

Paúl Guillermo Sotomayor González

Adaptación de los recursos
hídricos al cambio climático:
aplicación de modelos hidrológicos
al caso de la cuenca del río
Babahoyo-Ecuador

Departamento

Geografía y Ordenación del Territorio

Director/es

Escolano Utrilla, Severino
Sánchez Fabre, Miguel Ángel

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>



Reconocimiento – NoComercial – SinObraDerivada (by-nc-nd): No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas.

© Universidad de Zaragoza
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606



Universidad
Zaragoza

Tesis Doctoral

ADAPTACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS AL
CAMBIO CLIMÁTICO: APLICACIÓN DE MODELOS
HIDROLÓGICOS AL CASO DE LA CUENCA DEL
RÍO BABAHOYO-ECUADOR

Autor

Paúl Guillermo Sotomayor González

Director/es

Escolano Utrilla, Severino
Sánchez Fabre, Miguel Ángel

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
Geografía y Ordenación del Territorio

2020

TESIS DOCTORAL

Adaptación de los recursos hídricos al cambio climático: aplicación de modelos hidrológicos al caso de la cuenca del río Babahoyo-Ecuador



Universidad
Zaragoza

Paúl Guillermo
Sotomayor González
2019

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO

Trabajo de investigación para la obtención del título de Doctor en Ordenación del Territorio y Medio Ambiente

Autor de la tesis doctoral: Paúl Guillermo Sotomayor González

Directores de la tesis: Severino Escolano Utrilla y Miguel Sánchez Fabre

Año de calificación: 2019

La responsabilidad por las opiniones y el contenido expresado en el presente trabajo de investigación son de responsabilidad exclusiva de su autor y su publicación no significa que la Universidad se identifique con las mismas. 2019

Esta publicación se edita únicamente en formato digital.

Paúl Guillermo Sotomayor González

Teléfono: 593-961106007

paulsotomayorg@hotmail.com

Adaptación de los recursos hídricos al
cambio climático: aplicación de
modelos hidrológicos al caso de la
cuenca del río Babahoyo-Ecuador

Paúl Guillermo Sotomayor González
2019

Índice de contenidos

	Pág.
RESUMEN	13
ABSTRACT.....	15
I. INTRODUCCIÓN	19
1. Planteamiento del problema.....	20
2. Justificación	24
3. Hipótesis.....	25
4. Objetivo general	25
5. Objetivos específicos.....	25
6. Resultados esperados.....	26
II. MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO	29
1. Planificación de la gestión integrada de los recursos hídricos.....	30
1.1. Ciclo hidrológico	32
1.2. Balance hídrico (BH)	34
2. Cuenca hidrográfica como unidad de planificación	35
3. Red nacional de estaciones hidrometeorológicas	37
3.1. Información meteorológica.....	38
3.2. Información hidrológica	46
4. Recopilación y homogeneización de datos hidrometeorológicos	48
5. Datos meteorológicos	49
6. Datos hidrológicos	51
7. Modelo hidrológico	52
7.1. Configuración del modelo hidrológico.....	54
7.2. Calibración y validación del modelo.....	55
7.3. Cálculo del balance hídrico directo (BHD).....	55
8. Recursos hídricos y adaptación al cambio climático.....	57
8.1. Observaciones mundiales causadas por fenómenos climáticos.....	59
8.2. Modelos climáticos globales	61
8.3. Escenarios globales de cambio climático	62
8.4. Medidas de adaptación de los recursos hídricos al cambio climático en la planificación integrada de cuencas hidrográficas	67

III.	CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA.....	73
1.	Medio físico	73
1.1.	Medio biótico	73
1.2.	Medio inerte.....	78
2.	Centros poblados e infraestructura	87
3.	Población	89
4.	Marco jurídico e institucional.....	92
4.1.	Constitución de la Republica de Ecuador	92
4.2.	Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamientos del Agua (LORHUyA).....	94
4.3.	Visión general de fortalecimiento jurídico ante el cambio climático.	99
IV.	DATOS Y METODOLOGÍA	103
1.	Datos hidrometeorológicos: recolección, análisis, validación	104
1.1.	Análisis de la información meteorológica	105
1.2.	Complementación de datos diarios	108
1.3.	Generador de clima WXGEN	108
1.4.	Método complementar datos diarios de dos estaciones correlativas (CDDDEC).....	110
1.5.	Análisis de resultados (CDDDEC)	115
2.	Modelamiento hidrológico.....	122
2.1.	Ecuaciones.....	122
2.2.	Precipitación.....	123
2.3.	Ecuación de escorrentía superficial.....	123
2.4.	Ecuación de evapotranspiración	125
2.5.	Evapotranspiración Potencial.....	126
2.6.	Ecuación de agua subterránea	127
2.7.	Ecuación de sedimentación.....	128
2.8.	Análisis estadístico de resultados	129
2.9.	Configuración del modelo	131
2.10.	Calibración y validación del modelo.....	145
3.	Cálculo del balance hídrico directo (BHD).....	149
3.1.	Balance hídrico (BH)	149
3.2.	Balance hídrico directo (BHD)	149
3.3.	Reserva de agua en el suelo	151

3.4. Déficit de agua en el suelo	152
3.5. Exceso de agua en el suelo	152
4. Índice de Aridez	152
5. Periodo de análisis de la información	153
6. Resultados de la observación global y adaptación local	153
6.1. Aplicación de medidas a nivel global (ACC)	154
6.2. Balance hídrico actual y escenarios futuros de cambio climático	155
7. Adaptación local del uso de los recursos hídricos ante el cambio climático ..	155
V. RESULTADOS	159
1. Precipitación	159
2. Evapotranspiración potencial anual	163
3. Precipitación útil (P-ETP)	165
4. Reserva de agua en el suelo	167
5. Exceso de agua en el suelo	168
6. Déficit de agua en el suelo	171
7. Escorrentía superficial	174
8. Índice de aridez	176
9. Aplicación del modelo hidrológico	180
10. Proyección del balance hídrico ante escenarios de cambio climático	188
11. Adaptación local del uso de los recursos hídricos ante el cambio climático	189
VI. CONCLUSIONES	193
VII. AGRADECIMIENTO	199
VIII. BIBLIOGRAFÍA	203
IX. ANEXOS	219

Índice de figuras

	Pág.
Figura 1. Ubicación del área de estudio, cuenca del río Babahoyo.	23
Figura 2. Ciclo Hidrológico del Agua.	32
Figura 3. Representación en diagrama del bloque del sistema hidrológico global.	34
Figura 4. Clasificación de modelos hidrológicos. Clasificación de acuerdo a la forma, aleatoriedad y variabilidad espacial y temporal de los fenómenos hidrológicos.	53
Figura 5. Algebra de mapas cálculo del balance hídrico directo.	56
Figura 6. Conceptos centrales sobre la gestión de los riesgos de fenómenos climatológicos extremos y desastres. Esquema conceptual para mejorar la adaptación al cambio climático.	58
Figura 7. Enfoques de adaptación y gestión de riesgos de desastre. Esquema de aporte para reducir y gestionar los riesgos de desastres en un clima cambiante.	59
Figura 8. Patrones globales de impactos por el cambio climático.	60
Figura 9. Escenario del cambio de la temperatura media global para distintas proyecciones de emisiones.	63
Figura 10. Cambio en la temperatura media del aire. Periodos 1986-2005 a 2081 – 2100.	64
Figura 11. Cambio en la precipitación media en superficie. Periodo 1986-2005 a 2081-2100.	64
Figura 12. Efecto de cambio en la distribución de temperatura entre el clima presente y futuro. Efectos sobre los valores extremos de un desplazamiento simple para toda la distribución hacia un clima más cálido.	65
Figura 13. Mapa de las áreas protegidas y bosques protectores en el área de estudio.	75
Figura 14. Usos del suelo en la cuenca del río Babahoyo.	77
Figura 15. Mapa de Isoyetas.	79
Figura 16. Temperatura media máxima mensual de las estaciones en la cuenca de estudio.	80
Figura 17. Temperatura media mínima mensual de las estaciones en la cuenca de estudio.	81
Figura 18. Sistema Hídrico de la cuenca del río Babahoyo.	82
Figura 19. Mapa de formaciones geomorfológicas en la cuenca.	83
Figura 20. Mapa de formaciones geológicas en la cuenca.	85
Figura 21. Clasificación taxonómica de los suelos.	86
Figura 22. Centros poblados e infraestructuras principales.	88
Figura 23. Estructura poblacional, según censo de Población y Vivienda.	89
Figura 24. Mapa de densidad poblacional.	91

Figura 25. Organigrama de los principios básicos del agua	95
Figura 26. Organigrama de entidades públicas y privadas en materia de los Recursos Hídricos.....	97
Figura 27. Metodología aplicada en la presente investigación.....	103
Figura 28. Estaciones meteorológicas en el área de estudio.....	107
Figura 29. Flujo de cálculo de estimación de precipitación diaria.....	112
Figura 30. Correlaciones de precipitaciones de periodicidad para las estaciones Babahoyo (M0051) y Pueblo Viejo (M0172).....	113
Figura 31. Correlaciones de periodicidad para las estaciones Babahoyo y Pueblo Viejo.....	114
Figura 32. Ecuación lineal para las estaciones Babahoyo y Pueblo Viejo.....	114
Figura 33. Precipitación periódica simulados vs. observados.....	120
Figura 34. Relación entre escorrentía y precipitación según el método SCS.....	124
Figura 35. Esquema de modelamiento en SWAT.....	132
Figura 36. Distribución de las subcuencas según su superficie.....	134
Figura 37. Subcuencas del río Babahoyo.....	135
Figura 38. Nomenclatura de los perfiles del suelo.....	137
Figura 39. Los perfiles de suelos en la cuenca del río Babahoyo.....	139
Figura 40. Cobertura del uso del suelo en la cuenca del río Babahoyo.....	142
Figura 41. Distribución de las pendientes en la cuenca del río Babahoyo.....	143
Figura 42. Diagrama de caudales observados vs simulados.....	146
Figura 43. Calibración. Correlaciones caudales mensuales observados vs simulados.....	146
Figura 44. Validación. Correlación caudales mensuales observados vs simulados.....	148
Figura 45. Validación. Diagrama caudales mensuales observados vs simulados.....	148
Figura 46. Precipitación media anual 1986-2005 (mm).....	160
Figura 47. Precipitación media mensual 1986-2005 (mm) en la cuenca.....	161
Figura 48. Precipitación media mensual periodo (1986-2005).....	162
Figura 49. Evapotranspiración potencial anual (mm) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP.....	163
Figura 50. Evapotranspiración potencial mensual ETP mensual (mm) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP en la cuenca.....	164
Figura 51. Precipitación útil anual (mm) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5.....	166
Figura 52. Precipitación útil mensual (mm) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 en la cuenca.....	167

Figura 53. Reserva de agua en el suelo mensual (mm) Reserva de agua en el suelo mensual (mm) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5.	168
Figura 54. Exceso de agua en el suelo anual (mm) Exceso de agua en el suelo anual (mm) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5.	169
Figura 55. Exceso de agua en el suelo mensual (mm) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 en la cuenca.	170
Figura 56. Déficit de agua en el suelo (mm) mensual (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 en la cuenca.	172
Figura 57. Mapa del déficit de agua en el suelo anual (mm)	173
Figura 58. Superficie de déficit de agua en el suelo (km ²) mensual (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 en la cuenca.	174
Figura 59. Escorrentía superficial media anual en la cuenca (m ³ /s) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP.	175
Figura 60. Escorrentía mensual a la salida de la cuenca (m ³ /s) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP.	176
Figura 61. Índice de aridez anual en la cuenca por zonas (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5.	177
Figura 62. Índice de aridez entre los meses junio y noviembre en la cuenca.....	178
Figura 63. Esquema del modelamiento hidrológico periodo (1986-2005)	180
Figura 64. Esquema del modelamiento hidrológico periodo (2081-2100). Escenario RCP2.6.....	181
Figura 65. Esquema del modelamiento hidrológico periodo (2081-2100). Escenario RCP4.5.....	182
Figura 66. Esquema del modelamiento hidrológico periodo (2081-2100). Escenario RCP6.0.....	183
Figura 67. Esquema del modelamiento hidrológico periodo (2081-2100). Escenario RCP8.5.....	184
Figura 68. Variación porcentual de la evapotranspiración real	186
Figura 69. Variación porcentual del rendimiento hídrico para fin de siglo.....	187
Figura 70. Variación porcentual del déficit de agua en el suelo.	188
Figura 71. Variación anual de los componentes principales del Balance Hídrico.	188
Figura 72. Evapotranspiración potencial mensual enero.....	219
Figura 73. Evapotranspiración potencial media mensual febrero	220
Figura 74. Evapotranspiración potencial media mensual marzo.	221
Figura 75. Evapotranspiración potencial media mensual abril.	222
Figura 76. Evapotranspiración potencial media mensual mayo.	223
Figura 77. Evapotranspiración potencial media mensual junio	224

Figura 78. Evapotranspiración potencial media mensual julio.	225
Figura 79. Evapotranspiración potencial media mensual agosto.	226
Figura 80. Evapotranspiración potencial media mensual septiembre.....	227
Figura 81. Evapotranspiración potencial media mensual octubre.....	228
Figura 82. Evapotranspiración potencial media mensual noviembre.....	229
Figura 83. Evapotranspiración potencial media mensual diciembre.....	230
Figura 84. Precipitación útil media mensual enero.....	231
Figura 85. Precipitación útil media mensual febrero.	232
Figura 86. Precipitación útil media mensual marzo.	233
Figura 87. Precipitación útil media mensual abril.	234
Figura 88. Precipitación útil media mensual mayo.	235
Figura 89. Precipitación útil media mensual junio.	236
Figura 90. Precipitación útil media mensual julio.	237
Figura 91. Precipitación útil media mensual agosto.	238
Figura 92. Precipitación útil media mensual septiembre.....	239
Figura 93. Precipitación útil media mensual octubre.....	240
Figura 94. Precipitación útil media mensual noviembre.....	241
Figura 95. Precipitación útil media mensual diciembre.....	242
Figura 96. Reserva de agua en el suelo media mensual enero.	243
Figura 97. Reserva de agua en el suelo media mensual febrero.....	244
Figura 98. Reserva de agua en el suelo media mensual marzo.....	245
Figura 99. Reserva de agua en el suelo media mensual abril.	246
Figura 100. Reserva de agua en el suelo media mensual mayo.....	247
Figura 101. Reserva de agua en el suelo media mensual junio	248
Figura 102. Reserva de agua en el suelo media mensual julio.....	249
Figura 103. Reserva de agua en el suelo media mensual agosto.....	250
Figura 104. Reserva de agua en el suelo media mensual septiembre.....	251
Figura 105. Reserva de agua en el suelo media mensual octubre.....	252
Figura 106. Reserva de agua en el suelo media mensual noviembre.....	253
Figura 107. Reserva de agua en el suelo media mensual diciembre.....	254
Figura 108. Exceso de agua media mensual enero.	255
Figura 109. Exceso de agua media mensual febrero.....	256
Figura 110. Exceso de agua media mensual marzo.....	257
Figura 111. Exceso de agua media mensual abril.....	258
Figura 112. Exceso de agua media mensual mayo.....	259

Figura 113. Exceso de agua media mensual junio.....	260
Figura 114. Exceso de agua media mensual julio.....	261
Figura 115. Exceso de agua media mensual agosto.....	262
Figura 116. Exceso de agua media mensual septiembre.....	263
Figura 117. Exceso de agua media mensual octubre.....	264
Figura 118. Exceso de agua media mensual noviembre.....	265
Figura 119. Exceso de agua media mensual diciembre.....	266
Figura 120. Déficit de agua media mensual enero.....	267
Figura 121. Déficit de agua media mensual febrero.....	268
Figura 122. Déficit de agua media mensual marzo.....	269
Figura 123. Déficit de agua media mensual abril.....	270
Figura 124. Déficit de agua media mensual mayo.....	271
Figura 125. Déficit de agua media mensual junio.....	272
Figura 126. Déficit de agua media mensual julio.....	273
Figura 127. Déficit de agua media mensual agosto.....	274
Figura 128. Déficit de agua media mensual septiembre.....	275
Figura 129. Déficit de agua media mensual octubre.....	276
Figura 130. Déficit de agua media mensual noviembre.....	277
Figura 131. Déficit de agua media mensual diciembre.....	278
Figura 132. Escorrentía media mensual enero.....	279
Figura 133. Escorrentía media mensual febrero.....	280
Figura 134. Escorrentía media mensual marzo.....	281
Figura 135. Escorrentía media mensual abril.....	282
Figura 136. Escorrentía media mensual mayo.....	283
Figura 137. Escorrentía media mensual junio.....	284
Figura 138. Escorrentía media mensual julio.....	285
Figura 139. Escorrentía media mensual agosto.....	286
Figura 140. Escorrentía media mensual septiembre.....	287
Figura 141. Escorrentía media mensual octubre.....	288
Figura 142. Escorrentía media mensual noviembre.....	289
Figura 143. Escorrentía media mensual diciembre.....	290
Figura 144. Índice de aridez media mensual enero.....	291
Figura 145. Índice de aridez media mensual febrero.....	292
Figura 146. Índice de aridez media mensual marzo.....	293
Figura 147. Índice de aridez media mensual abril.....	294

Figura 148. Índice de aridez media mensual mayo.....	295
Figura 149. Índice de aridez media mensual junio.....	296
Figura 150. Índice de aridez media mensual julio.....	297
Figura 151. Índice de aridez media mensual agosto.....	298
Figura 152. Índice de aridez media mensual septiembre.....	299
Figura 153. Índice de aridez media mensual octubre.....	300
Figura 154. Índice de aridez media mensual noviembre.....	301
Figura 155. Índice de aridez media mensual diciembre.....	302

Índice de tablas

	Pág.
Tabla 1. Distribución del agua en el planeta.	33
Tabla 2. Balance anual de agua en la Tierra.	33
Tabla 3. Distribución de estaciones meteorológicas convencionales en Ecuador.	39
Tabla 4. Registros de datos de precipitación para el periodo (1981-2015).	50
Tabla 5. Registros de datos de temperaturas para el periodo (1981-2015).	51
Tabla 6. Estaciones hidrológicas de Ecuador.	52
Tabla 7. Rango de trayectoria de concentración representativa. Escenarios de emisión de gases de efecto invernadero al año 2100.	62
Tabla 8. Rango de incremento de la Temperatura Media Global.	63
Tabla 9. Áreas protegidas en el área de estudio.	74
Tabla 10. Bosques Protectores en el área de estudio.	74
Tabla 11. Usos del suelo en el área de estudio.	76
Tabla 12. Tipos de suelo en la cuenca del estudio.	84
Tabla 13. Población de las principales ciudades en la cuenca.	87
Tabla 14. Red vial en área de estudio.	87
Tabla 15. Principales Áreas de Riego. Presas y Embalses, SENAGUA, 2012; Sistemas de riego estatales, MAGAP.	89
Tabla 16. Población de la cuenca en estudio.	90
Tabla 17. Valores mínimos recomendados de densidad de estaciones (superficie, en Km ² por estación) (OMM, 1992).	105
Tabla 18. Datos de la estación hidrológica considerada para calibrar y validar el balance hídrico.	105
Tabla 19. Estaciones meteorológicas en el área de estudio.	106
Tabla 20. Ecuaciones estadísticas para generar data climática.	109
Tabla 21. Probabilidad de día húmedo (1) o día seco (0).	116
Tabla 22. Datos aleatorios para la estación Pueblo Viejo.	117
Tabla 23. Precipitación diaria para la estación Pueblo Viejo.	118
Tabla 24. Sumatoria de precipitación de los periodos (26) y (27) que mejor se ajusta a la estación Pueblo Viejo.	119
Tabla 25. Datos diarios de precipitación de la estación Pueblo Viejo.	119
Tabla 26. Datos observados y estimados para periodos de los años 1985, 1989 y 2005.	121
Tabla 27. Características de las subcuencas del río Babahoyo.	136
Tabla 28. Codificación de los perfiles de suelo.	137

