



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CENTRO INTERAMERICANO DE CIENCIAS DEL
AGUA

T E S I S

Para obtener el grado de
MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA

**ANÁLISIS DE CAMBIO DEL RENDIMIENTO HÍDRICO ACTUAL Y
BAJO ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS EN LA REGIÓN
SUR DEL ECUADOR**

Presenta:

Ing. Saula Verónica Minga León

Tutor académico:

Dr. Miguel Ángel Gómez Albores

Tutor adjunto:

Dr. Khalidou Mamadou Bâ

Toluca, Estado de México, noviembre 2018

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología – México (CONACYT) por la beca otorgada durante los estudios. A los proyectos de investigación CONACYT 248553 y UAEM/Quebec 4192/2016E. Especial agradecimiento al Dr. Miguel Gómez Alborés y al Dr. Khalidou Bâ por sus asesorías, sugerencias y aportes brindados a lo largo de este trabajo. Al comité de sínodos: Dra. Marivel Hernández, Dr. Ricardo Manzano Solís y Dr. Hector Martínez Valdés por las revisiones y consejos para mejorar este trabajo. A Luis Balcázar por sus revisiones y comentarios vertidos al trabajo. Al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador (INAMHI) por los datos hidrometeorológicos. Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú (SENAMHI) y a la Estación Científica San Francisco (ECSF) por los datos meteorológicos. Al programa Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS) por la base de datos de Downscaling Global Circulation Model Outputs.

Dedicatoria

A Dios

A mis padres, Carmita y Fernando, por su apoyo y motivación constante.

A mis abuelitos, quienes siempre están en mi mente y corazón.

A mis queridos hermanos, Naty, Fadia y Fernando.

A mis sobrinos, Fernanda y Andy.

A mi amor, Luis.

Saula

ABSTRACT

In this study, the average annual water yield for the 1970-2015 period was estimated and with climate change projections for the 2030s, 2050s, 2070s and 2080s in nine hydrographic basins of the southern region of Ecuador using the InVEST water yield model based on the Budyko framework using the InVEST water yield model based on the Budyko framework using the InVEST water yield model based on the Budyko framework. The model estimates annual surface run-off at the pixel, sub-basin, and basin level considering the following variables: precipitation, actual evapotranspiration, land cover/use, soil depth, and available water content for plants. The study involved the generation of the current variables of precipitation and reference evapotranspiration. And the use of the projected variables of two General Circulation Models (GCM) of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 Fifth (CMIP5): MIROC-ESM-CHEM and MRI-CGCM3, under two scenarios, RCP4.5 and RCP8.5. The results showed that the Mayo and Zamora basins had the highest water production, corresponding with 934 and 1218 mm per year, respectively, while the Alamor and Catamayo basins had the lowest water production, corresponding with 206 and 291 mm per year, respectively. According to the MIROC model, average changes of -33 and 67 mm are expected in the scenarios RCP4.5 and RCP8.5, respectively; while, the MRI model presents increments of 130 and 223 mm for the scenarios RCP4.5 and RCP8.5, respectively. GCM generally foresee that the water yield will increase in the middle and lower zones of the watersheds, while in the upper areas of the basins that originate in the Andes mountain range there will be a reduction in water production.

RESUMEN

En este estudio, se estimó el rendimiento hídrico medio anual del periodo 1970-2015 y con proyecciones de cambio climático de los periodos 2030s, 2050s, 2070s y 2080s en nueve cuencas hidrográficas de la región sur del Ecuador. Para la estimación del rendimiento hídrico se utilizó el modelo *Water Yield* de InVEST, una herramienta basada en el marco hidrológico de Budyko. El modelo estima el escurrimiento superficial anual a nivel píxel y cuenca hidrográfica, considerando las variables: precipitación, evapotranspiración real, uso/cobertura del suelo, profundidad del suelo, y contenido de agua disponible para la planta. El estudio implicó la generación de las variables actuales de precipitación y evapotranspiración de referencia. Y la utilización de las variables proyectadas de dos Modelos de Circulación General (MCG) de la Quinta fase del Programa de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP5, acrónimo en inglés): MIROC-ESM-CHEM y MRI-CGCM3, bajo dos escenarios, RCP4.5 y RCP8.5. Los resultados mostraron que las cuencas Mayo y Zamora son las de mayor producción hídrica, con valores de 934 y 1218 mm, respectivamente; mientras que las cuencas Alamor y Catamayo son las de menor producción hídrica con 206 y 291 mm, respectivamente. De acuerdo con el modelo MIROC, se espera cambios promedio de -33 y 67 mm en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente; mientras que, el modelo MRI presenta incrementos de 130 y 223 mm para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente. Los MCG prevén generalmente que el rendimiento hídrico incrementará en las zonas medias y bajas de las cuencas hidrográficas, mientras que en las zonas altas de las cuencas que nacen en la cordillera de Los Andes habrá una reducción de la producción hídrica.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	13
1.1	Antecedentes	14
1.1.1	Disponibilidad del agua en el mundo, América del Sur y Ecuador	14
1.1.2	Estudios hidrológicos en la región sur del Ecuador	15
1.1.3	Modelos hidrológicos y sistemas de información geográfica (SIG) como herramientas para la evaluación del rendimiento hídrico.....	16
1.2	Justificación	19
1.3	Hipótesis.....	20
1.4	Objetivos	20
1.4.1	Objetivo general.....	20
1.4.2	Objetivos específicos	20
2	MARCO CONCEPTUAL	21
2.1.1	Conceptualización e importancia de evaluar el rendimiento hídrico	21
2.1.2	Descripción del modelo <i>Water Yield</i> (WY) de InVEST	22
2.1.3	Influencia del uso y cobertura del suelo en el rendimiento hídrico	24
2.1.4	Método de interpolación <i>Thin plate spline model</i>	24
2.1.5	Método para evaluar tendencias y variabilidad climática.....	25
2.1.6	Escenarios de cambio climático.....	25
2.1.7	Modelos de circulación general atmósfera- océano.....	26
2.1.8	Descripción del Programa de Comparación de Modelos Acoplados.....	27
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
3.1	Área de estudio.....	29
3.2	Recopilación de información geoespacial.....	32
3.3	Estructuración y validación de datos meteorológicos	33
3.4	Generación de imágenes de superficie de precipitación y temperatura	36
3.5	Análisis de tendencias de series climáticas	40
3.6	Estimación del rendimiento hídrico en el área de estudio.....	40
3.6.1	Generación y preparación de datos requeridos por el modelo <i>Water Yield</i> de InVEST	41
3.6.2	Calibración del modelo WY	47
3.6.3	Estimación del rendimiento hídrico actual	50
3.7	Estimación del rendimiento hídrico futuro.....	52
3.8	Análisis de cambio del rendimiento hídrico actual y futuro	53
4	RESULTADOS.....	54
4.1	Disponibilidad de datos.....	54
4.2	Detección de valores atípicos.....	57
4.3	Superficies climáticas.....	58
4.3.1	Calidad de superficies climáticas.....	58
4.3.2	Análisis exploratorio de las superficies climáticas	60
4.4	Análisis de tendencias de series climáticas.....	63
4.5	Rendimiento hídrico actual de la zona de estudio.....	67
4.5.1	Calibración del modelo WY	68
4.5.2	Rendimiento hídrico de las cuencas hidrográficas de la región sur del Ecuador.....	68

4.6	Rendimiento hídrico futuro de las cuencas hidrográficas de la región sur del Ecuador	71
4.7	Análisis de cambio del rendimiento hídrico.....	77
5	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	84
5.1	Superficies climáticas.....	84
5.2	Tendencias de series climáticas	86
5.3	Rendimiento hídrico.....	87
6	CONCLUSIONES	92
7	RECOMENDACIONES.....	94
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
	ANEXOS.....	104

Lista de figuras

Figura 1-1.	Esquemas actuales de integración de los SIG y los modelos hidrológicos	17
Figura 3-1.	Ubicación del área de estudio.....	29
Figura 3-2.	Clasificación climática (método de Thornthwaite) para el área de estudio.....	30
Figura 3-3.	Depresión de Los Andes (Richter y Moreira, 2005)	31
Figura 3-4.	Uso y cobertura del suelo (UCS) del área de estudio.....	31
Figura 3-5.	Ubicación y distribución de estaciones meteorológicas en región sur del Ecuador y norte del Perú.	33
Figura 3-6.	Ejemplo de la estructura de la información meteorológica	35
Figura 3-7.	Diagrama de flujo de la generación de imágenes de superficie de precipitación y temperatura.....	37
Figura 3-8.	Estructura del archivo de texto (.dat), ejemplo para el año 1970.	38
Figura 3-9.	Interfaz gráfica del modelo WY de InVEST	41
Figura 3-10.	Diagrama para obtener <i>A</i> , <i>B</i> y <i>C</i> con el uso del <i>Macro Modeler</i>	43
Figura 3-11.	Diagrama para obtener <i>ET0</i> mensual en el <i>Macro Modeler</i> , aplicando la ecuación de Hargreaves	44
Figura 3-12.	Diagrama para obtener <i>ET0</i> de los meses de febrero en el <i>Macro Modeler</i> , aplicando la ecuación de Hargreaves.....	44
Figura 3-13.	Visualizador de la base de datos HWSD.....	46
Figura 3-14.	Localización de estaciones hidrométricas utilizadas en la calibración del modelo WY48	
Figura 3-15.	Hidrogramas de las estaciones hidrométricas.....	49
Figura 3-16.	Variables requeridas para la ejecución del modelo WY de InVEST: a) precipitación anual promedio (mm), b) <i>ET0</i> anual promedio (mm), c) uso y cobertura del suelo, d) PAWC, d) profundidad del suelo, y f) cuencas hidrográficas.....	51
Figura 4-1.	Número de registros mensuales durante el periodo 1960-2015; a) datos de precipitación, b) datos de temperatura máxima (<i>Tmax</i>), media (<i>Tmed</i>) y mínima (<i>Tmin</i>).	54
Figura 4-2.	Disponibilidad de datos de precipitación para el periodo 1960-2015	55
Figura 4-3.	Disponibilidad de datos de temperatura media para el periodo 1960-2015	56
Figura 4-4.	Magnitud de los datos por variable para toda la serie mensual 1970-2015.....	57
Figura 4-5.	Proporción de la señal, raíz cuadrada de la validación cruzada (RTGCV), y la raíz cuadrada del error medio (RTMSE) para las superficies mensuales de temperatura y precipitación.	59

Figura 4-6. Distribución espacial de la precipitación media anual (a) y temperatura media anual (b) en la zona de estudio. Valores promedio del periodo 1970-2015.	60
Figura 4-7. Diagrama ombrotérmico de la ZP7, valores promedio del período 1970-2015.	61
Figura 4-8. Diagramas ombrotérmicos de las cuencas hidrográficas de la región sur del Ecuador, valores promedio del período 1970-2015.	62
Figura 4-9. Series de tiempo de precipitación (izquierda) y temperatura media (derecha) mensual de la región sur del Ecuador.....	63
Figura 4-10. Series mensuales de precipitación de las cuencas hidrográficas de la región sur del Ecuador	65
Figura 4-11. Series mensuales de temperatura media de las cuencas hidrográficas de la región sur del Ecuador	66
Figura 4-12. Tendencia monótona (Tau Mann-Kendall): (a) precipitación anual promedio y (b) temperatura anual promedio, período 1970-2015.	67
Figura 4-13. Rendimiento hídrico promedio de las cuencas hidrográficas en la zona de estudio: a) lámina de escurrimiento (mm); b) volumen (Mm ³)	69
Figura 4-14. Rendimiento hídrico promedio de las subcuencas hidrográficas en la zona de estudio: a) lámina de escurrimiento (mm); b) volumen (Mm ³)	70
Figura 4-15. Distribución espacial del rendimiento hídrico en las cuencas hidrográficas de la región sur del Ecuador, periodo 1970-2015.	71
Figura 4-16. Rendimiento hídrico de los MCG para las proyecciones 2030s, 2050s, 2070s, y 2080s bajo escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5.....	72
Figura 4-17. Distribución espacial del rendimiento hídrico en la cuenca Alamor de acuerdo con los MCG a diferentes proyecciones y escenarios climáticos.	73
Figura 4-18. Distribución espacial del rendimiento hídrico en la cuenca Macará de acuerdo con los MCG a diferentes proyecciones y escenarios climáticos.	73
Figura 4-19. Distribución espacial del rendimiento hídrico en la cuenca Catamayo de acuerdo con los MCG a diferentes proyecciones y escenarios climáticos.	74
Figura 4-20. Distribución espacial del rendimiento hídrico en la cuenca Puyango de acuerdo con los MCG a diferentes proyecciones y escenarios climáticos.	74
Figura 4-21. Distribución espacial del rendimiento hídrico en la cuenca Santa Rosa de acuerdo con los MCG a diferentes proyecciones y escenarios climáticos.	75
Figura 4-22. Distribución espacial del rendimiento hídrico en la cuenca Jubones de acuerdo con los MCG a diferentes proyecciones y escenarios climáticos.	75
Figura 4-23. Distribución espacial del rendimiento hídrico en la cuenca Pagua de acuerdo con los MCG a diferentes proyecciones y escenarios climáticos.	76
Figura 4-24. Distribución espacial del rendimiento hídrico en la cuenca Zamora de acuerdo con los MCG a diferentes proyecciones y escenarios climáticos.	76
Figura 4-25. Distribución espacial del rendimiento hídrico en la cuenca Mayo de acuerdo con los MCG a diferentes proyecciones y escenarios climáticos.	77
Figura 4-26. Cambios en la precipitación de los MCG para las proyecciones 2030s, 2050s, 2070s, y 2080s bajo escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5	78
Figura 4-27. Cambios en la evapotranspiración real de los MCG para las proyecciones 2030s, 2050s, 2070s, y 2080s bajo escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5	79

Figura 4-28. Cambios en el rendimiento hídrico de los MCG para las proyecciones 2030s, 2050s, 2070s, y 2080s bajo escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5.....	80
Figura 4-29. Cambios en el rendimiento hídrico a nivel espacial	83
Figura 5-1. Calibración del modelo en función al parámetro ecohidrológico Z	87

Lista de tablas

Tabla 2-1. Descripción general de las trayectorias de concentración representativas (RCP) (Moss et al., 2010).	26
Tabla 3-1. Información geoespacial.....	32
Tabla 3-2. Información meteorológica recopilada	34
Tabla 3-3. Clasificación de eventos de El Niño	36
Tabla 3-4. Datos de entrada requeridos por el módulo ANUSPLIN-SPLINA	39
Tabla 3-5. Cuencas hidrográficas de la región sur del Ecuador	42
Tabla 3-6. Tabla biofísica utilizada para la ejecución del modelo WY, proporciona la profundidad de raíz y K_c para cada clase UCS.	47
Tabla 3-7. Información de las estaciones hidrométricas y periodo de evaluación utilizados para la calibración del modelo WY	49
Tabla 3-8. Sistemas de riego considerados en la calibración del modelo WY.....	50
Tabla 3-9. Orden, formato y resolución de las variables requeridas para la ejecución del modelo WY	51
Tabla 3-10. Información de los Modelos de Circulación General (MCGs).....	52
Tabla 4-1. Resumen de datos detectados como atípicos	58
Tabla 4-2. Variaciones en las variables climáticas con base a la línea de tendencia (1970-2015) ...	63
Tabla 4-3. Resumen del rendimiento hídrico observado y estimado en el proceso de calibración... ..	68
Tabla 4-4. Rendimiento hídrico medio anual [1970-2015] a nivel de unidades hidrológicas	69
Tabla 5-1. Cambios de temperatura media, evapotranspiración real (ETR), precipitación y rendimiento hídrico por MCG y escenario para el periodo 2080s [2070-2099]	90

Lista de anexos

Anexo A. Rutinas para la elaboración de gráficas de disponibilidad de datos.....	104
Anexo B. Proceso para la obtención de datos de elevación utilizados en la generación de superficies climáticas.	105
Anexo C. Detección de valores atípicos	106
Anexo D. Análisis de datos atípicos y extremos.....	114
Anexo E. Tendencia de series climáticas por mes para el periodo [1970-2015].	118
Anexo F. Precipitación, ETP y ETR de los MCG por año de proyección y escenarios.....	123
Anexo G. Cambios en la temperatura media, ET0, ETP de los MCG por año de proyección y escenarios.....	125

ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

<i>AR4</i>	<i>Cuarto Informe de Evaluación (IPCC)</i>
<i>AR5</i>	<i>Quinto Informe de Evaluación (IPCC)</i>
<i>CCAFS</i>	<i>Climate Change, Agriculture and Food Security (Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria)</i>
<i>CGIAR-CSI</i>	<i>Consultative Group on International Agricultural Research (Consortio de Información Espacial del Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional)</i>
<i>CMIP5</i>	<i>Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (Quinta fase del Programa de Comparación de Modelos Acoplados)</i>
<i>ENOS</i>	<i>El Niño-Oscilación del Sur</i>
<i>ETM</i>	<i>Earth Trends Modeler (Modelador de Tendencias de la Tierra)</i>
<i>ECSF</i>	<i>Estación Científica San Francisco</i>
<i>HWSD</i>	<i>Harmonized World Soil Database (Base de Datos Mundial Armonizada sobre el Suelo)</i>
<i>INAMHI</i>	<i>Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador</i>
<i>INEC</i>	<i>Instituto Nacional de Estadística y Censos del Ecuador</i>
<i>InVEST</i>	<i>Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (Valuación Integrada de Servicios Ecosistémicos y Compensaciones)</i>
<i>IPCC</i>	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático)</i>
<i>MAE</i>	<i>Ministerio de Ambiente del Ecuador</i>
<i>MCGAO</i>	<i>Modelos de Circulación General Atmósfera- Océano</i>
<i>MNA</i>	<i>Modelo numérico de altitud</i>
<i>OMM</i>	<i>Organización Meteorológica Mundial</i>
<i>RCP</i>	<i>Representative Concentration Pathway (Trayectorias de Concentración Representativas)</i>
<i>SENAMHI</i>	<i>Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú</i>
<i>SENPLADES</i>	<i>Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo del Ecuador</i>
<i>SRES</i>	<i>Special Report on Emission Scenarios (Informe Especial sobre Escenarios de Emisión)</i>
<i>SRTM</i>	<i>Shuttle Radar Topography Mission (Misión topográfica Radar Shuttle)</i>
<i>RCP4.5</i>	<i>Representative Concentration Pathway, scenario 4.5</i>
<i>RCP8.5</i>	<i>Representative Concentration Pathway, scenario 8.5</i>
<i>USGS/NASA</i>	<i>United States Geological Survey/National Aeronautics and Space Administration (Servicio Geológico de los Estados Unidos/ Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio)</i>
<i>UCS</i>	<i>Uso y cobertura del suelo</i>
<i>WY</i>	<i>Water Yiel (Rendimiento hídrico)</i>

<i>MIROC</i>	<i>Model for Interdisciplinary Research on Climate (Modelo para la Investigación Interdisciplinaria sobre el Clima)</i>
<i>MRI</i>	<i>Meteorological Research Institute (Instituto de Investigación Meteorológica)</i>
<i>2030s</i>	<i>Periodo [2020-2049]</i>
<i>2050s</i>	<i>Periodo [2040-2069]</i>
<i>2070s</i>	<i>Periodo [2060-2089]</i>
<i>2080s</i>	<i>Periodo [2070-2099]</i>

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

Del presente trabajo de investigación se desarrolló productos de divulgación, el cual se encuentran en un proceso de revisión y discusión para su publicación.

Minga-León, S., Gómez-Albores, M.A., Bâ, K.M., Balcázar, L., Manzano-Solís, L.R., Cuervo-Robayo, A.P., Mastachi-Loza, C.A., 2018. Estimation of water yield in the hydrographic basins of southern Ecuador. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 1–18. doi:10.5194/hess-2018-529.

Minga-León, S., Gómez-Albores, M.A., Bâ, K.M., Balcázar, L., Manzano-Solís, L.R., Mastachi-Loza, C.A., 2018b. Rendimiento hídrico de la cuenca alta del río Amacuzac basado en el modelo InVEST: modelación y calibración. *Cent. Investig. la Univ. la Salle.* En revisión.

Participación en el 1^{er} coloquio de Investigación en Ingeniería y 10^o curso-taller en Ciencias del Agua con el tema: “Rendimiento hídrico de la cuenca alta del río Amacuzac basado en el modelo InVEST: modelación y calibración”.

1 INTRODUCCIÓN

Estudios globales anticipan que el cambio climático tendrá un fuerte impacto sobre los recursos hídricos alrededor del mundo. Las proyecciones sobre el cambio climático durante el siglo XXI indican que la escorrentía aumentaría en latitudes altas y en los trópicos húmedos, y disminuiría en latitudes medias y en ciertas partes de los trópicos secos (Bates et al., 2008; IPCC, 2014a).

Aunque la disponibilidad del agua en las vertientes del Ecuador (Amazonas y Pacífico), superan el valor límite de estrés hídrico regular: 1700 m³/hab./año (UNESCO-WWAP, 2016), existen lugares con bajos índices de pluviosidad como es el caso de Zapotillo y Macará en la provincia de Loja, donde la precipitación anual promedio es de ~450 y ~500 mm, respectivamente (Pourrut et al., 1995). Por lo que, es importante mejorar el conocimiento a nivel regional sobre el cambio climático en relación al ciclo hidrológico a escalas que sean útiles para la toma de decisiones (Bates et al., 2008).

Por otro lado, los principales dinamizantes climáticos que determinan la disponibilidad del agua son la precipitación, temperatura y evapotranspiración (Bates et al., 2008). Sin embargo, no solo depende de estos aspectos, sino también de la permeabilidad del suelo, pendiente y vegetación (Zhang et al., 2012). Además de procesos antrópicos, como por ejemplo, el cambio de uso del suelo y demanda del agua (De Bievre et al., 2012).

En este contexto, el presente proyecto estimó la disponibilidad y distribución del agua actual y analizó su variabilidad frente a escenarios de cambio climático en cuencas hidrográficas de la región sur del Ecuador, utilizando el modelo *Water Yiel* de InVEST (acrónimo en inglés de Evaluación Integral de Servicios Ecosistémicos y Compensaciones), una herramienta basada en el marco hidrológico de Budyko. El modelo estima la escorrentía anual promedio a nivel cuenca, subcuenca y píxel; considerando variables como precipitación, evapotranspiración, uso y cobertura del suelo, profundidad del suelo, y contenido de agua disponible para la planta.

1.1 Antecedentes

1.1.1 Disponibilidad del agua en el mundo, América del Sur y Ecuador

Los recursos de agua dulce en el mundo se renuevan a través de un ciclo continuo de precipitación, evapotranspiración, infiltración y escorrentía, conocido como ciclo del agua, que determina su distribución y disponibilidad a través del tiempo y el espacio (UNESCO-WWAP, 2016). Se estima que en el mundo existen alrededor de 1400 millones de km³ de agua, de los cuales 35 millones (2.5%) es agua dulce (FAO, 2002). Del agua dulce, la mayoría se encuentra congelada en glaciares (69%) y en forma de agua subterránea (30%); sólo el 0.4% se encuentra en la superficie o en la atmósfera (UNESCO y WWAP, 2006).

América del Sur, es una región con abundantes recursos de agua dulce (CEPAL y GIZ, 2016), posee el 26% de agua del mundo para solo el 6% de la población, en comparación con Asia que concentra 30% de la disponibilidad de agua y 60% de la población (UNESCO-WWAP, 2007). La disponibilidad natural media per cápita para la región es aproximadamente de 30428 m³/hab./año, lo que constituye una cifra muy superior a la media mundial de 6000 m³/hab./año (FAO-AQUASTAT, 2016). Sin embargo, la región presenta una gran heterogeneidad en la distribución espacial de los recursos hídricos, de modo que simultáneamente contiene el desierto más árido del mundo, con precipitaciones prácticamente inexistentes, y áreas con un régimen híper hídrico (UNESCO, 2010). Sumando a esto, existe una alta contaminación de sus fuentes hídricas por un proceso intenso de urbanización (Dagnino et al., 2012; UNDESA, 2012).

Ecuador se divide en dos regiones hidrográficas o vertientes: Pacífico y Amazonas. Las vertientes comprenden 711 y 23 unidades hidrográficas respectivamente (SENAGUA et al., 2009). De acuerdo con el Plan Nacional de los Recursos Hídricos del Ecuador, la cantidad media anual de los recursos hídricos es de aproximadamente 376 Km³, con una oferta hídrica promedio de 26000 m³/hab./año; correspondiendo 118 y 258 km³/año para la vertiente del Pacífico y Amazonas respectivamente (CISPDR, 2015). Sin embargo, la disponibilidad hídrica en las vertientes es inversamente proporcional a la demanda, es decir el 88% de la población se localiza en la vertiente del Pacífico y apenas el 12% en la vertiente Amazónica (CEPAL, 2012).

Según UNESCO-WWAP (2016), un área se encuentra bajo estrés hídrico regular cuando los recursos hídricos renovables caen por debajo de 1700 m³/hab./año. A pesar que la disponibilidad de agua en el Ecuador supera éste valor límite, existen zonas con bajos índices de pluviosidad como es el caso de Zapotillo y Macará en la provincia de Loja donde la precipitación anual promedio es de ~450 y ~500 mm, respectivamente (Pourrut et al., 1995).

1.1.2 Estudios hidrológicos en la región sur del Ecuador

En la región sur del Ecuador, estudios sobre cuantificación de los recursos hídricos a nivel de unidades hidrográficas son pocos (Buytaert et al., 2006a). Los principales obstáculos para el avance del conocimiento hidrológico han sido la dificultad para implementar y mantener redes de observación en entornos complejos y remotos, y la falta de reconocimiento de los ecosistemas como proveedores de agua (Célleri et al., 2009).

Se han estudiado algunas microcuencas en los páramos húmedos y de montaña tropical en el sur del Ecuador. De los cuales se destacan varios trabajos, cuyos aportes principales son la conceptualización de los procesos hidrológicos (Célleri et al., 2009; Célleri y Feyen, 2009; Llambí et al., 2012), modelización hidrológica (Balcázar et al., 2016; Buytaert et al., 2006c; Oñate y Aguilar, 2003; Vázquez, 2015), monitoreo y cuantificación de las principales variables climáticas (Campozano et al., 2016; Ochoa-Tocachi et al., 2018), análisis de la relación lluvia-escorrentía (Crespo et al., 2011), variabilidad climática (Bendix et al., 2008; Buytaert et al., 2006b; Celleri et al., 2007; Fries et al., 2014; Luna-Romero et al., 2018; Rollenbeck y Bendix, 2011), efecto de los cambios en el uso de la tierra sobre el comportamiento hidrológico (Buytaert et al., 2007, 2005; Crespo et al., 2014; Ochoa-Tocachi et al., 2016) e impactos del cambio climático en la hidrología (Breuer et al., 2013; Buytaert et al., 2010, 2009; Buytaert y Bievre, 2012; Mora et al., 2014). Estos estudios, por lo general se han desarrollado a escalas muy pequeñas y en tiempos relativamente cortos.

La importancia de estudiar las cuencas andinas radica en que son las principales proveedores de agua para las tierras altas de Los Andes, así como para extensas tierras bajas adyacentes y parte de las llanuras costeras (Buytaert et al., 2006a). Crespo et al. (2014) señalan que la producción de agua en microcuencas de páramo en estado natural es de alrededor del 75% respecto a la cantidad de lluvia. La alta producción hídrica se debe a una alta cantidad de

precipitación, así como, al bajo consumo de agua de la vegetación. No obstante, el crecimiento urbano y la concentración de la agricultura en los valles interandinos influyen directamente en el incremento de la demanda de agua para diferentes usos.

1.1.3 Modelos hidrológicos y sistemas de información geográfica (SIG) como herramientas para la evaluación del rendimiento hídrico

En la década de los 60, con la revolución digital se realizó el primer modelo para representar el ciclo hidrológico, *Stanford Watershed Model* (SWM) desarrollado por la Universidad de Stanford. A partir de entonces, con el desarrollo de la tecnología de sistemas informáticos y de los sistemas de información geográfica (SIG), fue posible modelar una cuenca hidrográfica a lo largo de extensos periodos de tiempo y las respuestas a las perturbaciones, como por ejemplo el modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas.

De acuerdo a Sui y Maggio (1999) existen cuatro formas de integración entre los modelos hidrológicos y los SIG: (1) SIG incluido en el modelo, (2) función hidrológica incluida en el SIG, (3) acoplamiento holgado (*loose coupling*), y (4) acoplamiento estrecho (*tight coupling*), nivel más alto de integración (Figura 1-1). En la actualidad se utilizan todas estas diferentes formas de integración. Estos cuatro enfoques generales han dado lugar a abundantes estudios empíricos en varias regiones del mundo, la mayoría de los cuales se basan en una combinación de acoplamiento holgado y estrecho.

Entre las principales herramientas que poseen los SIG, y que son aplicables al campo de la hidrología se encuentran: la interpolación espacial (principalmente de variables climatológicas), trazado de flujo, delimitación de cuencas, algebra de mapas, entre otras (Wilson et al., 2000). Además, los SIG pueden actuar como plataforma para la experimentación rápida de nuevas ideas y conceptos, permitiendo acelerar los procesos de desarrollo, implementación y cálculo de modelos hidrológicos (Del Río, 2010).

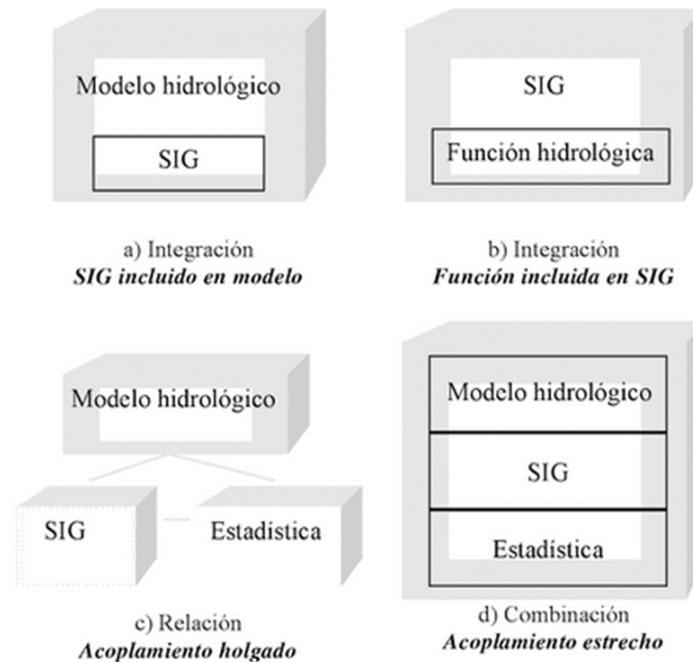


Figura 1-1. Esquemas actuales de integración de los SIG y los modelos hidrológicos. Elaborado por Del Río (2010) a partir de Sui y Maggio (1999), Nyerges (1991) y Martín et al. (2005).

El modelo *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs* (InVEST), es una herramienta de valoración de servicios ecosistémicos; desarrollado en el 2007 por la Universidad de Stanford, el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, acrónimo en inglés) y *The Nature Conservancy* (TNC). Comprende muchos sub-modelos, entre ellos, el modelo de rendimiento del agua “*Water Yield*”. El módulo de rendimiento del agua es un modelo de escala espacio - temporal basado en el principio del balance hídrico. Comparado con otros modelos hidrológicos, el modelo de rendimiento del agua de InVEST tiene funciones de mapeo y análisis espacial bajo un SIG.

Hasta la fecha, el modelo *Water Yield* (WY) se ha aplicado en varias cuencas alrededor del mundo y contextos de decisión. Como por ejemplo en China, Zhang et al. (2012) utilizaron el modelo para estimar el escurrimiento de agua en la cuenca del río Xitiaoxi; Chen et al. (2011) evaluaron el servicio de abastecimiento de agua en la cuenca del río Lancang. En España, Bangash et al. (2013) utilizaron el modelo en la evaluación de los impactos del cambio climático sobre los servicios de abastecimiento de agua en la cuenca de Llobregat del Mediterráneo. Varios estudios como Gaspari et al. (2015), Izquierdo & Clark (2012) y Bai et al. (2012) consideraron el rendimiento hídrico como parte de los servicios ecosistémicos,

por lo que el modelo ha sido usado para cuantificar, mapear y valorar este servicio, con el fin de identificar áreas prioritarias de conservación.

Sánchez-Canales et al. (2012), analizaron la sensibilidad del modelo en un caso de estudio en la cuenca del Llobregat, en España. Encontraron que el modelo era sensible a las variables climáticas, pero no al parámetro ecohidrológico Z (ver descripción del modelo en la sección 2.3.1). Hamel y Guswa (2015) evaluaron el desempeño del modelo en 10 subcuencas de Carolina del Norte. Encontraron que modelo InVEST es capaz de representar las diferencias en los usos de la tierra y, por lo tanto, en la distribución espacial del rendimiento hídrico. Sin embargo, las incertidumbres introducidas por los errores en los datos de entrada climática son significativas y espacialmente heterogéneas, lo que afecta la distribución espacial dentro de las cuencas de áreas con alto y bajo rendimiento hídrico.

Redhead et al. (2016) llevaron a cabo una validación del modelo de WY a partir de datos ampliamente disponibles de caudal, en 22 cuencas del Reino Unido. El resultado mostró que el modelo produce estimaciones precisas de la producción de agua en cuencas, sin embargo, esta precisión depende de la selección cuidadosa de los parámetros y datos de entrada del modelo, los cuales tienen que ser representativos a nivel espacial y temporal.

Pessacg et al. (2015) analizaron datos de precipitación globales y datos de estaciones meteorológica. Exploraron la incertidumbre de los diferentes datos en las simulaciones del rendimiento hídrico en la Cuenca del río Chubut (CHB). Las simulaciones se realizaron utilizando el modelo de servicios ecosistémicos InVEST. Los resultados muestran marcadas diferencias entre los conjuntos de datos para la región de la cuenca del Chubut, tanto en la magnitud de las precipitaciones como en su disposición espacial.

1.2 Justificación

Los registros de observaciones y proyecciones climáticas aportan abundante evidencia de que los recursos de agua dulce son vulnerables y pueden resultar gravemente afectados por el cambio climático (Bates et al., 2008). En algunas regiones, las cambiantes precipitaciones están alterando los sistemas hidrológicos, lo que afecta a los recursos hídricos en términos de cantidad y calidad (IPCC, 2014b).

La modelización de los servicios hidrológicos está asociada a un alto esfuerzo de aplicación y requerimiento de datos que no siempre están disponibles. Por este motivo, surge la necesidad de explorar herramientas accesibles, que requieran de poca información y puedan proporcionar una buena imagen general de los servicios hidrológicos. En particular, el modelo *Water Yiel* de InVEST es un modelo espacialmente explícito, basado en el principio de balance hídrico (Hamel y Guswa, 2015). El modelo ha sido usado en varios lugares del mundo y ha dado resultados satisfactorios en la evaluación del rendimiento hídrico, convirtiéndose en una valiosa herramienta de apoyo para la toma de decisiones (Gaspari et al., 2015; Zhang et al., 2012).

En este contexto, el presente trabajo estimó el rendimiento hídrico actual, así como, bajo escenarios de cambio climático en nueve cuencas hidrográficas de la región sur del Ecuador, utilizando el modelo *Water Yiel* de InVEST. Los resultados son un recurso útil en la planificación y gestión local de los recursos hídricos a largo plazo. Por otro lado, la estimación del rendimiento hídrico es un proceso complejo influenciado por varios factores (Zhang et al., 2012). Por lo que, la investigación también aportará con la generación de información indispensable para la zona, como: superficies climáticas de precipitación y temperatura para el periodo 19670-2015. Finalmente, la disponibilidad de información hizo posible el desarrollo del presente trabajo, en particular la disponibilidad de datos climáticos observados y las simulaciones de los modelos del CMIP5 bajo escenarios de cambio climático.

1.3 Hipótesis

La estimación del rendimiento hídrico actual y bajo escenarios de cambio de climático servirá para identificar zonas con tendencias positivas o negativas en las cuencas de estudio, que apoye a los tomadores de decisión y población en general a tomar medidas preventivas en el manejo del recurso hídrico.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar los cambios espacio temporal del rendimiento hídrico actual y bajo escenarios climáticos futuros en la región sur del Ecuador, utilizando el modelo *Water Yield* de InVEST.

1.4.2 Objetivos específicos

- Recopilar información geoespacial necesaria para la estimación del rendimiento hídrico actual y bajo escenarios de cambio climático.
- Estructurar y validar la información meteorológica a nivel temporal con el fin de contar con una base de datos suficiente y consistente de variables climáticas, mediante el uso de manejadores de base de datos.
- Generar imágenes de superficie de temperatura y precipitación con el método de interpolación *spline*, que permita llevar a cabo un análisis espacio temporal.
- Analizar tendencias de series climáticas utilizando el módulo *Earth Trends Modeler* del software TerrSet.
- Estimar el rendimiento hídrico actual y bajo escenarios de cambio climático utilizando el modelo *Water Yield* de InVEST.
- Analizar los cambios en el comportamiento espacio temporal entre el rendimiento hídrico actual y bajo escenarios de cambio climático.

2 MARCO CONCEPTUAL

2.1.1 Conceptualización e importancia de evaluar el rendimiento hídrico

Langbein y Iseri (1960) definen el rendimiento hídrico como “la precipitación menos la evapotranspiración”. De acuerdo con el Glosario Hidrológico Internacional (OMM, 2012), el rendimiento hídrico es la “cantidad de agua superficial o subterránea que se puede obtener para un uso determinado en una cuenca durante un intervalo de tiempo dado”. Este concepto permite expresar la esorrentía por unidad de área para cuantificar la oferta hídrica superficial, estimar valores en unidades hidrográficas no instrumentadas y establecer comparaciones en diferentes unidades de análisis (Sánchez et al., 2010).

La evapotranspiración, la capacidad de almacenamiento de agua en los suelos y la cantidad de precipitación determinan la cantidad de agua que finalmente llega a los ríos, es decir, el rendimiento hídrico depende de la interacción entre la cobertura, el suelo y el clima (Quintero, 2010). El rendimiento hídrico de una cuenca se puede evaluar en términos de su productividad de agua y de su eficiencia para producirla. La primera se expresa como caudal medio anual por unidad de área y la segunda está dada por el coeficiente de esorrentía medio anual:

$$\text{Productividad:} \quad l/s/Km^2 = \frac{Q}{A}, y$$

$$\text{Eficiencia:} \quad Ce (\%) = \frac{Q_L}{P} \times 100$$

Donde, Q es el caudal; A, área; Ce, coeficiente de esorrentía; Q_L , lámina escurrida anual; y P, precipitación. Cuanto mayor sean la precipitación y el escurrimiento en una cuenca y menor sea su evapotranspiración, mayor será su eficiencia hídrica; y cuanto mayor sean la precipitación y la eficiencia hídrica de una cuenca, mayor será su producción de agua (Silva León, 2005).

El conocimiento de la disponibilidad y la distribución de los recursos hídricos es fundamental para una adecuada planificación y gestión del agua. Su estimación interviene en aspectos de importancia como en el diseño de obras para el control de inundaciones, desarrollo de pronósticos oportunos, operación de obras existentes, en el suministro de agua, proyecciones

de disponibilidad del agua, construcción de centrales hidroeléctricas, planificación y gestión de los recursos, entre otros (Domínguez et al., 2008; Zhang et al., 2012).

2.1.2 Descripción del modelo *Water Yield (WY)* de InVEST

El modelo *WY*, se basa en la curva de Budyko y en la precipitación media anual [Ec. 2.1]. El modelo calcula el escurrimiento superficial medio (Y) en el píxel x del paisaje.

$$Y_x = \left(1 - \frac{ETR_x}{P_x}\right) P_x \quad [\text{Ec. 2.1}]$$

ETR_x es la evapotranspiración real anual del píxel x y P_x es la precipitación anual en el píxel x . La fracción $\frac{ETR_x}{P_x}$ se basa en una expresión de la curva de Budyko propuesta por Fu (1981) y Zhang et al. (2004) [Ec. 2.2]:

$$\frac{ETR_x}{P_x} = 1 + \frac{ETP_x}{P_x} - \left[1 + \left(\frac{ETP_x}{P_x}\right)^{\omega_x}\right]^{1/\omega_x} \quad [\text{Ec. 2.2}]$$

ETP_x es la evapotranspiración potencial y ω_x es un parámetro no físico que caracteriza las propiedades naturales clima-suelo, propuesto por Donohue et al. (2012). La ETP_x [Ec. 2.3] y ω_x [Ec. 2.4] se definen como:

$$ETP_x = K_c(l_x) \times ET_{0x} \quad [\text{Ec. 2.3}]$$

$$\omega_x = Z \times \frac{AWC_x}{P_x} + 1.25 \quad [\text{Ec. 2.4}]$$

Donde, ET_{0x} es la evapotranspiración de referencia del píxel x y K_c es el coeficiente de evapotranspiración de la planta asociado con el uso y cobertura del suelo (UCS) (l_x). ET_0 refleja las condiciones climáticas locales en función de la evapotranspiración de una vegetación de referencia, como la alfalfa. K_c ajusta los valores ET_0 de acuerdo con el tipo de vegetación del píxel x .

AWC_x es el contenido de agua disponible de la planta en mm y es definido a partir de la textura del suelo y la profundidad efectiva de las raíces. El AWC_x establece la cantidad de agua que se puede almacenar y liberar en el suelo para uso de una planta. Se estima como el

producto entre la capacidad disponible del agua (PAWC) y el valor mínimo entre la profundidad de la capa de restricción de las raíces o la profundidad de enraizamiento de la vegetación [Ec. 2.5]:

$$AWC_x = \text{Min} (\text{Rest. layer. depth}, \text{root. depth}) \times PAWC \quad [\text{Ec. 2.5}]$$

La profundidad de la capa de restricción de las raíces es la profundidad del suelo a la que se inhibe la penetración de la raíz debido a sus características físicas o químicas. La profundidad de enraizamiento de la vegetación se da a menudo como la profundidad a la que se produce el 95% de la biomasa de la raíz del tipo de vegetación. La PAWC es la capacidad disponible de agua para la planta, es decir, la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento.

Z es una constante empírica, que captura las características de la cuenca como: clima, la intensidad de la lluvia y la topografía. El término 1.25 es el valor mínimo de ω_x , que puede ser visto como un valor para el suelo desnudo (cuando la profundidad de la raíz es 0). Existen tres métodos para la determinación de Z propuestos por Sharp et al. (2018). El primero se basa en que Z está positivamente correlacionado con el número anual promedio de eventos de lluvia por año (N), y que Z puede estar aproximado a N/5 (Donohue et al., 2012). Esto implica que Z captura patrones de lluvia, distinguiendo entre cuencas con precipitación anual similar pero diferente intensidad (Hamel y Guswa, 2015). El segundo método se basa en despejar Z de la [Ec. 2.6], los valores de ω necesarios se encuentran disponibles a nivel mundial (Liang y Liu, 2014; Xu et al., 2013). En el tercer método, Z se determina a través de la calibración, esto consiste en comparar los datos estimados con datos observados.

Para los UCS sin vegetación (cuerpos de agua, urbanizaciones, etc.) la ETR se calcula directamente a partir de la ET_0 y tiene un límite superior definido por la precipitación [Ec. 2.6]:

$$ETR_x = \text{Min} (K_c(l_x) \times ET_{0x}, P_x) \quad [\text{Ec. 2.6}]$$

El modelo de rendimiento hídrico genera el escurrimiento superficial medio por pixel y un promedio a nivel de cuencas y subcuencas hidrográficas. Una descripción detallada del modelo se puede consultar en Sharp et al. (2018).

2.1.3 Influencia del uso y cobertura del suelo en el rendimiento hídrico

La importancia de considerar la vegetación es que ésta interviene en gran porcentaje como un factor en el ciclo hidrológico, fisiológicamente como medio de reserva temporal de agua a través del metabolismo, como soporte vital de la planta, puesto que el agua constituye parte de su estructura (García et al., 1999). De acuerdo a Zhang et al. (2001) la cobertura vegetal influye directamente en el rendimiento hídrico a través de su estructura, por interceptación de la lluvia y transpiración. En la ecuación del balance hídrico este elemento interviene activamente dentro del proceso de retención de humedad, que debe ser tomado en cuenta en el análisis del balance en una determinada región natural (Arias y Poveda, 2004; García et al., 1999).

2.1.4 Método de interpolación *Thin plate spline model*

La interpolación *Thin plate smoothing spline* fue desarrollada por Wahba y Wendelberger (1980) y su aplicación al análisis climático fue implementada por Hutchinson (1991). El método proporciona estimaciones exactas del clima al permitir una variación espacial de la dependencia de la topografía y es capaz de proporcionar una estimación directa del error de interpolación y un diagnóstico eficiente de los errores de datos (Hutchinson y Gessler, 1994 citado por Hijmans et al., 2005).

