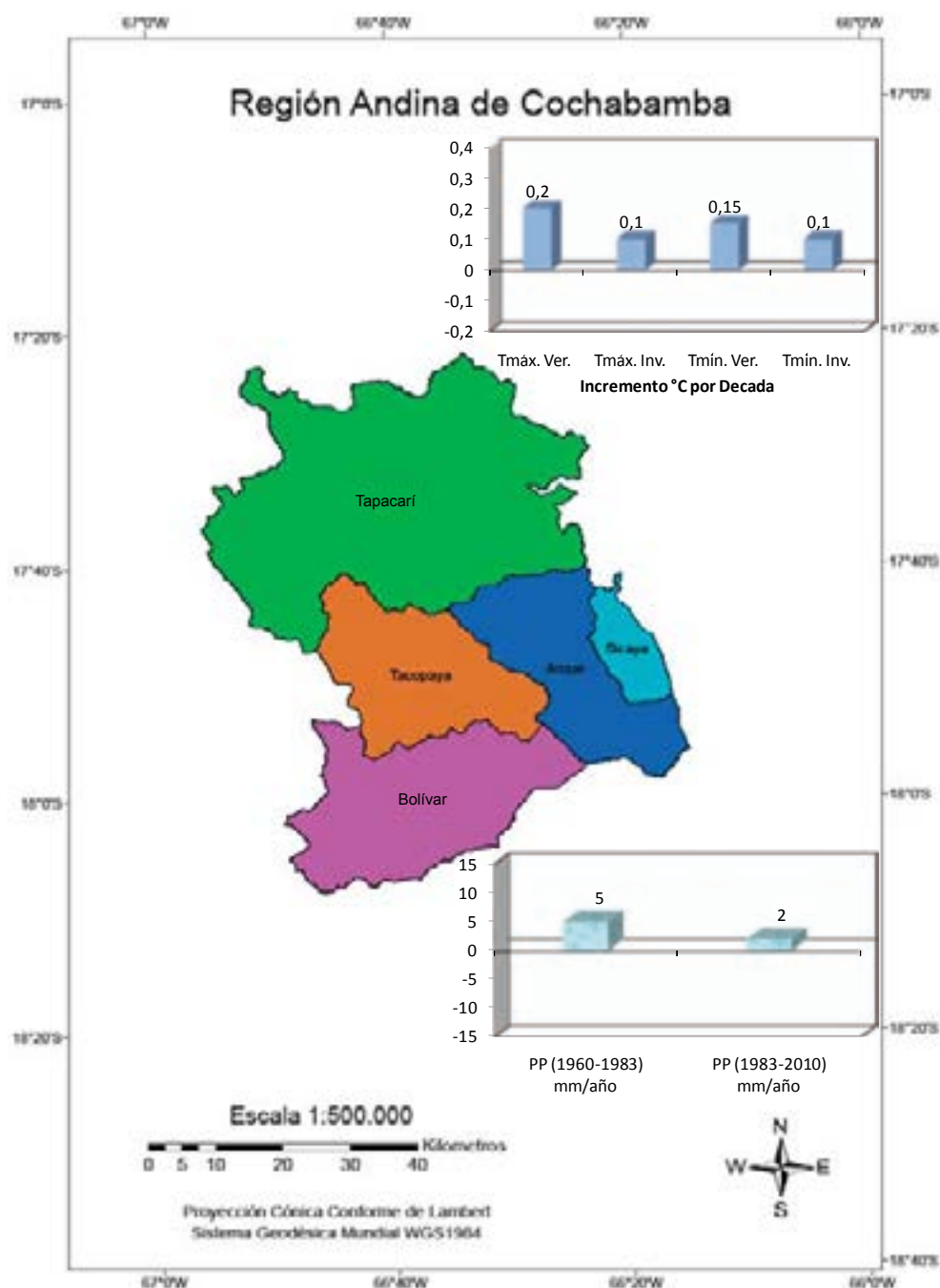


Mapa 2.5.
Tendencias de cambio de la temperatura en °C por cada 10 años desde 1960 y de la precipitación en mm/año para la Mancomunidad Cintis.

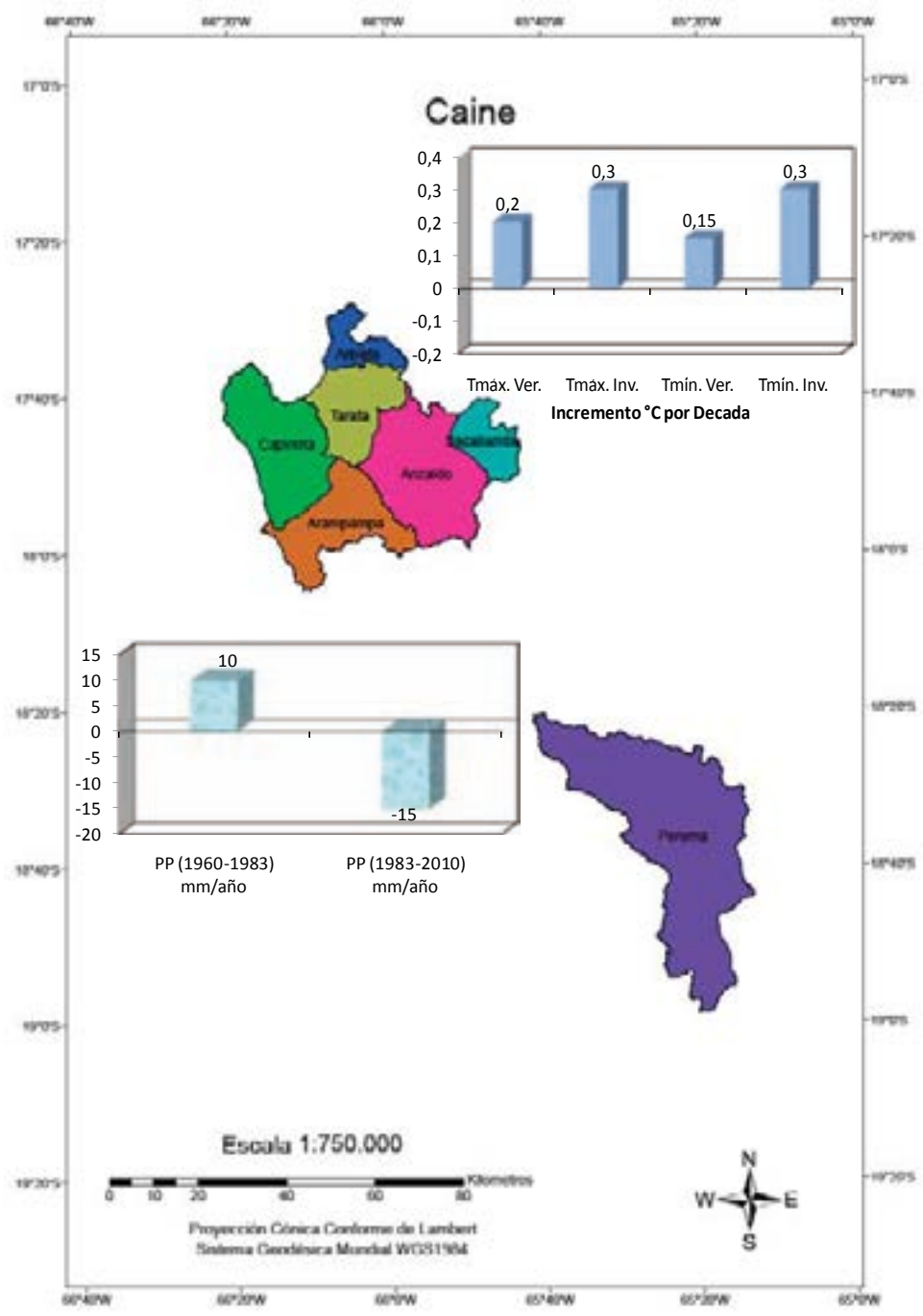


Mapa 2.6.

Tendencias de cambio de la temperatura en °C por cada 10 años desde 1960 y de la precipitación en mm/año para la Mancomunidad Región Andina de Cochabamba.

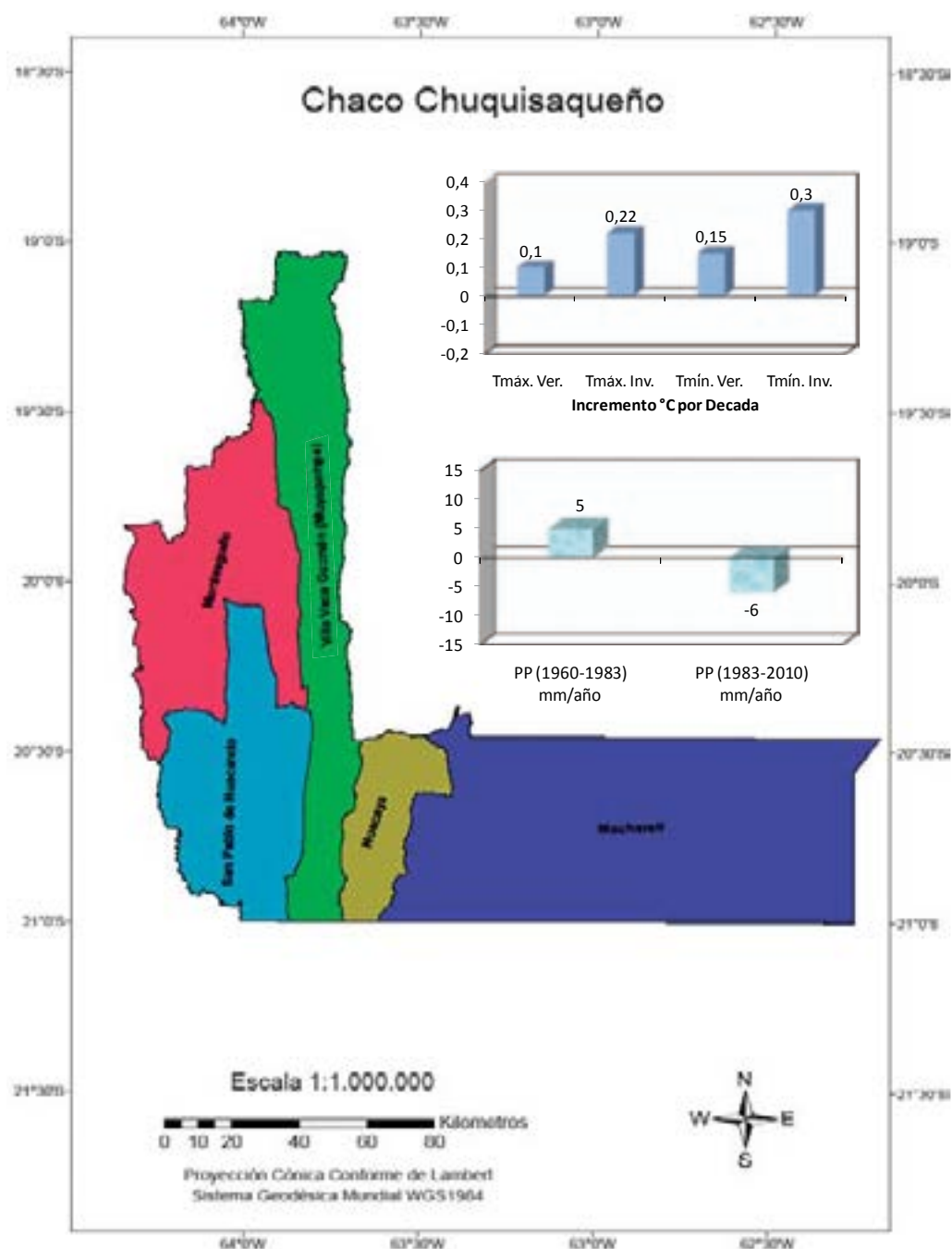


Mapa 2.7.
Tendencias de cambio de la temperatura en °C por cada 10 años desde 1960 y de la precipitación en mm/año para la Mancomunidad del Caine.

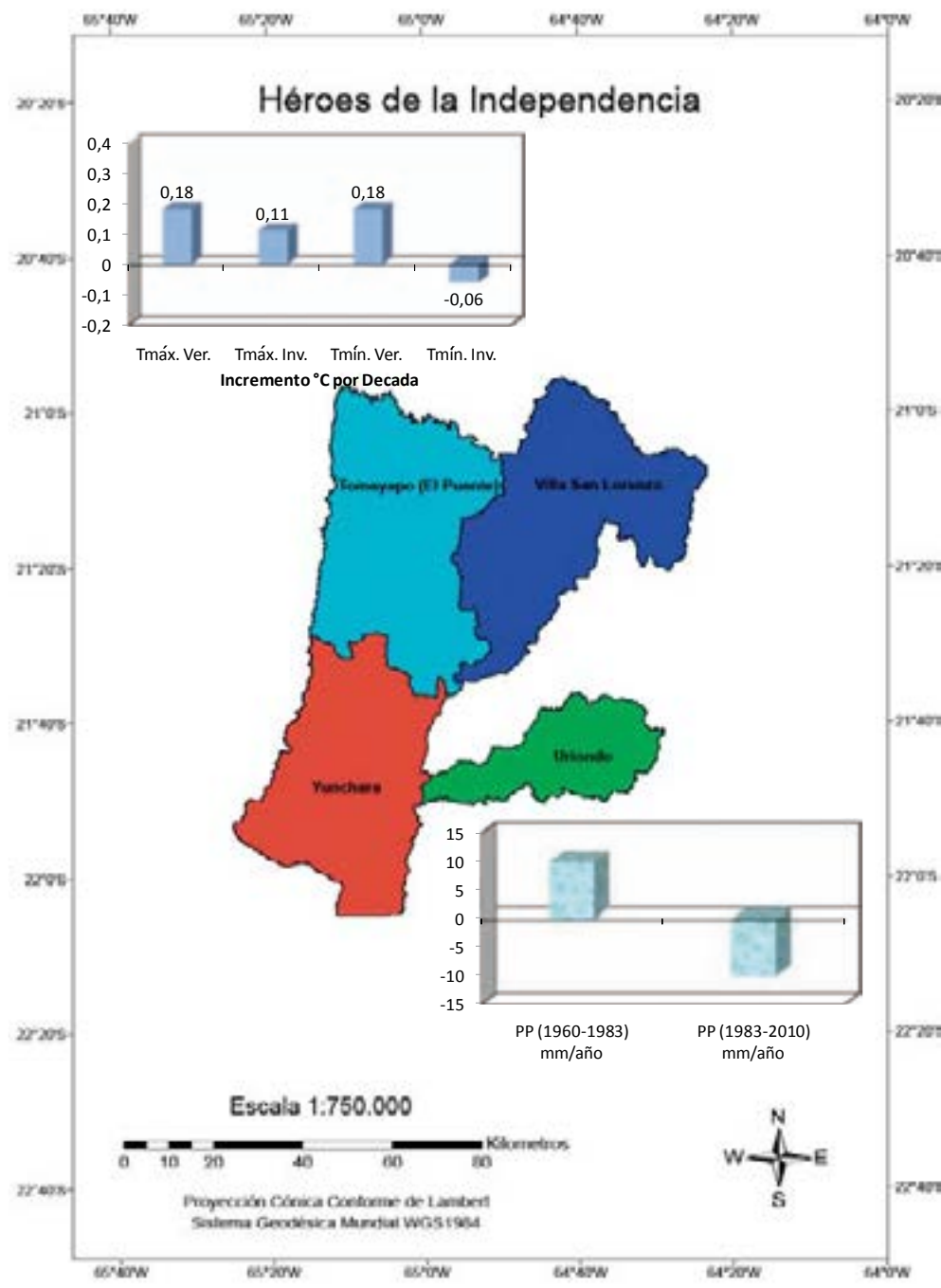


Mapa 2.8.

Tendencias de cambio de la temperatura en °C por cada 10 años desde 1960 y de la precipitación en mm/año para la Mancomunidad Chaco Chuquisaqueño.



Mapa 2.9.
Tendencias de cambio de la temperatura en °C por cada 10 años desde 1960 y de la precipitación en mm/año para la Mancomunidad Héroes de la Independencia.



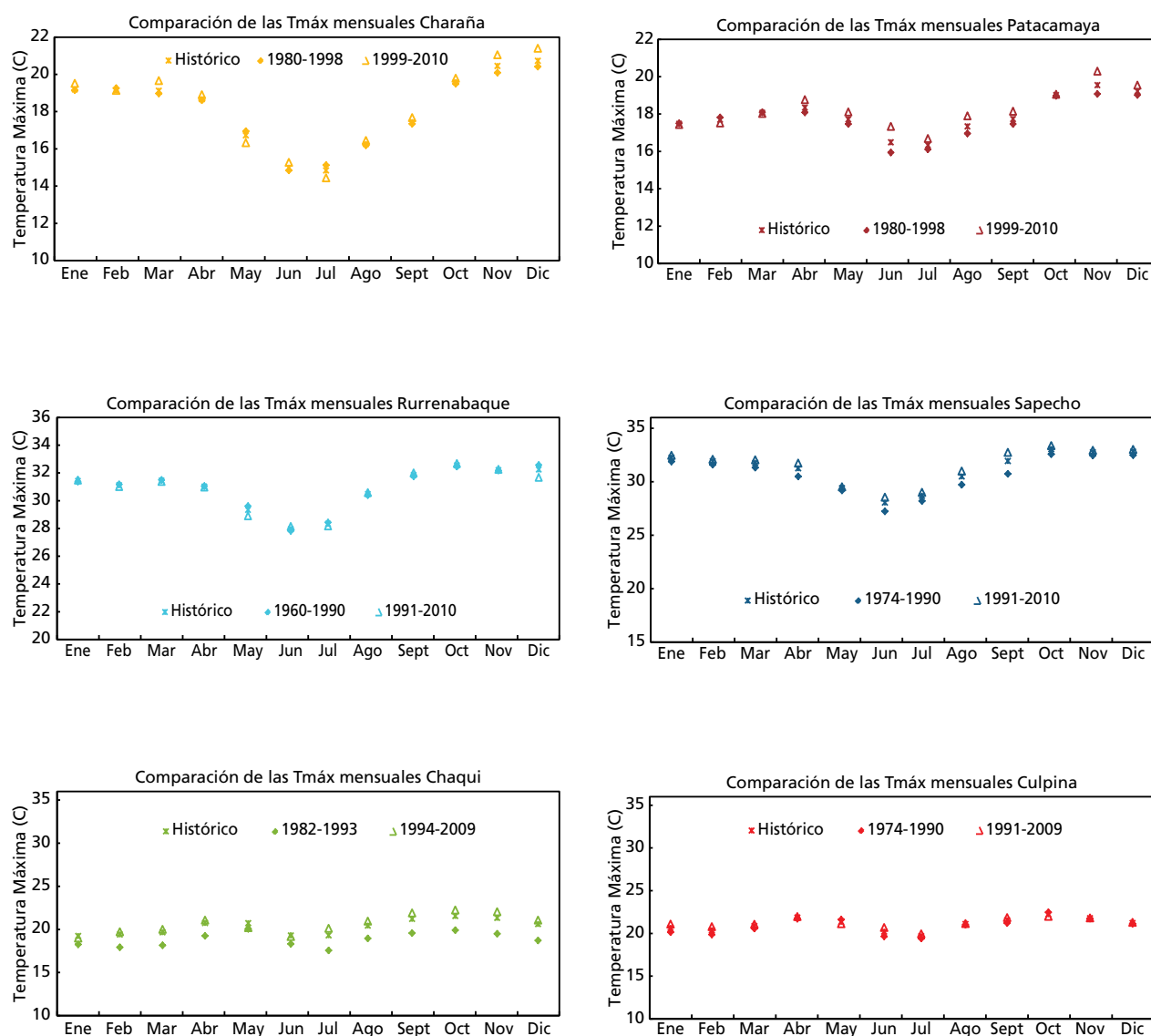
2.5.2. Temperatura Máxima (Tmáx)

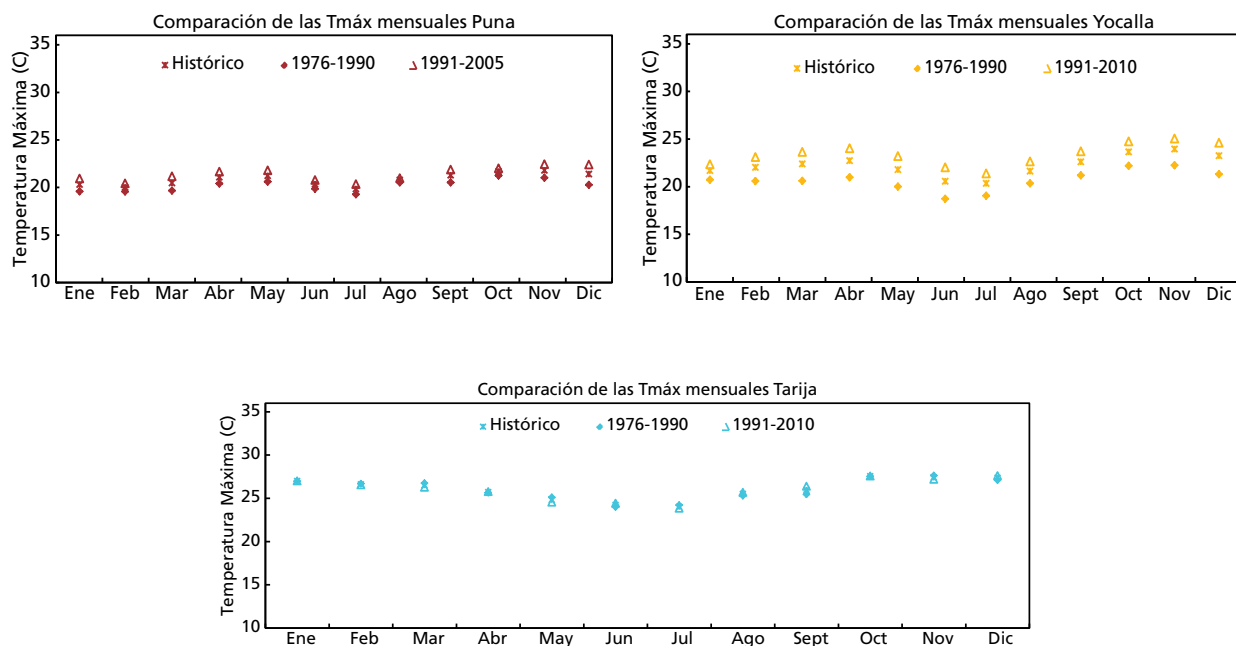
2.5.2.1. Variaciones promedio mensuales

El promedio mensual diferenciado de la Tmáx de las estaciones consideradas es presentado en la Figura 2.7.

Figura 2.7.

Evolución mensual de la Temperatura Máxima promedio mensual en las estaciones consideradas. Se compara el promedio histórico con el promedio de los dos medios de los registros con el fin de identificar cambios si los existiera.





El valor de la Tmáx en las estaciones se incrementa en los últimos años, especialmente en zonas áridas y semi-áridas de altitud moderada. Las estaciones de Rurrenabaque y Sapecho, presentan un menor incremento en comparación con los valles del Sur del país. Las estaciones del altiplano, también presentan ascensos pero estos son más moderados.

En el caso de las zonas de Norte Paceño Tropical y de Héroes de la Independencia, se confirmaría que las zonas vegetadas presentan menor tendencia al calentamiento que las zonas sin cobertura vegetal. En el caso de las estaciones del altiplano, la razón para un menor calentamiento podría estar en la mayor transparencia del aire que previene de un almacenamiento energético en el día.

La Tmáx está determinada por la acumulación energética diurna, la cual está influenciada por los Gases de Efecto Invernadero (principalmente CO₂ y vapor de agua). La falta de variación de esta variable en zonas bajas podría estar relacionada al menor incremento de estos gases, pues localmente por la vegetación incrementada, estos son absorbidos (el caso de CO₂) y el efecto de calentamiento es menor. Esto también se debe a que durante el día, la evapotranspiración de la vegetación se constituye en un moderador térmico, pues la evaporación consume gran canti-

dad de energía reduciendo las temperaturas de las superficies vegetadas. El altiplano, en cambio, al tener menor transparencia en su aire por su menor columna atmosférica, es afectado por el incremento energético pero no en la misma magnitud que los valles interandinos que acumulan gran energía, no tienen vegetación que module los cambios y por lo tanto serían fuertemente influenciados por el calentamiento.

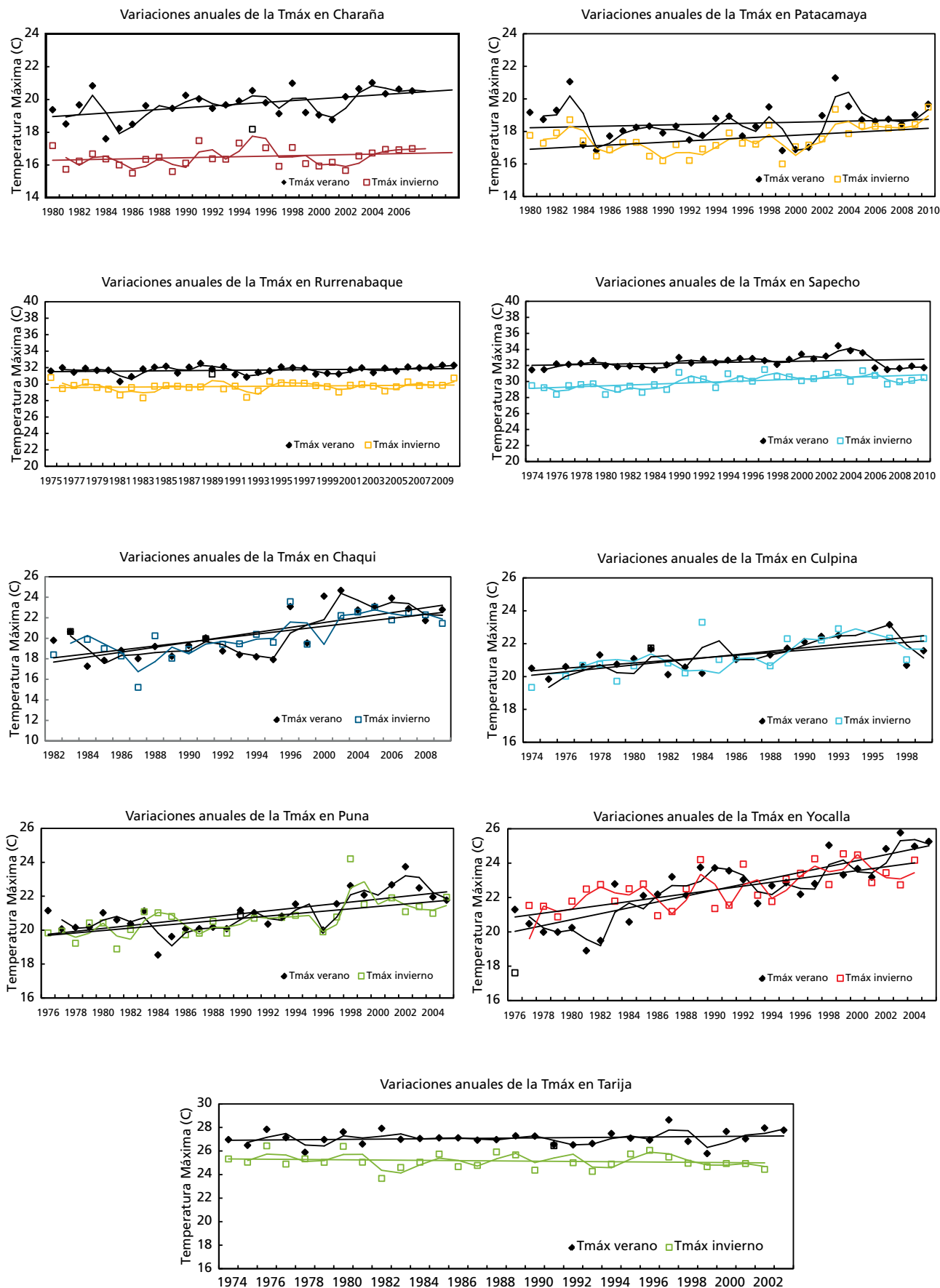
2.5.2.2. Tendencias históricas

En base a la información disponible de los registros de las estaciones, se evaluaron las tendencias de cambio en los valores de la Tmáx. A diferencia de la Tmín, la Tmáx muestra ascensos, visualmente detectables (Figura 2.8.) para muchas estaciones, a excepción de Rurrenabaque, Sapecho y Tarija. Estos ascensos son mayores en las estaciones ubicadas en regiones áridas y semiáridas de los valles interandinos.

Como el caso de la Tmín, y con apoyo de bibliografía auxiliar, se procedió a graficar las tendencias medias de cambio por grupo de municipios, los cuales reflejan que también en la Tmáx los cambios son levemente diferentes entre estaciones del año. Los Mapas 2.1 al 2.9 muestran precisamente estas tendencias.

Figura 2.8.

Serie de tiempo de la Tmáx promedio anual en las estaciones consideradas.



Se aprecia nuevamente que el Norte Paceño presenta la menor tendencia de cambio con un leve descenso de las $T_{máx}$ en invierno. En el altiplano y la zona andina de Cochabamba, el incremento es levemente mayor en verano que en invierno al igual que en el caso de la $T_{mín}$, mientras que el Chaco, Cintis, Norte Potosí, Gran Centro Potosí y la cuenca del Caine la elevación es mayor en invierno que en verano, lo que podría deberse a una menor atenuación de la recepción de la radiación solar por la menor nubosidad en invierno y durante la mañana, lo cual combinado con una menor cantidad de gases de efecto invernadero provocaría mayores $T_{máx}$ invernales. Sin embargo, estas hipótesis deben ser estudiadas con más detalle para su confirmación.

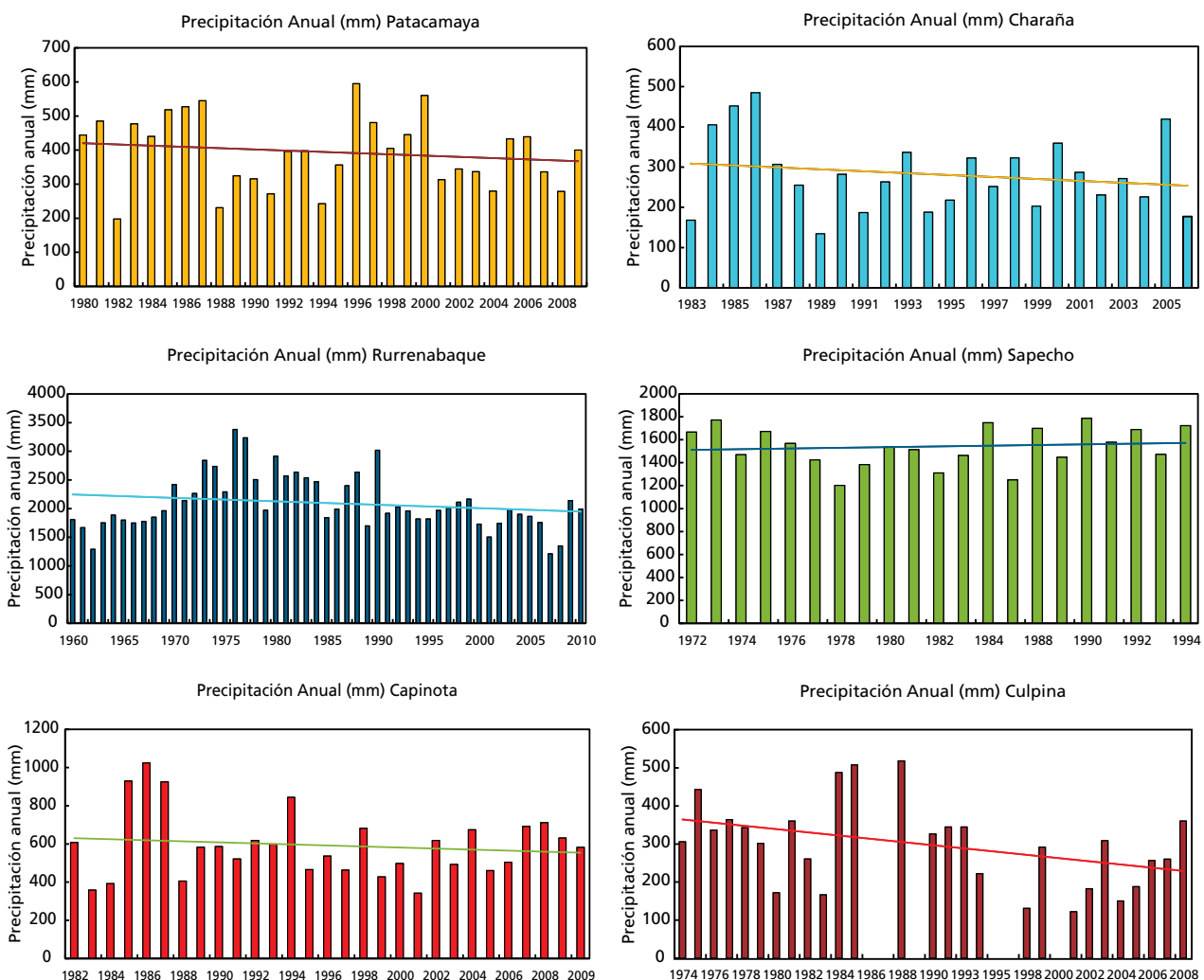
2.5.3. Precipitación

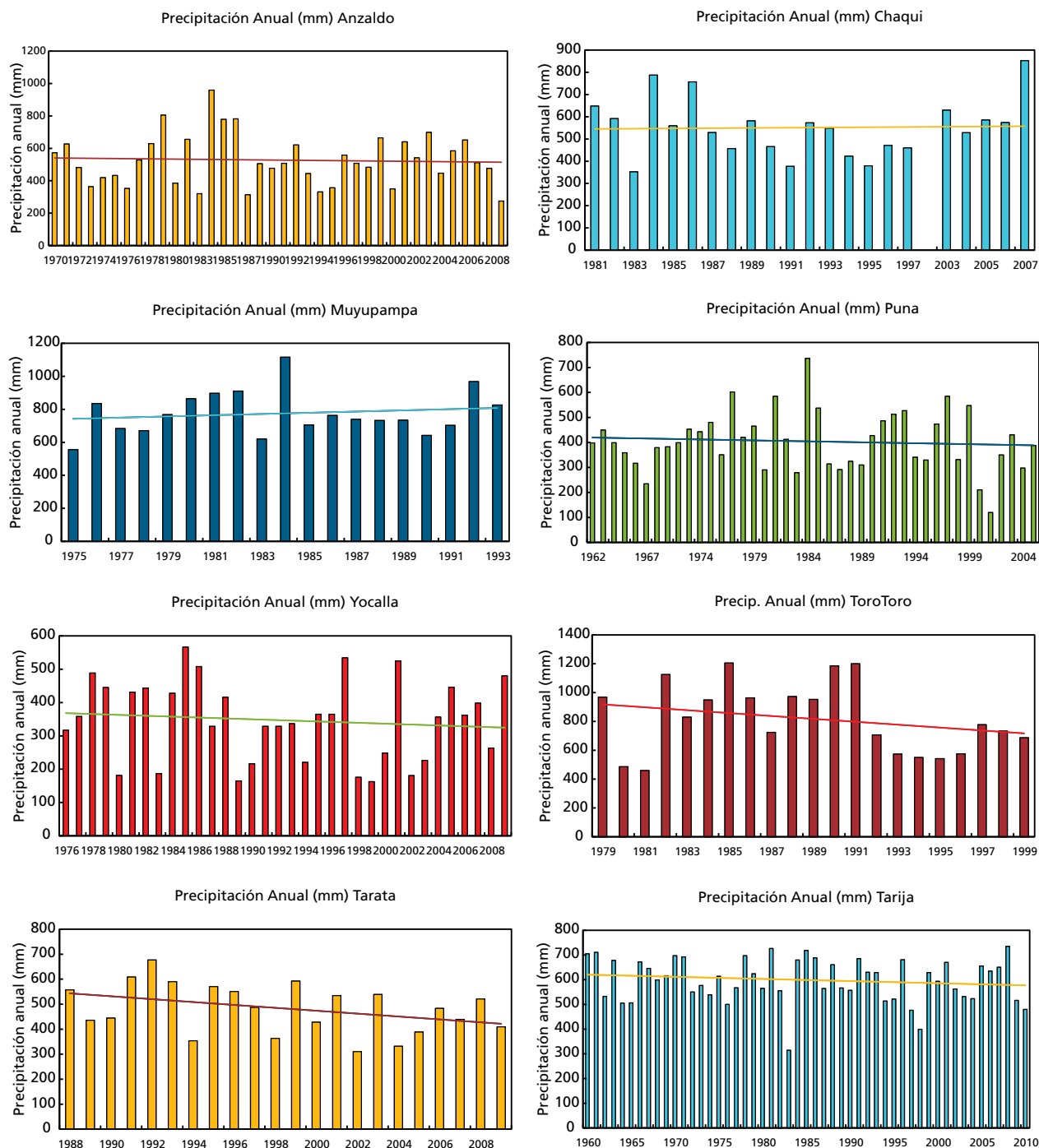
La distribución y la cantidad de la precipitación son determinantes para la producción agrícola. Adicionalmente, la cantidad de nubosidad en una zona también definirá una mayor o menor recepción de radiación solar y cierta diferencia de temperaturas. La Figura 2.9 presenta la evolución tendencial de la cantidad anual de lluvia recibida en las estaciones que permitían este análisis.

La precipitación en la mayor parte de las estaciones consideradas, no presenta diferencias ni tendencias significativas de cambio. Las estaciones del altiplano muestran una leve tendencia descendente, que podría cambiar con un par de lluvias elevadas.

Figura 2.9.

Evolución anual de la precipitación en las estaciones consideradas en el estudio.





En el caso de Rurrenabaque y Sapecho, éstas no muestran tendencias de cambio en ningún sentido. Las estaciones de Culpina y Toro Toro, muestran tendencias de cambio negativo, es decir se percibe una tendencia significativa de descenso.

Los resultados muestran que, en general, las estaciones de altitud y las de zonas bajas no tienen tendencias claras de cambio. Las esta-

ciones de zonas intermedias que se encuentran en los valles interandinos del Sur del país, presentan tendencias descendentes, lo cual debe ser considerado con cuidado, para acciones de adaptación.

Se han elaborado mapas que muestran la tendencia promedio por mancomunidad (Mapas 2.1. al 2.9.). Varios autores han mencionado que en Bolivia hay un punto de corte en la tendencia

de precipitación, ocurrida entre 1983 y 1985, muy probablemente relacionado a la presencia del fuerte evento de “El Niño” de 1983. Por ello se ha dividido el registro desde antes de 1983 y después del mismo año. En la mayoría de las zonas, la precipitación muestra un ascenso hasta 1983 con un posterior descenso después de este año, ocurriendo los mayores descensos comparativos en la zona de Norte Potosí, Altiplano, Caine y el Chaco. En Norte Paceño Tropical, después de 1983 ocurre un descenso pero menor que el ascenso previo. Gran Centro Potosí y Región Andina de Cochabamba muestran una leve tendencia ascendente que podría cambiar muy fácilmente, mientras que Héroes de la Independencias en general no muestra cambio a largo plazo.

2.6. CONCLUSIONES

La evaluación climática de las zonas de trabajo ha demostrado ser muy compleja, en primer lugar por la dificultad de contar con datos confiables y consistentes en el tiempo. La necesidad de contar con información sólida pues análisis desviados o errados, podrían conducir a acciones de mala adaptación y en muchos casos incrementar el riesgo de sufrir impactos.

Existen 46 estaciones en las zonas de análisis. Sin embargo, sólo 9 de éstas cuentan con series representativas para el análisis de tendencia de temperaturas (y algunas adicionales de precipitación), presentan registros en series suficientemente largas para evaluar tendencias de precipitación. Estos vacíos de información fueron superados a partir de análisis globales que ayudaron a definir las tendencias por mancomunidades de municipios. Sin embargo, esta información presenta cierta incertidumbre, lo cual debe tomarse en cuenta para anticipar acciones de adaptación.

Los valores de cambio analizados mostraron que las estaciones de zonas bajas y con alta cobertura vegetal, efectivamente muestran señales poco

significativas o no significativas de cambio de las variables analizadas. Las estaciones de zonas intermedias y áridas como las de los valles muestran tendencias claramente ascendentes en las $T_{\text{máx}}$ y menos claras en las $T_{\text{mín}}$. Las estaciones de zonas altas muestran tendencias ascendentes consistentes en $T_{\text{máx}}$ y $T_{\text{mín}}$ aunque de menor magnitud que las estaciones de zonas intermedias. Estas diferencias, coinciden parcialmente con estudios que mencionan que la mayor altitud de un punto determina su mayor nivel de calentamiento, siendo que el calentamiento se muestra menor en zonas muy altas que en zonas de altitud intermedia (entre 2.000 y 3.000 m), muy probablemente debido a la baja humedad relativa atmosférica y la baja concentración de gases que impide la acumulación energética en su atmósfera local. Sin embargo estos postulados deben ser estudiados a mayor profundidad y van más allá del objetivo del presente trabajo.

La precipitación en general muestra poca tendencia de cambio, especialmente en las estaciones de zonas bajas y altas. Sin embargo, muchas de las estaciones de zonas medias (valles interandinos) muestran tendencias descendentes bastante claras, lo que es un indicador preocupante por la menor disponibilidad de agua que podrían tener estas zonas, más aún considerando que son zonas agrícolas de mucha importancia tanto regional como nacional.