Tabla 29. Clasificación de la profundidad del suelo.	137
Tabla 30. Clasificación de pedregosidad.....	138
Tabla 31. Codificación de la materia orgánica.....	138
Tabla 32. Tipos de suelo en la cuenca del río Babahoyo	140
Tabla 33. Usos del suelo en la cuenca del río Babahoyo.....	141
Tabla 34. Rango de pendientes en la cuenca del río Babahoyo	141
Tabla 35. Unidades de respuestas hidrológicas de la cuenca.	144
Tabla 36. Orden y valor de los parámetros de sensibilidad en la cuenca.	147
Tabla 37. Clasificación del Índice P/ETo.	153
Tabla 38. Precipitación media mensual 1986-2005 (mm) en la cuenca.....	161
Tabla 39. Evapotranspiración potencial mensual (mm) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 en la cuenca.	164
Tabla 40. Precipitación útil mensual (mm) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 en la cuenca.....	165
Tabla 41. Reserva de agua en el suelo mensual (mm).	167
Tabla 42. Exceso de agua (mm) en el suelo mensual.	170
Tabla 43. Déficit de agua en el suelo (mm) mensual.....	171
Tabla 44. Superficie de déficit de agua en el suelo (km ²) mensual.....	172
Tabla 45. Escorrentía mensual a la salida de la cuenca (m ³ /s) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP	174
Tabla 46. Índice de aridez anual en la cuenca por zonas.	176
Tabla 47. Superficies (km ²) de las zonas climáticas para el periodo base y escenarios.	179
Tabla 48. Resultados del modelamiento hidrológico periodo (1986-2005).....	181
Tabla 49. Resultados del modelamiento hidrológico periodo (2081-2100). Escenario RCP2.6.....	182
Tabla 50. Resultados del modelamiento hidrológico periodo (2081-2100). Escenario RCP4.5.....	183
Tabla 51. Resultados del modelamiento hidrológico periodo (2081-2100). Escenario RCP6.0.....	184
Tabla 52. Resultados del modelamiento hidrológico periodo (2081-2100). Escenario RCP8.5.....	185
Tabla 53. Variación porcentual de la evapotranspiración real.....	185
Tabla 54. Variación porcentual del rendimiento hídrico para fin de siglo comparado con el periodo (1986-2005).	186
Tabla 55. Variación porcentual del déficit de agua en el suelo.....	187

Índice de anexos

	Pág.
Anexo 1. Evapotranspiración potencial mensual	219
Anexo 2. Precipitación útil mensual	231
Anexo 3. Reserva de agua en el suelo mensual	243
Anexo 4. Exceso de agua en el suelo mensual	255
Anexo 5. Déficit de agua en el suelo mensual.....	267
Anexo 6. Escorrentía mensual	279
Anexo 7. Índice de aridez (P/ETP) mensual	291

RESUMEN

La presente tesis doctoral es una contribución metodológica para la incorporación de criterios de cambio climático, en la planificación integral de los recursos hídricos de cuencas hidrográficas, basada en la comparación del cambio de volumen de agua, en los componentes del balance hídrico (BH) entre el periodo base (1986-2005) y los escenarios del IPCC (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5) para el periodo (2081-2100), donde la variable cambiante es la temperatura media, que incrementa en 1,00°C, 1,85°C, 2,25°C, y 3,70°C, respectivamente.

Sobre la metodología, la complejidad radica en la recopilación, validación y estructuración de información base para hacer correr de los modelos hidrológicos, y los mapas de los componentes del BH e índice de aridez (IDA). La investigación permitió la implementación del desarrollo de una metodología, que probó ser funcional y adecuada para su replicación en otras cuencas hidrográficas de Ecuador, con la flexibilidad de ser perfectible, debido a su funcionalidad como módulo abierto y escalable.

Los resultados obtenidos de los componentes del BH para el periodo base y futuros para los diferentes escenarios de cambio climático de trayectoria de concentración representativa (RCP), fueron producto del modelamiento hidrológico con la herramienta ArcSWAT sobre la plataforma de sistemas de información geográfica (SIG). Con el módulo interno de programación orientada a objetos del SIG, fueron elaborados de forma semiautomática, los mapas del balance hídrico (BH), como base para la construcción de índice de aridez (IDA).

El IDA permite cuantificar y cualificar zonas climáticas, si bien no es específicamente un índice de cambio climático (modelos de clima para atmósfera), el IDA permite la comparación entre resultados del BH (base y proyección), enmarcado en los escenarios RCP.

La presente investigación es una aportación en la contribución metodológica en Ecuador, para la incorporación de criterios de cambio climático en la formulación y actualización de planes de gestión integrada de los recursos hídricos, que permitiría a las autoridades, contar con información en la toma de decisiones a corto, mediano y largo plazo, para garantizar el uso y aprovechamiento del agua, mediante la mitigación de impactos, control de exposición y reducción de vulnerabilidad de los recursos hídricos, que por efecto del cambio climático, son susceptibles de reducción volumétrica del agua útil en la cuenca hidrográfica.

ABSTRACT

The present doctoral thesis is a methodological contribution to the Water Resources Planning on Hydrographic Basins in order to include climate change criteria, based on the comparison of the changes on water volume into the Water Balance (BH) between the base period (1986-2005) and the proposed IPCC scenarios (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5) for the period (2081-2100), in which the temperature average is changing by 1.00°C, 1.85°C, 2.25°C, and 3.70°C, respectively.

In reference to the methodology, the complexity lies on the collection, validation and structuring of the information for the hydrological models running, as a basis for quantitative calculations and qualitative analysis, as well as for the preparation of component maps of the BH and the IDA. The development of the research allowed the design and test of a methodology, which prove to be functional and suitable for implementation in other watersheds of Ecuador, considering that it is possible to be perfected, because it functions as an open and scalable module.

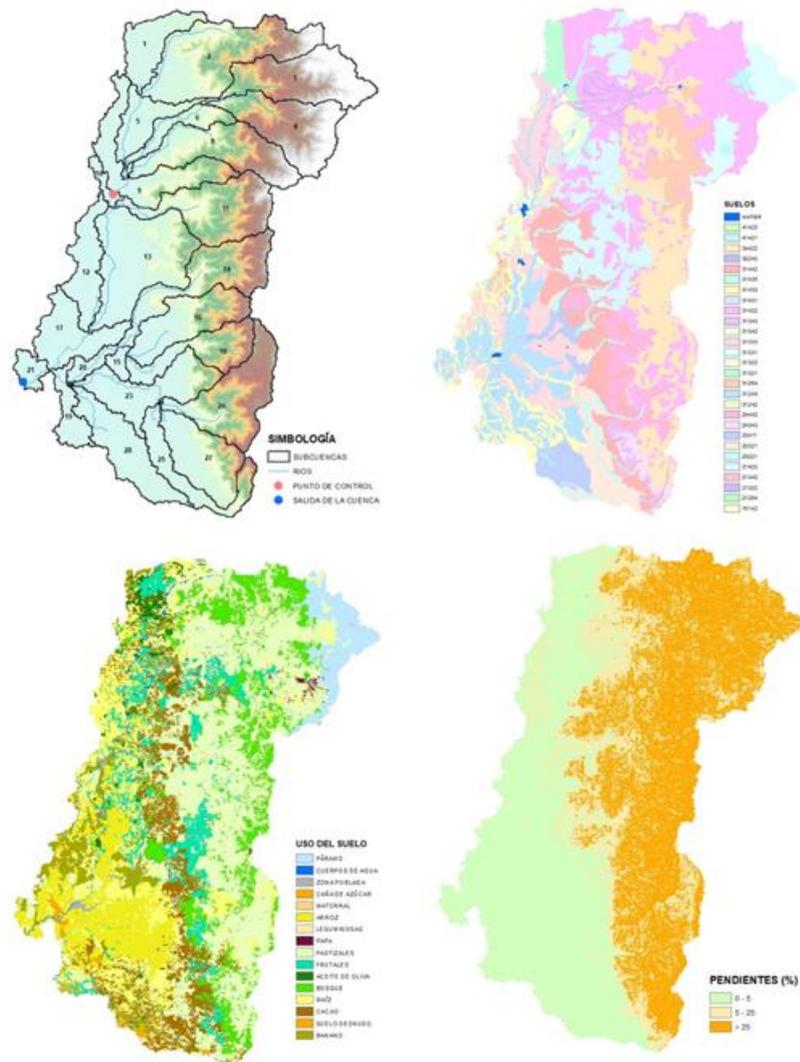
In the Geographic Information Systems (GIS) platform, through hydrological modeling with ArcSWAT, the results of the numerical calculation for the base period and RCP scenarios were obtained. With the internal GIS module of object-oriented programming, was developed a program for semiautomatic elaboration of component maps of the Water Balance (BH), which is the basis for the construction of the Aridity Index (IDA).

The IDA indicator is used to quantify and qualify the climatic zones, as well it is not an specific climate change index, the IDA allow comparison between HB results for base period and projected scenarios with RCP. The IDA is better adjusted in the hydrological field for analysis of altered elements due to climate change.

The research becomes the first step of methodological contribution in Ecuador to promote the incorporation of climate change criteria into the formulation and updating of the water resources plans, which will allow to authorities to have information in the short, media and long term in order to warranty the use and exploitation of water, through the mitigation of impacts, control of exposure and reduction of water resources vulnerability, which considering this susceptible to reduction in volume in the watershed due to effect of climate change.

Capítulo I.

INTRODUCCIÓN



I. INTRODUCCIÓN

El agua es la sustancia fundamental con la función básica de mantener la integridad del entorno natural y determinante en el desarrollo socio-económico, viéndose afectada a escala mundial por las actividades humanas, que desencadenan una serie de afectaciones para los sistemas humanos y naturales. La evaluación de los impactos sobre los diferentes sistemas, permite identificar el cambio de los patrones de riesgos y los beneficios potenciales debido al cambio climático, lo que permitiría tomar medidas para reducir los impactos y riesgos asociados, mediante acciones de adaptación y mitigación (IPCC, 2014).

Ante un cambio climático inequívoco e incremento de la temperatura, el balance hídrico en una cuenca hidrográfica se vería afectado debiendo contar con una base metodológica a nivel de país que permita cuantificar el recurso hídrico en el futuro para los diferentes escenarios propuestos por el IPCC, entidad intergubernamental para el cambio climático. Los nuevos valores deben ser los insumos de los gestores del recurso hídrico, tanto gubernamentales como privados, para la toma de decisiones sobre la gestión de la asignación del agua para las diferentes demandas de usos y aprovechamiento, de acuerdo con los principios de prelación que se describen en la Constitución de la República de Ecuador.

Por lo cual, interés del presente trabajo es el desarrollar una base metodológica que integre aspectos técnicos, científicos y jurídicos, mediante la aplicación de modelos hidrológicos en la cuenca del río Babahoyo (Ecuador), para la incorporación de criterios de adaptación al cambio climático en la formulación de planes de gestión integral de los recursos hídricos en el país.

En el Quinto Informe (IPCC, 2014), se definieron cuatro (4) escenarios de emisión de gases efecto invernadero, denominado como trayectoria de concentración representativa (RCP, por sus siglas en inglés). Éstas se caracterizan por su forzamiento radiativo (FR) total para el periodo de 2081-2100 que oscila entre 2,6 y 8,5W/m². El pronóstico del aumento de la temperatura media global en la superficie al final del siglo XXI (2081-2100) respecto de 1986-2005 para los diferentes escenarios será de 0,3 °C a 1,7 °C para el escenario RCP2.6; de 1,1 °C a 2,6 °C para RCP4.5; de 1,4 °C a 3,1 °C para RCP6.0; y de 2,6 °C a 4,8 °C para RCP8.5.

En la zona de estudio, para cada uno de los escenarios propuestos, el incremento de la temperatura media superficie para final del siglo XXI (2081-2100) respecto del periodo base 1986-2005, oscilaría entre 0,3 °C a 4,8 °C. Esta variación de temperatura afectaría el uso del suelo de forma espacial y temporal, alterando la dinámica de los recursos hídricos, mediante un desequilibrio territorial. Es aquí, donde la concepción técnica, científica y jurídica desempeña un rol preponderante en la reconfiguración del uso del suelo.

Con el avance tecnológico y la ayuda de nuevas técnicas de información, son utilizados con mayor frecuencia los modelos hidrológicos complejos, que se integran en los sistemas de información geográfica (SIG), coadyuvando sustancialmente en el

proceso para la toma de medidas espacio-temporal que aporten en la formulación de la planificación de la GIRH y modelamiento de los posibles cambios de las variables climáticas que pueden alterar el ciclo hidrológico. En el presente estudio se hace uso del modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) que fue desarrollado por el USDA-ARS (United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service). El modelo tiene como principal objetivo predecir el efecto de la toma de decisiones en el manejo de la producción de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas con razonable precisión, en cuencas que no cuentan con estaciones de aforo (Arnold, Williams, Srinivasan R. and King, 1999).

Más allá de la concepción y el desarrollo técnico-científico, es necesario el marco jurídico que permita la consecución de los resultados esperados en procesos de toma de decisiones, orientadas para la ordenación del territorio. En este marco, la Constitución Política de la República del Ecuador (2008), en materia de los recursos hídricos y cambio climático y en relación al presente estudio trata fundamentalmente de lo siguiente: i) Derecho humano al agua ii) planificación de los recursos hídricos iii) Protección del patrimonio natural.

La comparación entre el balance hídrico actual y el futuro, se cuantifica en incremento de la evapotranspiración potencial que afecta a la escorrentía, reserva de agua en el suelo, déficit hídrico, siendo necesario tomar en cuenta por los gestores del agua una oferta de agua superficial que disminuye en el espacio y tiempo versus una demanda creciente. La presión sobre la necesidad del agua se relaciona directamente a los cambios demográficos y climáticos. Donde las medidas prioritarias serían: i) Implantación de obras hidráulicas que garanticen el agua para consumo humano, riego y productivo. ii) Incorporar nuevos cultivos resistentes ante las condiciones cambiantes. iii) Captación de agua subterránea. iv) Conservación y protección de las fuentes de agua. v) Mejorar las condiciones hidráulicas de los cauces naturales. vi) Ordenación del uso del suelo. vii) Concientizar a la comunidad en el uso sostenible del agua.

Sin embargo, como una primera aproximación metodológica no implica que se cierren las puertas a otras investigaciones que permitan fortalecer los procesos de cuantificación de los componentes del ciclo hidrológico, más bien el fin es robustecer los avances en la investigación, en mejora de poder contar con herramientas comparativas para una valoración e interpretación más exhaustiva de los resultados, de tal forma que sea posible una mayor aplicabilidad en la formulación de planes de gestión integral de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas, convirtiéndose la presente investigación en una contribución metodológica que permita al país aportar en la consecución de los objetivos y metas nacionales en materia de recursos hídricos, vinculados a su vez a los lineamientos globales de los objetivos de desarrollo sostenible.

1. Planteamiento del problema

Según el objetivo 6 de la agenda 2030 sobre el desarrollo sostenible, la cantidad de agua dulce del planeta en términos volumétricos es suficiente para satisfacer la

necesidad de los usuarios, sin embargo; la problemática se presenta en la distribución espacial y temporal del recurso, donde se espera que para el año 2050 al menos el 25% de la población mundial, se encuentre en un situación de afectación crónica por cantidad y calidad, repercutiendo en la seguridad alimentaria, sobretodo perjudicaría a los países más pobres y la población más desprotegida (UN-ODS, 2015). El manejo integral del agua es imperativo y actualmente es aceptado a nivel internacional, el enfoque de gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), como la vía hacia el desarrollo y gestión eficiente, equitativa y sostenible de los recursos hídricos, en un mundo con limitaciones progresivas del líquido vital y una demanda competitiva (UN-WATER, 2008).

Los elementos del concepto de la GIRH, han sido utilizados desde la primera conferencia global en Mar del Plata (1997) y después de la Agenda 21 y la Cumbre Mundial sobre desarrollo sostenible en Rio de Janeiro (1992), es cuando la GIRH fue profundizada en los debates que incluían su implicación en la práctica. La definición de GIRH más aceptada hoy en día es la descrita por la Asociación Mundial para el Agua (GWP): “La GIRH es un proceso que promueve la gestión y el desarrollo coordinados del agua, el suelo y los otros recursos relacionados, con el fin de maximizar los resultados económicos y el bienestar social de forma equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales.” (Global Water Partnership, GWP, 2000).

Más allá de los aspectos técnicos, el marco jurídico es preponderante en la consecución de los objetivos de la GIRH. En la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Uso y Aprovechamiento del Agua de Ecuador (2014), se clarifica la GIRH, dentro el cual se indica, la unidad territorial para la gestión del agua es la cuenca hidrográfica. Igualmente, y dentro de los principios de la gestión de los recursos hídricos, se refiere a la cuenca hidrográfica como a la que “constituirá la unidad de planificación y gestión integrada de los recursos hídricos”. Con este antecedente, el estado ecuatoriano es el responsable de la ejecución de la planificación hídrica, que fundamenta sus acciones mediante el uso de la herramienta de gestión denominada plan nacional de recursos hídricos y los planes de gestión integral de los recursos hídricos por cuencas hidrográficas.

El plan nacional de la gestión integral e integrada de los recursos hídricos de las cuencas hidrográficas de Ecuador, debería contar con una base metodológica técnica, científica y jurídica, que permita identificar los impactos a corto, mediano y largo plazo por los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos, que podrían desencadenar en desastres, a fin de implementar de forma preventiva, medidas de mitigación y adaptación, en un escenario de clima cambiante, donde el mayor tema a enfrentar será la disminución de la oferta y el incremento de la demanda.

Para el desarrollo de la investigación, se debe considerar una cuenca hidrográfica tipo que permita representar a las cuencas hidrográficas de Ecuador y que pueda ser extrapolable la metodología desarrollada en la presente investigación al resto de cuencas hidrográficas, considerando los aspectos característicos de cada unidad de planificación hídrica.

El área de estudio de la tesis doctoral, es la cuenca hidrográfica del río Babahoyo que es parte de la Demarcación Hidrográfica (DH) del río Guayas (Figura 1) que tiene una superficie de 44.532 Km², y se encuentra en la zona centro-occidental de Ecuador. La DH Guayas, limita al norte con la DH Esmeraldas, al sur con las demarcaciones de Jubones y Santiago, al este con las de Pastaza y Santiago y al oeste con la DH Manabí y el océano Pacífico.

La población total actual, es de 654.400 habitantes, de la que el 39% de la población es urbana y el 61% rural. El principal tributario es el río Babahoyo, con una longitud de 236 km y el área de la cuenca es de 7.516 km².

La escorrentía anual es de 11,91 hm³; en los meses húmedos (enero a junio) que representa aproximadamente entre el 73,3% y el 87,9%; y, en el período o estación seca (julio a diciembre) representa entre el 26,7% y el 12,1%.

La evapotranspiración potencial es de 1.269 mm y la precipitación es de 2.200 mm; lo que supone 16,54 hm³ de agua precipitada.

La ubicación geográfica de la DH del Guayas se limita al Norte, con la coordenada 79°9'W; 0°14'N, ubicada en la parroquia Santo Domingo de los Colorados, en el cantón Santo Domingo, de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas; al Sur, con la coordenada 79°18'W; 2°51'S, ubicada en la parroquia Molleturo, en el cantón Cuenca, de la provincia de Azuay; al Este, con la coordenada 78°37'W; 2°18'S, ubicada en la parroquia Achupallas, en el cantón Alausí, de la provincia de Chimborazo; y al Oeste, con la coordenada 81°0'W; 2°11'S, ubicada en la parroquia Salinas, en el cantón Salinas, de la provincia de Santa Elena.