A continuación se describe de forma general una representación del modelo [Ec. 2.7] (Hutchinson 1995, Hutchinson 2006) :

$$Z_i = f(X_i) + e_i \quad (i = 1, \dots, n) \quad [\text{Ec. 2.7}]$$

donde X_i es un vector d-dimensional de las variables independientes del spline, representa la longitud, latitud y altitud; f es una función suavizadora desconocida que debe ser estimada. El e_i , es cero errores medios aleatorios que señalan un error de medición, al igual que las deficiencias en el modelo spline.

El valor del parámetro suavizador se determina al minimizar el error de la predicción a través de *Generalized Cross Validation* (GCV). El GCV es una prueba de validación que permite estimar los errores de interpolación que se obtienen al remover un punto y generar de nuevo las interpolaciones con los datos restantes a los cuales se les ha sumado el cuadrado de las

diferencias de cada uno de los datos omitidos a todas las estaciones restantes, para revisar que tan bien el punto omitido fue estimado (Cuervo-Robayo et al., 2014).

2.1.5 Método para evaluar tendencias y variabilidad climática

Existen dos métodos de obtención de una tendencia de largo plazo de series históricas. Uno de los métodos es mediante regresión sobre cada serie temporal de la variable geofísica en cada localización espacial, mientras que, un segundo tipo de técnicas buscan un patrón espacio-temporal de la variable (ONU, 2011). Muchas de las pruebas para la detección de tendencias significativas en las series temporales se pueden clasificar como métodos paramétricos, no paramétricos y mixtos (Meals et al., 2011). Mann-Kendall (MK) es un ejemplo de prueba no paramétrica que se ha aplicado en la detección de tendencias en varios estudios como por ejemplo Ordoñez (2015), Bautista et al. (2013), Li et al. (2011), Neeti y Eastman (2011), Puertas et al. (2011), Shadmani et al. (2011), Ceballos-Barbancho et al. (2008), Hamed (2008).

Earth Trends Modeler (ETM) del software TerrSet, es un conjunto integrado de herramientas para el análisis de series temporales de imágenes de superficie; como imágenes de satélite y mapas climáticos. La opción de la tendencia monotonica Mann-Kendall dentro de ETM proporciona un indicador de tendencia no lineal que mide el grado en que una tendencia está constantemente aumentando o disminuyendo (Eastman, 2016). Tiene un rango de -1 a +1. Un valor de +1 indica una tendencia que aumenta y nunca disminuye continuamente. Cuando tiene un valor de -1 la tendencia es negativa. Un valor de 0 indica que no hay una tendencia coherente. Todas las combinaciones de pares de valores a lo largo del tiempo se evalúan en cada píxel y se hace un recuento del número que está aumentando o está disminuyendo con el tiempo. La estadística de Mann-Kendall es simplemente la frecuencia relativa de aumentos menos la frecuencia relativa de disminuciones (Eastman, 2016; Meals et al., 2011).

2.1.6 Escenarios de cambio climático

En el desarrollo del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5), la comunidad científica ha definido un conjunto de cuatro escenarios nuevos de cambio climático denominados Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, acrónimo en inglés de *Representative*

Concentration Pathway). Los RCP se caracterizan por el cálculo aproximado que hacen del forzamiento radiativo total en el año 2100 en relación con 1750 (IPCC, 2013). La palabra representativa del RCP indica que cada trayectoria de representación ofrece uno de los muchos posibles escenarios que conducirían a las características específicas de forzamiento radiativo. La palabra trayectoria hace énfasis en que únicamente son de interés los niveles de concentración a largo plazo, pero también indica el camino seguido a lo largo del tiempo para llegar al resultado en cuestión (Moss et al., 2010). En la Tabla 2-1 se resumen los cuatro escenarios actuales.

Tabla 2-1. Descripción general de las trayectorias de concentración representativas (RCP) (Moss et al., 2010).

Nombre	Forzamiento radiativo (Wattios por metro cuadrado, $W m^{-2}$)	Concentración (ppm)	Trayectoria	Modelo
RCP8.5	$>8.5 W m^{-2}$ en 2100	$>1370 CO_2$ -eq en 2100	Aumento	MESSAGE
RCP6.0	Estabilización en $\sim 6 W m^{-2}$ después de 2100	$\sim 850 CO_2$ -eq en 2100 (Estabilización después del 2100)	Estabilización sin translimitaciones	AIM
RCP4.5	Estabilización en $\sim 4.5 W m^{-2}$ a partir de 2100	$\sim 650 CO_2$ -eq en 2100 (Estabilización después del 2100)	Estabilización sin translimitaciones	GCAM
RCP2.6	Máximo en $\sim 3 W m^{-2}$ antes de 2100 y posteriormente disminuye	Máximo en $\sim 650 CO_2$ -eq antes de 2100 y posteriormente disminuye	Máximo y disminuye	IMAGE

Los escenarios de RCP pueden representar una variedad de políticas climáticas del siglo XXI, frente a los escenarios del cuarto Informe de Evaluación (AR4) que no contemplaban políticas climáticas. Los escenarios de RCP se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos sencillos, modelos de la química atmosférica y modelos del ciclo global del carbono (IPCC, 2014b, 2013).

2.1.7 Modelos de circulación general atmósfera- océano

Los modelos informáticos del cambio climático que utiliza el IPCC son los modelos de circulación general atmósfera-océano (MCGAO), que resuelven las ecuaciones de la atmósfera y los océanos (IPCC, 1997). Tales como la conservación de la masa, la energía y el momento, para representar en tres dimensiones la atmósfera en forma de cuadrícula, que están regularmente espaciados (Oviedo Torres y León Aristizábal, 2010). A cada cuadrícula

se le asigna un valor promedio para propiedades como velocidad, temperatura, humedad (de la atmósfera) y salinidad (de los océanos). El tamaño de la cuadrícula es la resolución espacial del modelo, cuanto más pequeña es la cuadrícula más alta es la resolución (IPCC, 1997).

Los resultados obtenidos por los MCGAO en condiciones de cambio climático, particularmente en el caso de que la concentración de gases de efecto invernadero fuera duplicada, dan lugar a la construcción de escenarios de cambio climático para diversas variables y proyectados a diferentes horizontes. Las variables sobre las que se presta más atención, son la temperatura de superficie y la precipitación y, comúnmente, los horizontes proyectados se extienden hasta el 2100 (Conde y Gay, 2008).

2.1.8 Descripción del Programa de Comparación de Modelos Acoplados

El propósito del Programa de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP, acrónimo en inglés de *Coupled Models Inter-comparison Project Phase 5*) es proveer a científicos del clima una base de datos de simulaciones de Modelos de Circulación General (MCG) acoplados bajo condiciones de frontera estandarizados. Existieron varias fases del proyecto CMIP. En la quinta fase del CMIP denominado CMIP5, se incluyen dos tipos de experimentos de modelación del clima: 1) integraciones de largo plazo (escala de siglos) y 2) integraciones de corto plazo (10-30 años), también llamadas experimentos de período decenal (Taylor et al., 2012).

La comunidad científica y los centros de modelización del clima de todo el mundo conjuntaron sus actividades en el marco del proyecto CMIP5. El cual proporcionó la base para la mayor parte de la evaluación del cambio climático futuro del quinto informe del IPCC. Estos modelos simulan cambios basados en un conjunto de escenarios de forzamientos antropógenos (IPCC, 2013).

Para las nuevas simulaciones de modelos climáticos, realizadas en el proyecto CMIP5, se ha utilizado un nuevo conjunto de escenarios: los RCP (IPCC, 2013). Las simulaciones de los modelos del CMIP5 se encuentran disponibles sin costo alguno. Comparado con otras fases de CMIP, no solo hay mayor grupo de simulaciones sino también hay mayor documentación acerca de éstas. Una clave de la utilidad del CMIP5 es que todas las simulaciones de los modelos conforman un estándar y esta localizados en un archivo que aparece a los usuarios

como una base de datos unificada (Taylor et al., 2012). Existen en total 45 modelos disponibles de 21 instituciones alrededor del mundo. De estos 45 modelos, pocos tienen simulaciones para los cuatro RCP. La mayoría cuenta con simulaciones del RCP8.5 y RCP4.5, sin embargo, para el RCP6.0 casi la mitad de éstos generaron datos (Salinas et al., 2014).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se describe el área de estudio y el proceso que se siguió para el cumplimiento de los objetivos propuestos en la presente investigación.

3.1 Área de estudio

El estudio se desarrolló en nueve cuencas hidrográficas de la región sur del Ecuador, localizadas en las provincias de El Oro, Loja y Zamora Chinchipe denominadas en conjunto como Zona de Planificación Siete (ZP7, división política administrativa) (Figura 3-1). La extensión de la ZP7 es de 27491.9 km², comprendida entre: 3°02' y 5°00' sur, y 78°21' y 80°29' oeste, su altitud varía de 0 a ~3500 msnm. Limita al norte con las provincias de Morona Santiago, Azuay y Guayas; al sur, este y oeste con Perú.

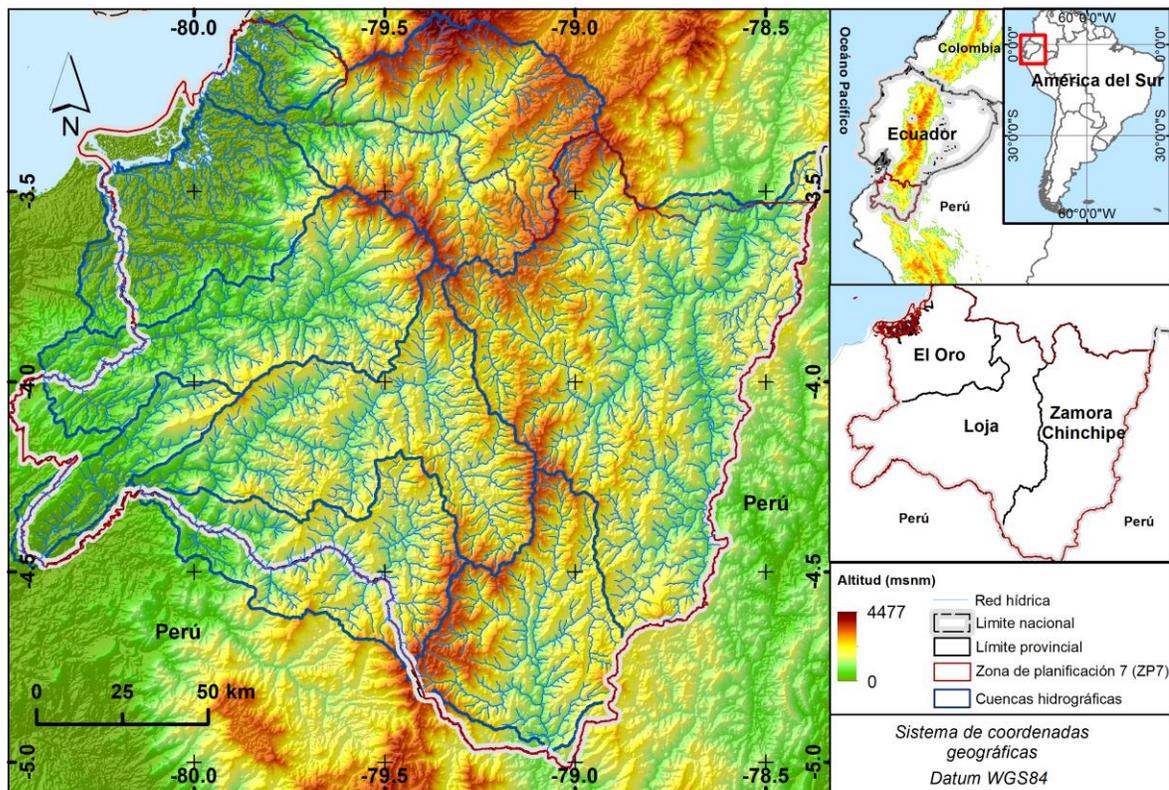


Figura 3-1. Ubicación del área de estudio.

De acuerdo con la clasificación climática de Thornthwaite realizada por el INAMHI (2006), existen 16 tipos de clima para la región sur del Ecuador (Figura 3-2). Los climas predominantes son: húmedo con pequeño déficit de agua - mesotérmico templado cálido,

subhúmedo con pequeño déficit de agua - mesotérmico templado frío, y subhúmedo con moderado déficit de agua en época seca – megatérmico. Los diversos tipos de clima son identificados en función a tres criterios: régimen hídrico, régimen térmico y variación estacional de la humedad.

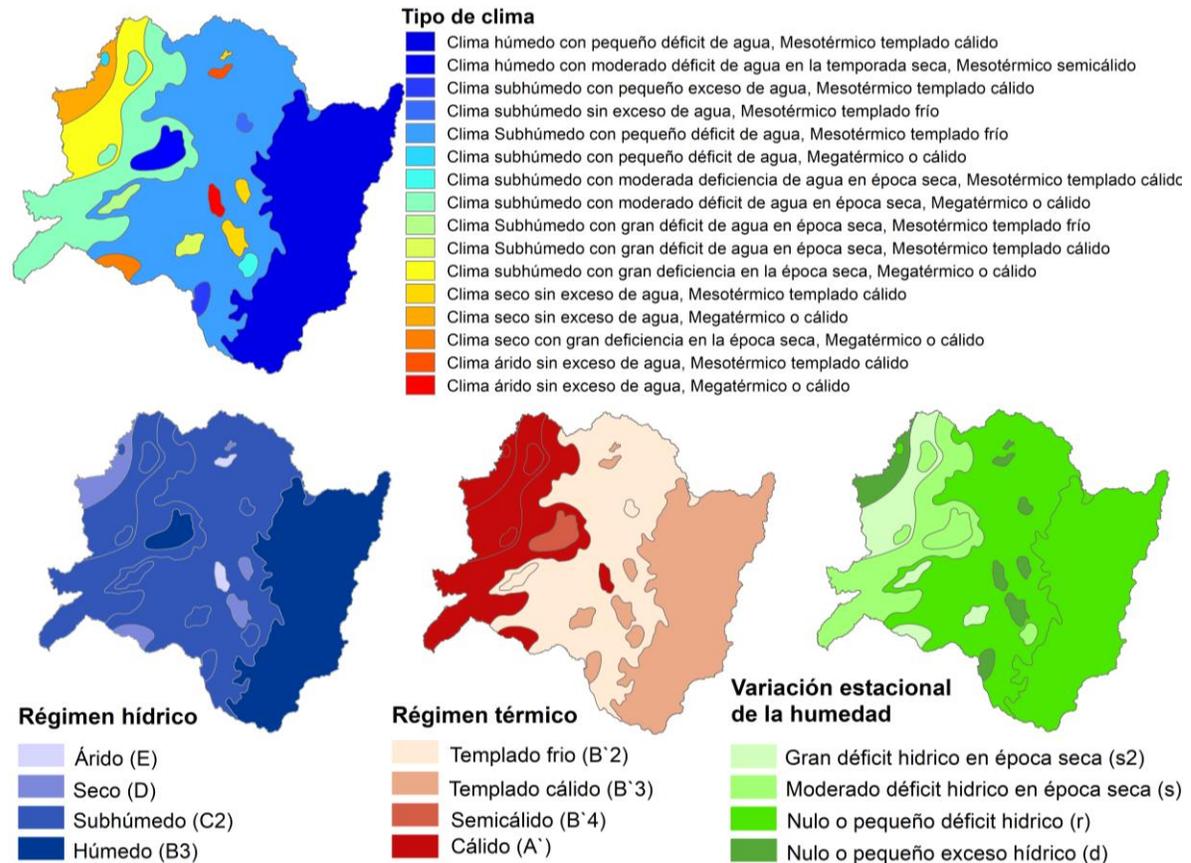


Figura 3-2. Clasificación climática (método de Thornthwaite) para el área de estudio. Elaboración propia a partir de datos del INAMHI (2006).

Los principales factores que influyen en el clima de la región son fenómenos oceográficos, como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y la corriente de Humboldt (Maldonado A., 2001). Así como la presencia de la Cordillera de Los Andes, siendo esta región uno de los sectores más bajos de la cadena montañosa (Figura 3-3). Se denomina a la región como depresión de Los Andes, aquí, los sectores altos son extremadamente húmedos durante todo el año y las vertientes de sotavento, secas. La región presenta un extremo gradiente vertical de precipitación y una fragmentación del relieve en valles y sierras, lo que conduce a una gran heterogeneidad climática (Richter y Moreira, 2005).

La región sur del Ecuador posee una enorme diversidad florística y formaciones vegetales. Presenta el 44 % de las especies de plantas vasculares y el 36 % de endemismo con respecto al resto del país. Así como, 17 tipos de vegetación que varían de acuerdo con el tipo de clima (Lozano, 2002).

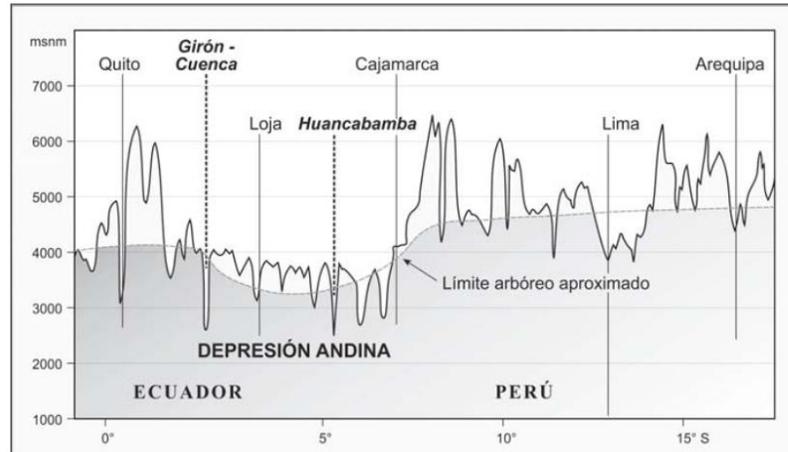


Figura 3-3. Depresión de Los Andes (Richter y Moreira, 2005).

El UCS de la región en su mayoría es bosque nativo (43%), principalmente en Zamora Chinchipe y Loja, y tierras agropecuarias (40%) como cultivos, pastizales y mosaico agropecuarios, especialmente en El Oro y Loja (Figura 3-4) (MAE, 2014).

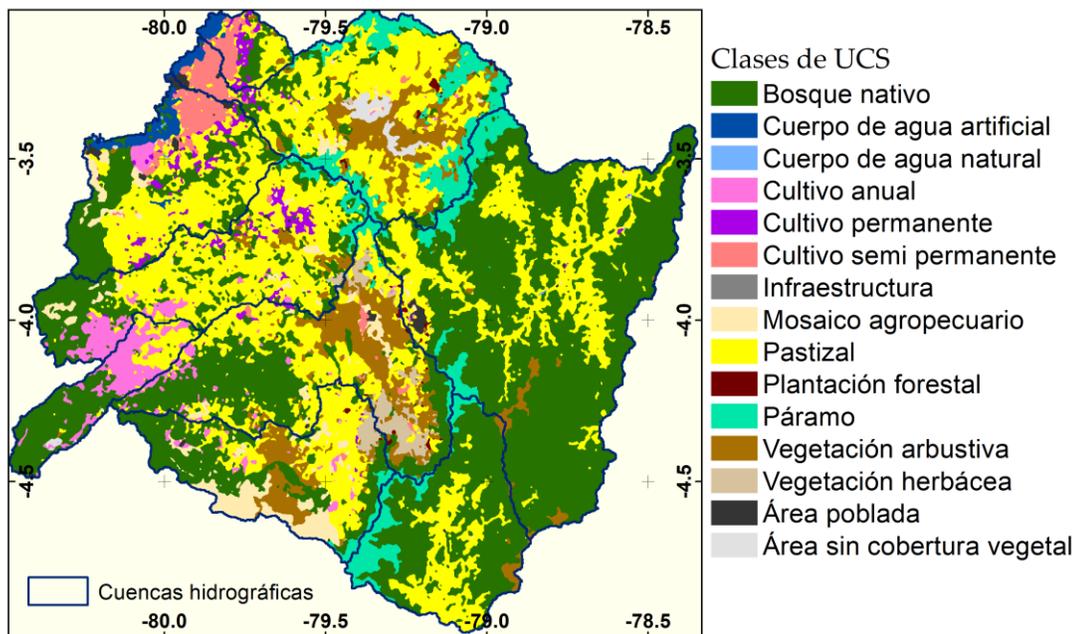


Figura 3-4. Uso y cobertura del suelo (UCS) del área de estudio. Elaboración propia a partir de información del MAE (2014).

En el año 2010 la población de la ZP7 fue de 1141001 habitantes, que corresponde al 7.9% del total nacional. La provincia de El Oro cuenta con el 53% del total de la población zonal, Loja con el 39% y Zamora Chinchipe con el 8.0% (INEC, 2017).

3.2 Recopilación de información geoespacial

La información geoespacial utilizada en el presente estudio se detalla en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Información geoespacial.

Información	Fuente	Enlace de descarga	Formato y resolución	Fecha de descarga	Aplicación
Límites políticos-administrativos de la ZP7	Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES)	http://sni.gob.ec/inicio	Shapefile (.shp) Escala 1:150000	29 de marzo 2017	Delimitación del área de estudio
Modelo numérico de altitud (MNA)	Consultative Group on International Agricultural Research – Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI)	http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp	GeoTiff (.tif) 3 segundos de arco (~90 m)	27 de marzo 2017	Generación de superficies climáticas y delimitación de cuencas hidrográficas
Mapa de uso y cobertura del suelo (UCS) del Ecuador: 2013-2014	Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE)	http://mapainteractivo.ambiente.gob.ec/	Shapefile (.shp) Escala 1:100000	29 de marzo 2017	Estimación del rendimiento hídrico
Radiación solar extraterrestre (Ra)	Proyecto Global-Aridity y Global-PET (CGIAR-CSI)	https://cgiarcsi.community/data/global-aridity-and-pet-database/	Arc/Info (.adf) 1.5 minutos de arco (~3 km ²)	01 de junio de 2017	Estimación de la Evapotranspiración de referencia (ET_0)
Profundidad del suelo	Food and Agriculture Organization (FAO), International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (ISS-CAS)	http://webarchiv.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/	Banda intercalada por línea (.bil) y Archivo access (.mdb)	03 de febrero de 2018	Estimación del rendimiento hídrico
Contenido de agua disponible de la planta (PAWC)	Joint Research Centre of the European Commission (JRC)				
Proyecciones de precipitación, temperatura media, mínima y máxima a nivel global bajo escenarios de cambio climático	Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS)	http://ccaafs-climate.org/data_spatial_downs_caling/	GeoTiff (.tif) 30 segundos de arco (~1 km)	04 de enero de 2018	Estimación del rendimiento hídrico futuro

El MNA procede de los datos USGS/NASA, éstos contienen agujeros "sin datos" donde el agua o la sombra impidieron la cuantificación de la elevación. Aunque, se trata de pequeños agujeros, hacen que los datos sean menos útiles, especialmente en el campo hidrológico. El CGIAR-CSI (Jarvis et al., 2008) procesó estos datos para proporcionar superficies de topografía continua, utilizando métodos de interpolación descritos por Reuter et al. (2007).

3.3 Estructuración y validación de datos meteorológicos

Se recopilaron registros históricos mensuales de las variables: precipitación acumulada, temperatura media, mínima y máxima para el período 1960 - 2015. Información, que se obtuvo de la red de estaciones climatológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador (INAMHI), Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú (SENAMHI) y de la Estación Científica San Francisco (ECSF). En la Figura 3-5 se presenta la distribución de las estaciones meteorológicas en la zona de estudio de acuerdo con su altitud.

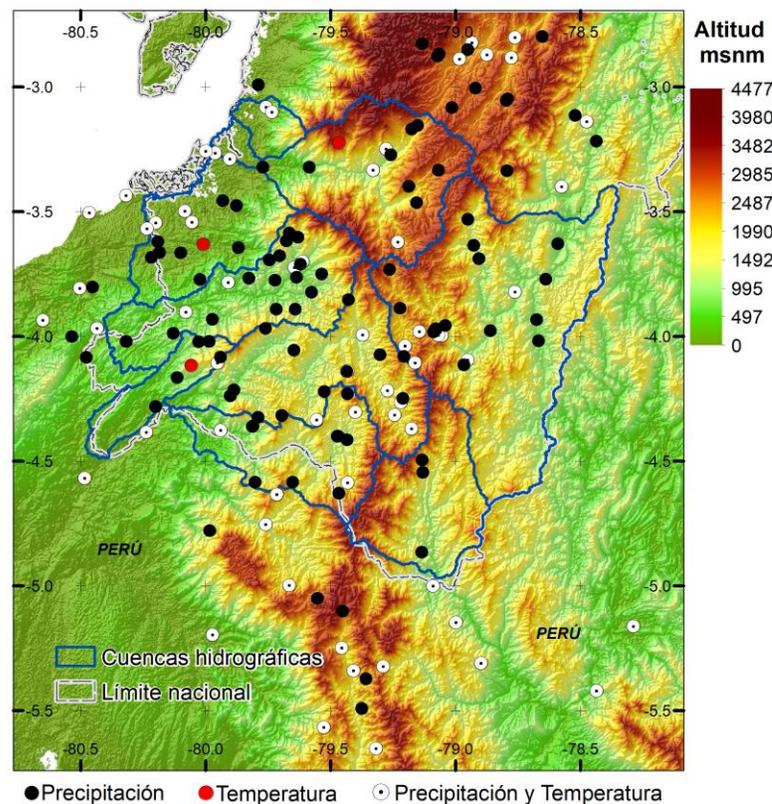


Figura 3-5. Ubicación y distribución de estaciones meteorológicas en región sur del Ecuador y norte del Perú.

La estructuración y validación de datos se desarrolló en el lenguaje de programación R, se usó librerías y funciones existentes. Este proceso, consistió en: unificar la información en una base de datos, elaborar gráficas de disponibilidad de datos y detectar valores atípicos.

(1) Unificar la información en una base de datos por variable

Los datos meteorológicos fueron proporcionados en diferente formato y escala temporal (Tabla 3-2); éstos se importaron a R. La escala temporal con la que se trabajó es mensual, por lo que los datos horarios y diarios fueron transformados en mensuales.

Tabla 3-2. Información meteorológica recopilada.

Institución (Fuente)	Escala temporal	Formato	Número de estaciones		
			Precipitación	Temperatura media	Temperatura Máxima y Mínima
ECSF	Horario	Texto (.csv)	13	-	4
SENAMHI	Diaria	Texto (.txt)	8	7	4
SENAMHI	Mensual	Hoja de cálculo (.xls)	24	15	16
INAMHI	Mensual	Texto (.txt)	115	40	40
Total			160	62	64

Para obtener los valores mensuales se siguió las recomendaciones de la OMM (2011). En el caso de temperatura el valor mensual es el promedio de los datos diarios, no se calculó un valor mensual si faltan más de 10 datos diarios o 5 datos diarios consecutivos. En precipitación el valor mensual es la suma de los datos diarios, se calculó el valor mensual solo si se dispone de todas las observaciones diarias. Para obtener el valor diario a partir del horario se aplicó las mismas condiciones.

(2) Elaborar gráfica de disponibilidad de datos

Para detectar huecos de información durante el periodo 1960-2015, se realizó una suma de los registros mensuales de la siguiente manera: si hay dato en el mes, se ubica un valor de 1, si no hay dato (NA), se ubica un valor de 0. Se sumó los valores agrupándolos por año y por mes, como resultado se tiene el número de datos disponibles por año y por mes. Complementario a esto se elaboró gráficas de disponibilidad de datos por estación meteorológica, en el Anexo A se presentan las librerías y rutinas seguidas para su elaboración.

En la Figura 3-6 se presenta la estructura de la información mensual utilizada en la elaboración de las gráficas. Las gráficas fueron utilizadas para establecer el periodo de análisis del presente estudio.

	Código	Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	M0012	1982	NA	NA	0.9	29.3	7.6	5.4	2.9	NA	NA	NA	NA	NA
2	M0012	1983	NA	410.5	488.2	544.3	311.7	281.3	95.1	4.5	NA	20.3	NA	NA
3	M0012	1984	6.2	268.7	110.6	31.1	15.0	8.2	6.0	9.9	7.9	12.0	3.8	28.4
4	M0012	1985	27.1	13.8	79.3	0.4	6.5	3.0	22.0	2.7	3.1	6.9	0.0	6.0
5	M0012	1986	173.0	35.8	0.0	96.0	8.2	0.0	5.0	4.6	8.3	5.3	0.7	2.0
6	M0012	1987	164.1	NA	181.8	267.1	0.0	0.0	3.2	6.3	6.0	7.6	0.9	3.5
7	M0012	1988	86.3	141.2	12.0	46.2	9.6	0.0	2.2	4.6	5.1	7.1	9.8	3.4
8	M0012	1989	163.0	271.5	66.5	28.7	4.0	3.0	0.2	NA	NA	NA	NA	2.0
9	M0012	2003	42.7	72.1	18.0	0.0	6.2	36.0	9.4	0.0	0.0	0.0	0.0	39.8

Showing 1 to 9 of 3,838 entries

Figura 3-6. Ejemplo de la estructura de la información meteorológica.

(3) Detectar valores atípicos

Con el periodo de análisis establecido, se identificó valores atípicos para su posterior validación, corrección o eliminación del valor. Este proceso se realizó con la ayuda de diagramas de caja. Los diagramas de caja fueron graficados considerando todos los datos de la serie mensual por variable.

Para la identificación de datos atípicos en las variables temperatura media, máxima y mínima se estableció un valor límite de 1.5 veces el rango intercuartílico (RIC); mientras que para precipitación se tomó en cuenta que la variabilidad de datos es mucho mayor, por lo que se fijó un límite de 3 veces el RIC. Límite, que es usado comúnmente para identificar datos extremos, esto ayudó a detectar solamente valores fuera de contexto que ocurrirían en caso de error informático o error a la hora de transcribir los datos (Trenberth y Paolino 1980; Peterson et al. 1998a citado por De Luque, 2011). Los datos atípicos y extremos se graficaron con un símbolo circular negro.

Para la validación, corrección o eliminación de los datos atípicos o extremos, se basó en:

- Revisión de información histórica: anuarios meteorológicos y estudios climáticos realizados en la zona.
- Verificación con estaciones vecinas: cuando el dato es sospechoso se revisa las estaciones cercanas, si éstas presentan valores similares se conserva el dato, caso contrario se elimina.
- Localización del valor sospechoso: para las estaciones ubicadas en la costa del Ecuador se consideró los valores extremos presentados en los años Niño (Tabla 3-3). Se eliminaron valores atípicos que superaron valores registrados en el evento de 1982/83, el cual fue considerado como año excepcional con lluvias también excepcionales sobre la vertiente occidental de la cordillera de Los Andes, cuyos aumentos significaron entre 50 y 1000 % de la media de los años normales (Corporación Andina de Fomento, 2000; Frederic, 1997).

Tabla 3-3. Clasificación de eventos de El Niño

Magnitud	Años Niño	Anomalías de TSM* acumulada (°C)	Índice de excesos de precipitación (mm)	Duración del evento (meses)
Débiles	1931, 1932, 1973, 1976	3 - 5	100– 350	4-5
Moderados	1926, 1932, 1951, 1953, 1958, 1972	6 - 12	400 – 750	
Fuertes	1957, 1965	14 – 20	1100 – 1500	
Excepcionales	1982/1983, 1997/1998	34.5	> 2630	11 19

*Temperatura superficial del mar

Fuente: Información recopilada de Frederic (1997) y Corporacion Andina de Fomento (2000)

3.4 Generación de imágenes de superficie de precipitación y temperatura

Para la generación de imágenes de superficie tanto de precipitación y temperatura media, mínima y máxima se utilizó el algoritmo suavizado de placa delgada (*thin-plate smoothing*) implementado en el software ANUSPLIN versión 4.36 desarrollado por Hutchinson (2006). En particular, se trabajó con los módulos SPLINA y LAPGRID, el primero para la generación de las interpolaciones y análisis estadísticos y el segundo para la espacialización de la información. Se usó el *spline* de segundo orden recomendado por Hijmans et al. 2005, el cual usa latitud, longitud y elevación como variables independientes; produce errores de validación cruzada bajos comparados con otros ajustes (por ejemplo, spline de tercer orden,

elevación como covariable) (Hijmans et al., 2005). En la Figura 3-7 se detalla el proceso general para la obtención de las superficies climáticas.

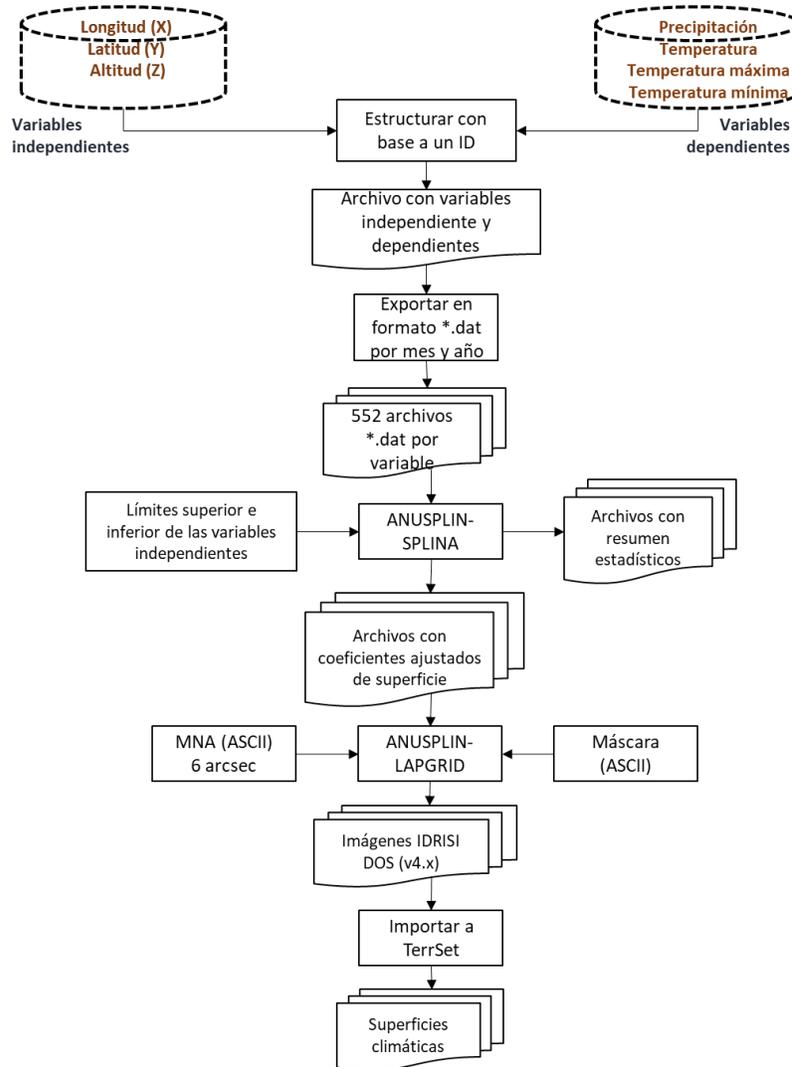


Figura 3-7. Diagrama de flujo de la generación de imágenes de superficie de precipitación y temperatura.

La ubicación de cada estación meteorológica (latitud y longitud) se obtuvo de la fuente correspondiente de cada base de datos (INAMHI, SENAMHI y ESCF). Posteriormente, se utilizó la ubicación de cada estación y el MNA del *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) para obtener la elevación. Esto con la finalidad de que la elevación se corresponda con el MNA, ya que el modelo será utilizado por el software ANUSPLIN-LAPGRID en la interpolación. La resolución del MNA es de 3 segundos de arco (~90 m), ésta, fue ajusta a 6 segundos de arcos (~185 m) para una mejor manipulación de la información ráster; así como

para una mejor eficiencia del proceso. Estos procesos se realizaron en el software TerrSet (Eastman, 2016).

Para identificar posibles errores en la altitud se compararon las elevaciones extraídas del MNA con las elevaciones reportadas por las instituciones encargadas, con el fin de verificar similitud (Anexo B). Este, es un proceso importante ya que el software ANUSPLIN-SPLINA produce una lista de las estaciones con un alto valor del cuadrado medio residual (es decir, la diferencia entre los datos de la estación y la superficie climática ajustada). Los residuos muy grandes se debe desde errores tipográficos simples, hasta errores en ubicación y elevación (Hijmans et al., 2005).

A la base de datos meteorológicos previamente estructurada (Figura 3-6), se le incorporó la ubicación (latitud / longitud) y la elevación de cada estación meteorológica, en unidades de grados decimales y en metros, respectivamente. Posteriormente se exportó archivos mensuales en formato DAT (.dat) requerido por ANUSPLIN-SPLINA. El objetivo fue obtener imágenes mensuales por año para el periodo 1970-2015 (46 años), se trabajó con 552 archivos de texto para cada variable. En la Figura 3-8 se presenta un ejemplo de la estructura del archivo .dat para el año 1970. La columna ID es el identificador único de la estación, las variables independientes (longitud, latitud y altitud) y la variable dependiente (X_1, X_2, \dots, X_{12}) en este caso precipitación. El X_1 representa la precipitación del mes de enero; el X_2 , febrero; X_3 , marzo; así sucesivamente, contando con un total de 12 archivos .dat por año.

ID	Longitud	Latitud	Altitud	X12
3	-79.20111	-4.036389	2132	131.7
4	-79.76889	-3.321940	44	60.3
5	-79.37083	-3.992778	1219	21.4
7	-78.98333	-2.886667	2523	90.5
8	-79.96111	-3.263889	6	3.1
9	-78.76278	-2.800000	2185	28.7
10	-78.77639	-2.881944	2272	73.5
11	-78.87472	-2.870278	2517	88.3
12	-79.23389	-3.611944	2389	39.0
13	-79.27111	-4.216111	1486	105.2
14	-79.21778	-4.262778	1553	64.2

Figura 3-8. Estructura del archivo de texto (.dat), ejemplo para el año 1970.

En la Tabla 3-4 se presenta los datos de entrada requeridos por ANUSPLIN-SPLINA para la interpolación.

Tabla 3-4. Datos de entrada requeridos por el módulo ANUSPLIN-SPLINA.

Datos de entrada	Detalles
Número de variables independiente	3: (1) longitud, (2) latitud y (3) altitud
Límites inferior y superior de cada variable independiente	Longitud: -80.7800 -77.7000 Latitud: -5.78000 -2.70000 Altitud: 0 4477
Transformaciones opcionales de cada variable independiente y dependiente.	De las variables independientes, únicamente a la altitud se le aplicó transformación, de metros a kilómetros. La variable dependiente (precipitación) fue transformada calculando la raíz cuadrada, por ser una variable que naturalmente no presenta valores negativos. El efecto que presenta esta transformación es que aplica mayor suavizado a valores altos de precipitación y menor a los valores bajos (Hutchinson 2006).
Orden del spline	Spline de orden dos (recomendado por el programa)
Número de superficies	1, se generó imágenes de superficie a nivel mensual
Suavizado óptimo	Validación cruzada generalizada (GCV, acrónimo en inglés)
Archivo de datos (.dat)	Nombre del archivo con su respectiva extensión, ejemplo: Prt1970_01.dat
Número máximo de datos	150, cantidad máxima de datos que posee los archivos .dat.
Número de caracteres del ID de la estación	Como opción máxima 20
Nombres de los archivos de salida	Especificaciones de los nombres de archivo de salida, en este caso solo nos interesaba la matriz de covarianza y los coeficientes de la superficie ajustada. Archivos que utiliza el programa LAPGRD más adelante.

Finalmente, las superficies climáticas de los 552 meses se generaron con el módulo ANUSPLIN-LAPGRD, utilizando los coeficientes de superficie ajustados por SPLINA (Hutchinson 2006). Adicional a esto, el módulo LAPGRD requiere el MNA en formato ASCII. Las superficies climáticas fueron generadas como archivos de imagen IDRISI for DOS (v4.x), las cuales fueron importadas en el software TerrSet (Eastman, 2016) para su posterior análisis. Las superficies constan de 1848 columnas y 1848 filas, todas las celdas tienen una resolución horizontal y vertical de 6 segundos de arco.

Las superficies climáticas de precipitación y temperatura media fueron utilizadas para la caracterización espacio- temporal de la zona de estudio y análisis de tendencias; mientras que las imágenes de temperatura mínima y máxima para la generación de imágenes de evapotranspiración. Información, indispensable para la estimación del rendimiento hídrico.

3.5 Análisis de tendencias de series climáticas

Se utilizó el módulo *Earth Trends Modeler* (ETM) del software TerrSet (Eastman, 2016). Los datos de entrada fueron las imágenes de superficie de temperatura media y precipitación en formato IDRISI raster (.rst) a una resolución de 6 segundos de arco. Se utilizó el módulo *Explore Space/Dynamics* para la creación de las series de tiempo.

Para el análisis de la serie y su tendencia a nivel temporal, se utilizó el módulo *Explore Temporal Profiles* opción tendencia lineal, que no es más que el método de mínimos cuadrados. Se graficaron los valores medios de todos los píxeles de las series de imágenes para un área definida, en este caso a nivel de ZP7 y unidades hidrográficas. La variación de la tendencia en el tiempo fue expresada como la diferencia entre el valor inicial y final de la recta de tendencia.

En cuanto al análisis de tendencias a nivel espacial se utilizó la prueba de Mann-Kendall, estadístico tau (t). Un $t = 0$ indica la inexistencia de tendencia, mientras se aleje de 0 y se aproxime a 1 estaríamos ante la existencia de una tendencia positiva o negativa dependiendo del signo.

3.6 Estimación del rendimiento hídrico en el área de estudio

La producción del agua se estimó utilizando el modelo WY de InVEST 3.4.4 (Figura 3-9), detalles del modelo se describen en la sección 2.1.2, así como también en Sharp et al. (2018). Primero, se detalla el proceso para la generación y preparación de los datos requeridos por el modelo; segundo, el proceso de calibración del modelo; y tercero, la estimación del rendimiento hídrico actual.

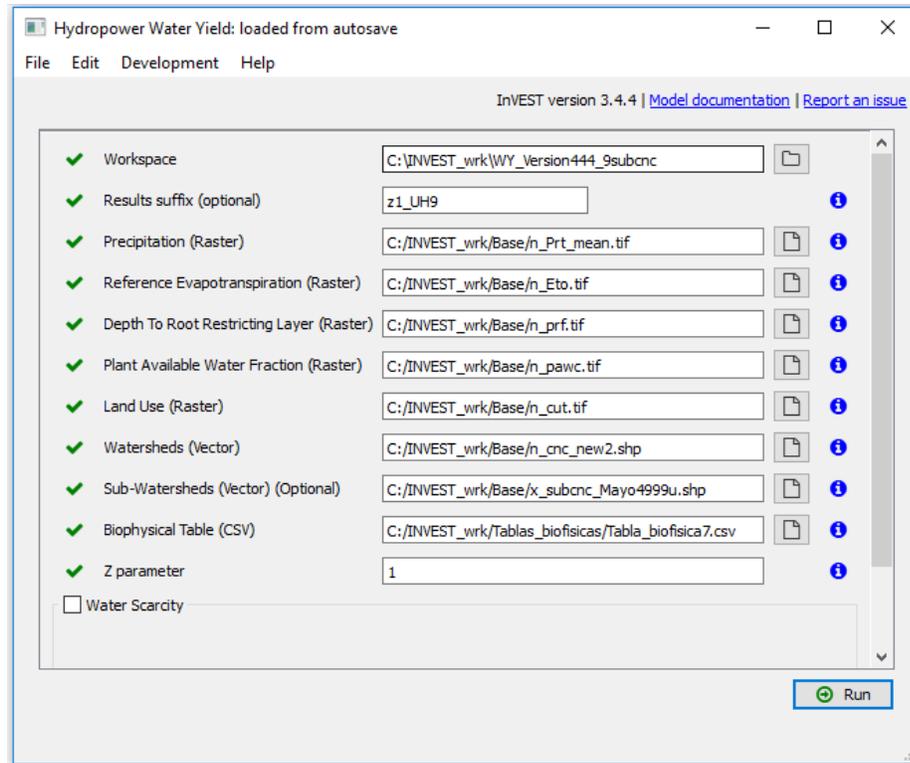


Figura 3-9. Interfaz gráfica del modelo WY de InVEST.

3.6.1 Generación y preparación de datos requeridos por el modelo *Water Yield* de InVEST

Los datos requeridos por el modelo WY son: precipitación anual promedio, evapotranspiración de referencia anual promedio, UCS, fracción de agua disponible para la planta (PAWC), profundidad del suelo, cuencas hidrográficas, tabla biofísica y el parámetro ecohidrológico Z. Para el manejo y estructuración de base de datos cartográficos en capas temáticas se utilizó el software TerrSet (Eastman, 2016).