Es necesario mencionar que el análisis integral de las tres variables, muestra que las áreas más complejas, desde un punto de vista de tendencia e impacto de cambio climático, son las de los valles áridos interandinos de altitud intermedia, pues estas áreas presentan una clara tendencia de ascenso en sus temperaturas y de descenso de sus precipitaciones, lo cual provocará con seguridad una fuerte presión sobre el agua, la cual debe ser cuidadosamente analizada. En los siguientes capítulos se profundizará el análisis de los escenarios de cambio esperados en estas zonas.



Capítulo 3

Evaluación del comportamiento
predictivo de las condiciones
climáticas de las zonas de trabajo
del PRRD por parte de tres Modelos
de Circulación General



3.1. INTRODUCCIÓN

Los Modelos de Circulación General de la atmósfera (MCG) son un conjunto de algoritmos matemáticos que intentan simular la física del sistema climático y las interrelaciones de los cinco componentes del sistema climático¹. Estos modelos se encuentran en el extremo superior de la jerarquía de modelos del clima porque acoplan los factores de mayor impacto en el clima (atmósfera-océano y suelo) y predicen cambios de las variables en un tiempo mayor.

Las expresiones matemáticas que configuran un MCG se pueden analizar por separado dentro de las tres principales partes de que constan estos modelos: (1) la dinámica del sistema del clima que describe el movimiento a gran escala de las masas de aire y el transporte de la energía y momentum; (2) la física del sistema climático tal como la transmisión de la radiación a través de la atmósfera, la termodinámica, y la evaporación; y (3) otros factores tales como la interacción océano-atmósfera, fisiografía y cobertura.

Los MCG utilizan las mismas ecuaciones de movimiento que un modelo de predicción y pronóstico numérico del tiempo (PNT). Los modelos PNT se utilizan para predecir el tiempo futuro a corto plazo (1-3 días) y medio plazo (de 4-10 días). Los modelos MCG corren para series de mayor tiempo, generalmente años; tiempo suficiente para dar luces sobre el clima en un sentido estadístico (es decir la media y la variabilidad), aunque no describen las variaciones temporales menores.

Los MCG, por ser globales, tienen una menor resolución por lo cual no son muy indicados para estudios e investigación de zonas específicas, mucho menos si se trata de zonas con variaciones altitudinales de consideración. En estos casos, es necesario el uso de modelos regionales o de modelos estadísticos que toman mayores resoluciones y son más hábiles en la determinación del clima de una zona o punto geográfico. Sin embargo, la capacidad de los MCG para describir el clima global y general de una zona no puede olvidarse. Por esta razón todas las metodologías que intentan reducir la escala de la grilla en zonas específicas, siempre usan como sus condiciones límites las tendencias determinadas por los MCG y las adaptan para que respondan efectivamente a las condiciones locales propias.

Entonces, para determinar el clima futuro siempre se utilizan dos modelos: uno global, el cual otorga las condiciones de frontera al otro modelo, ya sea regional o estadístico, denominándose a este proceso downscaling (reducción de la escala).

En el presente capítulo se llevará adelante el análisis de la aplicación de tres MCG (los de mayor uso para la zona Andina) en las zonas de intervención del PRRD tanto para el presente como en sus proyecciones a futuro. El modelo de borde que mejor represente será utilizado en los siguientes capítulos a través de un generador climático, para las zonas específicas de trabajo.

3.2. METODOLOGÍA

Provenientes de los resultados de los modelos generados por el IPCC, y en base a los resultados

¹ El sistema climático está formado por: Atmósfera, biósfera, geósfera, criósfera e hidrósfera, los que en una estrecha interrelación determinan el clima del planeta.



de diferentes estudios de aplicación de MCG en la zona Andina, se han seleccionado tres modelos para ser aplicados para la latitud y altitud de las zonas de intervención del PRRD. Estos modelos son descritos a continuación:

ECHAM5 es un modelo de circulación general acoplado atmósfera-océano, desarrollado en el Instituto Max Planck de Meteorología. El modelo tiene de 19 a 31 niveles y su grilla tiene un tamaño típico de 1.9° de latitud por 1.9° de longitud, aunque presenta variaciones en zonas cercanas al Ecuador.

HADUKMO del Hadley Centre para la predicción climática e investigación – Inglaterra. El modelo HADCM3 acoplado océano-atmósfera. El componente atmosférico tiene 19 niveles con una resolución horizontal de 2,5 grados de latitud por 3,75 grados de longitud, que produce una rejilla de celdas de la cuadrícula global de 96 x 73. Esto es equivalente a una resolución de la superficie de alrededor de 417 Km x 278 Km en el Ecuador, lo que reduce a 295 km por 278 Km a 45 grados de latitud. (Hadley Center, 2013). El componente oceánico del HadCM3 tiene 20 niveles, con una resolución horizontal de 1.25° X 1.25°, resolución que hace posible la representación de importantes detalles de la estructura normal oceánica.

MIROC es un modelo desarrollado por el Instituto Japonés para Estudios Ambientales. Es la última versión de una serie de Modelos acoplados Océano-Atmósfera de Circulación General. Incluye mejoras en la estimación de nubosidad y otros parámetros físicos. La resolución es de 2.5° por 2.5°, aunque en zonas cercanas al Ecuador, esta resolución es más precisa.

3.2.1. Protocolo de obtención de la información de los MCG

Las actividades realizadas fueron:

- Uso de los CDO (Climate Data Operators) para la selección de los años del periodo base (1960-1990), para tres modelos de circulación general (ECHAM5, MIROC HIRES y UKMO HADGEM).
- Uso de los CDO para el corte de grillas en las que se hallan las estaciones meteorológicas, para los tres modelos de circulación general (ECHAM5, MIROC-HIRES y UKMO HADGEM).
- Identificación espacial de todas las estaciones meteorológicas en los diferentes modelos de circulación general, para la buena diferenciación de la resolución de los modelos.

El trabajo de corte de las grillas de los MCG es complejo y requiere de conocimiento tanto de comandos CDO como de manejo de Sistemas de Información Geográfica (SIG). A continuación se presenta un breve detalle del protocolo para la obtención de la información, proveniente de los MCG seleccionados:

Para la selección de los años de periodo base se utilizó el comando **selyear**, debido a que algunos modelos tenían series desde 1860 hasta el 2001, entonces era necesario separar los datos para el periodo de Línea Base (1960-1990).

El comando requiere la escritura de los años que se seleccionará y, por supuesto, la dirección del documento al cual se aplicará el comando (Input)

y la dirección donde se guardará el nuevo documento (Output) todo con la extensión del documento principal que es: “nc” (Figura 3.1.).

Posteriormente, se debe conocer la resolución de grilla de cada MCG y esos detalles del documento se los obtiene gracias al comando “sinfo” que extrae la información general del documento tipo netCDF (Figura 3.2.).

Un ejemplo del producto se muestra en la Figura 3.3, en la cual se observa el número de píxeles que contiene (1), cuantos píxeles por columna y por fila (2). Las coordenadas que marcan el inicio y el final de las filas y las columnas (3) además del ancho horizontal y vertical de las grillas (4), todo esto en un sistema de coordenadas GCS_WGS_1984. Por último indica que el formato del documento es netCDF.

Los resultados de la aplicación de este comando indican lo siguiente:

1. En el caso del modelo **HADGEM** para las variables de temperatura máxima, mínima y promedio se tiene una misma resolución de grilla (1,875° ancho de grilla y 1.25° largo de grilla), en cambio para la variable de precipitación se tiene una menor resolución (3,75° ancho de grilla y 2,5° largo de grilla).

2. Para el modelo **MIROC-HIRES** existen diferencias de resolución. En las variables de temperatura máxima, mínima y precipitación se tiene una misma resolución de grilla (1,125° de ancho y alto), en cambio para la variable de temperatura promedio se tiene una diferente resolución (3,75° ancho de grilla y 2,54° de alto). Debido a que se trabajará con valores de T_{máx} y T_{mín}, sólo se usará la primera resolución.

3. En cuanto al modelo **ECHAM5** la resolución de la grilla o píxel es de 1,875° de ancho y alto para todas las variables utilizadas.

Para la visualización de los documentos netCDF se recurrió al programa ArcGis, a través de la herramienta “Make NetCDF raster layer”, adecuando todo al sistema geográfico GCS_WGS_1984.

Debido a la variada resolución entre los modelos, el número de estaciones meteorológicas cambia por grilla, siendo que los modelos con una escala menor albergan un mayor número de estación por grilla. Si se considera que el valor de todo el píxel es el mismo, entonces desaparece toda la variabilidad de las estaciones cubiertas en el píxel, en cambio los modelos con escalas mayores, es decir píxeles más pequeños albergan menos estaciones con la consiguiente validación de los valores de las estaciones.

Figura 3.1.

Comando *selyear* para seleccionar el periodo de corte de los modelos seleccionados.

```
C:\>cdo selyear.1960.1961.1962.1963.1964.1965.1966.1967.1968.1969.1970.1971.1972
.1973.1974.1975.1976.1977.1978.1979.1980.1981.1982.1983.1984.1985.1986.1987.1988
.1989.1990 input.nc output.nc
```

Figura 3.2.

Comando *sinfo* para conocer la resolución de los modelos seleccionados.

```
C:\>cdo sinfo input.nc > output.txt
```

Figura 3.3.

Resultados del comando *sinfo* que muestran los detalles geográficos de la grilla con la que se trabaja.

```
File format netCDF
-1: Institut Source Param Time Typ Grid Size Num Levels Num
1: unknown unknown -1 var F32 1470 1 1 1
Horizontal grids:
1: lonlat > size : dim = 1470 nlon = 30 nlat = 49
lon : first = 275.625 last = 330 inc = 1.875 degrees_east
lat : first = -45 last = 15 inc = 1.25 degrees_north
available : xbounds ybounds
```


El poder distinguir visualmente a qué y a cuántas grillas pertenecen las estaciones, ayuda a identificar los cuatro vértices de la grilla a la que pertenecen. Esas coordenadas son utilizadas para los cortes de grilla en los CDO y su comando **sellonlatbox**, como se ve en la Figura 3.4.

En función a experiencias previas de investigadores que trabajaron en Sudamérica y en los Andes, se decidió trabajar con los modelos HADGEM, ECHAM5 y MIROC HIRES. A continuación, se presentan las grillas de los tres modelos utilizados y las estaciones incluidas en cada una de esos pixeles.

A través de la utilización de los comandos CDO, se habilita la obtención de información que se encuentra almacenada como Metadata que no es de acceso directo. La introducción de los datos de latitud, longitud y altitud, determinan que, de acuerdo al modelo que esté siendo requerido, se

obtenga la información mensual de la línea base (enero de 1961 a diciembre de 1990) modelada por el MCG seleccionado con el fin de calibrar estos resultados con la realidad.

Una vez obtenidos y calibrados los resultados para la línea base, se obtienen los valores termoplumiométricos para el escenario climático. En el presente caso se trabajó con el clima al 2045-2055 o sea de mediados del Siglo XXI.

3.2.2. Modelo HADGEM

La imagen de la izquierda muestra la grilla del modelo HADGEM para la variable precipitación que, como se mencionó, tiene menor resolución y a la derecha se tiene una mejor resolución para las variables restantes del mismo modelo. En los cuadros inferiores se presentan las estaciones que fueron incluidas para su estudio en el pixel correspondiente.

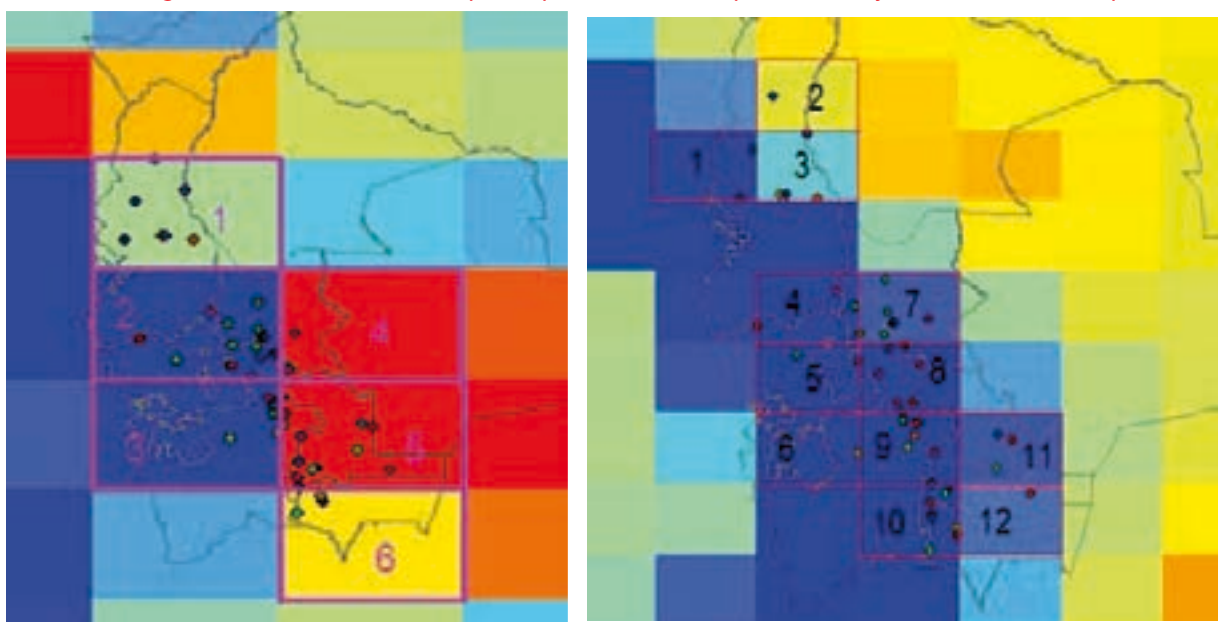
Figura 3.4.

Comando que permite identificar los vértices de las grillas.

```
C:\>cdo sellonlatbox,-69.750,-68.625,-16.875,-19.125 C:\CDO\realmiroc\miroc3.2.hires_20c3m_run1_tasmax_02_1961-1990_monmean.nc C:\CDO\realmiroc\miroc3.2.hires_20c3m_run1_tasmax_02_1961-1990_monmean_sajasaja.nc
cdo sellonlatbox: Processed 934920 values from 1 variable over 360 timesteps.
```

Figura 3.5.

Cobertura de la grilla del Modelo HADGEM, (Izq.) Precipitación - (Der.) Temperaturas, abajo sus estaciones correspondientes.



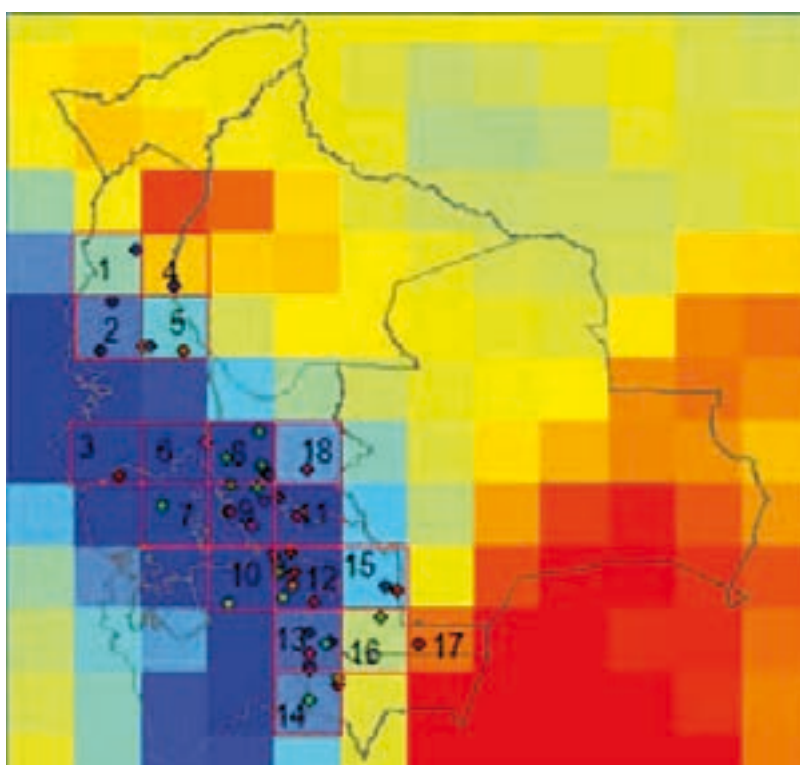
- 1: Ixiamas, Apolo, Rurrenabaque, Guanay, Tacacoma, Sapecho, Tipuani.
- 2: Acasio, Uncia, Llallagua, Pocoata, Curahuara de Carangas, Bolívar, Corque, Toro Toro, San Pedro de Buena Vista, Sacaca, Tapacarí, Tarata, Morochata, Anzaldo, Sacabamba.
- 3: Caiza, Tinquipaya, Tomave, Potosí, Yocalla.
- 4: Capinota, Poroma.
- 5: Chaquí, Puna, Tacobamba, Monteagudo, Muyupampa, San Lucas, Betanzos, Camargo, Culpina, Incahuasi, Las Carreras, Villa Abecia, Macharetí, Huacareta.
- 6: San Lorenzo, Tarija, Yunchará, El Puente.

- 1: Apolo, Tacacoma.
- 2: Ixiamas
- 3: Rurrenabaque, Sapecho, Tipuani, Guanay.
- 4: Curahuara de Carangas, Tapacarí, Morochata.
- 5: Uncia, Corque.
- 6: Tomave.
- 7: Bolívar, Capinota, Anzaldo, Tarata, Sacabamba, Sacaca, Acasio.
- 8: Poroma, Toro Toro, Llallagua, San Pedro de Buena Vista, Tinquipaya, Pocoata, Tacobamba.
- 9: Potosí, Caiza, Yocalla, Chaquí, San Lucas, Puna, Betanzos.
- 10: Camargo, Culpina, Incahuasi, Las Carreras, Villa Abecia, San Lorenzo, Tarija, El puente, Yunchara.
- 11: Monteagudo, Muyupampa, Huacareta
- 12: Macharetí.

3.2.3. Modelo MIROC-HIRES

Figura 3.6.

Cobertura de la grilla del Modelo MIROC a alta resolución.

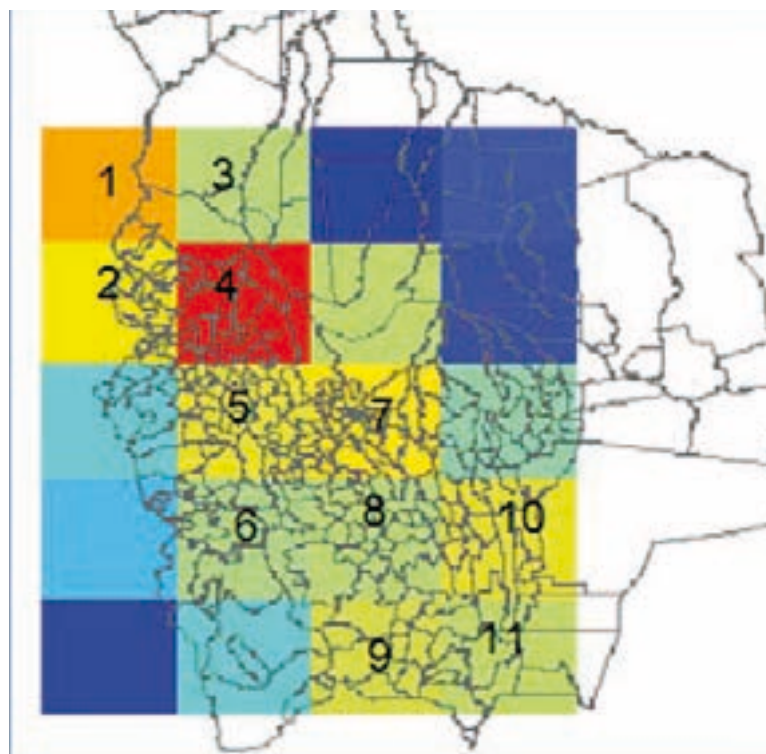


Cobertura de la grilla del Modelo MIROC y ubicación de las estaciones de estudio, de acuerdo al siguiente detalle: 1: Ixiamas; 2: Apolo, Tacacoma; 3: Curahuara de Carangas; 4: Rurrenabaque; 5: Guanay, Sapecho, Tipuani; 6: Morochata; 7: Corque; 8: Sacaca, Tapacarí, Anzaldo, Tarata, Sacabamba; 9: San Pedro de Buena Vista, Pocoata, Acasio, Uncia, Llallagua, Bolívar; 10: Tinquipaya, Tomave; 11: Toro Toro, Poroma; 12: Betanzos, Caiza, Chaquí, Puna, Tacobamba, Potosí, Yocalla, San Lucas; 13: Camargo, Culpina, Incahuasi, Las Carreras, Villa Abecia, El Puente; 14: San Lorenzo, Tarija, Yunchara; 15: Monteagudo, Muyupampa; 16: Huacareta; 17: Macharetí; 18: Capinota.

3.2.4. Modelo ECHAM5

Figura 3.7.

Cobertura de la grilla del Modelo ECHAM5



Cobertura de la grilla del Modelo MIROC y ubicación de las estaciones de estudio, de acuerdo al siguiente detalle: 1:Apolo; 2: Tacacoma; 3: Ixiamas, Rurrenabaque; 4: Sapecho, Tipuani, Guanay; 5:Uncia, Corque, Curahuara de Carangas, Tapacarí, Morochata; 6: Tomave; 7: Sacaca, Llallagua, San Pedro de Buena Vista, Toro Toro, Acasio, Bolívar, Capinota, Anzaldo, Tarata, Sacabamba, Poroma; 8: Pocoata, Betanzos, Caiza D, Chaquí, Puna, Tacobamba, Tinquipaya, Potosí, Yocalla, San Lucas; 9: Camargo, Culpina, Incahuasi, Carreras, Villa Abecia, San Lorenzo, Tarija, Puente, Yunchara; 10: Monteagudo, Muyupampa, Huacareta; 11: Macharetí.

3.2.5. Comparación con los datos observados y proyección a futuro

Una vez determinados los valores (de los MCG) correspondientes a las grillas que eran de interés para el estudio y para el periodo de la línea base, se realizó la evaluación de la capacidad de representar o aproximar la información histórica promedio mensual de las estaciones meteorológicas con las que se contaba (Capítulo 2). Para ello se calculó el coeficiente de correlación de la información de los MCG en comparación con la información observada en las estaciones meteorológicas. En base a los resultados se seleccionó el MCG que represente mejor comportamiento general para todas las estaciones consideradas, y con el que se procedió a generar las condiciones

de $T_{mín}$, $T_{máx}$ y PP de las estaciones consideradas para el periodo 2045-2055.

Es necesario recalcar que la información aquí presentada corresponde a los resultados de los Modelos de Circulación General con su correspondiente tamaño de grilla, la que no incluye todavía los procedimientos de Downscaling.

3.3. RESULTADOS

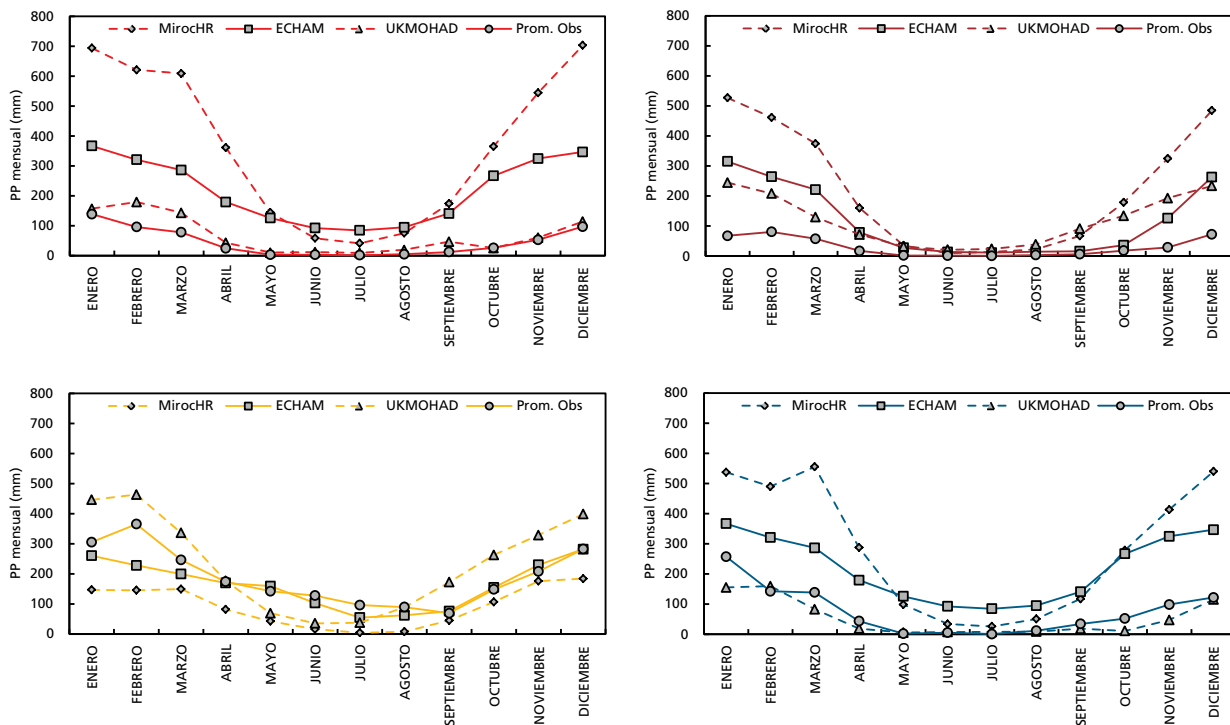
La correlación entre los valores simulados y los observados (por los tres modelos) para cada estación considerada para la $T_{mín}$, $T_{máx}$ y PP se presenta en forma resumida en las Tablas 3.1 a 3.3, respectivamente.

Como era de esperarse, los MCG no representaron la realidad termo-pluviométrica de las estaciones meteorológicas pues, como fue mencionado, éstos representan la información promedio de la grilla. Sin embargo, la evaluación correspondió a la capacidad de los modelos de representar las tendencias termo-pluviométricas que ocurren en el país de acuerdo a las épocas del año. Por ejemplo, si la temperatura baja en invierno y sube proporcionalmente a la realidad en verano, o si se simula mayor precipitación a la verdadera en verano que en invierno. Esto se debe a que la información de los MCG y específicamente del MCG que será seleccionado como modelo de frontera para llevar adelante el Downscaling estadístico, no será la utilizada para el análisis de la información futura, sino como el recuadro guía o frontera sobre el que trabajará dicho modelo. Bajo esta premisa se observó una elevada correlación de los datos producidos por los MCG para la $T_{mín}$ y la PP, pero que este valor es levemente menor para la $T_{máx}$.

Las Figuras 3.8, 3.9 y 3.10 muestran los resultados observados y simulados para estaciones seleccionadas y representativas de las zonas donde se ubican. Se muestra que la correlación es elevada. Durante el periodo de línea base o histórico se produce sobre o subestimación de la información observada en la estación, pero que las tendencias son mantenidas, lo cual permite una relativa confiabilidad de los resultados ya que son corregibles. Estos resultados siguen la línea de la información obtenida por otros autores que destacan una adecuada representación de la estacionalidad de la zona por parte de los MCG aunque no de los valores reales². Esto indicaría que los resultados del clima futuro producidos por los modelos estudiados también podrían reflejar adecuadamente las condiciones de variación de la $T_{mín}$, $T_{máx}$ y PP en la zona asumiendo nuevamente que la corrección sería la misma en el presente y en el futuro.

Figura 3.8.

PP mensual media (mm) observada y simulada por tres MCG para: superior derecha, Anzaldo; superior izquierda, Culpina; inferior derecha, Rurrenabaque; inferior izquierda, ToroToro.



2 Burgoa, A. 2010. Escenarios de Cambio Climático en el Sur del departamento de La Paz: Patacamaya y Calacoto. La Paz-Bolivia. Revista Boliviana de Física, 17, 6 pp. Seth, A., M. Rojas, and S. A. Rauscher. 2010. CMIP3 projected changes in the annual cycle of the South American Monsoon. Climatic Change 98:331–57.

Figura 3.9.

Temperatura máxima mensual media (°C) observada y simulada por tres MCG: superior derecha, Anzaldo; superior izquierda, Culpina; inferior derecha, Rurrenabaque; inferior izquierda, ToroToro.

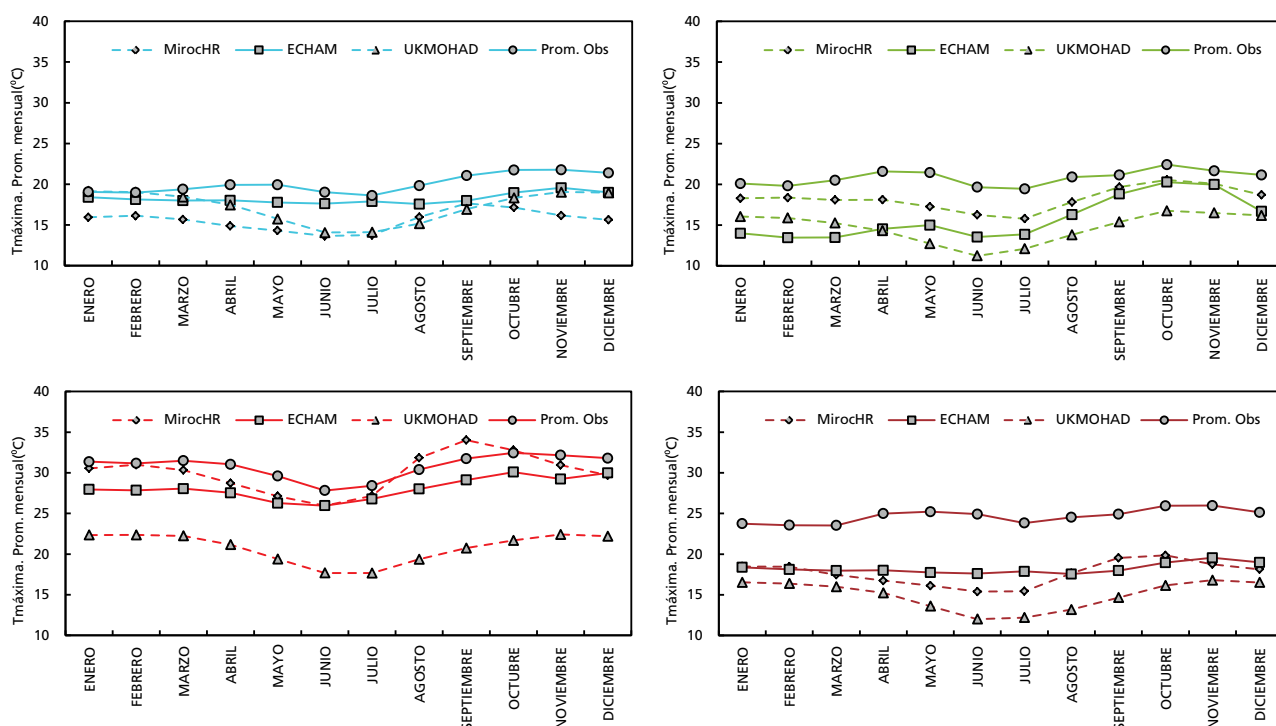
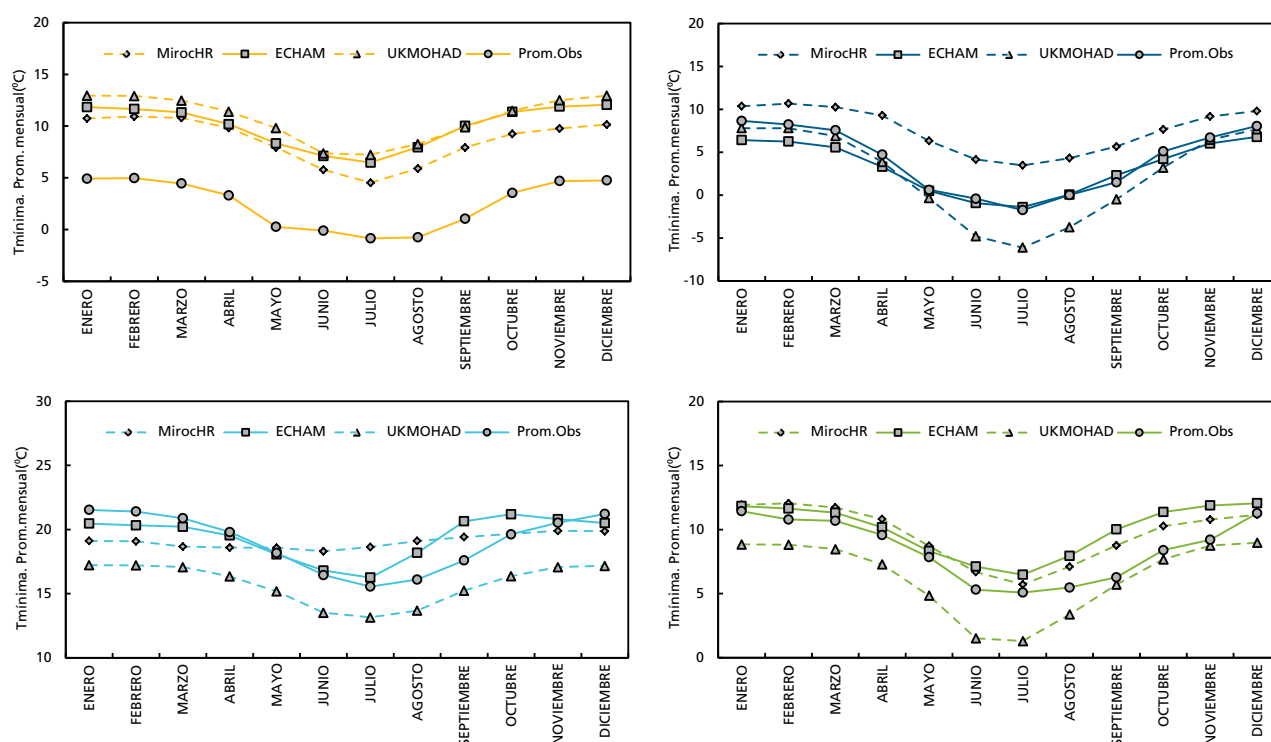


Figura 3.10.

Temperatura mínima mensual media (°C) observada y simulada por tres MCG para: superior derecha, Anzaldo; superior izquierda, Culpina; inferior derecha, Rurrenabaque; inferior izquierda, ToroToro.



Los resultados obtenidos muestran que los tres modelos utilizados, representan relativamente bien la realidad termo-pluviométrica de las zonas donde se realizó el análisis. Debido a que el downscaling estadístico requiere contar con un solo modelo de borde para generar los resultados, fue necesario elegir uno de ellos para continuar con el trabajo.

En función a los coeficientes de correlación y a lo obtenido por otros autores, se decidió trabajar con el ECHAM5 como modelo de borde para generar la información futura de las zonas estudiadas.

Tabla 3.1.

Coeficientes de correlación entre los valores de PP media mensual observada y simulada por tres MCG para el periodo histórico de estaciones situadas en diferentes áreas del país.

Estación	MirocHR	ECHAM	UKMOHAD
Acasio	0,965	0,967	0,956
Anzaldo	0,932	0,966	0,932
Betanzos	0,952	0,991	0,914
Bolívar	0,928	0,909	0,931
Caiza D	0,914	0,968	0,949
Camargo	0,972	0,953	0,941
Capinota	0,941	0,950	0,926
Chaquí	0,963	0,983	0,911
Corque	0,889	0,906	0,896
Culpina	0,968	0,975	0,887
Curahuara de Carangas	0,856	0,963	0,955
Charaña	0,856	0,963	0,946
El Puente	0,986	0,947	0,968
Huacareta	0,971	0,961	0,895
Llallagua	0,949	0,927	0,964
Monteagudo	0,965	0,955	0,885
Patacamaya	0,835	0,959	0,943
Poroma	0,965	0,962	0,936
Potosí	0,896	0,939	0,922
Puna	0,977	0,989	0,944
Rurrenabake	0,828	0,890	0,897
Sajama	0,853	0,959	0,944
San Lorenzo	0,993	0,986	0,935
San Lucas	0,953	0,988	0,940
San Pedro de Buena Vista	0,961	0,939	0,982
Sapecho	0,907	0,942	0,942

Continúa

Estación	MirocHR	ECHAM	UKMOHAD
Tapacarí	0,935	0,987	0,968
Tarata	0,933	0,946	0,946
Tarija	0,990	0,982	0,944
Tinguipaya	0,987	0,987	0,955
Toro Toro	0,886	0,915	0,911
Villa Abecia	0,960	0,967	0,920
Yocalla	0,931	0,973	0,940
Promedio	0,933	0,957	0,934

Tabla 3.2.

Coefficientes de correlación entre los valores de T_{máx} media mensual observada y simulada por tres MCG para el periodo histórico de estaciones situadas en diferentes áreas del país.

Estación	MirocHR	ECHAM	UKMOHAD
Anzaldo	0,611	0,736	0,434
Capinota	0,825	0,918	0,729
Chaquí	0,567	0,743	0,314
Culpina	0,743	0,774	0,493
Charaña	0,952	0,930	0,940
El Puente	0,834	0,602	0,953
Llallagua	0,905	0,821	0,685
Monteagudo	0,865	0,941	0,932
Morochata	0,632	0,629	0,659
Patacamaya	0,884	0,891	0,939
Potosí	0,848	0,701	0,887
Puna	0,654	0,813	0,500
Rurrenabaque	0,810	0,880	0,911
Sajama	0,690	0,922	0,927
San Lucas	0,781	0,668	0,770
Sapecho	0,869	0,958	0,953
Tarata	0,486	0,665	0,453
Tarija	0,871	0,647	0,951
Tinguipaya	0,978	0,882	0,813
Toro Toro	0,259	0,691	0,093
Yocalla	0,882	0,672	0,903
Promedio	0,759	0,785	0,726

Tabla 3.3.

Coeficientes de correlación entre los valores de T_{mín} media mensual observada y simulada por tres MCG, periodo histórico para estaciones situadas en diferentes áreas del país.

Estación	MirocHR	ECHAM	UKMOHAD
Anzaldo	0,924	0,942	0,968
Capinota	0,958	0,990	0,982
Chaquí	0,966	0,964	0,986
Culpina	0,973	0,986	0,987
Charaña	0,993	0,976	0,973
El Puente	0,971	0,991	0,988
Llallagua	0,950	0,973	0,985
Monteagudo	0,996	0,973	0,985
Morochata	0,966	0,980	0,979
Patacamaya	0,983	0,995	0,941
Potosí	0,981	0,988	0,996
Puna	0,968	0,992	0,987
Rurrenabaque	0,433	0,809	0,987
Sajama	0,875	0,953	0,784
San Lucas	0,972	0,991	0,989
Sapecho	0,973	0,706	0,951
Tarata	0,964	0,981	0,980
Tarija	0,960	0,989	0,979
Tinguipaya	0,956	0,983	0,994
Toro Toro	0,961	0,883	0,927
Yocalla	0,956	0,996	0,982
Promedio	0,937	0,954	0,968

3.4. PROYECCIÓN DEL CAMBIO DE LAS VARIABLES TERMO-PLUVIOMÉTRICAS A 2050

La obtención de la información de los MCG con los CDO permitió no solamente evaluar la capacidad de simular la situación histórica climática sino que se pudo evaluar la situación termo-pluviométrica que el modelo seleccionado (ECHAM5) prevé para el año 2050 y para el escenario A2³.

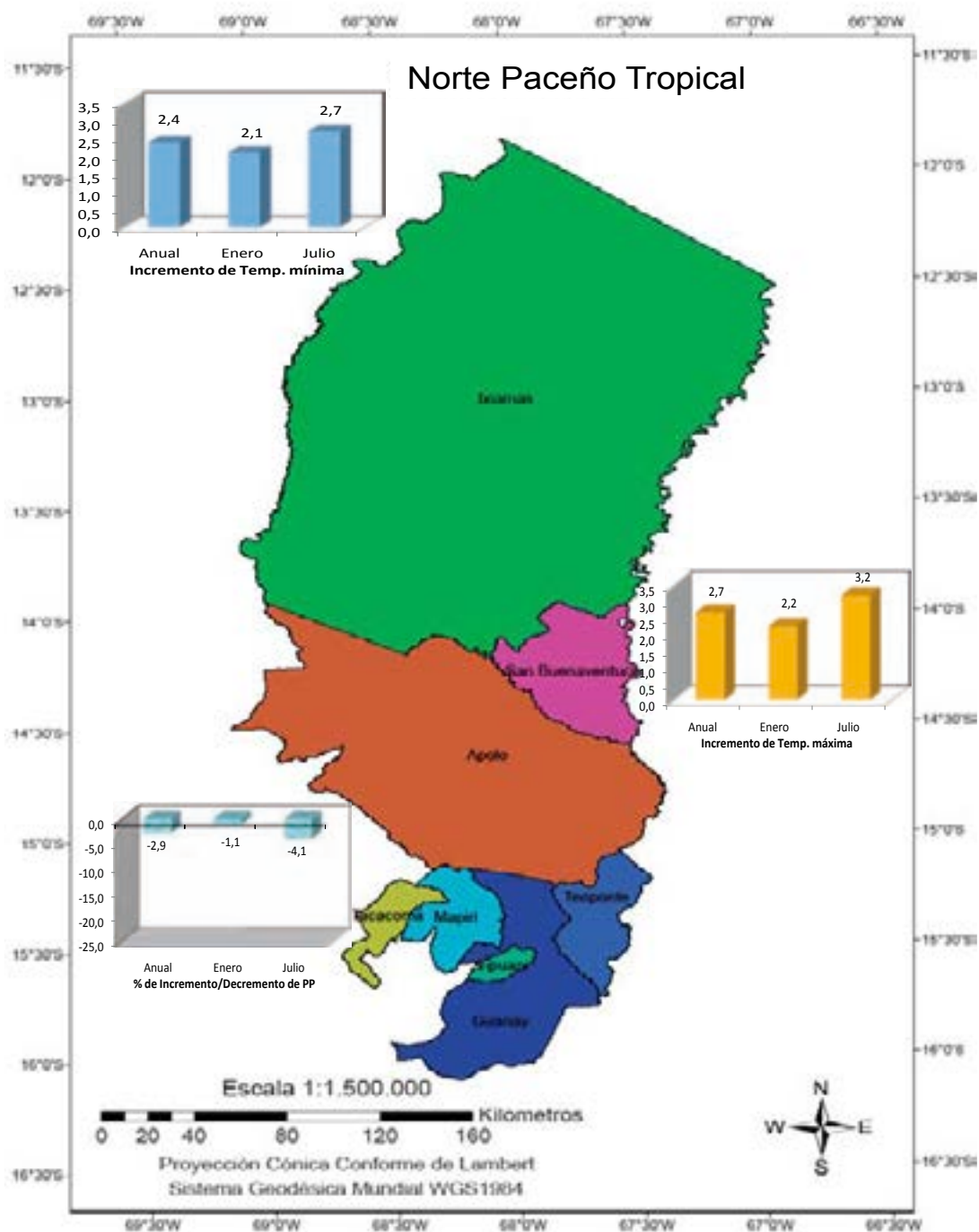
³ El escenario A2 describe un mundo muy heterogéneo basado en la preservación de las identidades locales. Los patrones de fertilidad de las regiones convergen lentamente, lo que se traduce en un aumento de población constante hasta mitad de siglo, donde se estabiliza. El desarrollo económico está orientado regionalmente y el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico, fragmentado. El escenario A2 podría considerar la descripción del mundo tal y como evolucionará de mantener el comportamiento actual.