Entre el período 1970-2013 se presentaron 1.109 inundaciones en la DH del Guayas; donde la población afectada fue de 356.701 habitantes, afectando a las poblaciones de Catarama, Ventanas, Babahoyo, San Jacinto de Yaguachi y Samborondón.

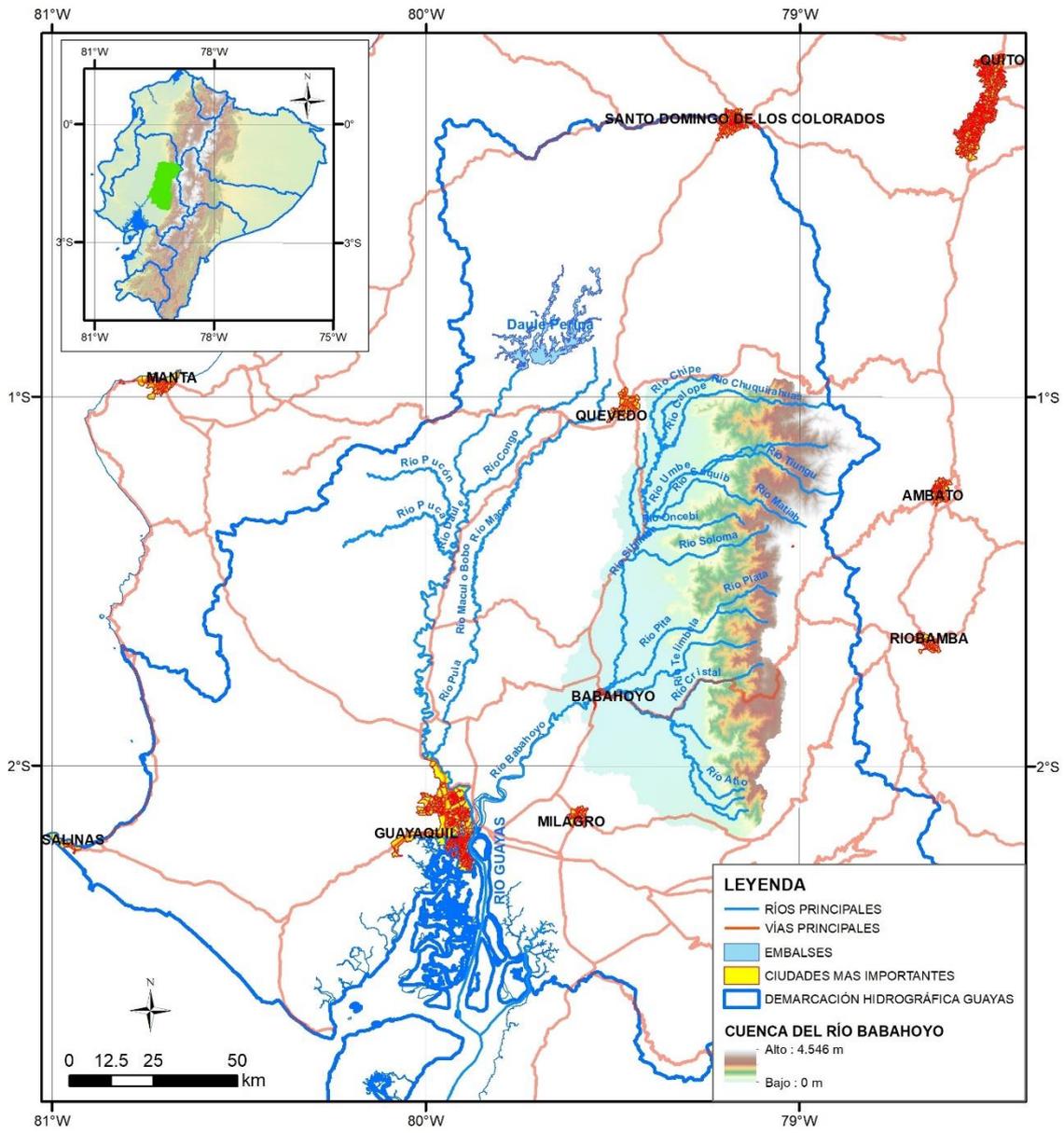


Figura 1. Ubicación del área de estudio, cuenca del río Babahoyo.
 Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

2. Justificación

La cuenca hidrográfica es la unidad territorial óptima para la gestión integrada de recursos hídricos (GIRH), con la finalidad de establecer los lineamientos para la gestión integrada de los recursos hidrológicos a nivel nacional, es necesario contar con un mapa de unidades hidrográficas dentro de un sistema estándar de delimitación y codificación.

La Secretaría General de la Comunidad Andina (SGCAN) y la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) Sur, dentro del marco de la estandarización de la información de las unidades hidrográficas para la Comunidad Andina de Sudamérica, elaboraron, conjuntamente con las autoridades nacionales rectoras en materia del recursos hídricos, un mapa a escala 1:250.000 para la delimitación y codificación de las unidades hidrográficas de la Comunidad Andina hasta el nivel 5 con la metodología Pfafstetter (UICN, 2008).

El método de codificación de unidades hidrográficas que se describe, fue creado en Brasil por Otto Pfafstetter en 1989 y difundido a partir de 1997 por Kristine Verdin a través del servicio geológico de los Estados Unidos (USGS) en el Programa Nacional del Medio Ambiente de las Naciones Unidas.

La metodología Pfafstetter identifica unidades hídricas o unidades de drenaje basadas en la teoría de topología que codifica en relación a la tendencia del drenaje y a sus vecinas. El tamaño de las unidades hídricas depende del nivel Pfafstetter, empieza con el nivel 1 que es la unidad más grande y se codifica con números de un dígito, para pasar al siguiente nivel (2) que se divide en unidades hídricas más pequeñas, respetando el límite del principio de cuenca hidrográfica y su codificación consta de dos números, empezando con el número de donde proviene, así sucesivamente hasta llegar al nivel deseado.

En Ecuador, la Secretaría Nacional del Agua - SENAGUA, mediante Resolución Ministerial N° 2011-245 del 24 de marzo del 2011, aprobó la metodología Pfafstetter para la delimitación y codificación de las unidades hidrográficas del Ecuador. La SENAGUA, en cumplimiento de la estandarización de las unidades hidrográficas en la Comunidad Andina, conjuntamente con la UICN Sur, mediante cooperación interinstitucional, elaboraron el mapa de delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Ecuador con la metodología de Pfafstetter a escala 1:250 000, hasta el nivel 5, llegando al nivel 3 de Pfafstetter, donde existen 18 unidades hidrográficas dentro del Ecuador (UICN, 2009).

La unidad hidrográfica de la cuenca del río Babahoyo es designada con código 149, significa que es de nivel tres. En otras palabras, pertenece a la unidad hidrográfica 14 que es la Demarcación Hidrográfica del Guayas, y esta a su vez a la unidad de código 1, que es el área donde se encuentra todos los drenes que desembocan en el océano Pacífico.

La selección de la cuenca hidrográfica del río Babahoyo, como materia de estudio en la presente tesis doctoral, obedece a tres principales condiciones:

- La primera, cumple con una representación física que abarca dos regiones costa y sierra de las cuatro que conforman Ecuador. La costa se caracteriza por llanuras fértiles, colinas y elevaciones de poca altura con clima cálido y la sierra con altas elevaciones montañosas, volcanes y nevados, con un clima característico frío;
- Segunda, es un área piloto representativa del clima de Ecuador por su característica heterogénea; y
- Tercera, cuenta con información suficiente de clima, tipos de suelos, cobertura vegetal y modelo digital de elevación, que se distribuye espacial y temporalmente, lo que permite la elaboración de cálculos de modelamientos hidrológicos y elaboración de mapas.

3. Hipótesis

Probar que los pronósticos del aumento de la temperatura para el periodo de 2081 – 2100, de los escenarios definidos por el IPCC sobre la base de la emisión de gases de efecto invernadero alteran la dinámica de los recursos hídricos en una cuenca hidrográfica. Siendo las nuevas técnicas de la información como los sistemas de información geográfica y los modelamientos hidrológicos las herramientas que contribuyan para la implementación de una metodología que faciliten la formulación de criterios para la adaptación de los planes de gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) ante el cambio climático en países con cierta limitación de información.

4. Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo de investigación es, desarrollar una base metodológica para cálculos comparativos del balance hídrico actual y futuro en una cuenca hidrográfica, mediante la aplicación de sistemas de información geográfica y modelos hidrológicos en la cuenca del río Babahoyo (Ecuador), para la incorporación de criterios de adaptación al cambio climático en la formulación de planes de gestión integral de los recursos hídricos en el país.

5. Objetivos específicos

- Ejecutar modelación hidrográfica para el cálculo de las variables del balance hídrico actual en el periodo 1986-2005.
- Calcular el balance hídrico actual para el periodo 1986-2005.

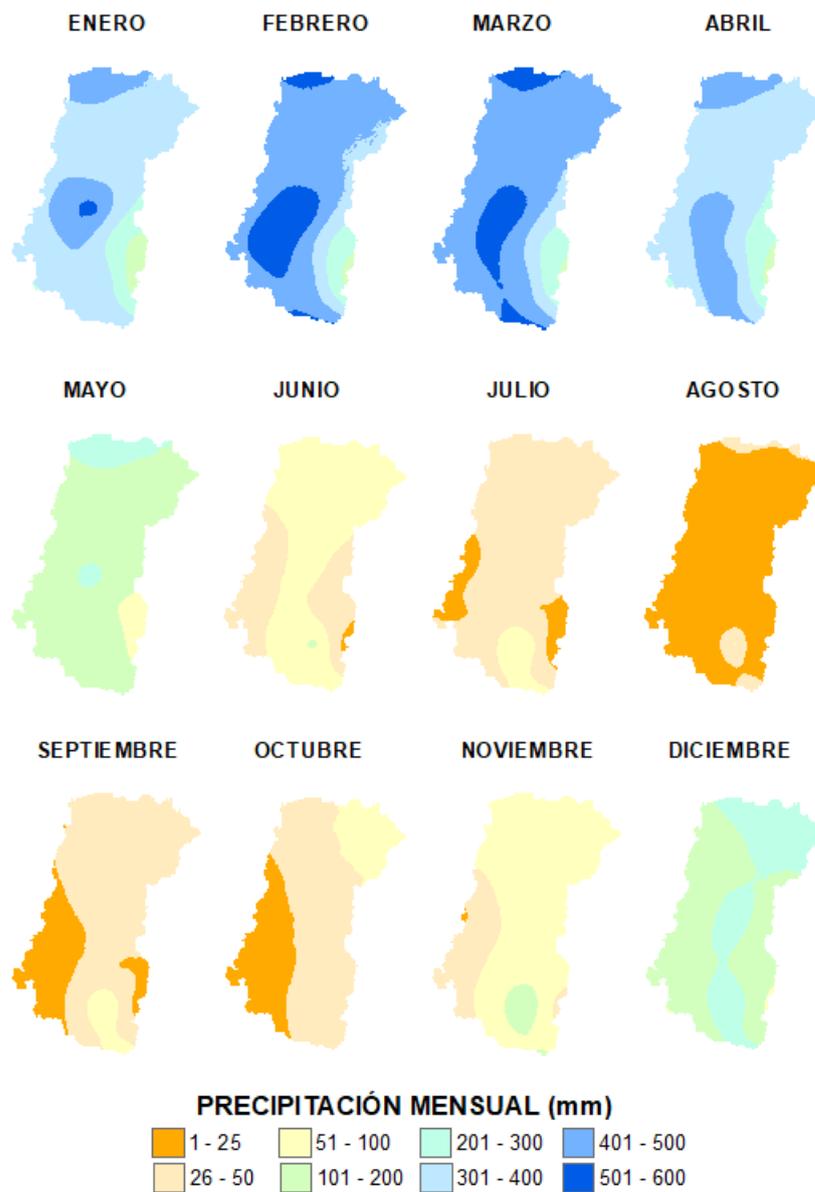
- Simular los balances hídricos para el periodo 2081-2100 con los valores de incremento de la temperatura de los escenarios de cambio climático (ruta de concentración representativa).
- Comparar los resultados del balance hídrico actual con el balance hídrico simulado mediante el cálculo del índice de aridez.
- Definir medidas generales de orden técnico y jurídico para la incorporación de criterios de adaptación al cambio climático en la planificación de la gestión integral de los recursos hídricos.

6. Resultados esperados

- Base de datos de las variables de balance hídrico actual (1986-2005) y futuro (2081-2100) resultados del modelamiento hidrológico.
- Mapas y tablas mensuales y anuales de las variables del balance hídrico del periodo 1986-2005, para precipitación, precipitación útil, evapotranspiración real y potencial, reserva, variación, déficit y exceso de agua en el suelo.
- Mapas y tablas mensuales y anuales de las simulaciones de balance hídrico para el periodo 2081-2100, con los valores de la temperatura de los escenarios: RCP2.6, RCP4.5, RCP6 y RCP8.5.
- Mapas y tablas de estimaciones del índice de aridez mensual y anual para los periodos 1986-2005 y 2081-2100.
- Listado de medidas generales de orden técnico y jurídico para la incorporación de criterios de adaptación al cambio climático en planificación de la gestión integral de los recursos hídricos.

Capítulo II

MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO



II. MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO

El crecimiento exponencial de la población en los dos últimos siglos y la búsqueda de la mejora en su calidad de vida, han impulsado un rápido crecimiento tecnológico y mercantilista que conlleva a una sobreexplotación de los recursos naturales del planeta y por ende el crecimiento de los agentes contaminantes, rompiendo su resiliencia y propiciando cambios climáticos a escala global. El cambio climático antropocéntrico se entiende como el *“cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”* (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático [CMNUCC], 1992, p.6).

A escala mundial las actividades humanas están interfiriendo en el sistema climático y el cambio climático desencadena riesgos a los sistemas humanos y naturales. La evaluación de los impactos ha permitido identificar la variabilidad de los patrones de riesgos sobre la exposición y vulnerabilidad, y los beneficios potenciales debido al cambio climático, lo que ha permitido concebir medidas decisivas para reducir y gestionar los impactos y los riesgos relacionados con el cambio climático por medio de la adaptación y la mitigación, a lo que se acota en el informe de síntesis, resumen para responsables de políticas de cambio climático 2014.

El calentamiento en el sistema climático es inequívoco, y desde la década de 1950 muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido y el nivel del mar se ha elevado. (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2013, p.4)

En la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático CMNUCC, (1992), se expusieron cinco motivos de preocupación que incrementan los riesgos por el cambio climático, las implicaciones que acarrea el calentamiento global y las medidas para la adaptación que mitigue la exposición y vulnerabilidad de los sistemas humanos y naturales para diferentes sectores y regiones mundiales. Los motivos de preocupación se describen como: 1) Sistemas únicos y amenazados, 2) Episodios meteorológicos extremos, 3) Distribución de los impactos, 4) Impactos totales a nivel global, y 5) Episodios singulares a gran escala.

La adaptación y la mitigación son estrategias complementarias para reducir y manejar los riesgos ante el cambio climático, bajo el concepto de desarrollo sostenible como base para la formulación de políticas públicas en el ámbito climático. Dentro del cual, se debe concientizar sobre los efectos del cambio climático, a los individuales involucrados y/o colectivos (personas y/o sociedad) de modo que se empoderen de los riesgos y las incertidumbres, en vista de que el cambio climático es un problema de acción colectiva a escala mundial. Sin embargo, de acuerdo a múltiples estudios actuales en las cuencas

hidrográficas no es posible prever de forma fiable cambios específicos a dicha escala, pero sí es seguro que los cambios climáticos afectarían gravemente en la gestión de los recursos hídricos, por lo que la actuación local en relación a la exposición y vulnerabilidad relacionados directamente con los usos y aprovechamientos del agua en las cuencas hidrográficas no es una tarea fácil de abordar. Sin embargo, de los cuatro escenarios del Quinto Informe (IPCC, 2014), el pronóstico del aumento de la temperatura media global en la superficie al final del siglo XXI (2081-2100) respecto de 1986-2005 será de 0,3 °C a 1,7 °C para el escenario RCP2.6; de 1,1 °C a 2,6 °C para RCP4.5; de 1,4 °C a 3,1 °C para RCP6.0; y de 2,6 °C a 4,8 °C para RCP8.5.

Ante lo cual, la cuenca hidrográfica, es la unidad idónea de planificación hídrica como unidad territorial que permite gestionar integralmente el agua para los diferentes usos y aprovechamientos demandados por la población para el presente y futuro. En la que los cálculos volumétricos actuales y futuros de los componentes del balance hídrico obedecen al principio de conservación de masas. La comparación de los resultados futuros con los actuales, permitirá visualizar espacialmente y numéricamente los cambios climáticos que ha sufrido la cuenca hidrográfica a través de indicadores de aridez, información para tomar medidas de adaptación que permitan paliar la exposición y vulnerabilidad de los sistemas humanos y naturales.

Desde la óptica gubernamental enmarcada en políticas públicas climáticas, las medidas de adaptación se mejoran con la complementación de las diferentes competencias de niveles públicos y privados como partícipes de la planificación de los recursos hídricos dentro de una unidad estratégica como es la cuenca hidrográfica; lo que permita la sostenibilidad a corto, mediano y largo plazo sobre los usos y aprovechamientos del agua en los diferentes sectores, ante los enfrentamientos de una oferta que disminuye por el incremento de la temperatura y una demanda creciente de los cambios demográficos y agrícolas.

1. Planificación de la gestión integrada de los recursos hídricos

El agua por ser el recurso vital para el ser humano y entorno natural, considerado como la base para la dinámica del desarrollo socio-económico, en un mundo de cambios constantes, debe ser tratada desde una perspectiva integral con proyecciones a diferentes escenarios en los sectores relacionados con el recurso hídrico. Desde los años setenta, se considera que los recursos naturales son limitados y que el desarrollo en el futuro deberá hacer frente a esta realidad. El concepto de sostenibilidad ha ganado aceptación, aunque el significado varíe según quien lo utilice (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2011).

La gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) nace por la necesidad de contar con una base metodológica que propicie el equilibrio del agua, que relacione el uso y aprovechamiento humano con las necesidades ecosistémicas, donde la unidad natural

de planificación, es la cuenca hidrográfica. El Banco Interamericano de Desarrollo (BID), indica que la GIRH se basa en la toma de decisiones sobre el desarrollo y gestión de los recursos hídricos para diversos fines, tomando en consideración las necesidades y deseos de los diferentes usuarios e interesados (BID, 1998).

La GIRH, no es un concepto nuevo, ha existido de una u otra forma desde mediados del siglo pasado, en las declaraciones y artículos de expertos hídricos, como Gilbert White. En 1977, durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Agua, celebrada en Mar del Plata, fue adoptada una resolución que promovía el concepto de gestión integrada de los recursos hídricos. Posteriormente, la GIRH figuraba como uno de los principios rectores de la Declaración de Dublín sobre el agua y el desarrollo sostenible de 1992 (CIAMA, 1992). Más recientemente, el programa de la Asociación Mundial para el Agua ha fundamentado su trabajo en torno a ese concepto (Tortajada, 2003).

La iniciativa de la GIRH, se ha implementado indistintamente en varios países y regiones a lo largo del mundo, aun cuando el concepto no haya sido explícito.

En la década de los ochenta es formulado el primer “Plan Nacional de Recursos Hidráulicos de la República del Ecuador”, con el apoyo de la Cooperación Española, a través de Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), con la finalidad de evaluar los conflictos de oferta y demanda de los recursos hídricos en los diferentes sectores: población, industria, riego e hidroeléctricas de Ecuador. El documento adquiere el carácter público en 1989.