Unidades hidrográficas

Las unidades hidrográficas se encuentran delimitadas para todo el Ecuador (SENAGUA et al., 2009), sin embargo, para fines del presente estudio fue necesario generar las cuencas considerando límites naturales y no políticos; así como también, evitar el solapamiento de información por diferencia de escala o resolución.

Para generar las cuencas hidrográficas se utilizó el módulo *Watershed* del software TerrSet (Eastman, 2016). El módulo delimitó las cuencas hidrográficas a partir de un MNA (Tabla 3-1), y la localización de exutorios (Tabla 3-5). Para la localización de exutorios se usó como guía el documento *Delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas del Ecuador, nivel 2* (SENAGUA et al., 2009). En la Tabla 3-5 y Figura 3-14 se presentan las características principales de las cuencas hidrográficas delimitadas.

Tabla 3-5. Cuencas hidrográficas de la región sur del Ecuador.

Id	Cuenca	Localización de exutorio		Desembocadura	Observaciones
		Longitud	Latitud		
1	Alamor	-80.39	-4.486	Río Chira (Perú)	
2	Macará	-80.14	-4.29	Río Chira (Perú)	Cuenca binacional (Ecuador-Perú)
3	Catamayo	-80.14	-4.28	Río Chira (Perú)	
4	Puyango	-80.40	-3.98	Río Tumbes (Perú)	Cuenca binacional (Ecuador-Perú)
5	Santa Rosa	-80.07*	-3.42*	Océano Pacífico	Agrupar las subcuencas Santa Rosa, Arenillas y Zarumilla
6	Jubones	-79.95	-3.19	Océano Pacífico	
7	Pagua	-79.87*	-3.07*	Océano Pacífico	Agrupar la subcuenca Siete y Pagua
8	Zamora en Chuchumbeza	-78.53	-3.53	Río Santiago (Ecuador)	Hasta la unión con el río Chuchumbeza
9	Mayo	-79.07	-4.97	Río Canchis (Perú)	

*Ubicación referencia de exutorios, cuencas hidrográficas que poseen varios puntos de escurrimiento hacia el océano Pacífico.

Precipitación

Se cuenta con una serie mensual de 552 imágenes ráster que pertenecen al periodo 1970-2015. Las imágenes fueron agrupadas por mes con el fin de obtener una imagen promedio de cada mes para el periodo analizado. Las 12 imágenes mensuales promedio fueron sumadas para obtener el promedio anual acumulado. Este proceso se realizó con la ayuda del *Macro-*

model del software TerrSet (Eastman, 2016). Finalmente, la imagen fue exportada de formato IDRISI raster (.rst) a GeoTiff (.tif), formato requerido por el modelo WY. La metodología para obtener las imágenes de precipitación se detalló en la sección 3.4.

Evapotranspiración de referencia

Se utilizó la ecuación de Hargreaves [Ec. 3.1], la cual estima la evapotranspiración a partir de la temperatura máxima (T_{max} , °C), mínima (T_{min} , °C) y radiación solar extraterrestre (Ra , mm/día). Las series de T_{max} y T_{min} se obtuvieron siguiendo la metodología presentada en la sección 3.4 y la Ra , de la base de datos del CGIAR-CSI a una resolución de 1.5 minutos de arco (Tabla 3-1). Se ajustó la resolución de las imágenes de Ra a 6 segundos de arco. En el área de estudio, el rango máximo de variación espacial de la Ra es de 0.35 mm (13.22-12.87 mm) en el mes de junio; mientras que el rango mínimo de variación es en el mes de marzo con 0.002 mm (15.561-15.563 mm). Lo que indica que la variación de la Ra en el área de estudio es relativamente pequeña y que el ajuste de resolución no afecta la estimación de la ET_0 .

El desarrollo de la ecuación se llevó a cabo en el software TerrSet (Eastman, 2016), mediante el uso del *Macro Modeler*. La ecuación se dividió en tres grupos: A, B y C (Ecuación 6) para facilitar la operación. En la Figura 3-10 se presenta el proceso para obtener las tres operaciones.

$$ET_0 = \underbrace{0.0023}_{A} Ra \left[\underbrace{\left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) + 17.8}_{B} \right] \underbrace{(T_{max} - T_{min})^{0.5} \left(\frac{mm}{d} \right)}_{C} \quad [\text{Ec. 3.1}]$$

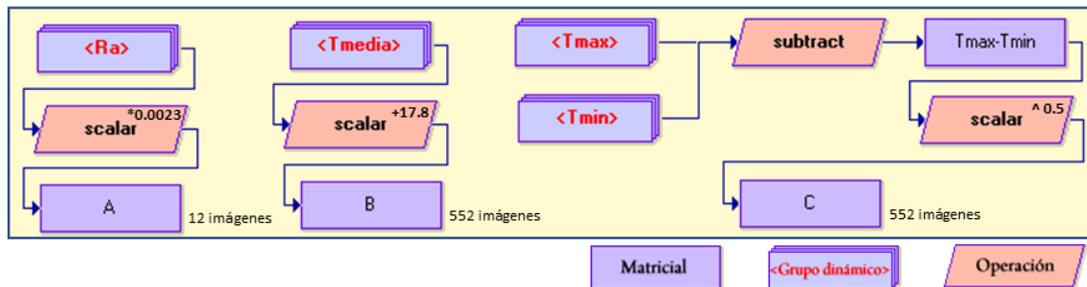


Figura 3-10. Diagrama para obtener A, B y C con el uso del *Macro Modeler*.

Ra es una serie de 12 imágenes; T_{media} , T_{max} y T_{min} , series de 552 imágenes. Para aplicar la [Ec. 3.1], se tomó en cuenta que la Ra varía de acuerdo con el mes; por lo que se agrupó las series B y C por meses. Para agrupar se consideraron los años bisiestos, se contó con un total de 13 grupos (46 eneros, 35 febreros, 11 febreros- bisiestos, 46 marzos, ..., 46 diciembres).

La Figura 3-11 presenta el proceso realizado en el *Macro Model* para obtener la ET_0 mensual. Se multiplicó $A \times B \times C$ para obtener la ET_0 diaria, posteriormente se multiplicó por el número de días de cada mes para obtener la ET_0 mensual. En el caso de las series de febrero, el grupo de 11 meses que pertenecen a años bisiestos, fueron multiplicados por 28 (días) y el otro grupo de 35 meses fueron multiplicados por 29 (días) (Figura 3-12).

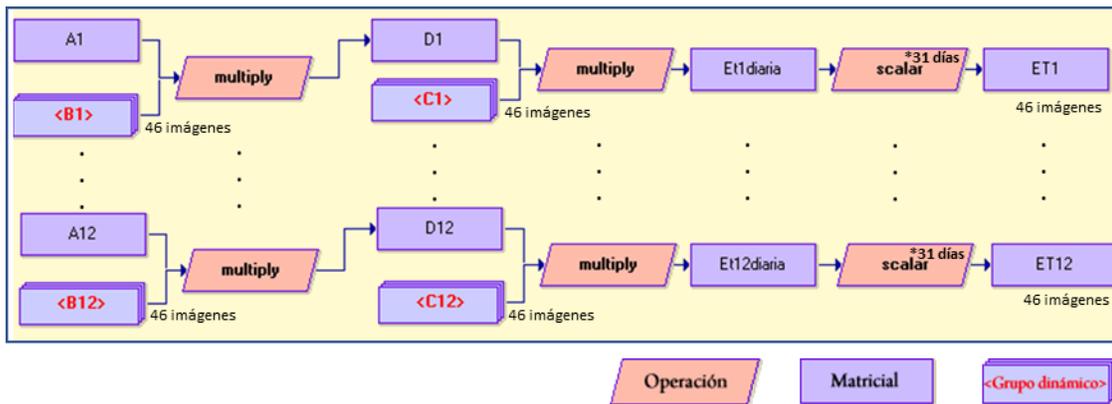


Figura 3-11. Diagrama para obtener ET_0 mensual en el *Macro Modeler*, aplicando la ecuación de Hargreaves.

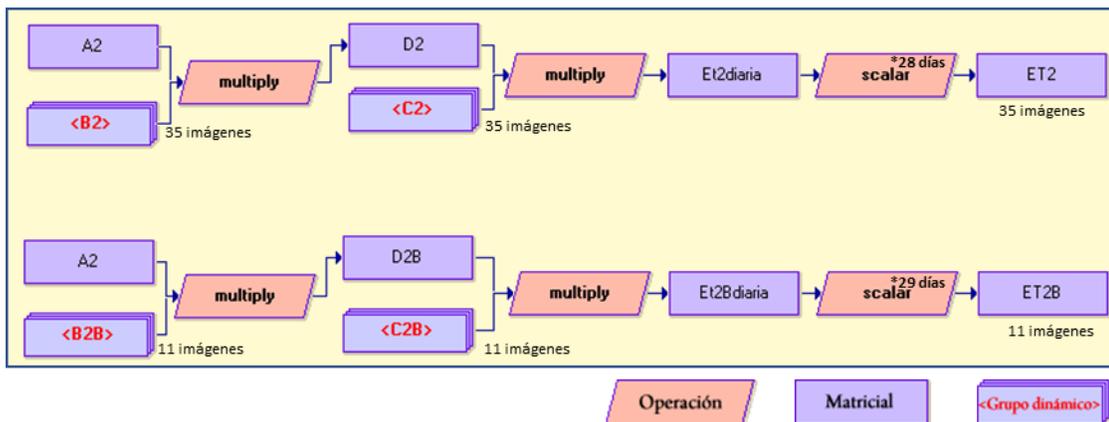


Figura 3-12. Diagrama para obtener ET_0 de los meses de febrero en el *Macro Modeler*, aplicando la ecuación de Hargreaves.

Al igual que en las variables precipitación y temperatura, se contó con una serie de 552 imágenes mensuales. Las cuales fueron agrupadas por meses, para obtener una imagen promedio por mes. Finalmente se suman las 12 imágenes promedios para obtener una imagen anual promedio del periodo 1970-2015.

Uso y cobertura del suelo (UCS)

El UCS se obtuvo de la base de datos del Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE) a una escala de 1: 100000, correspondiente a los años 2013-2014. A partir de esta información se generó una imagen ráster, se consideró el nivel II de la clasificación propuesta por el MAE-MAGAP (2015), lo cual corresponde a 15 clases de UCS para el área de estudio. La imagen ráster contiene un identificador (ID) para cada píxel vinculado a cada clase de UCS (Tabla 3-6).

Profundidad de la capa de restricción de raíz

La profundidad de la capa que restringe la raíz es la profundidad del suelo en la que la penetración de la raíz está fuertemente inhibida debido a las características físicas o químicas. En este caso, no se contó con la disponibilidad de esta capa, por lo que se usó la profundidad del suelo siguiendo la recomendación dada por Sharp et al. (2018).

La profundidad del suelo se obtuvo de la base de datos *Harmonized World Soil Database (HWSD)* versión 1.2 (FAO et al., 2012). La información consiste en polígonos vinculados a una base de datos por medio de un ID (Figura 3-13). Cada polígono puede tener varias profundidades. En la base de datos se especifica el porcentaje que ocupa cada profundidad dentro del polígono. A partir de esto, se generó una imagen ráster para el área de estudio con un valor promedio ponderado de profundidad para cada polígono, las unidades de medida son en milímetros (mm).

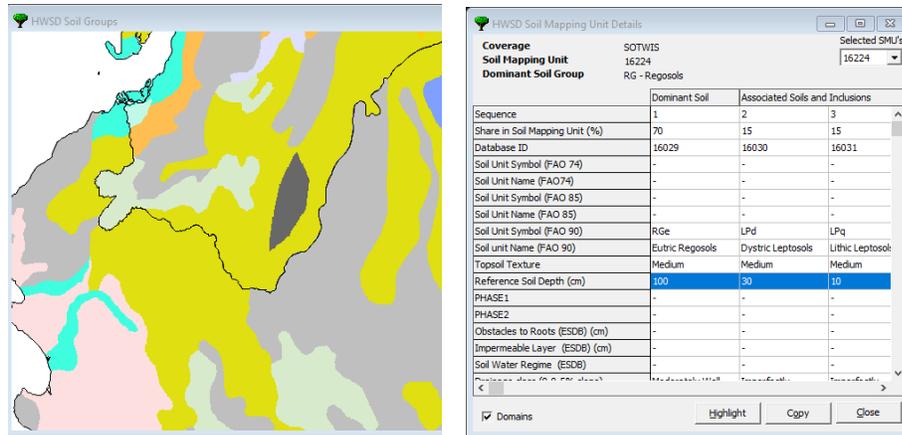


Figura 3-13. Visualizador de la base de datos HWSD.

Fracción del contenido de agua disponible de la planta (PAWC)

El AWC se define como la diferencia entre la capacidad de campo volumétrico y el punto de marchitamiento permanente (Sharp et al., 2018). El AWC se obtuvo de la base de datos HWSD, al igual que en la profundidad del suelo se generó una imagen promedio ponderada a partir de los porcentajes que ocupa AWC en cada polígono. Generada la imagen ráster AWC (mm) se la dividió por la imagen de profundidad de suelo (mm), con el fin de obtener PAWC, fracción requerida por el modelo WY, los valores son adimensionales (0 a 1).

Tabla biofísica

La tabla biofísica es un archivo de texto (.csv), el cual contiene atributos de cada clase de UCS (Tabla 3-6). Los atributos son: Id, clases de UCS, coeficiente de evapotranspiración (K_c), profundidad de la raíz y presencia de vegetación (UCS_veg). Los valores de K_c y profundidad de la raíz fueron tomados de Allen et al. (1998) y Sharp et al. (2018). El K_c se utiliza para obtener la evapotranspiración potencial a partir de la evapotranspiración de referencia, el cual es un valor que puede ir de 0 a 1.5. El campo UCS_veg indica al modelo WY que ecuación usar en la estimación de la ETR: valores de 1 para el UCS con vegetación [Ec. 2.2] y 0 para el UCS sin vegetación [Ec. 2.6].

Tabla 3-6. Tabla biofísica utilizada para la ejecución del modelo WY, proporciona la profundidad de raíz y K_c para cada clase UCS.

Id	Clases de UCS	K_c	Profundidad de raíz (mm)	UCS_veg
1	Bosque nativo	1	5000	1
2	Cuerpo de agua natural	1	1	0
3	Cultivo semi permanente	0.6	1000	1
4	Pastizal	0.7	1000	1
5	Cultivo permanente	0.6	1000	1
6	Vegetación arbustiva	0.5	2000	1
7	Mosaico agropecuario	0.6	1000	1
8	Área poblada	0.3	1	0
9	Área sin cobertura vegetal	0.3	1	0
10	Cuerpo de agua artificial	1	1	0
11	Páramo	0.7	1500	1
12	Vegetación herbácea	0.7	1500	1
13	Plantación forestal	1	5000	1
14	Cultivo anual	0.6	900	1
15	Infraestructura	0.3	1	0

Parámetro ecohidrológico Z

El parámetro ecohidrológico Z es una constante empírica que pueden ser un valor de 1 a 30. Para determinar Z se utilizó el tercer método descrito en la sección 2.1.2. Se determinó a través de la calibración, esto consiste en comparar los datos estimados con datos observado. En la sección 3.6.2 se describe el proceso de calibración.

3.6.2 Calibración del modelo WY

Para la calibración del modelo WY se utilizó el parámetro ecohidrológico Z y datos observados (caudal promedio a largo plazo) de nueve estaciones hidrométricas. No se contó con estaciones hidrométricas en los exutorios de las cuencas hidrográficas, siendo ésta, información ideal para la calibración del modelo. Sin embargo, las nueve estaciones pertenecen a subcuencas localizadas en las cuencas hidrográficas del área de estudio (Figura 3-14).

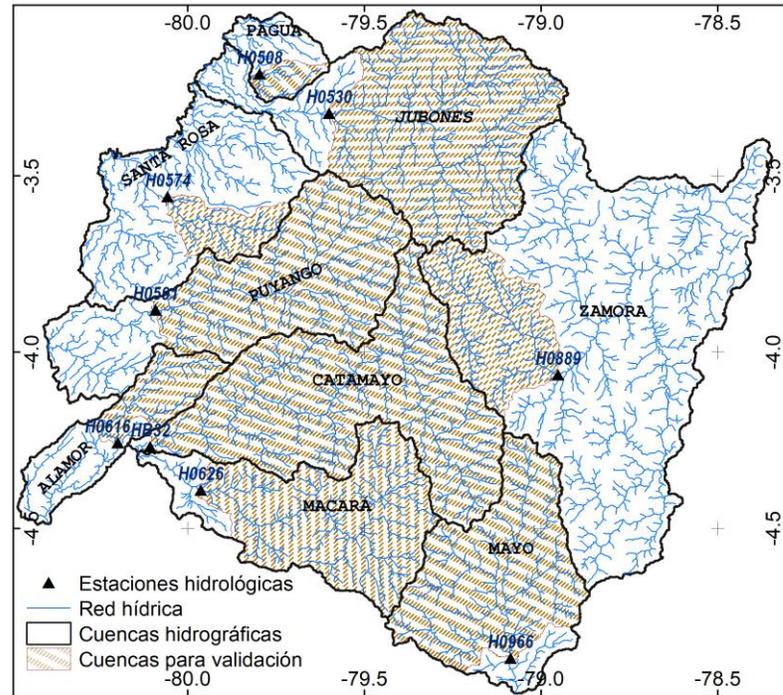


Figura 3-14. Localización de estaciones hidrométricas utilizadas en la calibración del modelo WY.

La calibración se realizó variando el valor Z de 1 a 30, hasta minimizar el error, que es la diferencia entre rendimiento hídrico estimado y observado. El rendimiento hídrico observado se obtuvo de datos de caudal diario, los cuales se obtuvieron del INAMHI (Figura 3-15). El periodo de calibración de cada una de las cuencas hidrográficas depende de la disponibilidad de datos observados en las estaciones hidrométricas (Tabla 3-7).

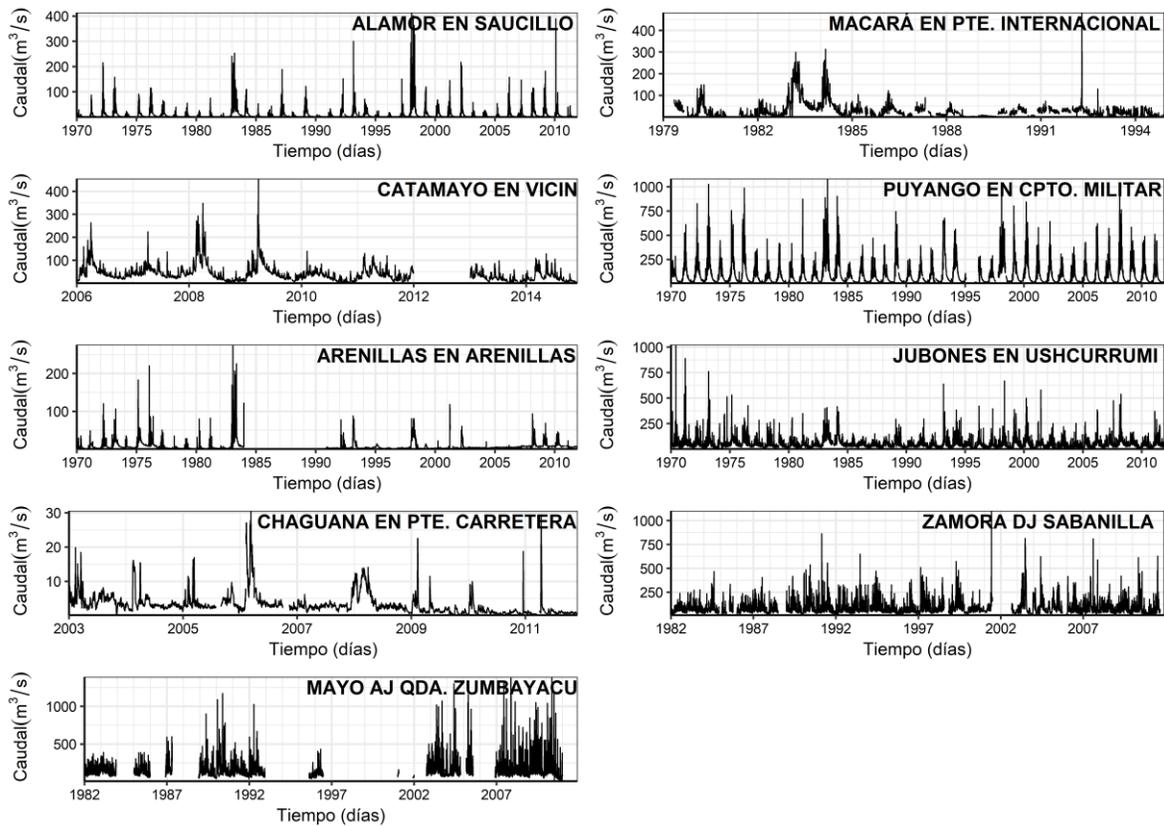


Figura 3-15. Hidrogramas de las estaciones hidrométricas.

Tabla 3-7. Información de las estaciones hidrométricas y periodo de evaluación utilizados para la calibración del modelo WY.

Código	Nombre de estación hidrométrica	Cuenca hidrográfica	Periodo de evaluación	Años evaluados	Años excluidos
H0616	Alamor en Saucillo (Dj Celica)	Alamor	1970-2011	42	-
H0626	Macará en Pte. Internacional	Macará	1979-1994	16	-
HB32	Catamayo en Vicin	Catamayo	2006-2014	8	-
H0591	Puyango en Cpto. Militar (Pte. Carretera)	Puyango	1970-2011	42	-
H0574	Arenillas en Arenillas	Santa Rosa	1970-2011	34	1984:1990
H0530	Jubones en Ushcurrumi	Jubones	1970-2011	42	-
H0508	Chaguana en Pte. Carretera	Pagua	2003-2011	9	-
H0889	Zamora DJ Sabanilla (en Zamora)	Zamora	1982-2011	28	1985, 2002
H0966	Mayo AJ Qda. Zumbayacu	Mayo	1982-2011	15	1984, 1986:1988, 1993:1995, 1997:2002, 2005:2006

Las unidades de los datos observados son en metros cúbicos por segundo (m^3/s), y los datos estimados en milímetros por año ($\text{mm}/\text{año}$), por lo que, los datos observados fueron transformados a $\text{mm}/\text{año}$.

En las subcuencas hidrográficas se consideró la desviación del caudal por sistemas de riego. Únicamente se consideró caudales que podrían influir en la calibración del modelo (Tabla 3-8), como por ejemplo el sistema de riego Zapotillo que se localiza antes de la estación HB32 y que desvía aproximadamente $8 \text{ m}^3/\text{s}$. No se consideró pequeños canales que poseen las comunidades para riego, por no contar con información del caudal desviado, además de ser consideradas mínimas cantidades.

Tabla 3-8. Sistemas de riego considerados en la calibración del modelo WY.

Unidad hidrográfica	Estación hidrométrica	Canales de riego	Caudal (m^3/s)	Fuente	Fecha
2	H0626	7	3.29	PDOT Prov. Loja	Hasta 2012
3	HB32	7	9.40	PDOT Prov. Loja	Hasta 2012
5	H0574	-	-	Represa Tahuil	-

No se posee información del caudal de la represa localizada en la cuenca hidrográfica Santa Rosa, se encuentra ubicada antes de la estación H0574, su fecha funcionamiento es desde el año 1989.

3.6.3 Estimación del rendimiento hídrico actual

Como se mencionó anteriormente el rendimiento hídrico fue estimado con el modelo WY de InVEST 3.4.4. En la Tabla 3-9 y Figura 3-16 se resume los parámetros de entrada, resolución utilizada y formato requerido por el modelo WY.

El valor calibrado de Z en la sección 3.6.2 se utilizó para obtener el rendimiento hídrico de cada cuenca hidrográfica, asumiendo que, el valor calibrado captura las características climáticas, intensidad de lluvia y topografía en las cuencas.

Tabla 3-9. Orden, formato y resolución de las variables requeridas para la ejecución del modelo WY.

Orden	Parámetro	Formato	Resolución temporal	Resolución espacial
1	Precipitación (mm)	GeoTiff (.tif)	1970-2015	6 arcos de segundo (~185 m)
2	Evapotranspiración de referencia (ET_0) (mm)	GeoTiff (.tif)		
3	Profundidad efectiva del suelo (mm)	GeoTiff (.tif)		
4	PAWC (mm)	GeoTiff (.tif)		
5	UCS (categorías)	GeoTiff (.tif)	2013-2014	
6	Cuencas hidrográficas	Vector (.shp)	-	-
7	Tabla biofísica: – Profundidad de las raíces (mm) – K_c	Tabla de texto (.csv) Ver Tabla 3-6	-	-
8	Parámetro ecohidrológico Z	Número entero entre 1 a 30 Ver sección 3.6.2	-	-

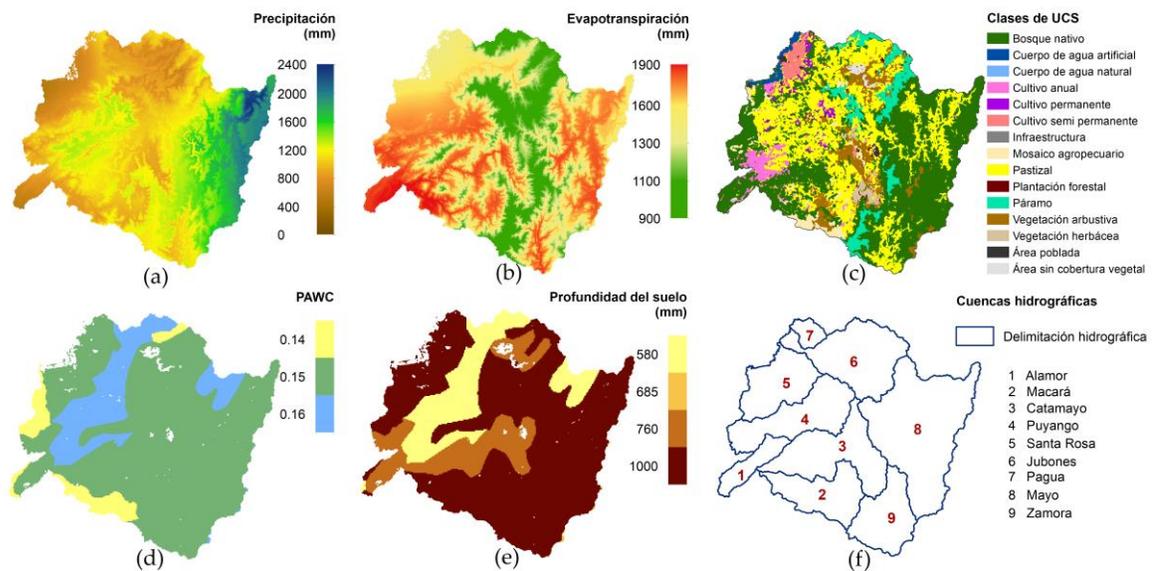


Figura 3-16. Variables requeridas para la ejecución del modelo WY de InVEST: a) precipitación anual promedio (mm), b) ET_0 anual promedio (mm), c) uso y cobertura del suelo, d) PAWC, e) profundidad del suelo, y f) cuencas hidrográficas.

El modelo proporciona como salidas: (1) un archivo de .txt con valores del rendimiento hídrico en lámina (mm) y en volumen (m^3) a nivel de cuencas hidrográficas, (2) archivos .tif de la fracción de la precipitación que realmente evapotranspira a nivel de píxel (evapotranspiración real / precipitación), evapotranspiración real (ETR) estimada por píxel y el rendimiento hídrico estimado por píxel.

3.7 Estimación del rendimiento hídrico futuro

Para la estimación del rendimiento hídrico futuro se utilizó las variables presentadas en la Tabla 3-9, a diferencia que las variables precipitación y evapotranspiración fueron proyectadas a diferentes horizontes (años futuros) y bajo escenarios de cambio climático. Se utilizaron dos MCG del proyecto CMIP5 (Tabla 3-10). Los MCG utilizados fueron MIROC-ESM-CHEM y MRI-CGCM3 para los periodos 2030s, 2050s, 2070s, 2080s, bajos dos escenarios: RCP4.5 (estabilización) y RCP8.5 (pesimista).

Los MCG fueron descargados de la base de datos de *Climate Change, Agriculture and Food Security* (CCAFS, http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/) a una resolución fina (30 segundos de arco ~ 1 km) para todo el globo terrestre. El downscaling que utilizaron para incrementar la resolución fue el método delta (Ramirez-Villegas y Jarvis, 2010). En la Tabla 3-10 se detalla las características de los MCG utilizados.

Tabla 3-10. Información de los Modelos de Circulación General (MCGs).

Nombre del MCG	Institución/País	Resolución espacial	Resolución temporal	Cobertura espacial	Referencia
MIROC-ESM-CHEM	Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies (NIES), y Japan Agency for Marine- Earth Science and Technology (JAMSTEC), Japón	30 arc– segundos (~ 1 km)	2030s [2020-2049]	Global	Watanabe et al., 2011
			2050s [2040-2069]		
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute (MRI), Japón		2070s [2060-2089]		
			2080s [2070-2099]		Yukimoto et al., 2012

Las variables descargadas fueron: precipitación, temperatura media, máxima y mínima. Las temperaturas se utilizaron para la estimación de la ET_0 proyectada de cada modelo, escenario y año de proyección. Para la estimación de la ET_0 se utilizó el método de Hargreaves (ver sección 3.6.3).

3.8 Análisis de cambio del rendimiento hídrico actual y futuro

El análisis considera la diferencia de las variables precipitación, evapotranspiración real y rendimiento hídrico entre los períodos futuros [2030s, 2050s, 2070s, 2080] y actual [1970-2015], una cantidad a la que se refiere como "cambio".

Las variables precipitación, temperatura media, evapotranspiración de referencia actuales fueron ajustadas a una resolución de ~1 km, con el fin de obtener el rendimiento hídrico a esta resolución. De tal manera que sea comparativo con las variables climáticas y rendimiento hídrico proyectado.

4 RESULTADOS

Los resultados se presentan en el siguiente orden: (1) análisis de la disponibilidad de datos, (2) detección de valores atípicos, (3) superficies climáticas, (4) tendencias de series climáticas, y (5) rendimiento hídrico actual y futuro.

4.1 Disponibilidad de datos

En este estudio, se recopiló datos meteorológicos correspondientes al periodo 1960-2015. Se contó con un total de 160 estaciones meteorológicas con datos de precipitación, 62 con datos de temperatura media y 64 con datos de temperatura máxima y mínima.

Datos de precipitación: el mayor registro de datos se presenta en los años 1980 a 1985, mientras que el mayor hueco de información durante los años 1960 a 1974 (Figura 4-1a). En la Figura 4-2 (imagen ráster) se presenta la disponibilidad de datos de cada estación meteorológica por año, la escala es una rampa continua de colores que va de color azul a crema, una celda de color azul indica el máxima número de datos al año (12) y una celda de color crema la ausencia de datos.

Datos de temperatura: en comparación con la variable precipitación existe menor disponibilidad de datos (Figura 4-1b). A partir del año 1970 hasta 2015 se registra la mayor cantidad de datos (20 a 45 datos al mes), mientras que el hueco de información se presenta durante 1960 a 1965. En la Figura 4-3 se presenta la disponibilidad de datos de temperatura media de cada estación meteorológica por año, al igual que precipitación la escala es una rampa continua de colores; una celda de color rojo indica la presencia de los 12 datos mensuales y el color crema la ausencia de datos.

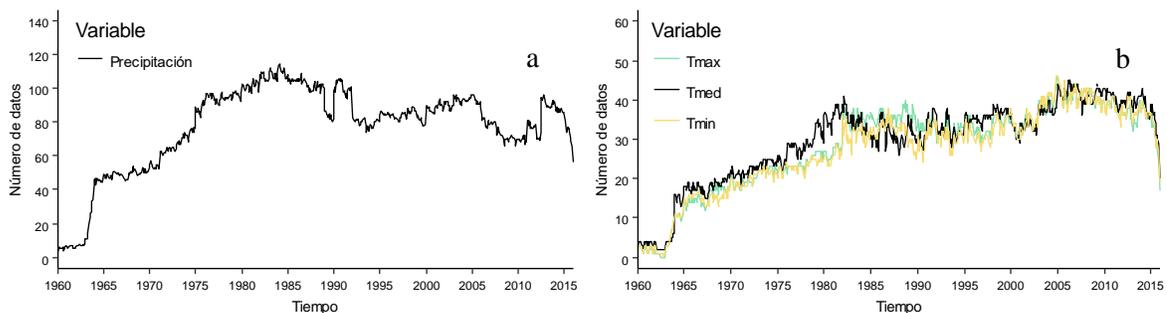


Figura 4-1. Número de registros mensuales durante el periodo 1960-2015; a) datos de precipitación, b) datos de temperatura máxima (Tmax), media (Tmed) y mínima (Tmin).

Con base a la disponibilidad de los datos de precipitación y temperatura, se estableció como periodo de análisis 1970-2015, periodo con el que se trabajará de aquí en adelante. Se consideró no abarcar los años 1960 a 1969, debido a que las variables poseen huecos de información durante ese periodo.

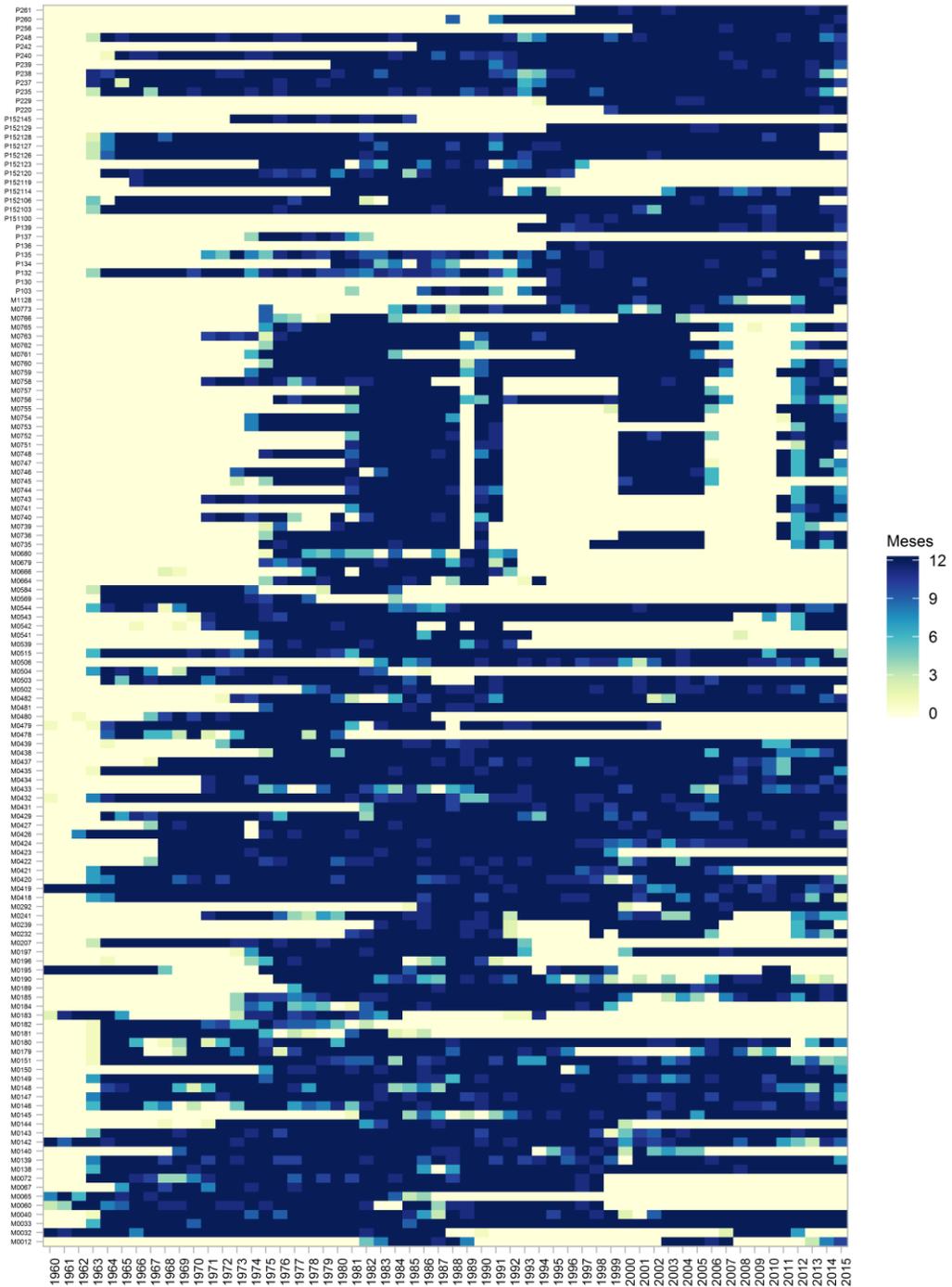


Figura 4-2. Disponibilidad de datos de precipitación para el periodo 1960-2015.

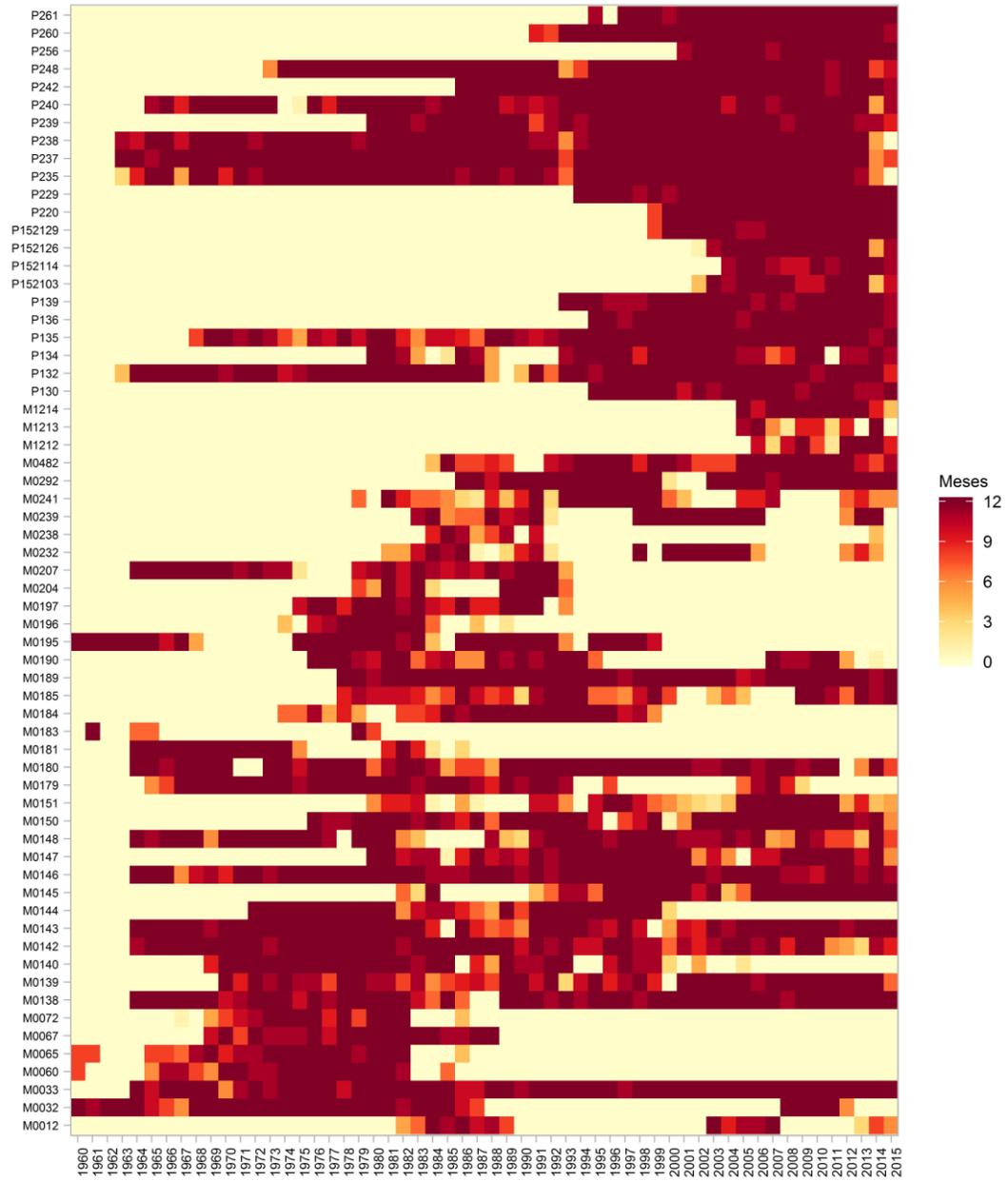


Figura 4-3. Disponibilidad de datos de temperatura media para el periodo 1960-2015.

4.2 Detección de valores atípicos

Valores atípicos por mes

La Figura 4-4 presenta la magnitud de las variables climáticas graficadas por mes. La variable precipitación presentó la mayor cantidad de valores atípicos y extremos, seguido de la temperatura máxima con dos valores atípicos, mientras que temperatura media y mínima no presentaron datos atípicos. Para la variable precipitación, se identificaron valores de hasta 5500 mm al mes.

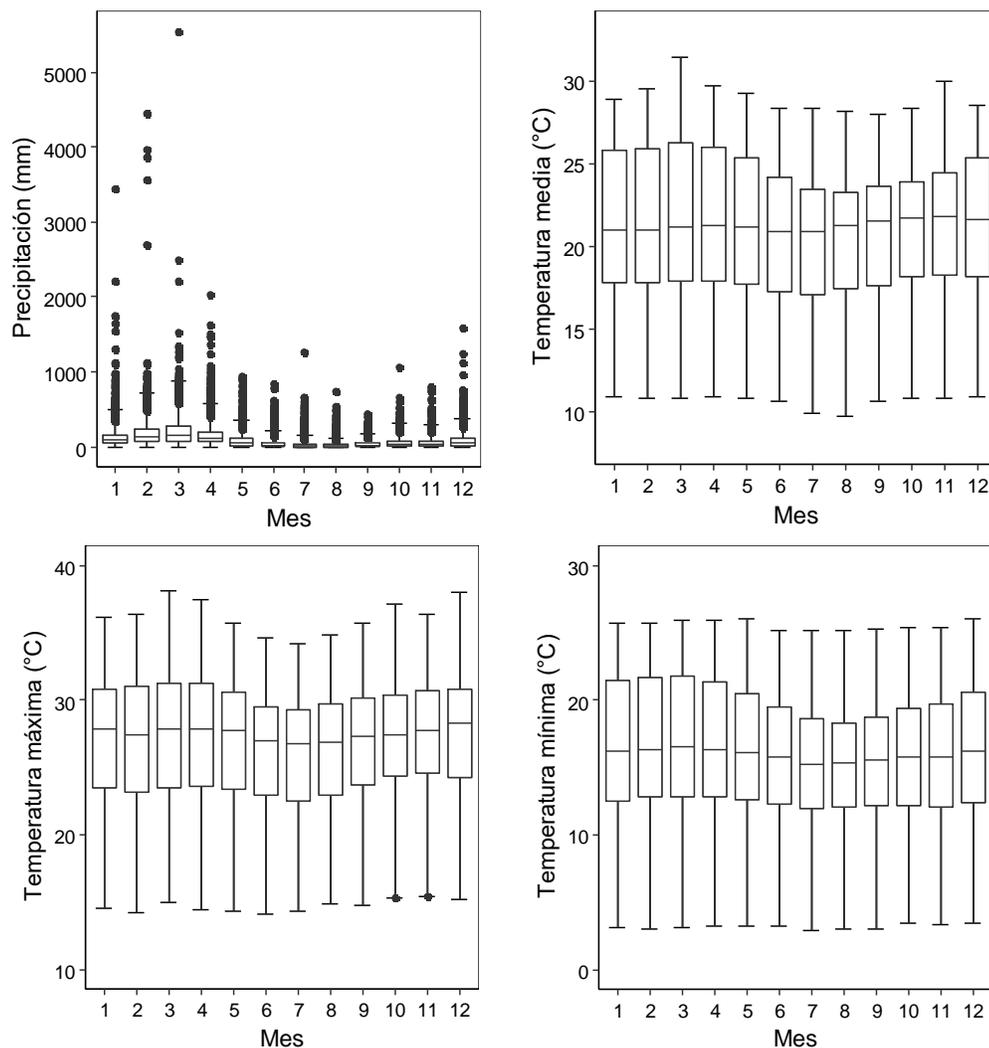


Figura 4-4. Magnitud de los datos por variable para toda la serie mensual 1970-2015.