De esta manera, se procesaron los valores de incremento térmico medio en °C, tanto en términos anuales como para enero y julio, representados para cada grupo de municipios donde tiene acciones el PRRD (Mapas 3.1. a 3.9.) y la variación porcentual media de la precipitación acumulada para los mismos periodos que la variación térmica.

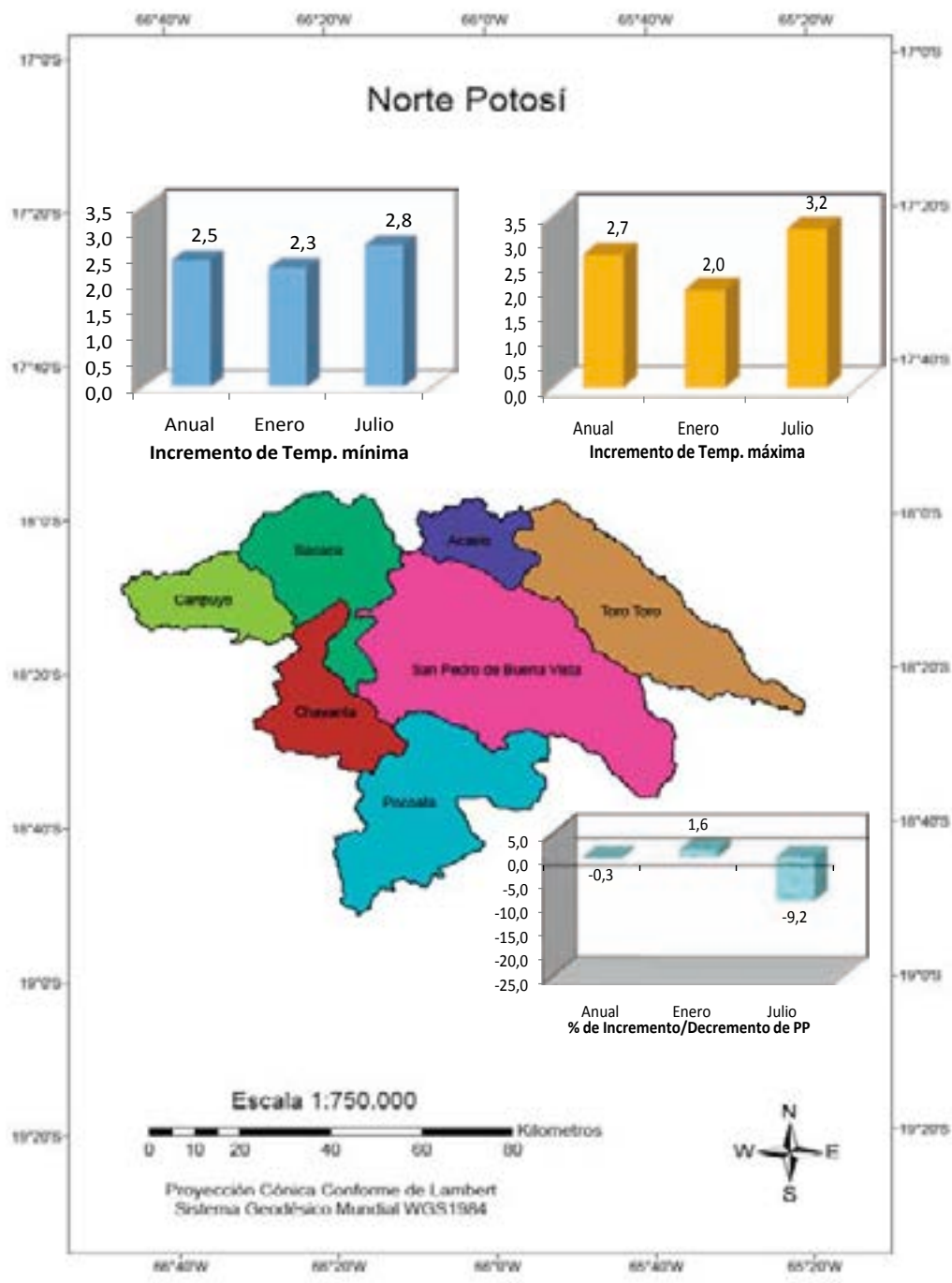
Los resultados muestran que las T_{máx} promedio anual se incrementarán en la mayor parte del país en aproximadamente 3°C, aunque en la zona chaqueña se esperaría un calentamiento levemente menor en todas las épocas.

Mapa 3.1.

Incrementos térmicos (°C) y cambios de PP (%) previstos por el MCG ECHAM5 para 2050 para el pixel que engloba la Mancomunidad Norte Paceño Tropical.

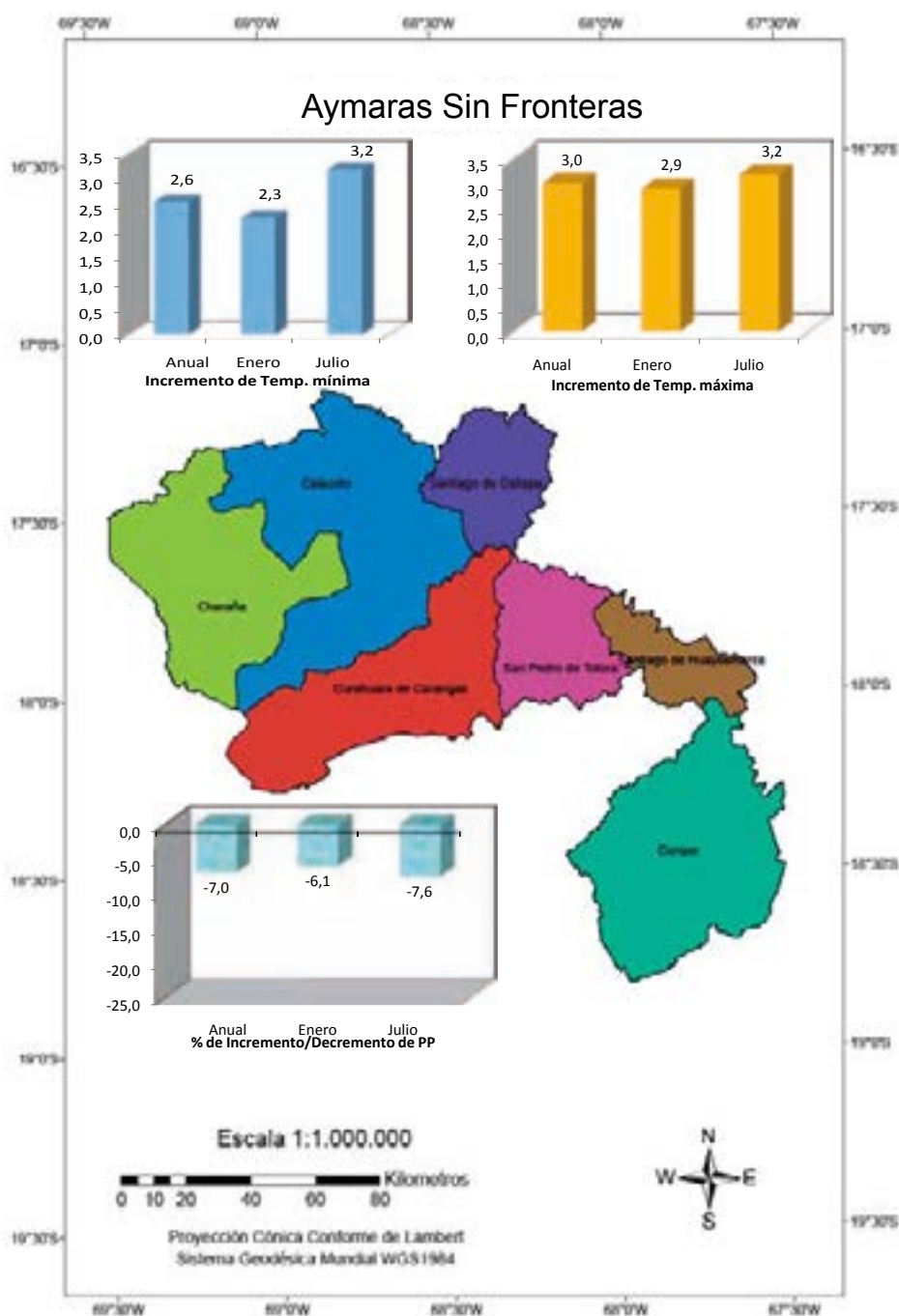


Mapa 3.2.
Incrementos térmicos (°C) y cambios de PP (%) previstos por el MCG ECHAM5 para 2050 para el pixel que engloba la Mancomunidad del Norte Potosí.

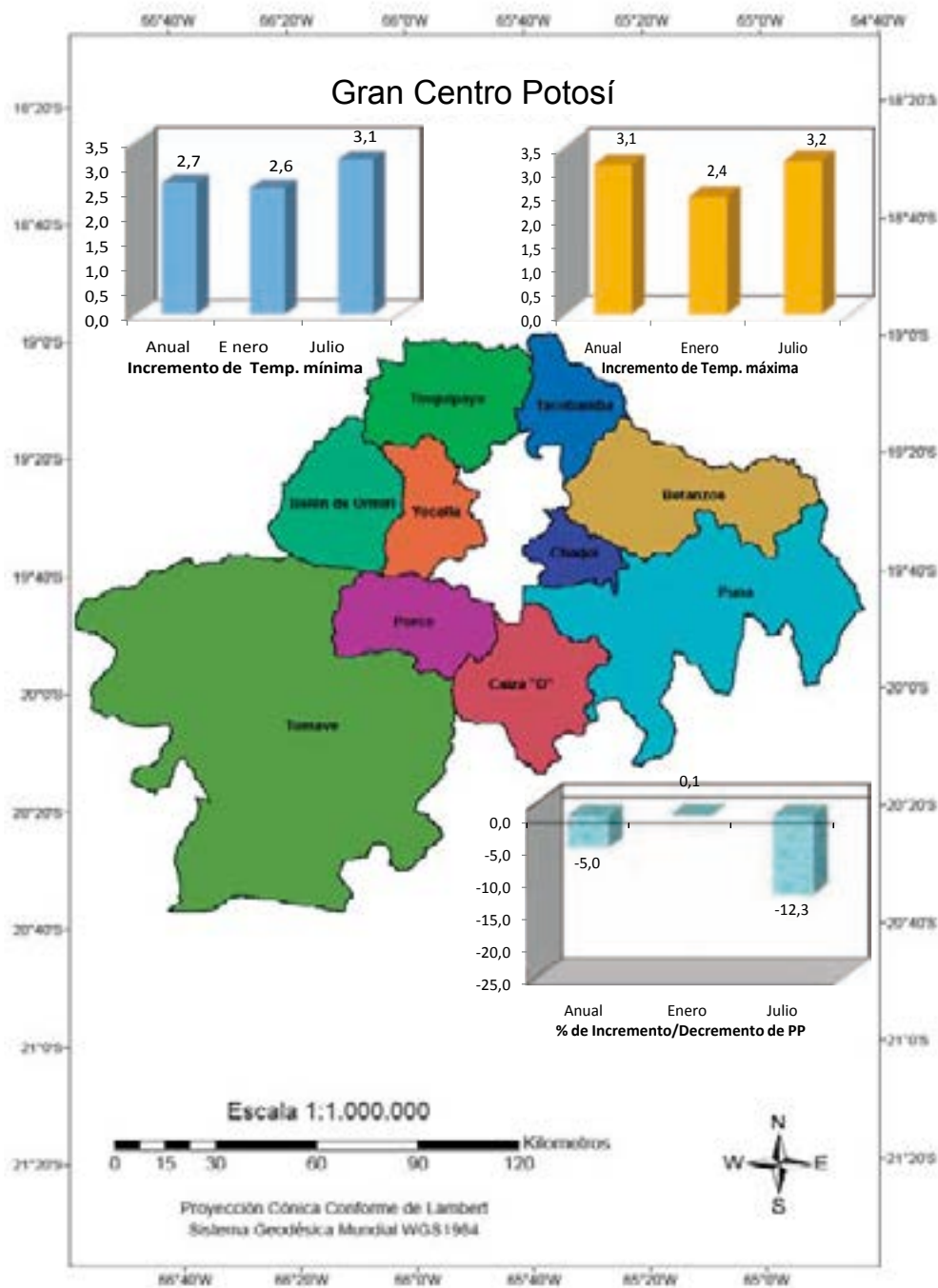


Mapa 3.3.

Incrementos térmicos (°C) y cambios de PP (%) previstos por el MCG ECHAM5 para 2050 para el pixel que engloba la Mancomunidad Aymaras Sin Fronteras.

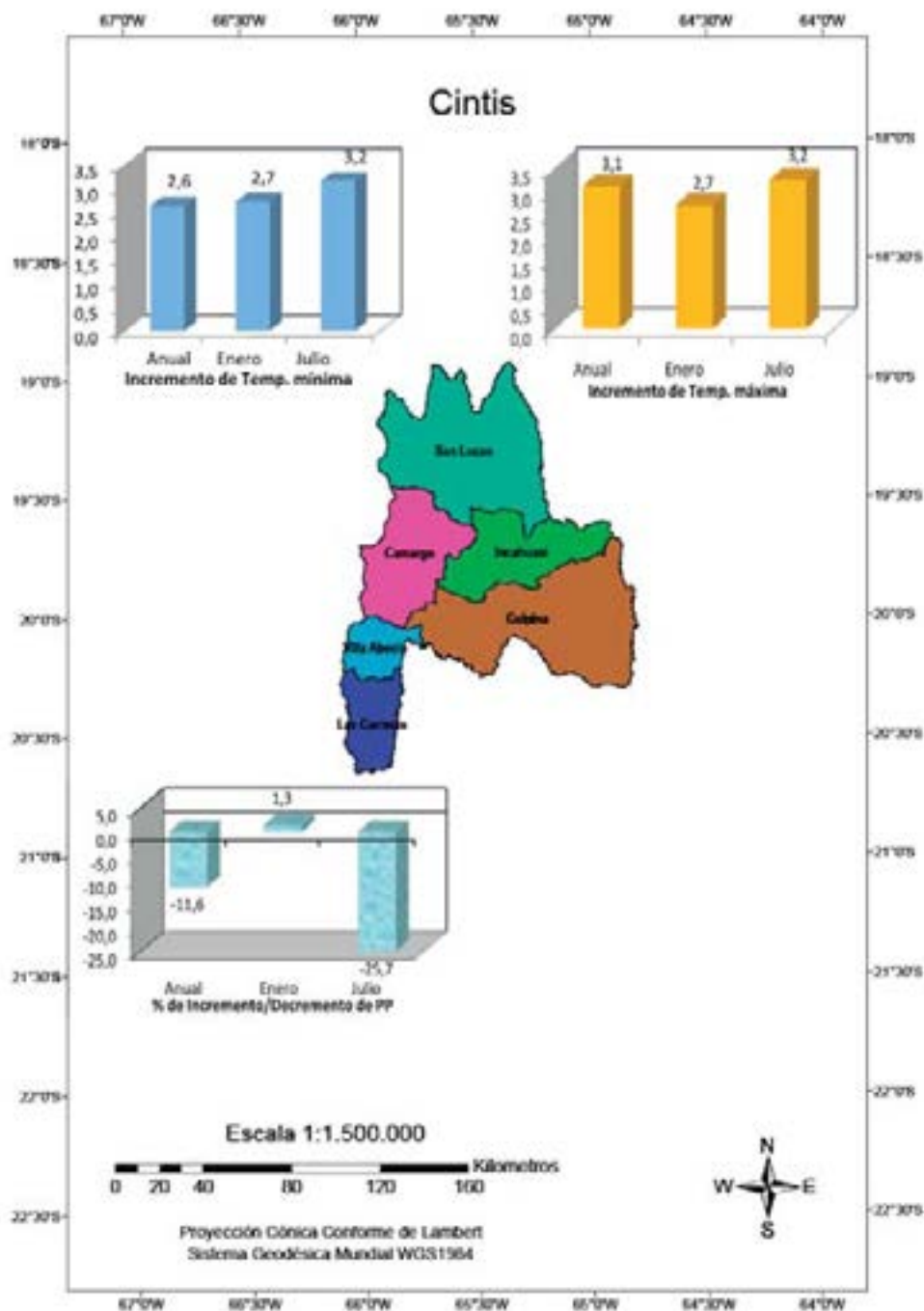


Mapa 3.4.
Incrementos térmicos (°C) y cambios de PP (%) previstos por el MCG ECHAM5 para 2050 para el pixel que engloba la Mancomunidad Gran Centro Potosí.

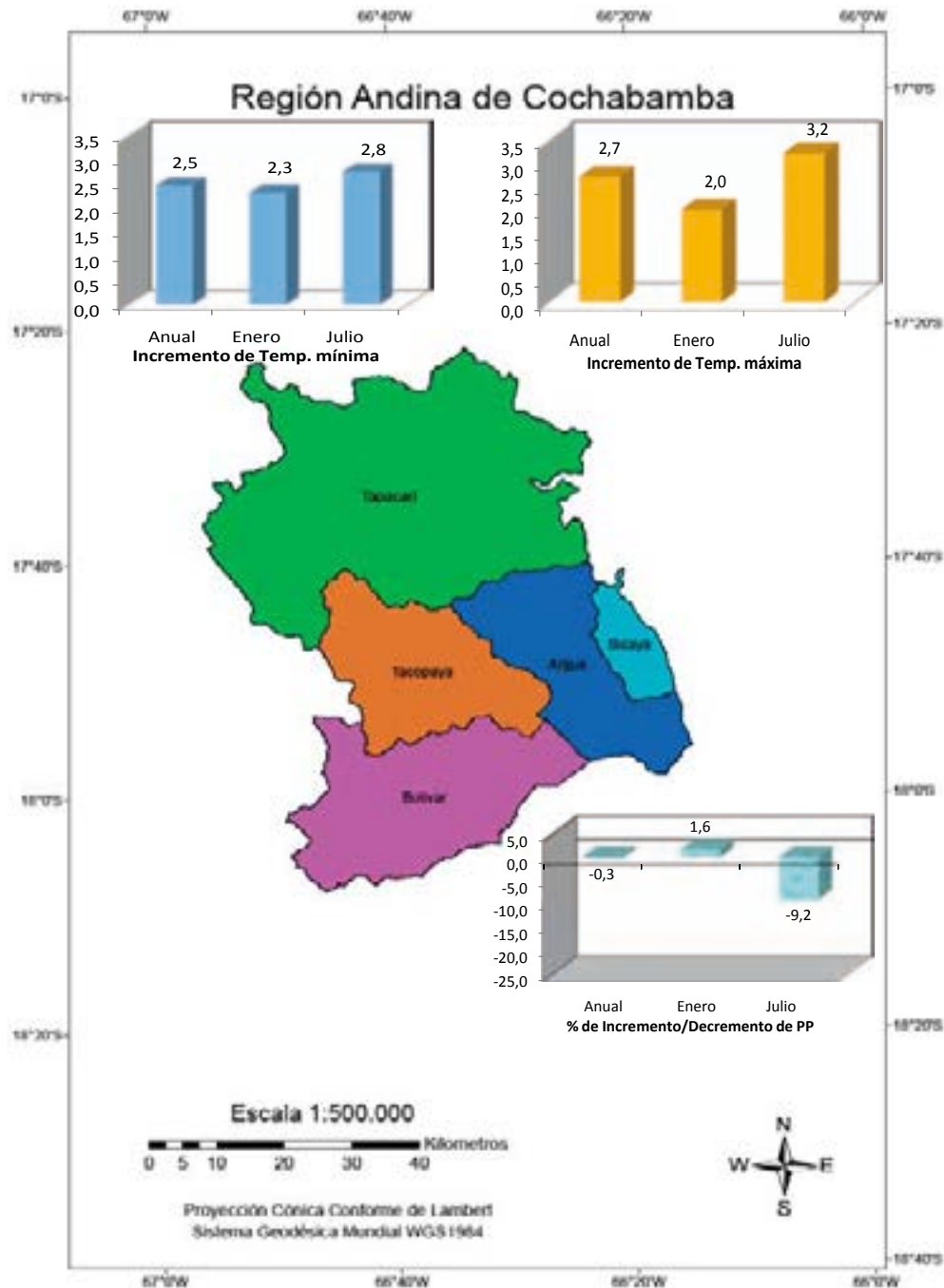


Mapa 3.5.

Incrementos térmicos (°C) y cambios de PP (%) previstos por el MCG ECHAM5 para 2050 para el pixel que engloba la Mancomunidad Cintis.

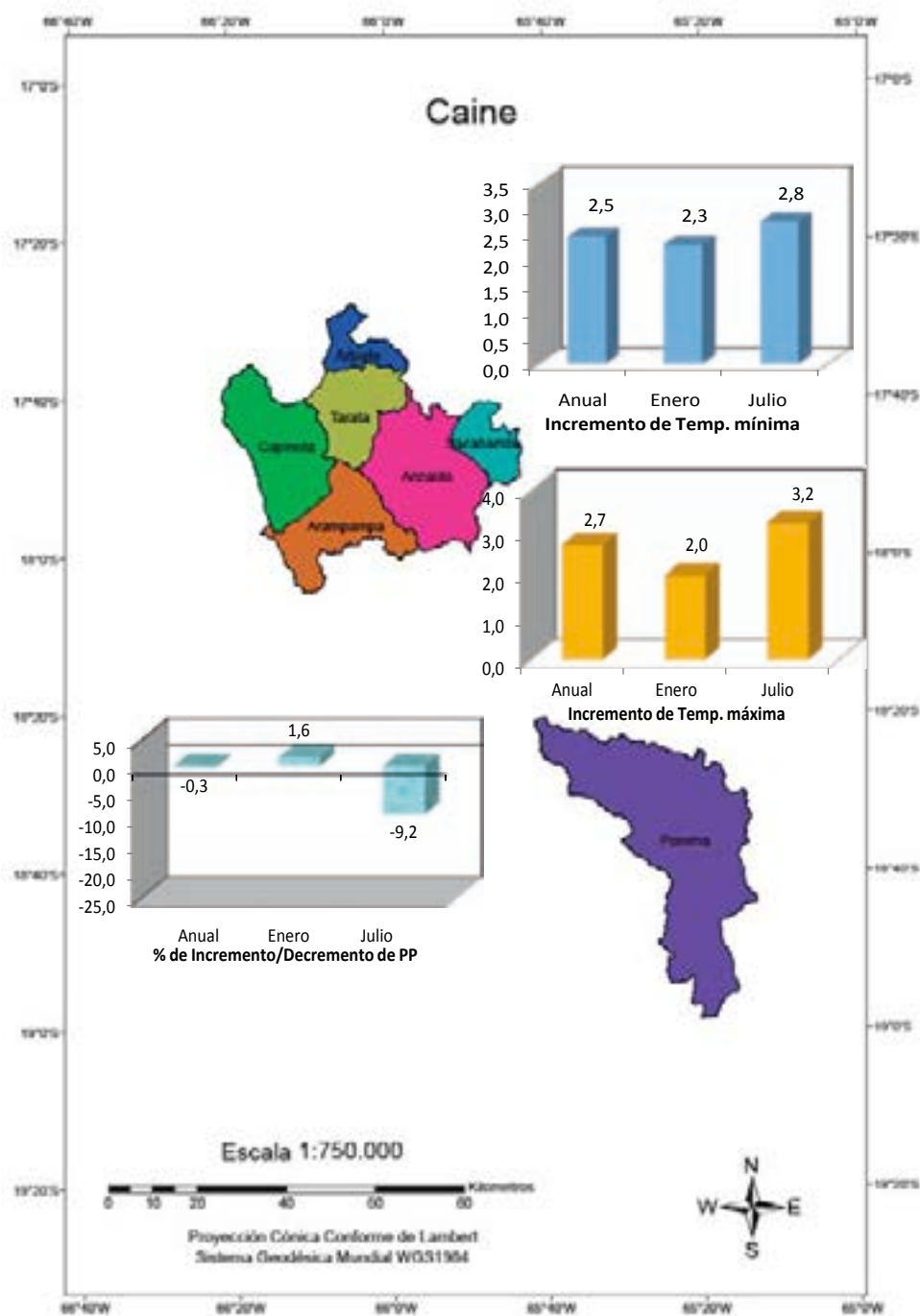


Mapa 3.6.
Incrementos térmicos (°C) y cambios de PP (%) previstos por el MCG ECHAM5 para 2050 para el pixel que engloba la Mancomunidad de la Región Andina de Cochabamba.

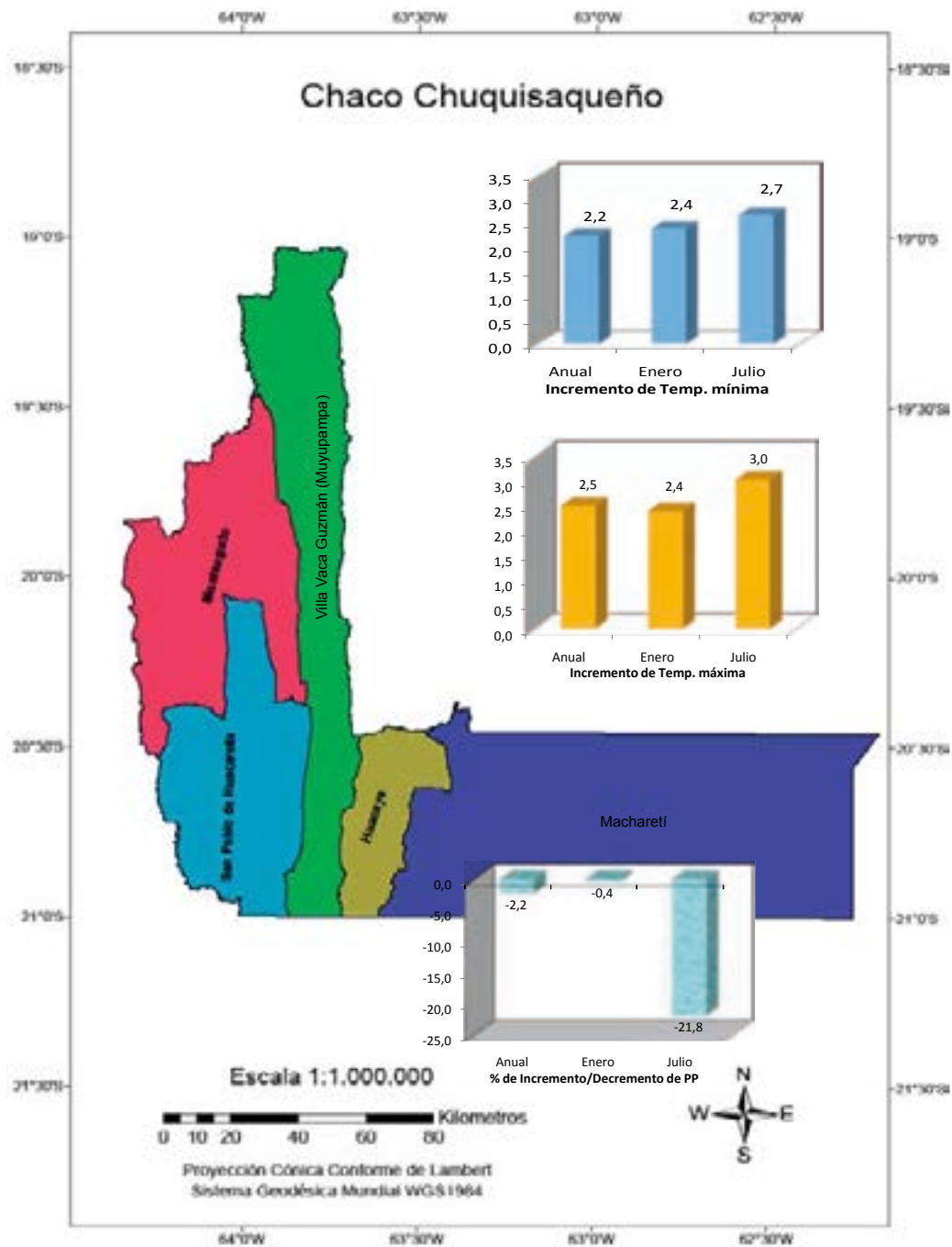


Mapa 3.7.

Incrementos térmicos (°C) y cambios de PP (%) previstos por el MCG ECHAM5 para 2050 para el pixel que engloba la Mancomunidad del Caine.

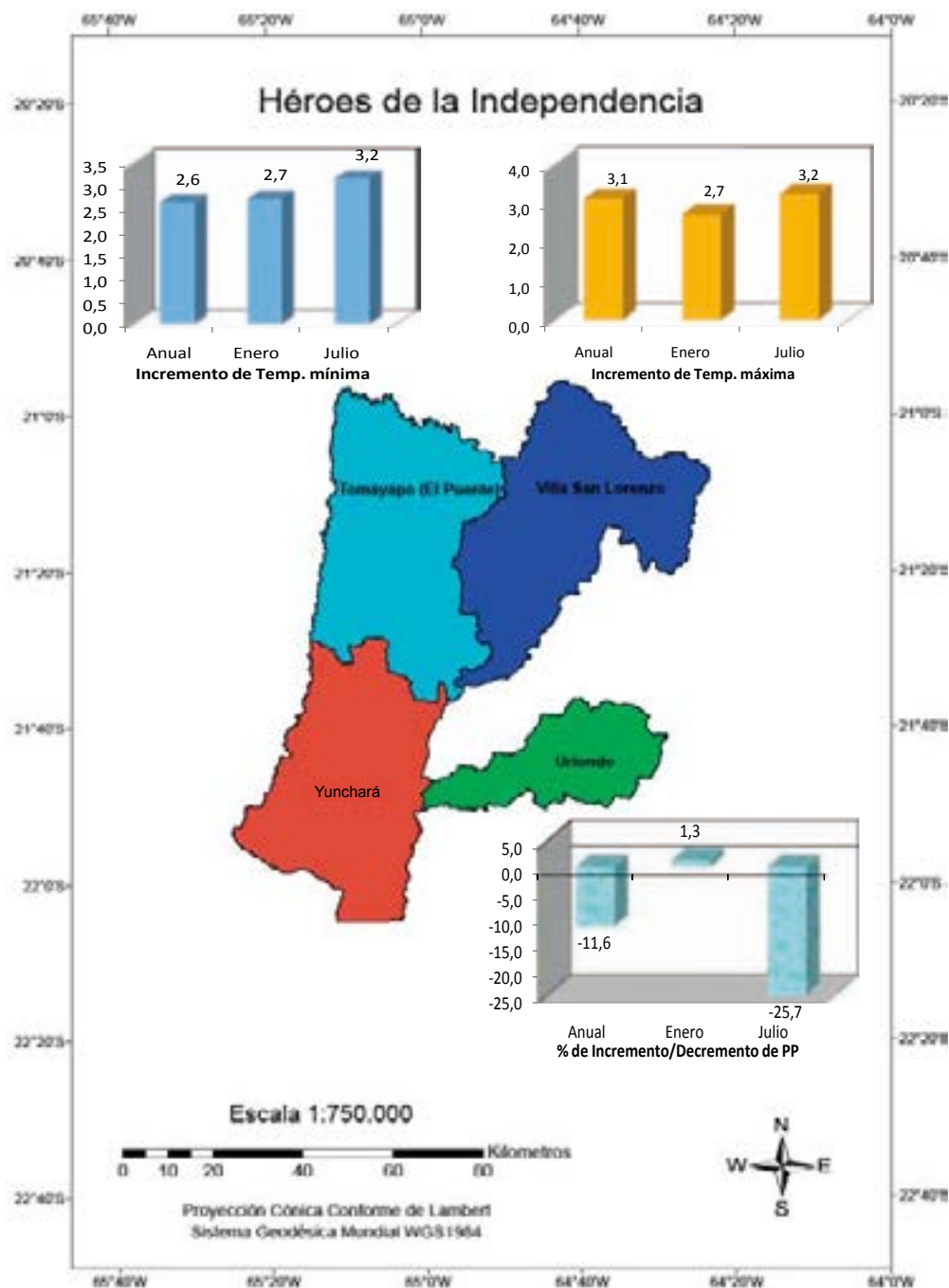


Mapa 3.8.
Incrementos térmicos (°C) y cambios de PP (%) previstos por el MCG ECHAM5 para 2050 para el pixel que engloba la Mancomunidad del Chaco Chuquisaqueño.



Mapa 3.9.

Incrementos térmicos (°C) y cambios de PP (%) previstos por el MCG ECHAM5 para 2050 para el pixel que engloba la Mancomunidad Héroes de la Independencia.



Sin embargo, estos números enmascaran variaciones importantes, pues el Norte Paceño Tropical presentará incrementos térmicos de mayor magnitud en invierno que en verano, seguramente enmascarados por la humedad atmosférica mayor de la época de lluvias. El mayor calentamiento para las zonas bajas ocurriría en octubre antes de la época de lluvias. La recepción de radiación solar sería intensa y la humedad atmosférica sería baja para compensar este proceso. En cambio las zonas altas y de altitud media, presentan calentamiento homogéneo a lo largo del año.

En el caso de la $T_{mín}$, el rango de calentamiento es similar, registrándose también los mayores valores de incremento en el mes de julio, que es la época seca. Un factor importante a ser analizado para acciones de adaptación es el hecho de que en parte de las zonas altas, la $T_{mín}$ dejaría de presentar valores negativos, lo cual podría afectar la economía productiva de los agricultores, aunque también favorecería a la migración de sistemas productivos hacia otros de mayor impacto económico.

En el caso de la precipitación, se analizó el cambio como el incremento porcentual entre lo simulado para el futuro y lo simulado para el presente. En función a ello, se encontró que la precipitación media anual podría reducirse en todas las zonas con un rango medio de variación desde -0.3% en Norte Potosí y la Región Andina de Cochabamba hasta -11.6% en la zona de Héroes de la Independencia (Tarija). Sin embargo, existen datos estacionales que muestran que en enero se podría recibir cantidades modestamente mayores que las presentes, pero que el invierno representado por julio será significativamente más seco, pues muestra reducciones de entre 4% y 25% de la precipitación que se recibirá. Sin embargo, es necesario considerar que en invierno las cantidades de lluvia que se reciben al presente en la mayor parte de las zonas son muy reducidas, por lo que pequeñas variaciones absolutas se traducirán en grandes variaciones porcentuales. También es importante considerar que las máximas reducciones previstas de lluvia, coinciden con los periodos de máximo incremento térmico, lo que muy probablemente provocará mayores déficits de agua que conlle-

varían problemas especialmente de sequía y de conflictos por agua.

Sin embargo, también se debe tener en mente que los valores aquí presentados representan la variación media de la grilla y no valores específicos para cada estación, lo que se mostrará en los próximos capítulos.

3.5. CONCLUSIONES

La comparación de las MCG para las zonas de trabajo del PRRD muestra que todos ellos ofrecen información que puede ser relacionada con la observada en la estación meteorológica, y que requiere de correcciones relativamente consistentes en el tiempo y por lo tanto aplicables.

Los datos históricos muestran tendencias leves a que los modelos sobreestimen la precipitación en las zonas altas y la subestimen en zonas bajas.

Los modelos tienden a sobreestimar las temperaturas mínimas y a subestimar las máximas, lo cual se debe a la generalización y el promediado de las grillas, pues la información de estaciones de zonas tanto altas como bajas incluidas en cada pixel es promediada para obtener un valor único y por lo tanto es modificada.

La generación de escenarios, en general, proyecta leves tendencias de reducción de precipitaciones hasta el 2050, lo cual debe considerarse con cuidado para integrar estos datos en estudios de vulnerabilidad futuros.

Los mayores decrementos porcentuales en la precipitación se proyectan para la época invernal lo cual probablemente incremente el estrés hídrico, tanto en la demanda urbana como rural.

Se esperan incrementos térmicos de entre 2°C a 3°C, pero con variaciones estacionales de magnitud, siendo que la temperatura subirá más en invierno que en la época de lluvias, por ello en esta época el déficit hídrico será mayor y el riesgo de sequía también. Adicionalmente, este hecho coincide con el periodo de mayor disminución pluviométrica. Como mencionan varios autores,

las zonas con más vegetación muestran niveles de calentamiento menor a zonas áridas de altitudes medias, mientras que en el Altiplano se reduce el efecto, probablemente por mayor pérdida de radiación de onda larga por la baja humedad relativa que no permite acumulación energética.

Se debe recordar que estos resultados engloban lo que está proyectado por los MCG con sus gri-

llas de tamaños considerables. En capítulos posteriores del trabajo, se analizarán estos cambios pero para los datos propios de las estaciones, lo que dará más luces para entender los procesos que ocurrirán en el futuro en las zonas de trabajo. Los resultados permiten concluir que la utilización del modelo ECHAM 5.0 es apropiada para su uso como modelo de borde para trabajos de regionalización en la zona de estudio.



Capítulo 4

Aplicación y calibración de técnicas de downscaling estadístico para el análisis de riesgos en las zonas de intervención del PRRD



4.1. INTRODUCCIÓN

El análisis realizado evidencia un calentamiento global del planeta que se traducen en olas de calor, sequías, inundaciones, etc.; y su incidencia general sobre la especie humana y su entorno demanda otro análisis de vulnerabilidad e impacto sobre los diversos sectores del desarrollo.

Con el fin de tener una aproximación de las características del clima futuro, se han obtenido proyecciones de la tendencia futura de estos cambios, utilizando modelos físico-matemáticos del clima, conocidos como Modelos de Circulación General (MCG). Los mismos simulan la dinámica de las relaciones del sistema climático (atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biósfera) bajo distintos escenarios de emisión de Gases de Efecto Invernadero de origen antrópico que reproducen la evolución del clima. Sin embargo, la resolución espacial de estos modelos es limitada (~200 km), por lo que los escenarios globales no permiten analizar la magnitud de los potenciales impactos locales en los ecosistemas, la agricultura, la hidrología, etc., ya que no consideran el carácter heterogéneo regional ni local. En este marco, la información generada es aún más limitada para la predicción y análisis del riesgo climático local que usualmente ocurren en forma geográfica puntual y que no es percibida por la grilla de los MCG.

4.2. LA FUNCIÓN DEL DOWNSCALING (REGIONALIZACIÓN)

De acuerdo a la UNFCCC¹ el downscaling o regionalización es un método para obtener información climática o de cambio climático de alta

resolución a partir de los resultados de los MCG, con el fin de aplicar a modelos de impacto que requieren información a mayor detalle.

La adaptación al cambio climático requiere diversas actividades genéricas que incluyan las características climáticas previstas dentro de la planificación de desarrollo de las comunidades. El clima cambiante provocará modificaciones en la frecuencia, intensidad y duración de eventos climáticos extremos, los cuales deben ser identificados considerando siempre su nivel de incertidumbre. Estos cambios en los extremos pueden afectar en la media, la varianza o la forma de las distribuciones probabilísticas, pero están inferidos dentro de la variabilidad natural del clima, la cual finalmente definirá sus características locales.

La tarea de reducir la escala de los resultados de los escenarios globales de cambio climático es clave para poder llevar a cabo de forma adecuada estudios de vulnerabilidad, impacto e identificar medidas de adaptación, que tengan en cuenta la variabilidad regional del clima y la influencia de las características de las zonas de estudio. Las dos metodologías que se utilizan en este proceso de reducción de escala son:

- a) La regionalización dinámica. Utiliza modelos regionales del clima con una resolución mayor (hasta 25 km de grilla), representativos de un área limitada y están acoplados a modelos globales que proporcionan las condiciones de contorno para las simulaciones. El problema de esta técnica es que requiere de recursos computacionales muy elevados con un costo comparativo muy alto. Adicionalmente, zonas con fisiografía muy accidentada no son representadas, pues la grilla

¹ http://unfccc.int/files/adaptation/methodologies_for/vulnerability_and_adaptation/application/pdf/statistical_downscaling.pdf.
Obtenido en marzo de 2013.



aún reducida podría ser mayor que sus variaciones.