Dentro de los mandatos constitucionales de Ecuador el Estado es el encargado de planificar el desarrollo nacional. Para lo cual, el Estado a través de la Autoridad Única del Agua, es el responsable de la planificación y gestión de los recursos hídricos (usos y aprovechamientos), que se destinará de acuerdo a un orden de prelación que empieza por el consumo humano, riego que garantice la soberanía alimentaria, caudal ecológico y actividades productivas. La gestión del agua corresponde exclusivamente a las autoridades públicas o comunitarias, que serán los responsables de la planificación, regulación y control, que garanticen el manejo del agua desde un enfoque ecosistémico, para lo cual trabajan con el gestor ambiental. (Constitución, 2008. Arts. 318 y 412)

Para las autorizaciones, la demanda del agua se clasifica en usos de agua y/o aprovechamiento productivo del agua. El uso de agua, es el caudal de agua que se destina para consumo humano o riego que garantice la soberanía alimentaria, incluye abrevaderos de animales y actividades de producción agrícola. El aprovechamiento productivo del agua, es el caudal destinado para cualquiera de los aprovechamientos económicos.

La GIRH es clarificada a partir de agosto de 2014, con la vigencia de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamientos del Agua de Ecuador, donde se especifica a la cuenca hidrográfica, como la unidad territorial de planificación para la gestión integrada de los recursos hídricos.

1.1. Ciclo hidrológico

El agua como base fundamental para el mantenimiento de la flora y fauna, así como para el desarrollo socioeconómico, se encuentra disponible en la hidrósfera, que es una de los cuatro subsistemas terrestres, ubicado entre quince kilómetros de atmósfera hasta un kilómetro bajo la litósfera.

En la hidrósfera circula el agua a través de procesos continuos que constituyen el ciclo hidrológico sin principio ni fin. En la Figura 2, se esquematiza como el agua se evapora desde los océanos y desde la superficie de la Tierra para ser parte de la atmósfera. El vapor de agua se transporta y se eleva a la atmósfera hasta que se condensa y precipita sobre la superficie de la Tierra y/o los océanos. El agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr sobre el suelo como flujo superficial y descargar en los ríos como escorrentía superficial.

La mayor parte del agua interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea, de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar parte de su caudal, y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que el ciclo hidrológico continúa (Chow, 1994).



Figura 2. Ciclo Hidrológico del Agua.

Fuente: <https://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>

El agua en la hidrósfera, se encuentra en los estados sólido, líquido y gaseoso; en diferentes lugares de almacenamiento, como los océanos, glaciares, banquisas, ríos y

lagos, suelos y subsuelos, atmósfera y biósfera. En la Tabla 1, se describe la disponibilidad de agua promedio anual en el mundo, que es de aproximadamente 1.386 millones de km³, de los cuales el 97,5% es agua salada y sólo el 2,5% es agua dulce, es decir 35 millones de km³. El agua dulce se distribuye: 68,7 % en glaciares, 30,1 % en aguas subterráneas, el 0,4 % es agua superficial y atmosférica y el 0,8 % en permafrost (Clarke y King, 2004).

Tabla 1.

Distribución del agua en el planeta.

Tipo de agua	Almacenamiento	Porcentaje agua total (%)	Volumen (millones km ³)	Porcentaje agua dulce (%)
Agua salada	Océanos y mares	97,50	1.351,35	
	Glaciares	1,72	23,84	68,80
	Subterráneas	0,75	10,40	30,00
Agua dulce	Superficiales y atmosféricas	0,01	0,14	0,40
	Permafrost	0,02	0,28	0,80
TOTAL:		100,00	1.386,00	100,00

Fuente: Clarke y King, 2004

A través del ciclo hidrológico anualmente circulan cantidades elevadas de agua en el sistema, sin embargo; en la superficie y en la atmósfera el contenido es bajo. El balance anual del agua en la Tierra se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2.

Balance anual de agua en la Tierra.

	Océanos (Área = 361.300.000 km ²)		Tierra (Área = 148.800.000 km ²)	
	(km ³ /año)	(mm/año)	(km ³ /año)	(mm/año)
Precipitación	458.000	1.270	119.000	800
Evaporación	505.000	1.400	72.000	484
Escorrentía a océanos				
Ríos			44.700	
Agua Subterránea			2.200	
Escorrentía total			46.900	316

Fuente: World Water Balance and Water Resources of the Earth (UNESCO, 1978).

Un sistema es un conjunto de partes conectadas entre sí, que forman un todo (Chow, 1994). Ante la complejidad de los fenómenos hidrológicos como parte del ciclo hidrológico, para la explicación de los procesos asociados al fenómeno, se simplifica denominándolo como un sistema. El ciclo hidrológico se trata como un sistema que se compone por precipitación, evapotranspiración, escorrentía, infiltración y otras fases o

procesos del ciclo hidrológico (Figura 3). Estos componentes se agrupan en subsistemas para su análisis total, los cuales se analizan por separado e interactúan bajo el principio de la conservación de masas del balance hídrico.

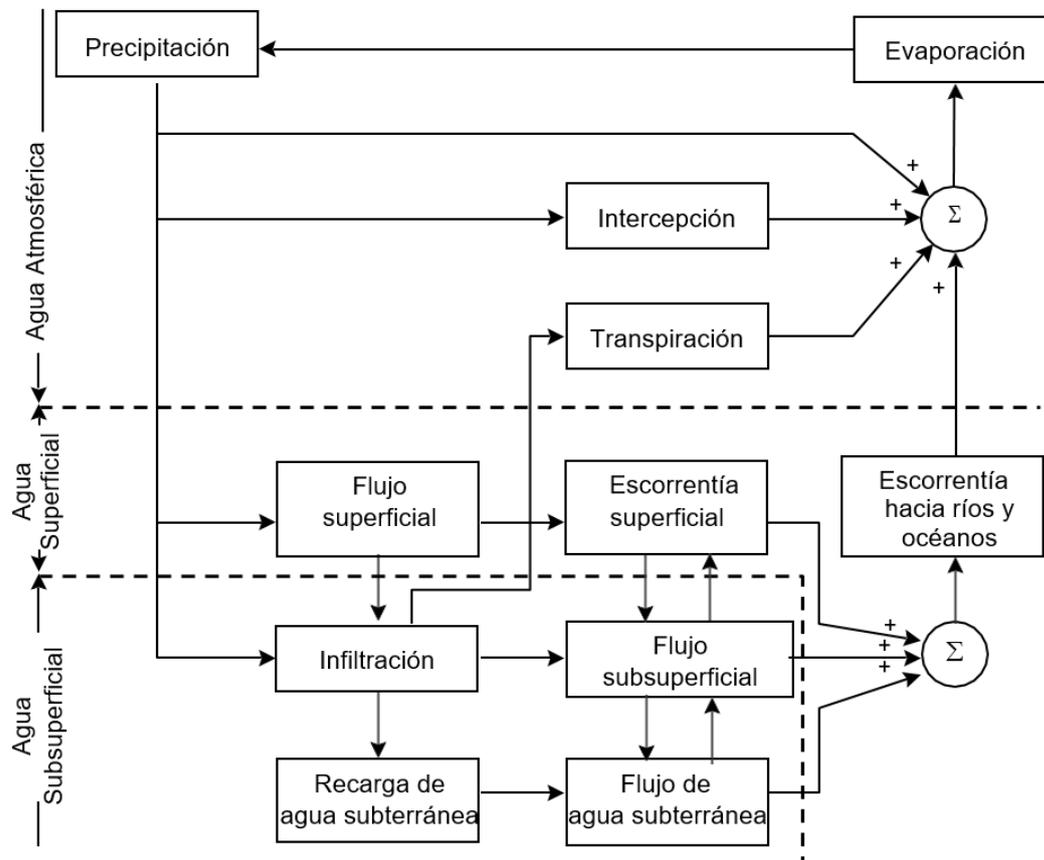


Figura 3. Representación en diagrama del bloque del sistema hidrológico global.

Fuente: Chow, 1994.

1.2. Balance hídrico (BH)

En hidrología el balance hídrico, se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de continuidad; como la forma de representación del ciclo hidrológico. Mediante la ecuación se establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas de agua, estará condicionada por la variación del volumen almacenado (UNESCO, 1981).

El balance hídrico en la cuenca del río Babahoyo, bajo el principio de la ecuación de continuidad, permite calcular los volúmenes de los componentes del recurso hídrico en los diferentes estados, mediante el modelamiento hidrológico. La cuenca hidrográfica del río Babahoyo tiene una superficie de 7.516 Km², que corresponde al 17% de la demarcación hidrográfica del Guayas, sus principales tributarios son los ríos: Catarama, Clementina y San Pablo.

De acuerdo con el reglamento técnico de la OMM (OMM-Nº 49), las normas climatológicas reglamentarias son medias de los datos climatológicos calculadas para períodos consecutivos de 30 años. También es aconsejable, el cálculo de las anomalías, con base en períodos normales climatológicos reglamentarios, con el fin de establecer una base uniforme para las comparaciones. Los promedios (también conocidos como normales provisionales) pueden calcularse en cualquier momento en el caso de estaciones que carecen de datos disponibles correspondientes a un período de 30 años. (OMM, 2011).

Generalmente, los datos sobre el ciclo hidrológico se concentran en el marco de las redes tradicionales de medición. Actualmente para recopilar algunos de estos datos, son utilizados con mayor frecuencia los sensores remotos: radar, fotogrametría aérea y satélites (OMM, 1979). La concentración de datos sobre el ciclo hidrológico exige una infraestructura de estaciones, equipo de transmisión de datos y medida, talleres de reparación y mantenimiento, laboratorios de control, aeronaves, estaciones receptoras de datos satelitales y el equipo necesario de observadores, técnicos e ingenieros, así como una súper estructura para planificar el sistema de concentración de datos, su funcionamiento y para la verificación y el proceso primario de los datos.

Los datos históricos son concentrados para obtener la serie espacio temporal sobre las fases del Ciclo hidrológico para determinarlos a largo plazo. (UNESCO y OMM, 1993).

2. Cuenca hidrográfica como unidad de planificación

En la actualidad, uno de los grandes desafíos a nivel mundial es la gestión integral de recursos hídricos (GIRH) en cuencas hidrográficas (INE, 2007). Sin embargo; cinco mil años AC, el concepto tiene sus orígenes en los antiguos pueblos sumerios y egipcios con la construcción de obras hidráulicas integrales para riego y control de inundaciones (Newson, 1992).

El concepto de cuenca, ha venido siendo vinculado desde hace mucho tiempo. En 1752, fue incluido por Philippe Buache como unidad básica y fundamental en estudios de geografía (Arellano, 2005). Posteriormente, en el siglo XVIII, fue retomado por el geógrafo alemán Gatter como base para organizar la información geográfica disponible. En 1890 Wilcocks, describe las experiencias en el manejo de la cuenca del Río Nilo para la regulación de su flujo entre las partes altas y bajas del cauce fluvial.

En la década de los treinta, se formulan a nivel mundial las políticas públicas del manejo de cuencas con énfasis en el crecimiento de la industria hidroeléctrica. Simultáneamente, se formulan varios proyectos para el desarrollo económico regional en el ámbito territorial de las cuencas hidrográficas. Ejemplo del proyecto realizado en el Valle de Tennessee, (TVA) en Estados Unidos en 1933 (Perevochtchikova, 2008).

A inicio de los sesenta, en varios países se pone en marcha el concepto de manejo de cuencas con la creación de agencias, consejo y comités del agua. En 1964, en Ecuador se empieza con los estudios del desarrollo de las cuencas con la creación de la Comisión

de Estudios para el Desarrollo de la Cuenca del río Guayas (CEDEGE), que continúa en los años venideros con la creación de las Corporaciones Regionales para el Desarrollo a lo largo del país. Publicándose en el año de 1983 el “Plan Regional Integral de la Cuenca del Río Guayas.”, y para el año 1989 es publicado el “Plan Nacional de los Recursos Hidráulicos de la República de Ecuador.”

A partir del año 2014 son oficialmente acuñados en Ecuador, los conceptos de cuenca hidrográfica y gestión integrada de los recursos hídricos, dentro de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (LORHUyA), describiéndose de la siguiente manera: *“La unidad territorial para la gestión del agua es la cuenca hidrográfica”* (Art. 8). Igualmente, y dentro de los principios de la gestión de los recursos hídricos, el artículo 35 se refiere a la cuenca hidrográfica que *“constituirá la unidad de planificación y gestión integrada de los recursos hídricos”*.

Consiguientemente, la LORHUyA contiene una definición de cuenca hidrográfica que es *“...la unidad territorial delimitada por la línea divisoria de sus aguas que drenan superficialmente hacia un cauce común, incluyen en este espacio poblaciones, infraestructura, áreas de conservación, protección y zonas productivas”* (art. 8). Siendo el estado ecuatoriano, el responsable de la ejecución de la planificación hídrica, sobre la base del plan nacional de recursos hídricos y planes de gestión integral de los recursos hídricos por cuencas hidrográficas (art. 28).

La cuenca hidrográfica, es la unidad de planificación idónea que permite prever las garantías del agua para los diferentes usos y aprovechamientos demandados en diferentes horizontes temporales. Los cálculos volumétricos del balance hídrico de la cuenca permiten identificar cada uno de los estados del ciclo hidrológico a través del principio de conservación de masas, para los periodos actuales y escenarios previstos de acuerdo a la trayectoria de concentración representativa. La comparación de los resultados de los balances hídricos actuales y escenarios proyectados para fin de siglo, permitirán visualizar espacial y numéricamente los cambios de volumen de humedad que podría experimentar la cuenca hidrográfica a través de indicadores de aridez, información necesaria para diseñar medidas de adaptación que permitan controlar los niveles de exposición y vulnerabilidad de los sistemas humanos y naturales.

Desde la óptica gubernamental de políticas públicas climáticas, las medidas de adaptación son mejoradas con la complementación de las diferentes competencias de niveles públicos y privados como partícipes de la planificación de los recursos hídricos dentro de una unidad estratégica como es la cuenca hidrográfica; de tal forma que permita la sostenibilidad a corto, mediano y largo plazo, sobre los usos y aprovechamientos del agua en los diferentes sectores, ante un escenario de enfrentamiento entre una oferta que disminuye por el incremento de la temperatura y una demanda creciente debida a los cambios demográficos y agrícolas.

3. Red nacional de estaciones hidrometeorológicas

La instancia rectora en Ecuador, fue creada mediante Decreto Ejecutivo N° 1446, en el gobierno del Presidente José María Velasco Ibarra (Registro Oficial N° 289, publicado el 15 de agosto de 1961) que otorgó la creación del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SNMH), hoy en día es el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), el cual, realiza trabajos de investigación y desarrollo de la meteorología e hidrología.

El SNMH inició sus funciones adscrito al Ministerio de Fomento, con sede en Quito y jurisdicción en toda la República, personería jurídica, autonomía técnica y administrativa, y representación nacional e internacional. Desde el 17 de junio de 2010, el INAMHI, forma parte de la Secretaria Nacional de Gestión de Riesgos (según Decreto Ejecutivo N° 391 expedido en esa fecha), actual Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias.

El INAMHI, como instancia rectora, coordina y normaliza la política hidrometeorológica nacional. Su normativa, la faculta para el establecimiento, operación y mantenimiento de la red de estaciones hidrometeorológicas, por lo cual es una institución que recopila información básica y suministra servicios y productos hidrometeorológicos necesarios para el desarrollo del país.

La información convencional sobre los recursos hídricos abarca estadísticas relativas a diversos elementos meteorológicos e hidrológicos (OMM/UNESCO, 1993). Entre ellos cabe señalar:

- a) Precipitación, por ejemplo, de lluvia, nieve y humedad condensada;
- b) Niveles y flujos fluviales, y niveles de lagos y embalses;
- c) Niveles de agua subterránea;
- d) Evapotranspiración;
- e) Concentración y carga de sedimentos fluviales; y
- f) Calidad (bacteriológica, química y física) de las aguas superficiales y subterráneas.

Para tales consideraciones, se cuenta con una red de estaciones meteorológicas e hidrológicas en todo el país, que almacenan datos que son analizados y sistematizados para generar información hidrometeorológica en el marco del ciclo hidrológico.

Las estaciones hidrometeorológicas, dependiendo de su prestación objetiva están equipadas con diferentes dispositivos analógicos y digitales que permiten el registro y almacenamiento de datos para las diferentes variables.

Hoy en día existen estaciones que permiten transmitir la información en línea a través de diferentes medios de comunicación, radio, telefónica y satelital; otras almacenan la información en memoria física que se puede descargar directamente en la estación y las que se registra información manualmente.

- Estaciones agrometeorológicas (AM). Registra observaciones meteorológicas y biológicas, incluyendo fenológicas y otras observaciones que ayudan a determinar las relaciones entre el tiempo y el clima. Incluye el mismo programa de observaciones de la estación CP, más registros de temperatura a varias alturas (hasta un metro) y en la capa cercana al suelo (5, 10 y 20 cm sobre el suelo)
- Estación climatológica principal (CP). Miden visibilidad, tiempo atmosférico presente, cantidad, tipo y altura de las nubes, estado del suelo, precipitación, temperatura del aire, temperaturas máxima y mínima a 2 metros, humedad, viento, radiación, brillo solar, evaporación, temperaturas extremas del tanque de evaporación y fenómenos especiales. Gran parte de estos parámetros se obtienen de instrumentos registradores. Por lo general se efectúan tres observaciones diarias.
- Estación climatológica ordinaria (CO). Miden precipitación, temperatura del aire, temperatura máxima y mínima a 2 metros y humedad. Poseen muy poco instrumental registrador. Algunas llevan instrumentos adicionales tales como tanque de evaporación, heliógrafo y anemómetro.
- Estación pluviométrica (PM). Están dotadas con instrumentos de lectura directa (pluviómetro), que miden la cantidad de lluvia caída con una frecuencia normal de una vez al día.
- Estación pluviográfica (PG). Miden la precipitación tanto con instrumentos de lectura directa como también de registro continuo. El pluviógrafo registra en forma mecánica y continua la precipitación, en una gráfica que permite conocer la cantidad, duración, intensidad y período en que ha ocurrido la lluvia. Actualmente se utilizan pluviógrafos de registro diario.

3.1. Información meteorológica

Las estaciones meteorológicas permiten registrar sistemáticamente las mediciones. Para la presente tesis doctoral, son analizadas las variables de precipitación, temperatura del aire, radiación solar, evapotranspiración y velocidad del viento.

Las primeras observaciones meteorológicas en Ecuador datan del año 1846, que fueron publicadas por la Academia Francesa de Ciencias. Dando inicio a la meteorología en Ecuador con la instalación del primer barógrafo el 01 de marzo de 1892. Con la llegada del transporte aéreo en Ecuador, en la década de los años treinta del siglo pasado, se instalan estaciones meteorológicas en varios aeropuertos con fines netamente aeronáuticos. Finalmente, con la creación del Sistema Nacional de Meteorología e Hidrología (SNMH) se consolida el inicio de la actividad meteorológica en Ecuador (INAMHI, 2013).

En la actualidad, el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) a largo del país cuenta con una red de 383 estaciones meteorológicas convencionales, distribuidas de acuerdo a como se indica en la Tabla 3.

Tabla 3.

Distribución de estaciones meteorológicas convencionales en Ecuador.

ESTACIÓN	COSTA	SIERRA	ORIENTE	INSULAR	TOTAL
Agrometeorológicas (AM)	5	6	2	0	13
Climatológica Principal (CP)	16	31	4	3	54
Climatológica Ordinaria (CO)	46	44	6	1	97
Pluviométrica (PM)	77	121	13	1	212
Pluviográfica (PG)	2	4	1	0	7
TOTAL	146	206	26	5	383
(%)	38,12	53,79	6,79	1,31	100,00

Fuente: INAMHI, 2013.