Valores atípicos por estación y año

Como proceso complementario para la detección de valores atípicos, se graficó las variables por año-mes y por estación-mes (Anexo C). En este caso si se encontró valores atípicos para las variables temperatura media, máxima y mínima. Los mismos que pertenecían a las pocas estaciones ubicadas a altas altitudes, descartando así la posibilidad de datos erróneos, es decir, los datos de las estaciones son representativos de acuerdo con la altitud. En la Tabla 4-1 se presenta el resumen de los datos que fueron validados, corregidos o eliminados. En el Anexo D se presentan la lista completa del análisis realizado.

Tabla 4-1. Resumen de datos detectados como atípicos.

Variable	Proceso	Cantidad
Precipitación	Eliminados	17
	Validados	23
	Corregidos	2
Temperatura máxima	Validados	2
Total de datos analizados		44

Es importante destacar que los valores detectados como sospechosos en las cuatro variables se encuentran relacionados con la irregularidad de la disponibilidad de datos durante el periodo analizado. Únicamente once estaciones se localizan sobre los 2000 msnm (Figura 3-5), siendo éstas las que presentan la mayor cantidad de valores detectados como atípicos.

4.3 Superficies climáticas

Se presentan los resúmenes estadísticos de las imágenes de superficie interpoladas, así como también un análisis exploratorio de las superficies a nivel de la ZP7 y cuencas hidrográficas.

4.3.1 Calidad de superficies climáticas

En la Figura 4-5 se presenta un resumen estadístico de la calidad de las superficies climáticas interpoladas. De acuerdo con Hutchinson (1993) y Hutchinson y Gessler (1994) la señal no debe superar a la mitad del número de datos utilizados para la interpolación. Señales mayores que esto pueden indicar datos insuficientes o correlación positiva en errores de datos.

Para representar la señal se graficó la proporción de la señal de cada superficie interpolada, es decir, la relación [señal / número total de datos], la cual debe ser menor a 0.5 como indicativo de que la señal es menor al número total de datos.

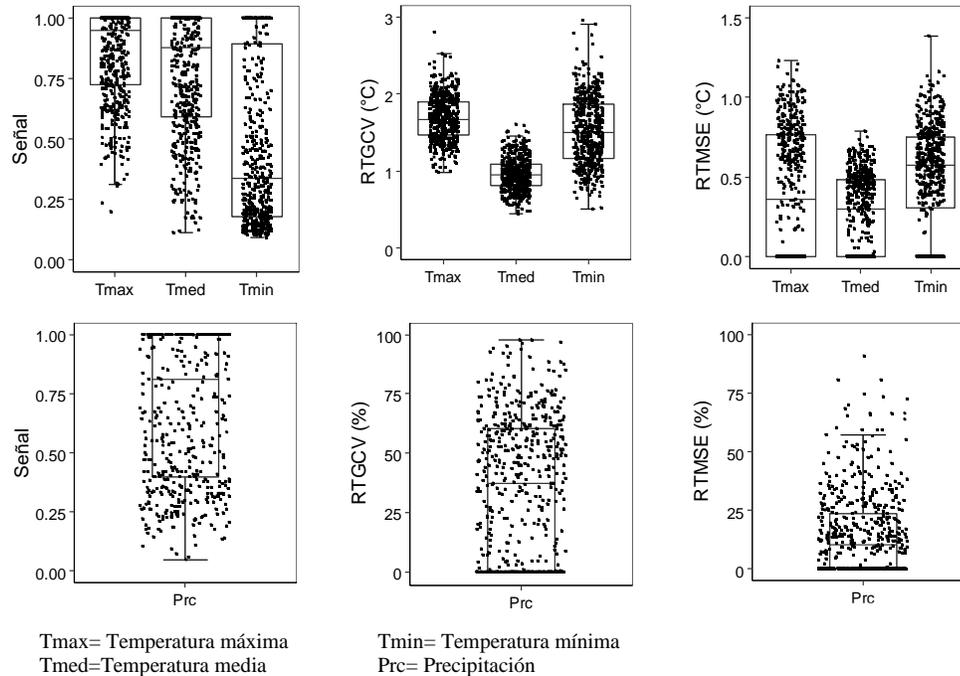


Figura 4-5. Proporción de la señal, raíz cuadrada de la validación cruzada (RTGCV), y la raíz cuadrada del error medio (RTMSE) para las superficies mensuales de temperatura media y precipitación.

Sólo el 13% de las imágenes de temperatura máxima poseen una señal menor al número de datos; en temperatura media, el 20 % de las imágenes; mientras que, en temperatura mínima aproximadamente el 65% de las imágenes, indicando en ésta última que, un número adecuado de datos fue seleccionado para la generación de las superficies. En la variable precipitación el ~ 40 % de las superficies poseen una señal adecuada.

La justificación teórica del GCV y la demostración de su rendimiento en datos simulados han sido dados por Craven y Wahba (1979). Los valores de RTGVC y RTMSE están expresados en unidades de grados centígrados para temperatura y en porcentaje para precipitación.

La RTGCV es una sobreestimación del verdadero error de interpolación, ya que los puntos de datos (estaciones meteorológicas) para calcular la GCV tienen errores. La RTMSE es una estimación del verdadero error de interpolación después de que los errores de los datos son removidos (Téllez et al., 2011). La RTMSE de temperatura máxima varían entre 0 - 1.2°C

(0.4 °C promedio), temperatura media entre 0 - 0.8°C (0.3°C promedio), y temperatura mínima entre 0 – 1.4°C (0.5°C promedio). En el caso de la precipitación el 75% de las superficies climáticas poseen valores entre 0 – 25% de error. Lo que indica un ajuste entre los datos y la superficie modelada.

4.3.2 Análisis exploratorio de las superficies climáticas

La distribución de la precipitación y temperatura media del periodo de estudio 1970-2015 (Figura 4-6) está influenciada por la orografía del lugar. Las áreas de costa, valles andinos y la región amazónica son los lugares más cálidos del área de estudio. La costa y los valles son cálidos (> 19 °C) y secos (< 500 mm), la región amazónica es cálida (> 19 °C) y húmeda (> 2000 mm), y las áreas cercanas a la cordillera de Los Andes son frías, la temperatura fluctúa entre ~8 y ~14 °C, y la precipitación varía entre ~1200 y ~1500 mm.

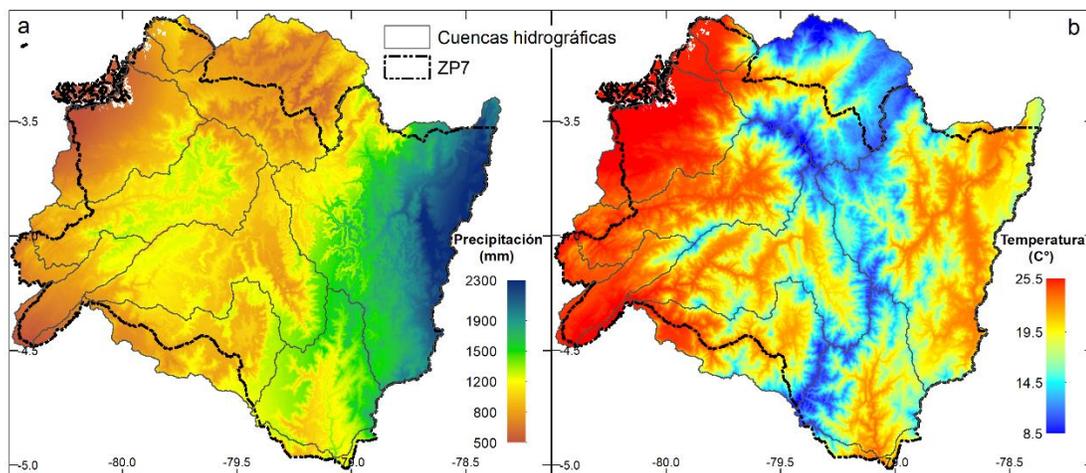


Figura 4-6. Distribución espacial de la precipitación media anual (a) y temperatura media anual (b) en la zona de estudio. Valores promedio del periodo 1970-2015.

Durante los meses de enero a abril, en la ZP7 se presenta un régimen hiper-húmedo y en los meses de mayo a diciembre un régimen húmedo, siendo agosto y septiembre los meses con menores precipitaciones. A nivel de ZP7 no se logró identificar un régimen seco, la variación de la temperatura es mínima durante el año (Figura 4-7).

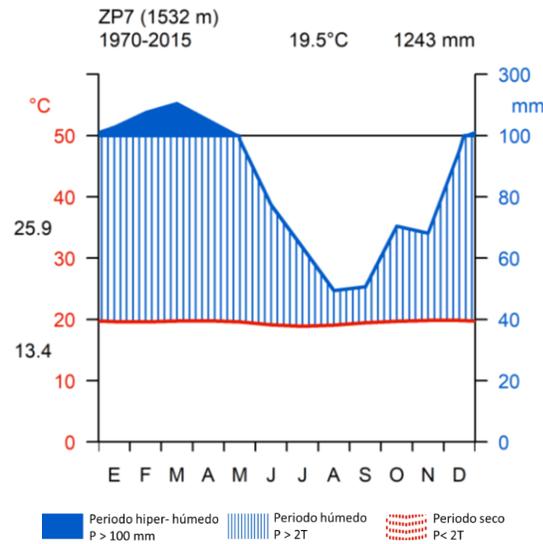


Figura 4-7. Diagrama ombrotérmico de la ZP7, valores promedio del período 1970-2015.

La escala de precipitaciones es doble con referencia a la de temperaturas, esto es, por cada °C en temperatura se toma 2 mm en precipitación. Así a un valor de 20 °C le corresponde en la misma línea el valor de 40 mm. Cuando la precipitación mensual es mayor de 100 mm, la escala aumenta de 2 mm por °C a 20 mm por °C para evitar diagramas demasiado altos en lugares muy húmedos. Este cambio está indicado por una línea horizontal negra, y el gráfico sobre ella está relleno en azul sólido. Los valores de color negro en el eje izquierdo representan la oscilación térmica (temperatura mínima y temperatura máxima).

A nivel de cuencas hidrográficas (Figura 4-8), se observó que las cuencas localizadas en la vertiente del océano Pacífico tienen un patrón de lluvia similar, presentan un régimen hiper-húmedo durante los meses de enero a mayo y un régimen seco que varía entre mayo a diciembre. Sin embargo, las cuencas que nacen en la cordillera de Los Andes, por ejemplo Catamayo, Jubones y Macará, se observa que el régimen seco es más corto y menos pronunciado en relación a las cuencas que nacen cerca de la Costa, o que no tienen influencia directa con la Cordillera de Los Andes. La precipitación media anual de las cuencas del Pacífico varía entre 900 y 1120 mm, los lugares altos, cerca de Los Andes reciben precipitaciones de ~1200 mm (Figura 4-6). Por el contrario, las áreas cerca de la costa están influenciadas por masas de aire secas, excepto en los años Niño.

Las cuencas que escurren hacia el Amazonas no muestran un periodo seco. En la cuenca Zamora se observa durante el año un régimen hiper-húmedo. La subcuenca Mayo presenta un periodo hiper-húmedo entre noviembre a mayo y húmedo durante junio a octubre. La

precipitación promedio es de 1700 y 1356 mm respectivamente, para Zamora y Mayo; las láminas más altas se observaron en la parte este de la cuenca.

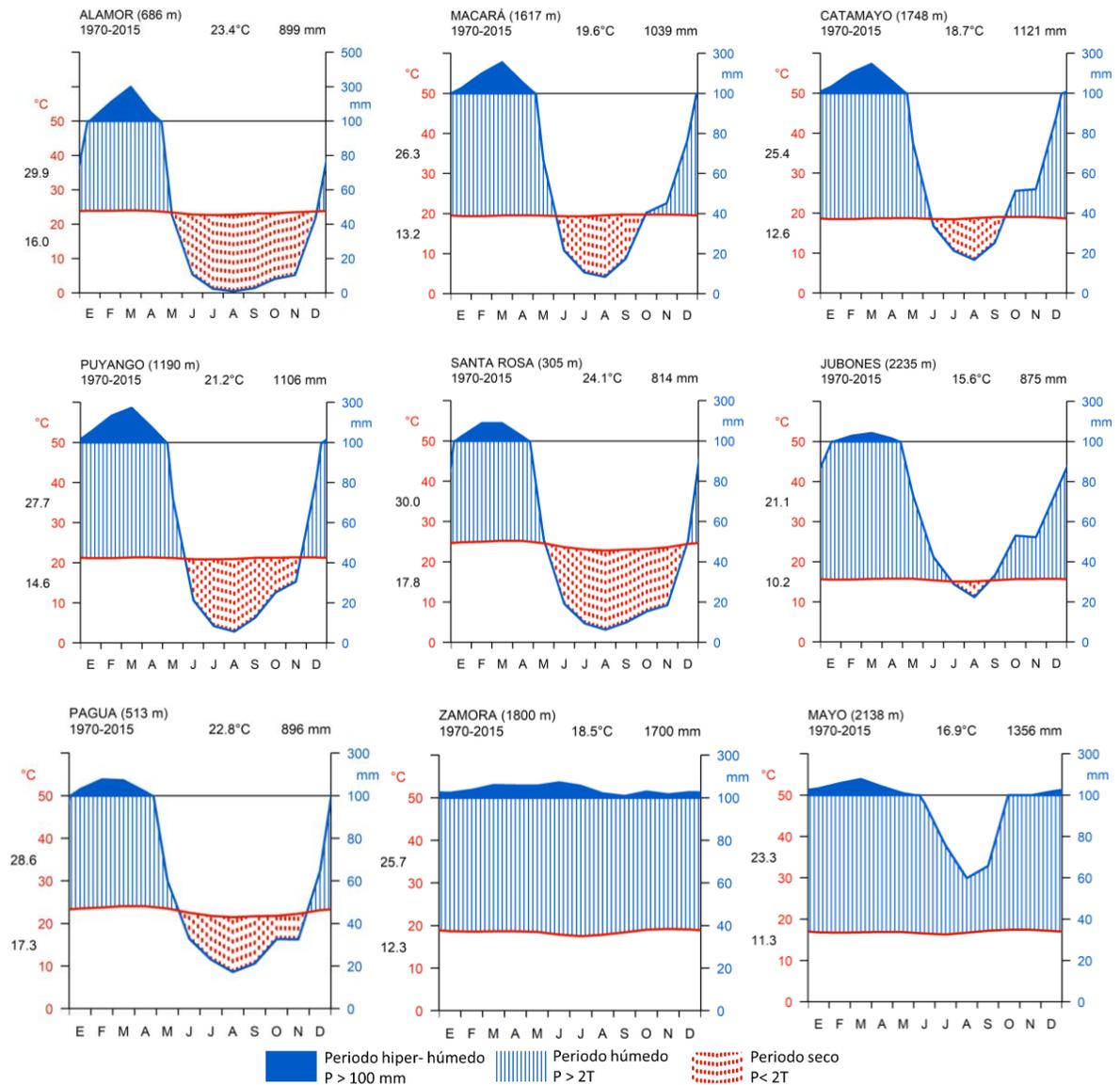


Figura 4-8. Diagramas ombrotérmicos de las cuencas hidrográficas de la región sur del Ecuador, valores promedio del período 1970-2015.

4.4 Análisis de tendencias de series climáticas

Las Figura 4-9 a 4-12 muestran la evolución y la tendencia de las precipitaciones y temperaturas mensuales del periodo analizado (1970-2015) a nivel de la ZP7 y cuencas hidrográficas. De manera complementaria, la Tabla 4-2 presenta las variaciones en las precipitaciones y temperaturas con base a la línea de tendencia.

La ZP7 no presenta una tendencia marcada en la variable precipitación, hubo un ligero incremento de ~10 mm (Tabla 4-2). Este valor no es representativo considerando la alta variabilidad de la precipitación, representando el 0.8% de la precipitación promedio de todo el periodo. En cuanto a la temperatura, la línea de tendencia asciende 1.1 °C, indicando un incremento de temperatura en la zona de estudio.

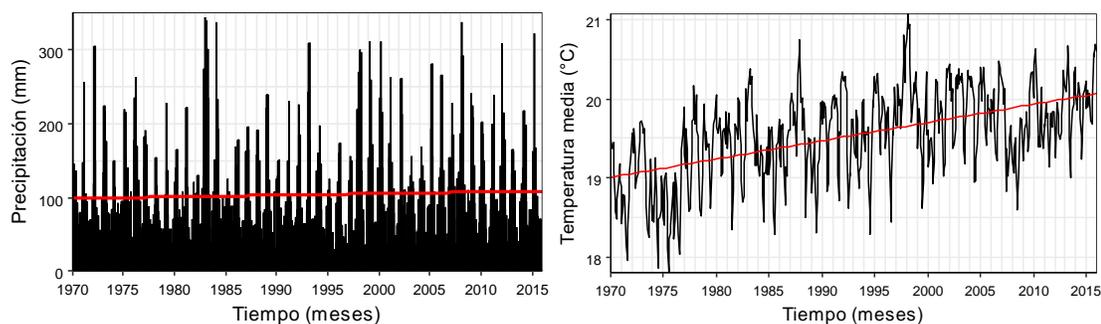


Figura 4-9. Series de tiempo de precipitación (izquierda) y temperatura media (derecha) mensual de la región sur del Ecuador.

Tabla 4-2. Variaciones en las variables climáticas con base a la línea de tendencia (1970-2015).

Id	Cuenca	Región	ΔP (mm)	Valor mínimo y máximo de la tendencia	ΔT (°C)	Valor mínimo y máximo de la tendencia
	ZP7	Costa, Sierra, Amazonía	10.2	98.5-108.7	1.1	19.0-20.1
1	Alamor	Costa -Sierra	2.6	73.6-76.2	1.6	22.6-24.2
2	Macará	Sierra	19.8	76.7-96.5	0.9	19.1-20.0
3	Catamayo	Sierra	19.1	83.8-102.9	0.9	18.3-19.2
4	Puyango	Costa - Sierra	1.3	91.5-92.8	1.5	20.4-21.9
5	Santa Rosa	Costa	-8.0	71.9-63.9	1.3	23.4-24.7
6	Jubones	Costa -Sierra	19.7	63.1-82.8	1.7	14.7-16.4
7	Pagua	Costa	0.7	74.3-75.0	0.9	22.4-23.3
8	Zamora	Amazonía	3.2	140.1-143.3	0.7	18.2-18.9
9	Mayo	Amazonía	36.9	94.5-131.4	1.0	16.4-17.4

Analizando las series temporales de la precipitación a nivel de cuencas hidrográficas, se puede apreciar en la Figura 4-10 y en la Tabla 4-2 que existe un incremento de la precipitación, a excepción de la cuenca Santa Rosa. El incremento es muy ligero, siendo la cuenca Mayo la que presenta mayor incremento de precipitación (~37 mm), y el menor incremento (~ 1 mm) en la cuenca Pagua. La cuenca Santa Rosa presenta una tendencia negativa, lo que indica una disminución de precipitación (~ -8 mm). En relación con la temperatura, todas las cuencas presentan una tendencia ascendente (Figura 4-11), siendo la cuenca Jubones la que mostró el mayor incremento con un valor de 1.7°C y el menor incremento fue en la cuenca Zamora con un valor de 0.7 °C.

No se logró detectar tendencias de precipitación posiblemente debido a la influencia de los periodos húmedos o secos en la regresión lineal. Esto se puede confirmar al analizar la tendencia por mes (Anexo E), donde se observa tendencias positivas y negativas de precipitación.

Es importante mencionar que la variación de las lluvias se encuentra influenciadas por el ENOS, sobre todo en las cuencas localizadas en la región Costa. En las series se puede identificar los picos de lluvia, sobre todo el evento de El Niño del año 1982/1983 que fue considerado como año excepcional.

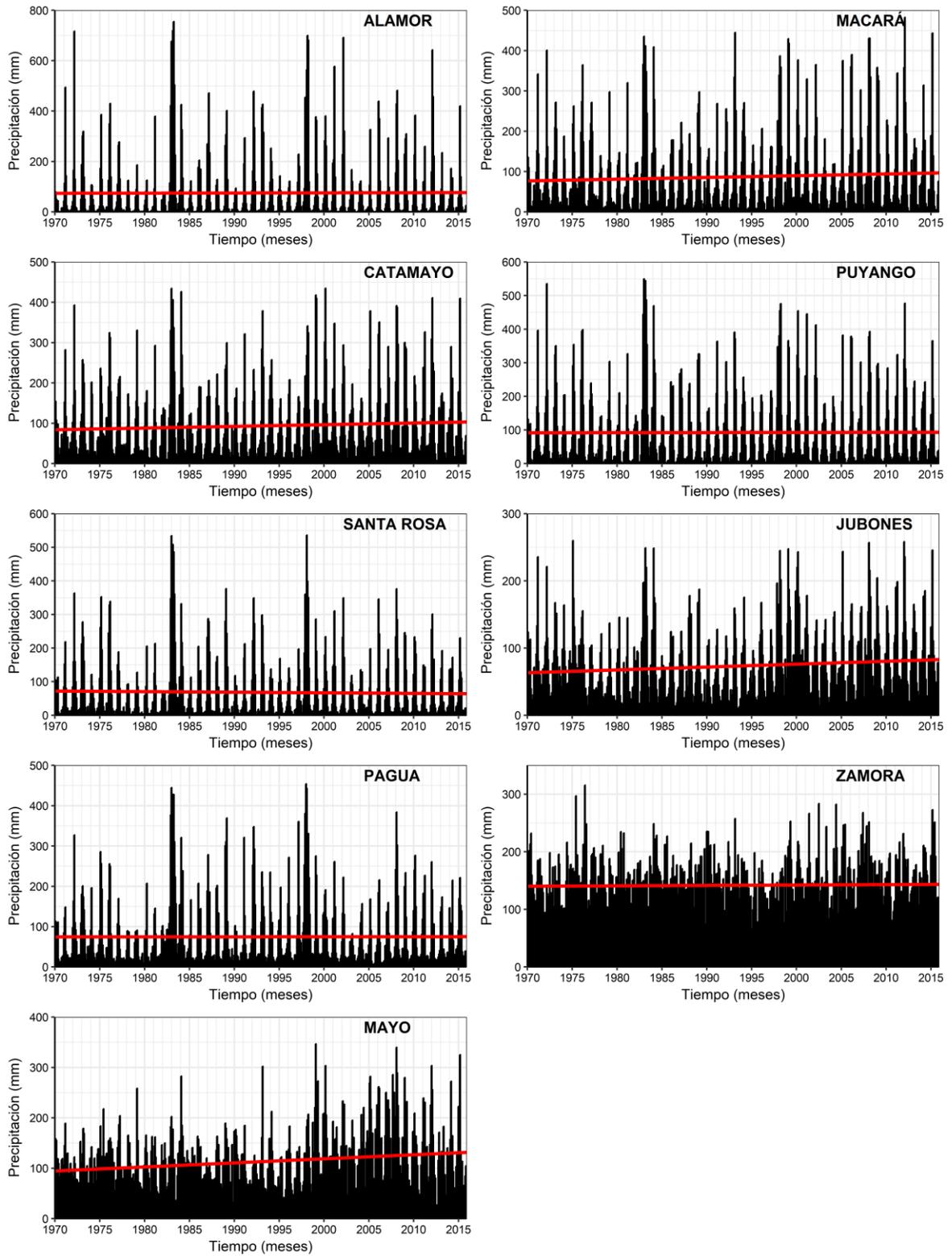


Figura 4-10. Series mensuales de precipitación de las cuencas hidrográficas de la región sur del Ecuador.

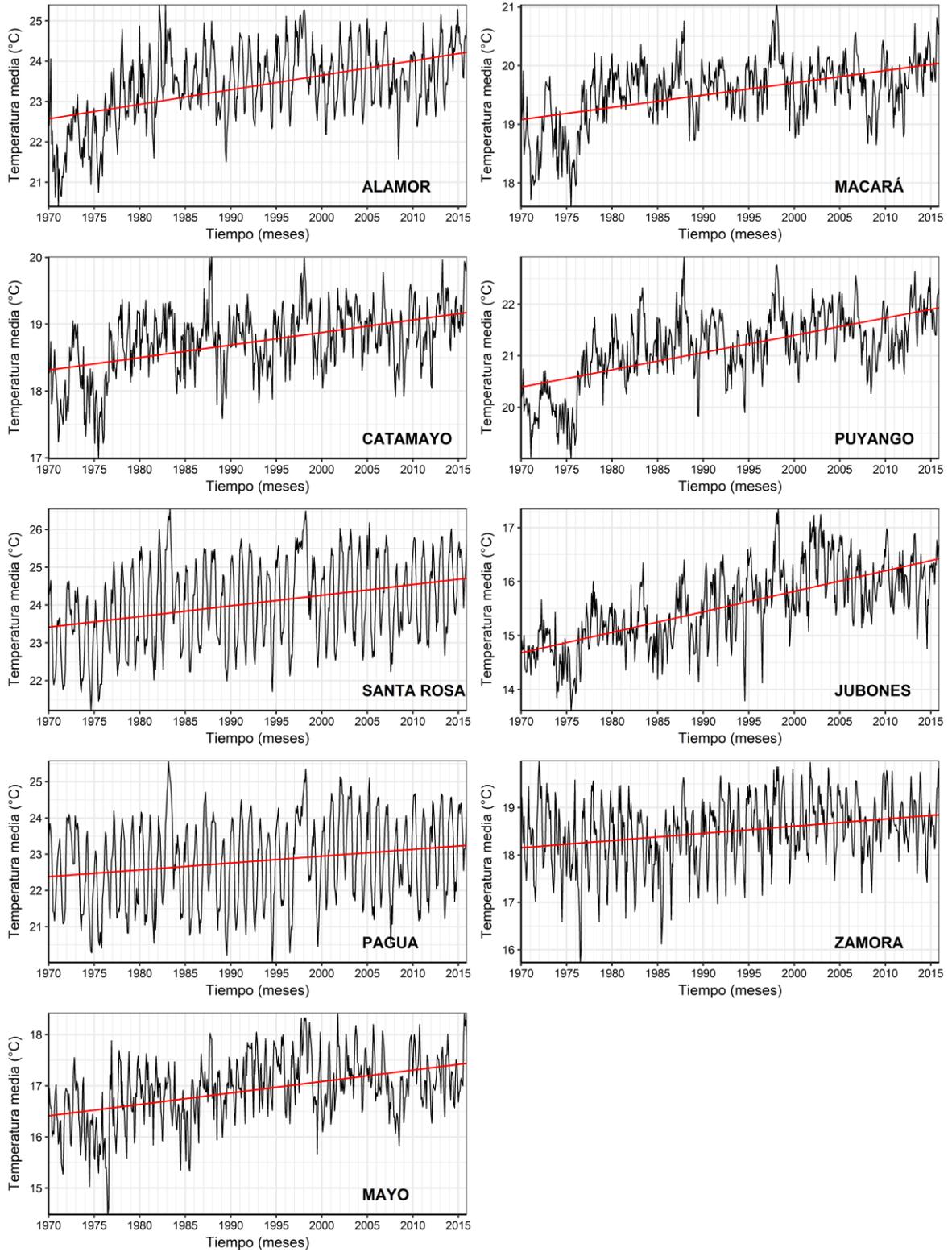


Figura 4-11. Series mensuales de temperatura media de las cuencas hidrográficas de la región sur del Ecuador.

En cuanto al análisis de tendencias a nivel espacial por el método de Tau Mann-Kendall (Figura 4-12), la variable precipitación presenta un rango de -0.15 a 0.21, valores que se encuentran más cercanos a 0. Lo cual indica una tendencia baja en la zona de estudio a nivel píxel, lo que corrobora con los resultados presentados previamente (Figura 4-11). En cuanto a las temperaturas el rango va de -0.36 a 0.62, lo que indica presencia de tendencias positivas en la zona de estudio. Se aprecia un patrón espacial, con valores positivos en el norte y centro del área de estudio; y valores negativos en el este y oeste. Hablando de cuencas hidrográficas, la mayor cantidad de píxeles con presencia de tendencia positiva (>0.5) se encuentra en la cuenca Jubones (parte alta-centro), cuenca Puyango (parte alta), cuenca Catamayo (parte alta) y al noroeste de la cuenca Zamora.

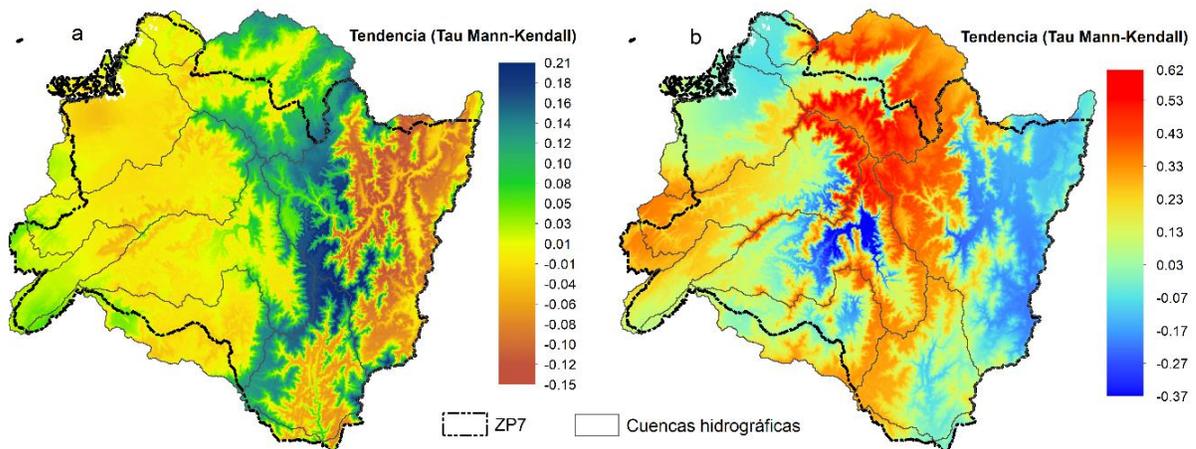


Figura 4-12. Tendencia monótona (Tau Mann-Kendall): (a) precipitación anual promedio y (b) temperatura anual promedio, período 1970-2015.

4.5 Rendimiento hídrico actual de la zona de estudio

Se presenta los resultados de la estimación del rendimiento hídrico a nivel de cuencas hidrográficas, subcuencas y píxel. Se empieza detallando los valores Z utilizados para la calibración del modelo WY en cada una de las unidades hidrográficas, así como el error relativo de la calibración y se finaliza con la estimación del rendimiento hídrico actual.

4.5.1 Calibración del modelo WY

El modelo se calibró a partir de valores $Z \geq 3$ para cinco subcuencas hidrográficas, con errores inferiores al $\sim 7\%$; mientras que las cuatro cuencas restantes no pudieron ser calibradas, la producción de agua fue subestimada con errores entre 20-50% (Tabla 4-3).

Tabla 4-3. Resumen del rendimiento hídrico medio anual (RH) observado y estimado en el proceso de calibración, periodo 1970-2015.

Código estación	Nombre de estación hidrométrica	Área (Km ²)	P (mm)	ET ₀ (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	Parámetro Z	RH observado (mm)	RH estimado (mm)	Error relativo (%)
H0616	Alamor en Saucillo (Dj Celica)	585	1108	1660	1157	725	13	381	383	-0.58
H0626	Macará en Pte. Internacional	2509	986	1544	1124	595	5	360	349	3.21
HB32	Catamayo en Vicin	4172	1251	1536	1170	833	24	303	303	0
H0591	Puyango en Cpto. Militar (Pte. Carretera)	2728	1149	1585	1153	375	1	1008	775	23.13
H0574	Arenillas en Arenillas	493	1009	1678	1302	533	3	447	477	-6.72
H0530	Jubones en Ushcurrumi	3636	870	1249	810	447	4	423	422	0.10
H0508	Chaguana en Pte. Carretera	190	789	1505	1169	352	1	576	437	24.19
H0889	Zamora DJ Sabanilla (en Zamora)	1422	1343	1240	1070	399	1	1724	994	42.36
H0966	Mayo AJ Qda. Zumbayacu	2564	1424	1363	1189	422	1	1987	1001	49.60

P: Precipitación

ET₀: Evapotranspiración de referencia

ETP: Evapotranspiración potencial

ETR: Evapotranspiración real

4.5.2 Rendimiento hídrico de las cuencas hidrográficas de la región sur del Ecuador

La producción hídrica a nivel de cuencas hidrográficas se presenta en la Tabla 4-4 y Figura 4-13. Las cuencas Zamora y Mayo son las de mayor producción hídrica, con valores de 1218 y 934 mm, respectivamente. En cambio, las cuencas Alamor y Catamayo son las de menor producción hídrica con 206 y 258 mm, respectivamente.

Tabla 4-4. Resumen del rendimiento hídrico medio anual (RH), periodo 1970-2015.

Id	Unidad hidrográfica	Área (Km ²)	P (mm)	ET ₀ (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	RH estimado (mm)	Volumen (Mm ³)
1	Alamor	1187	899	1752	1436	693	206	245
2	Macará	2824	1039	1577	1193	607	432	1220
3	Catamayo	4187	1121	1528	1167	863	258	1080
4	Puyango	3601	1106	1629	1240	382	724	2606
5	Santa Rosa	2708	842	1603	1263	505	336	910
6	Jubones	4402	875	1284	861	460	415	1827
7	Pagua	505	906	1457	1075	352	553	279
8	Zamora	8297	1701	1518	1376	482	1218	10109
9	Mayo	2869	1356	1390	1211	421	934	2681

P: Precipitación

ET₀: Evapotranspiración de referencia

ETP: Evapotranspiración potencial

ETR: Evapotranspiración real

La precipitación y ET_0 en algunas cuencas es similar, como es el caso de Macará y Catamayo, sin embargo, la ETR es diferente, lo que conduce a distintos rendimientos hídricos (Tabla 5 y Figura 4). Esto se atribuye principalmente a la influencia del K_c en la estimación de la ETR. El valor de K_c depende del tipo de cobertura vegetal, cuando menor es el K_c , menor es la ETR y por consiguiente mayor producción hídrica; y viceversa. El modelo supone que toda el agua en exceso de la pérdida por ETR es producción de agua.

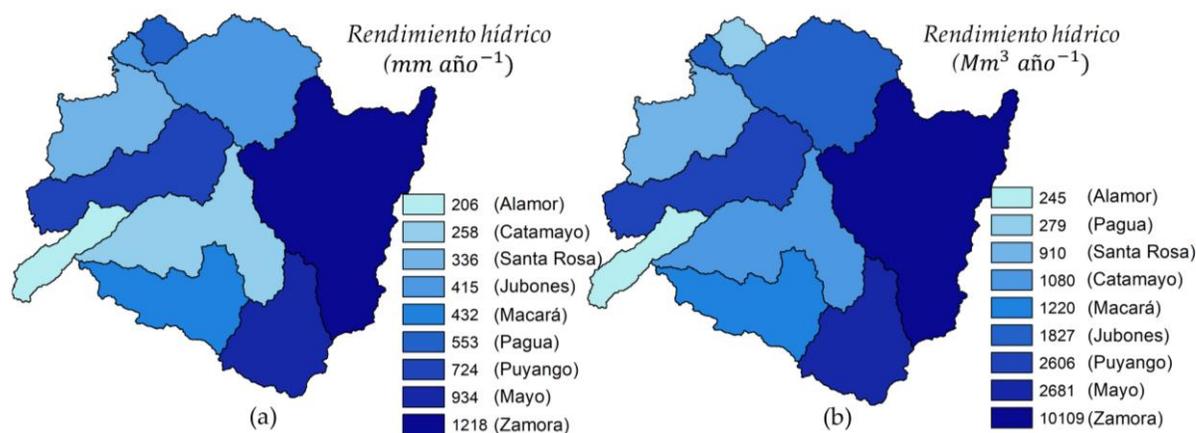


Figura 4-13. Rendimiento hídrico promedio de las cuencas hidrográficas en la zona de estudio: a) lámina de escurrimiento (mm); b) volumen (Mm³).

La producción hídrica a nivel subcuencas se observa en la Figura 4-14. La mayoría de las subcuencas localizadas en la vertiente del Océano Pacífico presentan menor rendimiento

hídrico en comparación de las cuencas localizadas en la vertiente del Amazonas; a excepción de algunas subcuencas de la cuenca Puyango.

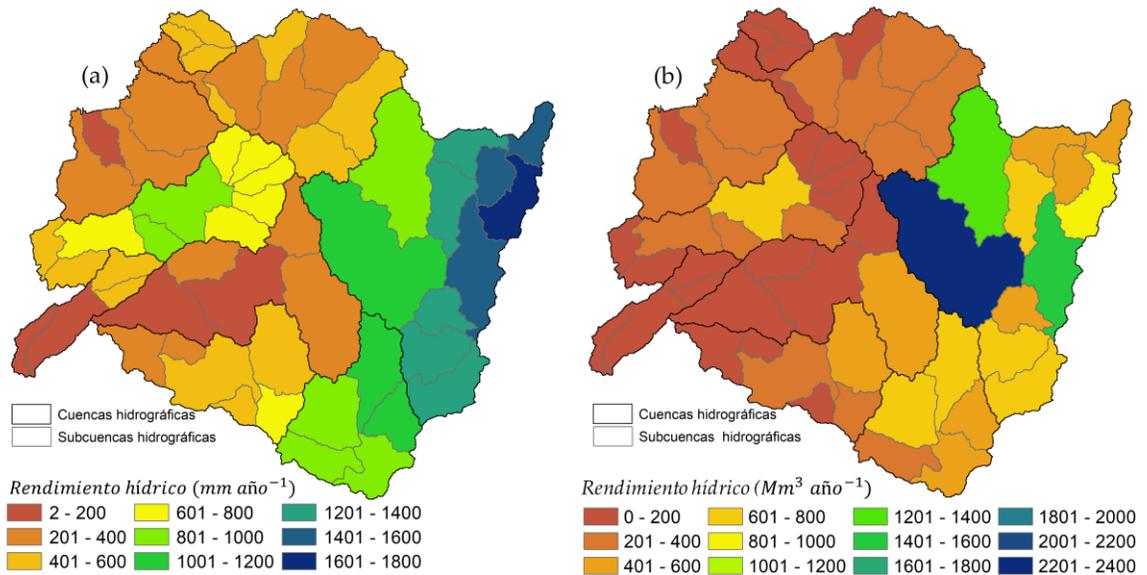


Figura 4-14. Rendimiento hídrico promedio de las subcuencas hidrográficas en la zona de estudio: a) lámina de escurrimiento (mm); b) volumen (Mm^3).

La producción hídrica a nivel píxel se presenta en la Figura 4-15, en la cual se aprecia las zonas con alta y baja producción hídrica por unidad hidrográfica. Comparando el rendimiento hídrico con la distribución espacial de la precipitación (Figura 4-6), el rendimiento hídrico generalmente aumenta en zonas de alta precipitación. Por ejemplo, la precipitación más alta se localizó al este de la cuenca Zamora, en consecuencia, la producción hídrica también tendió a ser mayor en la misma zona.

Es importante mencionar que la distribución del rendimiento hídrico a nivel píxel se presenta por cada unidad hidrográfica, debido a que, la calibración se realizó con diferentes valores del parámetro ecohidrológico Z. Por lo tanto, la distribución entre cuencas no es continua.

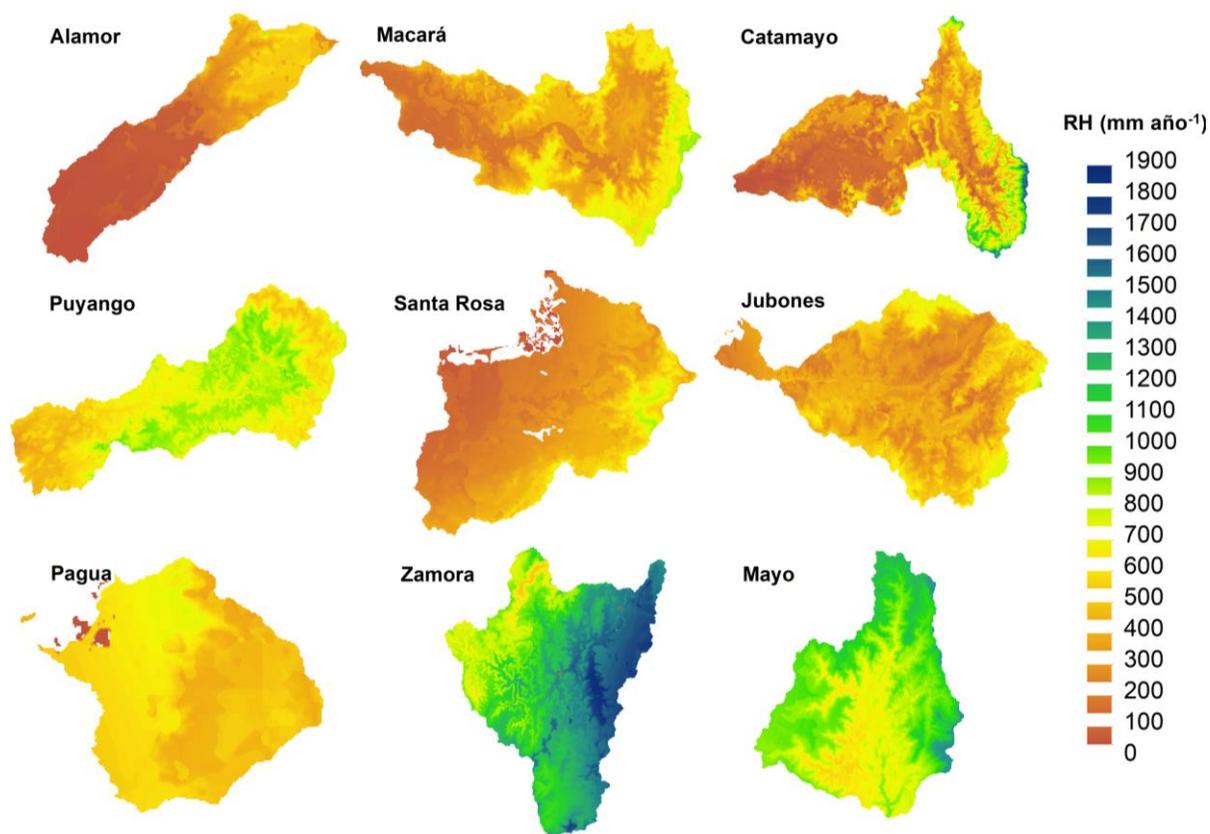


Figura 4-15. Distribución espacial del rendimiento hídrico en las cuencas hidrográficas de la región sur del Ecuador, periodo 1970-2015.

4.6 Rendimiento hídrico futuro de las cuencas hidrográficas de la región sur del Ecuador

Existe una variación del rendimiento hídrico de acuerdo con el modelo climático, año de proyección y escenario (Figura 4-16). El modelo [MRI -año 2080- RCP8.5] presenta los valores más altos de rendimiento hídrico en la mayoría de las cuencas hidrográficas. A excepción de las cuencas Zamora y Mayo, el rendimiento hídrico es ligeramente menor al modelo MIROC. El menor rendimiento hídrico lo presenta el modelo [MIROC- año 2030- RCP4.5] en la mayoría de las cuencas hidrográficas, incluso una producción menor a la actual. La precipitación media anual, ETP, ETR para cada modelo climático, año de proyección y escenario se presentan en el Anexo F.