- b) La regionalización estadística. Utiliza modelos empíricos para proyectar las condiciones climáticas futuras en localidades de características climáticas conocidas. Esta es una técnica muy barata, pero su principal debilidad es que asume que la validez de los modelos empíricos ajustados se mantendrá en el clima futuro.

Siendo que la regionalización o downscaling estadístico es una herramienta de fácil acceso con buenos resultados, diversos autores y agencias (UNFCCC, Canadian Climate Change Scenarios Network, entre otros) sugieren su uso a nivel local. Estos autores² describen que entre los diversos métodos de regionalización o downscaling estadístico están:

1. Funciones de transferencia, basadas en modelos de regresión lineales y no lineales para derivar las relaciones entre predictandos locales y predictores de larga escala. Estos métodos son “generativos”, en el sentido de que las predicciones se derivan de un modelo que se obtiene a partir de los datos de regresiones estadísticas.
2. Tipos de tiempo y métodos de análogos, basados en modelos de vecinos cercanos o de clasificación de tiempos en un número de grupos con similares series de tiempo

2 UNFCCC (2005); Compendium on methods and tools to evaluate impacts of, and vulnerability and adaptation to, climate change. CCCSN. Downscaling Tools. Obtenido de <http://www.cccsn.ec.gc.ca/?page=dst-intro> en marzo de 2013.

Von Storch H., Hewitson B., y Mearns L.; Review of Empirical Downscaling Techniques. GKSS Research Center, Institute for Hydrophysics, Germany. Obtenido de http://regclim.met.no/rapport_4/presentation02/presentation02.htm en marzo de 2013.

meteorológico; normalmente estos métodos son no generativos, pues se basan en un procedimiento algorítmico para obtener la proyección.

3. Generadores de tiempo, que se utilizaron inicialmente para pasar de predicciones a una escala temporal superior a la deseada (por ejemplo, mensual o estacional, cuando se necesita predicción diaria), a través de la simulación estocástica de series de valores diarios consistentes con la climatología disponible. Posteriormente, se identificó su utilidad para la regionalización local por su capacidad de reproducir la climatología diaria, la cual, integrada con los resultados de los MCG, ha mostrado una amplia y barata aplicación para la evaluación de condiciones futuras locales.

4.3. GENERADORES DE TIEMPO COMO HERRAMIENTAS DE DOWNSCALING

La diversidad de técnicas de regionalización (downscaling) estadístico ha impulsado a que muchos autores lleven adelante estudios de comparación de sus resultados³. Los modelos de regionalización estadísticos más populares son el SDSM-Statistical DownScaling Model, (Wilby R. y Dawson C.) que es típicamente una función de transferencia y LARS-WG representando a los generadores de tiempo (Semenov M. y Barrow

3 Sajjad Khan M., Coulibaly P., Bibike Y., Paulin, Yonas Dibike, Uncertainty analysis of statistical downscaling methods; Stochastic Environmental Research and Risk Assessment; May 2011, Volume 25, Issue 4, pp 475-484.

Wilby, R.L. and Wigley, T.M.L. (1997) Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. Progress in Physical Geography, 21, 530-548.

Wilby, R.L., Wigley, T.M.L., Conway, D., Jones, P.D., Hewitson, B.C., Main, J. and Wilks, D.S. (1998) Statistical downscaling of general circulation model output: A comparison of methods. Water Resources Research, 34, 2995-3008.

E.), ambos desarrollados en Inglaterra. Los resultados muestran que los generadores de tiempo tienen mejor capacidad para capturar la variabilidad inter-diaria de los eventos, mientras que las funciones de transferencia y las redes neuronales producen resultados más representativos para la variabilidad interanual. Por lo tanto, el estudio de eventos extremos se realiza mejor con generadores de tiempo, como herramientas de downscaling estadístico.

Un generador estocástico de tiempo es un modelo que genera series de tiempo estadísticamente similares al tiempo observado en una localidad y con la misma variabilidad. En este caso, la metodología para la construcción de escenarios diarios y específicos para estudios de impacto de cambio climático, se basan en la calibración de los datos del Generador de Tiempo con los datos observados en una localidad. Los parámetros ajustados localmente son utilizados por el Generador Climático nuevamente, observándose datos futuros diarios que incluyen las variaciones previstas por el o los MCG.

La información provista por un generador de tiempo, debe ser validada antes de su aplicación. Para ello se emplea pruebas estadísticas que evalúan los resultados para una localidad y comparan similitudes entre el tiempo sintético y el observado. Una comparación de los valores medios y la dispersión de los factores climáticos es bastante común, mediante la aplicación de la Prueba "t" y Prueba "F". Sin embargo, se ha detectado que la prueba de Kolmogorov - Smirnov (KS) rinde resultados más satisfactorios. Es probable que la frecuencia y magnitud de los eventos meteorológicos extremos aumente con el cambio climático. Por lo tanto, esto también debe ser testeado para los objetivos del presente trabajo.

El modelo LARS-WG

LARS-WG 5.0 es uno de los WG (generador de tiempo por sus siglas en inglés) más populares en la comunidad de cambio climático (Semenov, *et al.*, 1998). Es comúnmente usado para proyectar la actividad de condiciones de tiempo meteorológico severo (por ejemplo: actividad de tormentas, ondas de calor, olas de frío, periodos secos, etc.),

y en base a la información diaria se puede generar escenarios climáticos mensuales. El generador estocástico ayuda a estimar la probabilidad de que en una estación, por ejemplo, la temperatura o precipitación presenten eventos extremos, permitiendo así analizar sus cambios en un planeta más caluroso. Los cambios en la condición media del clima y su variabilidad pueden hacer que los incrementos en temperatura o en precipitación extremas (colas de la función de probabilidad) sean mayores que los proyectados para la mediana, donde se identifica que el cambio climático podría ser más visible, a través de eventos extremos que de medias mensuales.

LARS-WG genera datos sintéticos diarios para una estación o punto a partir de condiciones observadas de precipitación, temperatura máxima, mínima y radiación. LARS-WG puede funcionar incluso sólo con series de precipitación diaria o con sólo un año de información diaria de entrada. Sin embargo, es recomendable utilizar todas las variables requeridas y en periodos adecuadamente largos para una simulación más realista, pues el modelo integra la nubosidad dada por la precipitación para representar cambios en la temperatura. Por ejemplo, un día con precipitación tendrá que estar relacionado con menor recepción de radiación solar y valores menores de temperaturas máximas.

Los cambios en la función de probabilidad generada por LARS-WG permiten estimar cómo serán los cambios en las medias y las condiciones extremas (Figura 4.1.). Por ejemplo, la probabilidad de un parámetro meteorológico bajo cambio climático puede distribuirse manteniendo la variabilidad pero incrementando la media (Figura 4.1. arriba), manteniendo la media y la variabilidad (Figura 4.1. centro), o incrementando ambos parámetros (Figura 4.1. abajo). Estas probables distribuciones son mostradas en los resultados producidos por el modelo LARS-WG para los parámetros de temperaturas máximas y mínimas, precipitación y radiación solar, siempre que estos sean introducidos como datos de entrada.

El modelo LARS-WG funciona para el punto en que fue generado y produce series sintéticas diarias de temperatura máxima y mínima, pre-

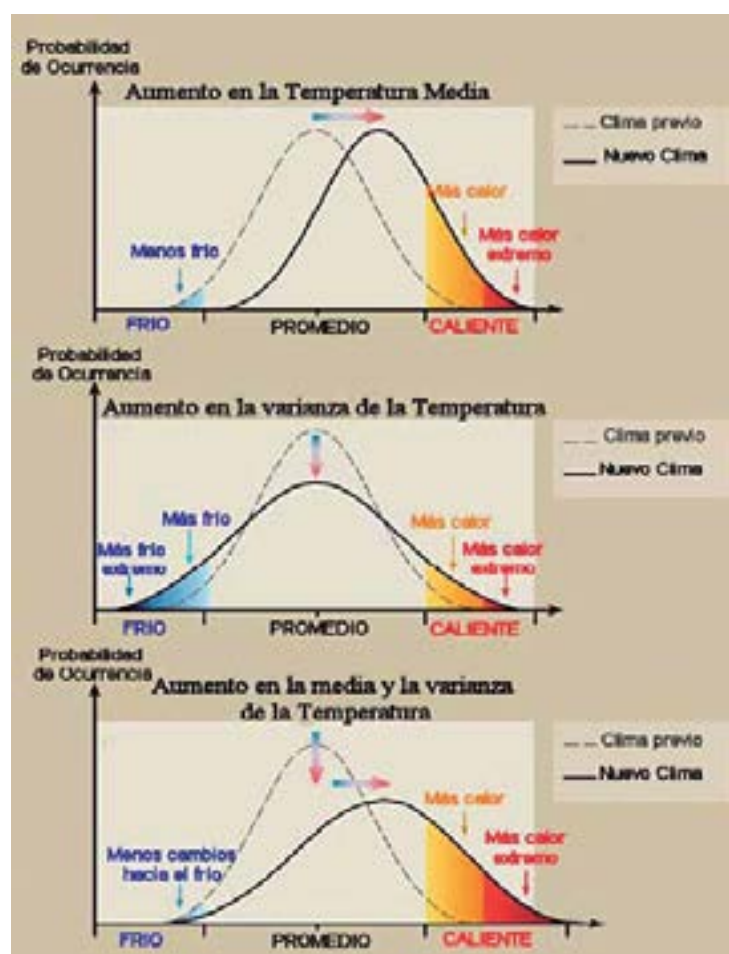
precipitación y radiación solar. El modelo distingue días secos y húmedos, dependiendo de si la precipitación es mayor que cero. La precipitación se modela utilizando distribuciones semi-empíricas de probabilidad para las series requeridas de días lluviosos y secos, así como la cantidad de precipitación en un día lluvioso. Una distribución semi-empírica es un histograma con un número fijo de intervalos (10 en el caso de LARS-WG) y es lo suficientemente flexible para permitir la simulación precisa de varias estadísticas meteorológicas. La temperatura mínima, la temperatura máxima y la radiación se relacionan también con la precipitación e incluyen la consideración de la influencia de la nubosidad sobre estos parámetros, y así LARS-WG utiliza distribuciones separadas para los días lluviosos y secos para cada una de estas variables.

4.4. OBJETIVOS

El objetivo del presente capítulo es presentar los resultados del generador estocástico de tiempo LARS-WG (disponible en www.rothamsted.bbsrc.ac.uk/mas-models/lasrwg.php) y evaluar su capacidad para simular adecuadamente la climatología diaria de las zonas de influencia del PRRD, utilizando como modelo global de frontera los resultados del MCG ECHAM5 que fueron evaluados en el Capítulo 3. Una vez testeado y calibrado con las series históricas, será posible asumir que el modelo tendrá la capacidad de generar datos futuros adecuados a la realidad local.

Figura 4.1.

Simulación de la variación de la función de probabilidad de la $T_{máx}$ de un punto cualquiera mostrando las variaciones que podrían ser identificadas en sus medias y sus colas.



4.5. METODOLOGÍA

Se trabaja con series de tiempo de las estaciones incluidas en el capítulo No. 2 (42 estaciones) distribuidas en las zonas de acción del PRRD o ubicadas en zonas cercanas a ellas. Estas series incluyen la información diaria de por lo menos Precipitación y en muchos casos también de las $T_{\text{máx}}$ y $T_{\text{mín}}$ en función de la disponibilidad mostrada en la Tabla 2.1. Las series fueron filtradas en su consistencia para introducirlas en el Generador de Tiempo LARS-WG. Esto último es de mucha importancia pues las estadísticas de los eventos extremos no son explícitamente analizadas en su consistencia por LARS-WG. En otras palabras, las colas de la distribución observada deben estar bien representadas. Si por ejemplo, las temperaturas extremas se desvían de la distribución normal, LARS-WG que asume la normalidad de la distribución de las temperaturas, podría no representar adecuadamente los eventos extremos aunque la media y la varianza correspondan adecuadamente.

Las series climáticas observadas (preferentemente del periodo 1960-1990) fueron utilizadas para generar 30 años de datos diarios que deberían representar la distribución histórica de las estaciones utilizadas.

Las medias y desviaciones estándar de los datos generados fueron comparadas con la información observada. El test no-paramétrico de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (KS) que se aplica a todo tipo de distribuciones, fue usado para comparar las distribuciones de las poblaciones observadas y generadas. Se aplicó un nivel de significancia de 0.05 conociendo que cuanto mayor sea el valor p , más alta es la probabilidad de que

las dos poblaciones sean iguales. Los percentiles 95 y 5 de las Temperaturas Máximas, Mínimas y Precipitación fueron analizados, tanto en sus medias como en sus máximos y mínimos.

4.6. RESULTADOS

4.6.1. Precipitación

4.6.1.1. Simulación de datos diarios y medias mensuales

Los valores de precipitación diaria fueron bien reproducidos por el modelo LARS-WG, lo cual es demostrado por el valor del estadístico KS que no rechazó ninguna de las series de las estaciones generadas. La Tabla 4.1, presenta un resumen del promedio mensual de la precipitación observada (O) y generada (G) de las estaciones incluidas en el estudio, junto con el estadístico KS calculado para la población y el valor p . En todos los casos, el estadístico es notablemente inferior al valor p de la distribución KS y cercano a 1, lo cual demuestra la similitud de las poblaciones. Las estaciones de Betanzos, Camargo, Sacaca y Curahuara de Carangas presentan valores moderadamente bajos del valor p . Estos resultados podrían sugerir que el generador no tiene una muy adecuada capacidad para reproducir las condiciones locales; sin embargo, su buena o muy buena capacidad mostrada para varias estaciones de las mismas zonas, sugieren que el problema se encuentra en los datos de partida. Estos son complejos de analizar pues se parte de la hipótesis de que los datos de partida tienen buena calidad. Con el fin de continuar con el trabajo, se considerará con cuidado los resultados de las estaciones mencionadas, siempre analizándolos en comparación con estaciones cercanas.

Tabla 4.1.

Promedio y desviación estándar de los promedios mensuales de las precipitaciones diarias generadas por el modelo LARS-WG para las estaciones meteorológicas, consideradas dentro del área de influencia del PRRD. Se presenta también el valor del estadístico KS y su valor p para una significancia del 95%.

Localidad		Media	Desv.	Estadístico KS	VALOR p
Anzaldo	O	44,3	28,9	0,1578	0,7854
	G	43,2	27,9		
Acasio	O	83,6	54,7	0,1200	0,8758
	G	86,4	49,6		
Betanzos	O	32,1	26,2	0,2417	0,5321
	G	31,4	18,5		

Localidad		Media	Desv.	Estadístico KS	VALOR p
Bolívar	O	38,9	29,3	0,1763	0,7803
	G	37,5	24,0		
Caiza D	O	35,9	37,7	0,1733	0,7538
	G	36,0	32,5		
Calacoto	O	33,3	30,1	0,1254	0,7993
	G	32,9	28,5		
Camargo	O	27,5	17,8	0,2593	0,5300
	G	26,9	16,5		
Capinota	O	44,9	29,8	0,1064	0,9197
	G	44,8	26,6		
Chaquí	O	45,0	24,4	0,1289	0,8350
	G	46,3	21,4		
Charaña	O	28,7	22,5	0,2196	0,7241
	G	28,9	21,3		
Corque	O	27,6	21,5	0,2185	0,6724
	G	25,3	19,0		
Culpina	O	29,4	19,7	0,1993	0,6333
	G	31,3	21,7		
Curahuara	O	41,7	49,1	0,2330	0,5803
	G	40,7	43,5		
El Puente	O	29,2	25,2	0,2012	0,6824
	G	29,8	21,8		
Guanay	O	163,2	98,4	0,1127	0,9760
	G	157,1	88,9		
Huacareta	O	74,6	42,7	0,1087	0,9811
	G	74,1	43,9		
Ixiamas	O	163,8	69,8	0,1246	0,9424
	G	168,4	72,1		
Las Carreras	O	22,0	16,4	0,2387	0,6970
	G	21,9	15,5		
Llallagua	O	48,0	19,1	0,1424	0,8287
	G	49,1	23,6		
Macharetí	O	62,8	47,5	0,2404	0,6348
	G	63,3	42,3		
Monteagudo	O	80,3	45,6	0,0949	0,9732
	G	80,1	48,2		
Morochata	O	62,4	38,2	0,1810	0,7644
	G	58,0	31,3		
Muyupampa	O	65,2	35,2	0,1342	0,8541
	G	65,0	38,3		
Patacamaya	O	53,3	31,1	0,1346	0,8553
	G	51,9	19,5		
Pocoata	O	21,0	18,6	0,1975	0,6770
	G	20,8	16,2		
Poroma	O	67,1	41,4	0,1334	0,8989
	G	67,4	38,6		

Continúa

Localidad		Media	Desv.	Estadístico KS	VALOR p
Puna	O	36,2	23,0	0,1632	0,8545
	G	37,9	21,4		
Rurrenabaque	O	190,2	98,1	0,0793	0,9954
	G	199,1	97,6		
Sacabamba	O	57,2	49,9	0,1782	0,8178
	G	55,9	44,8		
Sacaca	O	64,9	32,5	0,2428	0,5810
	G	63,9	27,7		
Sajama	O	28,3	25,5	0,2589	0,6521
	G	29,1	23,1		
San Lorenzo	O	43,4	20,1	0,1787	0,7367
	G	41,5	20,9		
San Lucas	O	38,6	23,3	0,2497	0,5182
	G	38,3	22,6		
San Pedro	O	70,8	42,4	0,1316	0,8514
	G	67,6	39,6		
Sapecho	O	123,6	69,8	0,0691	0,9997
	G	130,5	65,9		
Tacacoma	O	70,9	42,1	0,0914	0,9868
	G	71,5	36,9		
Tarata	O	67,0	52,4	0,1778	0,8138
	G	66,3	46,4		
Tinguipaya	O	41,0	31,8	0,1758	0,7876
	G	39,0	23,0		
Tipuani	O	169,2	118,7	0,1594	0,8618
	G	166,3	112,5		
Torotoro	O	75,6	52,7	0,1206	0,8814
	G	76,2	43,4		
Villa Abecia	O	19,7	16,8	0,2007	0,7217
	G	20,3	17,3		
Yocalla	O	33,4	21,9	0,1931	0,7508
	G	34,9	18,0		

4.6.1.2. Generación de precipitaciones máximas diarias

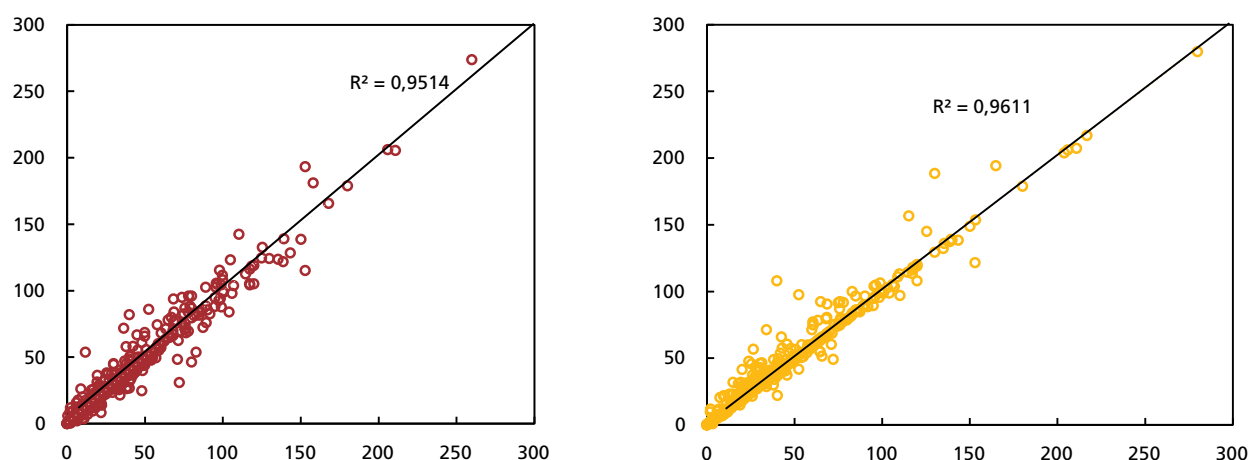
La capacidad del generador también fue evaluada para los valores extremos de precipitación, pues la evaluación de riesgos requiere de un mayor énfasis en las colas de la distribución.

La Figura 4.2 a) muestra la comparación de los valores observados y de los generados del valor del percentil 95, de las precipitaciones máximas diarias en las estaciones incluidas en el estudio. Para todos los sitios hay una excelente aproximación entre la precipitación máxima observada y la generada en términos mensuales, situándose todos los valores alrededor de la recta 1:1. Siendo que la precipitación es una variable muy errática

y que los valores comparados son los extremos, estos resultados muestran la capacidad del generador de representar la climatología local. La aplicación de la prueba KS, rinde un valor $D = 0.007$ que es inferior al valor del estadístico de referencia, con un nivel de significancia del 5%, por lo que se acepta la hipótesis que los valores estimados replican a los datos históricos significativamente. En el caso de la Figura 3 b) se presenta los valores de las precipitaciones máximas absolutas por mes en las estaciones consideradas. Aunque se observan algunos *outliers*, la gran mayoría de la población se agrupa alrededor de la *Curva* 1:1. Esto también se expresa a través del test KS cuyo estadístico es incluso inferior que en el primer caso con un valor $D = 0.002$, igualmente inferior al estadístico de referencia al 5%.

Figura 4.2.

a) Gráfico 1:1 del percentil 95 de la precipitación máxima mensual observada (eje x) vs. simulada (eje y) en mm/día para las estaciones incluidas en el estudio y presentadas en la Tabla 1.1. b) lo mismo pero para la precipitación máxima mensual absoluta.



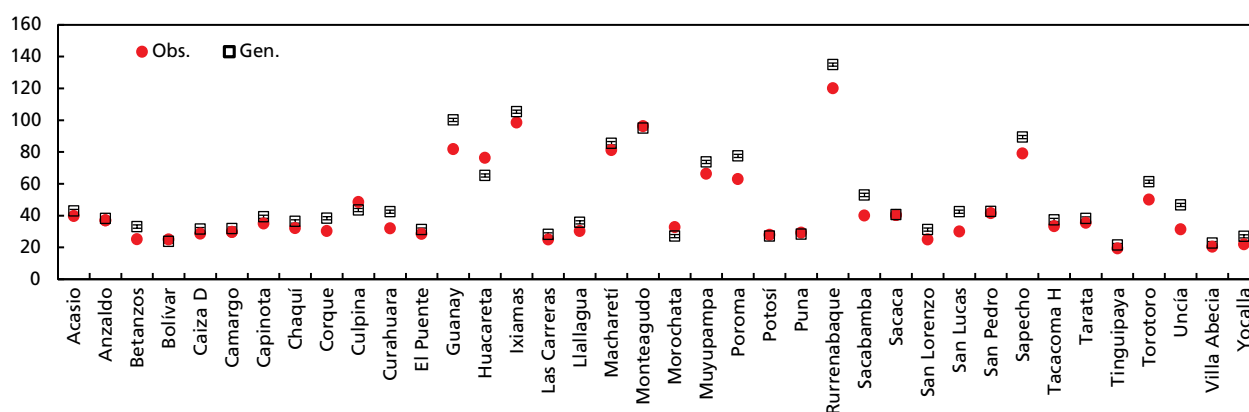
Con el fin de evaluar la capacidad del modelo para generar los eventos extremos de precipitación diaria, se calculó también la precipitación máxima diaria para cada año del registro. Se obtuvo la mediana, el máximo y el mínimo para todos los valores procesados, tanto para los datos observados como para los generados. La Figura 4.3, presenta los valores de la mediana, el máximo y el mínimo del registro interanual de los valores históricos de precipitación máxima anual del periodo de registros, comparados con los máximos observados en las estaciones de la

Tabla 2.1. Los valores generados tanto para la mediana como para los extremos de precipitación máxima anual se encuentran en rangos muy concordantes en todos los casos, observándose solamente cierta sobre-estimación de los valores mínimos de precipitación máxima diaria. Sin embargo, tratándose de una variable tan errática como la precipitación, los rangos de sobre-estimación son muy reducidos para considerarse como importantes.

Figura 4.3.

(1ra) Mediana de precipitación máxima absoluta anual observada (mm/día) comparada con el mismo valor pero del registro generado por LARS-WG para cada estación citada en el eje x. (2da) lo mismo pero para la máxima del registro. (3ra) lo mismo pero para la mínima del registro.

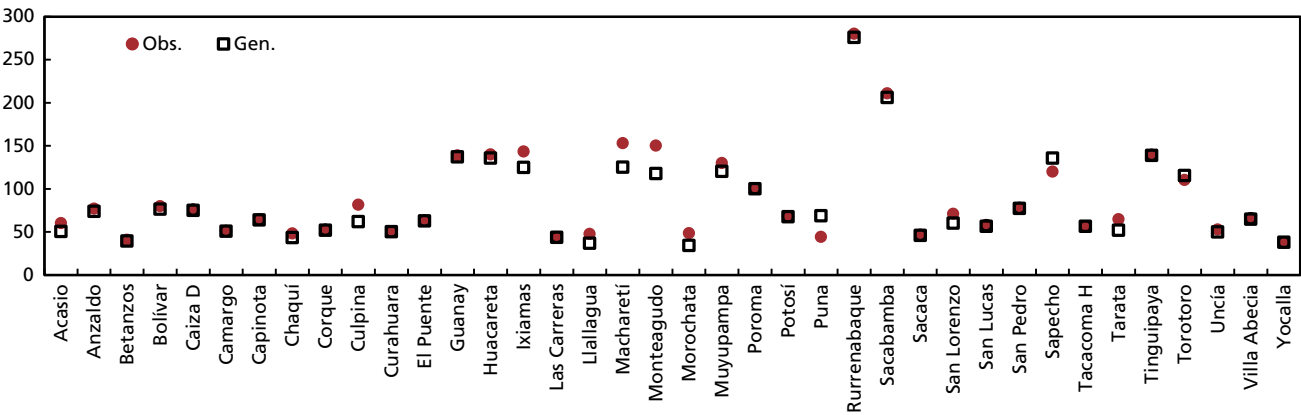
1ra



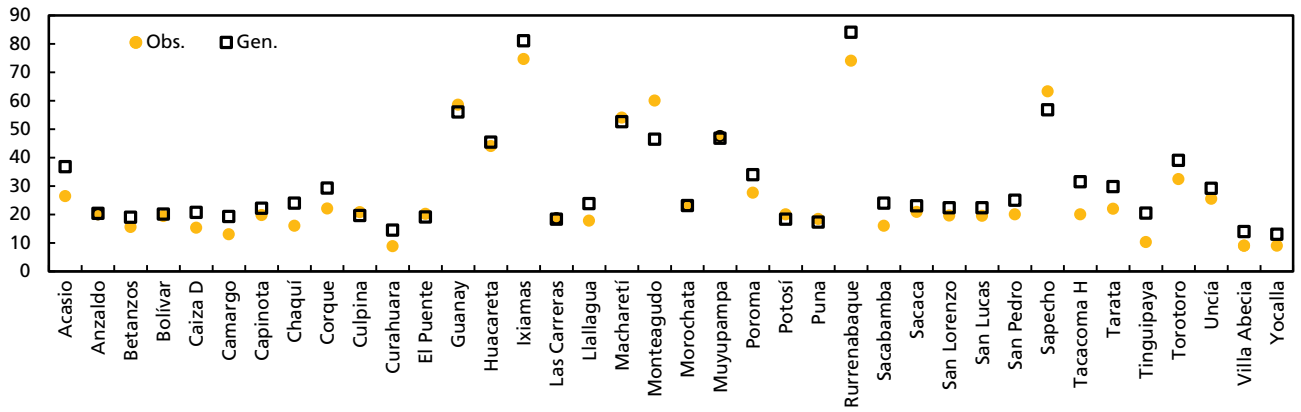
Continúa

Figura 4.3.

2da



3ra



4.6.2. Temperaturas Máximas (Tmáx)

4.6.2.1. Simulación de datos diarios y medias mensuales de Tmáx

En general, las variaciones de la Tmáx diaria, expresada en los promedios mensuales fueron

bien representadas en las localidades analizadas, tal como se muestra en la Tabla 4.2. De las tres variables incluidas, la Tmáx es la mejor representada por el generador climático, como se observan los valores del estadístico KS y su gran diferencia con el valor *p* para todas las estaciones que permiten este análisis.

Tabla 4.2. Promedio y desviación estándar de los promedios mensuales de las Tmáx diarias generadas por el modelo LARS-WG para las estaciones meteorológicas, consideradas dentro del área de influencia del PRRD. Se presenta también el valor del estadístico KS y su valor *p* para una significancia del 95%.

Localidad	Fuente	Media	Desv.	Estadístico KS	VALOR <i>p</i>
Anzaldo	O	20,1	1,3	0,1493	0,8949
	G	20,0	0,5		
Capinota	O	27,7	2,1	0,0880	0,9993
	G	27,8	0,6		
Chaquí	O	18,9	1,8	0,0927	0,9921
	G	18,9	0,6		

Continúa

Localidad	Fuente	Media	Desv.	Estadístico KS	VALOR p
Charaña	O	16,6	1,2	0,1319	0,9090
	G	16,7	0,4		
Culpina	O	20,6	1,0	0,1012	0,9706
	G	20,6	0,6		
Curahuara	O	21,2	2,8	0,1057	0,9847
	G	21,3	1,3		
El Puente	O	28,6	1,4	0,0924	0,9779
	G	28,7	0,5		
Llallagua	O	17,5	0,9	0,0925	0,9850
	G	17,4	0,4		
Monteagudo	O	27,7	1,7	0,0837	0,9923
	G	27,9	0,9		
Morochata	O	18,2	1,4	0,1188	0,9631
	G	18,2	0,5		
Muyupampa	O	26,7	1,7	0,1012	0,9619
	G	26,8	0,9		
Potosí	O	15,9	1,0	0,0707	0,9996
	G	15,9	0,4		
Puna	O	20,2	1,3	0,0836	0,9923
	G	20,3	0,6		
Rurrenabaque	O	30,8	1,1	0,0794	0,9995
	G	30,8	0,7		
Sacaca	O	22,4	1,0	0,0819	0,9853
	G	22,5	0,4		
San Lucas	O	24,4	1,2	0,1273	0,9401
	G	24,4	0,5		
San Pedro	O	26,8	1,0	0,1099	0,9704
	G	26,8	0,6		
Sapecho	O	30,7	1,0	0,1011	0,9780
	G	30,8	0,5		
Tarata	O	26,2	1,1	0,1055	0,9919
	G	26,2	0,5		
Tinguipaya	O	19,0	1,0	0,1099	0,9847
	G	18,9	0,4		
Toro Toro	O	24,6	1,5	0,1361	0,9323
	G	24,6	0,5		
Uncía	O	17,1	2,0	0,1012	0,9920
	G	17,2	0,9		
Yocalla	O	20,6	2,2	0,1232	0,9701
	G	20,6	0,7		

4.6.2.2. Generación de valores extremos mensuales de las $T_{\text{máx}}$ por mes

En el análisis de amenazas climáticas es imprescindible conocer la capacidad de cualquier generador de reproducir los valores extremos de las variables, en este caso la $T_{\text{máx}}$. Con el propósito de evaluar la capacidad del LARS-WG de generar datos extremos, se compararon (Gráficos 1:1) los valores generados para el percentil 95 (valores por debajo de los cuales se encuentra el 95% de la población) y para el percentil 5 (valores por debajo de los cuales se encuentra el 5% de la población) Figura 4.4 de $T_{\text{máx}}$ extrema mensual del registro considerado. Estos valores también se conocen como días muy calientes y muy fríos, respectivamente, de acuerdo a las definiciones del Grupo de Análisis del Riesgo del IPCC.

En los percentiles que muestran los valores más elevados y más bajos de la $T_{\text{máx}}$, tanto observados como generados, se observa que el generador LARS-WG tiene una muy apropiada capacidad de reproducir la variabilidad diaria y los eventos extremos que podría alcanzar la variable. Este comportamiento demuestra que la distribución asumida por el generador (distribución normal) es adecuada para representar la $T_{\text{máx}}$ en las estaciones consideradas y, en general en Bolivia, representando bien tanto la media como las colas de esta distribución.

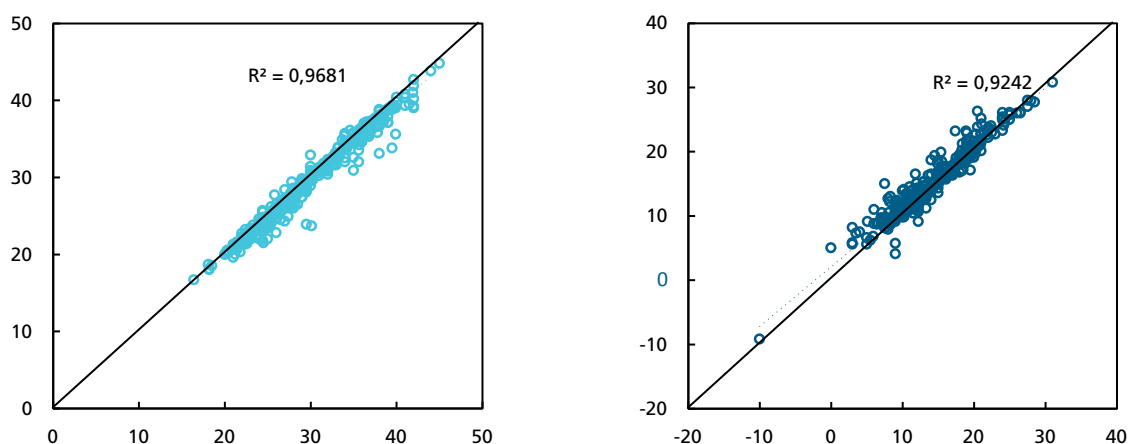
4.6.2.3. Estadística de los extremos anuales de $T_{\text{máx}}$

Los valores anuales máximos de $T_{\text{máx}}$ fueron también evaluados en las estaciones que permitían este análisis, generando una población del número de años incluidos en los registros observados. De estas poblaciones se obtuvieron los valores de las medianas, máximos y mínimos, pues a futuro los valores máximos extremos de $T_{\text{máx}}$ podrían tener gran importancia mostrando los extremos térmicos que se enfrentará. La Figura 4.5. presenta los valores de la mediana, máximo y mínimo del registro interanual de los valores máximos anuales de temperatura máxima del periodo de registros observados comparados con los máximos generados por LARS-WG, para las estaciones que cuentan con registros de temperatura que permiten el mencionado análisis.

Asimismo, los valores mínimos anuales de la $T_{\text{máx}}$ fueron calculados y sus valores de mediana, máximos y mínimos dentro del registro interanual fueron evaluados en los registros observados y comparados por el LARS-WG (Figura 4.6.). Los valores analizados son los mismos de las estaciones, que en el caso de la Figura 4.5, cuentan con registros de temperatura de acuerdo a lo presentado en la Tabla 2.1.

Figura 4.4.

a) Gráfico 1:1 del percentil 95 de la $T_{\text{máx}}$ mensual observada (eje x) vs. simulada (eje y) en $^{\circ}\text{C}$ para las estaciones incluidas en el estudio y presentadas en la Tabla 1. b) lo mismo pero para el percentil 5.



Las Figuras 4.5 y 4.6 muestran que el generador climático LARS-WG tiene una amplia capacidad de reproducir los extremos de temperaturas máximas, incluso en las colas de la distribución también conocidos como valores extremos. Se aprecia una leve tendencia a la sobre-estimación de los valores mínimos de los extremos inferior-

res de $T_{\max}$ (T_{xn}), la cual no excede los 2.5°C que influyen muy reducidamente en el total de las estimaciones. Adicionalmente, las olas de calor son extremos de mayor importancia que los días fríos, especialmente para las latitudes tropicales en Bolivia. Con el fin de evaluar la influencia de estas diferencias, se calculó el estadístico KS para

Figura 4.5.

(1ra) Mediana del registro de los valores máximos anuales de la temperatura máxima observada ($^{\circ}\text{C}$) comparada con el registro generado por LARS-WG para cada estación citada en el eje x. (2da) lo mismo pero para la máxima del registro. (3ra) lo mismo pero para la mínima del registro.

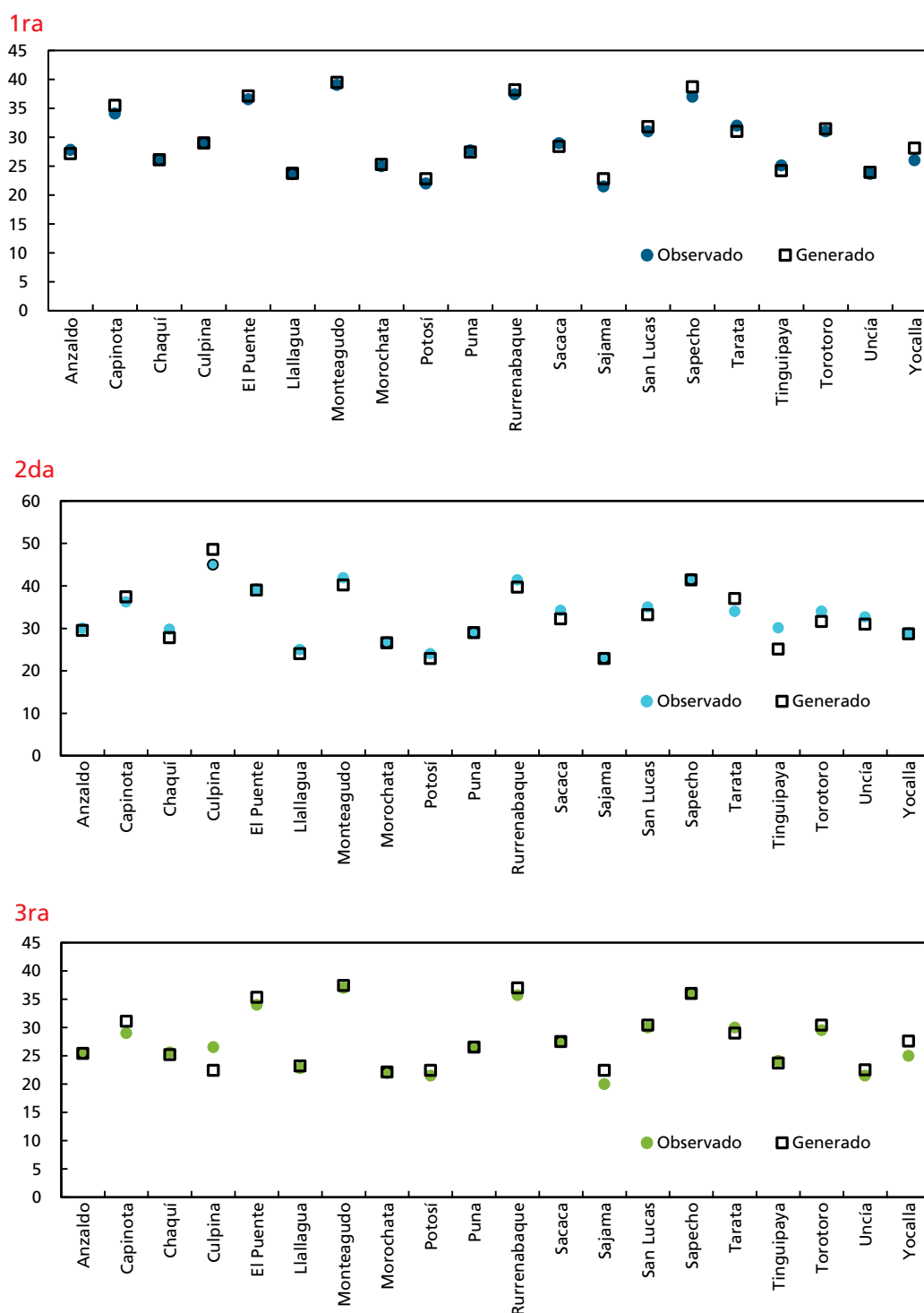
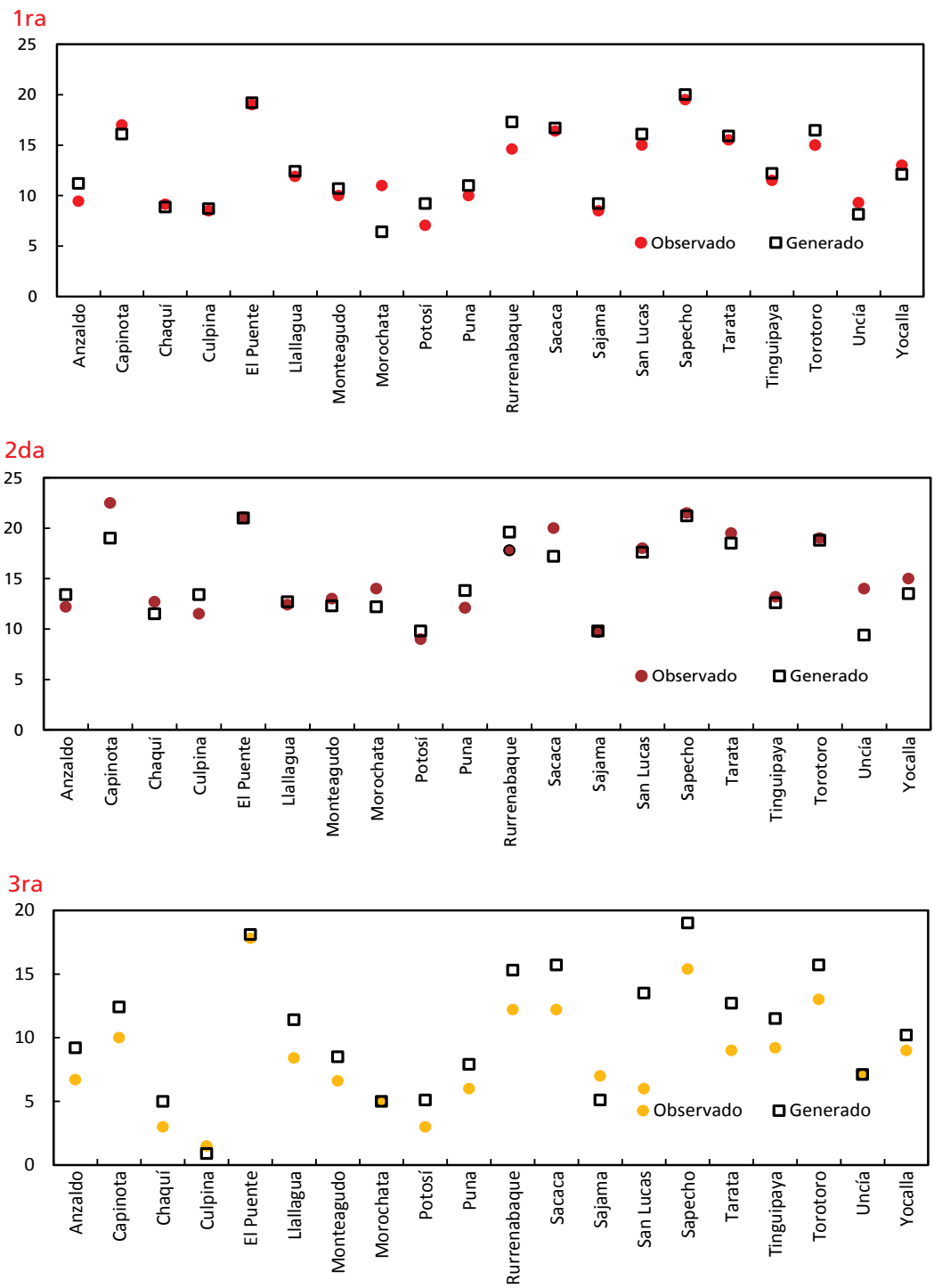


Figura 4.6.
(1ra) Mediana del registro de los valores mínimos anuales de la temperatura máxima observada (°C) comparada con el mismo valor pero del registro generado por LARS-WG para cada estación citada en el eje x. (2da) lo mismo pero para la máxima del registro. (3ra) lo mismo pero para la mínima del registro.



definir si las poblaciones son similares en los registros de las estaciones que presentaban diferencias mayores a 2°C. En todos los casos, el KS obtuvo valores menores que el “D” de referencia, por lo que se acepta la hipótesis de que no existen diferencias estadísticas con las observadas.