Precipitación

La precipitación es un parámetro necesario para la planificación de los recursos hídricos, que varía según las características del proyecto y del recurso hídrico correspondiente. La planificación puede exigir la combinación de los datos y de la información tal como la precipitación máxima con varias probabilidades o períodos de retorno y características de las tormentas, series cronológicas de la precipitación diaria, estadísticas de la precipitación, distribución en superficie de la precipitación para varios meses, estaciones, etc., series cronológicas del espesor del manto de nieve y su contenido en agua, nieve acumulada sobre el terreno (mayor probabilidad de acumulación máxima de nieve). (OMM/UNESCO, 1993).

La lluvia es un fenómeno hidrológico muy importante y variable, por lo que el número de estaciones que la miden es alto. La mayoría de los países utilizan sistemas de control de calidad y de compilación de datos de lluvia. En la guía de prácticas climatológicas (OMM-N° 100) se describe el sistema utilizado por la Oficina Meteorológica de Reino Unido, para el procesamiento de datos diarios de pluviosidad. Los errores en la recopilación y procesamiento de los datos de precipitación son casi universales, por lo tanto, este sistema podrá servir de modelo para diversos tipos de situaciones. La fiabilidad de un sistema basado en comparaciones entre estaciones está vinculada a la densidad de la red.

Es fundamental medir el valor exacto de las precipitaciones, por lo cual, es necesario realizar una esmerada selección del emplazamiento, forma y exposición del pluviómetro. Además, deben ser tomadas medidas para impedir las pérdidas por evaporación, efecto del viento y las salpicaduras. Para la aplicación de otros métodos más complejos, como los basados en radares y satélites meteorológicos, será necesario conocer a fondo las características de error. (OMM, 2011).

La precipitación atmosférica consiste en la caída de lluvia, llovizna, nieve, granizo, hielo granulado, etc., desde las nubes hasta la superficie de la Tierra. La precipitación se mide en mm de alto, que equivale a la altura obtenida por la caída de un litro de agua sobre la superficie de un metro cuadrado. El mínimo de agua que debe recogerse para que se considere un día con precipitación varía de un país a otro, en general, es de 0.1 mm.

La medida de precipitación en medidores individuales es susceptible a errores por varias causas y un error adicional es introducido cuando la precipitación regional se estima con valores puntuales. Típicamente las estimaciones totales o medias de precipitación de área por periodo de un año o más, producen ciertas inexactitudes relativas de 10% (Winter, 1991, como se citó en Neitsch *et al.*, 2005, p.67).

Medidas de precipitación puntual, generalmente capturan sólo una fracción de la precipitación verdadera. La incapacidad de un medidor para captar una lectura verdadera es causada principalmente por remolinos de viento creados por el medidor. Estos remolinos reducen la captación de las gotas de agua y copos de nieve más pequeños. (Larson y Peck 1974, como se citó en Neitsch *et al.*, 2005, p.67) encontraron deficiencias del 10% para lluvias y 30% para nieve, comúnmente en medidores ubicados por encima de la superficie del suelo y que no están diseñados para prevenir efectos de viento.

Por lo general, los medidores de precipitación convendrían que estuvieran distribuidos uniformemente como corresponda a las necesidades prácticas de datos y a la ubicación de los observadores voluntarios. En regiones montañosas, será necesario analizar la distribución vertical, utilizando para ello medidores de precipitación acumulada de depósito, con el fin de medir la precipitación en latitudes altas. Los medidores de precipitación pueden estar específicamente diseñados para medir el equivalente de agua de la nieve, o bien mediante la incorporación de un apantallamiento para reducir la menor captación por efecto del viento, o mediante la utilización de sensores de presión.

Los factores claves en consideración son las trayectorias del viento prevalente, las fuentes de ciertos compuestos de interés, la frecuencia de los fenómenos de precipitación (lluvia, nieve, granizo), y otros procesos meteorológicos que influyan en la deposición. Habrá que tomar también en consideración algunos criterios locales:

- a) No existir alguna fuente de contaminación, por ejemplo, el tráfico aéreo, terrestre o fluvial habitual a menos de 1 000 m del emplazamiento;
- b) No existir almacenamiento en superficie de productos agrícolas, combustibles u otros materiales extraños a menos de 1 000 m del emplazamiento;
- c) Instalación de dispositivos de muestreo en terrenos llanos y en calma, preferiblemente cubiertos de hierba, y rodeados de árboles a una distancia superior a 5 m del dispositivo, evitar fuentes de contaminación activadas por el viento, como campos cultivados o carreteras no pavimentadas. Convendría

- evitar, particularmente, las zonas de turbulencia vertical intensa, las zonas de turbulencia a sotavento de una cordillera, las cimas de las cordilleras y los tejados barridos por el viento, debido a las fuertes turbulencias;
- d) No existir objeto de altura superior a la del dispositivo de muestreo a menos de 5 m del emplazamiento;
 - e) No debería haber ningún objeto situado a menos de 2,5 veces la diferencia de altura entre el objeto y la altura del dispositivo. Deberá prestarse especial atención a los cables de tendido eléctrico aéreo;
 - f) La toma del colector debería estar situada a no menos de 1 m sobre la altura de la cubierta del terreno existente, con el fin de reducir al mínimo la incorporación de Tierra o de salpicaduras;
 - g) Los dispositivos de muestreo automático necesitan de energía eléctrica para mover los opérculos y sensores, y en algunos casos para la refrigeración, en verano, y para la descongelación, en invierno. Si se utiliza tendidos eléctricos, éstos no deberán ser aéreos. Si se utilizan generadores, la evacuación de gases deberá estar situada a suficiente distancia, y viento abajo respecto del colector; y
 - h) Para obtener resultados a escala continental, los emplazamientos deberían ser preferiblemente rurales y apartados, y carecer de fuentes de contaminación continua a lo largo de una distancia de 50 km en la dirección prevalente del viento, y de 30 km en las restantes direcciones. Podría suceder que no fuera posible satisfacer todos estos criterios en todos los casos. En la descripción de la estación debería hacerse referencia a esos criterios, indicando las características exactas de cada ubicación seleccionada como punto de muestreo. En el caso de los grandes lagos, la precipitación sobre el lago podría no ser tan intensa como en sus orillas, y la proporción de partículas de gran tamaño podría ser inferior. A fin de obtener muestras en la región central de un lago, el dispositivo de muestreo podrá estar instalado sobre una boya, roca, bajío o islote. El muestreo por evento es el método preferido para la toma de muestras de precipitación. Cada aguacero, tormenta o nevada constituye un evento. El análisis de las muestras de precipitación por evento permite determinar los contaminantes asociados a una tormenta dada, y determinar sus fuentes probables mediante el análisis de la trayectoria del viento. (OMM, 2011).

En Ecuador los valores diarios son calculados como la suma de las observaciones de las 13:00 y 19:00 horas del día en cuestión, más la observación de las 07:00 horas del día siguiente.

Para el cálculo del valor en 24 horas, se requiere fundamentalmente la observación de las 07:00 horas ya que, siendo un proceso acumulativo, se puede no registrar los datos de las 13:00 horas y/o de las 19:00 horas, valores que se acumulan en el registro de las 07:00 horas del día siguiente; pero, si no se realiza esta última observación, el

valor acumulado para la próxima observación corresponderá al valor total del día incluyendo una parte del valor del siguiente día, dejando de ser por tanto, un valor en 24 horas.

La máxima en 24 horas se obtiene únicamente si ha sido posible calcular el valor en 24 horas para todos los días del mes y corresponde a un dato puntual, considerado el máximo absoluto. Los resúmenes mensuales se obtienen con un mínimo de 20 días registrados. (Anuarios Meteorológicos, INAMHI).

Temperatura

Los datos de temperatura se registran de acuerdo a las normativas nacionales en el marco de las OMM. Las temperaturas extremas son valores máximo y mínimo de temperatura del aire observados durante un período de observación dado.

La temperatura del aire se medirá a 2 m de altura sobre la superficie del terreno, la observación de la temperatura del aire a intervalos de 1, 4 o 6 horas podría ser suficiente, lo más idóneo es contar con un registro continuo, especialmente para las mediciones de humedad. Los termógrafos eléctricos, que utilizan termómetros de termopar, son adecuados para registrar observaciones en los potenciómetros multicanal utilizados para las mediciones de radiación. Al medir la temperatura del agua, los termómetros deberán estar protegidos del sol, sin por ello restringir la ventilación natural. Se han diseñado apantallamientos de radiación especiales para termómetros de termopar. Las mediciones de la temperatura del aire deberían presentar un error no superior a $\pm 0,3$ °C. (OMM, 2011).

Los valores estadísticos mensuales de temperatura se obtienen con un mínimo de 20 días de registro de observaciones. En cuanto a temperaturas extremas, se obtienen las medias mensuales y los valores extremos absolutos de los registros diarios.

Para la temperatura media, se calcula un valor promedio diario de las tres observaciones del termómetro seco. La media mensual se obtiene de los registros medios diarios. (Anuarios Meteorológicos, INAMHI).

Radiación solar

La radiación solar es la duración en horas y minutos de brillo solar sobre la superficie terrestre.

La radiación solar absorbida varía con varios parámetros tales como la latitud, la estación del año, la hora del día, las condiciones atmosféricas, la cubierta forestal, la inclinación, la orientación de la superficie y la reflectividad de la nieve. Los efectos de la latitud, de las estaciones del año, de la hora del día y de las condiciones atmosféricas están incluidos en las observaciones de radiación solar, que generalmente será necesario interpolar, debido a la escasez de estaciones de ese tipo. Es posible también calcularlos en términos de cantidades totales diarias mediante fórmulas o diagramas que expresan la radiación solar en función del grado de nubosidad, del instante del año y de la latitud. (OMM, 2011).

La determinación de la interacción que se producen entre los componentes del sistema climático, establece los efectos de la radiación solar y las propiedades radiactivas de la superficie. La interacción de la atmósfera con los demás componentes desempeña un papel importante en la conformación del clima. La atmósfera absorbe energía directamente de la radiación solar incidente o indirectamente mediante procesos en los que interviene la superficie de la Tierra. Esta energía se redistribuye continuamente en dirección vertical y horizontal mediante procesos termodinámicos o movimientos a gran escala con el objetivo inalcanzable de lograr la estabilidad y el equilibrio del sistema. (OMM, 2011).

Para el procesamiento de la información se determina que el tiempo de duración del brillo solar está expresado en horas y décimos de hora, en relación con las horas teóricas de permanencia del sol sobre el horizonte (12 horas en el Ecuador). (Anuarios Meteorológicos, INAMHI).

Evapotranspiración

La Evapotranspiración es la consideración conjunta de dos procesos diferentes: la evaporación y la transpiración. La evaporación se da en superficies libres, el suelo, la nieve, el hielo y la vegetación, y transpiración vegetal abarca los usos fitonutrientes. Los usos fitonutrientes solo difieren de la evapotranspiración en que abarcan el agua utilizada para formar los tejidos vegetales (Singh, 1994, como se citó en OMM, 2011). Al calcular la evapotranspiración se incluyen tanto la transpiración como la evaporación del suelo. La evapotranspiración real se puede determinar analizando al mismo tiempo los registros de pluviosidad y de escorrentía de una cuenca fluvial. Hay una diferencia importante entre la evapotranspiración y la evaporación en superficies libres. La transpiración está asociada al crecimiento de la planta y, por lo tanto, solo habrá evapotranspiración cuando la planta está creciendo, lo que dar lugar a variaciones diurnas y estacionales. La transpiración añade estas variaciones al volumen anual normal de evaporación en superficies libres.

Los procesos de evapotranspiración abarcan los de evaporación en superficies naturales, tanto si el agua se encuentra en el suelo como en las plantas, o en ambos. Con respecto al área evaporante, el consumo de fitonutrientes denota la evaporación total en una superficie, más el agua utilizada por los tejidos vegetales, por lo que su significado es el mismo que el de la evapotranspiración. La determinación de la evaporación y de la transpiración como elementos independientes en una cuenca de drenaje no arroja resultados fiables. Además, en la mayoría de los estudios no será necesaria la evaluación por separado. La evapotranspiración es uno de los temas de investigación más abordados en hidrología e irrigación. Con el fin de estimar la evapotranspiración se han desarrollado numerosos procedimientos, que pueden clasificarse en:

- a) Métodos de balance hídrico, aquellos basados en la utilización de evapotranspirómetros, para el balance hídrico de parcelas de terreno o en el agotamiento de la humedad del suelo;

- b) Método del balance energético;
- c) Métodos de transferencia de masas, aquellos basados en la velocidad del viento, en el flujo turbulento o en la utilización de recintos;
- d) Combinación de métodos de balance energético y de transferencia de masas, como el método Penman;
- e) Métodos de predicción, como las ecuaciones empíricas o los índices aplicados a los datos de evaporación en tanque; y
- f) Métodos vinculados a cultivos específicos. Estos últimos están descritos en el National Handbook of Recommended Methods for Water Data Acquisition (USGS, 1977).

En el contexto de la evapotranspiración, Thornthwaite y Holzman (1941) introdujeron el término “evapotranspiración potencial” para definir la evapotranspiración que se produce cuando el suelo contiene un suministro adecuado de humedad en todo momento, es decir, cuando la humedad no es un factor limitador de la evapotranspiración. Los métodos de predicción permiten obtener estimaciones de la evapotranspiración potencial. Los demás métodos se utilizan, en su mayoría, para estimar la evapotranspiración real en condiciones de suficiencia permanente de agua. La evapotranspiración real (Ecuación 1) se obtiene de la evapotranspiración potencial mediante una función simple de humedad del suelo $f(\phi)$ (Saxton y otros, 1986):

$$\lambda E_{\text{real}} = f(\phi) * \lambda E \quad (1)$$

Donde λE_{real} es la evapotranspiración real, y la función de humedad del suelo es una variable sin dimensiones estimada mediante un modelo lineal simple. La función de humedad del suelo se define mediante la expresión siguiente (Ecuación 2):

$$f(\phi) = M/\text{Capacidad del terreno} \quad (2)$$

Donde M es la humedad volumétrica del suelo a una profundidad de 20 cm (en el área radicular). La capacidad del terreno puede definirse como el porcentaje de agua que subsiste en un suelo dos o tres días después de haber sido saturado, una vez que el drenaje espontáneo prácticamente ha cesado. Ha sido evidenciado (Brandes y Wilcox, 2000, como se citó en OMM, 2011) que los modelos lineales simples del proceso de evapotranspiración/humedad del suelo son apropiados para la elaboración de modelos hidrológicos.

Existen un numeroso grupo de aparatos para medir la evaporación. El utilizado por el INAMHI es el tanque de evaporación que mide la llamada evaporación potencial.

Para su procesamiento los valores diarios son calculados como la suma de las observaciones de las 13:00 y 19:00 horas del día en cuestión, más la observación de las 07:00 horas del día siguiente. Las consideraciones para el cálculo del valor en 24 horas, son las mismas descritas para la precipitación, en el apartado previo.

El valor de la evaporación corresponde a la diferencia entre la evaporación potencial que se obtiene del tanque de evaporación y el valor de la precipitación registrado en el pluviómetro. (Anuarios Meteorológicos, INAMHI).

Velocidad del viento

El viento es el movimiento del aire con respecto a la superficie de la Tierra en una dirección y velocidad determinadas. Las direcciones son consideradas de acuerdo con la procedencia del viento. Las velocidades son registradas en m/s.

Para cada una de las ocho direcciones (N, NE, E, SE, S, SW, W y NW) se obtienen los valores medios mensuales de la velocidad en m/s, basado en los registros medios diarios calculados con las tres observaciones diarias. De igual forma es determinada la frecuencia en porcentaje, con relación al total de observaciones registradas de viento.

Del total de registros de observación del viento durante un mes, se obtiene el porcentaje mensual de calmas ($v = 0$ m/s), la mayor velocidad de viento del mes y su dirección. Es necesario aclarar que este último valor no debe tomarse como valor de racha máxima.

La velocidad del viento se medirá en las proximidades del centro del lago o embalse, a una altura de 2 m por encima de la superficie del agua. Cualquier tipo de anemómetro estándar adecuado para transmitir indicaciones o registros a distancia será apropiado para determinar promedios diarios de la velocidad del viento. Para los registros a distancia, los instrumentos más adecuados son los anemómetros de ventilador con rotor de tres palas.

Las mediciones de viento efectuadas con este tipo de instrumentos suelen arrojar un grado de exactitud de $\pm 0,5$ m/s, que es considerado como aceptable para las mediciones de evaporación. Cuando se utilice un anemómetro totalizador, deberá preverse una lectura del contador a intervalos fijos (preferiblemente cada día). Cuando se utilice un anemómetro de contacto eléctrico, deberá instalarse un registrador. Para ello podría servir un indicador eléctrico, que registre los fenómenos sobre el margen de la gráfica de temperaturas. (OMM, 2011).

Otro valor que se presenta es la media mensual de la velocidad del viento en 24 horas. Esta se define como el valor medio del dato calculado diariamente, por diferencia de los registros del anemómetro totalizador de las 07:00 horas del día en consideración, con el de las 07:00 horas del día siguiente.

Para el cálculo de los valores medios mensuales, frecuencia, velocidad en 24 horas y máxima, se precisa un mínimo de 20 datos medios diarios. (Anuarios Meteorológicos, INAMHI).

3.2. Información hidrológica

En la red de estaciones de Ecuador, se realizan sistemáticamente mediciones de caudal, sedimentos, muestreo hidroquímico y/u observaciones del nivel de agua, lo que permite conocer el régimen en un río, canal o el nivel de un lago o embalse.

Se denomina caudal, al volumen de agua que pasa por una sección transversal de una corriente en la unidad de tiempo y se mide en metros cúbicos por segundo (m^3/s) o en litros por segundo (l/s).

Caudal

El caudal fluvial, expresado en unidades de volumen por unidad de tiempo, es la tasa a la que el agua discurre a través de una sección transversal. El caudal en un instante dado puede medirse utilizando varios métodos, y la selección entre éstos dependerá de las condiciones existentes en un emplazamiento dado. Por lo general, el valor del caudal se expresará en función de la altura, previamente se define la tabla de gastos correspondiente a una estación de aforo. La exactitud de la medición del caudal dependerá del período de tiempo necesario para efectuar la medición y de la variación de la altura del agua y del caudal durante la observación. Las variaciones de las condiciones aguas abajo durante la medición podrán influir en el resultado, por lo que convendría evitarlas.

Por lo general, se instalará un número suficiente de estaciones de caudal fluvial a lo largo del curso principal de las grandes corrientes, con la finalidad de interpolar el caudal entre estaciones. La ubicación específica de éstas responderá a consideraciones topográficas y climáticas. Siempre que sea posible, las estaciones de base estarán situadas en corrientes con regímenes naturales. Cuando ello sea imposible, podría ser necesario instalar estaciones adicionales en canales o embalses con objeto de obtener los datos necesarios para reconstruir los flujos naturales en las estaciones de base. A tal efecto, podría ser útil el flujo calculado corriente abajo en plantas hidroeléctricas o presas de control, aunque habría que adoptar medidas para calibrar las estructuras de control y las turbinas, y para comprobar periódicamente tales calibraciones durante todo el ciclo de vida de las plantas.

Las estaciones deberían estar situadas en los tramos inferiores de los principales ríos del país, inmediatamente por encima de sus desembocaduras (por lo general, a salvo de la influencia de las mareas), o en los puntos en que los ríos atraviesan una frontera. Las estaciones deberían estar también situadas en los puntos en que el río abandona una montaña, y río arriba de los puntos de extracción de agua de riego. Otras estaciones hidrométricas están situadas en puntos en que el caudal varía considerablemente, río abajo de los puntos de confluencia de los afluentes principales, en los puntos de desagüe de los lagos, y en puntos en que probablemente se construirán grandes estructuras.