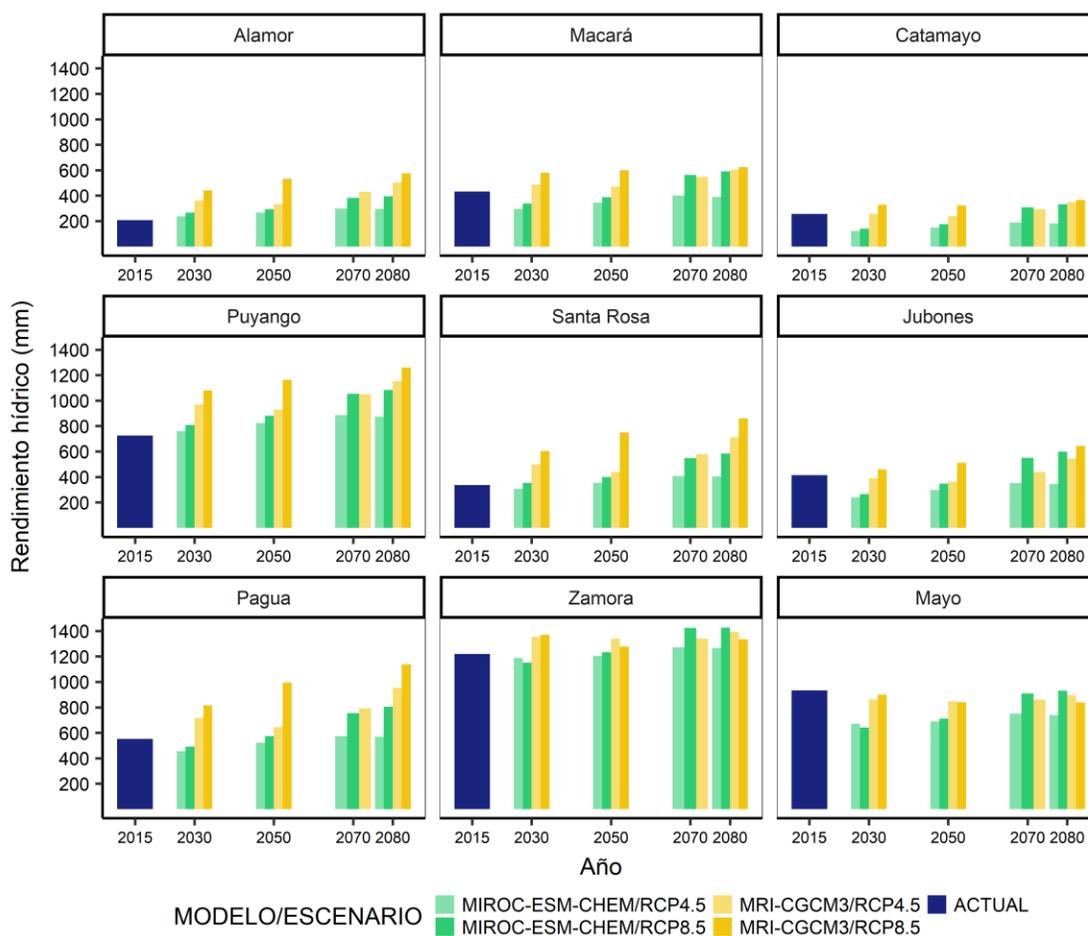


Figura 4-16. Rendimiento hídrico de los MCG para las proyecciones 2030s, 2050s, 2070s, y 2080s bajo escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5.

A nivel espacial se observa un alto rendimiento hídrico en las partes altas de las cuencas hidrográficas. Siendo siempre el escenario RCP8.5 el más drástico, al presentar la mayor producción de agua en todas las cuencas a nivel píxel (Figura 4-17 a Figura 4-25). Las cuencas Alamor, Santa Rosa, Puyango y Pagua, se destacan por una variación espacial amplia del rendimiento hídrico, 0 a ~1800. La variación espacial del rendimiento hídrico en las cuencas Macará, Catamayo y Jubones es similar, 0 a ~1300 mm. Las cuencas amazónicas, Zamora y Mayo, presentan los valores más altos de rendimiento hídrico. La variación espacial de la cuenca Zamora es de ~200 a ~2500 mm. En cambio, la cuenca Mayo presenta la distribución espacial del rendimiento hídrico más homogéneo, variando de ~600 a 1200 mm.

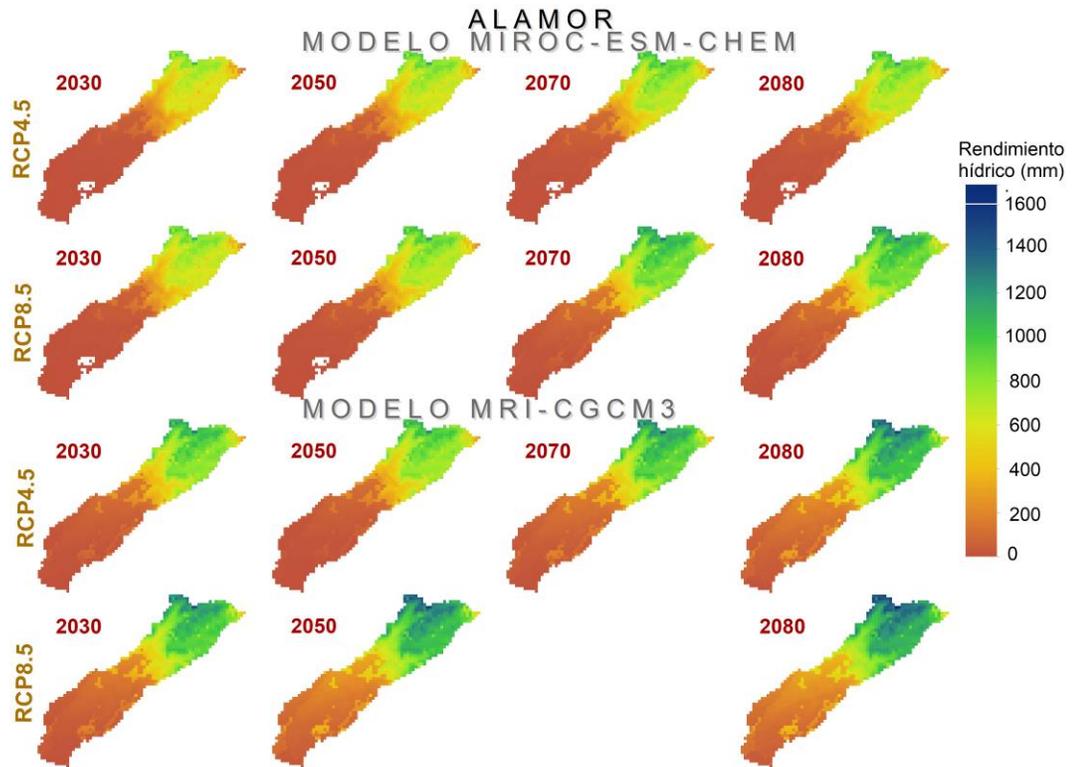


Figura 4-17. Distribución espacial del rendimiento hídrico en la cuenca Alamor de acuerdo con los MCG a diferentes proyecciones y escenarios climáticos.

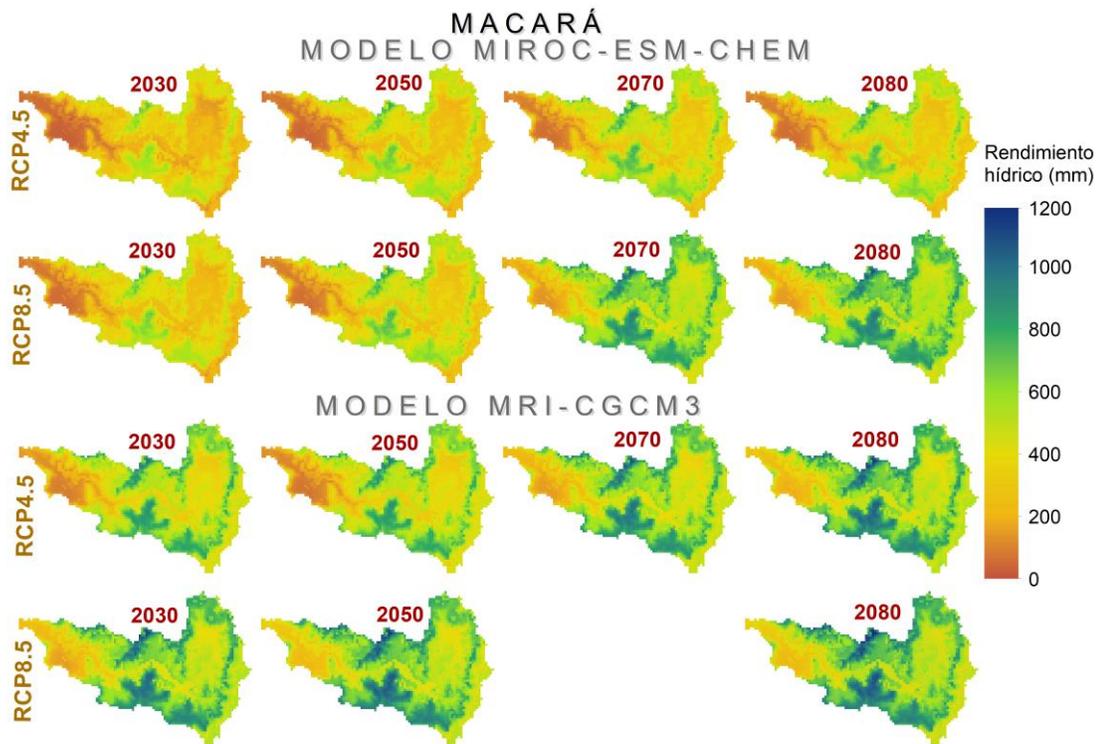


Figura 4-18. Distribución espacial del rendimiento hídrico en la cuenca Macará de acuerdo con los MCG a diferentes proyecciones y escenarios climáticos.

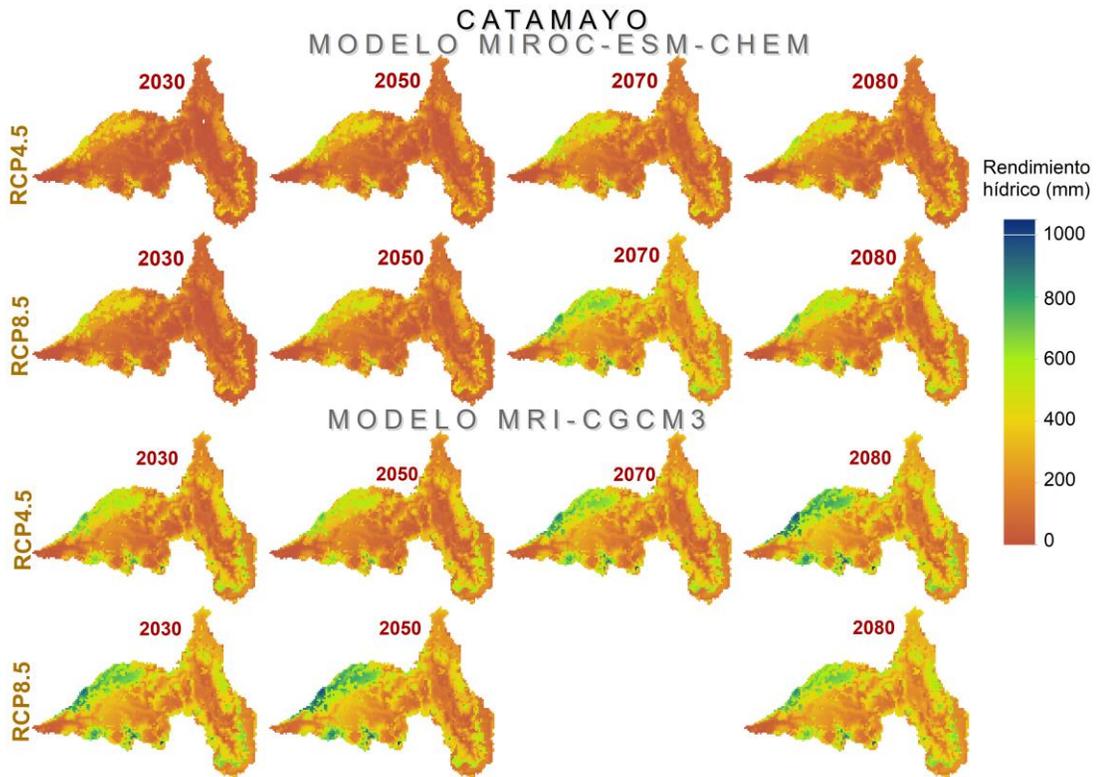


Figura 4-19. Distribución espacial del rendimiento hídrico en la cuenca Catamayo de acuerdo con los MCG a diferentes proyecciones y escenarios climáticos.

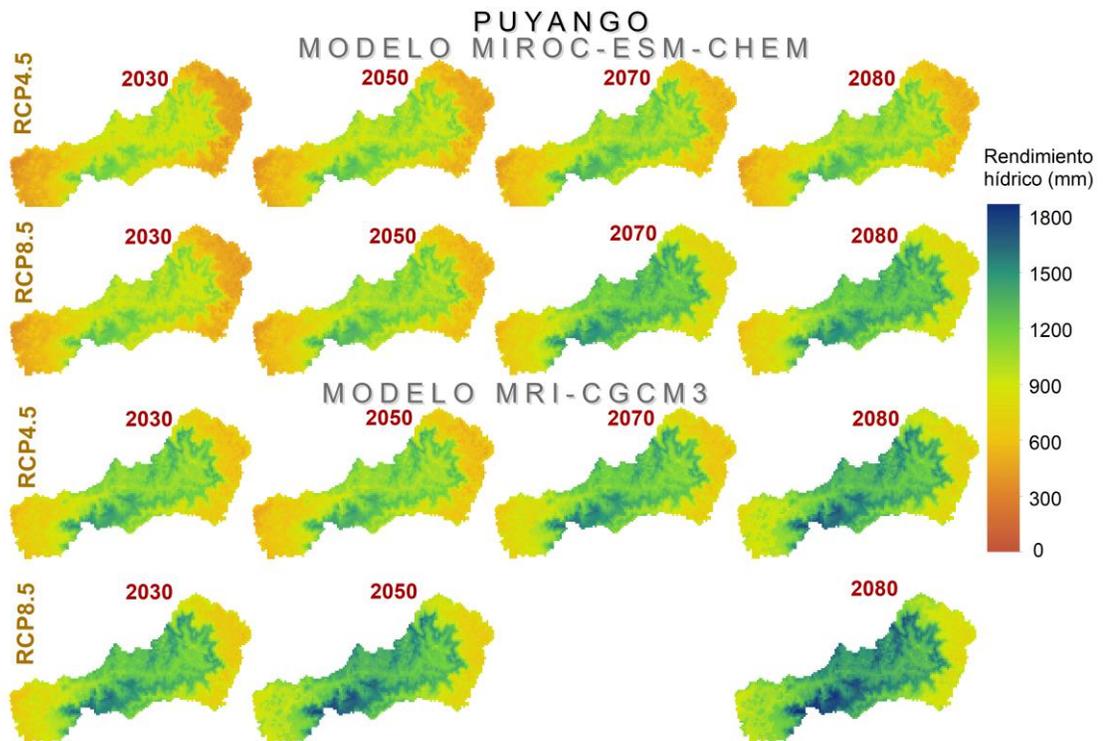


Figura 4-20. Distribución espacial del rendimiento hídrico en la cuenca Puyango de acuerdo con los MCG a diferentes proyecciones y escenarios climáticos.

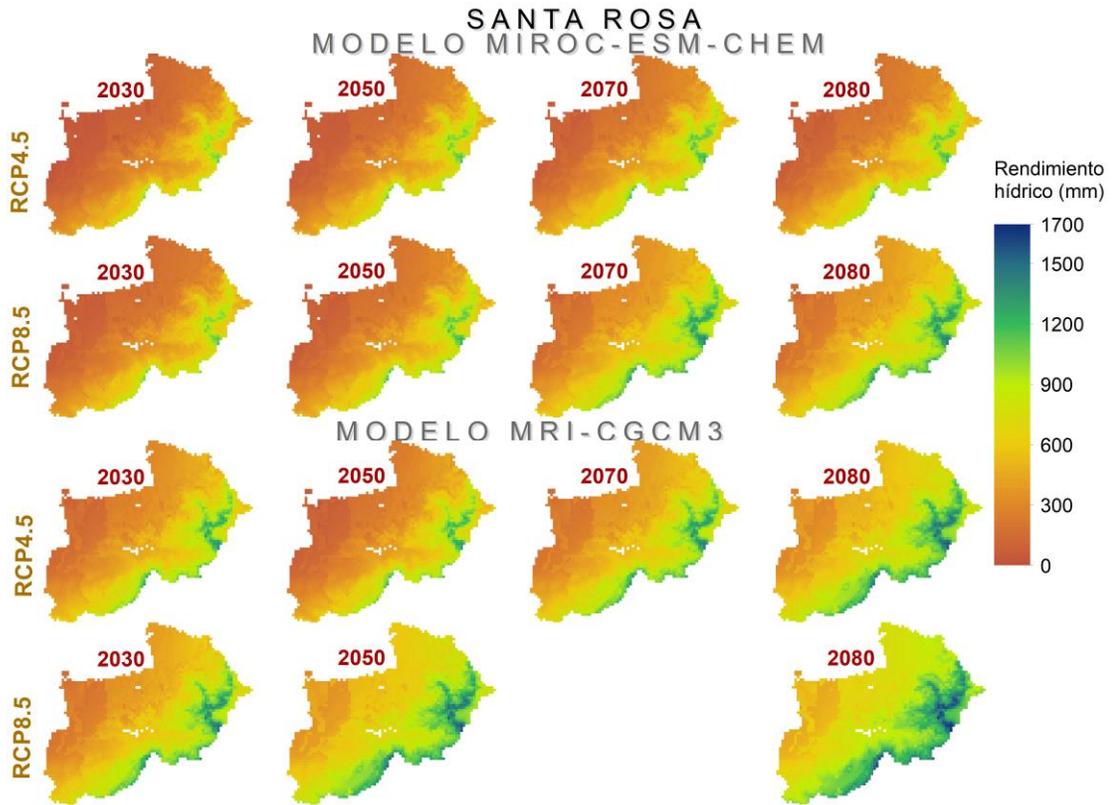


Figura 4-21. Distribución espacial del rendimiento hídrico en la cuenca Santa Rosa de acuerdo con los MCG a diferentes proyecciones y escenarios climáticos.

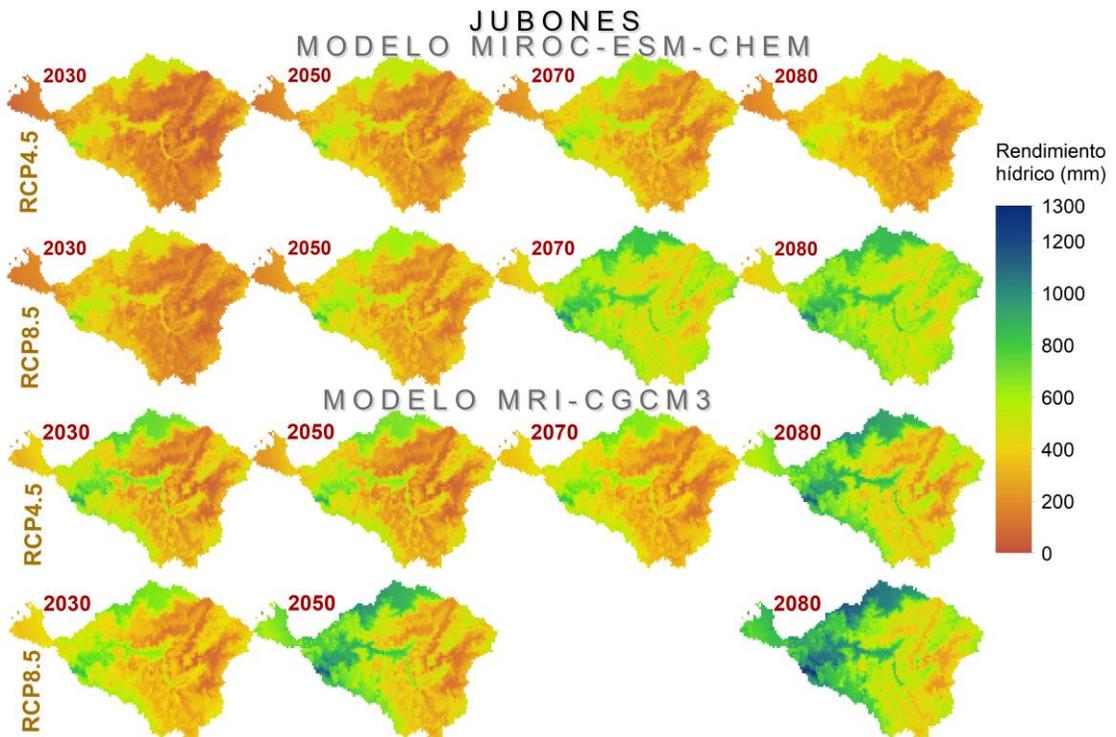


Figura 4-22. Distribución espacial del rendimiento hídrico en la cuenca Jubones de acuerdo con los MCG a diferentes proyecciones y escenarios climáticos.

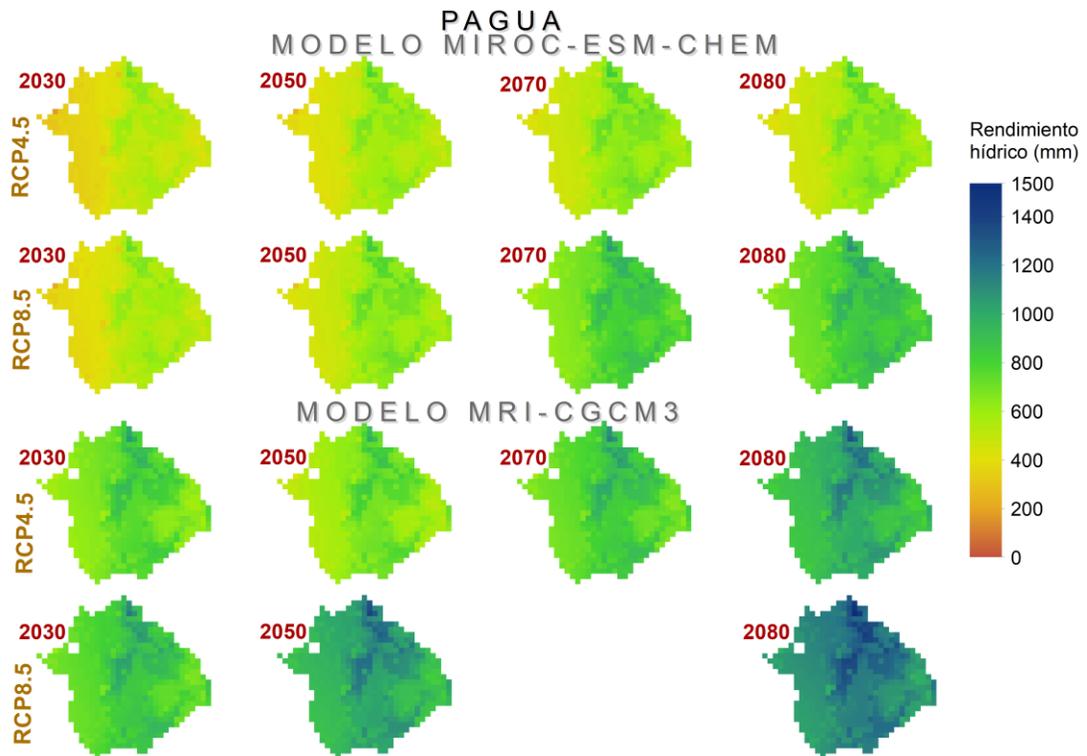


Figura 4-23. Distribución espacial del rendimiento hídrico en la cuenca Pagua de acuerdo con los MCG a diferentes proyecciones y escenarios climáticos.

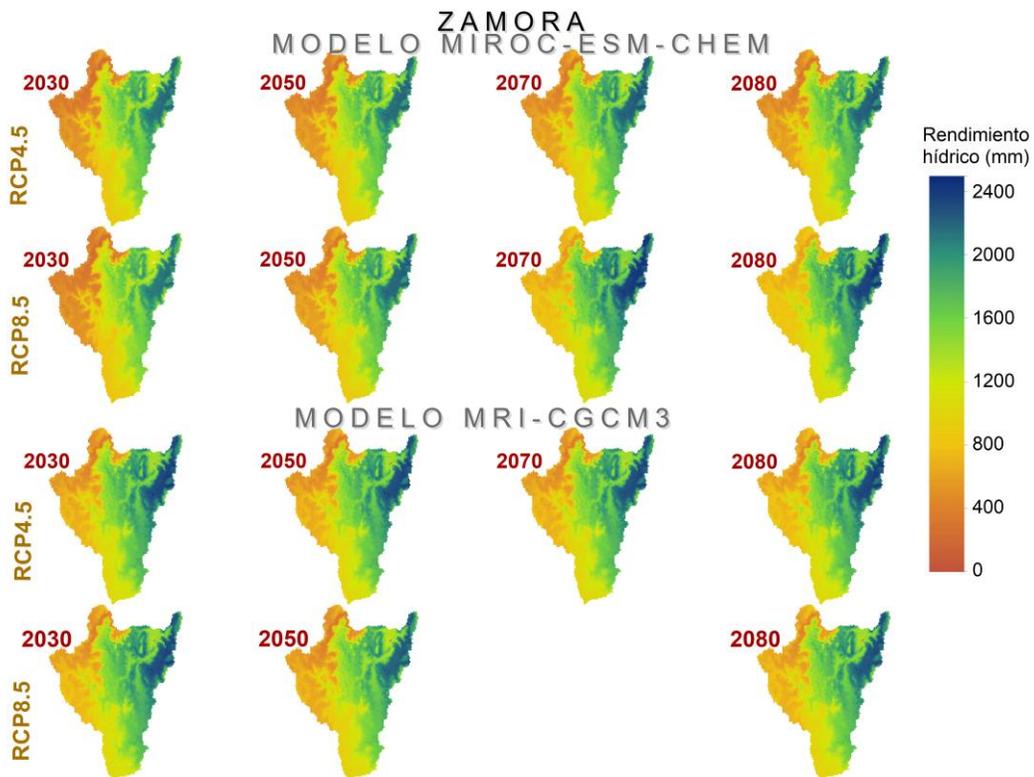


Figura 4-24. Distribución espacial del rendimiento hídrico en la cuenca Zamora de acuerdo con los MCG a diferentes proyecciones y escenarios climáticos.

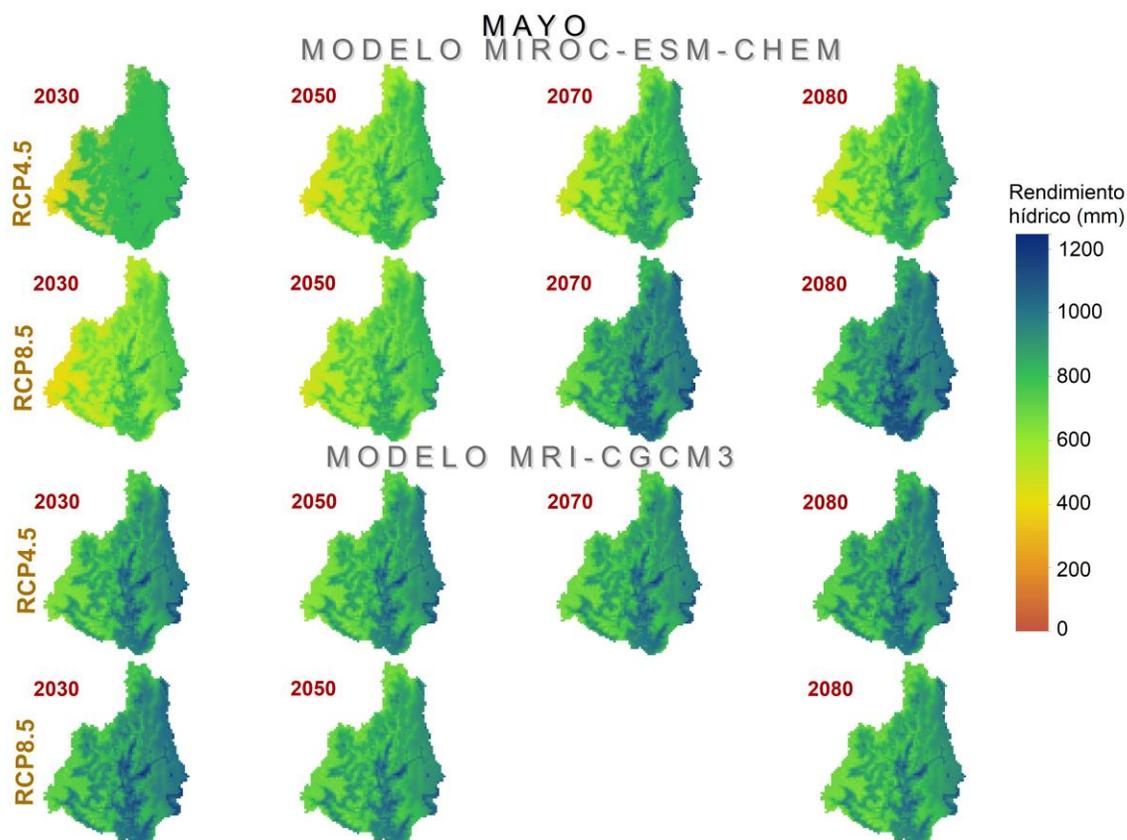


Figura 4-25. Distribución espacial del rendimiento hídrico en la cuenca Mayo de acuerdo con los MCG a diferentes proyecciones y escenarios climáticos.

4.7 Análisis de cambio del rendimiento hídrico

La estimación del rendimiento hídrico es bastante sensible a las variables climáticas: precipitación y evapotranspiración (Hamel y Guswa, 2015). Los cambios de estas variables dependen de los MCG, escenarios y años de proyección.

En precipitación el modelo MIROC presenta promedios de cambio de ~ -20 y ~ 115 mm para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente; mientras que, el modelo MRI presenta incrementos promedio de ~ 170 y 290 mm para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente (Figura 4-26). Lo que indica que los mayores incrementos de precipitación en las cuencas hidrográficas están dados por el modelo MRI y los cambios negativos o menores están dados por el modelo MIROC. El mayor incremento de precipitación es de 680 mm en la cuenca Pagua [MRI-año 2080-RCP8.5]. Y la mayor reducción de precipitación es en la cuenca Mayo con un valor de -295 mm [MIROC-año 2030-RCP8.5].

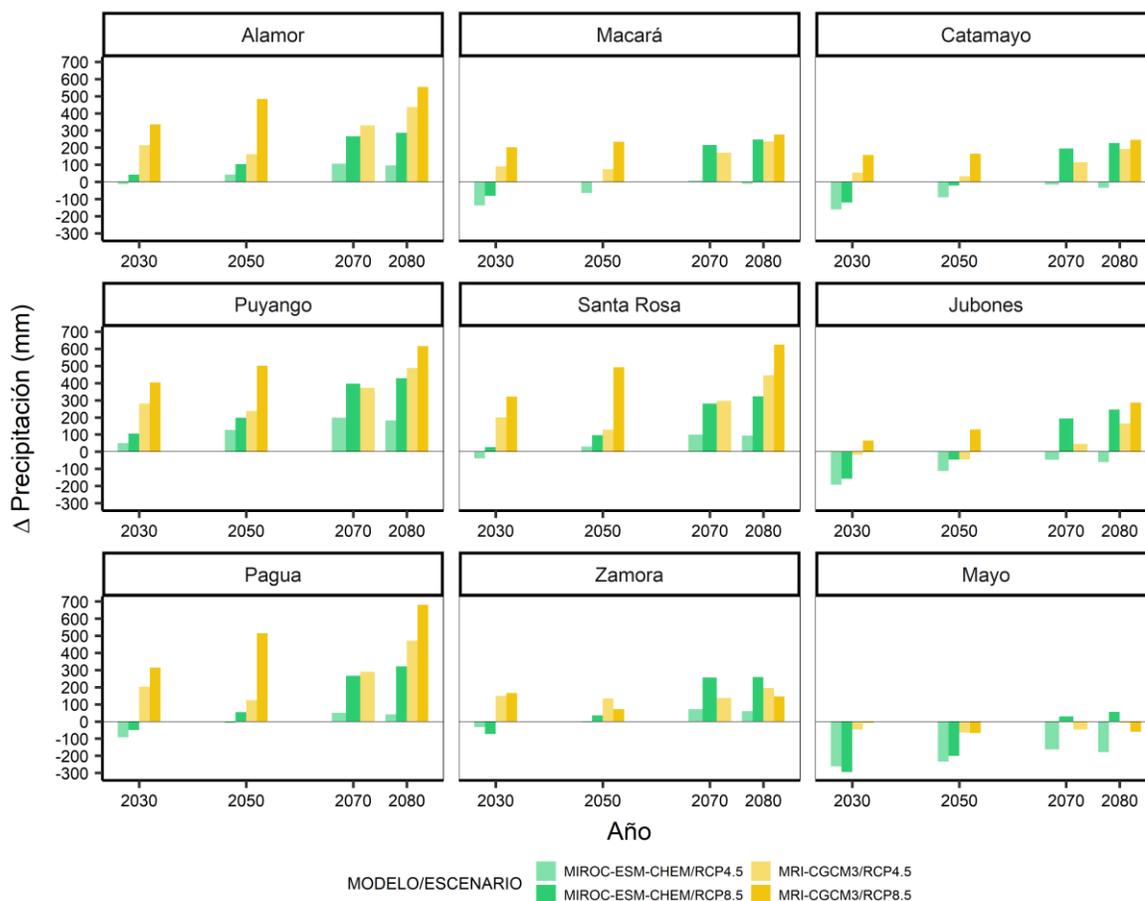


Figura 4-26. Cambios en la precipitación de los MCG para las proyecciones 2030s, 2050s, 2070s, y 2080s bajo escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5.

La evapotranspiración real (ETR) a diferencia de la precipitación presenta incrementos en todas las cuencas hidrográficas (Figura 4-27). El modelo MIROC presenta un promedio de cambio de ~ 15 y ~ 50 mm para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente; mientras que, el modelo MRI presenta incrementos promedios de 45 y 70 mm para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente. El mayor incremento y disminución de la ETR se presenta en la cuenca Alamor con un valor de 185 mm [MRI-año 2080-RCP8.5], y -43 mm en el modelo [MIROC-año 2030-RCP4.5], respectivamente.

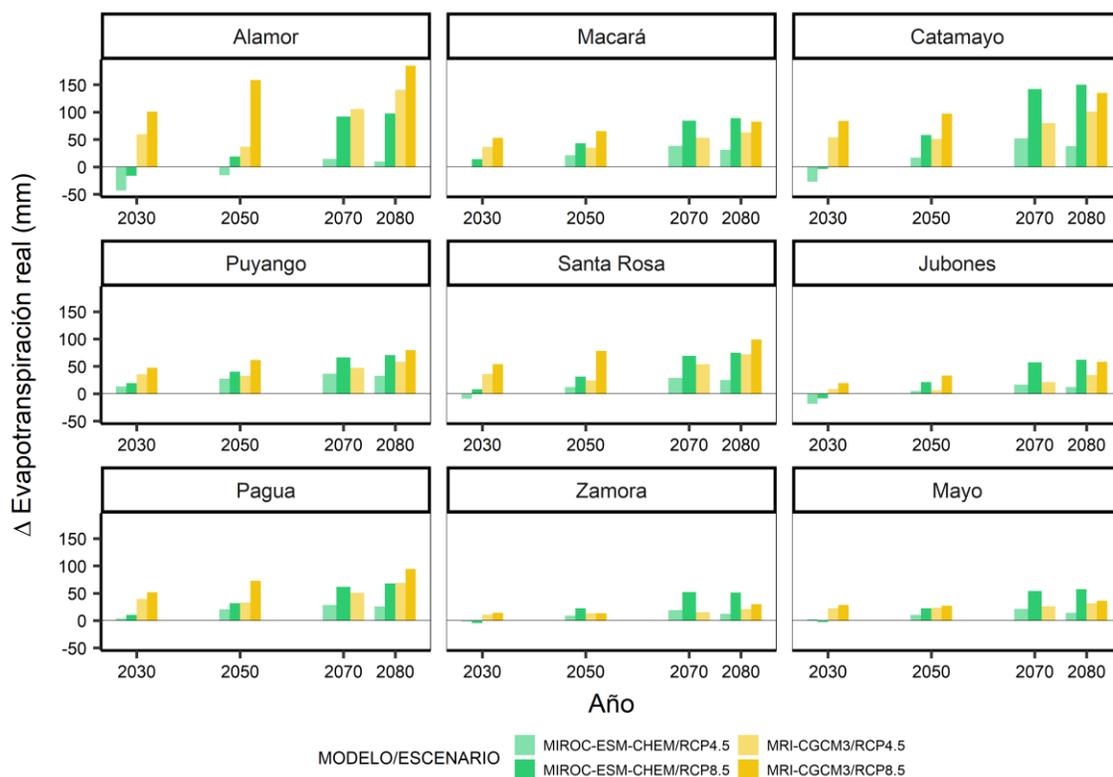


Figura 4-27. Cambios en la evapotranspiración real de los MCG para las proyecciones 2030s, 2050s, 2070s, y 2080s bajo escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5.

El rendimiento hídrico futuro presenta incrementos y decrementos a la vez en la mayoría de las cuencas hidrográficas (Figura 4-28); esto, dependiendo del MCG, año de proyección y escenario. El modelo MIROC, presenta cambios promedio de -33 mm en el escenario RCP4.5 y 67 mm en el RCP8.5; mientras que, el modelo MRI presenta el mayor incremento de producción de agua con valores promedios de 130 y 222 mm para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente. La cuenca Pagua presenta el mayor incremento de producción hídrica con un valor de ~ 600 mm [MRI-año 2080-RCP8.5]. Y la cuenca Mayo presenta la mayor reducción de agua, con un valor de ~ -300 mm [MIROC-año 2030-RCP8.5]. Es importante destacar que las cuencas Puyango y Alamor presentan únicamente cambios positivos del rendimiento hídrico, incrementos hasta de ~540 mm en el modelo [MRI-año 2080-RCP8.5]. En el Tabla 4-5 se presenta a detalle los valores absolutos de cambios del rendimiento hídrico.

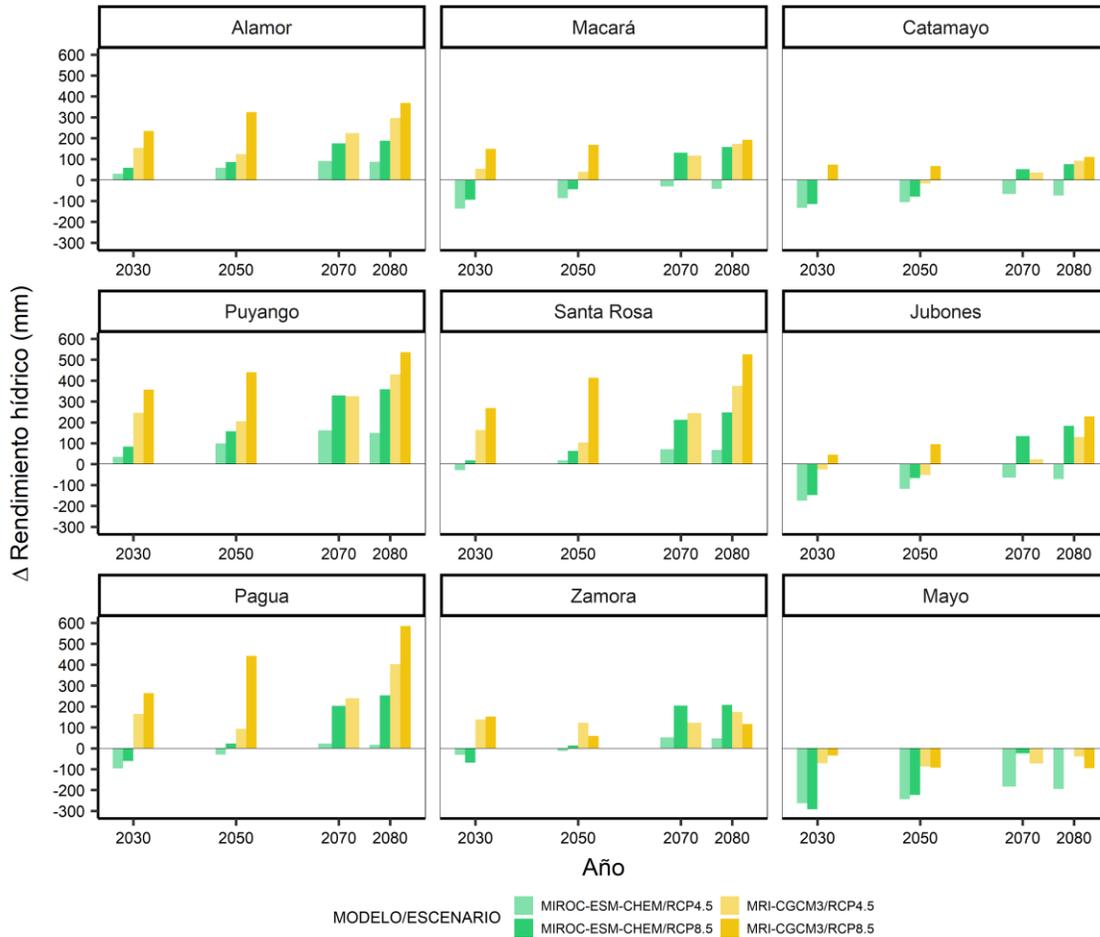


Figura 4-28. Cambios en el rendimiento hídrico de los MCG para las proyecciones 2030s, 2050s, 2070s, y 2080s bajo escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5.

Los cambios del rendimiento hídrico a nivel espacial se pueden observar en la Figura 4-29. De acuerdo con el modelo MIROC, escenario RCP4.5, generalmente habrá una reducción del rendimiento hídrico en las cuencas Macará, Catamayo, Jubones, Zamora (oeste) y Mayo. En el escenario RCP8.5 a medida que aumenta el año de proyección, la reducción del rendimiento hídrico disminuye. Es decir, en el año 2080- RCP8.5, la reducción del rendimiento hídrico es solamente en las zonas altas de las cuencas. Por otro lado, el mayor incremento del rendimiento hídrico se presenta en las cuencas Alamor, Puyango y al este de la cuenca Zamora, tanto en el escenario RCP4.5 y como el RCP8.5 y en todos los años de proyección.

Tabla 4-5. Cambios futuros del rendimiento hídrico en mm, con referencia al valor estimado actual [1970-2015].

Id	Cuenca	Modelo	Escenario	Actual	2030s	Δ	2050s	Δ	2070s	Δ	2080s	Δ
1	Alamor	MIROC-ESM-CHEM	RCP4.5	207	237	30	266	59	298	91	294	87
			RCP8.5		266	59	293	86	382	175	395	188
		MRI-CGCM3	RCP4.5		361	154	331	124	431	224	503	296
			RCP8.5		442	235	532	325	-	-	576	369
2	Macará	MIROC-ESM-CHEM	RCP4.5	432	295	-137	345	-87	401	-31	390	-42
			RCP8.5		337	-95	387	-45	562	130	590	158
		MRI-CGCM3	RCP4.5		486	54	471	39	548	116	604	172
			RCP8.5		580	148	600	168	-	-	624	192
3	Catamayo	MIROC-ESM-CHEM	RCP4.5	256	122	-134	150	-106	189	-67	182	-74
			RCP8.5		141	-115	176	-80	308	52	332	76
		MRI-CGCM3	RCP4.5		256	0.1	239	-17	292	36	348	92
			RCP8.5		329	-27	323	67	-	-	366	109
4	Puyango	MIROC-ESM-CHEM	RCP4.5	724	759	35	823	99	886	162	873	149
			RCP8.5		808	84	881	157	1053	329	1083	359
		MRI-CGCM3	RCP4.5		969	245	929	205	1049	325	1153	429
			RCP8.5		1080	356	1164	440	-	-	1260	536
5	Santa Rosa	MIROC-ESM-CHEM	RCP4.5	335	306	-29	353	18	406	71	403	68
			RCP8.5		353	18	399	64	547	212	583	248
		MRI-CGCM3	RCP4.5		498	163	439	104	579	244	709	374
			RCP8.5		603	268	749	414	-	-	861	526
6	Jubones	MIROC-ESM-CHEM	RCP4.5	414	240	-174	296	-118	350	-64	343	-71
			RCP8.5		266	-148	347	-67	549	135	598	184
		MRI-CGCM3	RCP4.5		389	-25	362	-52	438	24	544	130
			RCP8.5		459	45	510	96	-	-	642	228
7	Pagua	MIROC-ESM-CHEM	RCP4.5	552	455	-97	522	-30	574	22	568	16
			RCP8.5		491	-61	574	22	755	203	805	253
		MRI-CGCM3	RCP4.5		716	164	645	93	791	239	954	402
			RCP8.5		816	264	994	442	-	-	1137	585
8	Zamora	MIROC-ESM-CHEM	RCP4.5	1219	1187	-32	1205	-14	1271	52	1266	47
			RCP8.5		1150	-69	1232	13	1423	204	1426	207
		MRI-CGCM3	RCP4.5		1356	137	1341	122	1340	121	1392	173
			RCP8.5		1370	151	1277	58	-	-	1335	116
9	Mayo	MIROC-ESM-CHEM	RCP4.5	934	670	-264	690	-244	750	-184	739	-195
			RCP8.5		642	-292	711	-223	909	-25	932	-2
		MRI-CGCM3	RCP4.5		863	-71	847	-87	861	-73	895	-39
			RCP8.5		899	-35	841	-93	-	-	838	-96

De acuerdo con el modelo MRI, la reducción del rendimiento hídrico a nivel espacial se presenta únicamente en las zonas altas de las cuencas Catamayo, Macará, Jubones, Zamora y Mayo, zona denominada como depresión de Los Andes, en los dos escenarios y en todos los años de proyección, con un valor máximo de ~ -600 mm. En cambio, las cuencas Alamor, Puyango, Santa Rosa, Pagua, y las zonas bajas del resto de cuencas presentan un incremento del rendimiento hídrico, siendo siempre mayor el incremento en el año 2080.