La capacidad de mostrar los eventos extremos máximos y mínimos de temperaturas es importante, pues dentro de los riesgos previstos a ser incrementados en un entorno de clima cambiante, podrían ser las colas de las distribuciones más importantes que el cambio en la media poblacional.

4.6.3. Temperatura Mínima (T_{mín})

4.6.3.1. Simulación de datos diarios y medias mensuales

Continuando con la verificación de la capacidad del modelo LARS-WG de generar adecuadamente el pasado climático reciente, se comparó las T_{mín} de todas las zonas y se las agrupó para mostrar sus promedios anuales, los cuales se presentan en la Tabla 4.3.

En general, los promedios históricos anuales están bien representados por la población generada, así como los promedios mensuales. Se observa que la desviación estándar está subestimada por el generador climático, aunque sus valores son cercanos.

Los valores del estadístico KS se muestran muy reducidos y en todos los casos permiten aceptar con seguridad del 95%, la hipótesis nula de que las poblaciones generadas y observadas son iguales estadísticamente. Como en el caso de la T_{máx}, los valores de tendencia central muestran que el generador climático reproduce adecuadamente

la población promedio de las T_{mín} en todas las estaciones analizadas.

4.6.3.2. Generación de valores extremos mensuales de las T_{mín} por mes

Los extremos de los percentiles 5 y 95 de la variable T_{mín} denotan los valores térmicos más bajos que el 5% (noches muy frías) y los valores más altos que el 95% (noches muy calientes) de la población. Sus valores varían de mes a mes, por lo que el representar adecuadamente esta dispersión es una señal de que el generador climático la representa adecuadamente, así como las colas de la población histórica observada.

La Figura 4.7, muestra la comparación 1:1 de los percentiles 95 y 5 de la T_{mín} mensual histórica de todas las localidades estudiadas.

4.6.3.3. Estadística de los extremos anuales de T_{mín}

Los extremos anuales que representan a los valores mínimos y máximos extremos de la T_{mín} (TN_n y TN_x) fueron determinados para la población histórica y también para aquella generada con el fin de determinar si en niveles anuales se man-

Tabla 4.3.

Media y desviación estándar de los valores mensuales de las T_{mín} diarias generadas por el modelo LARS-WG para las estaciones meteorológicas consideradas dentro del área de influencia del PRRD. Se presenta también el valor KS y su valor *p* para una significancia del 95%.

Localidad	Fuente	Media	Desv.	Estadístico KS	VALOR <i>p</i>
Anzaldo	O	2,3	2,2	0,1451	0,8617
	G	2,2	1,5		
Capinota	O	8,5	2,2	0,0925	0,9992
	G	8,5	1,6		
Chaquí	O	4,0	1,9	0,0968	0,9920
	G	4,1	1,6		
Charaña	O	1,6	0,9	0,1215	0,9445
	G	1,6	0,4		
Culpina	O	4,2	1,3	0,0925	0,9924
	G	4,3	0,9		
Curahuara	O	-1,3	2,5	0,1143	0,9774
	G	-1,3	2,1		
El Puente	O	8,6	2,1	0,1099	0,9850
	G	8,5	1,6		
Llallagua	O	3,4	0,8	0,0969	0,9615
	G	3,3	0,6		
Macharetí	O	14,5	1,1	0,1450	0,8695
	G	14,7	0,9		
Monteagudo	O	12,9	1,2	0,0794	0,9995
	G	13,0	0,9		
Morochata	O	3,5	0,9	0,1100	0,9546
	G	3,5	0,7		

Continúa

Localidad	Fuente	Media	Desv.	Estadístico KS	VALOR p
Muyupampa	O	12,4	1,1	0,1451	0,8787
	G	12,3	0,8		
Pocoata	O	4,1	1,6	0,1302	0,9487
	G	4,2	1,2		
Potosí	O	-0,7	1,3	0,0935	0,9851
	G	-0,7	0,9		
Puna	O	3,3	1,6	0,0705	0,9997
	G	3,4	0,8		
Rurrenabaque	O	19,1	1,5	0,0838	0,9994
	G	19,2	0,5		
Sacaca	O	2,3	1,4	0,0968	0,9849
	G	2,4	1,3		
San Lucas	O	6,6	1,9	0,1056	0,9619
	G	6,6	1,6		
San Pedro	O	11,1	0,8	0,0750	0,9996
	G	11,2	0,6		
Sapecho	O	19,2	1,4	0,1143	0,9775
	G	19,2	0,9		
Tarata	O	6,2	1,9	0,1012	0,9920
	G	6,2	0,8		
Tinguipaya	O	3,8	0,8	0,1101	0,9613
	G	3,8	0,9		
Torotoro	O	8,4	1,8	0,1406	0,8936
	G	8,3	1,5		
Uncía	O	2,9	2,3	0,0820	0,9995
	G	3,0	1,5		
Yocalla	O	2,3	2,3	0,1187	0,9702
	G	2,2	1,6		

tiene la capacidad del LARS-WG de representar los extremos.

La Figura 4.8 presenta a la mediana, el máximo y el mínimo de la $T_{mín}$ en las localidades consideradas en este análisis.

La Figura 4.9 presenta los estadísticos máximo, mediana y mínimo de las temperaturas anuales más elevadas de las $T_{mín}$ (T_{Nx}) durante los registros disponibles de las estaciones consideradas y que permitían este análisis de acuerdo a lo presentado en la Tabla 2.1, en comparación con el mismo parámetro pero de los registros generados por LARS-WG.

Respecto a la variable $T_{mín}$, LARS-WG tiene la capacidad de reproducir sus tendencias centrales, medidas de dispersión y extremos a través de poblaciones similares en su distribución y magnitud. Esta capacidad es de mucho valor para reproducir la variabilidad climática local, reflejada en la dispersión diaria de las variables aquí consideradas y se asume que en el futuro la

generación estadística permitirá un análisis de impacto con menor incertidumbre.

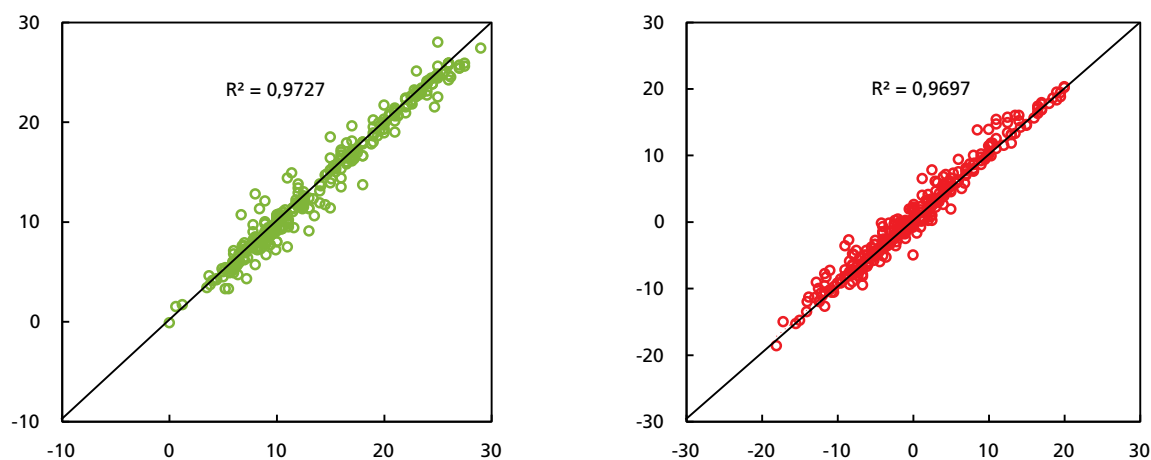
4.7. DISCUSIÓN

En el presente capítulo se trabajó para mostrar la habilidad del LARS-WG de simular condiciones meteorológicas históricas promedio y extremas en 42 puntos de observación para la precipitación y en 18 para la temperatura, que representan a las zonas de influencia del PRRD. Esto se realizó bajo la hipótesis de que si el generador tiene la habilidad de representar adecuadamente las condiciones climáticas históricas, entonces, apoyado en los resultados del Modelo de Circulación General, será capaz de reducir el nivel de incertidumbres del clima futuro (décadas del 2020 y del 2050). Para ello, los niveles de similitud de las distribuciones simuladas y observadas, fueron evaluados a través de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (KS).

En este reporte se muestra la capacidad de LARS-WG para generar información histórica de tem-

Figura 4.7.

a) Gráfico 1:1 del percentil 95 de la $T_{mín}$ mensual observada (eje x) vs. simulada (eje y) en °C para las estaciones incluidas en el estudio y presentadas en la Tabla 1. b) Lo mismo pero para el percentil 5.



peraturas tanto máxima como mínima y de precipitación, muy similar a la original en las estaciones incluidas en este estudio, siendo su comportamiento homogéneo sin diferencias en su eficiencia atribuible al ecosistema o a rangos térmicos. Para modelar temperatura, el generador asume que ésta sigue una distribución normal estándar, que aunque en otras zonas no parece totalmente cierta, en Bolivia se percibe como adecuada, especialmente para la $T_{máx}$. La razón para este comportamiento correcto estaría en la ubicación latitudinal del país que determina una distribución térmica muy homogénea a lo largo del año, reduciendo perturbaciones estacionales marcadas y típicas de zonas de latitudes más elevadas.

En general, la desviación típica y la varianza son levemente subestimadas por LARS-WG, debido a que el programa tiene una estructura de autocorrelación que determina una distribución más aleatoria, mientras que en la realidad, los datos observados contienen muchos periodos en los que la precipitación o la temperatura están altamente correlacionados. A pesar de esta pequeña limitación, los valores extremos no sufrieron reducción de la calidad de generación, pues las Figuras 4.4. y 4.7. muestran que tanto los percentiles 95 y 5 de temperaturas y las máximas extremas anuales de precipitación se generaron adecuadamente gracias a los algoritmos estadísticos incluidos en el modelo LARS-WG que ha

sido ampliamente usado para evaluar riesgos climáticos futuros.

4.8. CONCLUSIONES

La magnitud de los valores generados fue muy cercana a los datos observados, siendo la variable mejor reproducida la temperatura máxima. De acuerdo a la prueba estadística KS, las poblaciones generadas fueron aceptadas como representación de las variables observadas, demostrando que la reconstrucción de información histórica a través del downscaling estadístico es mucho más precisa que aquella llevada adelante únicamente con información directa de MCG, los que efectivamente mostraron problemas de sub y sobreestimación de las variables climáticas (Capítulo 3).

El generador climático LARS-WG es capaz de reproducir la variabilidad diaria de las estaciones meteorológicas incluidas en el estudio, así como los valores promedios y de dispersión de las variables históricas observadas. De esta manera, es posible proseguir el análisis hacia la generación de bases de datos climáticas al 2020 y al 2050, considerando que el modelo LARS-WG ha demostrado que puede reproducir la variabilidad climática de las zonas estudiadas y que, entonces, podrá generar información confiable y adaptada localmente sobre la variabilidad climática futura en un mundo con clima cambiante.

Figura 4.8.
(1ra) Mediana del registro de los valores mínimos anuales de la T_{mín} observada (°C) comparada con el mismo valor pero del registro generado por LARS-WG para cada estación citada en el eje x. (2da) lo mismo pero para la máxima del registro. (3ra) lo mismo pero para la mínima del registro.

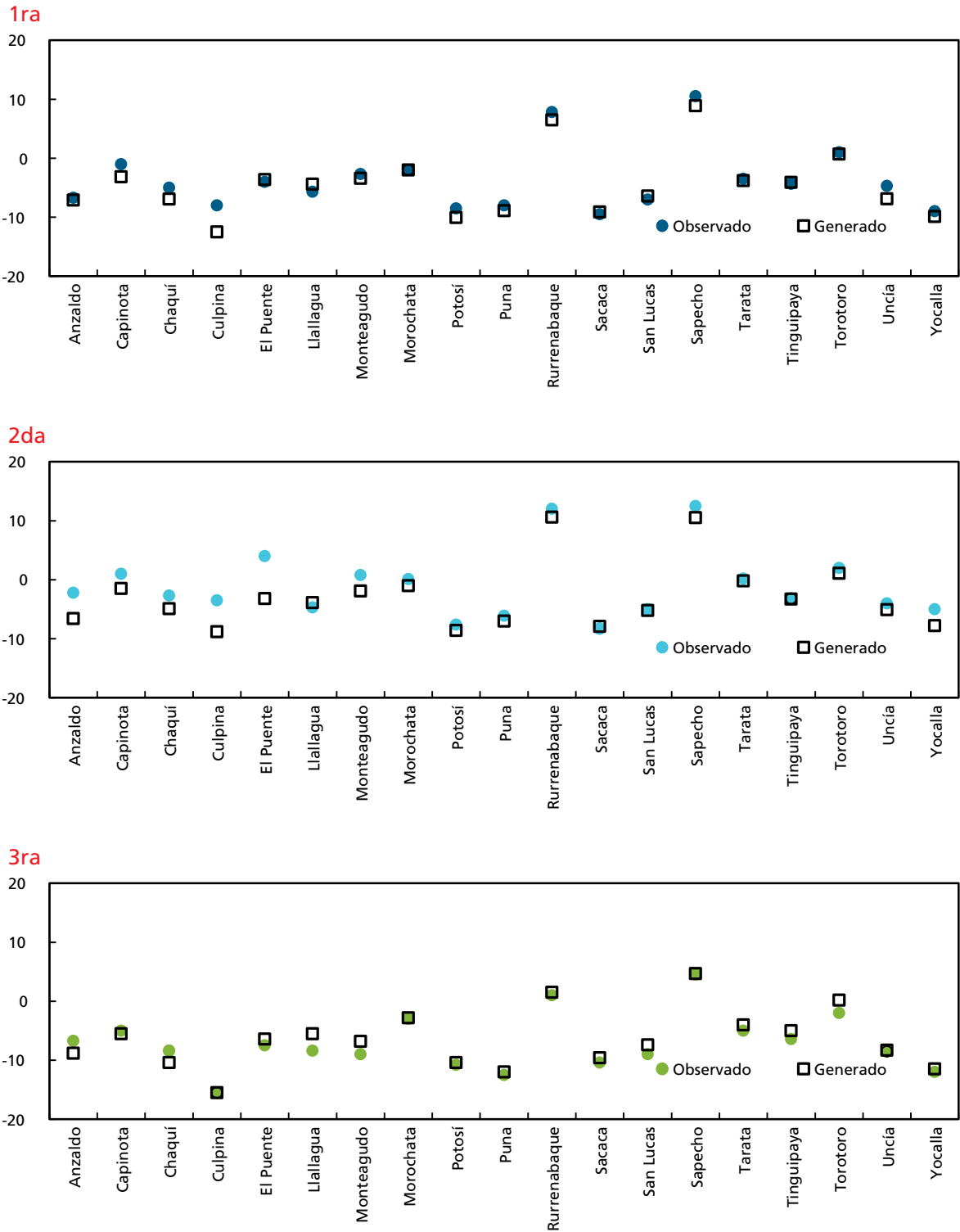
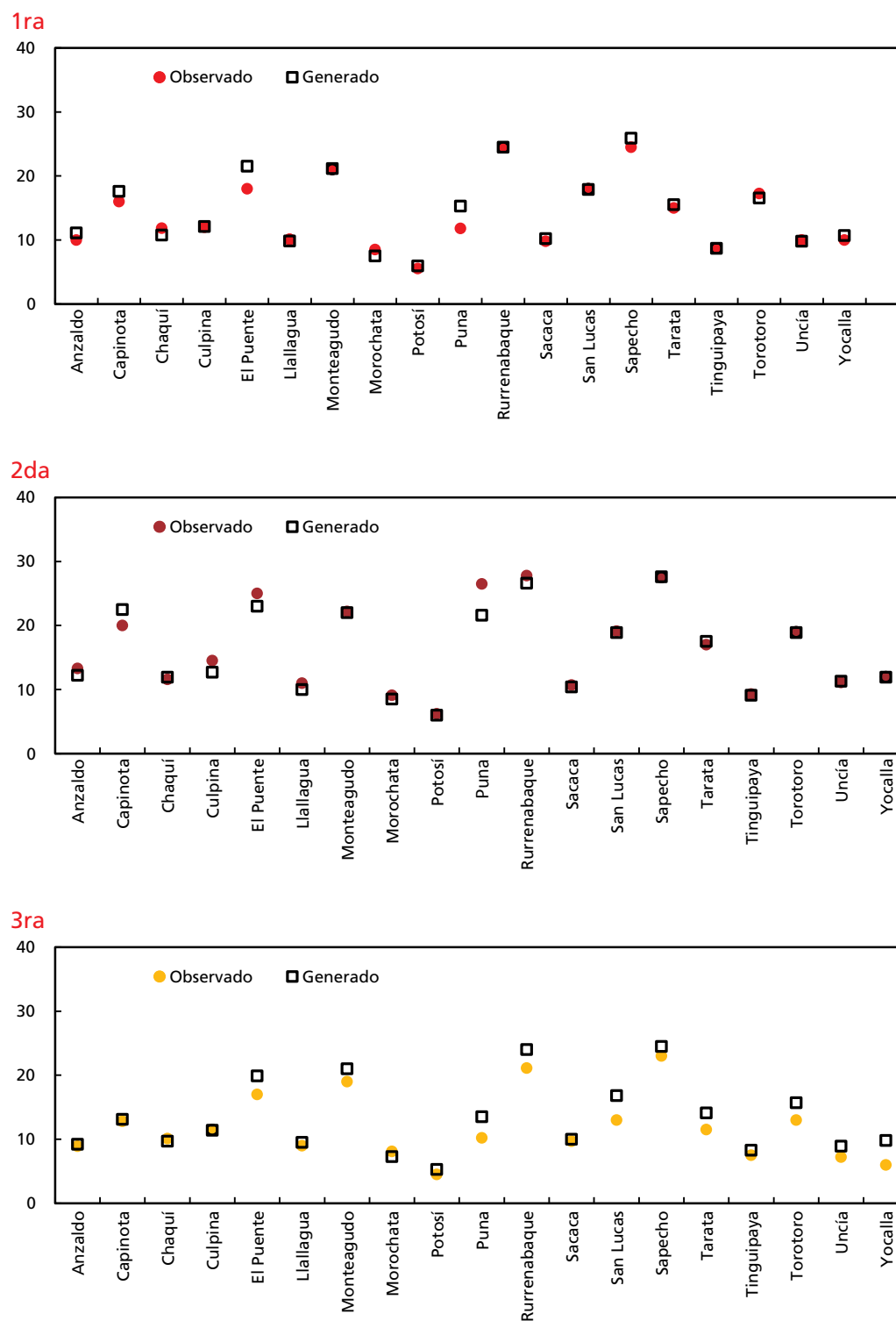


Figura 4.9.

(1ra) Mediana del registro de los valores máximos anuales de la $T_{mín}$ observada ($^{\circ}C$) comparada con el mismo valor pero del registro generado por LARS-WG para cada estación citada en el eje x. (2da) lo mismo pero para la máxima del registro. (3ra) lo mismo pero para la mínima del registro.





Capítulo 5

Descripción de la base de datos
climáticos futuros generados para
las zonas de influencia del PRRD
y variaciones esperadas



5.1. INTRODUCCIÓN

Para estimar el clima futuro de una zona se requiere dos métodos: uno global (Modelo de Circulación General-MCG) el cual otorga las condiciones de frontera (generales atmosféricas) y el otro regional o estadístico, denominado *downscaling* que genera condiciones típicamente locales para la zona de trabajo.

El *downscaling* se basa en métodos estadísticos o dinámicos, siendo los primeros de uso más frecuente por su bajo costo computacional y su corto tiempo de aplicación, además de describir mejor las particularidades locales de las zonas, especialmente en áreas fisiográficas muy heterogéneas. La ejecución del *downscaling* es muy importante para delinear acciones y políticas de frente a los riesgos climáticos, y otorga información detallada sobre características futuras de las variables climáticas.

En el Tercer Capítulo del presente trabajo, se llevó adelante el análisis de la aplicación de tres MCG (los de mayor uso para la zona andina) para generar un registro histórico de las estaciones que cuentan con registros adecuados para tal fin (Tercer Capítulo) y se extrapoló los resultados a las otras estaciones, con el fin de seleccionar, cuál de estos MCG servirían como frontera para el trabajo de generación climática diaria futura. Una vez definido que el modelo ECHAM5 es el que presenta mejor correlación con las condiciones históricas (aunque requiera de correcciones sistemáticas), se lo asumió para actuar de modelo de borde.

En el Capítulo Cuarto, se presentaron los resultados de la evaluación del modelo LARS-WG para generar datos climáticos diarios como línea base (condicio-

nes históricas) con el fin de analizar su capacidad de generar poblaciones estadísticamente iguales y climáticamente similares a los datos reales, mostrando que efectivamente las poblaciones generadas poseen las características climáticas y la variabilidad de las zonas de influencia del PRRD.

Con esta capacidad demostrada y bajo la frontera del MCG seleccionado (ECHAM5), se presentan los resultados de la generación estocástica de la información climática futura y se evalúa esa base de datos generada por el modelo LARS-WG, especialmente en su medida de tendencia central.

5.2. METODOLOGÍA

La construcción de la base de datos se realizó por medio de la aplicación del modelo LARS-WG, el cual fue validado para las estaciones analizadas, siguiendo la metodología descrita en el Capítulo 4, que básicamente incluye:

- Generación de datos diarios de las estaciones presentadas en la Tabla 2.1, a partir de corridas realizadas y comparadas con series mensuales y diarias de las variables de temperatura y precipitación.
- Análisis de correlación de información obtenida por medio de gráficos 1:1 y la prueba estadística de KS, para cada parámetro de las medidas de tendencia central mensuales.
- Análisis de correlación de información obtenida por medio de gráficos 1:1 y la prueba estadística de KS, para cada parámetro de las medidas de dispersión analizados en los percentiles 95 y 5 y los valores extremos.



Conocida la confiabilidad del modelo para generar información climática local incluyendo su variabilidad, éste fue aplicado para construir una base de datos de información diaria de Tmáx, Tmín y PP para las zonas de influencia y en el futuro. Se espera obtener, con bajo nivel de incertidumbre, una base de datos climática que incluya la variabilidad intrínseca local y la señal de cambio climático indicada por un MCG.

En este caso, se trabajó con datos de base de 42 estaciones meteorológicas para generar información climática esperada para la década del 2020 y la del 2050 contando como modelo base al ECHAM5.0, bajo el escenario A2¹ y de acuerdo a la descripción de la Tabla 2.1. Se trabajó con el escenario A2 porque las tendencias actuales de emisiones de Gases de Efecto Invernadero han sobrepasado las estimaciones optimistas y es previsible que no se alcancen sus metas, además que convenios vinculantes como el Protocolo de Kyoto presentan objetivos poco ambiciosos que han sido incumplidos; por ello se aconseja evaluar el futuro en base al escenario pesimista postulado por el IPCC.

En todos los casos, se generó una población futura de 30 años de información diaria la cual no corresponde a ningún año en particular, sino a la serie estadísticamente probable en los periodos 2020-2030 y 2045-2055. Los datos generados fueron comparados con el registro histórico, tanto en sus valores mensuales como diarios,

con el fin de evaluar no solamente la variación media esperada para el futuro, sino también la ocurrencia de eventos extremos. En este capítulo se presenta la evaluación de los datos agrupados mensualmente para las zonas de acción del PRRD.

5.3. RESULTADOS

5.3.1. Precipitación

5.3.1.1. Variaciones medias mensuales

La Tabla 5.1 presenta la cantidad de precipitación trimestral y anual promedio que reciben las zonas analizadas en el presente trabajo. Asimismo, la Tabla 5.2 presenta los valores de cambio en porcentajes entre los promedios de los registros futuros (año 2020 y año 2050) y los registros de la línea base. La Tabla 5.2 presenta los valores de cambio en forma trimestral y anual. Esta información también se encuentra reflejada en los mapas del 1 a 36, que describen en forma gráfica las variaciones observadas.

La precipitación en un año presenta cambios no significativos en la cantidad e intensidad. Se observa en los municipios y zonas estudiadas, tendencias a reducciones o incrementos anuales de aproximadamente el 4%, con valores extremos de incremento del 6% o reducción del 10%, siendo los municipios de la zona Andina (Altiplano y Región Andina de Cochabamba) y de los Cintis los que mayor reducción anual presentarían en forma persistente tanto en el futuro cercano como a mediados de siglo.

¹ El **escenario A2** describe un mundo muy heterogéneo basado en la preservación de las identidades locales. Los patrones de fertilidad de las regiones convergen lentamente, lo que se traduce en un aumento de población constante. El desarrollo económico está orientado regionalmente, y el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico fragmentado. El escenario A2 podría considerar la descripción del mundo tal y como evolucionará de mantener nuestro actual comportamiento.

Tabla 5.1.

Precipitación acumulada (mm) del registro histórico en los puntos analizados. Se presentan los datos promedio para los trimestres de enero a marzo (E-M), abril a junio (A-Jn), julio a septiembre (Jl-S), octubre a diciembre (O-D) y el promedio anual.

Localidad	E-M	A-J	J-S	O-D	ANUAL
Acasio	510,9	75,0	53,9	331,5	971,4
Andamarca	190,1	9,7	10,9	104,8	315,5
Anzaldo	292,4	35,0	18,3	151,7	497,4
Apolo	538,5	238,0	166,3	398,2	1341,0
Arampampa	510,9	75,0	53,9	331,5	971,4
Arque	287,6	30,7	18,8	128,5	465,5
Arbieto	292,4	35,0	18,3	151,7	497,4
Betanzos	239,7	21,4	9,6	123,2	394,0
Bolívar	287,6	30,7	18,8	128,5	465,5
Caiza D	271,6	27,6	14,5	126,7	440,5
Calacoto	262,1	24,1	19,9	119,2	425,3
Callapa	262,1	24,1	19,9	119,2	425,3
Camargo	210,7	4,6	7,4	155,8	378,3
Capinota	304,5	28,9	22,1	177,4	532,9
Caripuyo	333,4	29,2	16,9	206,6	586,1
Chaquí	297,1	30,4	15,7	202,1	545,4
Charaña	212,6	14,8	8,6	71,8	307,8
Chayanta	333,4	29,2	16,9	206,6	586,1
Corque	190,1	9,7	10,9	104,8	315,5
Culpina	195,1	50,9	6,1	128,7	380,8
Curahuara de Carangas	212,6	14,8	8,6	71,8	307,8
El Puente	189,8	9,1	7,5	171,0	377,3
Guanay	865,3	321,8	202,7	593,4	1983,2
Huacareta	456,5	95,6	29,2	292,4	873,6
Huacaya	482,9	139,6	59,1	259,0	940,7
Huayllamarca	190,1	9,7	10,9	104,8	315,5
Incahuasi	195,1	50,9	6,1	128,7	380,8
Ixiamas	768,4	303,7	270,1	624,0	1966,2
Las Carreras	185,5	16,8	6,5	89,4	298,3
Macharetí	353,2	125,6	18,7	243,1	740,6
Mapiri	865,3	321,8	202,7	593,4	1983,2
Monteagudo	482,9	139,6	59,1	259,0	940,7
Muyupampa	378,1	103,2	26,2	310,9	818,3
Pocoata	333,4	29,2	16,9	206,6	586,1
Porco	242,8	19,1	12,4	115,6	390,0
Poroma	474,8	38,9	34,7	285,9	834,3
Puna	222,1	32,5	24,9	156,4	435,9
San Buenaventura	973,4	511,3	329,1	676,9	2490,7
Sacabamba	478,9	55,7	19,8	239,2	793,6
Sacaca	492,3	36,9	17,4	242,2	788,9
San Lorenzo	287,9	35,8	18,1	173,0	514,8
San Lucas	335,0	15,1	21,4	143,4	514,8
San Pedro	483,6	64,3	55,9	250,1	853,9
San Pedro de Totora	212,6	14,8	8,6	71,8	307,8
Sicaya	287,6	30,7	18,8	128,5	465,5
Tacacoma	485,4	120,5	48,8	218,0	872,8

Continúa

Localidad	E-M	A-J	J-S	O-D	ANUAL
Tacobamba	242,8	19,1	12,4	115,6	390,0
Tarata	517,1	54,7	17,6	227,8	817,2
Tacopaya	287,6	30,7	18,8	128,5	465,5
Tapacarí	287,6	30,7	18,8	128,5	465,5
Teoponte	865,3	321,8	202,7	593,4	1983,2
Tipuani	865,3	321,8	202,7	593,4	1983,2
Tinguipaya	354,5	26,8	8,6	112,8	502,7
Tomave	242,8	19,1	12,4	115,6	390,0
ToroToro	498,5	47,8	28,5	332,3	907,1
Urmiri	242,8	19,1	12,4	115,6	390,0
Uriondo	287,9	35,8	18,1	173,0	514,8
Villa Abecia	176,4	13,3	6,2	58,8	254,7
Yocalla	242,8	19,1	12,4	115,6	390,0
Yunchará	189,8	9,1	7,5	171,0	377,3

Tabla 5.2.

Porcentaje de cambio de precipitación trimestral (%) que sería recibida en el futuro cercano y a mediados de siglo. Se presentan los datos promedio para los trimestres enero a marzo (E-M), abril a junio (A-Jn), julio a septiembre (Jl-S), octubre a diciembre (O-D) y el promedio anual.

Municipio	Año	E-M	A-Jn	Jl-S	O-D	ANUAL
Acasio	2020	17,961	-2,646	-22,535	-19,626	4,681
	2050	21,425	-4,725	-21,448	-18,294	5,001
Andamarca	2020	-5,755	-24,405	-11,604	-3,027	-5,758
	2050	-7,582	6,727	4,909	-12,127	-8,833
Anzaldo	2020	-0,695	-1,946	-7,308	0,560	-0,136
	2050	3,723	-11,278	-0,800	0,493	1,636
Apolo	2020	4,720	-15,648	5,498	1,480	0,886
	2050	10,309	-17,762	0,299	0,126	1,677
Arapampa	2020	-0,422	-1,511	-8,210	0,016	-0,188
	2050	6,451	-6,943	-9,519	-1,223	3,193
Arque	2020	-6,282	4,046	18,420	-1,670	-4,963
	2050	-5,570	-4,295	24,389	-0,519	-4,768
Arbieto	2020	-7,539	-4,505	-9,219	-0,902	-4,699
	2050	-4,309	-8,882	-7,477	-1,765	-2,916
Betanzos	2020	-4,002	5,351	8,773	7,877	-5,511
	2050	-1,515	0,926	23,725	3,856	-4,925
Bolívar	2020	-6,282	4,046	18,420	-1,670	-4,963
	2050	-5,570	-4,295	24,389	-0,519	-4,768
Caiza D	2020	-7,252	24,844	-26,680	-14,298	-6,441
	2050	-5,440	21,998	-17,278	-18,619	-6,999
Calacoto	2020	0,179	5,808	8,131	-3,227	-1,662
	2050	0,887	3,363	18,237	-2,930	-1,408
Callapa	2020	5,677	-7,347	-12,256	-1,252	-3,917
	2050	2,742	-4,653	-4,062	-7,095	-1,736
Camargo	2020	-19,185	-21,359	9,275	4,424	-6,671
	2050	-17,492	-21,334	19,545	-2,359	-8,199
Capinota	2020	-0,422	-1,511	-8,210	0,016	-0,188
	2050	6,451	-6,943	-9,519	-1,223	3,193

Municipio	Año	E-M	A-Jn	Jl-S	O-D	ANUAL
Caripuyo	2020	-6,727	-23,624	3,635	-14,029	-10,413
	2050	-7,195	-28,192	15,675	-13,044	-10,968
Chaquí	2020	0,435	-9,548	18,136	-3,545	-1,211
	2050	2,592	-14,263	26,578	-6,266	-1,255
Charaña	2020	0,179	9,808	28,131	-3,227	-1,662
	2050	0,887	3,363	25,237	-2,930	-1,408
Chayanta	2020	-6,727	-23,624	3,635	-14,029	-10,413
	2050	-7,195	-28,192	15,675	-13,044	-10,968
Corque	2020	-5,755	-24,405	-11,604	-3,027	-5,758
	2050	-7,582	6,727	4,909	-12,127	-8,833
Culpina	2020	-0,955	-6,698	-5,751	1,471	-3,121
	2050	0,728	-8,656	-1,526	-4,275	-4,168
Curahuara de Carangas	2020	5,677	-17,347	2,256	-10,252	-9,917
	2050	2,742	-24,653	8,062	-9,095	-1,736
El Puente	2020	4,116	-9,053	-10,167	-0,184	1,310
	2050	13,209	-11,289	-8,839	0,183	5,125
Guanay	2020	-5,404	6,603	-5,470	-14,412	-5,362
	2050	-2,452	-0,745	-4,711	-14,894	-5,295
Huacareta	2020	5,159	4,848	-8,074	8,584	5,640
	2050	7,889	1,805	-15,467	-7,568	5,824
Huacaya	2020	2,504	-4,543	-19,991	-5,078	0,088
	2050	6,774	-6,730	-17,526	0,228	0,789
Huayllamarca	2020	-5,755	-24,405	-9,604	-3,027	-5,758
	2050	-7,582	6,727	4,909	-12,127	-8,833
Incahuasi	2020	-0,955	-6,698	-5,751	1,471	-3,121
	2050	0,728	-8,656	-1,526	-4,275	-4,168
Ixiamas	2020	-1,148	10,194	8,889	-7,078	-0,914
	2050	-2,577	18,598	7,630	-7,431	-1,423
Las Carreras	2020	-5,589	-15,584	16,380	-6,824	-6,085
	2050	-4,910	-18,571	19,652	-12,466	-7,361
Machareti	2020	4,083	-4,832	-21,570	-4,974	-3,147
	2050	4,887	-4,200	-21,518	-5,620	-2,472
Mapiri	2020	-5,404	6,603	-5,470	-14,412	-5,362
	2050	-2,452	-0,745	-4,711	-14,894	-5,295
Monteagudo	2020	2,504	-4,543	-19,991	5,078	0,088
	2050	6,774	-6,730	-17,526	0,228	0,789
Muyupampa	2020	-15,805	-1,853	20,149	2,649	-4,928
	2050	-12,946	-3,895	23,129	-1,576	-5,289
Pocoata	2020	0,804	-1,042	11,948	22,954	3,798
	2050	2,110	-9,272	25,905	24,123	5,966
Porco	2020	-3,381	-5,920	-24,091	7,786	-0,477
	2050	-0,091	-7,559	-12,976	3,827	0,010
Poroma	2020	-3,491	-3,594	-7,277	4,432	-1,371
	2050	0,641	-9,535	-0,319	2,019	0,012
Puna	2020	3,135	-10,885	-8,497	6,843	2,567
	2050	6,840	-15,667	9,028	0,049	2,720
San Buenaventura	2020	1,535	-0,721	-5,395	-10,863	-2,709
	2050	7,704	-4,588	-19,010	-12,618	-3,112

Continúa

Municipio	Año	E-M	A-Jn	Jl-S	O-D	ANUAL
Sacabamba	2020	-11,012	-11,510	-7,777	0,864	-7,399
	2050	-7,985	-16,077	-3,994	0,768	-6,026
Sacaca	2020	0,179	9,808	28,131	-3,227	-1,662
	2050	0,887	3,363	21,237	-2,930	-1,408
San Lorenzo	2020	-6,177	-8,462	-10,139	-0,520	-3,261
	2050	-5,797	-10,059	-7,442	-5,588	-4,775
San Lucas	2020	-5,404	26,050	-8,440	8,933	-2,167
	2050	-4,450	21,327	-2,959	5,752	-2,575
San Pedro	2020	-3,098	-23,329	-15,780	0,890	-3,741
	2050	0,173	-29,183	-2,664	-1,857	-2,336
San Pedro de Totora	2020	5,677	-17,347	2,256	-10,252	-9,917
	2050	2,742	-24,653	8,062	-9,095	-1,736
Sicaya	2020	-5,755	-12,405	-10,604	-3,027	-5,758
	2050	-7,582	6,727	4,909	-12,127	-8,833
Tacacoma	2020	-6,456	2,677	4,758	7,899	-1,703
	2050	-3,534	-5,666	18,053	9,215	-0,757
Tacobamba	2020	-3,381	-5,920	-24,091	7,786	-0,477
	2050	-0,091	-7,559	-12,976	3,827	0,010
Tarata	2020	-7,539	-11,505	-17,219	-0,902	-4,699
	2050	-4,309	-18,882	-7,477	-1,765	-2,916
Tacopaya	2020	-6,282	4,046	18,420	-1,670	-4,963
	2050	-5,570	-4,295	24,389	-0,519	-4,768
Tapacarí	2020	-6,282	4,046	18,420	-1,670	-4,963
	2050	-5,570	-4,295	26,389	-0,519	-4,768
Teoponte	2020	-1,148	10,194	8,889	-7,078	-0,914
	2050	-2,577	18,598	7,630	-7,431	-1,423
Tipuani	2020	-1,148	10,194	8,889	-7,078	-0,914
	2050	-2,577	18,598	7,630	-7,431	-1,423
Tinguipaya	2020	1,595	-0,717	25,807	11,735	3,161
	2050	0,771	-3,233	20,922	11,873	2,365
Tomave	2020	-3,381	-5,920	-24,091	7,786	-0,477
	2050	-0,091	-7,559	-12,976	3,827	0,010
ToroToro	2020	7,887	24,380	2,811	2,466	5,674
	2050	12,228	12,511	8,807	1,239	6,488
Urmiri	2020	-3,381	-5,920	-24,091	7,786	-0,477
	2050	-0,091	-7,559	-12,976	3,827	0,010
Uriondo	2020	-6,177	-8,462	-10,139	-0,520	-3,261
	2050	-5,797	-10,059	-7,442	-5,588	-4,775
Villa Abecia	2020	-9,720	-25,327	7,536	6,707	-5,013
	2050	-8,756	-28,045	12,951	1,105	-5,950
Yocalla	2020	-3,381	-5,920	-24,091	7,786	-0,477
	2050	-0,091	-7,559	-12,976	3,827	0,010
Yunchará	2020	4,116	-9,053	-10,167	-0,184	1,310
	2050	13,209	-11,289	-8,839	0,183	5,125

Sin embargo, al separar el análisis en forma trimestral, se observa otro tipo de información que resalta las diferencias entre estaciones del año. Los porcentajes más altos de cambio se concentran en la época invernal (trimestres: abril-junio y julio- septiembre). Esto se debe a que, en gran parte del país en época invernal, los valores de PP naturales, se encuentran en rangos muy reducidos, de tal manera que pequeñas variaciones absolutas, provocarán grandes variaciones porcentuales hacia el futuro.

La Tabla 5.3, presenta los valores promedio trimestrales y anuales que serían recibidos en las zonas a futuro.