Es frecuente instalar estaciones hidrométricas en las principales ciudades, con el fin de responder a diversas necesidades sociales. Para conseguir un muestreo adecuado, debería haber como mínimo el mismo número de estaciones de aforo de caudales en

las corrientes menores que en las mayores. Sin embargo, será necesario un procedimiento de muestreo para las corrientes menores, ya que es inviable establecer estaciones de medición en todas ellas. El caudal de los ríos pequeños está fuertemente determinado por factores locales. En regiones muy desarrolladas, en que incluso los cursos de agua más pequeños tienen importancia económica, las deficiencias de la red son notorias incluso en corrientes con superficies de drenaje tan reducidas como 10 km² (OMM, 2011).

De acuerdo con el INAMHI, la toma del dato de la información limnimétrica, es obtenida a través de mediciones periódicas registradas por el observador de la estación. En el caso de la red hidrométrica es registrado el dato por la mañana y la tarde, procurando en lo posible realizarla siempre a la misma hora. La información es registrada en los formularios diseñados para el efecto y tienen capacidad para contener la información diaria de un mes, que posteriormente es enviada a las oficinas centrales de la Institución para su catalogación, archivo y procesamiento respectivo.

En Ecuador la toma de datos de muestreo del caudal para una estación se realiza a través de campañas de aforos, cuya planificación y ejecución corresponde al personal técnico del Departamento de Hidrometría del INAMHI.

De forma adicional al registro de datos por el observador y operador de la estación, existen además los registros gráficos (limnigramas), los cuales determinan de manera continua la variación del nivel en el tiempo. Estos registros son de diversa índole, pudiendo ser diarios, semanales, mensuales o para un período específico, dependiendo del instrumento registrador y del mantenimiento de la estación. (Anuarios Hidrológicos INAMHI).

En cuanto al procesamiento de la información se realiza lo siguiente:

- a) Niveles. Los niveles medios diarios de agua se obtienen por el promedio ponderado de las lecturas limnigráficas registradas en 24 horas en aquellas estaciones que tienen limnógrafo, o por medio de las dos lecturas diarias para aquellas que tan solo disponen de limnómetro. Para las estaciones que cuentan con los dos tipos de registros, generalmente se utilizan las lecturas limnimétricas únicamente para períodos en los que no existen datos limnigráficos.
- b) Caudales. Para el cálculo de caudales a partir de las lecturas limnimétricas y/o limnigráficas, es necesario contar con la curva de gasto líquido (curva de descarga), la que es obtenida mediante un ajuste de mínimos cuadrados a partir de los caudales obtenidos de los aforos realizados en una estación. Los caudales medios diarios se obtienen como un promedio aritmético ponderado de los valores parciales de caudales generados en base de los niveles observados, a través de su respectiva curva de gasto líquido.
- c) Sedimentos. Las muestras que llegan del campo son procesadas en laboratorio especializado, en donde se obtiene la concentración del sedimento y mediante procedimientos específicos se efectúa el cálculo para definir caudales sólidos y las ecuaciones respectivas.

- d) Información de pozos y vertientes. Mediante cálculo y utilizando formatos preestablecidos, son registrados los niveles y otros parámetros de aguas subterráneas. La ubicación se registra en cartas topográficas a escala 1:50.000.
- e) Hidroquímica. Con fin de conocer la calidad del agua, definir su composición y los efectos que pueden causar los elementos que contiene, en el laboratorio de hidroquímica, son analizadas las muestras de agua superficial y subterránea. (Anuarios Hidrológicos INAMHI).

4. Recopilación y homogeneización de datos hidrometeorológicos

La consideración del componente de recopilación y homogeneización de los datos tienen la finalidad de mejorar la cuantificación de los recursos hídricos de la cuenca, permitiendo identificar los posibles impactos de riesgo, en el balance hídrico por incremento de la temperatura que es asociada directamente con el déficit de agua, alterando subsecuentemente los volúmenes de las fases del ciclo hidrológico, afectando la garantía de los usos y aprovechamientos del agua.

El informe de la Conferencia Internacional sobre el Agua y Desarrollo Sostenible (CIAMA), celebrada por Naciones Unidas en Dublín en enero de 1992, destaca una evaluación sobre la importancia de los recursos hídricos para el medio ambiente y la economía, acentuando el rol de los servicios hidrológicos sobre la base del desarrollo sostenible.

Bajo este principio, los datos hidrológicos son la base para la evaluación del recurso hídrico en una cuenca hidrográfica, lo que permite planificar los recursos hídricos para un año horizonte, conforme las necesidades de los usos y aprovechamientos de agua destinada para consumo humano, riego para la agricultura, ambiente y producción.

Dentro del área de estudio, la toma de datos de las estaciones hidrometeorológicas ha sido manual. Los mismos que se remitieron analógicamente a la institución para su registro e ingreso a la base de datos institucionales. La data registrada tiene una periodicidad diaria. En el presente estudio es focalizado un importante esfuerzo en la elaboración de un análisis de las series meteorológicas, en particular por las lagunas de datos de precipitación y por la fiabilidad de la data registrada manualmente.

En la complementación de data hidrometeorológica de las series meteorológicas se investigaron dos métodos, un método integrado en el modelamiento hidrológico y otro desarrollado en la presente investigación por el autor:

El primer método para la complementación de la información diaria, utilizado en la presente tesis doctoral, se desarrolla con base estocástica, como parte integral del modelamiento hidrológico. El segundo método, es una metodología híbrida, que parte de contar con una buena correlación entre dos estaciones meteorológicas cercanas, para luego complementar la data diaria, con base en el primer método, bajo la salvedad de la realización de varias iteraciones, seleccionando la data que mejor se correlaciona.

El método estocástico, es parte de la teoría de probabilidades. En los dos métodos aplicados, son utilizadas las cadenas de Markov, que han demostrado buenos resultados para la generación y complementación de series sintéticas de precipitación para largos periodos de tiempo (Telesca et al. (2017); Mehan et al. (2017); Baigorria y Jones (2010); Cowden et al. (2008); Schuol y Abbaspour (2007); Vicente Serrano (2016). El cálculo de los datos, consiste en la estructuración de ecuaciones con datos aleatorios y variables estadísticas de series continuas de la misma estación.

La recopilación de datos en Ecuador, es una tarea muy compleja debido a la ausencia de reglamentación explícita para la difusión de la información pública del Estado, sumado a la falta de cooperación de las instancias rectoras en materia de monitoreo técnico científico, para la provisión eficiente de los datos e información.

Los prestadores de servicios hidrometeorológicos, deben cumplir con ciertas funciones que deberán satisfacer los requerimientos de sus usuarios tanto en los productos como en los servicios. Estos se describen en el Reglamento Técnico (OMM-Nº 49), en el cual indica las funciones básicas de un prestador del servicio hidrológico en su Volumen III - Hidrología, D.1.1, 8.3. Algunas de las actividades descritas son: elaborar normas y programas que garanticen la calidad; diseñar y utilizar las redes de observación; recopilación, procesamiento y conservación de datos; evaluar las necesidades de los usuarios en materia de datos e información relacionados con el agua, y suministrar datos e información, por ejemplo, predicciones hidrológicas o evaluación de recursos hídricos.

En la actualidad los datos hidrológicos tienen algún tipo de limitación: dificultades de compatibilidad que requiere métodos adecuado de homogenización para sus respectivos procesos de la información; periodicidad histórica de datos y confiabilidad, en dos vertientes que son lagunas de datos en las series hidrológicas y posibles errores humanos en la toma manual de los datos.

5. Datos meteorológicos

Los datos diarios meteorológicos que se utilizan en el modelamiento hidrológico (SWAT) para una cuenca hidrográfica son: precipitación, temperatura máxima y mínima, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento (Winchell, 2013). Los mismos, que se utilizan en la presente tesis doctoral.

Cuando existen lagunas de información diaria de las series de las variables meteorológica antes descritas, se puede generar o complementar los datos faltantes usando variables estadísticas de los datos promedios mensuales. Para lo cual, se utiliza el "Generador de Clima" denominado WXGEN (Sharpey y Willians, 1990).

La precipitación, y temperatura máxima y mínima son las series de datos diarios que se ingresan al modelamiento (observados o estocásticos) y son analizados en presente capítulo. Las series de datos diarios de humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento son datos generados por el modelo WXGEN, para lo cual se calcularon las

variables estadísticas partiendo de datos mensuales de dichas variables e ingresadas al modelo para su generación.

Datos de precipitación

De la variable precipitación existen series de datos diarios para 30 estaciones ubicadas en el área de influencia de la zona de estudio. Fueron consideradas las que cuentan con menos lagunas de datos de información y cubre toda la distribución espacial de la cuenca hidrográfica del río Babahoyo, permitiendo consolidar integralidad para los cálculos de balance hídrico a través del modelamiento hidrológico. Fueron entonces seleccionadas doce estaciones bajo los principios antes descritos para la información recopilada, contando con serie de registro diario para un periodo de 35 años (1981-2015). En la (Tabla 4) se aprecia las estaciones con su periodo de datos y lagunas de información. Las estaciones seleccionadas con porcentajes elevados de lagunas de información obedecen a su ubicación estrategia espacial.

Tabla 4.

Registros de datos de precipitación para el periodo (1981-2015).

CÓDIGO	NOMBRE DE ESTACIONES	REGISTROS DIARIOS	LAGUNAS DE DATOS DIARIOS	PORCENTAJE DE LAGUNAS (%)
M0037	MILAGRO (INGENIO VALDEZ)	12.784	71	0,56
M0006	PICHILINGUE	12.784	21	0,16
M0129	CALUMA	12.784	4.234	33,12
M0172	PUEBLO VIEJO	12.784	1.732	13,55
M0124	SAN JUAN LA MANÁ	12.784	1.507	11,79
M0130	CHILLANES	12.784	735	5,75
M0051	BABAHOYO-UTB	12.784	1.104	8,64
M0123	EL CORAZÓN	12.784	299	2,34
M0465	VENTANAS INAMHI	12.784	515	4,03
M0132	BALZAPAMBA	12.784	7.497	58,64
M0039	BUCAY	12.784	5.742	44,92
M0383	ECHEANDÍA	12.784	1.375	10,76

Fuente: INAMHI.

Datos de temperatura

Para la selección de las estaciones meteorológicas que registran temperatura máxima y mínima (Tabla 5), es utilizado el mismo principio de selección de estaciones con registro diario de precipitación. Los datos diarios que se computan en el periodo de 35 años (1981-2015) son 12.784 registros. Las estaciones seleccionadas con porcentajes elevados de lagunas de información obedecen a su ubicación estratégica espacial.

Tabla 5.
Registros de datos de temperaturas para el periodo (1981-2015).

CÓDIGO	NOMBRE DE ESTACIONES	TEMPERATURA MÁXIMA		TEMPERATURA MÍNIMA	
		LAGUNAS DE DATOS DIARIOS	PORCENTAJE DE LAGUNAS (%)	LAGUNAS DE DATOS DIARIOS	PORCENTAJE DE LAGUNAS (%)
M0037	MILAGRO (INGENIO VALDEZ)	233	1.82	143	1,12
M0006	PICHILINGUE	170	1.33	49	0,38
M0129	CALUMA	5.420	42.40	5.140	40,21
M0172	PUEBLO VIEJO	3.486	27.27	2.748	21,50
M0124	SAN JUAN LA MANÁ	2.829	22.13	2.415	18,89
M0130	CHILLANES	1.953	15.28	1.752	13,70
M0051	BABAHOYO-UTB	1.277	9.99	1.175	9,19
M0123	EL CORAZÓN	745	5.83	842	6,59
M0132	BALZAPAMBA	9.545	74.66	9.559	74,77
M0039	BUCAY	7.794	60.97	7.628	59,67

Fuente: INAMHI.

6. Datos hidrológicos

En el área de influencia de la cuenca del río Babahoyo, se encuentran disponibles series hidrológicas con datos diarios de caudales en 24 estaciones hidrológicas. Dichas estaciones se clasifican en limnimétricas (18) y limnigráficas (6).

- Estación limnigráfica o fluviográfica. Estación para la determinación de caudales por medio de registro gráfico continuo de los niveles de agua.
- Estación limnimétrica o fluviométrica. Estación para la determinación de caudales por medio de lecturas periódicas sobre una regla graduada llevadas a cabo por un observador. La frecuencia de las lecturas es de dos veces por día.

Existen registros diarios de caudales desde el año 1981, sin embargo; en algunas estaciones ya no se registran datos. Más adelante se analizará la data de las estaciones en razón de discriminar la validez del uso de la información de las estaciones necesarias para el presente estudio. El nombre de las estaciones con sus características y ubicación es presentado en la Tabla 6.

Tabla 6.
Estaciones hidrológicas de Ecuador.

CÓDIGO	NOMBRE	TIPO DE ESTACIÓN	ELEVACIÓN	LONGITUD	LATITUD
H0330	CHANCHAN EN KM 90+180	Limnimétricas	326	79°08'08"W	02°13'18"S
H0331	CHIMBO EN SAN LORENZO	Limnimétricas	2405	79°00'15"W	01°40'01"S
H0332	CANAL CHIMBO EN SAN LORENZO	Limnimétricas	2419	79°00'15"W	01°40'02"S
H0333	SAN LORENZO EN SAN LORENZO	Limnimétricas	2438	78°59'44"W	01°41'12"S
H0334	DE CHIMA A.J. LAS PESQUERIAS	Limnimétricas	2100	79°04'10"W	01°51'25"S
H0337	PANGOR A.J. CHIMBO	Limnigráficas	1480	79°00'13"W	01°55'53"S
H0338	CHIMBO D.J. PANGOR	Limnimétricas	1452	79°00'26"W	01°55'56"S
H0340	CHIMBO EN BUCAY	Limnimétricas	297	79°08'09"W	02°11'58"S
H0343	ECHEANDÍA EN ECHEANDÍA	Limnigráficas	425	79°16'48"W	01°25'32"S
H0344	UMBE EN LA U VELLA UNION	Limnimétricas	0	79°16'30"W	01°12'15"S
H0345	ZAPOTAL EN CATARAMA	Limnimétricas	40	79°28'14"W	01°34'02"S
H0346	ZAPOTAL EN LECHUGAL	Limnimétricas	40	79°26'07"W	01°23'13"S
H0347	QUEVEDO EN QUEVEDO	Limnigráficas	68	79°27'25"W	01°00'34"S
H0348	VINCES EN VINCES	Limnimétricas	41	79°45'02"W	01°32'57"S
H0349	BABAHOYO EN BABAHOYO	Limnimétricas	9	79°32'39"W	01°48'07"S
H0371	SAN PABLO EN PALMAR	Limnigráficas	10	79°26'20"W	01°49'55"S
H0373	VERNAZA DD VINCES	Limnimétricas	16	79°48'06"W	01°38'39"S
H0390	CHIMBO AJ MILAGRO	Limnimétricas	13	79°41'36"W	02°06'09"S
H0392	JUNQUILLO DD VERNASA EMBARCADERO EN HDA.	Limnimétricas	25	79°47'08"W	01°40'51"S
H0394	CLEMENTINA	Limnimétricas	18	79°23'29"W	01°42'38"S
H0417	VINCES EN HDA. CASA VINCES	Limnimétricas	37	79°34'43"W	01°18'28"S
H0418	SUQUIBI EN LAS NAVES	Limnimétricas	0	79°19'10"W	01°17'09"S
H0763	MULACORRAL AJ CALAMACA	Limnimétricas	3430	78°49'41"W	01°14'49"S
H0764	CALAMACA AJ. MULACORRAL	Limnigráficas	3440	78°49'34"W	01°14'47"S

Fuente: INAMHI.

7. Modelo hidrológico

A lo largo de la historia, muchos científicos y estudiosos de las diferentes ramas de las ciencias geográficas, han enfrentado la necesidad de conocer los valores de caudales, volúmenes de agua y transporte de sedimentos, que drenan a lo largo de una cuenca hidrográfica, con la finalidad de profundizar en el entendimiento de la dinámica de las cuencas, teniendo como objetivos; la implementación de obras hidráulicas -control de inundaciones, abastecimiento de agua, etc.- para el bienestar de la sociedad .

El avance en las técnicas de información y nuevas tecnologías, han sido de gran utilidad, permitiendo la introducción de diversos campos en las diferentes disciplinas para la modelación de escenarios más ajustados a situaciones reales en el mundo a bajos costo, superando la barrera de la escasez de información.

La modelación permite simular un sistema por un cuasi-sistema con la finalidad de extraer la información de él. El modelo imita determinados procesos del sistema, considerando los más relevantes para el objeto del estudio en cuestión, llegando a ser considerada como una analogía práctica al sistema real. Básicamente, una modelación permite simular y predecir el comportamiento del sistema complejo con la ayuda de un modelo manejable. Los detalles del sistema real pueden ser ignorados, ya sea por la poca importancia o complejidad y, por consiguiente, intratables (Dooge, 1973).

Los modelos hidrológicos pueden dividirse en: modelos físicos y modelos abstractos. Los modelos físicos, representan el sistema a una escala reducida, y los modelos abstractos, representan el sistema en forma matemática, las cuales describen su comportamiento a través de ecuaciones que se integran entre entradas y salidas (Chow, 1994). Debido a la complejidad de los modelos hidrológicos, deben ser consideradas tres decisiones en un modelo: ¿serán o no aleatorias las variables del modelo?; ¿variarán en el espacio o serán uniformes?; ¿variarán en el tiempo o serán constantes?

La clasificación de los modelos hidrológicos es presentada en la Figura 4.

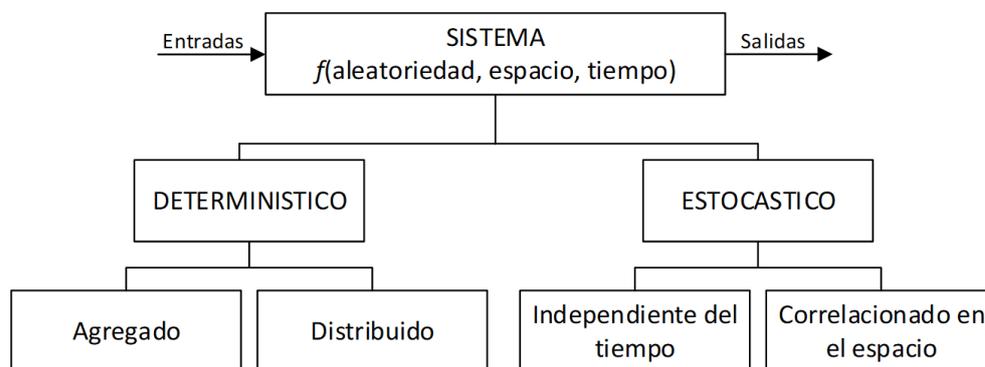


Figura 4. Clasificación de modelos hidrológicos. Clasificación de acuerdo a la forma, aleatoriedad y variabilidad espacial y temporal de los fenómenos hidrológicos.

Fuente: Chow, 1994.

Un modelo determinístico se diferencia del modelo estocástico, en que el primero no considera aleatoriedad a gran escala. Es posible inferir, que los modelos determinísticos hacen pronóstico, a diferencia de los modelos estocásticos que hacen predicción. En consecuencia, los modelos determinísticos son apropiados para realizar un balance hidrológico, por contar con información histórica. Sin embargo; si las variables aleatorias son grandes, el modelo estocástico es el más adecuado.

En el desarrollo de la presente tesis doctoral, es elegido un modelo determinístico por no requerir de datos aleatorios, más allá de poder complementar lagunas de información, y que permita interactuar con la ayuda de los sistemas de información geográfica (SIG), sus diferentes módulos hidrológicos, la base científica y los lenguajes de programación, que facilita el modelado espacio-temporal de los recursos hidrológicos.

El modelo determinístico que se ajusta en dar respuesta a la presente investigación es el Soil Water Assessment Tools (SWAT), desarrollado por el Agricultural Research Service (USDA-ARS), para predecir el impacto en el manejo del suelo, la vegetación, producción de agua, sedimentos y químicos agrícolas, en grandes y complejas cuencas, con variación en tipos y uso de suelos, así como en las condiciones de manejo en largos periodos.