Finalmente se puede observar que tanto a nivel temporal y espacial hay cambios positivos y negativos en las cuencas hidrográficas de la región sur del Ecuador. Los cambios negativos, es decir, reducción de rendimiento hídrico se dan en las zonas altas de las cuencas. En particular, la cuenca Mayo es la que presenta la mayor reducción del rendimiento hídrico en todos los modelos, escenarios y años de proyección, con un promedio de hasta ~ -300 mm año⁻¹. Mientras que, los cambios positivos generalmente son en las zonas medias y bajas de las cuencas localizadas en los valles interandinos y sierras; así como, al este de la cuenca Zamora y parte baja de la cuenca Mayo. Las cuencas con mayor incremento del rendimiento hídrico son Alamor y Puyango, siendo espacialmente homogéneo el incremento a nivel espacial, con un promedio de hasta ~ 540 mm año⁻¹.

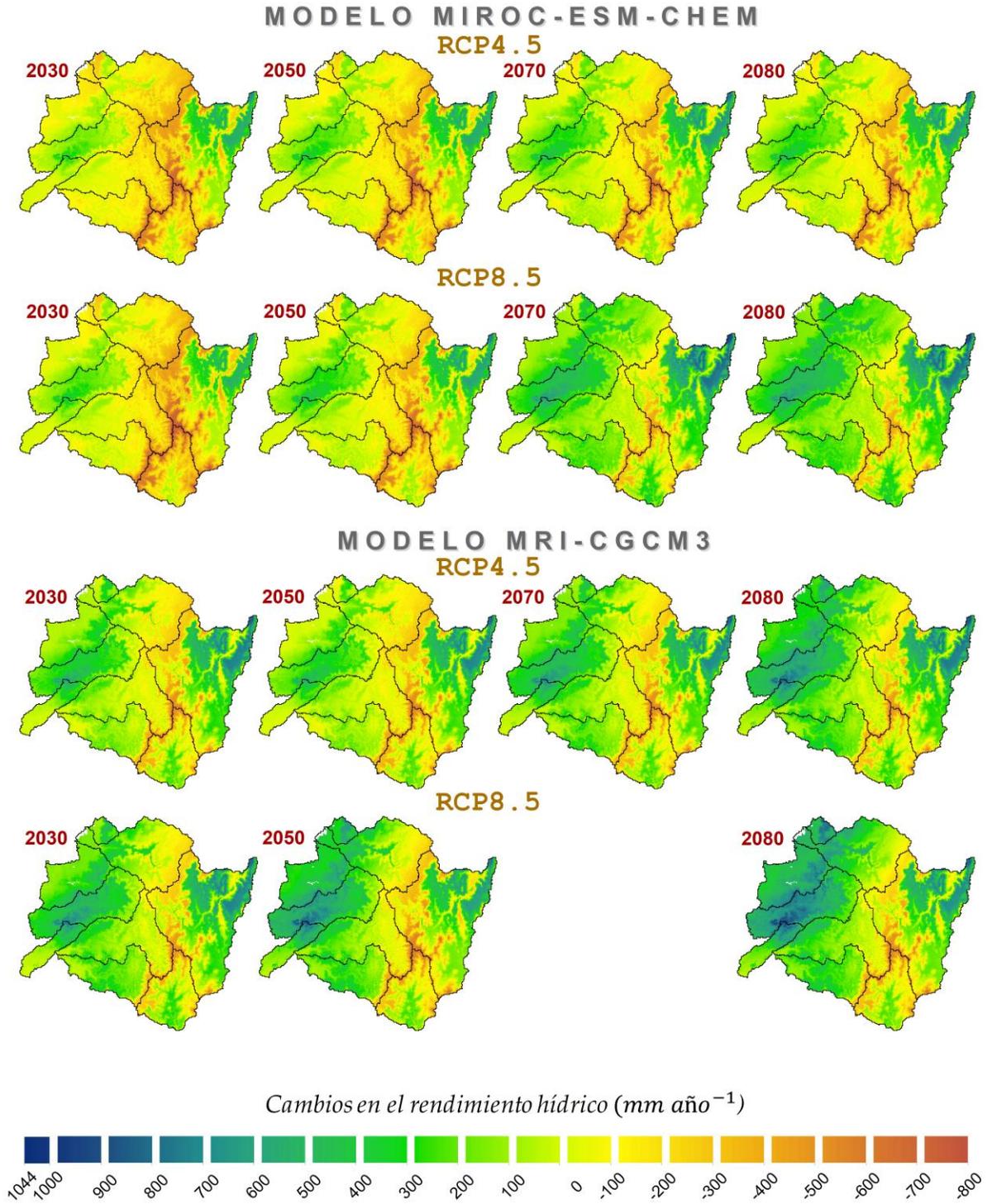


Figura 4-29. Cambios en el rendimiento hídrico a nivel espacial.

5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1 Superficies climáticas

ANUSPLIN-SPLINA proporciona medidas de diagnóstico para evaluar la calidad de cada superficie climática. La señal indica la complejidad de la superficie y varía entre un pequeño valor positivo y el número de estaciones utilizadas para generar la superficie (Hutchinson, 2004). Hutchinson y Gessler (1994) sugieren que la señal generalmente no debe ser mayor que la mitad del número de estaciones utilizadas. Los modelos con señales apropiadas tienden a ser más robustos y confiables en regiones dispersas de datos. Las señales más altas indican una superficie más compleja con el ajuste resultante acercándose a una interpolación más exacta a través de los puntos de datos (Mckenney et al., 2006). La mayoría de las superficies climáticas interpoladas para el área de estudio tuvieron señales altas (entre 0 - 0.8). Situación que refleja la compleja orografía del área de estudio. Mckenney et al. (2006), tuvieron resultados similares, varias de las superficies climáticas (<10%) tuvieron señales > 0.5, en este caso reforzaron un cierto grado de suavizado en la superficie estableciendo un valor máximo para la señal en el 80% (0.8) del número de puntos de datos.

La RTMSE es una estimación del verdadero error de interpolación después de que los errores de los datos son removidos (Télez et al., 2011). Se calcula como la raíz cuadrada del error medio (MSE). Los valores de RTMSE fueron generalmente inferiores a 1.4 °C para las variables de temperatura; y variaron entre 0 y 25% para la precipitación, lo que indica un buen ajuste entre los datos y la superficie modelada (Mckenney et al., 2006). En el caso de la precipitación, los errores se pueden explicar en parte por el error de medición y baja densidad de estaciones.

Finalmente, las superficies climáticas generadas tienen una resolución espacial 5 veces mayor (6 arcos de segundo ~185 m) que las superficies climáticas disponibles a nivel mundial, por ejemplo, WorldClim (30 segundos de arco ~ 1km). Los datos climáticos a resoluciones altas pueden ser esenciales para estudios en áreas montañosas y áreas con fuertes gradientes climáticos (Fick y Hijmans, 2017). Una cuadrícula climática de alta resolución oculta menos la variación espacial (Hijmans et al., 2005). A pesar de que la señal de las superficies interpoladas estuvieron por encima del valor límite, se ha logrado avances

significativos, se requieren esfuerzos adicionales en el control de calidad y compilación de datos climáticos para mejorar la cobertura espacial y temporal de las superficies climáticas.

Análisis exploratorio de las superficies climáticas

Las superficies climáticas de precipitación muestran una alta variabilidad espacial y temporal. La mayoría de las cuencas hidrográficas posee valores muy altos de precipitación, generalmente durante los meses de febrero y marzo, sin embargo, durante meses pueden no haber lluvias (Figura 4-8). Por ejemplo, la cuenca Alamor presentan los valores mas altos de precipitación de 211 y 300 mm en los meses de febrero y marzo, respectivamente; lo que representa aproximadamente el 60 % de la precipitación total anual. La misma cuenca presenta los valores más bajo de precipitación en el mes de agosto (~1 mm) en comparación con las demás cuencas. Este patrón se refleja en otras cuencas como Puyango, Macará, Catamayo, Santa Rosa y Pagua.

Estudios climáticos previos desarrollados en algunas zonas del área de estudio, en diferentes periodos, presentan patrones similares de distribución (Emck, 2007a; Luna-Romero et al., 2018; Pourrut, 1983; Pourrut et al., 1995). Sin embargo, el estudio de Rollenbeck y Bendix (2011) evaluaron un conjunto de imágenes de radar (LAWR) al sur del Ecuador, sus resultados indican que la precipitación alcanza los 4000 mm en las partes altas de las montañas, mientras que las imágenes obtenidas por interpolación en el presente estudio llegan a los 2400 mm. La subestimación de la precipitación se debe posiblemente a la baja densidad de estaciones meteorológicas en las partes altas de las montañas, las cuales son áreas que reciben la mayor cantidad de lluvia, así como también por la compleja orografía de la zona de estudio. Particularmente aquí, existe la influencia directa de la Cordillera de Los Andes, siendo esta región uno de los sectores más bajos de la cadena montañosa, conocido como depresión de Los Andes (Richter y Moreira, 2005). El estudio de Cuervo-Robayo et al. (2014) desarrollaron superficies climáticas para todo México utilizando el método thin-plate smoothing, los resultados en general fueron satisfactorios, sin embargo, indican que valores altos de error estándar se presentan principalmente en las cadenas montañosas.

5.2 Tendencias de series climáticas

En la variable precipitación no se pudo observar una tendencia clara de incremento o disminución de la precipitación en el tiempo. No obstante, es importante mencionar que esto puede ser posiblemente por la influencia que tienen los periodos húmedos y secos en la regresión lineal en cada unidad hidrográfica. Ya que, al analizar la precipitación a nivel mensual por unidades hidrográficas para el periodo 1970-2015 (Anexo E) se observa que en los meses lluviosos hay un incremento de la precipitación, mientras que en los meses secos disminuye la precipitación, sobre todo en el mes de agosto. De acuerdo con el estudio de Celleri et al. (2007) en la cuenca Jubones, aunque no se encontraron tendencias para la precipitación anual, sí hubo tendencias positivas durante la estación húmeda y tendencias negativas durante la estación seca, situación que aumenta el riesgo de desastres provocados por la precipitación y probabilidad de escasez de agua.

Otro estudio en la cuenca binacional Catamayo-Chira (abarca las cuencas Alamor, Macará y Catamayo) (Oñate-Valdivieso y Bosque Sendra, 2011) analizaron registros de precipitación de 40 estaciones, aunque el análisis no fue a nivel espacial, lograron determinar tendencias positivas y negativas de precipitación. Se detectaron tendencias positivas, con valores entre 31% y 187% en estaciones localizadas por debajo de los 600 msnm; y valores entre 7.7 % y 35.5 % en estaciones localizadas sobre los 600 msnm. En cambio, las tendencias negativas se presentaron en estaciones localizadas entre los 980 y 2160 msnm, con valores que varían entre -2.1 y -34.3 %. Esto demuestra la alta variabilidad espacial y temporal de la precipitación en el área de estudio y la necesidad de analizar tendencias a nivel mensual o estacional.

En cuanto a la temperatura, se identificó tendencias positivas tanto a nivel espacial y temporal en la ZP7 y en cuencas hidrográficas, los valores variaron entre 0.7 y 1.74 °C. En el estudio de Oñate-Valdivieso y Bosque Sendra (2011) el rango de variación de la tendencia es más amplio, entre 0.1 a 2.4 °C (cuenca Catamayo-Chira). Las tendencias positivas de temperatura evidencia la existencia de un cambio climático en la zona de estudio.

5.3 Rendimiento hídrico

Calibración del modelo *Water Yield* de InVEST

Se logró la calibración del modelo WY en cinco subcuencas hidrográficas con errores menores de 7%, mientras que en cuatro subcuencas no se logró la calibración, los resultados del rendimiento hídrico fueron subestimados, esto, se puede atribuir a la posible subestimación de la precipitación, al ser la variable con mayor sensibilidad en la estimación del rendimiento hídrico de acuerdo con varios estudios realizados (Goyal y Khan, 2016; Hamel y Guswa, 2015; Redhead et al., 2016; Sánchez-Canales et al., 2012).

En un caso de estudio en una cuenca andina de Argentina, Pessacg et al. (2015) evaluaron diferentes conjuntos de datos de precipitación, con diferentes resoluciones espaciales y temporales. La calibración del parámetro ecohidrológico Z varió de acuerdo con la base de datos de precipitación. Errores en la precipitación de +/-30% condujeron a errores del rendimiento hídrico del 50 al 150% (-45 a -60%) en algunas subcuencas.

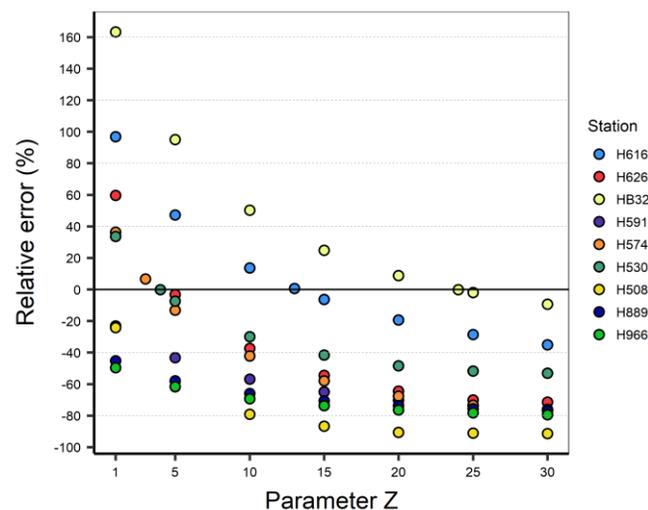


Figura 5-1. Calibración del modelo en función al parámetro ecohidrológico Z.

De acuerdo con Hamel y Guswa (2015) los valores de Z menores de 5 son poco probables. Por otro lado, se confirmó que mientras más bajos son los valores de Z, mayor son los valores de rendimiento hídrico y, a medida que los valores de Z incrementan, el rendimiento hídrico disminuye (Figura 5-1). Estudios como Pessacg et al. (2015) y Zhang et al. (2012) corroboran esta relación. En este estudio, a pesar de que la calibración en cinco cuencas hidrográficas

fue satisfactoria, tres de ellas se calibraron con valores bajos de Z , esto, confirma una subestimación de la precipitación.

En el presente estudio, se utilizó información de AWC, profundidad del suelo y de las raíces de la base de datos HSWD, la cual presenta una escala relativamente grande para el área de estudio (información disponible), lo ideal sería trabajar con información a más detalle, ya que estos parámetros forman parte de las propiedades físicas del suelo y de la planta que son considerados en la estimación de la ETR.

Con respecto al UCS, sería importante estimar el RH a partir de un mapa UCS más detallado, es decir subdividir las categorías, como por ejemplo la clase bosque, se podría subdividir en bosque seco, bosque montado o pinos, ya que todas estas coberturas tienen diferentes características con respecto a la profundidad de las raíces, y diferente K_c . Esto se debería realizar siempre y cuando se cuente con la información a detalle de las demás variables.

El parámetro ecohidrológico Z es una constante empírica que capta características de la cuenca, como: clima, intensidad de la lluvia y la topografía, las cuales no están descritas por el contenido de agua disponible en la planta (AWC) y la precipitación anual. Dada la naturaleza empírica del modelo, el valor del parámetro Z sigue siendo incierto.

La profundidad de raíz no fue sensible en los resultados de estimación del rendimiento hídrico, ya que posee valores relativamente mayores que la profundidad del suelo. Al aplicar la fórmula [Ec. 2.5] para obtener AWC se considera al valor menor entre las variables profundidad de enraizamiento y profundidad del suelo. Los valores bajos fueron la profundidad del suelo, de modo que esta variable tiene mayor peso en comparación con la profundidad de la raíz.

Rendimiento hídrico actual y futuro

El mayor rendimiento hídrico tanto actual y futuro en el área de estudio es en las cuencas Zamora y Mayo. Estas dos cuencas se encuentran localizadas en la región amazónica, por lo que se ven influenciadas por “masas de aire tropical continental”. Estas, son masas de aire caliente, con una notable humedad procedente de la evaporación de los pantanos y evapotranspiración de la selva densa llegando a producir importantes precipitaciones en la

zona por proceso de enfriamiento adiabático (Pourrut et al., 1995). Aquí las precipitaciones están distribuidas uniformemente a lo largo del año, con una ligera disminución en los meses de junio a octubre, en la cuenca Mayo.

Las cuencas localizadas en los valles andinos y sierras al suroeste de la cadena montañosa se destacan por una amplia variación espacial del rendimiento hídrico. Esto se explica debido a que generalmente estas zonas son húmedas en las partes altas y secas en las zonas bajas, debido al efecto "Foehn" (Emck, 2007b). Un claro ejemplo es el valle de Catamayo (noreste de la cuenca Catamayo) con un clima totalmente árido que es propenso al efecto Fohn provocado por los "vientos del este". Los meses más secos son de junio a agosto con muy poca o nula precipitación. La estación húmeda corta trae lluvias intensas, que a menudo están conectadas a masas de aire húmedo provenientes del sur. El valle de Vilcabamba (sureste de la cuenca Catamayo), muestra patrones similares, pero la proximidad a la Cordillera Real de Los Andes y el efecto Föhn ligeramente más débil conducen a un clima semiárido, con una estacionalidad similar (Rollenbeck y Bendix, 2011).

El rendimiento hídrico sigue el comportamiento espacial y temporal de la precipitación. Por lo que la mayor producción hídrica fue en las cuencas amazónicas Zamora y Mayo; mientras que las de menor fueron las cuencas localizadas en los valles andinos y sierras, Alamor y Catamayo. Un estudio en la región sur del Ecuador evaluó la producción de agua como parte de un servicio ecosistémico a nivel de ZP7, la estimación la realizaron aplicando la fórmula de escurrimiento medio. Sus resultados mostraron mayor producción hídrica ($\sim 9750 \text{ m}^3/\text{ha}$) al noroeste de área (cuenca Zamora) y la menor producción en las zonas costera y valles andinos ($\sim 167 \text{ m}^3/\text{ha}$) (Aguirre et al., 2015).

De acuerdo con las proyecciones futuras se prevén un incremento del rendimiento hídrico en la mayoría de las zonas medias y bajas de las cuencas hidrográficas. En cambio, las partes altas de las cuencas que nacen en la cordillera de los Andes presentan una reducción del rendimiento hídrico. Los cambios de la producción hídrica por efecto del cambio climático dependen principalmente de las variación de la precipitación y evapotranspiración (Bates et al., 2008).

En un estudio realizado por Buytaert et al. (2010) en Los Andes tropicales, prevén un incremento de la temperatura alrededor de 3 °C y la precipitación alrededor del 10 %. Estos resultados son producto de un ensamble de 18 MCG, periodo 2080s, escenario A1B, a una resolución de 0.1° (~10 km). El escenario similar a A1B en este estudio es RCP4.5, la temperatura y precipitación también presentaron aumentos. La temperatura incrementó en promedio 2.5 °C de acuerdo con el modelo MIROC-RCP4.5; mientras que el modelo MRI-RCP4.5 el incremento es menor, 2°C (Tabla 5-1 y Anexo G). La precipitación aumentó en promedio 1.9 % y 27 % para los modelos MIROC-RCP4.5 y MRI- RCP4.5, respectivamente (Tabla 5-1 y Figura 4-26); siendo este último, el más drástico, esto, para el periodo 2080s [2070-2099].

Tabla 5-1. Cambios de temperatura media, evapotranspiración real (ETR), precipitación y rendimiento hídrico por MCG y escenario para el periodo 2080s [2070-2099].

Variable	Modelo	Escenario	2015	2080s	Cambios	Cambios (%)
Temperatura media (°C)	MIROC-ESM-CHEM	RCP4.5	20.0	22.6	2.5	-
	MIROC-ESM-CHEM	RCP8.5		24.6	4.5	-
	MRI-CGCM3	RCP4.5		22.0	2.0	-
	MRI-CGCM3	RCP8.5		23.5	3.4	-
ETR (mm)	MIROC-ESM-CHEM	RCP4.5	529.8	552.1	22.3	4.2
	MIROC-ESM-CHEM	RCP8.5		609.9	80.1	15.1
	MRI-CGCM3	RCP4.5		595.4	65.6	12.2
	MRI-CGCM3	RCP8.5		618.7	88.8	16.8
Precipitación (mm)	MIROC-ESM-CHEM	RCP4.5	1093.4	1114.1	20.7	1.9
	MIROC-ESM-CHEM	RCP8.5		1359.3	265.9	24.3
	MRI-CGCM3	RCP4.5		1384.6	291.1	26.6
	MRI-CGCM3	RCP8.5		1467.4	374.0	34.21
Rendimiento hídrico (mm)	MIROC-ESM-CHEM	RCP4.5	563.6	562.0	-1.6	-0.28
	MIROC-ESM-CHEM	RCP8.5		749.3	185.7	33.0
	MRI-CGCM3	RCP4.5		789.1	225.5	40.0
	MRI-CGCM3	RCP8.5		848.8	285.2	50.6

La estimación del rendimiento hídrico bajo proyecciones también estuvo claramente vinculado a las variables: precipitación y evapotranspiración real. Por ejemplo, en la Tabla 5-1 observamos que los cambios promedio del modelo MIROC-RCP4.5 fueron de 4.2% en evapotranspiración real y apenas 1.9 % en precipitación, lo que conllevó a una ligera reducción del rendimiento hídrico de -0.28 %. En cambio, el modelo MRI a pesar de que el

incremento de la ETR fue mayor, 12,4%, la precipitación tuvo un incremento del 26%, por lo que conllevó a un mayor incremento del rendimiento hídrico (40%).

Finalmente es importante destacar las tendencias identificadas de incremento de precipitaciones en los meses lluviosos y disminución en los meses secos (Anexo E). Situación que sería importante analizar más a detalle en un futuro. Este patrón concuerda con las proyecciones futuras, Bates et al. (2008) señala que los modelos indican que la precipitación aumentará por lo general en áreas con valores máximos de precipitación tropical regional (por ejemplo, en los regímenes monzónicos, particularmente en el Pacífico tropical). Es muy probable que los episodios de precipitación intensa aumenten en frecuencia. Su intensidad aumentaría, particularmente en áreas tropicales y de latitudes altas que experimentan aumentos de la precipitación media. Se aprecia una tendencia hacia un clima más seco en áreas continentales medias durante los veranos, que apunta a un riesgo de sequía elevado en esas regiones. En la mayoría de las áreas tropicales, la precipitación extrema aumentaría más que la precipitación media. Esto implica un alto riesgo para la población, ya que en un futuro se puede sufrir de mayor escasez de agua y así como también, zonas que padecen de inundaciones, podrían ser más severas.

6 CONCLUSIONES

- Se recopiló, estructuró y validó información meteorológica de 160 estaciones de precipitación, 62 de temperatura media y 64 de temperatura máxima y mínima para el periodo 1970-2015. Se identificó valores atípicos, sin embargo, la mayoría de estos valores se encontraron relacionados con la irregularidad de la disponibilidad de datos, localización de la estación y el ENOS.
- Se generó una serie de 552 imágenes ráster por variable para el periodo 1970-2015, a una resolución de 6 arcos de segundo (~185 m). La RTMSE fue generalmente inferior a 1.4°C para las variables temperatura media, máxima y mínima; y variaron entre 0 y 25% para la precipitación, lo que indicó un ajuste entre los datos y la superficie modelada. En el caso de la precipitación, estos errores se pueden explicar en parte por el error de medición y baja densidad de estaciones.
- Durante el periodo 1970-2015 el área de estudio no presenta una tendencia clara en la precipitación a nivel temporal y espacial. En cambio, en la temperatura existe un incremento significativo tanto a nivel temporal y espacial. Las cuencas que nacen cerca o en la cordillera de Los Andes presentan un incremento significativo de temperatura, siendo la cuenca Jubones la que mostró el mayor incremento con un valor de 1.7°C y el menor incremento en la cuenca Zamora con un valor de 0.7 °C.
- La falta de datos hidrométricos dificultó la calibración del modelo *Water Yield*, sin embargo, se logró la calibración de cinco subcuencas hidrográficas con errores menores al 7%. En cuatro subcuencas no se logró la calibración, los resultados del rendimiento hídrico fueron subestimados, esto, se atribuye a una posible subestimación de la precipitación.
- El rendimiento hídrico actual a nivel de cuencas hidrográficas varía entre 206 a 1218 mm, este, sigue el comportamiento espacial y temporal de la precipitación. Por lo que la mayor producción hídrica fue en las cuencas amazónicas Zamora y Mayo; mientras que las de menor fueron las cuencas localizadas en los valles andinos y sierras, Alamor y Catamayo.
- La variación del rendimiento hídrico futuro dependió del modelo climático, año de proyección y escenario. El modelo [MRI -año 2080- RCP8.5] presenta los valores promedio más altos de rendimiento hídrico en la mayoría de las cuencas hidrográficas. Únicamente en las cuencas Zamora y Mayo el rendimiento hídrico es ligeramente menor

al modelo MIROC; mientras que, la menor producción del rendimiento hídrico la presenta [MIROC- año 2030- RCP4.5] en todas las cuencas hidrográficas, incluso una producción menor a la actual.

- De acuerdo con los Modelos de Circulación General (MCG) se prevén generalmente que el rendimiento hídrico incremente en las zonas medias y bajas de las cuencas hidrográficas, mientras que las zonas altas de las cuencas que nacen en la cordillera de Los Andes se prevé una reducción de la producción hídrica. Los mayores incrementos de rendimiento hídrico en las cuencas hidrográficas están dados por el modelo MRI y los cambios negativos o menores están dados por el modelo MIROC.
- Aunque la magnitud de los cambios del rendimiento hídrico en un futuro varía de un modelo a otro dando lugar a una considerable incertidumbre respecto a las proyecciones. Los modelos concuerdan en su mayoría con un incremento de la precipitación y por ende del rendimiento hídrico en las zonas medias y bajas de las cuencas hidrográficas. Esto implica un alto riesgo para la población, ya que en un futuro se podrían intensificar inundaciones en la zona de estudio, sobre todo en cuencas que ya padecen de estos fenómenos (Puyango, Alamor, Santa Rosa y Pagua).

7 RECOMENDACIONES

Realizar un análisis detallado de tendencias a nivel mensual o estacional. Se realizó únicamente un análisis exploratorio a nivel de todo el periodo [1970-2015] y no se encontró una tendencia clara, esto puede ser debido al peso que tienen los periodos húmedos o secos en la regresión lineal. Al graficar de forma mensual se encontró presencia de tendencias de aumentos de precipitación en meses lluviosos y en meses secos una disminución.

En la estimación del rendimiento hídrico, sería recomendable proyectar el UCS a los diferentes horizontes [2030s, 2050s, 2070s, 2080s] utilizados en los MCG, con el fin de tener una mejor representación de los cambios futuros con base a los posibles cambios de la cobertura vegetal en el futuro, y no considerarlo estático como se llevo a cabo en el presente estudio.

En este estudio se utilizaron datos climáticos puntuales que posteriormente fueron interpolados. Los datos son provenientes de estaciones meteorológicas que por lo general se localizan en las partes bajas de los valles. Por lo que es necesario incrementar la densidad y mejorar la distribución espacial de las estaciones, con el fin de evitar cuantificaciones erróneas sobre el rendimiento hídrico anual.

Debido a la subestimación del rendimiento hídrico en algunas cuencas hidrográficas en el área estudio, es necesario explorar diversos algoritmos de estimación de precipitación y temperatura a diferente resolución espacial y temporal, con el fin de determinar los más idóneos en la evaluación del rendimiento hídrico en la región sur del Ecuador.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, N., Eguiguren, P., Maita, J., Coronel, V., Samaniego, N., Luna, T.O., Mendoza, Z.A., 2015. Vulnerabilidad al cambio climático en la Región Sur del Ecuador: Potenciales impactos en los ecosistemas, producción de biomasa y producción hídrica. Loja, Ecuador.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome.
- Arias, P., Poveda, G., 2004. Estimación de la Relación Adimensional de Budyko en Colombia. XVI Semin. Nac. Hidráulica e Hidrol. 9.
- Bai, Y., Zheng, H., Ouyang, Z., Zhuang, C., Jiang, B., 2012. Modeling hydrological ecosystem services and tradeoffs: A case study in Baiyangdian watershed, China. *Environ. Earth Sci.* 70, 709–718. doi:10.1007/s12665-012-2154-5
- Balcázar, L., Ba, K., Gaona, G., Hernández, F., 2016. Modelación lluvia–escurrimiento utilizando un modelo distribuido en una cuenca de los Andes del Sur de Ecuador, en: IV Congreso Nacional de Manejo de cuencas hidrográficas.
- Bangash, R.F., Passuello, A., Sanchez-Canales, M., Terrado, M., López, A., Elorza, F.J., Ziv, G., Acuña, V., Schuhmacher, M., 2013. Ecosystem services in Mediterranean river basin: Climate change impact on water provisioning and erosion control. *Sci. Total Environ.* 458–460, 246–255. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.04.025
- Bates, B., Kundzewicz, Z., Wu, S., Palutikof, J., 2008. El Cambio Climático y El Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC, Ginebra, Suiza.
- Bautista, F., Bautista-Hernández, D.A., Álvarez, O., Anaya-Romero, M., De La Rosa, D., 2013. Software para identificar las tendencias de cambio climático a nivel local: un estudio de caso en Yucatán, México. *Rev. Chapingo, Ser. Ciencias For. y del Ambient.* 19, 81–90. doi:10.5154/r.rchscfa.2011.09.073
- Bendix, J., Rollenbeck, R., Fabian, P., Emck, P., Richter, M., Beck, E., 2008. Climate Variability, en: *Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador.* pp. 281–290.
- Breuer, L., Exbrayat, J.-F., Plesca, I., Buytaert, W., Ehmann, T., Peters, T., Timbe, E., Trachte, K., Windhorst, D., 2013. Global Climate Change Impacts on Local Climate and Hydrology, en: Bendix, J., Beck, E., Bräuning, A., Makeshin, F., Mosandl, R., Scheu, S., Wilcke, W. (Eds.), *Ecosystem Services, Biodiversity and Environmental Change in a Tropical Mountain Ecosystem of South Ecuador, Ecological Studies.* Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-38137-9
- Buytaert, W., Bievre, B. De, 2012. Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resour. Res.* 48, 1–13. doi:10.1029/2011WR011755
- Buytaert, W., Ce, R., Timbe, L., 2009. Predicting climate change impacts on water resources in the tropical Andes : Effects of GCM uncertainty 36, 1–5. doi:10.1029/2008GL037048
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., Hofstede, R., 2006a. Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Rev.* 79, 53–72. doi:10.1016/j.earscirev.2006.06.002

- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B. De, Wyseure, G., 2006b. Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *J. Hydrol.* 329, 413–421. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.02.031
- Buytaert, W., Iñiguez, V., Bièvre, B. De, 2007. The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *For. Ecol. Manage.* 251, 22–30. doi:10.1016/j.foreco.2007.06.035
- Buytaert, W., Iñiguez, V., Celleri, R., De Bièvre, B., Wyseure, G., Deckers, J., 2006c. Analysis of the water balance of small páramo catchments in South Ecuador, en: Krecek, J., Haigh, M. (Eds.), *Environmental Role of Wetlands in Headwaters*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 271–281.
- Buytaert, W., Vuille, M., Dewulf, A., Urrutia, R., Karmalkar, A., Céleri, R., 2010. Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: Implications for water resources management. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 1247–1258. doi:10.5194/hess-14-1247-2010
- Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre, B., Deckers, J., 2005. The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrol. Process.* 19, 3985–3997. doi:10.1002/hyp.5867
- Campozano, L., Céleri, R., Trachte, K., Bendix, J., Samaniego, E., 2016. Rainfall and Cloud Dynamics in the Andes: A Southern Ecuador Case Study. *Adv. Meteorol.* 2016. doi:10.1155/2016/3192765
- Ceballos-Barbancho, A., Morán-Tejeda, E., Luengo-Ugidos, M.Á., Llorente-Pinto, J.M., 2008. Water resources and environmental change in a Mediterranean environment: The south-west sector of the Duero river basin (Spain). *J. Hydrol.* 351, 126–138. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.12.004
- Céleri, R., Buytaert, W., De Bièvre, B., Tobón, C., Crespo, P., Molina, J., Feyen, J., 2009. Understanding the hydrology of tropical Andean ecosystems through an Andean network of basins. *Status Perspect. Hydrol. Small Basins* 209–212. doi:10.13140/2.1.4187.3608
- Céleri, R., Feyen, J., 2009. The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives. *Mt. Res. Dev.* 29, 350–355. doi:10.1659/mrd.00007
- Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W., Feyen, J., 2007. Space–time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. *Hydrol. Process.* 21, 3316–3327. doi:10.1002/hyp.6575
- CEPAL, 2012. Diagnóstico de la estadísticas del agua en Ecuador 81.
- CEPAL, GIZ, 2016. Desafíos de la seguridad hídrica en América Latina y el Caribe. Los Serv. agua potable y Saneam. en el umbral del siglo XXI 57. doi:10.3989/arbor.2000.i653.1000
- Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research, 2015. Plan nacional de la gestión integrada e integral de los recursos hídricos de las cuencas y microcuencas hidrográficas de Ecuador. Resumen Ejecutivo.
- Chen, Xie, G., Zhang, C., Pei, S., Fan, N., Ge, L., Zhang, C., 2011. Modelling Ecosystem Water Supply Services across the Lancang River Basin. *Ecology* 2, 322–327. doi:10.3969/j.issn.1674-764x.2011.04.005
- Conde, A., Gay, C., 2008. Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional. México.

- Corporacion Andina de Fomento, 2000. Las lecciones de El Niño: memorias del fenómeno El Niño 1997-1998, retos y prpopuesras para la región andina.
- Craven, P., Wahba, G., 1979. Numerische MathematJk. Springer 403, 377–403.
- Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., Borja, P., De Bièvre, B., 2014. Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos, en: Avances en investigación para la conservación de los páramos Andinos. pp. 288–304.
- Crespo, P.J., Feyen, J., Buytaert, W., Bücker, A., Breuer, L., Frede, H.G., Ramírez, M., 2011. Identifying controls of the rainfall-runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *J. Hydrol.* 407, 164–174. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.07.021
- Cuervo-Robayo, A.P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M., Venegas-Barrera, C.S., Manjarrez, J., Martínez-Meyer, E., 2014. An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico 2437, 2427–2437. doi:10.1002/joc.3848
- Dagnino, J., Sturzenegger, A., Charreau, E., Vardé, O., Bauer, C., Bereciartúa, P., 2012. Diagnóstico del agua en las américas, en: Laclette, J., Zúñiga, P. (Eds.), Foro Consultivo Científico y Tecnológico. México, pp. 1–448.
- De Bievre, B., Bustamante, M., Buytaert, W., Murtinho, F., Armijos, M., 2012. Panorama andino de cambio climático: Vulnerabilidades y adaptación en los Andes Tropicales, en: Cuesta, F., Bustamante, M., Becerra, M.T., Postigo, J., Peralvo, M. (Eds.), CONDESAN, SGCAN. Lima, Perú, p. 329.
- De Luque, A., 2011. Cualificación y homogenización de las series climáticas mensuales de precipitación de Canarias; Memoria Metodológica. Canarias.
- Del Río, J., 2010. Introducción al Tratamiento de Datos Espaciales en la Hidrología. España.
- Domínguez Mora, R., Esquivel Garduño, G., Méndez Antonio, B., Mendoza Reséndiz, A., Arganis Juárez, M.L., Carriosa Elizondo, E., 2008. Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento. México.
- Donohue, R.J., Roderick, M.L., Mcvicar, T.R., 2012. Roots , storms and soil pores : Incorporating key ecohydrological processes into Budyko ' s hydrological model. *J. Hydrol.* 436–437, 35–50. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.02.033
- Eastman, R.J., 2016. TerrSet Manual. USA.
- Emck, P., 2007a. A Climatology of South Ecuador - With special focus on the major Andean ridge as Atlantic-Pacific climate divide. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU).
- Emck, P., 2007b. A Climatology of South Ecuador. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU).
- FAO-AQUASTAT, 2016. Resumen general - América del Sur, Centroamérica y Caribe [WWW Document]. Aquastat. URL http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/americas/indexesp3.stm (consultado 4.23.17).
- FAO, 2002. Crops and Drops. Roma, Italia. doi:10.1017/CBO9781107415324.004

- FAO, IIASA, ISRIC, ISS-CAS, JRC, 2012. Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, Italy IIASA, Laxenburg, Austria.
- Fick, S.E., Hijmans, R.J., 2017. WorldClim 2 : new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 14. doi:10.1002/joc.5086
- Frederic, R., 1997. Influencia de El Niño sobre los regimenes hidro - pluviométricos del Ecuador.pdf.crdownload.
- Fries, A., Rollenbeck, R., Bayer, F., Gonzalez, V., Oñate-Valivieso, F., Peters, T., Bendix, J., 2014. Catchment precipitation processes in the San Francisco valley in southern Ecuador: combined approach using high-resolution radar images and in situ observations. *Meteorol. Atmos. Phys.* 126, 13–29. doi:10.1007/s00703-014-0335-3
- García, M., Contreras, C.Y., Sánchez L., F.D., Marín R., R., Guzmán A., H., Wilches S., J.H., Olaya T., G., Cañas C., H. de J., Vargas M., O.N., Domínguez C., E.A., Rodríguez B., G.E., Niño R., R., 1999. Sistema de Información Componente Hidrológico Redes, Mediciones, Observaciones y procesos básicos.
- Gaspari, F., Diaz, R., Delgado, M.I., Senisterra, G., 2015. Evaluación del Servicio Ambiental de provisión hídrica en cuencas hidrográficas del sudeste bonaerense . *Argentina. Rev. Fac. Agron. La Plata* 114, 214–221.
- Goyal, M.K., Khan, M., 2016. Assessment of spatially explicit annual water-balance model for Sutlej River Basin in eastern Himalayas and Tungabhadra River Basin in peninsular India. *Hydrol. Res.* 1–16. doi:10.2166/nh.2016.053
- Hamed, K.H., 2008. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *J. Hydrol.* 349, 350–363. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.11.009
- Hamel, P., Guswa, A.J., 2015. Uncertainty analysis of a spatially explicit annual water-balance model : case study of the Cape Fear basin , North Carolina 839–853. doi:10.5194/hess-19-839-2015
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, G., Jarvis, A., 2005. VERY HIGH RESOLUTION INTERPOLATED CLIMATE SURFACES FOR GLOBAL LAND AREAS. *Int. J. Climatol.* 1978, 1965–1978. doi:10.1002/joc.1276
- Hutchinson, M., Gessler, P., 1994. Splines more than just a smooth interpolator 62, 45–67.
- Hutchinson, M.F., 2006. USER GUIDE. Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University, Canberra.
- INEC, 2017. Censo Nacional 2010 [WWW Document]. URL <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>
- IPCC-Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 1997. Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el segundo informe de evaluación del ipcc.
- IPCC, 2014a. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resúmenes, preguntas frecuentes y recuadros multicapítulos. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza.
- IPCC, 2014b. Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I,

- II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza.
- IPCC, 2013. Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- Izquierdo, A.E., Clark, M.L., 2012. Spatial analysis of conservation priorities based on ecosystem services in the Atlantic forest region of Misiones, Argentina. *Forests* 3, 764–786. doi:10.3390/f3030764
- Jarvis, A., Reuter, H., Nelson, A., Guevara, E., 2008. Hole-filled seamless SRTM data V4. Tech. rep., International Centre for Tropical Agriculture (CIAT).
- Langbein, W.B., Iseri, K.T., 1960. General Introduction and Hydrologic Definitions, en: *Manual of Hydrology: Part 1. General Surface-Water Techniques*. United States Geological Survey - USGS, Washington, D.C., p. 29.
- Li, Q., Chen, Y., Shen, Y., Li, X., Xu, J., 2011. Spatial and temporal trends of climate change in Xinjiang, China. *J. Geogr. Sci.* 21, 1007–1018. doi:10.1007/s11442-011-0896-8
- Liang, L., Liu, Q., 2014. Stream flow sensitivity analysis to climate change for a large water-limited basin 1774, 1767–1774. doi:10.1002/hyp.9720
- Llambí, L.D., Soto-w, A., Borja, P., Soto-w, A., Calle, T., 2012. Páramos Andinos: Ecología , hidrología y suelos de páramos.
- Lozano, P., 2002. Los tipos de bosque en el sur del Ecuador, en: Aguirre M., Z., Madsen, J.E., Cotton, E., Balslev, H. (Eds.), *Botanica Austroecuatoriana. Estudios sobre los recursos vegetales en las provincial de El Oro, Loja y Zamora-Chinchipec*. Quito, Ecuador, pp. 29–50.
- Luna-Romero, A., Ramírez, I., Sánchez, C., Conde, J., Agurto, L., Villaseñor, D., 2018. Spatio-temporal distribution of precipitation in the Jubones river basin, Ecuador: 1975-2013. *Sci. Agropecu.* 9, 63–70. doi:10.17268/sci.agropecu.2018.01.07
- MAE, 2014. Mapa de cobertura y uso de la tierra 2014 [WWW Document]. URL <http://mapainteractivo.ambiente.gob.ec/>
- Maldonado A., N., 2001. La cuenca hidrográfica como espacio para promover el desarrollo sustentable: Elementos de Agroquimatología y Ecología. Loja, Ecuador.
- Mckenney, D.W., Pedlar, J.H., Papadopol, P., Hutchinson, M.F., 2006. The development of 1901 – 2000 historical monthly climate models for Canada and the United States 138, 69–81. doi:10.1016/j.agrformet.2006.03.012
- Meals, D.W., Spooner, J., Dressing, S.A., Harcum, J.B., 2011. *Statistical Analysis for Monotonic Trends* 1–23.
- Ministerio del Ambiente (MAE), Ministerio de Agricultura, Ganadería, A. y P. (MAGAP), 2015. Protocolo metodológico para la elaboración del Mapa de cobertura y uso de la tierra del Ecuador continental 2013 – 2014, escala 1:100.000. doi:nn
- Mora, D.E., Campozano, L., Cisneros, F., Wyseure, G., Willems, P., Divison, H., Cuenca, D., Brussel,

- V.U., Engineering, H., Leuven, K.U., Divison, W.M., 2014. Climate changes of hydrometeorological and hydrological extremes in the Paute basin , Ecuadorean Andes 631–648. doi:10.5194/hess-18-631-2014
- Moss, R.H.R.H., Edmonds, J.A.J.A., Hibbard, K.A.K.A., Manning, M.R., Rose, S.K.S.K., van Vuuren, D.P.D.P., Carter, T.R.T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A.G.A., Mitchell, J.F.B.J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J.S.J., Stouffer, R.J.R.J., Thomson, A.M.A.M., Weyant, J.P.J.P., Wilbanks, T.J.T.J., Nakicenovic, N., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756. doi:10.1038/nature08823
- Moya, R., 2006. *Climas del Ecuador*.
- Neeti, N., Eastman, J.R., 2011. A Contextual Mann-Kendall Approach for the Assessment of Trend Significance in Image Time Series. *Trans. GIS* 15, 599–611. doi:10.1111/j.1467-9671.2011.01280.x
- Ochoa-Tocachi, B.F., Buytaert, W., Antiporta, J., Acosta, L., Bardales, J.D., Célleri, R., Crespo, P., Fuentes, P., Gil-Ríos, J., Guallpa, M., Llerena, C., Olaya, D., Pardo, P., Rojas, G., Villacís, M., Villazón, M., Viñas, P., De Bièvre, B., 2018. Data Descriptor: High-resolution hydrometeorological data from a network of headwater catchments in the tropical Andes. *Sci. Data* 5, 1–16. doi:10.1038/sdata.2018.80
- Ochoa-Tocachi, B.F., Buytaert, W., De Bièvre, B., 2016. Regionalization of land-use impacts on streamflow using a network of paired catchments. *Water Resour. Res.* 52, 6710–6729. doi:10.1002/2016WR018596
- Oñate-Valdivieso, F., Bosque Sendra, J., 2011. Estudio de tendencias climáticas y generación de escenarios regionales de cambio climático en una cuenca hidrográfica binacional en América del Sur. *Estud. Geográficos* 72, 147–172. doi:10.3989/estgeogr.201107
- Oñate, F., Aguilar, G., 2003. Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del río Catamayo, en: III Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Arequipa, Perú, p. 11.
- ONU, 2011. Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe: Dinámicas , tendencias y variabilidad climática. Santiago de Chile.
- Ordoñez Sierra, R., 2015. Modelado espacio temporal de desfase y amplitud de la variabilidad climática en la cuenca Lerma-Chapala-Santiago. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO.
- Organización Meteorológica Mundial, 2012. *International Glossary of Hydrology*, IHP/OHP-Berichte. Ginebra, Suiza.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2011. *Guía de prácticas climatológicas*. Ginebra, Suiza.
- Oviedo Torres, B.E., León Aristizábal, G., 2010. Guía de procedimiento para la generación de escenarios de cambio climático regional y local a partir de los modelos globales. Bogotá.
- Pessacq, N., Flaherty, S., Brandizi, L., Solman, S., Pascual, M., 2015. Getting water right : A case study in water yield modelling based on precipitation data. *Sci. Total Environ.* 537, 225–234. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.07.148