Desde un punto de vista regional, los cambios porcentuales de precipitación muestran que la fisiografía del país definirá diferentes impactos a futuro, los que serán discutidos en los siguientes párrafos.

Tabla 5.3.

Registro de precipitación acumulada (mm) en las décadas de 2020 y de 2050. Se presentan los datos promedio para los trimestres enero a marzo (E-M), abril a junio (A-Jn), julio a septiembre (Jl-S), octubre a diciembre (O-D) y el promedio anual.

Localidad	Año	E-M	A-J	J-S	O-D	ANUAL
Acasio	2020	602,7	78,5	41,8	266,5	1016,9
	2050	620,4	71,5	42,3	270,9	1020,0
Andamarca	2020	179,2	7,3	9,6	101,6	297,3
	2050	175,7	10,3	11,4	92,1	287,6
Anzaldo	2020	290,4	34,3	16,9	152,6	496,7
	2050	303,3	31,1	18,1	152,5	505,6
Apolo	2020	563,9	200,7	175,4	404,1	1352,9
	2050	594,0	195,7	166,8	398,8	1363,5
Arapampa	2020	508,8	73,9	49,5	331,6	969,6
	2050	543,9	69,8	48,8	327,5	1002,4
Arque	2020	269,5	31,9	22,2	126,3	442,4
	2050	271,6	29,4	23,3	127,8	443,3
Arbieto	2020	270,4	33,5	16,6	150,3	474,0
	2050	279,8	31,9	16,9	149,0	482,9
Betanzos	2020	230,1	22,6	10,5	132,9	372,3
	2050	236,1	21,6	11,9	128,0	374,6
Bolívar	2020	269,5	31,9	22,2	126,3	442,4
	2050	271,6	29,4	23,3	127,8	443,3
Caiza D	2020	251,9	34,5	10,6	108,6	412,1
	2050	256,9	33,7	12,0	103,1	409,6
Calacoto	2020	262,6	22,7	21,5	115,3	418,2
	2050	264,4	24,9	23,5	115,7	419,3
Callapa	2020	262,6	22,7	21,5	115,3	418,2
	2050	264,4	24,9	23,5	115,7	419,3
Camargo	2020	170,2	3,6	8,1	162,6	353,1
	2050	173,8	3,6	8,8	152,1	347,3
Capinota	2020	303,2	28,5	20,2	177,4	531,9
	2050	324,2	26,9	20,0	175,2	549,9
Caripuyo	2020	311,0	22,3	17,5	177,6	525,1
	2050	309,4	21,0	19,6	179,7	521,8
Chaquí	2020	298,4	27,5	18,6	195,0	538,8
	2050	304,8	26,0	19,9	189,5	538,5

Continúa

Localidad	Año	E-M	A-J	J-S	O-D	ANUAL
Charaña	2020	213,0	13,3	11,0	69,5	302,7
	2050	214,5	15,3	10,8	69,7	303,5
Chayanta	2020	311,0	22,3	17,5	177,6	525,1
	2050	309,4	21,0	19,6	179,7	521,8
Corque	2020	179,2	7,3	9,6	101,6	297,3
	2050	175,7	10,3	11,4	92,1	287,6
Culpina	2020	193,2	47,5	5,8	130,5	368,9
	2050	196,5	46,5	6,1	123,2	364,9
Curahuara	2020	224,7	12,2	8,8	64,5	277,3
	2050	218,4	11,1	9,3	65,3	302,5
El Puente	2020	197,6	8,3	6,7	170,7	382,3
	2050	214,8	8,1	6,8	171,3	396,7
Guanay	2020	818,5	343,1	191,6	507,9	1876,9
	2050	844,1	319,4	193,2	505,0	1878,2
Huacareta	2020	480,0	100,2	26,8	317,5	922,9
	2050	492,5	97,3	24,7	270,3	924,5
Huacaya	2020	495,0	133,3	47,3	245,9	941,5
	2050	515,6	130,2	48,8	259,6	948,1
Huayllamarca	2020	179,2	7,3	9,6	101,6	297,3
	2050	175,7	10,3	11,4	92,1	287,6
Incahuasi	2020	193,2	47,5	5,8	130,5	368,9
	2050	196,5	46,5	6,1	123,2	364,9
Ixiamas	2020	759,6	334,6	294,1	579,8	1948,2
	2050	748,6	360,1	290,7	577,6	1938,2
Las Carreras	2020	175,2	14,2	7,6	83,3	280,1
	2050	176,4	13,7	7,8	78,2	276,3
Machareti	2020	367,6	119,6	14,6	231,0	717,3
	2050	370,5	120,3	14,6	229,4	722,3
Mapiri	2020	818,5	343,1	191,6	507,9	1876,9
	2050	844,1	319,4	193,2	505,0	1878,2
Monteagudo	2020	495,0	133,3	47,3	272,2	941,5
	2050	515,6	130,2	48,8	259,6	948,1
Muyupampa	2020	318,4	101,3	31,5	319,1	778,0
	2050	329,2	99,2	32,2	306,0	775,1
Pocoata	2020	311,0	22,3	17,5	177,6	525,1
	2050	309,4	21,0	19,6	179,7	521,8
Porco	2020	234,6	18,0	9,4	124,6	388,1
	2050	242,6	17,7	10,8	120,0	390,0
Poroma	2020	458,2	37,5	32,1	298,6	822,8
	2050	477,8	35,2	34,6	291,7	834,4
Puna	2020	229,1	29,0	22,7	167,1	447,1
	2050	237,3	27,4	27,1	156,5	447,7
San Buenaventura	2020	988,4	507,6	311,4	603,4	2423,3
	2050	1048,4	487,8	266,5	591,5	2413,2
Sacabamba	2020	426,1	49,3	18,3	241,3	734,9
	2050	440,6	46,7	19,0	241,0	745,8
Sacaca	2020	493,2	40,6	22,3	234,4	775,8
	2050	496,7	38,2	21,1	235,1	777,8
San Lorenzo	2020	270,1	32,8	16,3	172,1	498,0
	2050	271,2	32,2	16,8	163,3	490,2
San Lucas	2020	316,9	19,0	19,6	156,2	503,6
	2050	320,1	18,3	20,7	151,6	501,5

Continúa

Localidad	Año	E-M	A-J	J-S	O-D	ANUAL
San Pedro	2020	468,6	49,3	47,1	252,3	821,9
	2050	484,4	45,5	54,4	245,4	833,9
San Pedro de Totora	2020	224,7	12,2	8,8	64,5	277,3
	2050	218,4	11,1	9,3	65,3	302,5
Sicaya	2020	269,5	31,9	22,2	126,3	442,4
	2050	271,6	29,4	23,7	127,8	443,3
Tacacoma	2020	454,1	123,8	51,2	235,2	857,9
	2050	468,3	113,7	57,7	238,1	866,2
Tacobamba	2020	234,6	18,0	9,4	124,6	388,1
	2050	242,6	17,7	10,8	120,0	390,0
Tarata	2020	478,1	52,3	15,9	225,8	778,8
	2050	494,8	49,9	16,2	223,8	793,4
Tacopaya	2020	269,5	31,9	22,2	126,3	442,4
	2050	271,6	29,4	23,3	127,8	443,3
Tapacarí	2020	269,5	31,9	22,2	126,3	442,4
	2050	271,6	29,4	23,7	127,8	443,3
Teoponte	2020	855,4	354,6	220,7	551,4	1965,1
	2050	843,0	381,7	218,2	549,3	1955,0
Tipuani	2020	855,4	354,6	220,7	551,4	1965,1
	2050	843,0	381,7	218,2	549,3	1955,0
Tinguipaya	2020	360,1	26,6	10,9	126,1	518,6
	2050	357,2	25,9	10,4	126,2	514,6
Tomave	2020	234,6	18,0	9,4	124,6	388,1
	2050	242,6	17,7	10,8	120,0	390,0
ToroToro	2020	537,8	59,5	29,3	340,5	958,6
	2050	559,5	53,8	31,0	336,4	965,9
Urmiri	2020	234,6	18,0	9,4	124,6	388,1
	2050	242,6	17,7	10,8	120,0	390,0
Uriondo	2020	270,1	32,8	16,3	172,1	498,0
	2050	271,2	32,2	16,8	163,3	490,2
Villa Abecia	2020	159,3	9,9	6,7	62,7	241,9
	2050	161,0	9,6	7,0	59,4	239,5
Yocalla	2020	234,6	18,0	9,4	124,6	388,1
	2050	242,6	17,7	10,8	120,0	390,0
Yunchará	2020	197,6	8,3	6,7	170,7	382,3
	2050	214,8	8,1	6,8	171,3	396,7

Precipitación



Norte Paceño Tropical

Los Mapas 1 y 3, muestran que esta zona (tanto en un futuro cercano como hasta mediados de siglo) no presentará cambios significativos en la precipitación anual, aunque se observa una tendencia no significativa a la reducción. Sin embargo, estos valores se encuentran en los rangos de la variabilidad normal interanual, por lo que no permiten inferir de manera concluyente cambios significativos.

En el análisis trimestral, de enero a marzo (Mapas 2 y 4), ninguna de las estaciones muestra un cambio importante con relación a la precipitación actual en ninguno de las series consideradas (2020 y 2050), aunque existe una tendencia al descenso con excepción de Apolo con ascensos no significativos. El impacto no será alto en comparación al régimen actual, considerando que la lluvia en este trimestre es abundante y que porcentajes bajos no cambiarán la situación actual.

La situación cambia entre abril y octubre (Mapas 2 y 4) y se intensificará desde el 2020 al 2050. El análisis muestra que la lluvia invernal se reduciría en Apolo compensando levemente la mayor cantidad de lluvia de inicio de año. San Buenaventura, en cambio, presenta una tendencia a reducirse en invierno, lo que podría incrementar las sequías en épocas calientes. La precipitación

tiende a aumentar en los municipios de Larecaja, aunque en Guanay los cambios en la precipitación se compensarían en el semestre, quizás por una leve concentración de la lluvia. De todas maneras, considerando que esta época es seca, cambios porcentuales reducidos sugieren cambios leves con relación a la época actual, a excepción de San Buenaventura que podría enfrentar sequías entre julio y septiembre.

Los Mapas 2 y 4 muestran que la zona presentará reducciones de su precipitación en el periodo octubre-diciembre, especialmente en los municipios de Larecaja. Esta situación podría provocar impactos de consideración y producir déficits hídricos importantes porque esta época presenta mayor demanda atmosférica de vapor de agua, debido a que las temperaturas suben al acercarse el verano, pero el periodo de lluvias todavía no se inicia. Si en el futuro esta zona presenta menos precipitación que la actual, el déficit hídrico podría ser mayor, incrementando el riesgo de enfrentar sequías en forma regular. Solamente la estación de mayor altura que es Tacacoma muestra un incremento en la precipitación entre octubre y diciembre, lo que probablemente, incidirá en otros mecanismos de precipitación.

Dada la importancia de conocer la variabilidad de la precipitación esperada, se estudiará este parámetro en dos estaciones representativas de la zona con un registro de partida para un periodo de 30 años de comportamiento homogéneo, tal como se muestra en el Capítulo 2.

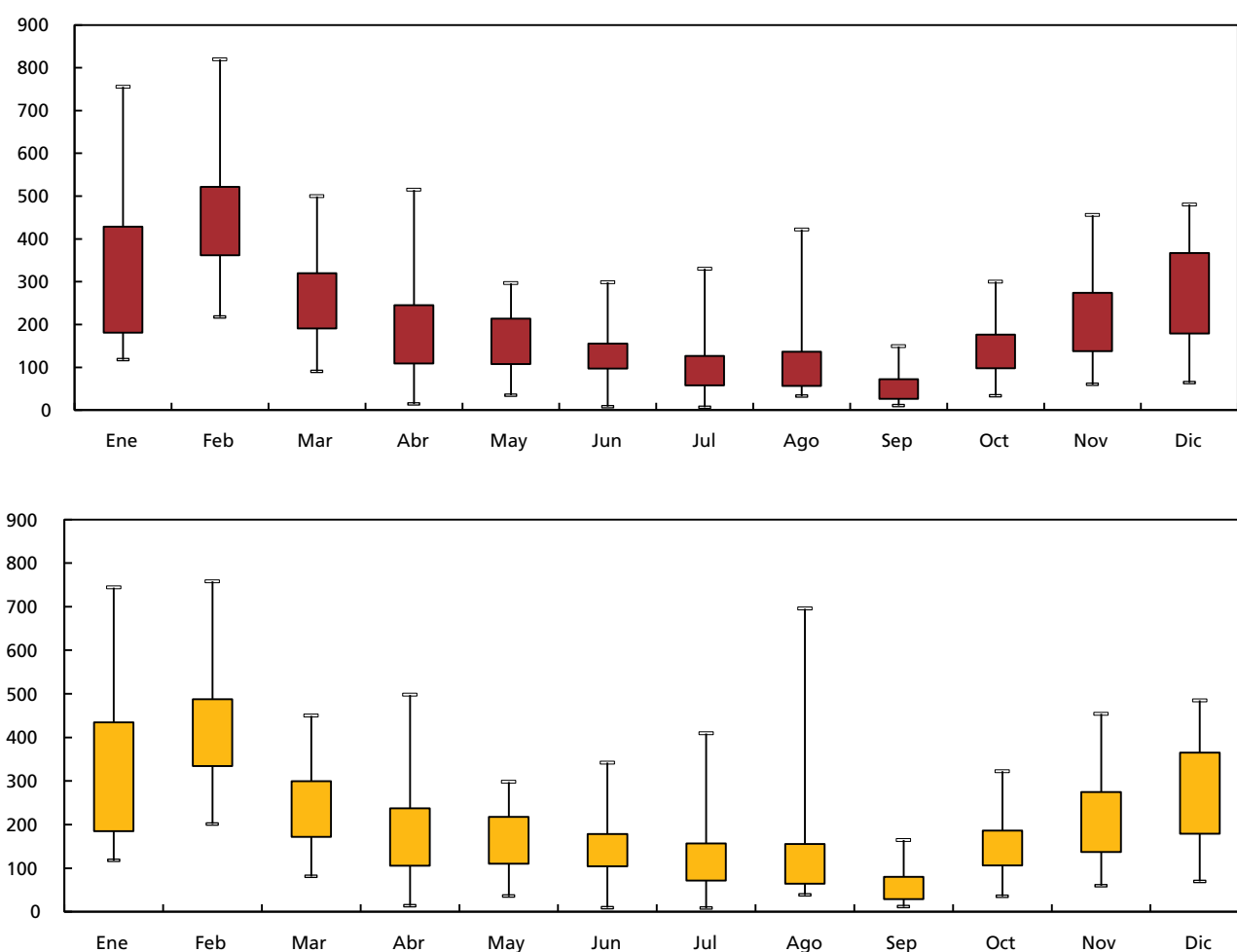
Las magnitudes de precipitación mensual son similares a las actuales, a excepción de los extremos, pero sobresale el hecho de que en Norte Paceño Tropical, especialmente en las zonas más bajas, se pueden esperar precipitaciones de gran magnitud a inicio del año, especialmente durante febrero (más de 600 mm por mes) y

hasta abril aunque su frecuencia no será elevada (Figura 5.1.). Esto implica alta probabilidad de inundaciones mayores a las actuales que deben ser consideradas para acciones de adaptación. En algunos años la precipitación invernal podría presentar magnitudes elevadas, pero su frecuencia disminuiría a mediados de siglo.

En el caso de las áreas con mayor altitud de la mancomunidad, también se podrían recibir fuertes precipitaciones durante los meses de inicio de año, y este efecto se extendería hasta marzo. La lluvia de invierno en estas zonas no tendrá

Figura 5.1.

Dispersión interanual representada en boxplots de los registros de precipitación mensual para 2020 (arriba) y 2050 (abajo) para San Buenaventura (Estación de referencia en Rurrenabaque).

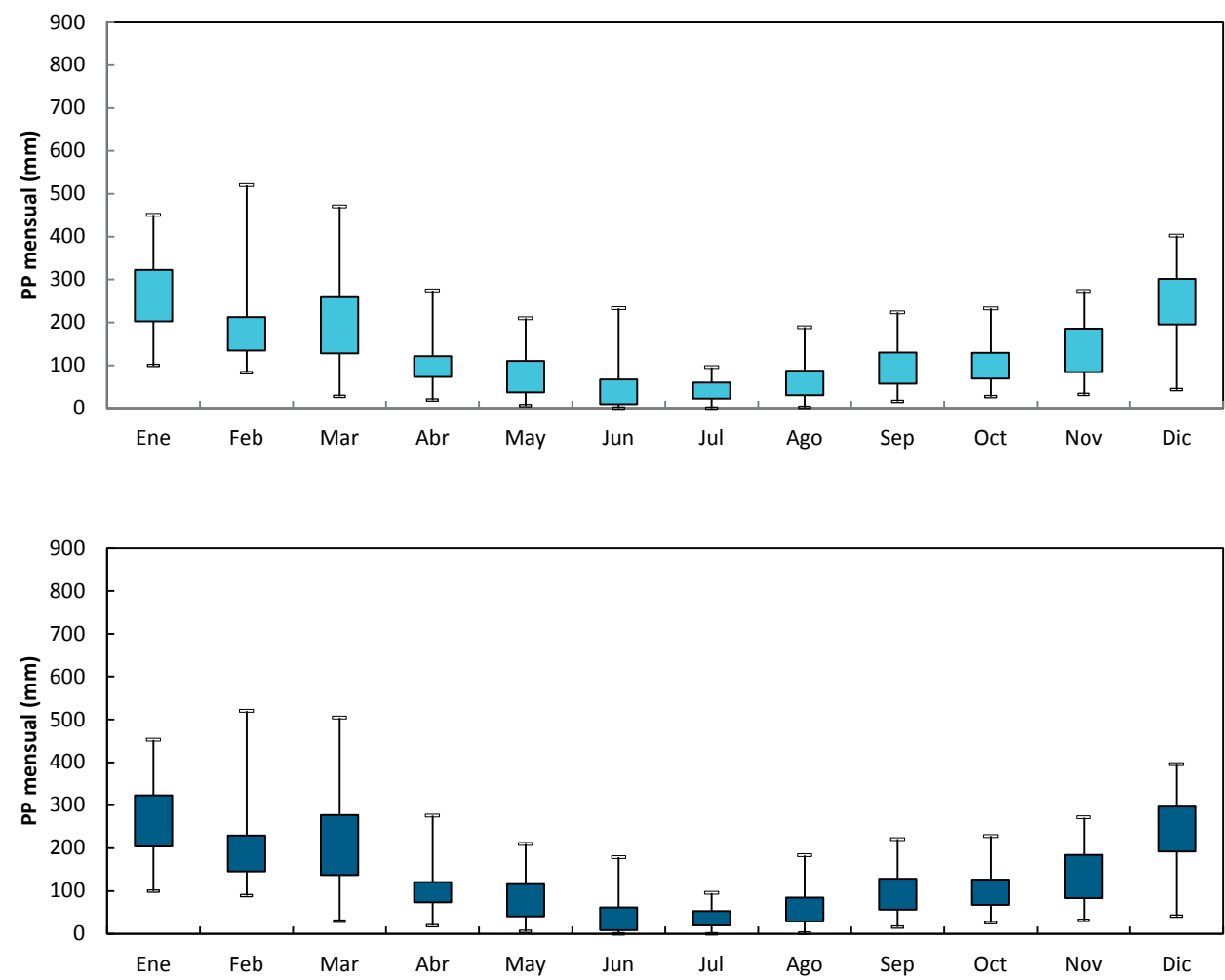


eventos de mucha intensidad, aunque continuarán ocurriendo en el futuro (Figura 5.2).

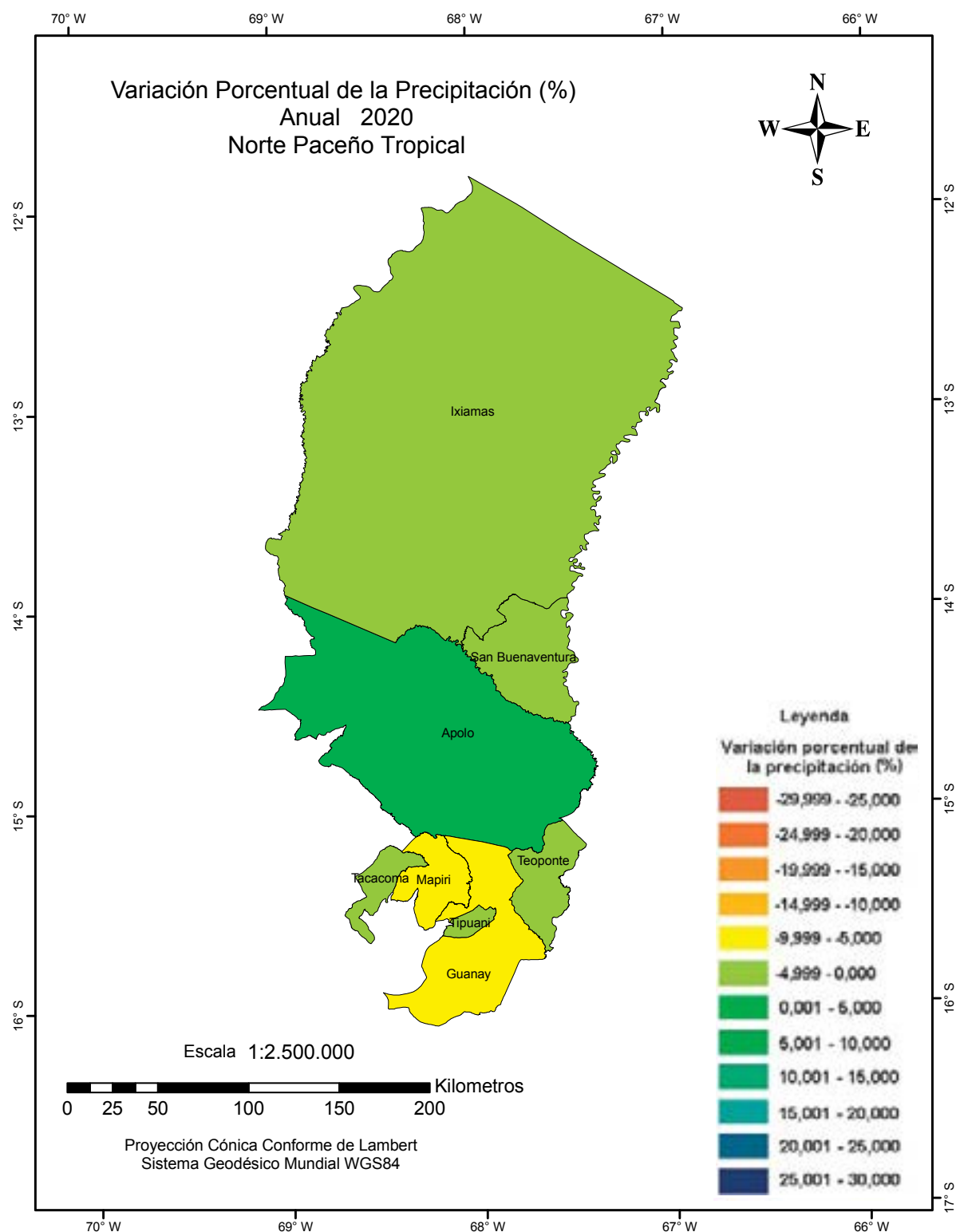
estaciones existe la probabilidad de enfrentar periodos muy secos, lo cual afectará con cierta periodicidad el ecosistema de la zona.

A pesar de enfrentar fuertes inundaciones en verano y lluvias moderadas en invierno, en ambas

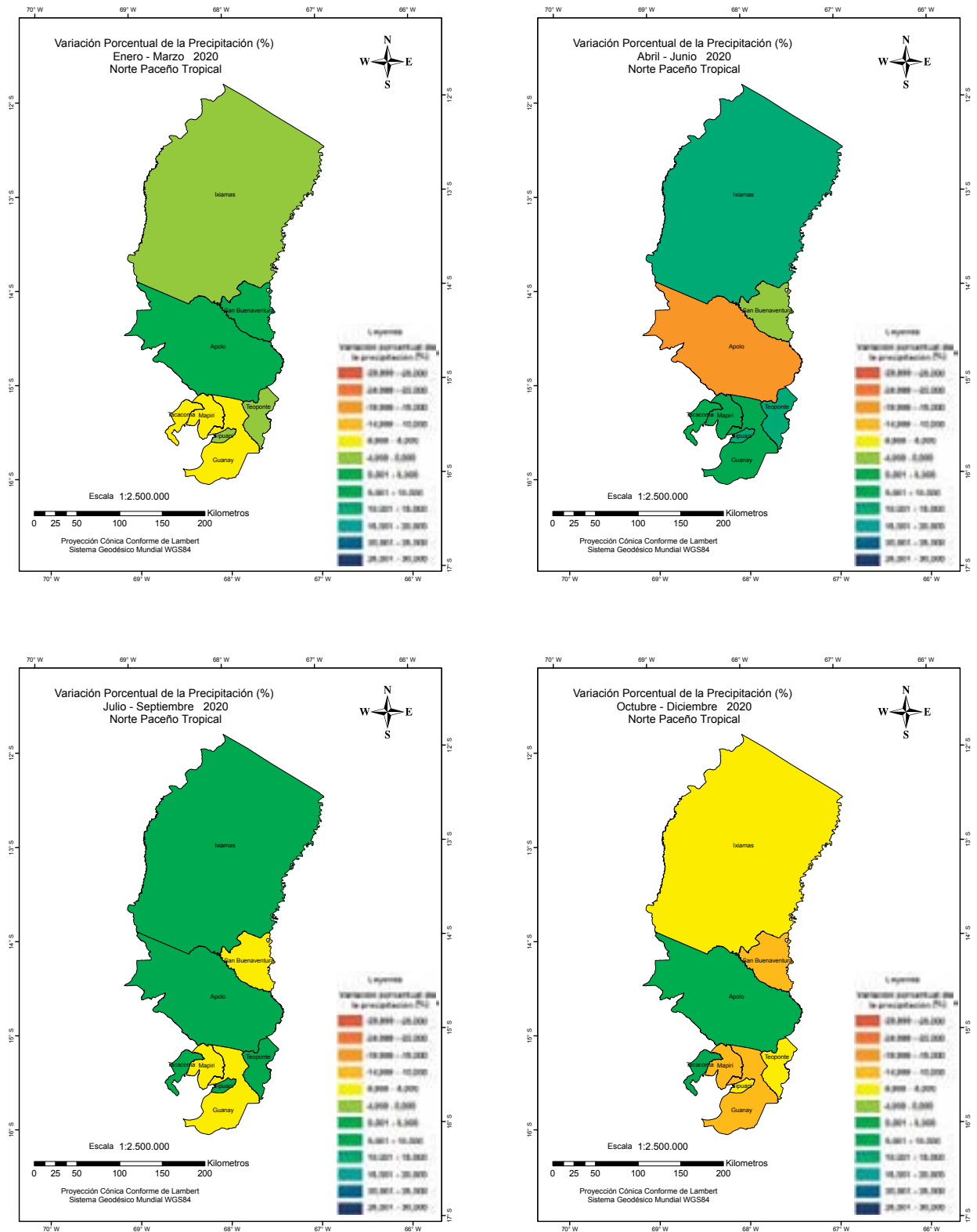
Figura 5.2.
Dispersión interanual representada en boxplots de los registros de precipitación mensual en Apolo para 2020 (arriba) y 2050 (abajo). Estación de referencia en Sapecho.



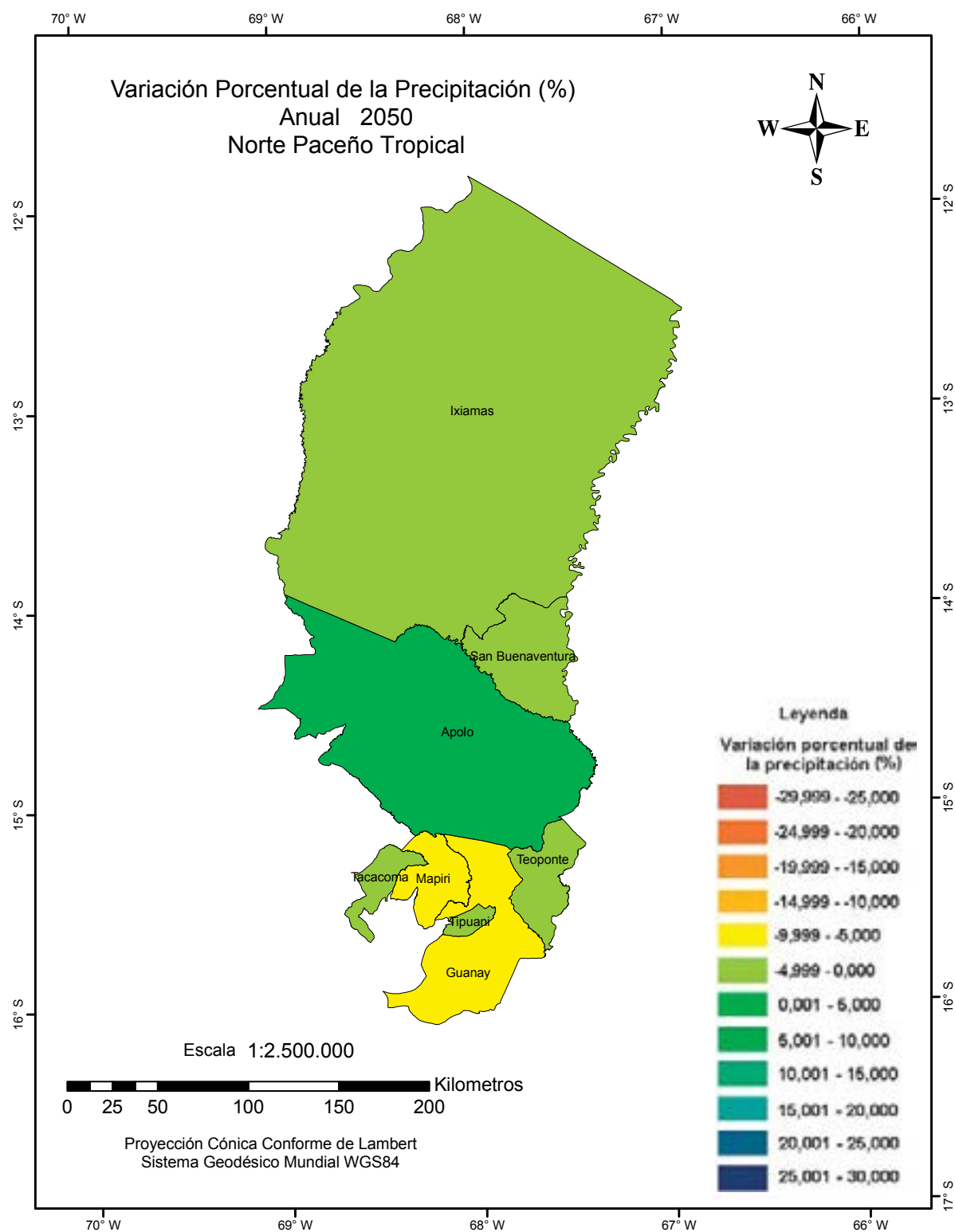
Mapa 5.1.



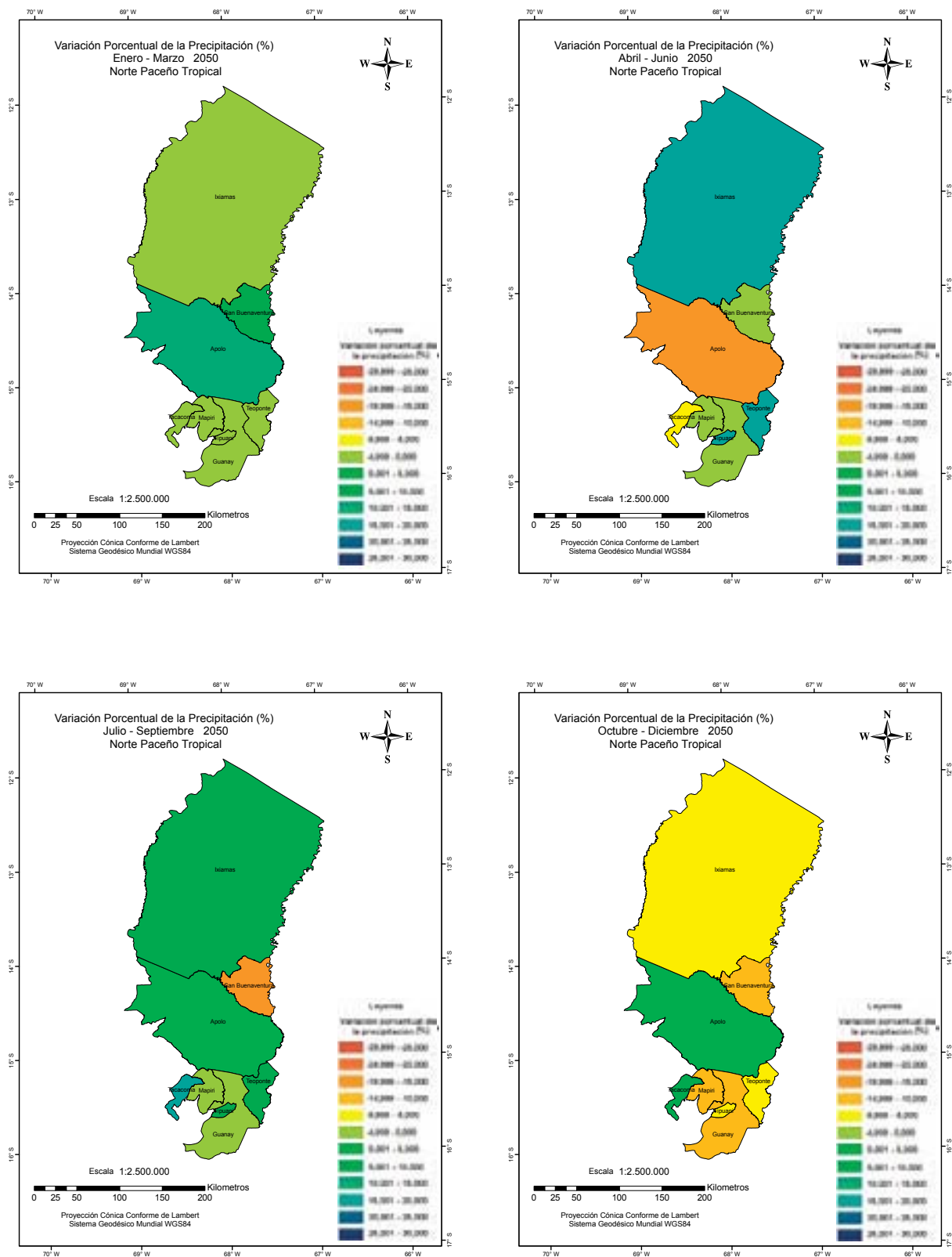
Mapa 5.2.
Variación porcentual de la precipitación por trimestres en 2020. Norte Paceño Tropical



Mapa 5.3.



Mapa 5.4.
Variación porcentual de la precipitación por trimestre 2050. Norte Paceño Tropical





Norte Potosí

Norte Potosí presenta una formación de puna y valles altos interandinos con fuerte vocación agrícola, dependientes de las condiciones del clima predominante; la disponibilidad de agua depende de las precipitaciones y de la nieve invernal existente. Esta zona muestra alto nivel de disección con variación altitudinal entre municipios, las que varían entre los 2.700 y los 3.900 msnm con características variables tanto de paisaje como de ecosistemas.

Los registros anuales muestran una reducción de la cantidad de lluvia, en especial en los municipios de altura y que varía levemente hasta el 2050 (Mapas 5 y 7). El porcentaje de disminución se encuentra dentro del rango de variabilidad habitual, por lo que no es posible determinar cambios de precipitación en los valores anuales.

El análisis trimestral muestra diferencias que requieren ser analizadas. Entre enero y marzo, (Mapas 6 y 8) solamente Acasio y Toro Toro registrarían variaciones significativas hacia un incremento en su precipitación que aumentan hacia 2050, lo que implica mayor probabilidad de inundaciones. Las restantes estaciones que coincidentemente son las de mayor altitud, muestran tendencias descendentes en el inicio del año, las que, sin embargo, no son significativas.

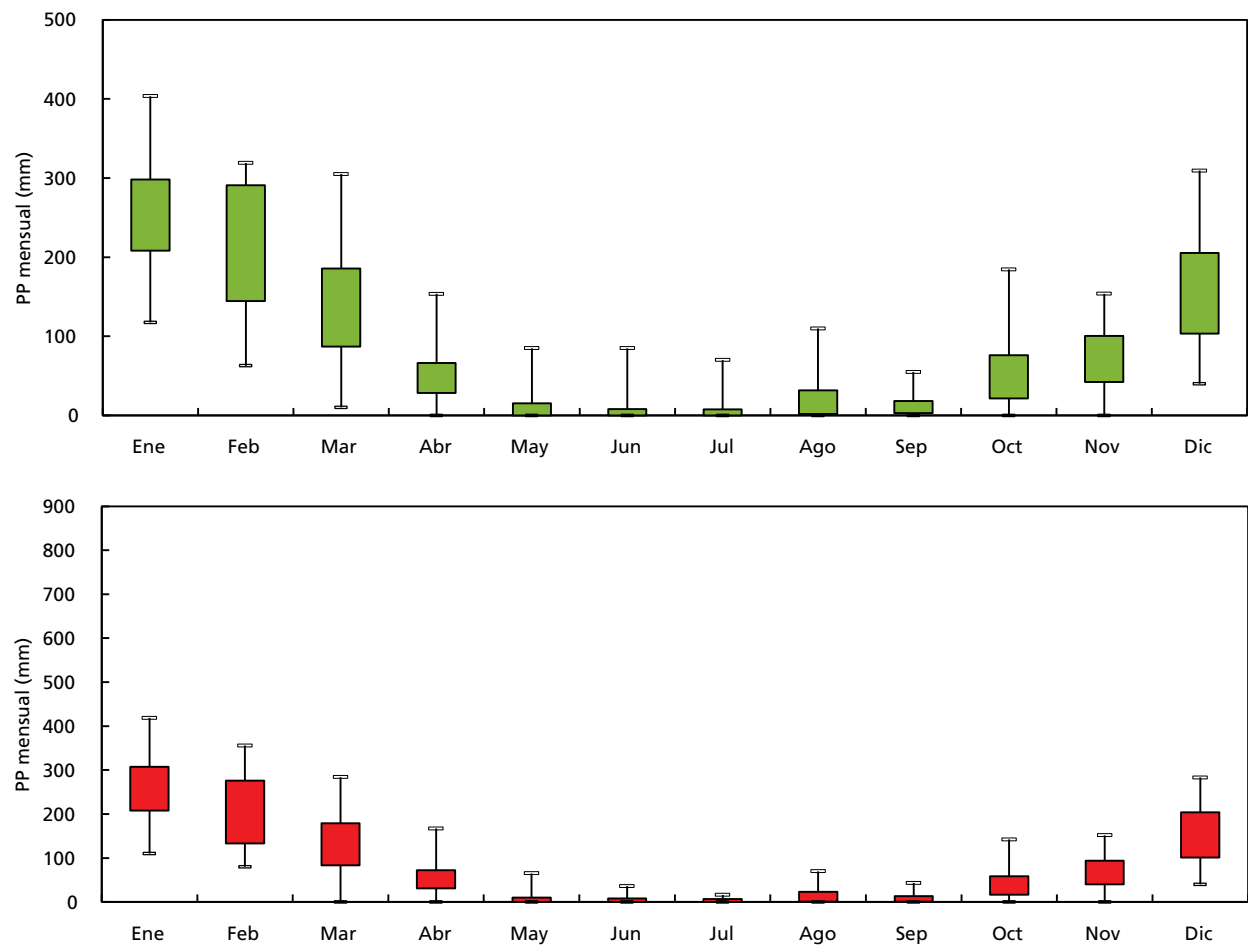
Las variaciones porcentuales de la precipitación entre abril y junio (Mapas 6 y 8) son mayores con tendencia a reducirse, lo que implica un corte repentino al finalizar la época de lluvias; mientras que en las estaciones de menor altitud, la época de lluvias tiende a extenderse levemente. En los municipios de mayor altitud, las reducciones podrían afectar la producción agrícola.

Entre julio y septiembre (Mapas 6 y 8) la situación parece estabilizarse a situaciones similares a las actuales, aunque San Pedro y Acasio mostrarían reducciones significativas a su ya reducida precipitación. Estos meses en el futuro, continuarán o serán más secos, lo que debe considerarse para acciones de adaptación y de manejo de amenazas climáticas.

A futuro, el inicio de la época de lluvias muestra retraso, pues entre octubre y diciembre (Mapas 6 y 8) las estaciones presentan tendencias al descenso de su precipitación, intensificándose al 2050.

La variabilidad mensual fue analizada para las dos estaciones con mejor registro de partida que se encuentran en la zona, que son las estaciones de Acasio y San Pedro de Buenavista, tal como lo muestran las Figuras 5.3 y 5.4.

Figura 5.3.
Dispersión interanual de la precipitación mensual en Acasio, representada en boxplots para 2020 (arriba) y 2050 (abajo).