El modelo tiene como principal objetivo predecir el efecto en el manejo de la producción de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas con razonable precisión, en cuencas que no cuentan con estaciones de aforo (Arnold *et al.*, 1999).

En el portal web, https://www.card.iastate.edu/swat_articles/ se encuentra una base de datos que registra desde 2016 al 2019 cerca de 1.500 artículos de revistas que se relacionan con la aplicabilidad del modelo SWAT, alrededor de todo el mundo. Los mismos que son revisados en conjunto por el Center for Agricultural and Rural Development (CARD) y el departamento de ciencia y tecnología de la Universidad Estatal de IOWA.

7.1. Configuración del modelo hidrológico

Para el modelamiento hidrológico, fueron seleccionadas las diez estaciones climatológicas anteriormente descritas en las Tabla 4 y 5, las mismas que cuentan con información viable de las siguientes variables: temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, radiación solar, punto de rocío y velocidad del viento. El periodo de modelamiento es de 20 años (1986-2005). Para los vacíos temporales de información, el modelo complementa la data faltante con el generador climatológico (XWGEN), y de esta forma es posible realizar un análisis estadístico mensual de las variables climáticas que ingresa a la base de datos del SWAT, para los respectivos cálculos.

Para la calibración del modelo fue utilizada la variable de caudal de la estación hidrológica de Zapotal en Lechugal (Tabla 6), para el periodo de registro 1986 - 2005. De igual forma, las estaciones climatológicas, poseen vacíos de información temporal.

La información de entrada en cada una de las subcuencas, se organiza conforme las siguientes categorías: clima, unidades de respuestas hidrológicas (HRU), pantanos, aguas subterráneas y ríos principales que drenan en la cuenca. Las HRU son áreas homogéneas dentro de la subcuenca, con la particularidad de contar con una misma combinación de unidades, cobertura de suelo, tipo de suelo y pendiente.

La herramienta de modelamiento (SWAT), utiliza el balance hídrico como respuesta a la simulación de las diferentes variables que se puedan analizar dentro de la cuenca de estudio. Para la presente investigación se particulariza en la predicción de sedimentos y simulación del ciclo hidrológico dentro de la cuenca.

La simulación hidrológica en una cuenca, está separada en dos grandes divisiones: la primera división, es la fase de la Tierra del ciclo hidrológico; mientras que, la segunda división, son las rutas del movimiento del agua a través de la red de ríos de la cuenca.

7.2. Calibración y validación del modelo

El registro histórico de las estaciones hidrometeorológicas dentro de las cuencas hidrográficas para la calibración y validación del modelamiento hidrológico es del periodo de 1986-2015. El proceso de calibración es para el periodo de 1986-2005 y para la validación de 2006-2015. Los datos simulados con el SWAT son comparados con los datos observados de la estación Zapotal en Lechugal.

El SWAT, para el proceso de simulación requiere una cantidad elevada de parámetros, algunos de estos tienen una mayor influencia en relación con el caudal, para la determinación e influencia de dichos parámetros se realiza el análisis de sensibilidad. El cual consiste en el uso de un rango de valores entre un mínimo y un máximo para cada uno de los parámetros, en un lazo de iteraciones y comprobaciones entre valores observados y simulados se registran los valores que tienen mayor influencia en el modelamiento.

7.3. Cálculo del balance hídrico directo (BHD)

El conocimiento del balance hídrico es necesario para la cuantificación de los volúmenes de agua en las diferentes fases como déficit de agua, reserva de agua y es de aplicabilidad para la clasificación climática y definición de la hidrología de la cuenca, así como para la planificación hidráulica. En el método de balance hídrico directo (BHD), el agua del suelo disminuye mes a mes hasta agotar la reserva para poder cubrir las necesidades de agua (evapotranspiración), y cuando el suelo está seco no es posible extraer agua y, por lo tanto, no es posible llegar a la evapotranspiración potencial (Almorox, 2003).

Los pronósticos de balance hídrico en cuencas hidrográficas a diferentes años horizontes, han sido investigados con diferentes metodologías. Los métodos más frecuentes son el empleo de la escorrentía directa simulada por los modelos climáticos (Christensen et al. 2007; Hurk et al. 2005) y el uso de modelos hidrológicos con información de precipitación y temperatura procedente de modelos climáticos (Christensen et al. 2007; Döll et al. 2003; Döll et al. 1999; Leavesley et al. 2002; Nash and Gleick 1993; Wurbs and Muttiah 2005; Xu et al. 2009). Otros estudios emplean fórmulas climatológicas con base en las variables precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial, que determinan los valores de escorrentía (Sankarasubramanian and Vogel 2002).

Para el análisis del balance hídrico de la cuenca, es utilizado el método empírico de balance hídrico directo (BHD), que comprende un periodo de estudio de 20 años entre 1986-2005. El BHD, utiliza de partida los cálculos mensuales de precipitación y la estimación de la evapotranspiración potencial para el año hidrológico de una estación meteorológica, que desencadena una secuencia de cálculos de los parámetros del

balance hídrico que permiten la retroalimentación para cálculos de los parámetros del siguiente mes.

En la presente tesis doctoral la adaptación del BHD es desarrollada mediante la elaboración de mapas mensuales de precipitación (valores medios mensuales de las estaciones seleccionadas) y mapas de evapotranspiración potencial resultado del modelamiento hidrológico. Con los mapas mensuales preestablecidos para ambas variables, se estima mediante un proceso semiautomático de álgebra de mapas (Figura 5) la estimación mes a mes de los parámetros: precipitación útil (P-ETP), Reserva de agua en el suelo (R), Variación de la Reserva (VR), Evapotranspiración Real (ETR), Periodo seco, Déficit de agua (F) y Exceso de agua (Ex). En otras palabras, los cálculos están en función de los mapas de precipitación y evapotranspiración potencia de cada mes y el resultado del cálculo del mapa de reserva como insumo para el siguiente mes, así sucesivamente hasta el mes de diciembre.

En el desarrollo del balance hídrico, se implementa el uso de modelos hidrológicos como insumo de comparación de los balances hídricos actual (1986-2005) y proyectados (2081-2100). El insumo para el modelamiento futuro parte de la información procedente de los modelos climáticos para los diferentes escenarios, donde la temperatura incrementa para fin de siglo (2081-2100) y la precipitación es considerada como constante. Los valores de temperatura media para la zona de estudio en el periodo 2081-2100 es de 1,0°C, 1,85°C, 2,25°C y 3,70°C para los escenarios RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 respectivamente, y el comportamiento de la precipitación igual para la precipitación de 1981 al 2015, en función de que, los métodos de reconstrucción de las series de precipitación global terrestre presentaron pocos cambios desde 1900.

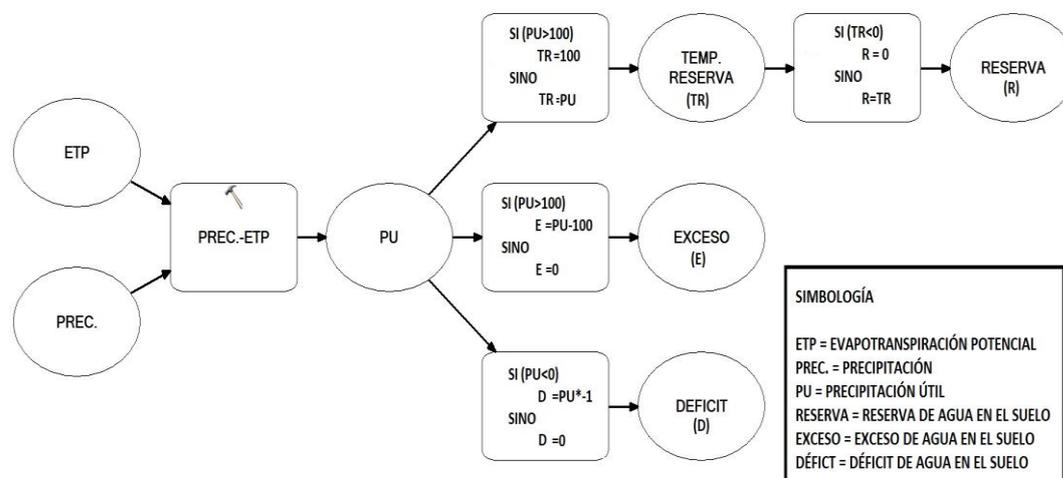


Figura 5. Álgebra de mapas cálculo del balance hídrico directo.

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

8. Recursos hídricos y adaptación al cambio climático

La creciente demanda hídrica para usos y aprovechamiento humano, riego y producción, debido al incremento de la población, nuevas zonas agrícolas e industriales, se vería afectada por el cambio climático, que disminuye el volumen hídrico anual disponible, por influencia del incremento de la temperatura en las cuencas hidrográficas, en particular en la época de estiaje, que pasaría de ser cada vez más escasa a ilimitada en los meses de menor precipitación. Se complementa sobre la base de estudios en varias regiones y con diferentes cultivos, los impactos negativos en su rendimiento por el cambio climático son más comunes que los impactos positivos en los cultivos del trigo y el maíz (IPCC, 2014).

La regulación, conservación y protección de los recursos hídricos mediante una adecuada gestión integral en las cuencas hidrográficas del uso y aprovechamiento del agua ante el aumento gradual por la demanda y una disminución por el cambio climático, al amparo de una planificación y políticas públicas que garantice nuevas formas de regulación y uso óptimo de la expansión de la oferta, con soluciones de índole estructural y no estructural, permitiría alcanzar las tasas de garantía mínima de agua para los diferentes sectores demandantes.

Con la finalidad de resolver la problemática y para garantizar la expansión óptima de los sistemas de los recursos hídricos a través de infraestructuras hidráulicas nuevas, repotenciaciones y tecnificaciones óptimas o progresivas, debe mediar el costo beneficio desde el punto de vista social y económico. Para el efecto han sido desarrolladas una gran cantidad de teorías, metodologías, algoritmos y modelamientos. Algunos investigadores en la materia son: Basagaoglu and Yazicigil 1995; Hsu et al. 2008; Martin 1987; Sánchez Camacho y Andreu Álvarez 2001.

Partiendo del comportamiento del cambio en la distribución de temperatura entre el clima presente y futuro de un simple desplazamiento total hacia un clima más cálido; los valores de precipitación para fin de siglo (2081-2100) se mantendrían iguales a los del periodo actual (1986-2005), en función de que es muy probable que las precipitaciones en los trópicos incrementaran en los periodos húmedos, intensificando la variabilidad climática.

El carácter y gravedad de los impactos de las condiciones climatológicas extremas, no solo depende de los extremos, sino también de la exposición y vulnerabilidad. Los impactos adversos son considerados desastres cuando los daños son generalizados y causan graves alteraciones en el funcionamiento normal de las comunidades y sociedades. El clima extremo, la exposición y la vulnerabilidad están influenciados por una amplia gama, incluido el cambio climático antropogénico, la variabilidad natural del clima y el desarrollo socioeconómico (Figura 6).

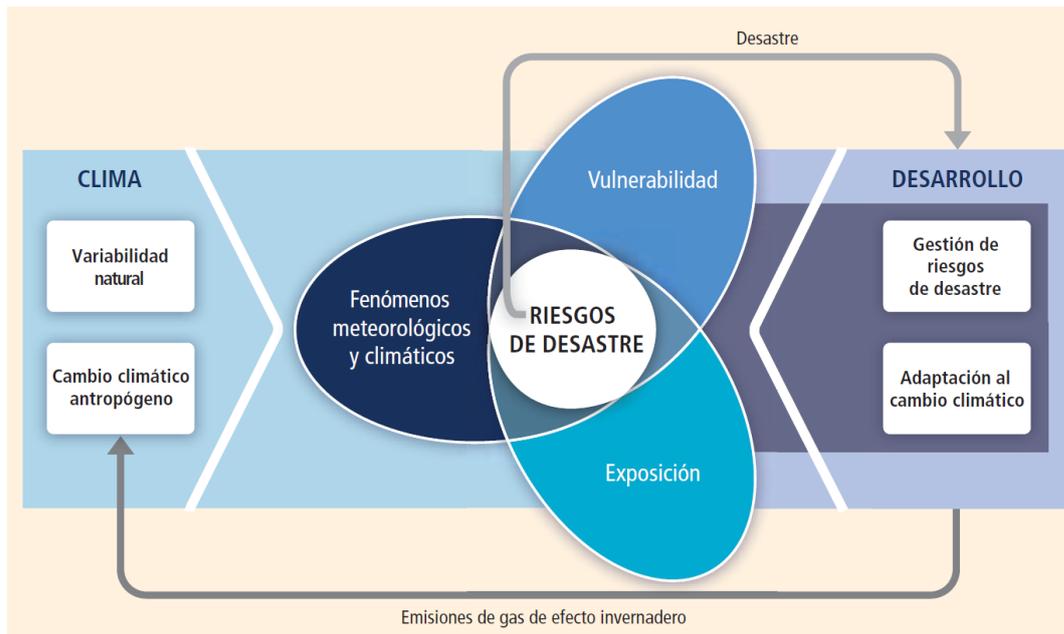


Figura 6. Conceptos centrales sobre la gestión de los riesgos de fenómenos climatológicos extremos y desastres. Esquema conceptual para mejorar la adaptación al cambio climático.

Fuente: IPCC, 2012.

La gestión del riesgo de desastres y la adaptación al cambio climático se centra en la reducción de la exposición y la vulnerabilidad y el aumento de la resiliencia ante los posibles efectos adversos de las condiciones climatológicas extremas. Aunque los riesgos no se puedan eliminar por completo, es posible complementar las acciones de la adaptación y la mitigación, para una reducción significativa del riesgo ante el cambio climático (Figura 7).

Un clima cambiante conlleva a cambios en la frecuencia, intensidad, extensión espacial, duración y clima extremos, y no necesariamente desencadena en condiciones climatológicas extremas. Los cambios extremos del clima se pueden vincular a los cambios en la media, varianza u otra forma de distribución probabilística. Las sequías, por ejemplo, no necesariamente es una condición extrema del clima, más bien puede obedecer a un evento de cambio del clima.

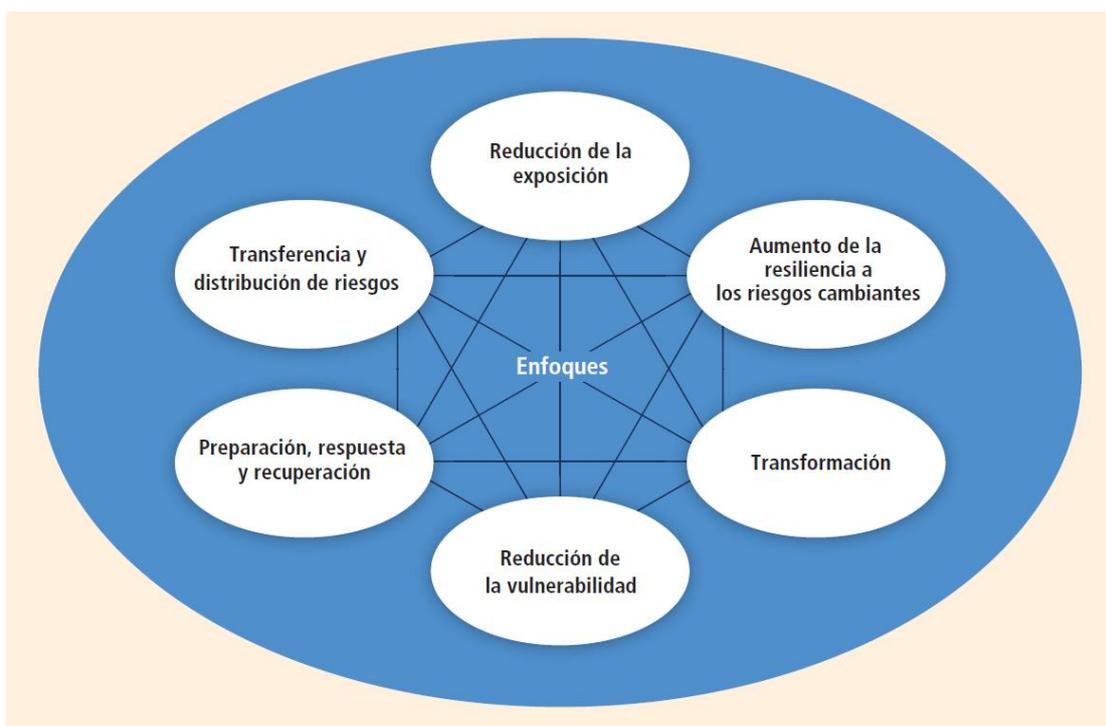


Figura 7. Enfoques de adaptación y gestión de riesgos de desastre. Esquema de aporte para reducir y gestionar los riesgos de desastres en un clima cambiante.

Fuente: IPCC, 2012.

8.1. Observaciones mundiales causadas por fenómenos climáticos

En las últimas décadas el planeta Tierra ha experimentado cambios inequívocos en el clima, causando impactos sociales, económicos y ambientales en los mares y océanos, así como en los continentes e islas.

La evidencia de los impactos generalizados a nivel mundial, basados en los estudios desde el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, radica en los patrones globales de los impactos atribuidos al cambio climático y los sistemas humanos. (Figura 8).

En torno a los sistemas hidrológicos, la calidad y cantidad del agua dulce en las cuencas hidrográficas, han sido alterados debido a los cambios de patrones meteorológicos y climáticos, como la precipitación y derretimiento de la nieve y hielo, y el permafrost, que incrementa la escorrentía superficial y afecta los recursos hídricos aguas abajo provocando posibles inundaciones. De igual forma, la evapotranspiración altera el balance hídrico incrementado posibles días secos en las transiciones de estaciones climáticas.

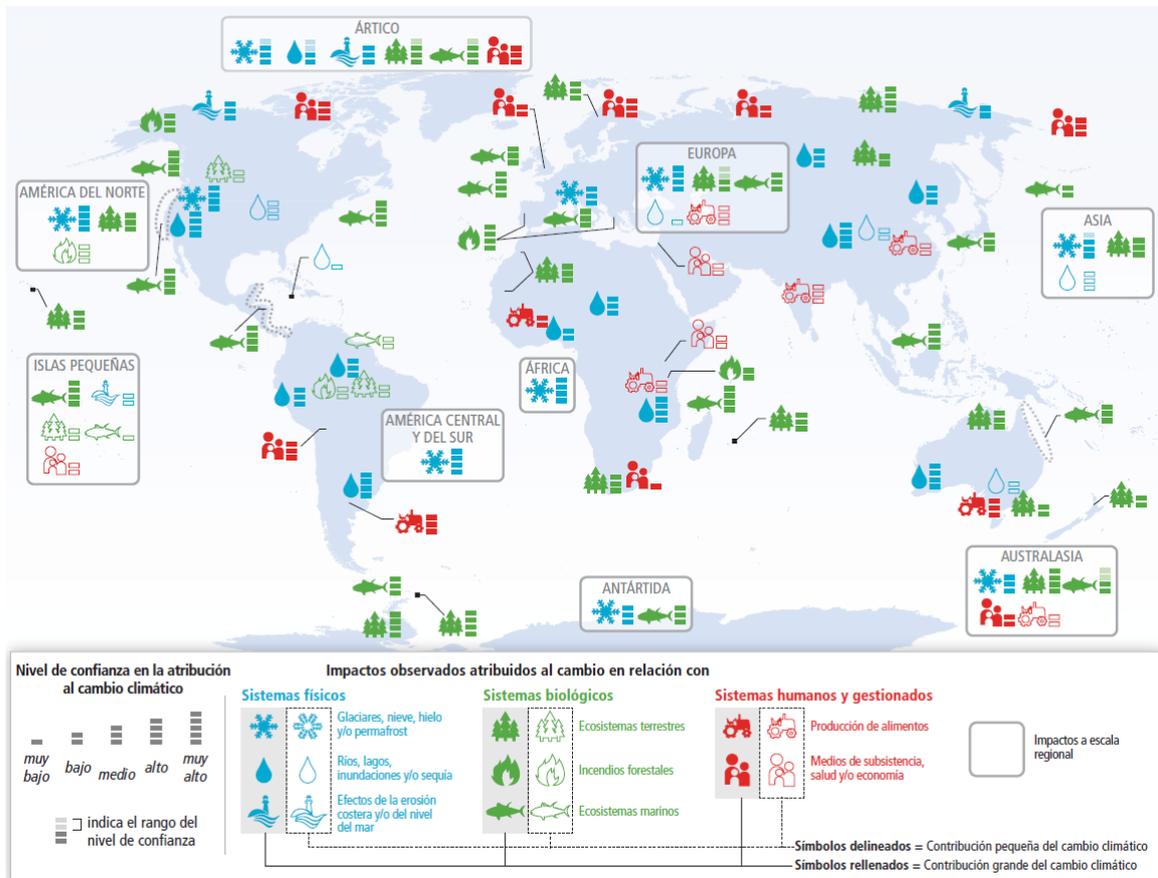


Figura 8. Patrones globales de impactos por el cambio climático.