- Pourrut, P., 1983. Los climas del Ecuador: fundamentos explicativos. *Los climas del Ecuador* 7–41.
- Pourrut, P., Gómez, G., Bermeo, A., Segovia, A., 1995. Factores condicionantes de los regímenes climáticos e hidrológicos, en: Pourrut, P., Róvere, O., Romo, I., Villacrés, H. (Eds.), *El agua en el Ecuador: Clima, precipitaciones, escorrentía*. Quito, Ecuador, pp. 7–12.
- Puertas, O.L., Escobar, Y.C., Angel, M.Q., 2011. Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta-media del río Cauca, Colombia. *Dyna* 78, 112–120.
- Quintero, M. (Ed.), 2010. *Servicios ambientales hidrológicos en la región andina. Estado del conocimiento, la acción y la política para asegurar su provisión mediante esquemas de pago por servicios ambientales*. Lima, Perú.
- Ramirez-Villegas, J., Jarvis, A., 2010. Downscaling Global Circulation Model Outputs: The Delta Method Decision and Policy Analysis Working Paper No. 1. *Policy Anal.* 18. doi:citeulike-article-id:12801153
- Redhead, J.W., Stratford, C., Sharps, K., Jones, L., Ziv, G., Clarke, D., Oliver, T.H., Bullock, J.M., 2016. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale. *Sci. Total Environ.* 569–570, 1418–1426. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.06.227
- Reuter, H., Nelson, A., JARVIS, A., 2007. An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 21:9, 983–1008.
- Richter, M., Moreira, A., 2005. Heterogeneidad climática y diversidad de la vegetación en el sur de Ecuador : un método de fitoindicación. *Biología (Bratisl)*. 12, 217–238.
- Rollenbeck, R., Bendix, J., 2011. Rainfall distribution in the Andes of southern Ecuador derived from blending weather radar data and meteorological field observations. *Atmos. Res.* 99, 277–289. doi:10.1016/j.atmosres.2010.10.018
- Salinas, J., Colorado, G., Montero, M., Maya, M., González, R., 2014. Actualización y divulgación de los nuevos escenarios de cambio climático aplicados a México para fortalecer las capacidades nacionales.
- Sánchez-Canales, M., López Benito, A., Passuello, A., Terrado, M., Ziv, G., Acuña, V., Schuhmacher, M., Elorza, F.J., 2012. Sensitivity analysis of ecosystem service valuation in a Mediterranean watershed. *Sci. Total Environ.* 440, 140–153. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.07.071
- Sánchez, F., García, M., Jaramillo, O., Verdugo, N., 2010. Agua superficial, en: *Estudio Nacional del agua*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá, p. 58.
- SENAGUA, UICN, SGCAN, 2009. *Delimitación y codificación de unidades geográficas del Ecuador: Metodología Pfafstetter*. Quito, Ecuador.
- Serrano Vincenti, S., Reisancho Puetate, A., Borbor-Córdova, M.J., Stewart-Ibarra, A.M., 2016. Análisis de inundaciones costeras por precipitaciones intensas, cambio climático y fenómeno de El Niño. Caso de estudio: Machala. *La Granja* 24. doi:10.17163/lgr.n24.2016.04
- Shadmani, M., Marofi, S., Roknian, M., 2011. Trend Analysis in Reference Evapotranspiration Using Mann-Kendall and Spearman's Rho Tests in Arid Regions of Iran. *Water Resour. Manag.* 26, 211–224. doi:10.1007/s11269-011-9913-z

- Sharp, R., Tallis, H., Ricketts, T., Guerry, A., Wood, S., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, C., Gua, J., 2018. InVEST +VERSION+ User's Guide.
- Silva León, G., 2005. La cuenca del río Orinoco : visión hidrográfica y balance hídrico. *Rev. Geográfica Venez.* 46, 75–108.
- Sui, D.Z., Maggio, R.C., 1999. Integrating GIS with hydrological modeling: Practices, problems, and prospects. *Comput. Environ. Urban Syst.* 23, 33–51. doi:10.1016/S0198-9715(98)00052-0
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A., 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93, 485–498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- Télliez, O., Hutchinson, M.A., Nix, H.A., Jones, P., 2011. Desarrollo de coberturas digitales climáticas para México. *Cambio climático Aproximaciones para el Estud. su Ef. sobre la Biodivers.* 15–23.
- UNDESA, 2012. A guidebook to the Green Economy Issue: exploring green economy policies and international experience with national strategies, A Guidebook to the Green Economy.
- UNESCO-WWAP, 2016. Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo. París, UNESCO.
- UNESCO-WWAP, 2007. Agua para todos, Agua para la vida, Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo.
- UNESCO, 2010. Atlas de Zonas Áridas de América Latina y el Caribe”. Dentro del marco del proyecto “Elaboración del Mapa de Zonas Áridas, Semiáridas y Subhúmedas de América Latina y el Caribe.
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura), WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas), 2006. El agua, una responsabilidad compartida. 2º Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el mundo.
- Vázquez, R.F., 2015. Modelación hidrológica de una microcuenca Altoandina ubicada en el Austro Ecuatoriano. *Maskana* 1, 79–90.
- Wahba, G., Wendelberger, J., 1980. Some New Mathematical Methods for Variational Objective Analysis Using Splines and Cross Validation. *Am. Metereologica Soc.* 108, 1122–1143.
- Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., Okajima, H., Nozawa, T., Kawase, H., Abe, M., Yokohata, T., Ise, T., Sato, H., Kato, E., Takata, K., Emori, S., Kawamiya, M., 2011. MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geosci. Model Dev.* 4, 845–872. doi:10.5194/gmd-4-845-2011
- Wilson, J.P., Mitasova, H., Wright, D.J., 2000. Water Resource Applications of Geographic Information Systems. *URISA J.* 12, 61–79.
- Xu, X., Liu, W., Scanlon, B.R., Zhang, L., Pan, M., 2013. Local and global factors controlling water-energy balances within the Budyko framework. *Geophys. Res. Lett.* 40, 6123–6129. doi:10.1002/2013GL058324

- Yukimoto, S., Adachi, Y., Hosaka, M., Sakami, T., Yoshimura, H., Hirabara, M., Tanaka, T.Y., Shindo, E., Tsujino, H., Deushi, M., Mizuka, R., Yabu, S., Obata, A., Nakano, H., Koshiro, T., Ose, T., Kitoh, A., 2012. A New Global Climate Model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3 ^|^mdash;Model Description and Basic Performance^|^mdash; J. Meteorol. Soc. Japan 90A, 23–64. doi:10.2151/jmsj.2012-A02
- Zhang, C., Li, W., Zhang, B., Liu, M., 2012. Water yield of Xitiaoxi River basin based on InVEST modeling. J. Resour. Ecol. 3, 50–54. doi:10.5814/j.issn.1674-764x.2012.01.008
- Zhang, L., Daves, W.R., Walker, G.R., 2001. Response of Mean Annual ET to Vegetation Changes at Catchment Scale. WATER Resour. Res. 37, 701–708. doi:10.1029/2000WR900325
- Zhang, L., Hickel, K., Dawes, W.R., Chiew, F.H.S., Western, A.W., Briggs, P.R., 2004. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. Water Resour. Res. 40, W025021–W02502114. doi:10.1029/2003WR002710

ANEXOS

Anexo A. Rutinas para la elaboración de gráficas de disponibilidad de datos

Librerías utilizadas:

```
library(dplyr)
library(tidyr)
library(ggplot2)
library(RColorBrewer)
##Gráfica de disponibilidad, ejemplo para precipitación

setwd(dir = "C:\\R work\\DATOS SIN FILTROS\\Disponibilidad de datos 2") #Direcciona el archivo

#lee el archivo *.csv

Datos <- read.csv("(Prc_1960-2015_137Est_Ec_Pe.csv", sep = ";", dec = ".", na.strings = NA) %>%
gather(key= Mes, value =Prt, 3:14)%>%
mutate(Mes = gsub("X", "",Mes))%>%
spread(key = Mes, value = Prt) %>%
dplyr:: select(1:3, 7:14, 4:6)

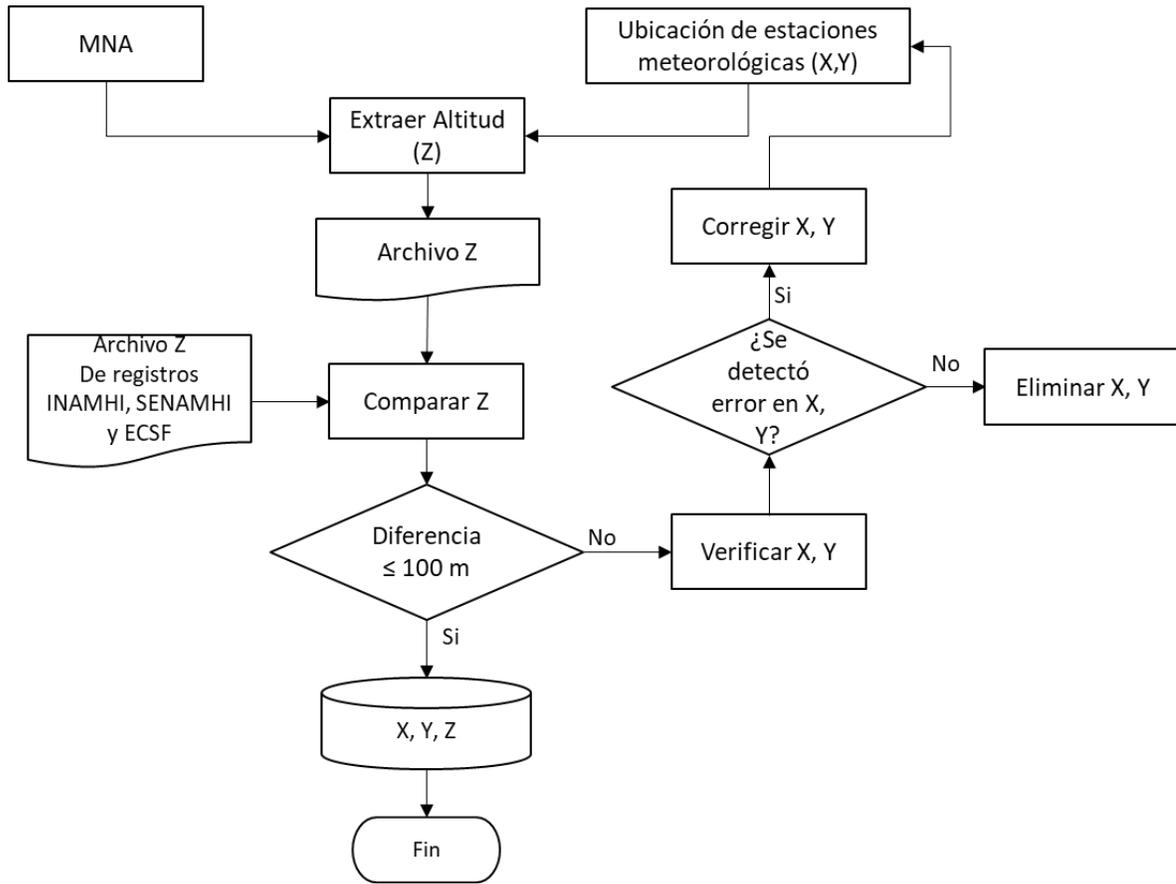
df <- Datos %>%
gather(Mes, Prt, 3:14)%>%
mutate(Num = ifelse(is.na(Prt), 0, 1)) %>%
group_by(Codigo, Anio) %>%
summarise(Num = sum(Num)) %>%
mutate(fecha = as.Date(ISOdate(Anio, 1, 1,0))) %>%
filter(Anio >= 1960)

# Grafica

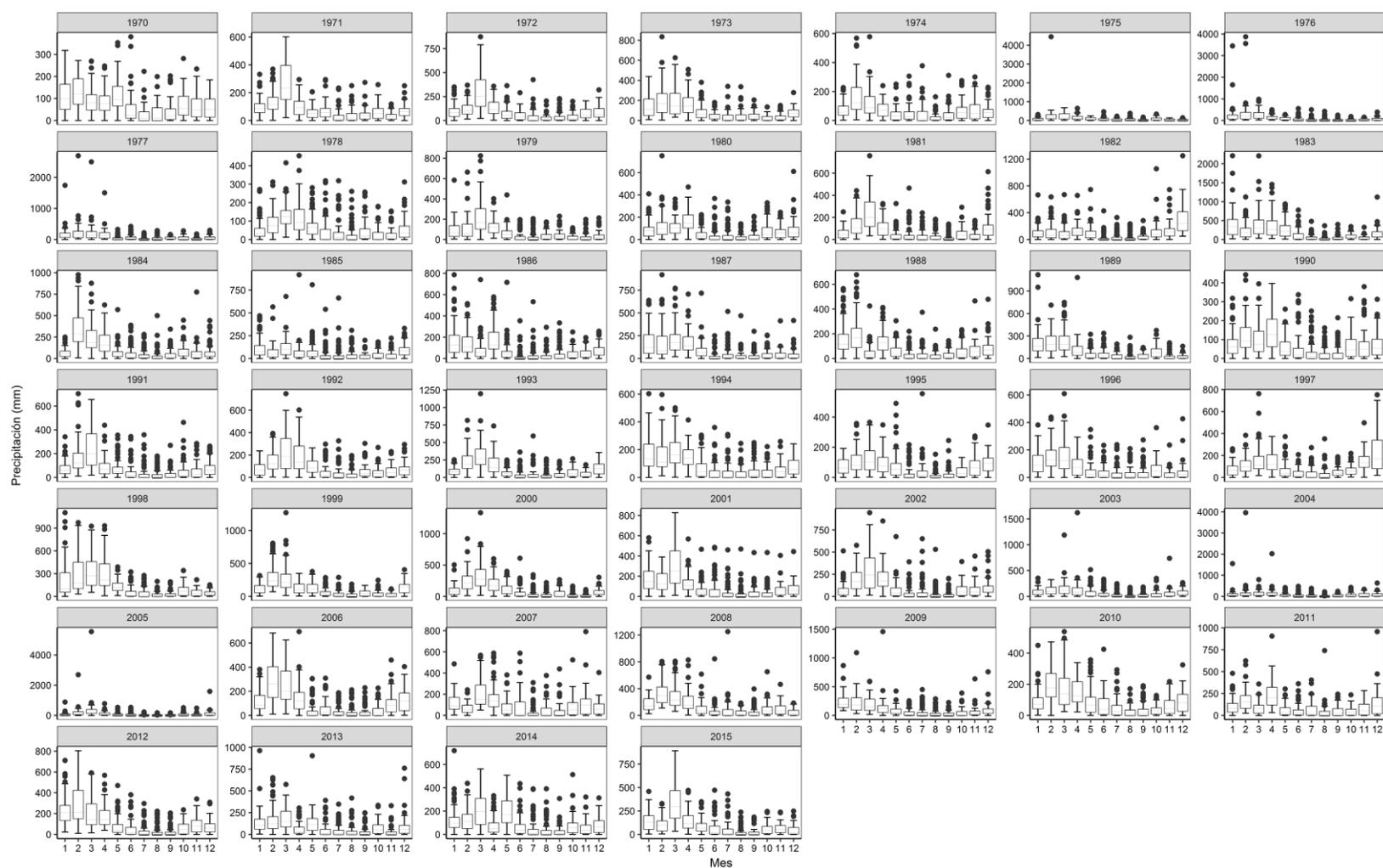
p<- ggplot(df) +
geom_raster(aes(x = fecha, y = Codigo, fill = Num)) +
scale_fill_gradientn(name="Meses", colors = brewer.pal(9, "YlGnBu")) +
scale_x_date(date_breaks = "1 year", date_minor_breaks = "year",
date_labels = "% Y", expand = c(0,0)) +
theme_light()+
theme(text = element_text(size = 7),
axis.text.y = element_text(size = 2),
legend.position = "right", legend.text=element_text(size=rel(1)),
panel.grid = element_blank(), legend.key.size = unit (0.5, "cm"),
axis.text.x = element_text(angle = 90, hjust = 1),
axis.title = element_blank(),
panel.background = element_rect(fill = brewer.pal(9, "YlGnBu")[1]))

ggsave("dispobilidad_png.jpg", dpi = 1000, scale = 1) #guarda la imagen a una resolución de 1000
pixeles
```

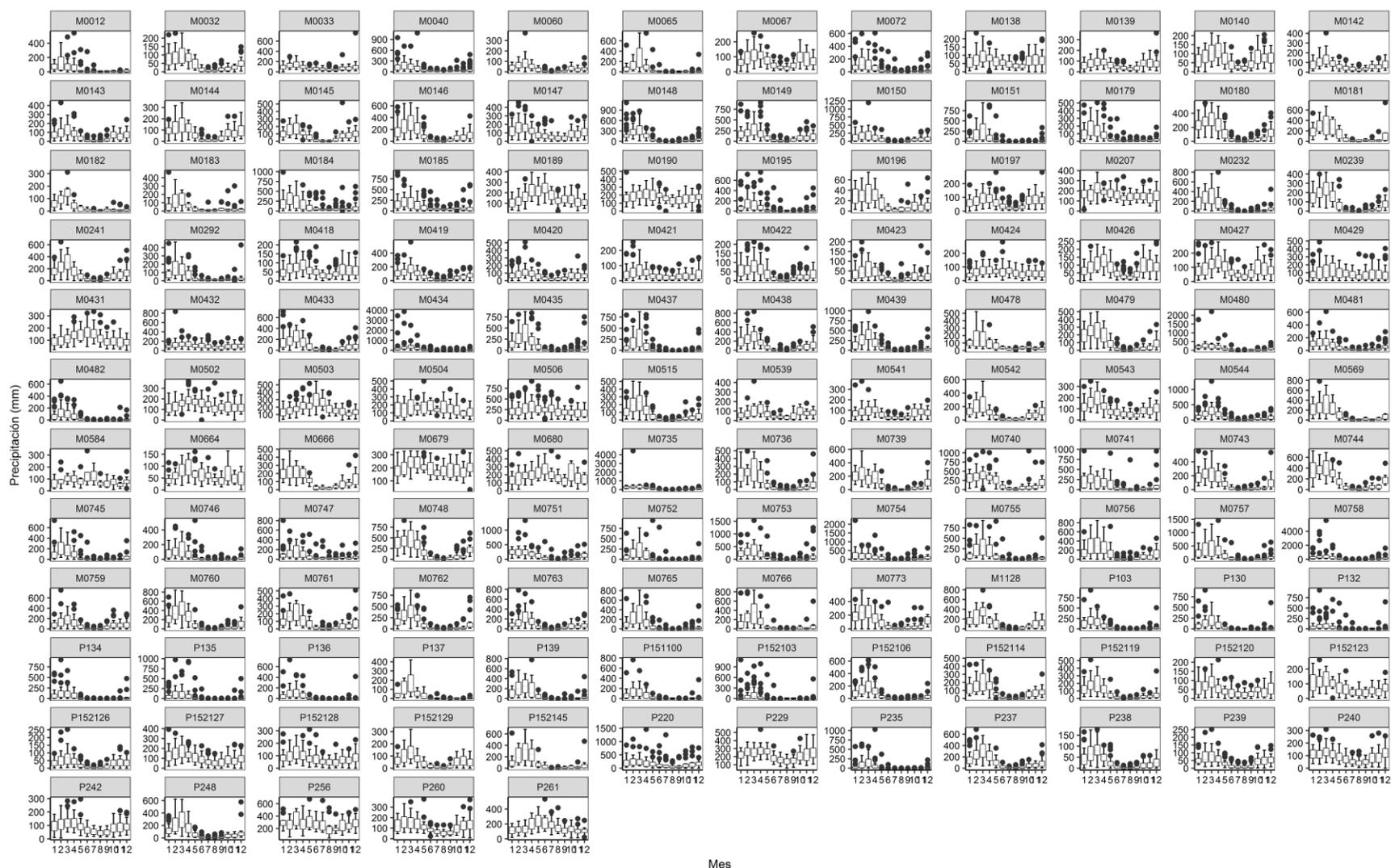
Anexo B. Proceso para la obtención de datos de elevación utilizados en la generación de superficies climáticas.



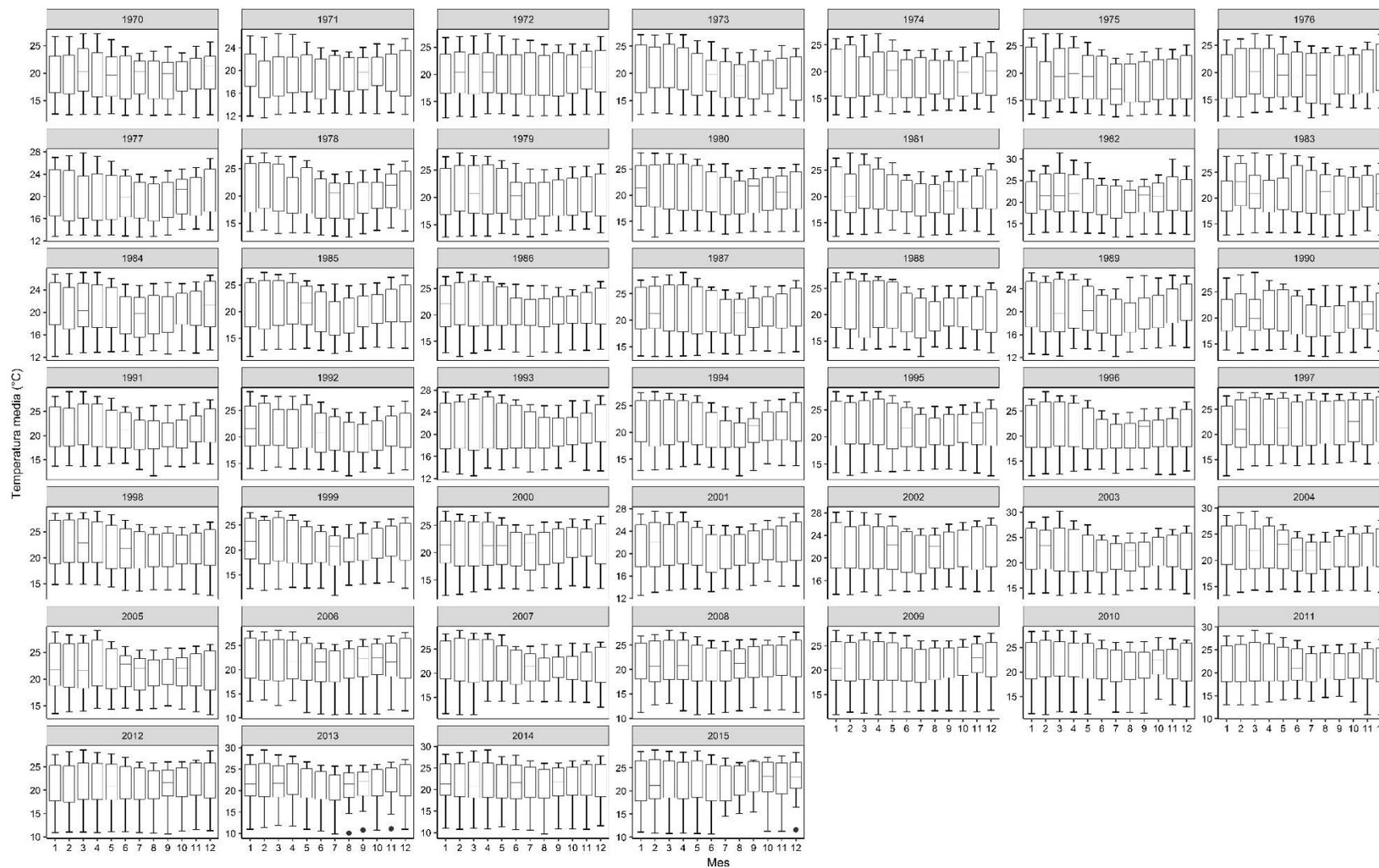
Anexo C. Detección de valores atípicos



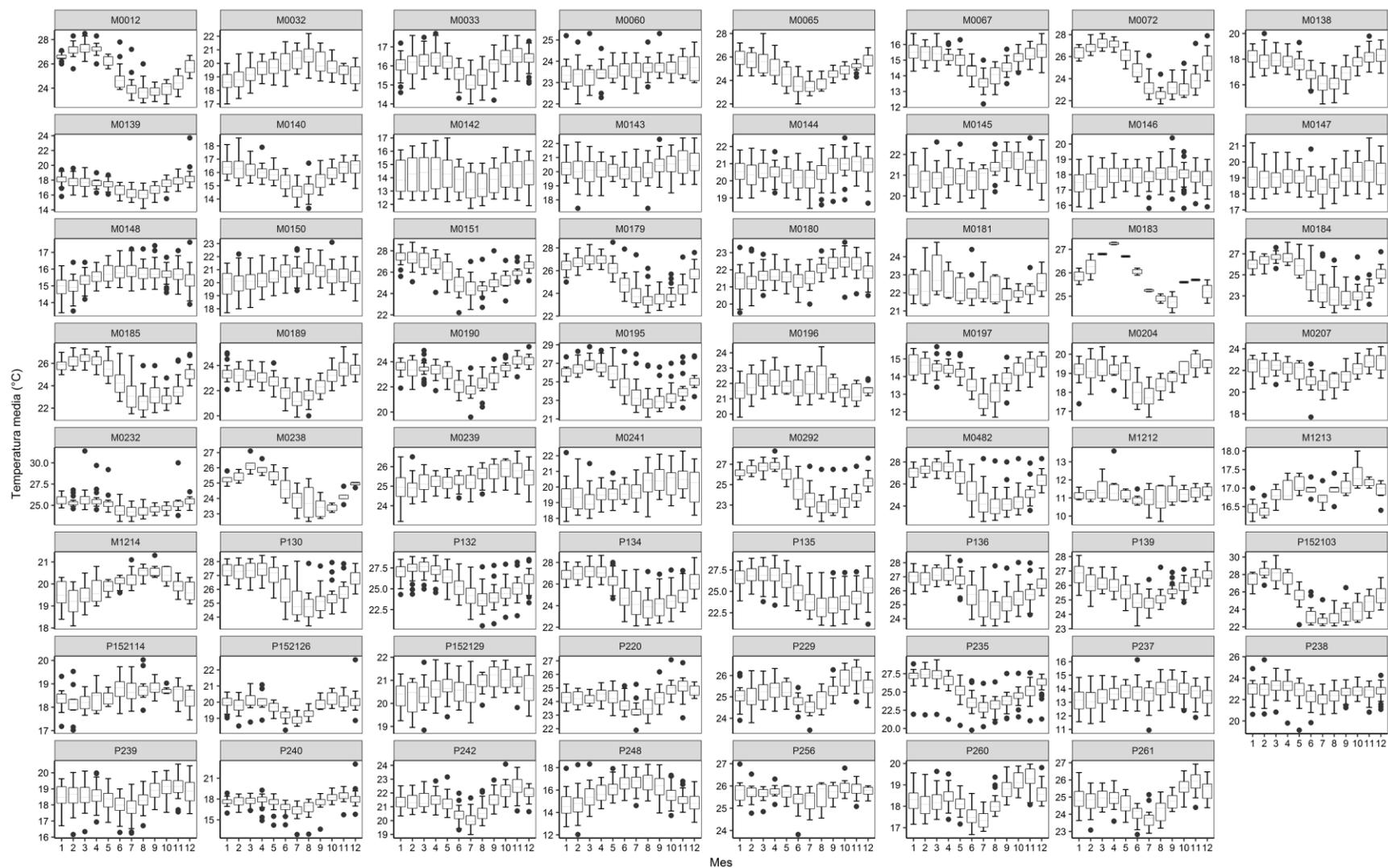
Magnitud de los datos de precipitación, graficados por año y mes para el periodo 1970-2015.



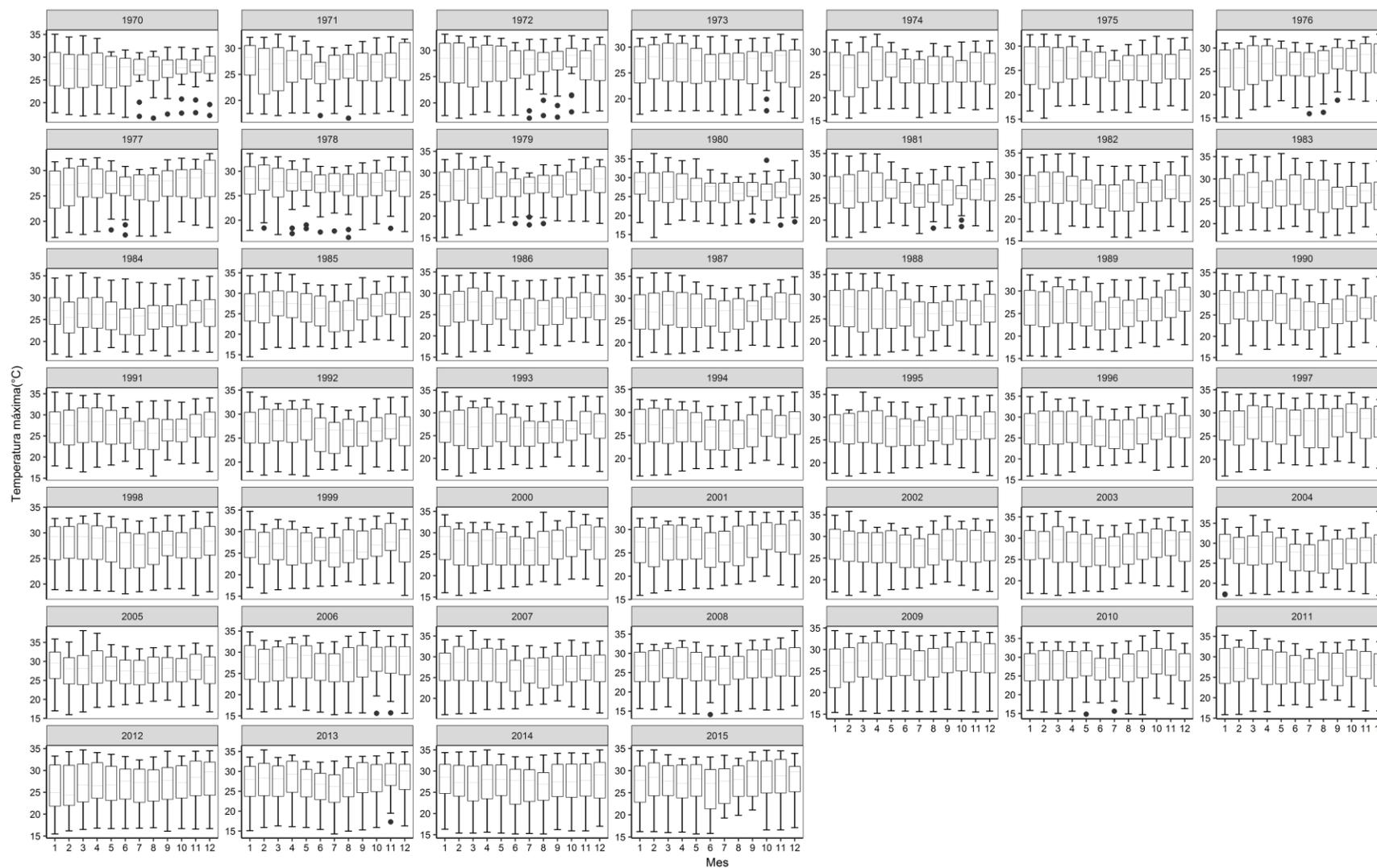
Magnitud de los datos de precipitación, graficados por estación y mes para el periodo 1970-2015.



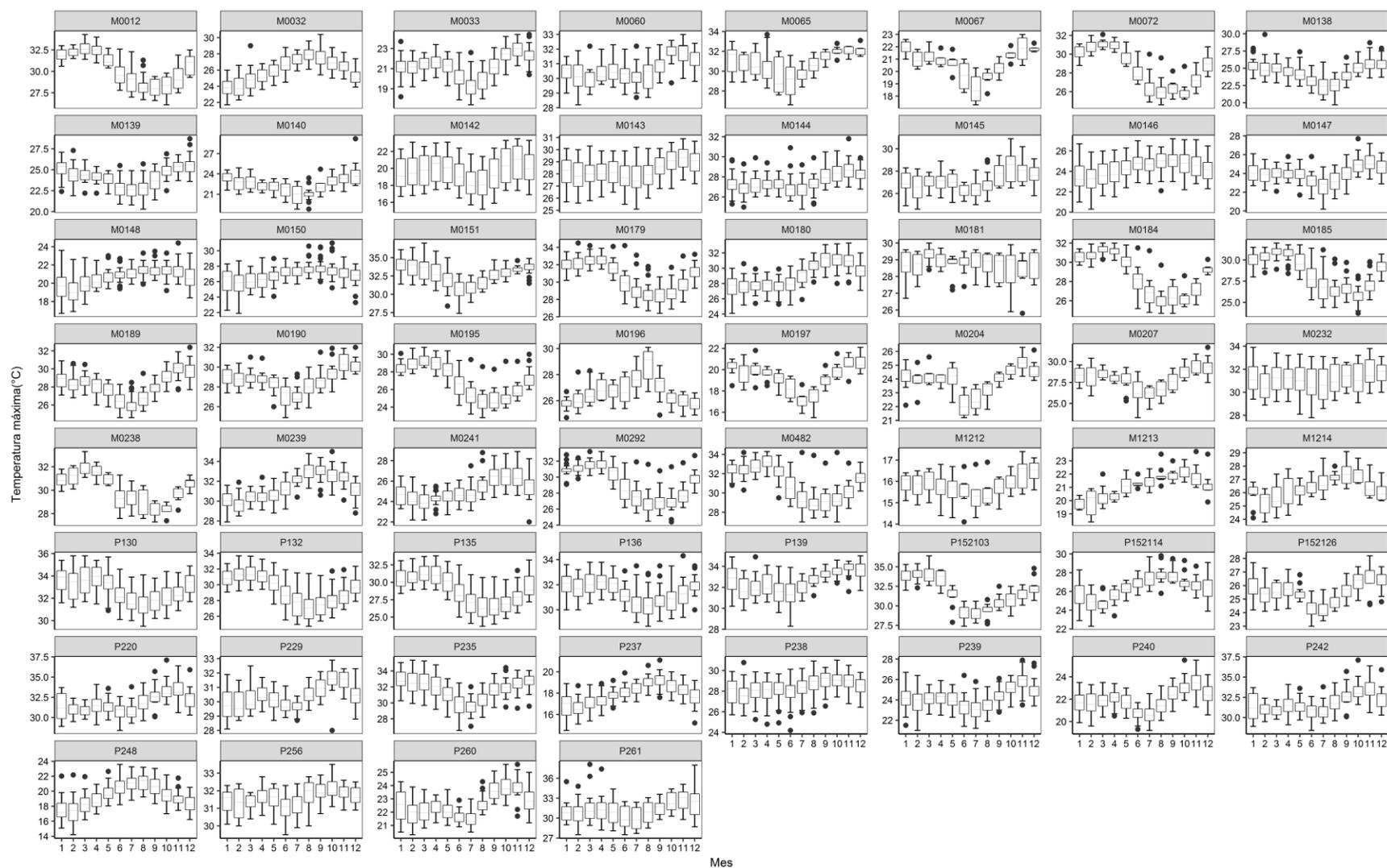
Magnitud de los datos de temperatura media, graficados por año y mes para el periodo 1970-2015.



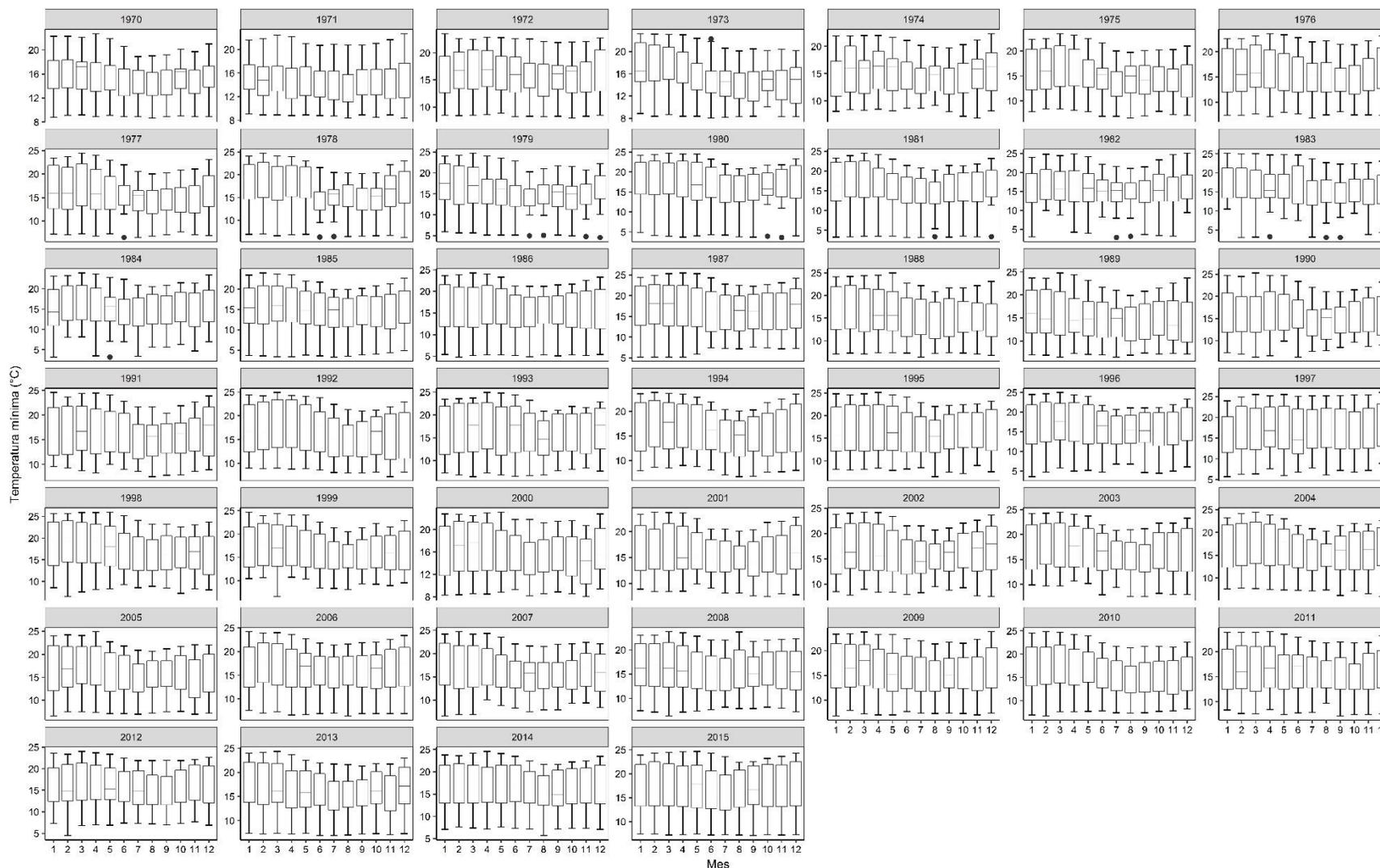
Magnitud de los datos de temperatura media, graficados por estación y mes para el periodo 1970-2015.



Magnitud de los datos de temperatura máxima, graficados por año y mes para el periodo 1970-2015.



Magnitud de los datos de temperatura máxima, graficados por estación y mes para el periodo 1970-2015.



Magnitud de los datos de temperatura mínima, graficados por año y mes para el periodo 1970-2015.



Magnitud de los datos de temperatura mínima, graficados por estación y por mes para el periodo 1970-2015.

Anexo D. Análisis de datos atípicos y extremos.

Variable	Código	Nombre	Altitud (msnm)	Año	Mes	Valor sospechoso	Año Niño	Región	Resultado	Observaciones
Precipitación	M0148	Celica	2043	1989	1	1117.9	No	Sierra	Corregido	Único valor mayor a 1000 mm, en un periodo de 52 años
Precipitación	M0434	Sozoranga Inamhi	1409	1976	1	3446.2	Si	Sierra	Eliminado	Posible error de transcripción, esta estación posee 6 datos con inconsistencias, estación con 45 años de registro histórico. A pesar de que dos datos pertenecen a años Niño, la estación se encuentra localizada en la Sierra.
Precipitación	M0434	Sozoranga Inamhi	1409	1977	1	1742.1	No	Sierra	Eliminado	Posible error de transcripción, esta estación posee 6 datos con inconsistencias, estación con 45 años de registro histórico. A pesar de que dos datos pertenecen a años Niño, la estación se encuentra localizada en la Sierra.
Precipitación	M0480	Rio Pindo (Aj Amarillo)	606	1983	1	1748.9	Si	Costa	Validado	Se valida el dato por encontrarse la estación en la región costa y ser año Niño
Precipitación	M0754	Chaguarpamba	1269	1983	1	2212.5	Si	Sierra	Validado	Años Niño, se encuentra entre el límite de sierra y costa
Precipitación	M0757	El Limo	997	1983	1	1310	Si	Sierra	Validado	Años Niño, se encuentra entre el límite de sierra y costa
Precipitación	M0758	El Prado (Guayquichuma) 200 Cc	1097	1976	1	1648	Si	Sierra	Eliminado	Posibles errores de transcripción
Precipitación	M0758	El Prado (Guayquichuma) 200 Cc	1097	2004	1	1550.3	No	Sierra	Eliminado	Posibles errores de transcripción
Precipitación	P152103	Lancones	113	1998	1	1103	Si	Costa	Validado	Años Niño
Precipitación	M0434	Sozoranga Inamhi	1409	1976	2	3870.9	Si	Sierra	Eliminado	Posible error de transcripción, esta estación posee 6 datos con inconsistencias, estación con 45 años de registro histórico. A pesar de que dos datos pertenecen a años Niño, la estación se encuentra localizada en la Sierra.

Continuación... Anexo D

Variable	Código	Nombre	Altitud (msnm)	Año	Mes	Valor sospechoso	Año Niño	Región	Resultado	Observaciones
Precipitación	M0434	Sozoranga Inamhi	1409	1977	2	2696	No	Sierra	Eliminado	Posible error de transcripción, esta estación posee 6 datos con inconsistencias, estación con 45 años de registro histórico. A pesar de que dos datos pertenecen a años Niño, la estación se encuentra localizada en la Sierra.
Precipitación	M0735	Ayapamba	1442	1975	2	4450	No	Costa	Corregido	Posible error de transcripción posee un único valor de 4450 mm durante un registro histórico de 27 años
Precipitación	M0757	El Limo	997	1983	2	1123.4	Si	Sierra	Validado	Años Niño, se encuentra entre el límite de sierra y costa
Precipitación	M0758	El Prado (Guayquichuma) 200 Cc	1097	1976	2	3556.8	Si	Sierra	Eliminado	Posibles errores de transcripción
Precipitación	M0758	El Prado (Guayquichuma) 200 Cc	1097	2004	2	3960.8	No	Sierra	Eliminado	Posibles errores de transcripción
Precipitación	M0758	El Prado (Guayquichuma) 200 Cc	1097	2005	2	2692.6	No	Sierra	Eliminado	Posibles errores de transcripción
Precipitación	P220	Namballe	683	2009	2	1092	No	Amazonía	Validado	No se pudo detectar error, posee varios valores con similitud durante todo el año
Precipitación	M0150	Amaluzza Inamhi	1674	1993	3	1198	No	Sierra	Eliminado	Posible error tipográfico, único valor superior a 1000 en un periodo de registro histórico de 41 años
Precipitación	M0 434	Sozoranga Inamhi	1409	1977	3	2499	No	Sierra	Eliminado	Posible error de transcripción, esta estación posee 6 datos con inconsistencias, estación con 45 años de registro histórico. A pesar de que dos datos pertenecen a años Niño, la estación se encuentra localizada en la Sierra.
Precipitación	M0480	Rio Pindo (Aj Amarillo)	606	1983	3	2210.4	Si	Costa	Validado	Se valida el dato por encontrarse la estación en la región costa y ser año Niño
Precipitación	M0544	Colaisaca	2515	1999	3	1270.6	No	Sierra	Validado	No se pudo detectar error, a pesar de ser el único valor > 1000 mm.