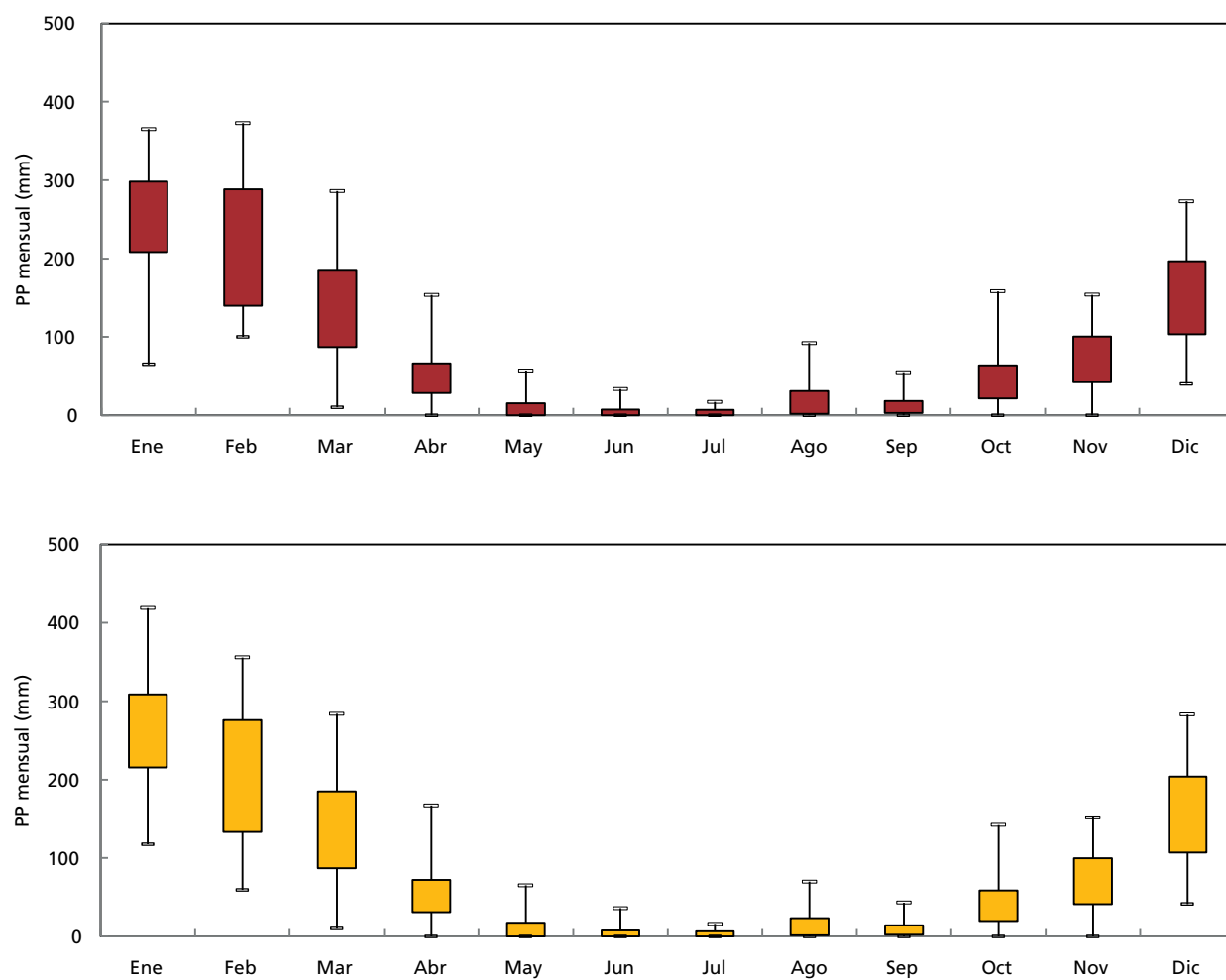


La precipitación en esta zona se concentra entre los meses de diciembre y marzo, existiendo la alta probabilidad de intensas precipitaciones en verano, así como años muy secos en invierno, especialmente desde marzo. A partir de este mes, existe alta probabilidad de enfrentar años secos

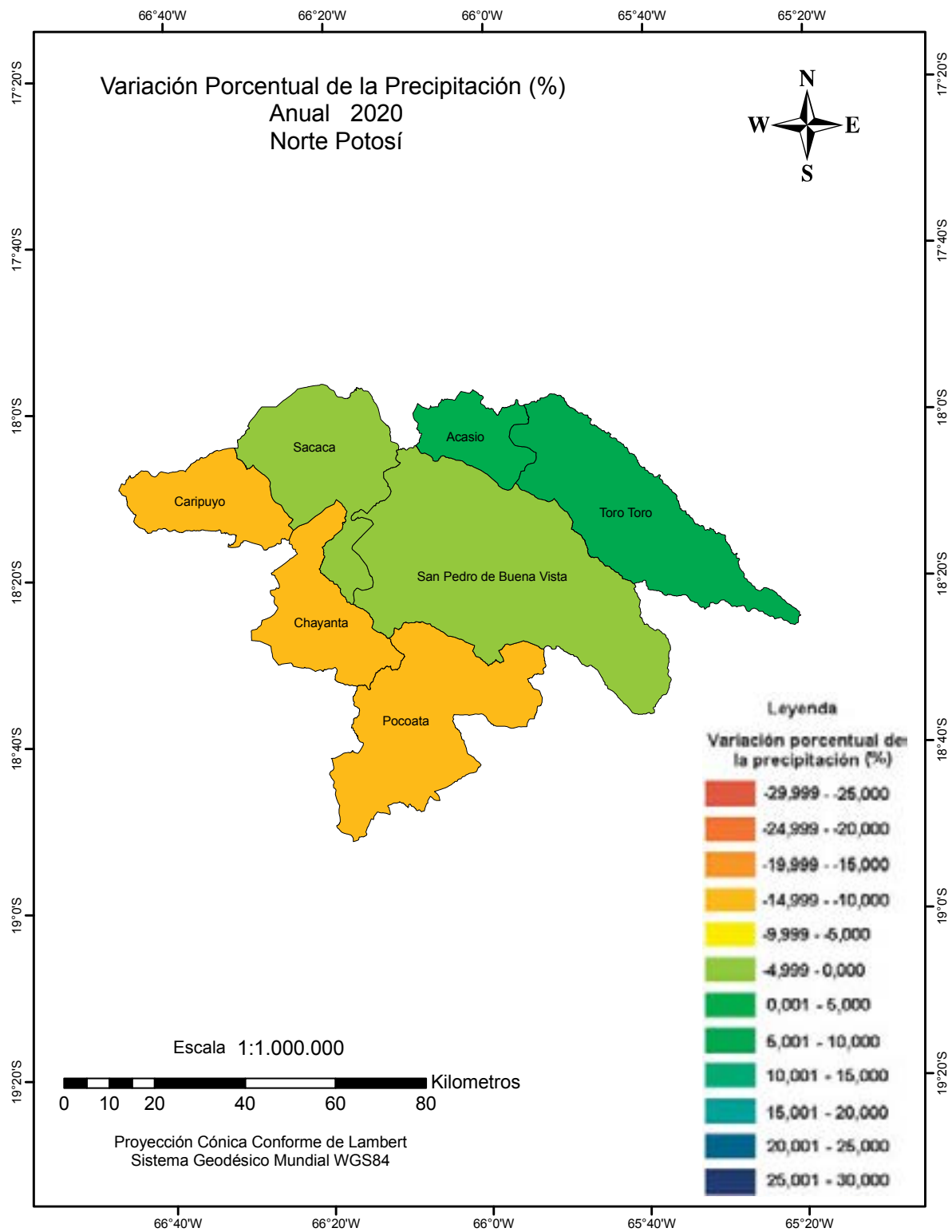
hasta septiembre. Al inicio de la época de lluvias existe baja probabilidad de ocurrencia, por lo que se deberían establecer sistemas de riego por lo menos deficitario, que garanticen la fase inicial de los cultivos.

Figura 5.4.

Dispersión interanual de la precipitación mensual en San Pedro de Buenavista, representada en boxplots para 2020 (arriba) y 2050 (abajo).

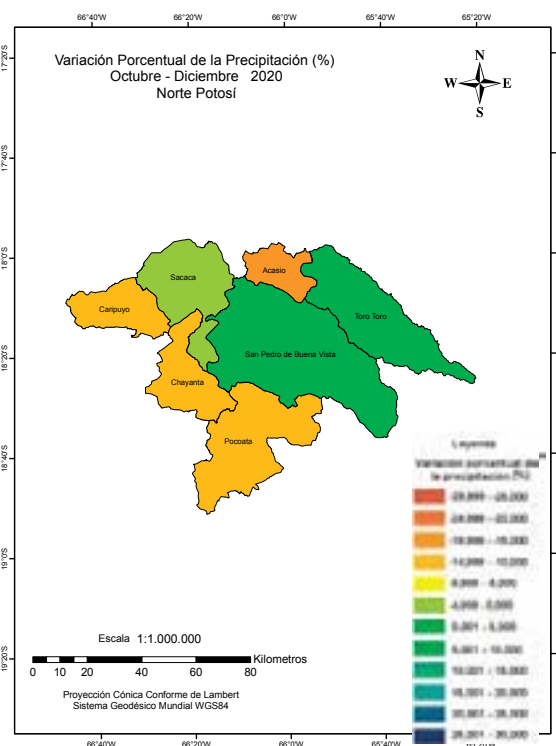
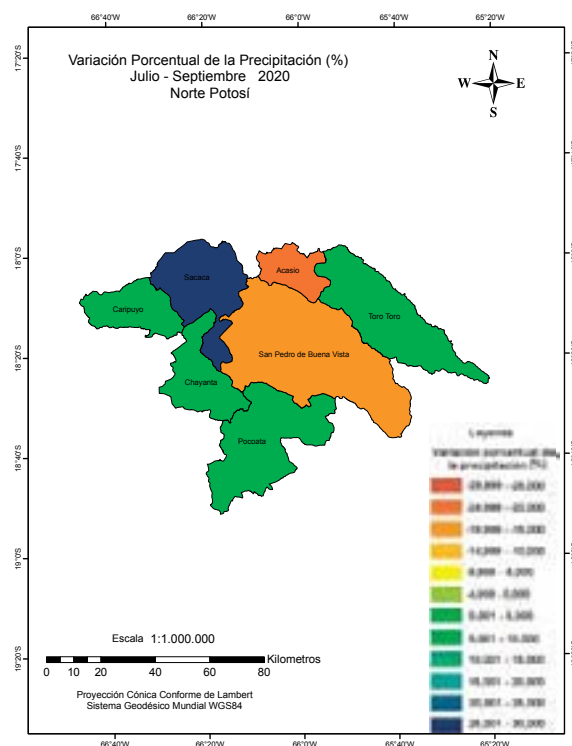
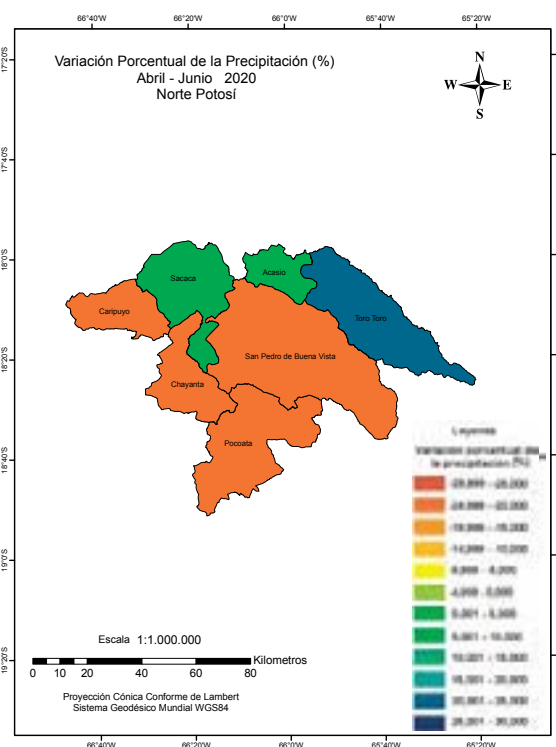
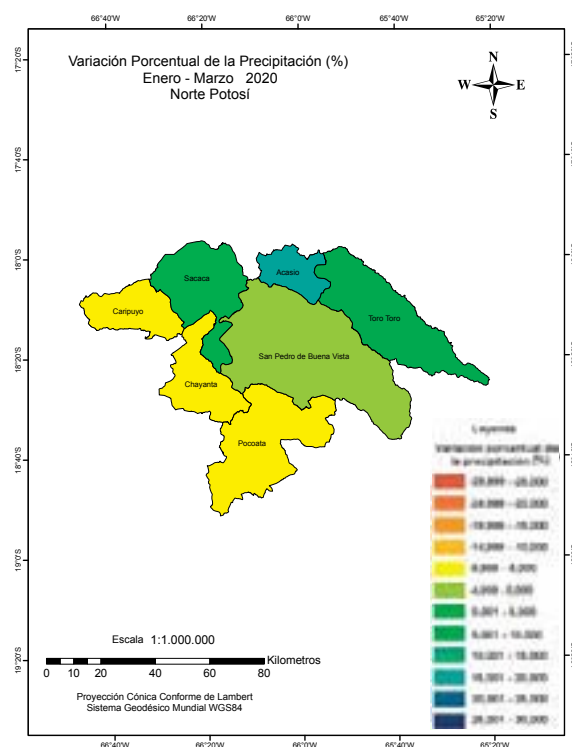


Mapa 5.5

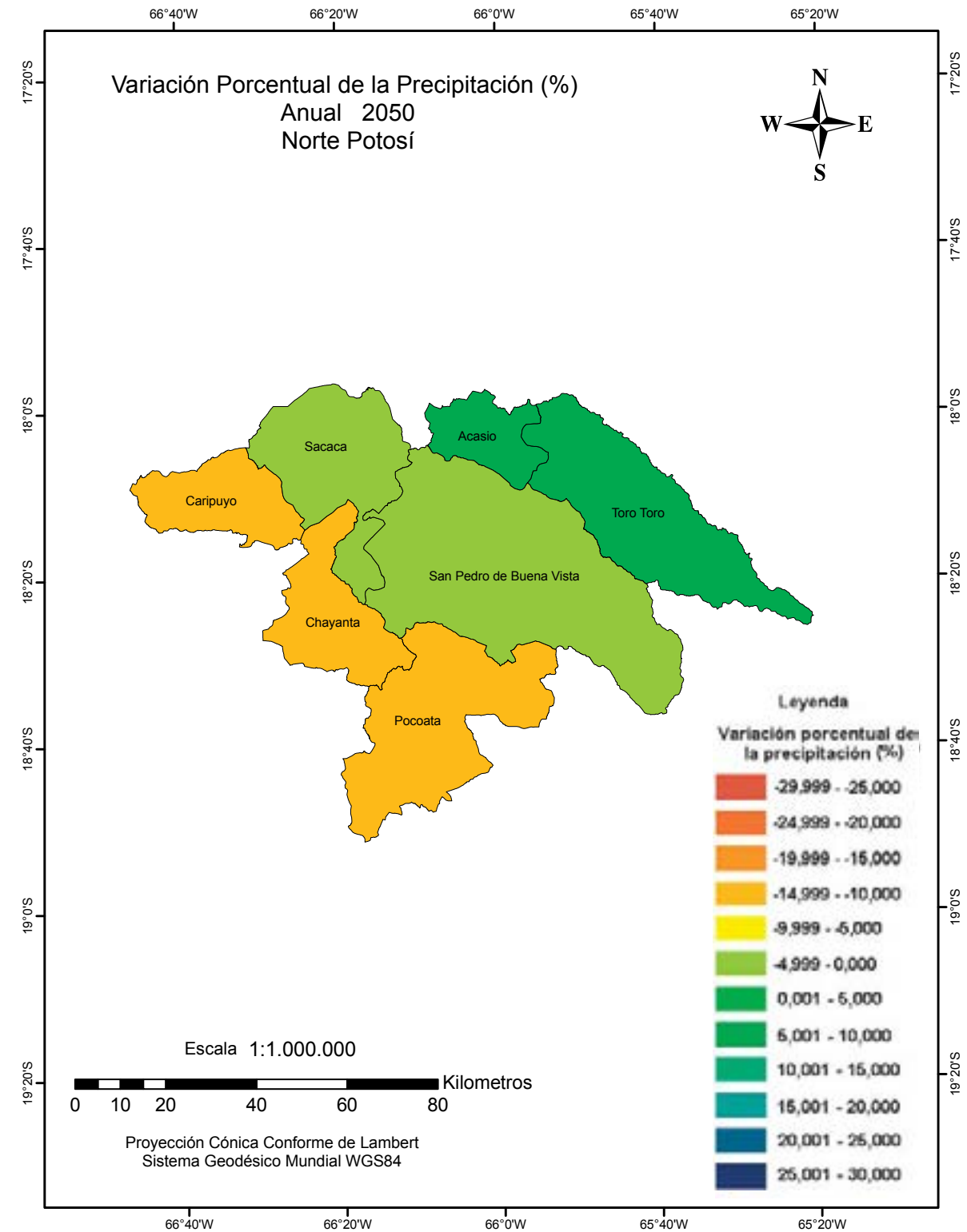


Mapa 5.6.

Variación porcentual de la precipitación por trimestre en 2020. Norte Potosí

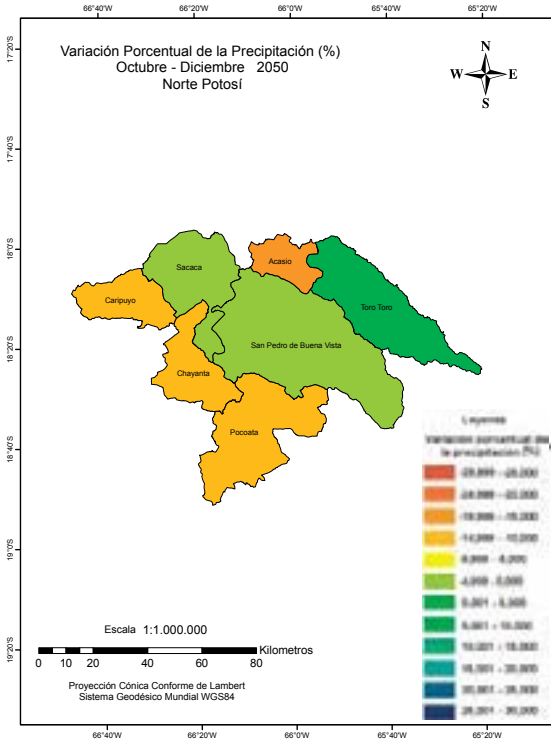
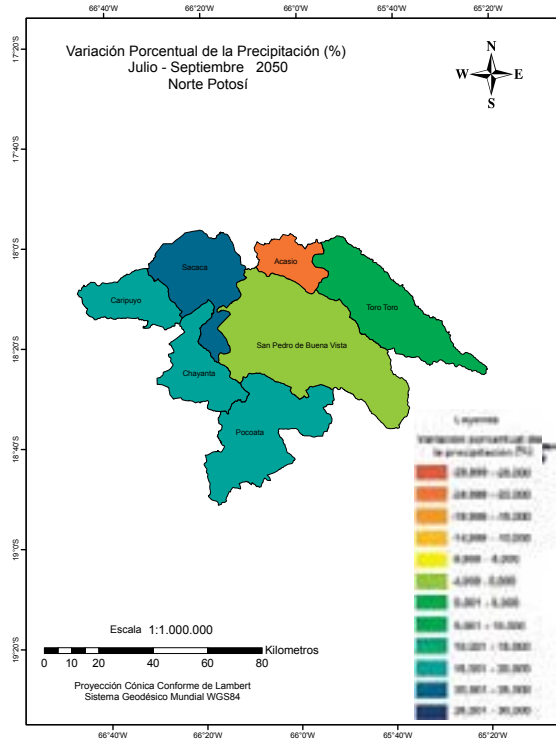
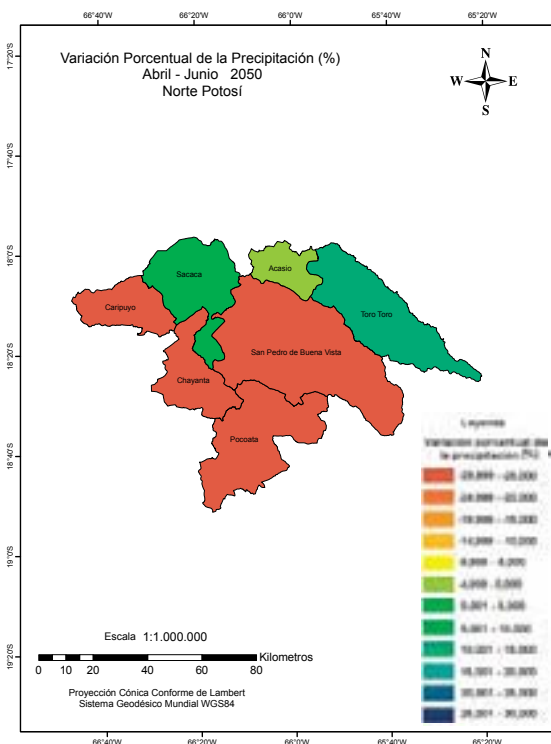
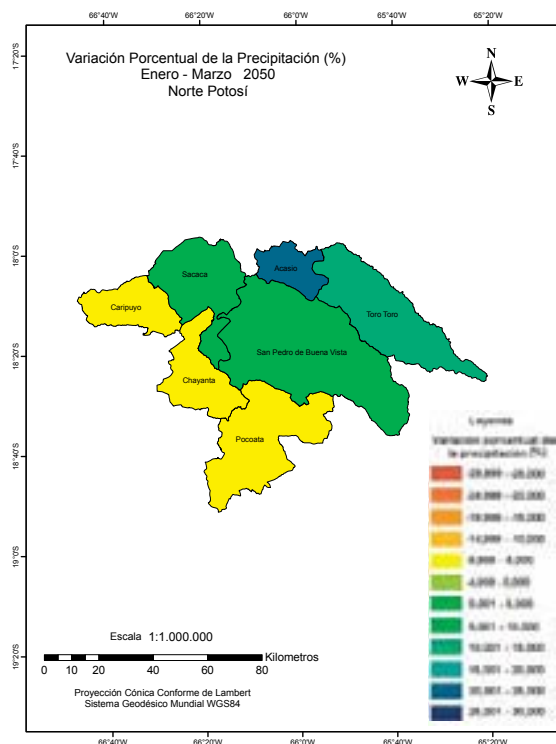


Mapa 5.7.



Mapa 5.8.

Variación porcentual de la precipitación por trimestre en 2050. Norte Potosí





Aymaras Sin Fronteras

(zona altiplánica)

La zona altiplánica muestra que la precipitación anual descenderá en el futuro, probablemente por su ubicación en el Oeste del país que está más expuesta a las corrientes de aire seco que provienen del océano Pacífico. Este proceso de reducción ocurre en todas las estaciones de la zona (Mapas 9 y 11) y de manera más pronunciada en las estaciones situadas más al Sur. También se observa que esta tendencia se incrementará levemente hacia mediados de siglo, lo que podría provocar situaciones de mayor estrés hídrico en zonas con déficit de precipitación.

La reducción de la precipitación no es significativa al inicio del año (Mapas 10 y 12). Sin embargo, existen tendencias marcadas a la reducción en los municipios del Sur.

Entre abril y junio (Mapas 10 y 12), especialmente al 2020, el régimen de lluvias se reducirá en una época todavía caliente. Por la baja cobertura de nubes, es posible la presencia de heladas radiativas tempranas con mayor frecuencia. Sin embargo, el proceso parece estabilizarse en el futuro lejano y las lluvias se incrementarían nuevamente, probablemente esto se deba a una estabilidad del anticiclón del

Pacífico, lo cual reduciría su influencia negativa sobre la zona.

A futuro, (Mapas 10 y 12), la precipitación podría incrementarse en la primavera, probablemente por una mayor presencia de masas de aire frío que provocarían nevadas con cierta frecuencia. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que actualmente la cantidad de precipitación es muy baja, por lo que los cambios porcentuales incluso elevados no significan ascensos de magnitud.

Un impacto preocupante para esta zona se muestra al inicio de la época de lluvias (Mapas 10 y 12), pues en todos los casos se observa una reducción en la precipitación. Siendo un área dependiente de la agricultura y ganadería a secano, el retraso de la época de lluvias provocará siembras tardías. Si se toma en cuenta que la estación de lluvias podría concluir antes y que las heladas podrían iniciarse más temprano, el riesgo en los cultivos a secano se incrementaría.

La variabilidad mensual fue analizada para las dos estaciones con mejor registro de partida que se encuentran en la zona: Charaña y Curahuara

de Carangas, tal como lo muestran las Figuras 5.5 y 5.6.

La precipitación en el altiplano presenta valores mensuales reducidos, pero llama la atención la probabilidad de enfrentar años con precipitación cercana a cero durante la época de lluvias. Esto significa que el riesgo de sequía en la zona es per-

manente, con menor probabilidad de enfrentar años con inundaciones. El invierno seguirá siendo muy seco, contando solamente con elevada precipitación en agosto de 2020, fundamentalmente por la ocurrencia periódica de nevadas, aunque esto parece que se reducirá a mediados de siglo, aparentemente por un desplazamiento de esos procesos hacia octubre.

Figura 5.5.

Dispersión interanual de precipitación mensual en Charaña, representada en boxplots para 2020 (arriba) y 2050 (abajo).

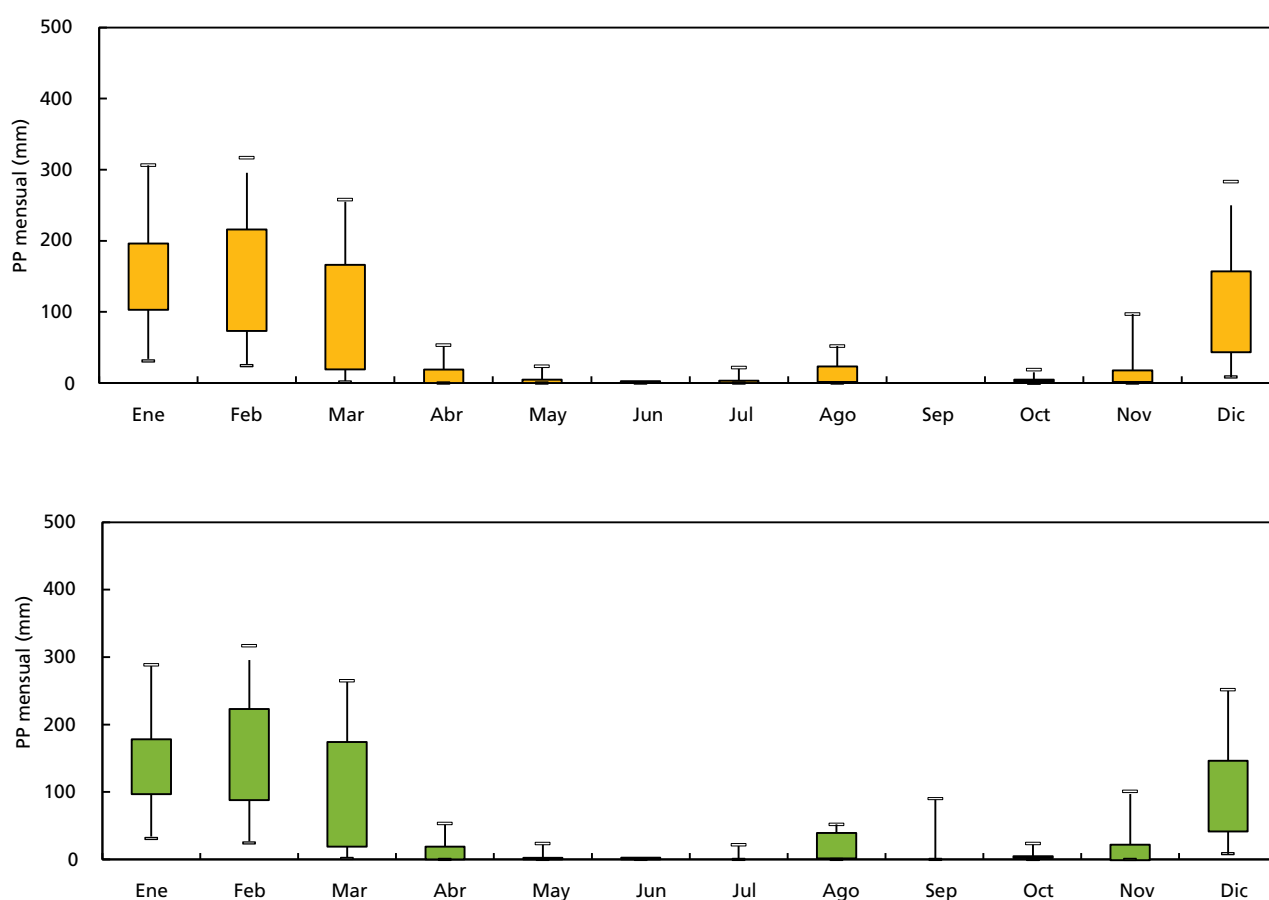
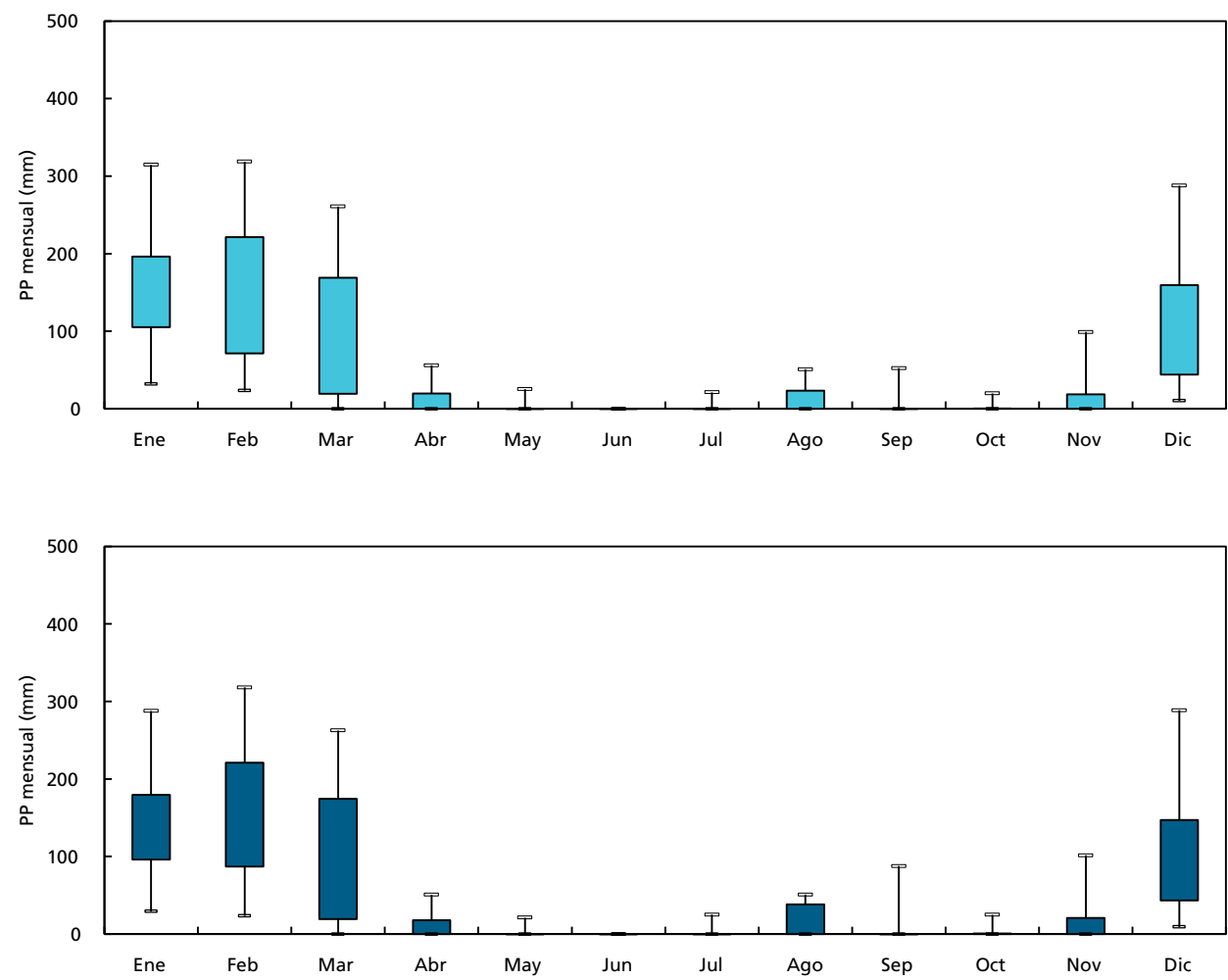
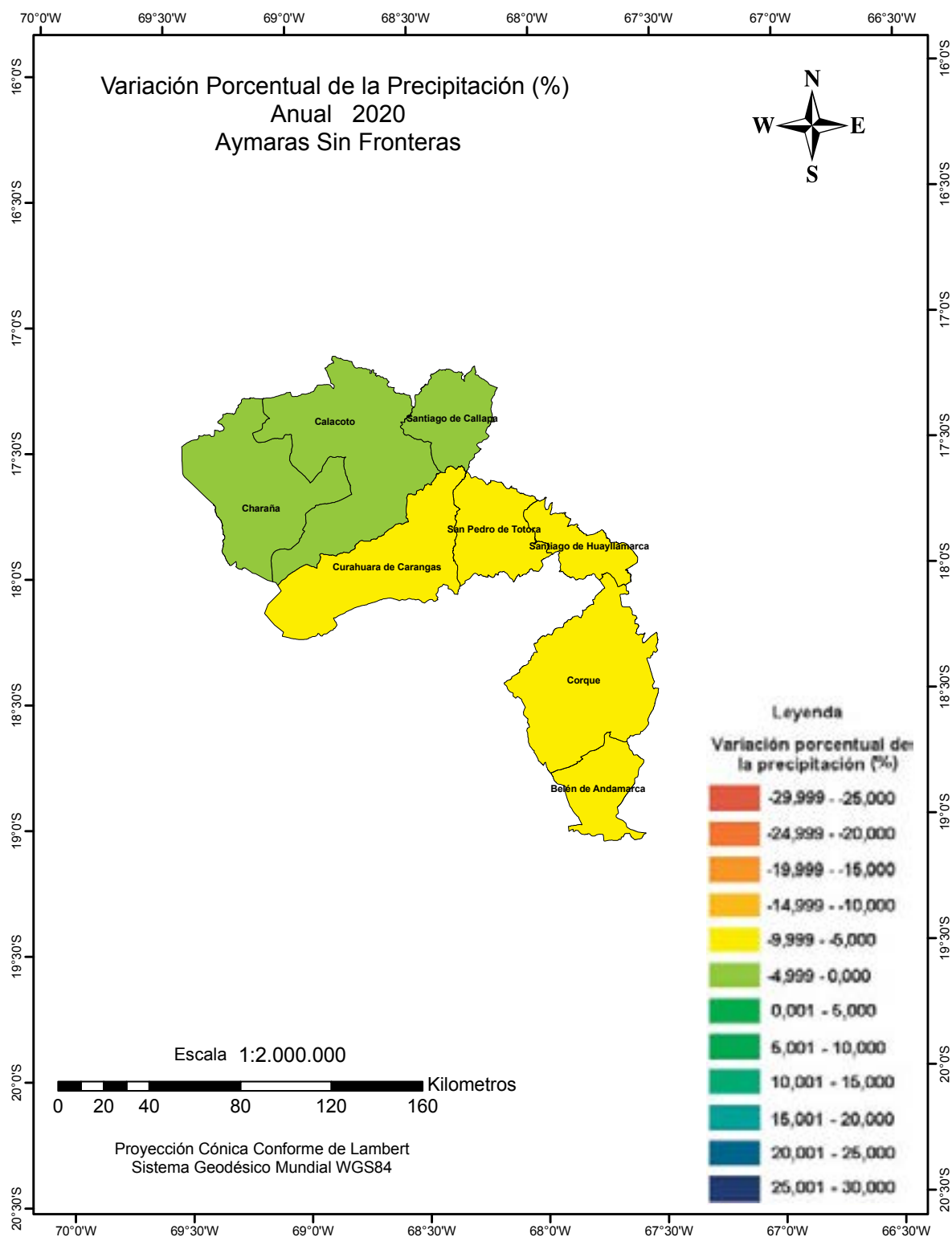


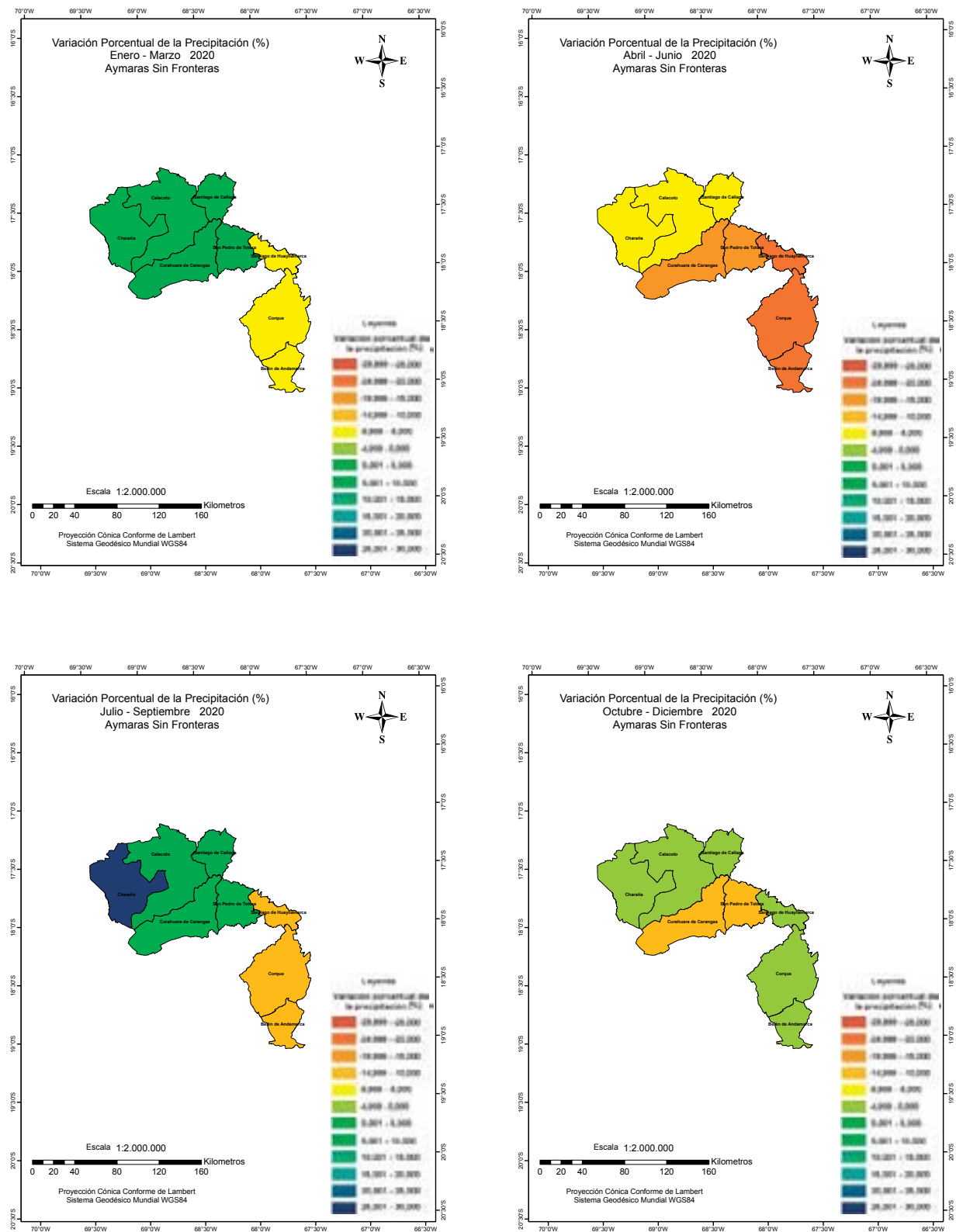
Figura 5.6.
Dispersión interanual representada en boxplots de los registros de precipitación acumulada mensual previstos para 2020 (arriba) y 2050 (abajo) para Curahuara de Carangas.