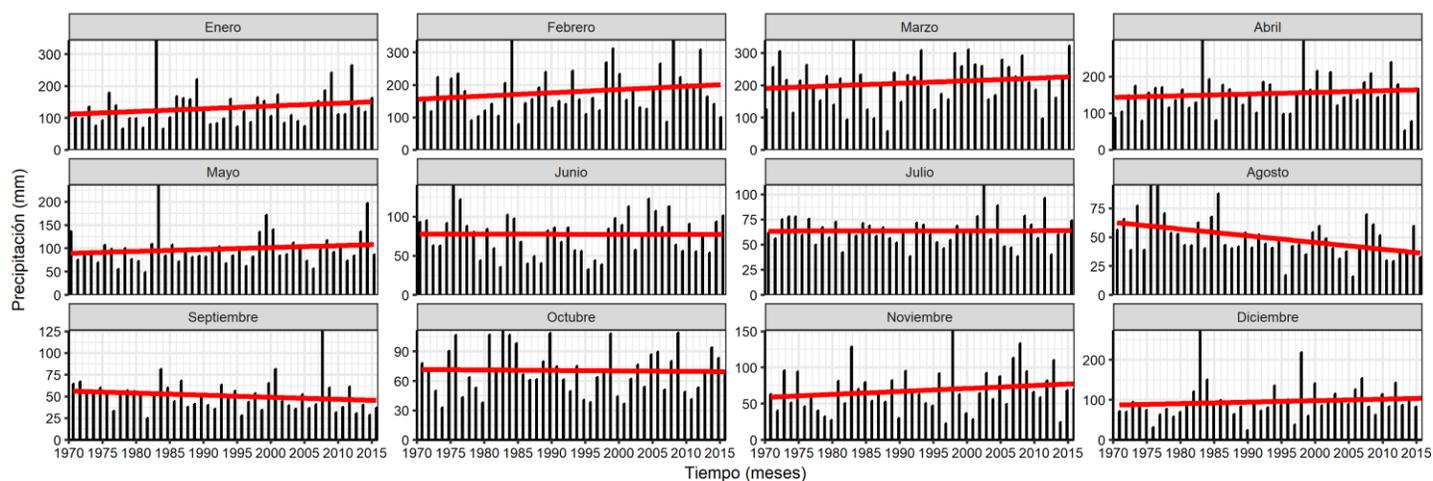
Continuación... Anexo D

Variable	Código	Nombre	Altitud (msnm)	Año	Mes	Valor sospechoso	Año Niño	Región	Resultado	Observaciones
Precipitación	M0740	Huertas	1400	1983	3	1031	Si	Costa	Validado	Estación localizada en la costa y año Niño
Precipitación	M0751	Buenavista	895	2000	3	1335.2	No	Costa	Validado	No se pudo detectar error, a pesar de ser el único valor > 1000 mm.
Precipitación	M0753	Ciano	1489	1983	3	1530.1	Si	Sierra	Validado	Años Niño, se encuentra entre el límite de sierra y costa
Precipitación	M0757	El Limo	997	1983	3	1322.2	Si	Sierra	Validado	Años Niño, se encuentra entre el límite de sierra y costa
Precipitación	M0758	El Prado (Guayquichuma) 200 Cc	1097	2003	3	1188.3	No	Sierra	Eliminado	Posibles errores de transcripción
Precipitación	M0758	El Prado (Guayquichuma) 200 Cc	1097	2005	3	5544.9	No	Sierra	Eliminado	Posibles errores de transcripción
Precipitación	M0040	Pasaje	44	1989	4	1080.5	No	Costa	Validado	Se encontró estudios que verifican las fuertes lluvias (Serrano Vincenti et al., 2016)
Precipitación	M0434	Sozoranga Inamhi	1409	1977	4	1502	No	Sierra	Eliminado	Posible error de transcripción, esta estación posee 6 datos con inconsistencias, estación con 45 años de registro histórico. A pesar de que dos datos pertenecen a años Niño, la estación se encuentra localizada en la Sierra.
Precipitación	M0740	Huertas	1400	1983	4	1004.6	Si	Costa	Validado	Estación localizada en la costa y año Niño
Precipitación	M0753	Ciano	1489	1983	4	1232.3	Si	Costa	Validado	Años Niño, se encuentra entre el límite de sierra y costa
Precipitación	M0754	Chaguarpamba	1269	1983	4	1369.8	Si	Sierra	Validado	Años Niño, se encuentra entre el límite de sierra y costa
Precipitación	M0757	El Limo	997	1983	4	1455.2	Si	Sierra	Validado	Años Niño, se encuentra entre el límite de sierra y costa
Precipitación	M0758	El Prado (Guayquichuma)	1097	2003	4	1621.3	No	Sierra	Eliminado	Posibles errores de transcripción
Precipitación	M0758	El Prado (Guayquichuma)	1097	2004	4	2018.3	No	Sierra	Eliminado	Posibles errores de transcripción
Precipitación	P220	Namballe	683	2009	4	1458.8	No	Amazonía	Validado	No se pudo detectar error, posee varios valores con similitud durante todo el año
Precipitación	P235	Morropon	129	1983	4	1030.7	Si	Costa	Validado	Año niño

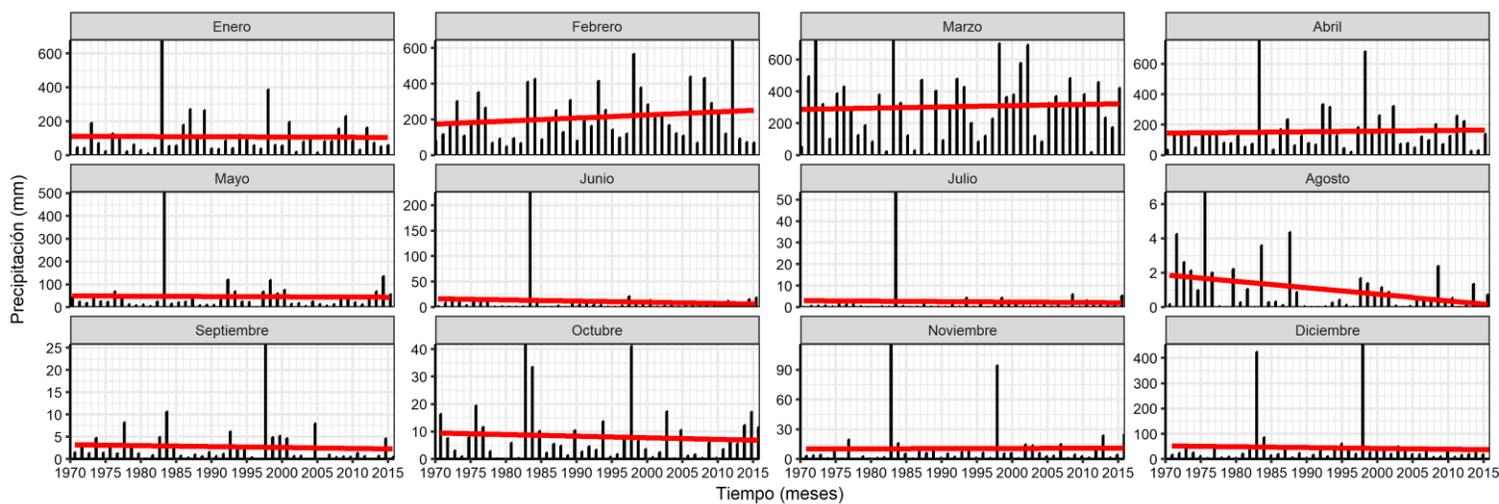
Continuación... Anexo D

Variable	Código	Nombre	Altitud (msnm)	Año	Mes	Valor sospechoso	Año Niño	Región	Resultado	Observaciones
Precipitación	P220	Namballe	683	2008	7	1252.1	No	Amazonía	Validado	No se pudo detectar error, posee varios valores con similitud durante todo el año
Precipitación	M0740	Huertas	1400	1982	10	1055.8	Si	Costa	Validado	Estación localizada en la costa y año Niño
Precipitación	M0753	Ciano	1489	1982	12	1249.7	Si	Costa	Validado	Años Niño, se encuentra entre el límite de sierra y costa
Precipitación	M0753	Ciano	1489	1983	12	1120.2	Si	Costa	Validado	Años Niño, se encuentra entre el límite de sierra y costa
Precipitación	M0758	El Prado (Guayquichuma)	1097	2005	12	1591.6	No	Sierra	Eliminado	Posibles errores de transcripción
Temperatura máxima	M1212	Pucara- Colegio Agropecuario	3105	2008	10	15.3	No	Sierra	Validado	Única estación localizada sobre los 3000 msnm, el valor corresponde con su altitud
Temperatura máxima	M1212	Pucara- Colegio Agropecuario	3105	2008	10	15.4	No	Sierra	Validado	Única estación localizada sobre los 3000 msnm, el valor corresponde con su altitud

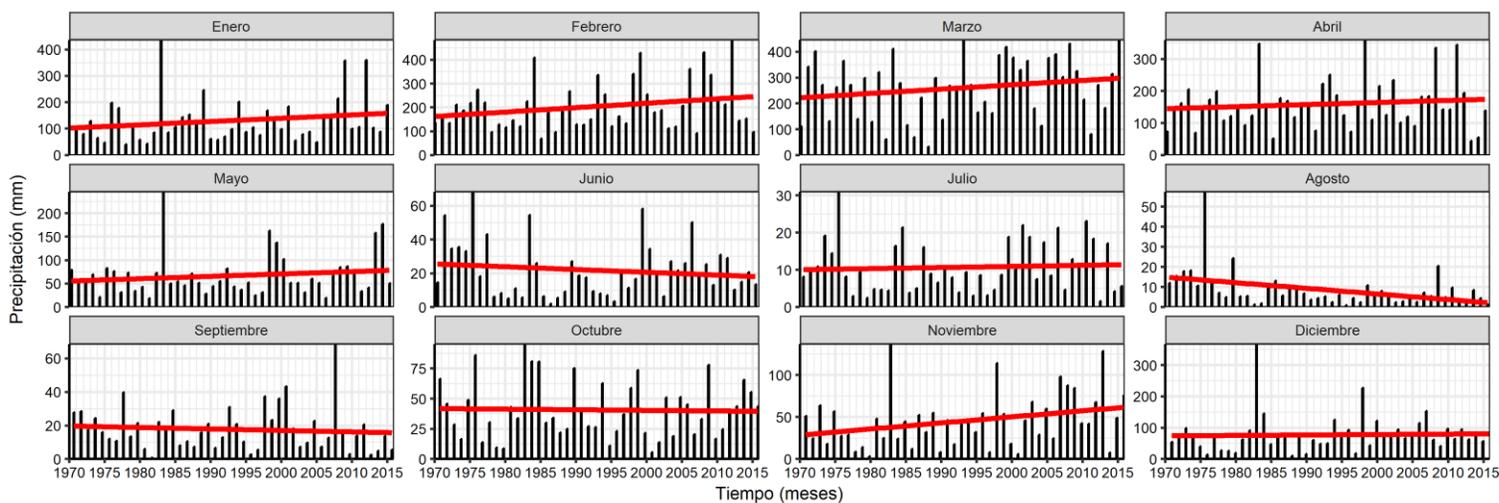
Anexo E. Tendencia de series climáticas por mes para el periodo [1970-2015].



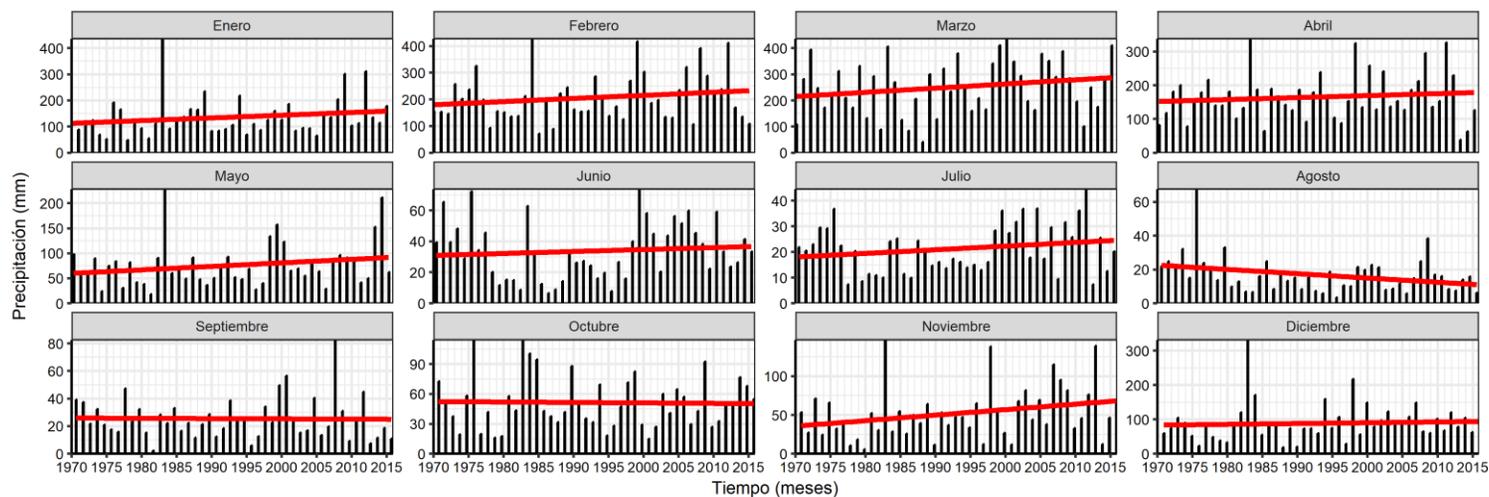
Tendencias de precipitación por mes para el periodo [1970-2015], ZP7.



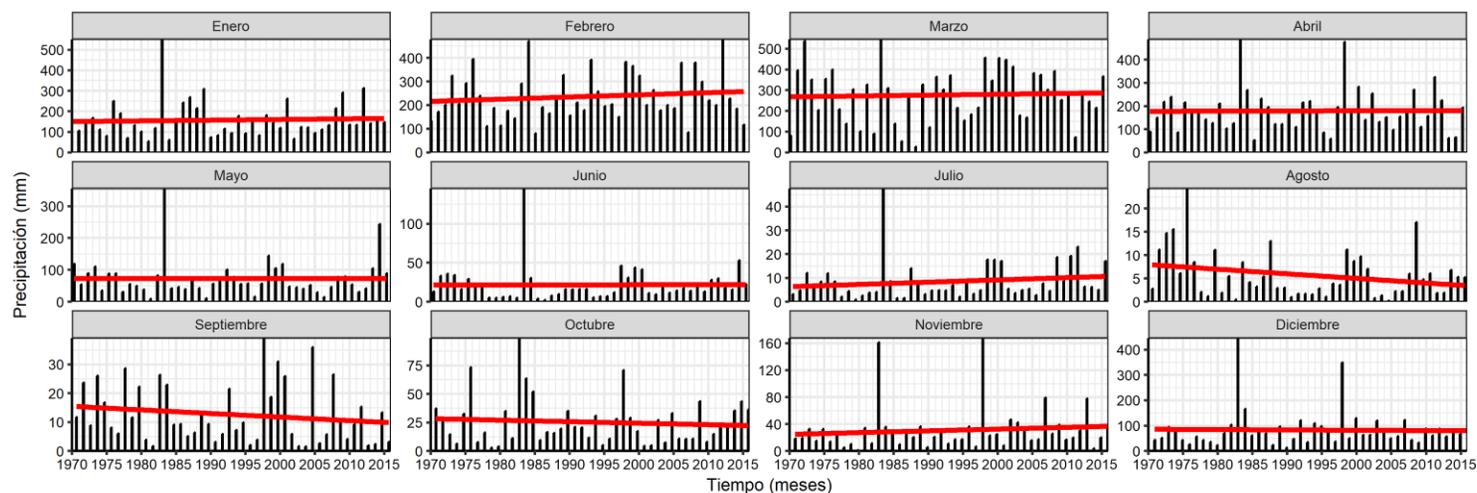
Tendencias de precipitación por mes para el periodo [1970-2015], Cuenca Alamor.



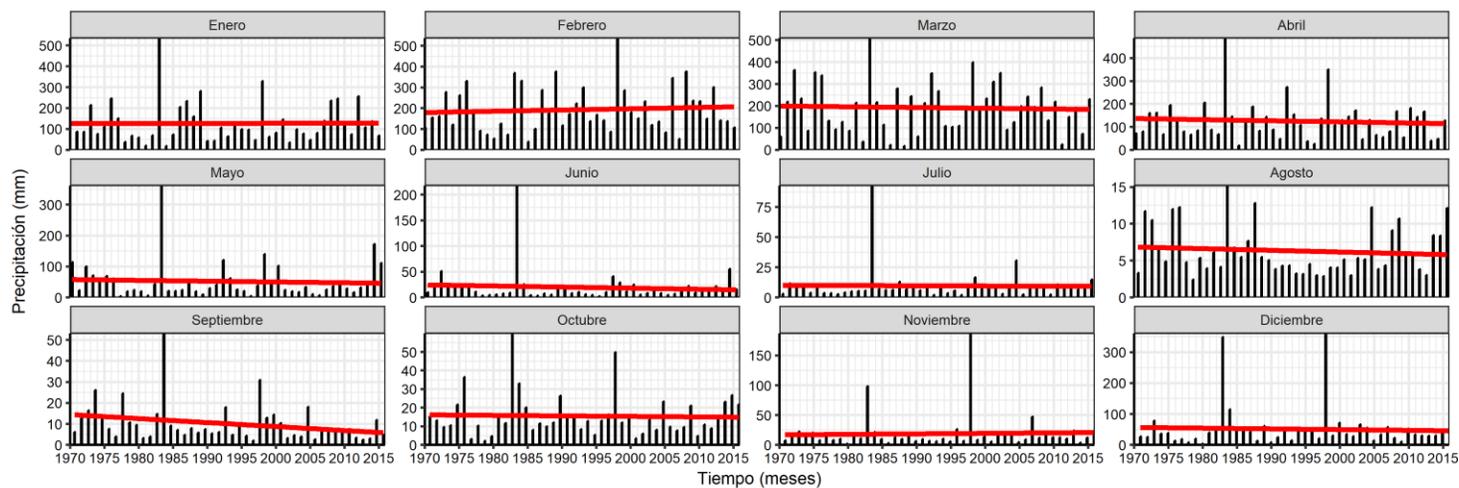
Tendencias de precipitación por mes para el periodo [1970-2015], cuenca Macará.



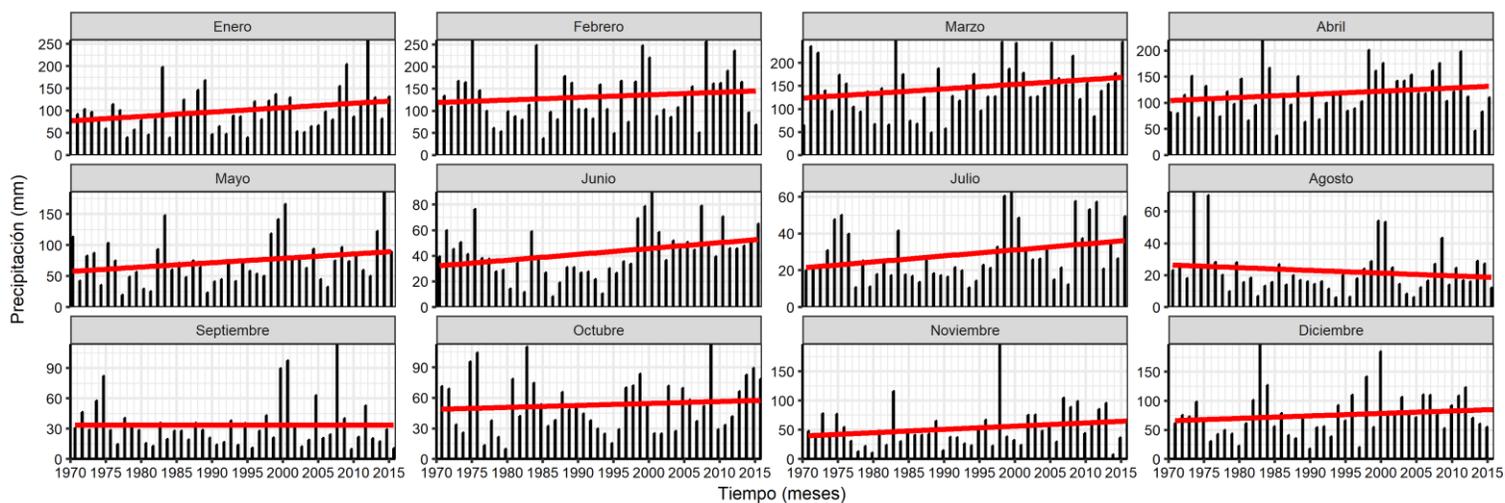
Tendencias de precipitación por mes para el periodo [1970-2015], cuenca Catamayo.



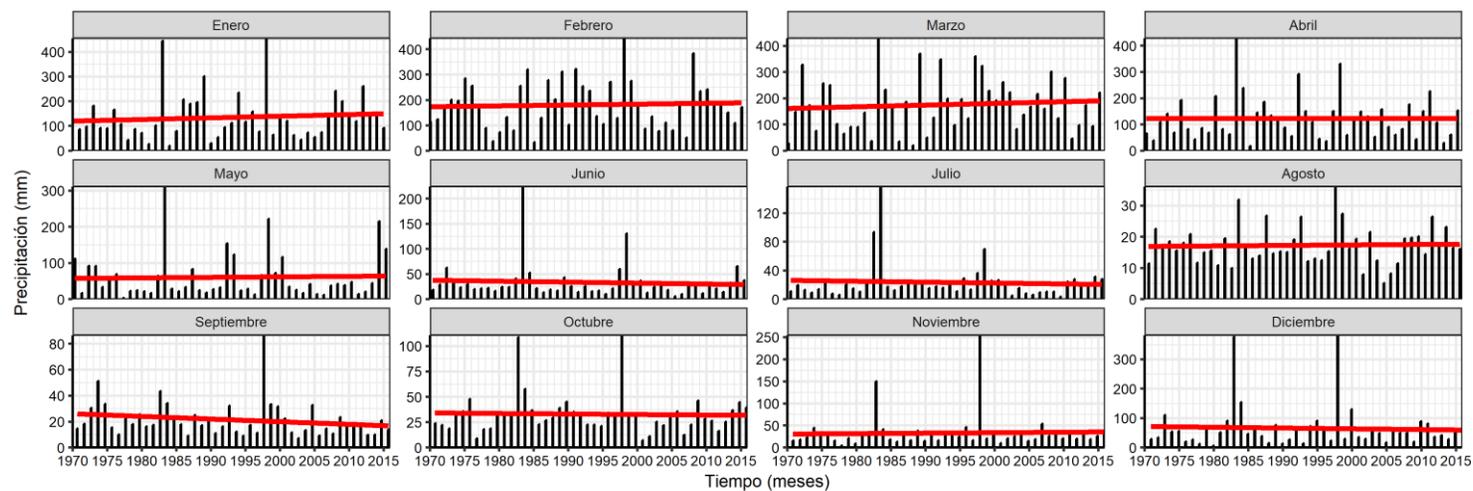
Tendencias de precipitación por mes para el periodo [1970-2015], Cuenca Puyango.



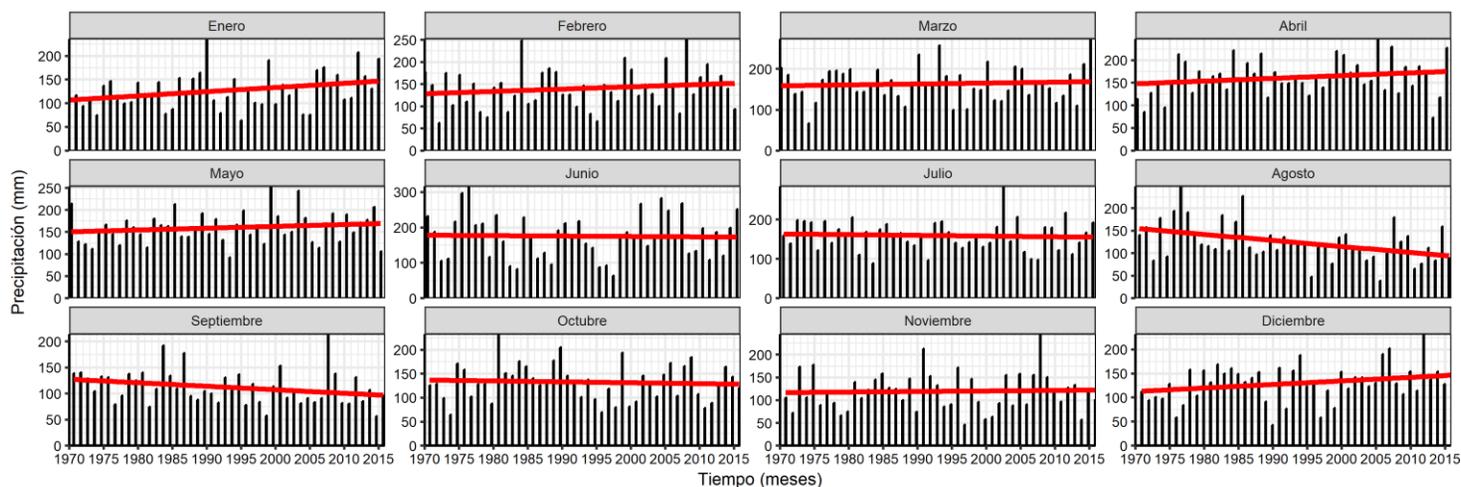
Tendencias de precipitación por mes para el periodo [1970-2015], Cuenca Santa Rosa.



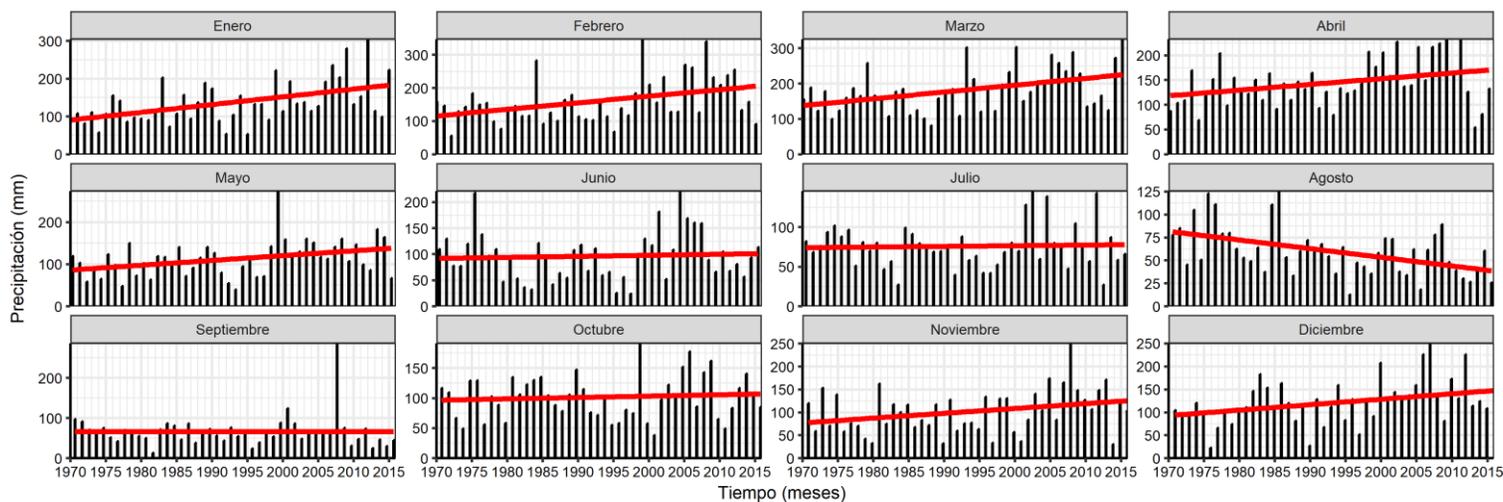
Tendencias de precipitación por mes para el periodo [1970-2015], cuenca Jubones.



Tendencias de precipitación por mes para el periodo [1970-2015], cuenca Pagua.

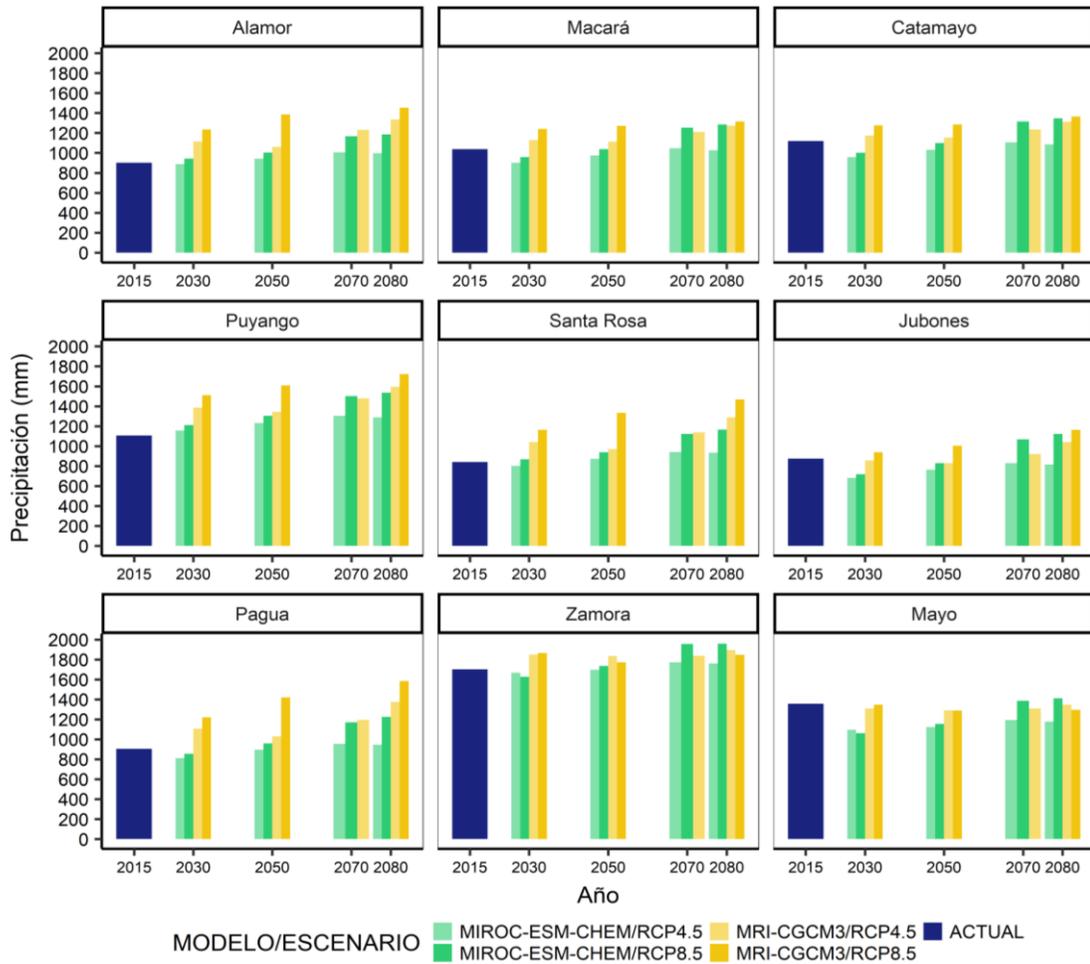


Tendencias de precipitación por mes para el periodo [1970-2015], cuenca Zamora.

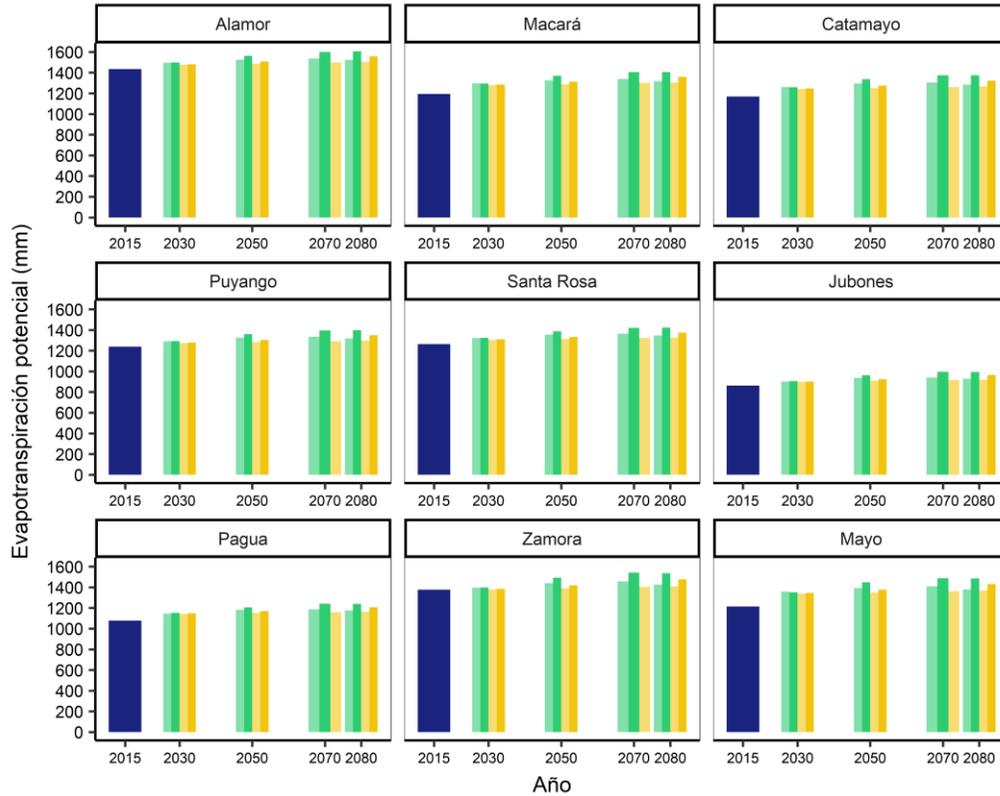


Tendencias de precipitación por mes para el periodo [1970-2015], cuenca Mayo.

Anexo F. Precipitación, ETP y ETR de los MCG por año de proyección y escenarios.

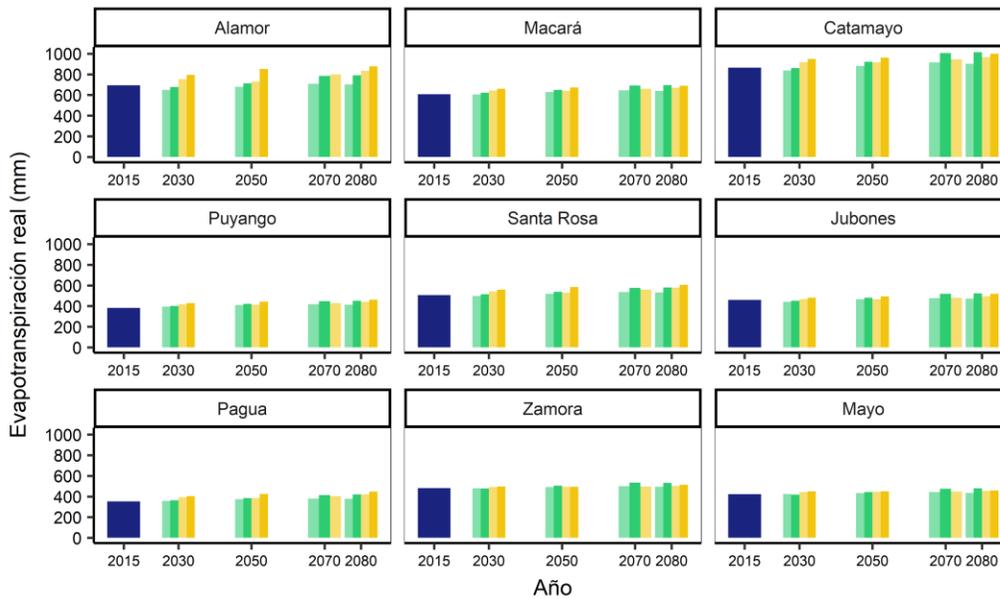


Precipitación media anual de los MCG para las proyecciones 2030s, 2050s, 2070s, y 2080s bajo escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5.



MODELO/ESCENARIO MIROC-ESM-CHEM/RCP4.5 MRI-CGCM3/RCP4.5 ACTUAL
 MIROC-ESM-CHEM/RCP8.5 MRI-CGCM3/RCP8.5

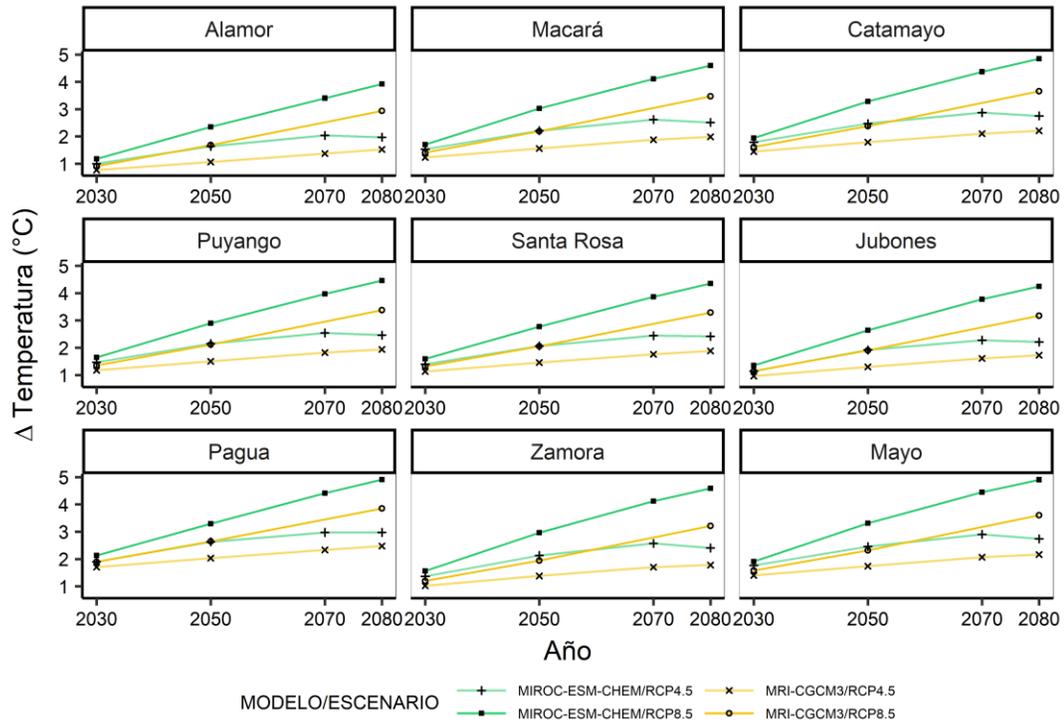
ETP media anual de los MCG para las proyecciones 2030s, 2050s, 2070s, y 2080s bajo escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5.



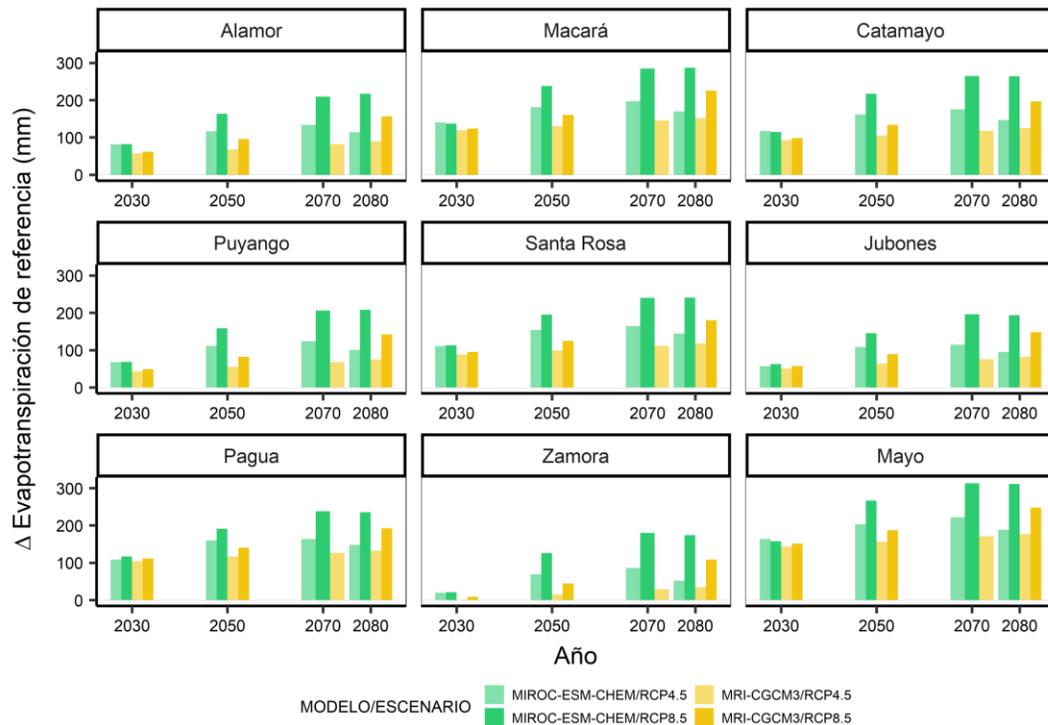
MODELO/ESCENARIO MIROC-ESM-CHEM/RCP4.5 MRI-CGCM3/RCP4.5 ACTUAL
 MIROC-ESM-CHEM/RCP8.5 MRI-CGCM3/RCP8.5

ETR media anual de los MCG para las proyecciones 2030s, 2050s, 2070s, y 2080s bajo escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5.

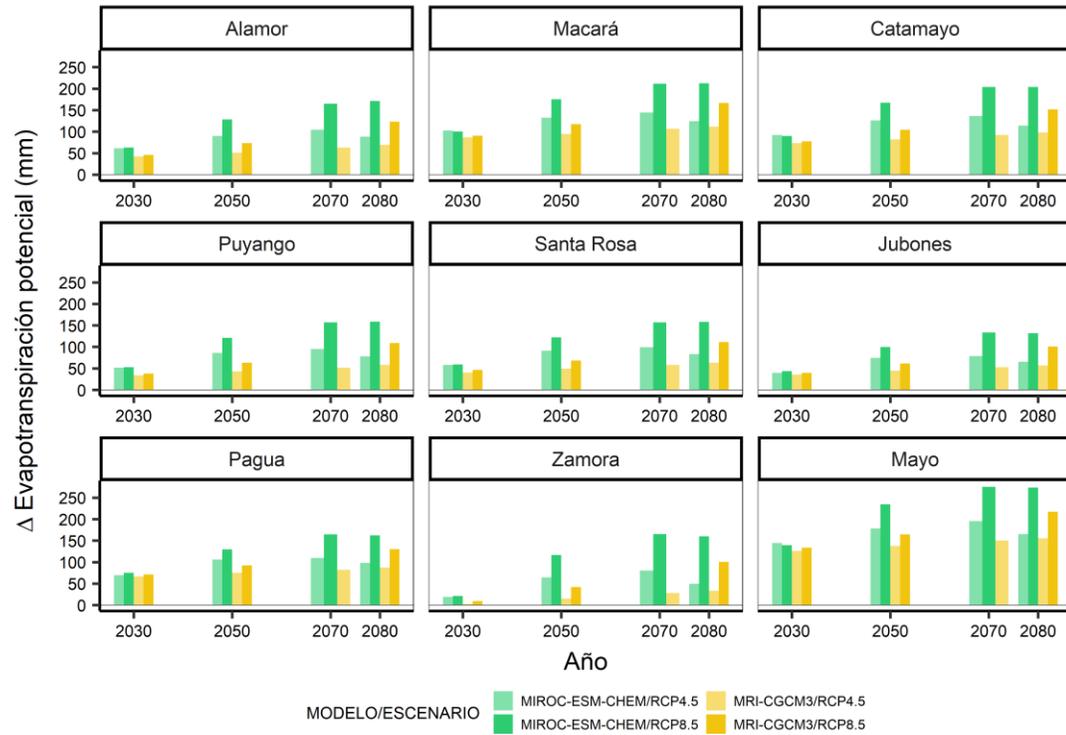
Anexo G. Cambios en la temperatura media, ET_0 , ETP de los MCG por año de proyección y escenarios.



Cambios en la temperatura de los MCG para las proyecciones 2030s, 2050s, 2070s, y 2080s bajo escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5.



Cambios en la ET_0 de los MCG para las proyecciones 2030s, 2050s, 2070s, y 2080s bajo escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5.



Cambios en la ETP de los MCG para las proyecciones 2030s, 2050s, 2070s, y 2080s bajo escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5.