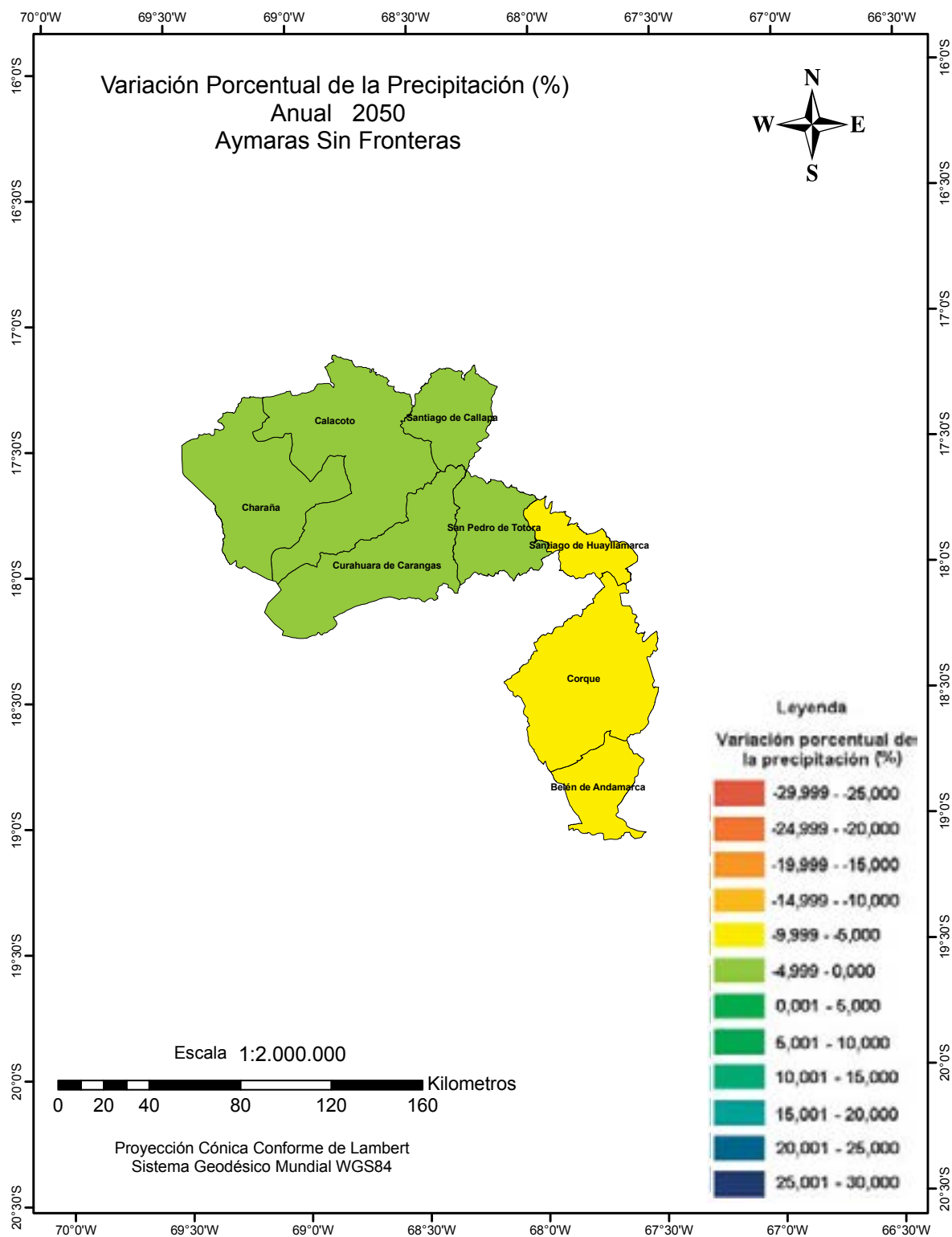
Mapa 5.9.



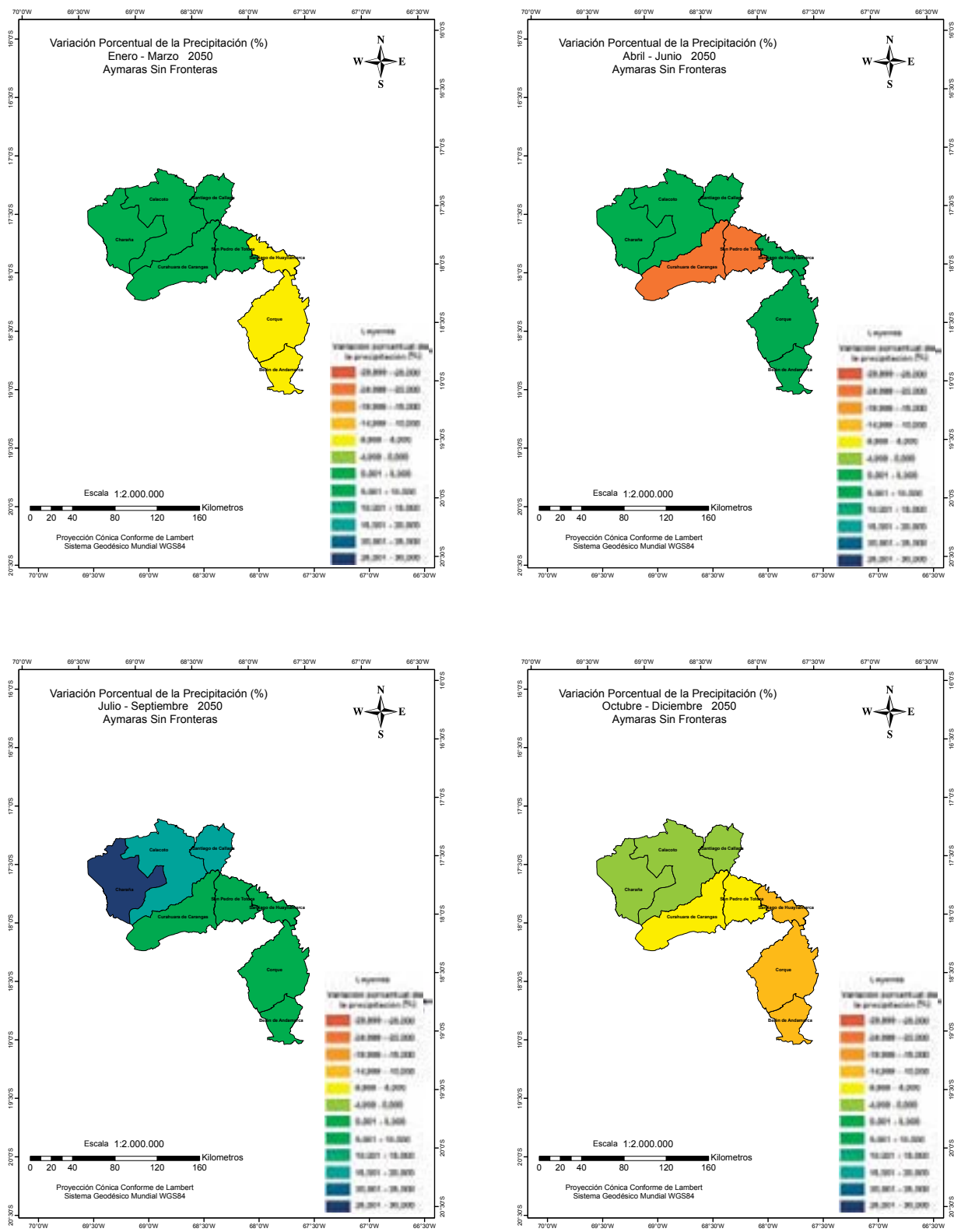
Mapa 5.10.
Variación porcentual de la precipitación por trimestre en 2020. Aymaras Sin Fronteras



Mapa 5.11.



Mapa 5.12.
Variación porcentual de la precipitación por trimestre 2050. Aymaras Sin Fronteras





Gran Centro Potosí

Las variaciones anuales de la precipitación recibida (Mapas 13 y 15) en todos los municipios de Gran Centro de Potosí son muy reducidas, menores que la variabilidad interanual típica de la zona, situación que se prolongará hasta el 2050.

El análisis trimestral muestra que entre enero y marzo (Mapas 14 y 16), es decir en el pico de la estación de lluvias, el régimen de precipitación será muy similar al actual con una leve tendencia al descenso hasta el 2050. Esta situación va cambiando lentamente a medida que avanza el año. De esta forma, entre abril y junio (Mapas 14 y 16), la mayoría de las estaciones presenta un descenso marcado de la precipitación en el 2020 que es mayor al 2050. Se excluyen de este comportamiento las estaciones de Betanzos y Caiza "D" que más bien muestran un ascenso comparativo de su precipitación. En general, es probable que se produzca una reducción del periodo de lluvias con una repentina transición entre la época de lluvias y la época seca.

Entre julio y septiembre (Mapas 14 y 16), la mayoría de las estaciones muestran descensos de lluvia que incrementarán su aridez, pues esos valles presentan temperaturas moderadas (entre 5 °C y 20 °C) por la elevada recepción de radiación solar durante el año. Sin embargo, esto debe

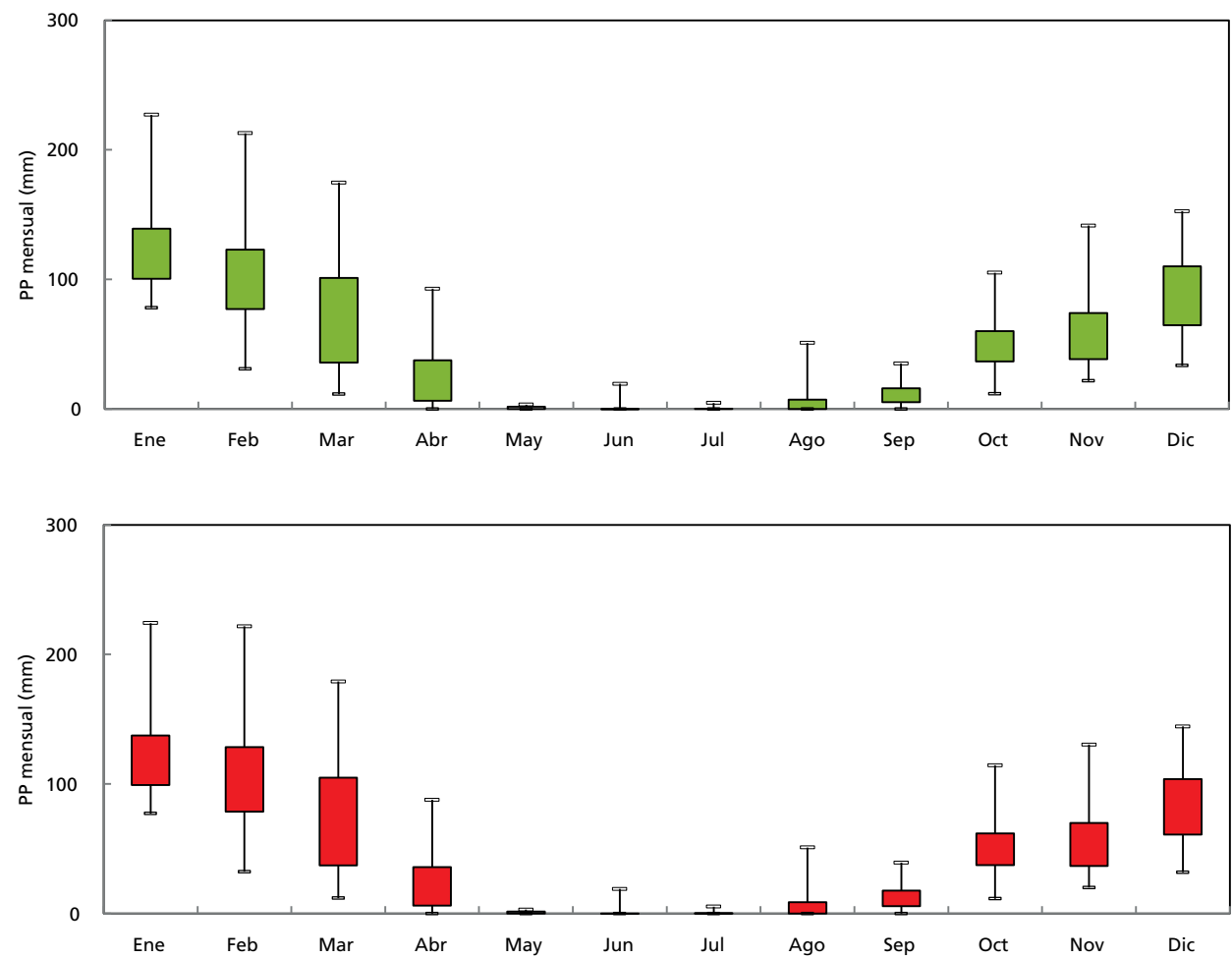
compensarse con evapotranspiración real, la cual será reducida por el menor aporte de agua de lluvia, teniendo como resultado un déficit hídrico climático más o menos permanente.

A diferencia de las otras zonas, ésta no muestra una clara tendencia de descenso al inicio de la época de lluvias que ocurren entre octubre y diciembre (Mapas 14 y 16), sino más bien un aparente incremento en más del 11%, manteniendo este comportamiento hasta 2050, lo cual podría significar un beneficio para la zona, que debe ser analizado a mayor detalle para implementar medidas de adaptación.

La variabilidad mensual fue analizada para las dos estaciones con mejor registro de información de partida que se encuentran en la zona: las estaciones de Chaquí y Yocalla, tal como lo muestran las Figuras 5.7 y 5.8.

Las Figuras 5.7 y 5.8 muestran que la zona no presenta probabilidades de enfrentar años con precipitación cercana a cero durante la época de lluvias pero sí de tener años con muy baja precipitación, especialmente entre febrero y abril, lo que podría afectar el desarrollo de la agricultura en la zona.

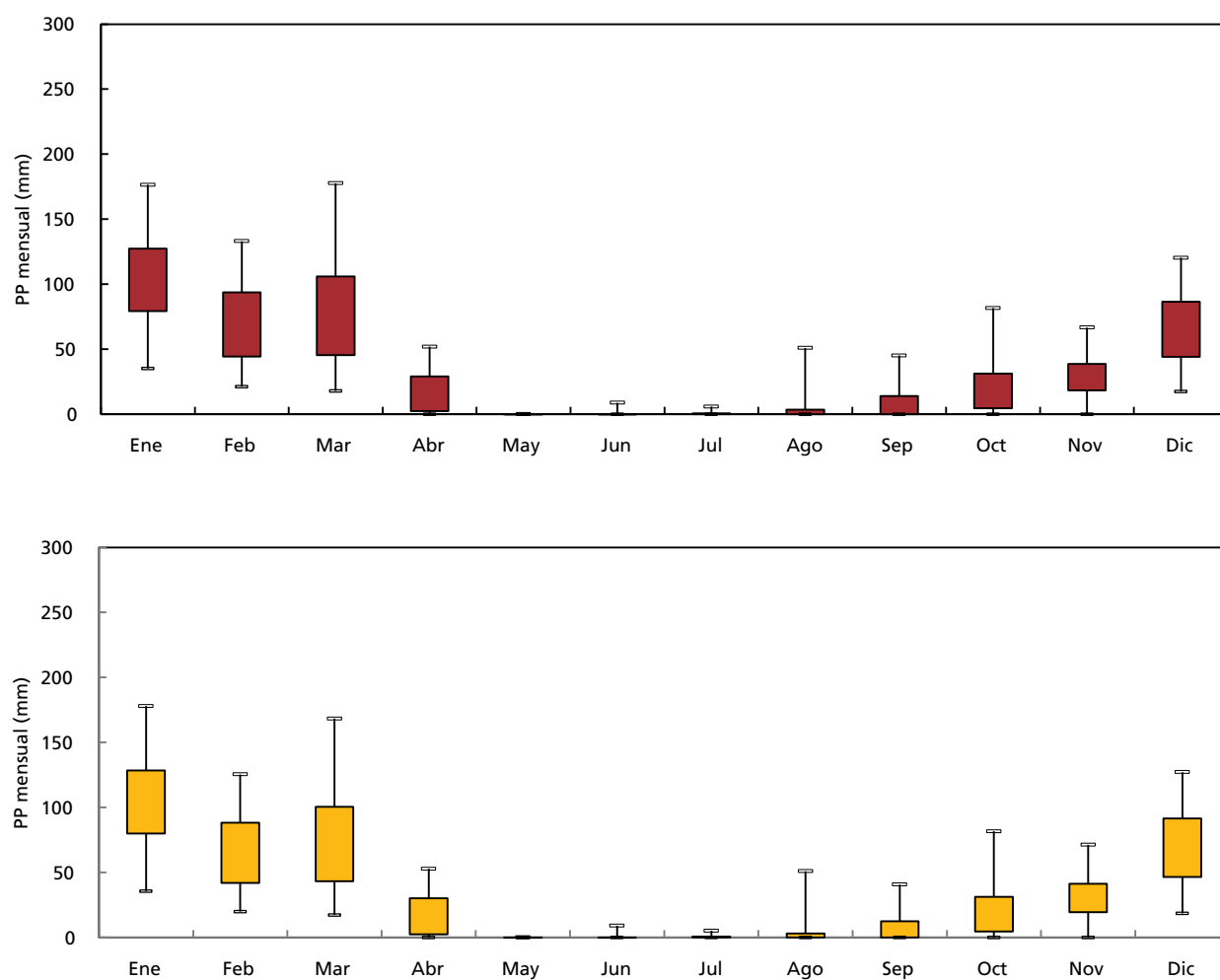
Figura 5.7.
Dispersión interanual de la precipitación mensual en Chaquí, representada en boxplots para 2020 (arriba) y 2050 (abajo).



Las altas precipitaciones también son posibles, aunque con valores mensuales no muy elevados. La precipitación invernal es cercana a cero, lo que determinará permanentes sequías durante esta época, situación que no cambiará en el futuro.

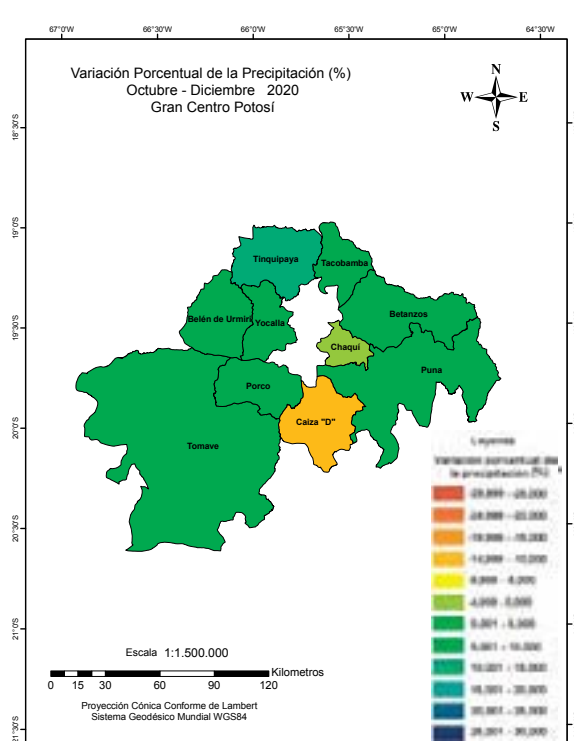
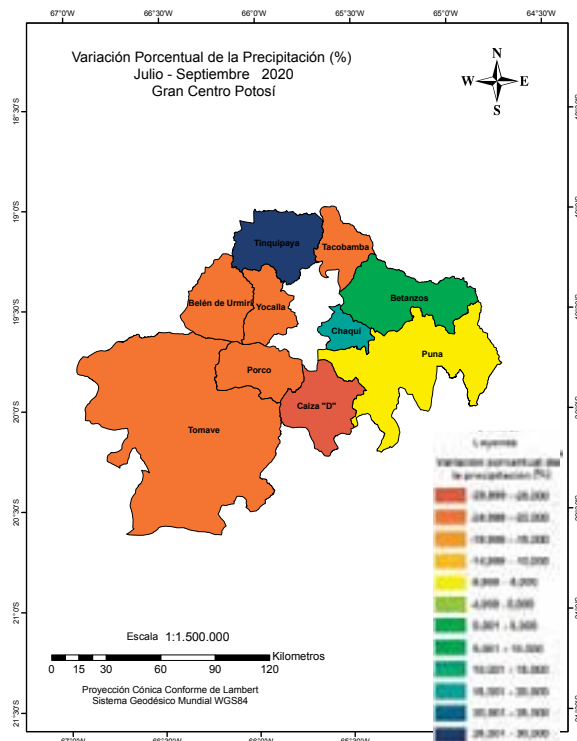
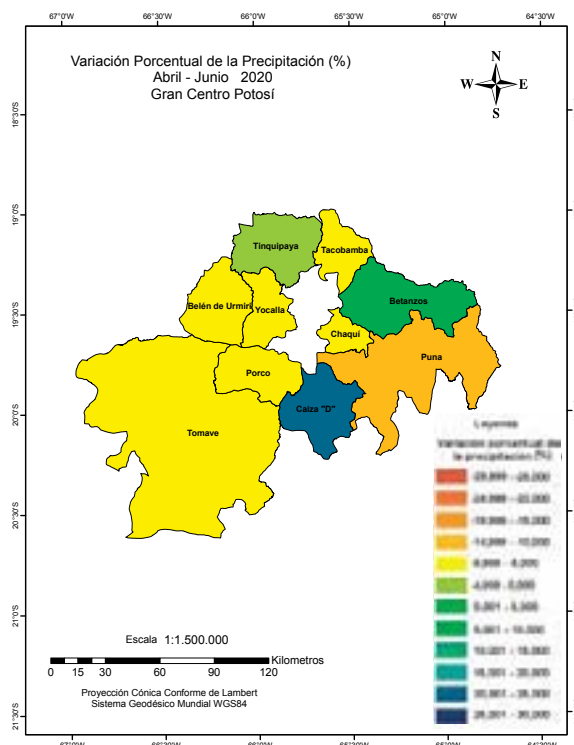
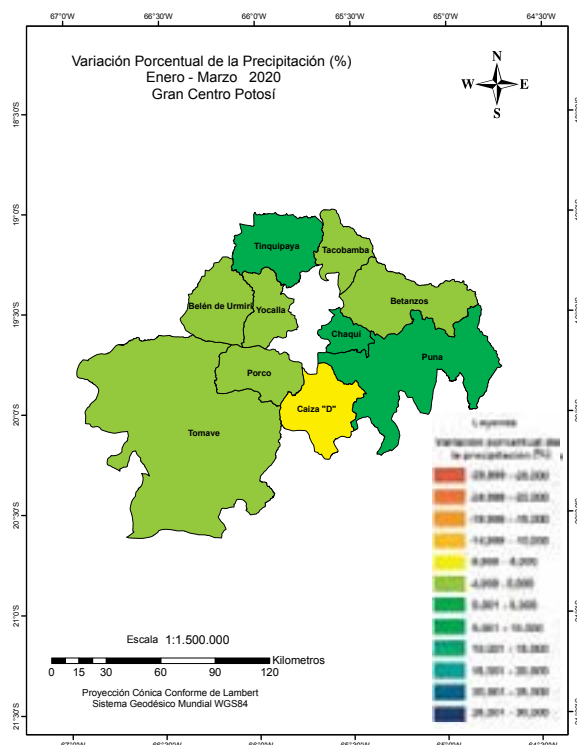
Figura 5.8.

Dispersión interanual de la precipitación mensual de Yocalla, representada en boxplots para 2020 (arriba) y 2050 (abajo).

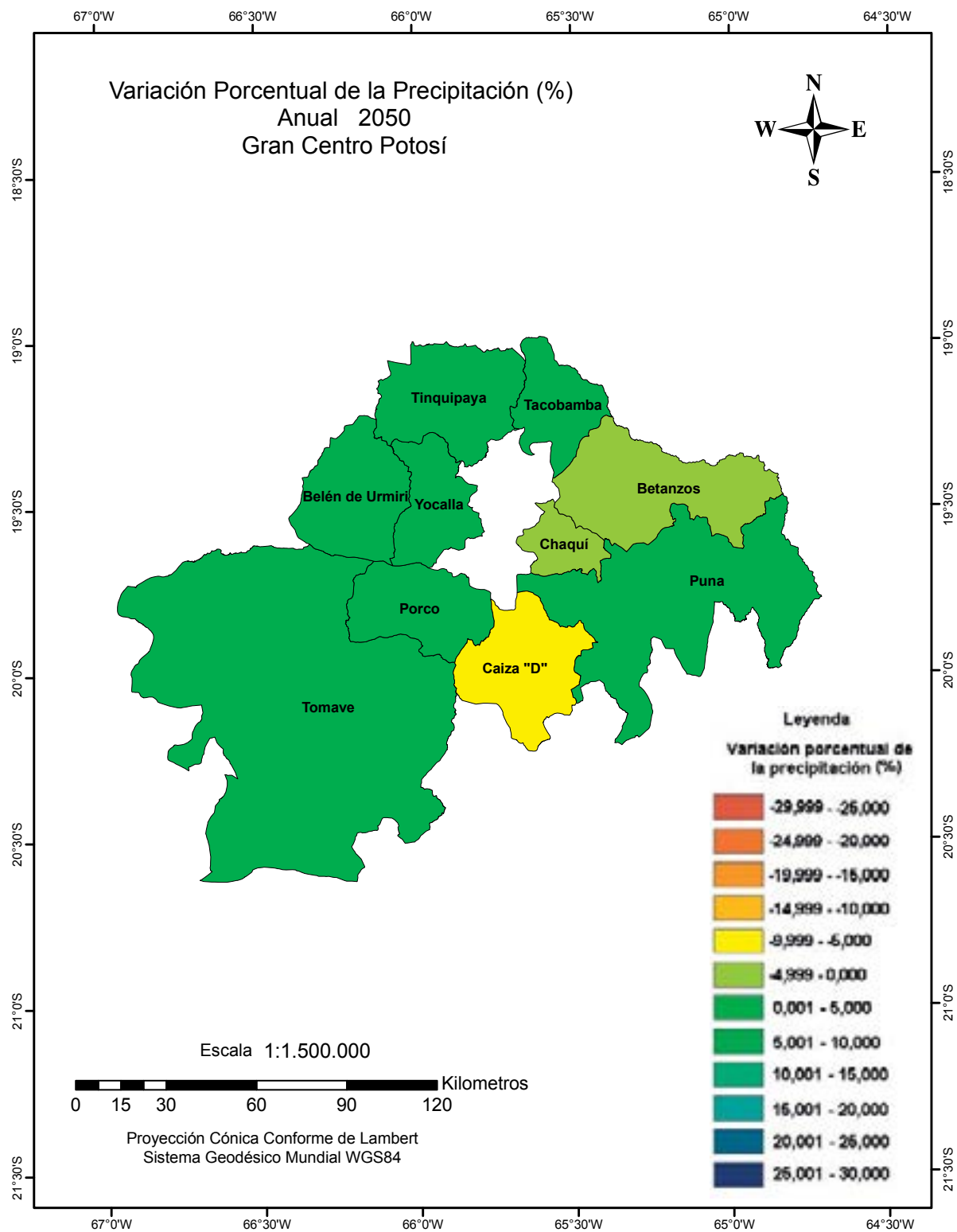


Mapa 5.14.

Variación porcentual de la precipitación por trimestre en 2020. Gran Centro Potosí

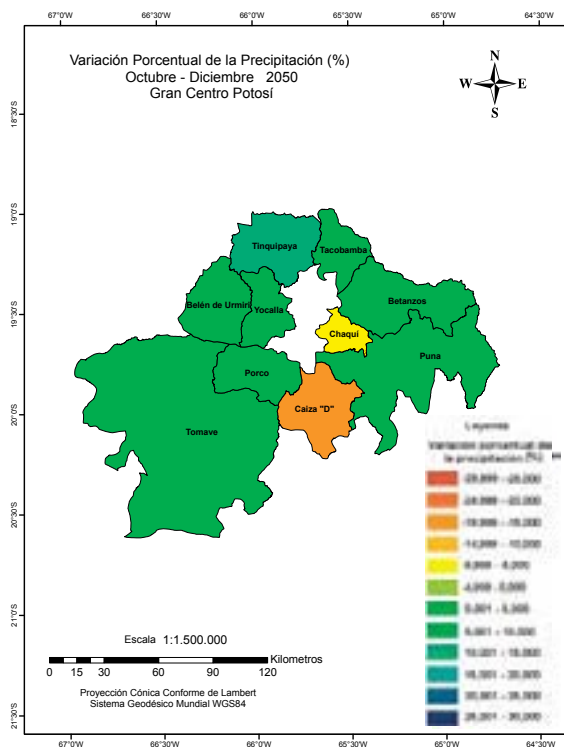
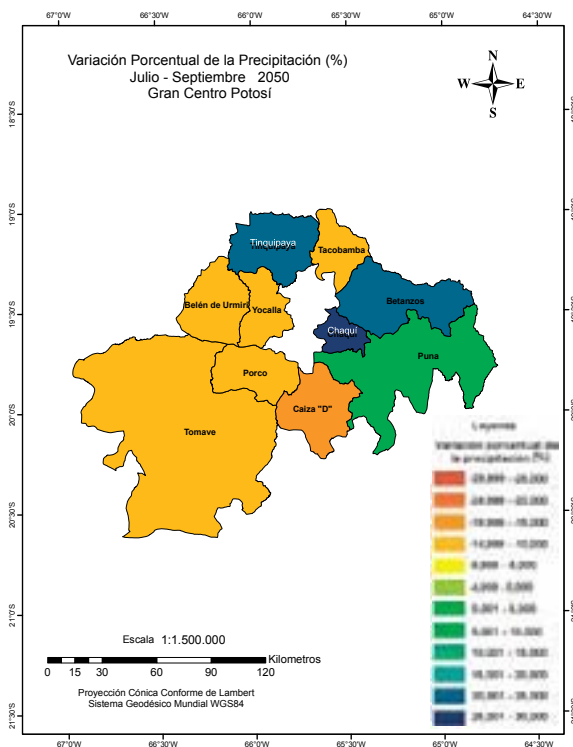
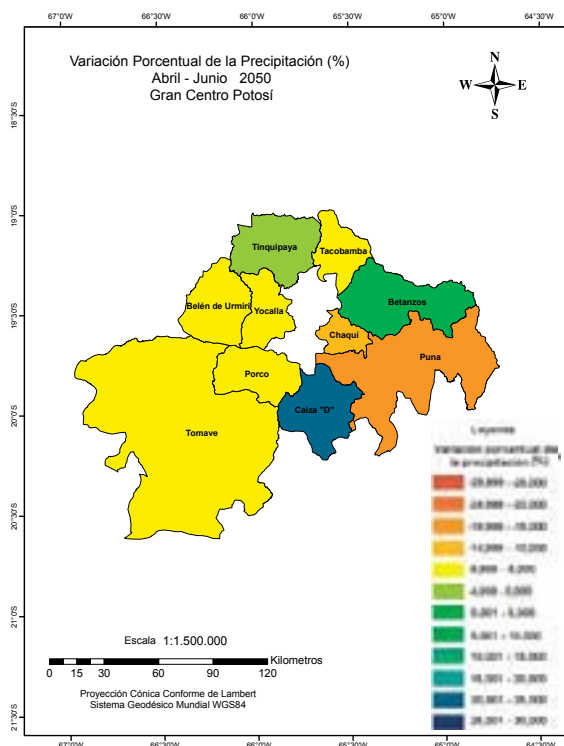
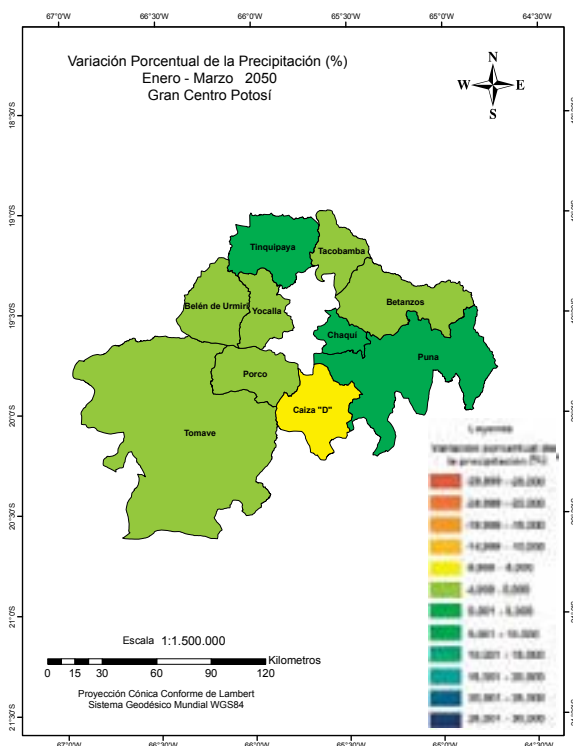


Mapa 5.15.



Mapa 5.16.

Variación porcentual de la precipitación por trimestre en 2050. Gran Centro Potosí





Cintis

Los valles interandinos o valles del Sur de altitud media en los cuales se encuentra Cintis, se caracteriza por la alta incidencia de radiación solar y las temperaturas moderadas con vocación para la agricultura. Sin embargo, el nivel de aridez local producida por su ubicación en valles que bloquean el flujo de masas de aire húmedo, incrementan su tendencia típica a la falta de agua y a eventuales, pero aislados, eventos de lluvias intensas y cortas.

Estas características parecen incrementarse bajo condiciones de cambio climático, pues en todos los municipios involucrados se observa una clara tendencia al descenso de la lluvia anual (Mapas 17 y 19), tendencia que se incrementa hasta el 2050, siendo los municipios con mayor impacto Camargo y Las Carreras. En este caso, las bajas precipitaciones hacen que la reducción porcentual no sea significativa, situación que probablemente cambie en el futuro.

La precipitación de enero a marzo (Mapas 18 y 20) mantiene esta tendencia, aunque los porcentajes de reducción en Culpina e Incahuasi no son significativos. Los restantes municipios muestran reducciones relativamente moderadas, siendo

Camargo el municipio con mayores reducciones tanto en 2020 como en 2050.

La precipitación también se vería reducida entre los meses de abril a junio (Mapas 18 y 20) en la mayoría de los municipios de la zona, pero en porcentajes mayores a las otras zonas próximas analizadas, incidiendo en la aridez en el periodo de cambio de la época húmeda a la seca.

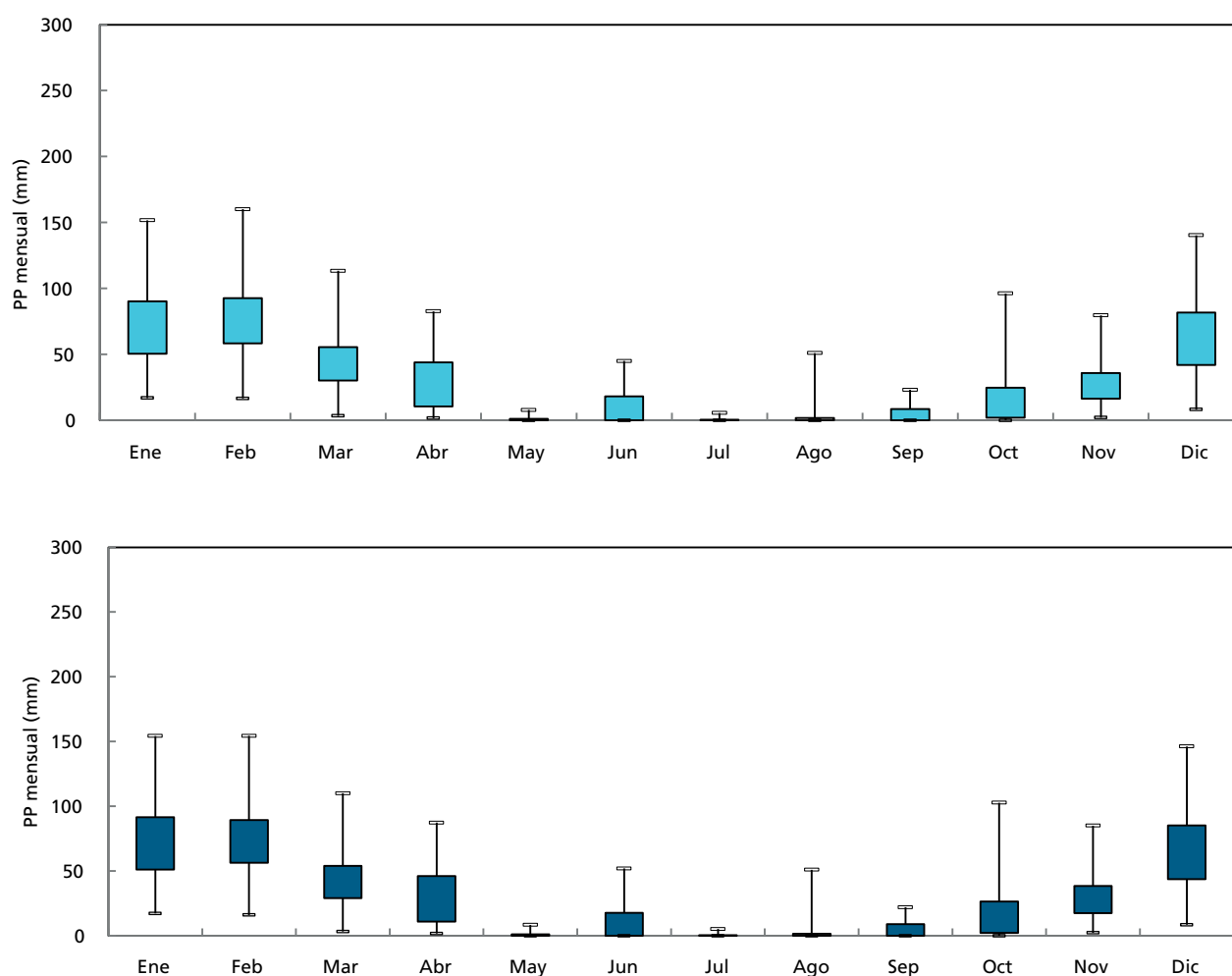
Entre julio y septiembre, la precipitación parece estabilizarse, a excepción de Camargo y Villa Abecia donde se incrementarían. Es importante recordar que ésta es la época de estiaje, por lo que un incremento porcentual, incluso alto, no sería significativo.

Entre octubre y diciembre la precipitación se mantendrá hasta el 2020, reduciéndose después, a partir de un debilitamiento del movimiento de las masas de aire. La zona de Las Carreras sería la más afectada por este fenómeno, lo que finalmente influirá en la reducción anual.

La variabilidad mensual fue analizada en base a las estaciones de Culpina y Las Carreras, como se muestra en las Figuras 5.9 y 5.10.

Figura 5.9.

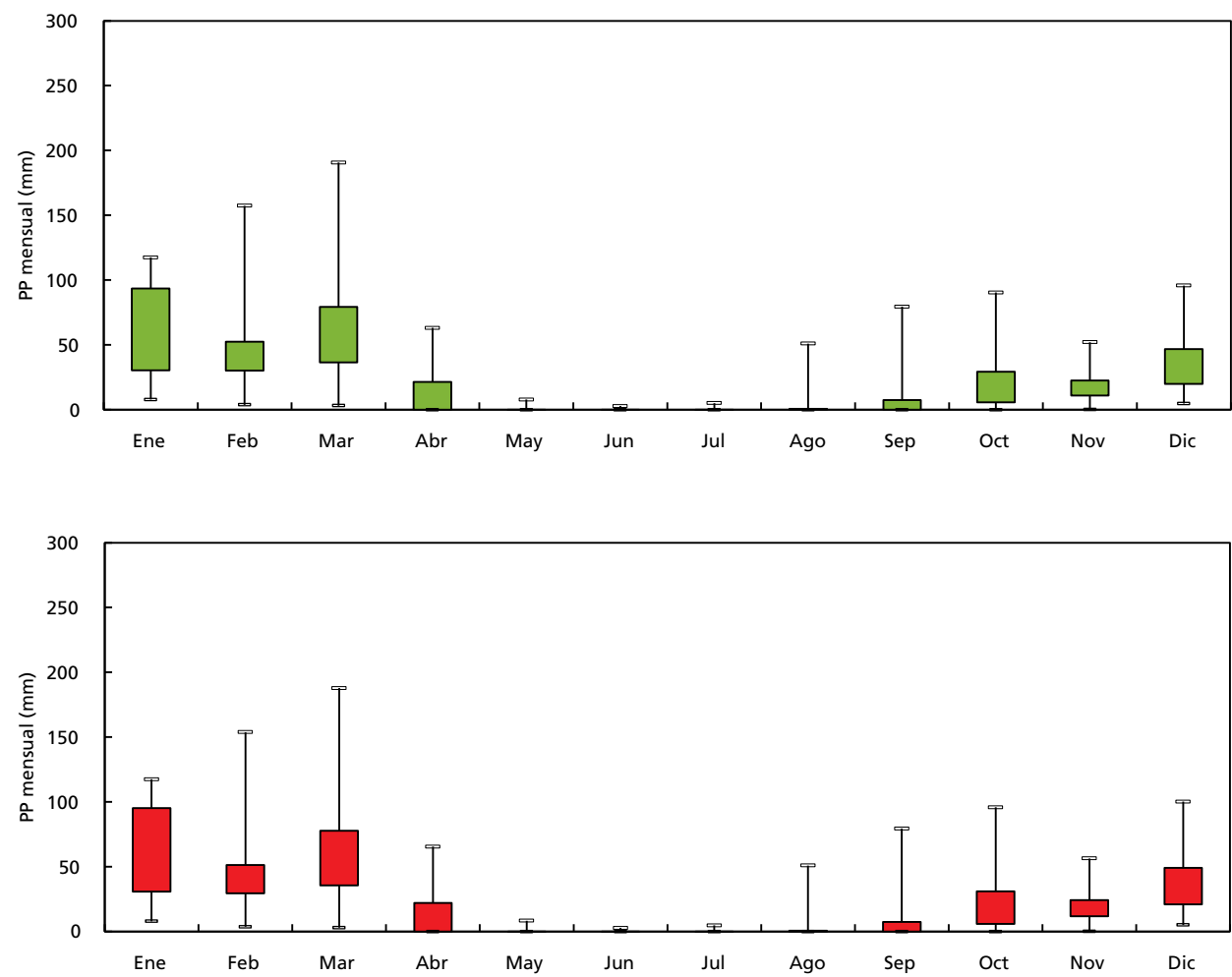
Dispersión interanual de la precipitación mensual en Culpina, representada en boxplots para 2020 (arriba) y 2050 (abajo).



La variabilidad interanual muestra la elevada probabilidad de enfrentar años muy secos en esta región. Siendo que la mediana se encuentra en valores muy reducidos y los extremos muy alejados de ésta y sin cambios en la tendencia hacia mediados de siglo. Esto muestra que la zona

tendrá baja precipitación en general, pero los extremos podrían alterar el ecosistema y poner a prueba las obras que se construyan a futuro. Los inviernos se mantienen muy secos y el cambio entre la época lluviosa y la seca es muy evidente y de rápida ocurrencia.

Figura 5.10.
Dispersión interanual de la precipitación mensual en Las Carreras, representada en boxplots para 2020 (arriba) y 2050 (abajo).



Mapa 5.17.