Fuente: IPCC, 2014.

En relación con los cultivos, la revisión de muchos estudios por parte de Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación (GTII IE5) del IPCC, tanto regionales y de diversidad de cultivos, concluye que es más común los impactos negativos como el rendimiento de los cultivos antes que los impactos positivos. En muchas regiones el trigo y el maíz son afectados de forma negativa por el cambio climático, siendo los principales impactos observados sobre la soberanía alimentaria.

Sobre la vulnerabilidad y exposición, los diferentes factores que componen el clima y las diferentes formas de producción en los procesos de desarrollo hacen que la vulnerabilidad y exposición tengan comportamientos dispares, por ende, los riesgos productos del cambio climático (IPCC, 2014), siendo más vulnerables las personas y comunidades marginadas en lo social, económico, político e institucional en virtud de que no cuentan con capacidades de respuesta alguna de adaptación y mitigación.

Los impactos por fenómenos extremos, como las olas de calor, sequías, inundaciones, ciclones o incendios forestales se relacionan con los fenómenos climatológicos extremos y variabilidad climática que incrementa la vulnerabilidad y exposición a las personas, comunidades y sistemas naturales, que, a su vez, se relacionan con impactos negativos que influyen sobre el bienestar de la población como la producción de alimentos, abastecimiento de agua, infraestructuras entre otros (IPCC, 2014).

8.2. Modelos climáticos globales

Los escenarios climáticos a futuro dependen de las condiciones creadas por los forzamientos externos al sistema climático, así como de la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles, y otros factores de índole natural y humana, adicional a la variabilidad interna inherente al sistema climático. Un conjunto de hipótesis sobre la magnitud y frecuencia de las emisiones futuras, permiten a los científicos elaborar diferentes escenarios de emisiones, sobre los que se basan las proyecciones de los modelos climáticos. Siendo los modelos climáticos los que proporcionan diferentes alternativas de representación ante las respuestas de los forzamientos externos y la variabilidad interna del sistema climático.

Los modelos climáticos son las principales herramientas disponibles para evaluar el comportamiento del sistema climático global para varios escenarios, conocidos también como modelos de circulación general (MCG). Los modelos aplican una representación matemática en tres dimensiones del comportamiento dinámico de la atmósfera, convirtiéndose en las herramientas actuales más avanzadas que permiten simular las futuras respuestas del sistema climático global, ante los incrementos de los gases de efecto invernadero.

Los modelos climáticos se basan en los principios físicos que rigen el sistema climático y en el conocimiento empírico, que interpretan la iteración de los procesos de un sistema complejo para simular el clima y el cambio climático presente y futuro. Las observaciones pasadas, o las extrapolaciones de tendencias recientes, son métodos inadecuados para producir proyecciones, pues el futuro no será necesariamente una simple continuación de lo que se ha observado hasta el presente.

La coordinación del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP), del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas y su grupo de trabajo sobre modelización del clima, nace de una iniciativa de la comunidad científica para la evaluación de los modelos que simulan el clima pasado y presente y comparar las proyecciones del futuro cambio climático. Como resultado, la comunidad climatológica ha normalizado técnicamente la utilización de los “multimodelos” para evaluar las proyecciones de variables climáticas específicas, con escenarios de trayectoria de concentración representativa (IPCC, 2013).

Los MCG representan el clima mediante rejilla tridimensional sobre el globo, la cual típicamente tiene una resolución horizontal entre 200 y 600 kilómetros y con resolución vertical para la atmósfera entre 10 a 20 capas y unas 30 capas para los océanos. Sin embargo, existe incertidumbre en la representación del sistema climático y generan imprecisiones en las proyecciones futuras. Por tanto, son ejecutadas evaluaciones del desempeño, mediante la utilización de herramientas de comparación entre modelos, como el proyecto CMIP5, que corresponde a la quinta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Climáticos del World Climate Research Programme (WCRP) (Taylor et al. 2012), este proyecto produce el estado del arte del conjunto de

datos multimodal diseñado para avanzar en el conocimiento de la variabilidad climática y el cambio climático.

El proyecto CMIP5, es el utilizado en el Quinto Informe de Cambio Climático, incluye simulaciones a largo plazo del clima del siglo XX y proyecciones para el siglo XXI y siglo XXIII, además de simulaciones a corto plazo centradas en las últimas décadas. Las salidas modeladas del CMIP5 están disponibles libremente para la comunidad científica a través de un archivo de datos integrados (Giorgi and Mearns, 2001).

8.3. Escenarios globales de cambio climático

La magnitud y frecuencia de las emisiones de gases que ejercen presión sobre el sistema climático, permite elaborar diferentes escenarios de emisiones; sin embargo; es más complejo predecir el desarrollo socioeconómico, que predecir la evolución de un sistema físico por su implicación al futuro comportamiento del ser humano.

De los escenarios de desarrollo socioeconómico futuro el más común, es el método de pronosticar las emisiones futuras de gases de efecto invernadero y otros agentes de forzamiento radiativo, para lo cual es utilizado un rango de posibilidades escénicas, en razón de no ser posible determinar su probabilidad de ocurrencia. De esta forma es posible contar con visiones futuras de posibles condiciones climáticas.

En el Quinto Informe de Evaluación (AR5) del 2014, el IPCC adopta cuatro escenarios de emisiones, caracterizados cualitativamente y cuantitativamente, por las denominadas trayectoria de concentración representativa (RCP: Representative Concentration Pathway), que son las posibles cantidades de gases de efecto invernadero que serán emitidas hasta en el año 2100, o, en otras palabras, el posible rango de valores de forzamiento radiativo en el año 2100. Los escenarios de RCP como, RCP2.6, RCP4.5, RCP6 y RCP8.5, son conocidos con sus forzamientos radiativos o forzamiento climático de +2,6, +4,5, +6,0 y +8,5 (W / m^2) (Tabla 7), respetivamente. Estos reemplazan las proyecciones del Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (SRES: Special Report on Emissions Scenarios), adoptados en el Cuarto Informe de Evacuación (AR4) de cambio climático del 2007.

Tabla 7.

Rango de trayectoria de concentración representativa. Escenarios de emisión de gases de efecto invernadero al año 2100.

ESCENARIO	FORZAMIENTO RADIATIVO (W/m^2)	TENDENCIA AL AÑO 2100
RCP2.6	2,6	DECRECIENTE
RCP4.5	4,5	ESTABLE BAJO
RCP6.0	6,0	ESTABLE ALTO
RCP8.5	8,5	CRECIENTE

Fuente: IPCC, 2014

Para los cuatro escenarios, el incremento de la temperatura media global en la superficie para finales del siglo XXI (2081-2100) respecto de 1986-2005 serían, 0,3 °C a 1,7 °C; 1,1 °C a 2,6 °C; 1,4 °C a 3,1 °C; y de 2,6 °C a 4,8 °C para los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, respectivamente (Tabla 8), (Figura 9) y (Figura 10).

Tabla 8.

Rango de incremento de la Temperatura Media Global.

Escenario	Temperatura Media (°C)	Temperatura Rango (°C)
RCP 2.6	1,00	0,3 -1,7
RCP 4.5	1,85	1,1 – 2,6
RCP 6.0	2,25	1,4 – 3,1
RCP 8.5	3,70	2,6 – 4,8

Nota: Proyección del cambio de la temperatura media global en la superficie para finales del siglo XXI (2081-20100) en relación con el periodo de referencia (1986-2005).

La medición de los cambios de la precipitación promedio a partir de los registros disponibles, es complejo debido a la dificultad de la toma de muestras de precipitación y porque se espera que las precipitaciones experimenten un cambio fraccional menor que el contenido de vapor de agua en el aire. Los niveles de confianza en las zonas terrestres a escala mundial a partir del año 1951 son considerados con nivel de confianza medio y para antes del año 1951, son considerados como nivel de confianza bajo debido a la insuficiencia de datos.

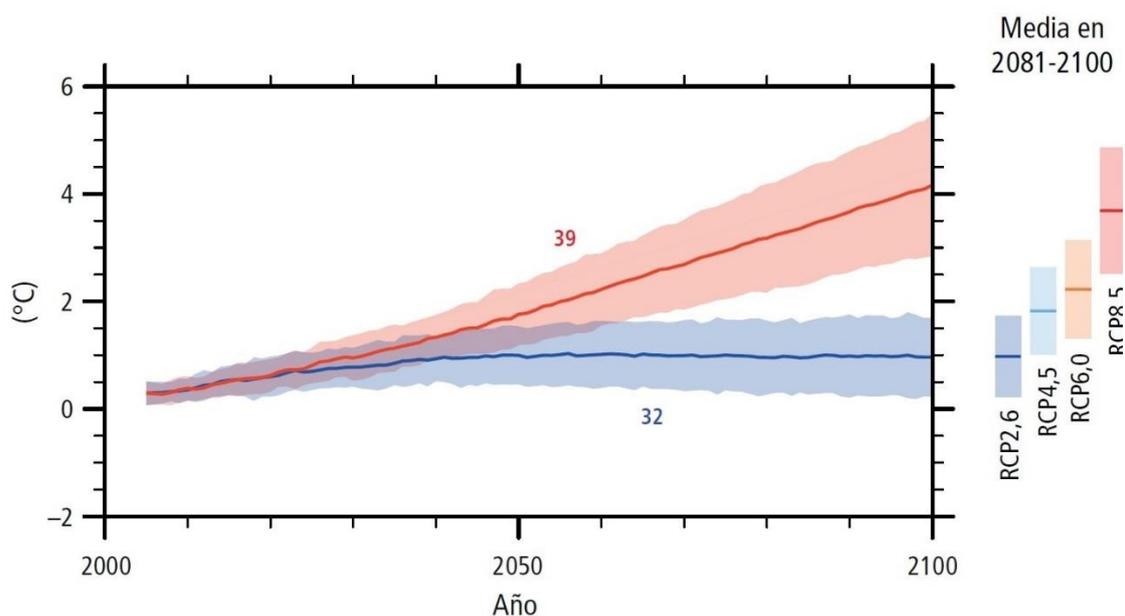


Figura 9. Escenario del cambio de la temperatura media global para distintas proyecciones de emisiones.

Fuente: IPCC, 2014.

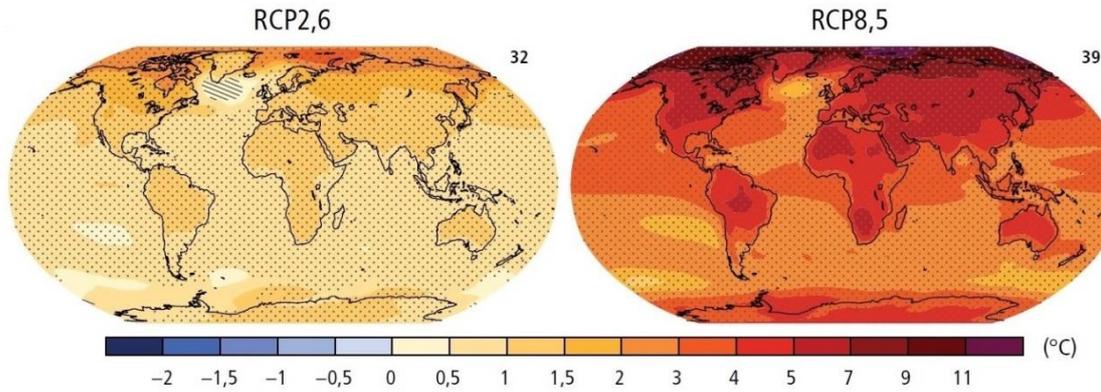


Figura 10. Cambio en la temperatura media del aire. Periodos 1986-2005 a 2081 – 2100.

Fuente: IPCC, 2014.

Con los métodos de reconstrucción de las series cronológicas de precipitación, fueron obtenidos resultados que destacan que los cambios en la precipitación global terrestre presentan pocos cambios desde 1900. En las zonas continentales de latitudes medias del hemisferio norte la precipitación presenta un posible incremento general con dos niveles de confianza medio y alto, para los periodos antes de 1951 y después de ese año, respectivamente.

Los cambios que se pueden producir en el ciclo global del agua, en respuesta al calentamiento durante este siglo, no serán uniformes. Se acentuaría el contraste en las precipitaciones entre las regiones húmedas y secas y entre las estaciones húmedas y secas, con excepciones regionales (Figura 11).

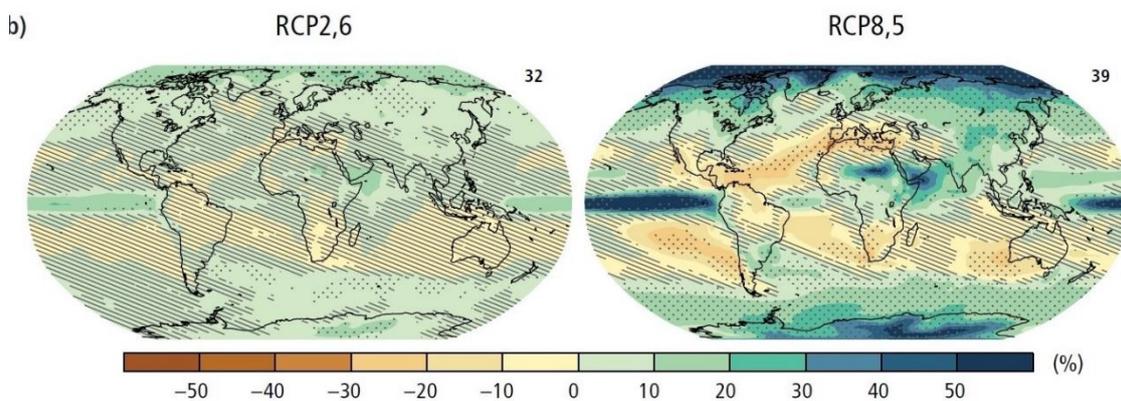


Figura 11. Cambio en la precipitación media en superficie. Periodo 1986-2005 a 2081-2100

Fuente: IPCC, 2014.

Tomando en consideración las proyecciones globales y los escenarios RCP, para Ecuador la temperatura y precipitación sufrirían cambios sustanciales, donde la temperatura incrementaría conforme en el escenario RCP8.5 (Tabla 8 y Figura 10);

mientras que la precipitación promedio anual, tendría un incremento menor al 10% en las regiones y estaciones húmedas, y un decremento para las regiones y estaciones secas, escenario RCP8.5 (Figura 11).

Los cambios climáticos se pueden relacionar con la variación de indicadores estadísticos como la media, mediana, varianza o la forma de la distribución probabilística producto de las condiciones climáticas cambiantes de la frecuencia, intensidad, extensión espacial, duración y circunstancias temporales de los fenómenos meteorológicos y climáticos.

El efecto del cambio de la temperatura entre clima presente y futuro, para el presente estudio se centra en la distribución del valor medio desplazado de toda la distribución hacia un clima más cálido, para las diferentes temperaturas promedio para los diferentes escenarios RPC proyectada para el año 2100 (Figura 12).

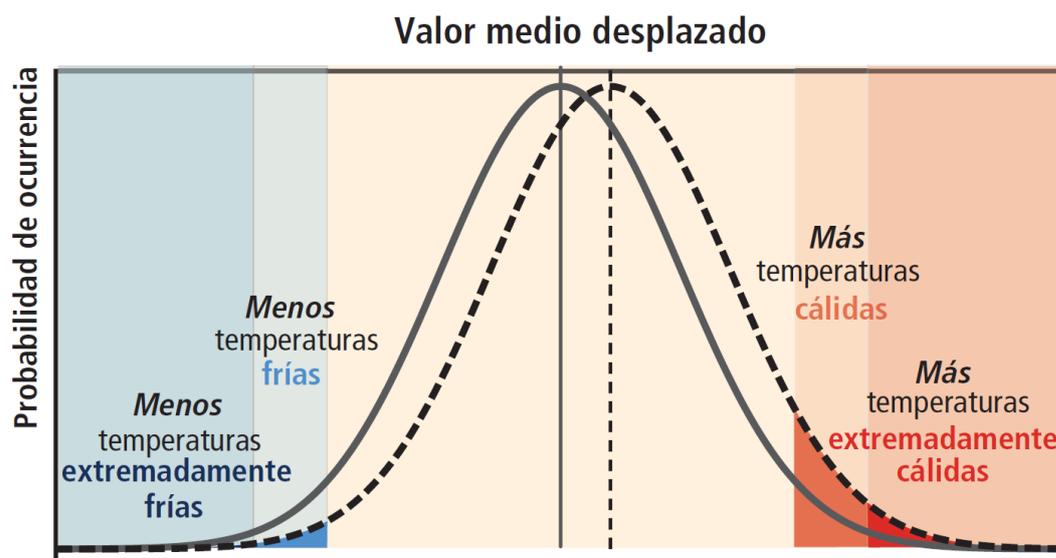


Figura 12. Efecto de cambio en la distribución de temperatura entre el clima presente y futuro. Efectos sobre los valores extremos de un desplazamiento simple para toda la distribución hacia un clima más cálido.

Fuente: IPCC, 2012.

Principios y medidas globales de adaptación al cambio climáticas

Las medidas de adaptación al cambio climático a nivel global, son de índole diversa por las características heterogéneas locales y las condiciones de principios técnicos, financieros y políticos. Sin embargo, el principio de reducir la vulnerabilidad y exposición ante el cambio climático futuro, es una las primeras medidas a considerar como parte de las acciones para fortalecer la resiliencia como parte de la adaptación al cambio climático.

Para la planificación integral considerando un enfoque multisectorial con base técnico-científica, administrativa y jurídica, considerando varios escenarios y diferentes

horizontes para la viabilidad a la adaptación al cambio climático de los recursos hídricos, es necesario el aditamento de información y criterios de cambio climático, incorporando a los actores públicos y privados, especificando el rol de cada uno dentro de la planificación, con un componente fuerte de responsabilidad sobre la comunidad y familias.

Las siguientes medidas son una base que facilita los procesos de adaptación al cambio climático:

- **Procesos de planificación.** Ante el inequívoco cambio climático, son contextualizadas las afectaciones negativas en los sectores riesgos y recursos hídricos, siendo las opciones ingenieriles, tecnológicas, de protección y conservación, la respuesta, integradora en los planes de gestión de riesgos y planes de gestión integrada de recursos hídricos, con su respectivo enfoque de adaptación al cambio climático.
- **Ajustes de aprendizaje.** Las experiencias en implementación de medidas de adaptación, sobre la base de resultados locales, han permitido continuar en el perfeccionamiento de las nuevas opciones ingenieriles, tecnológicas, de protección y conservación, con la finalidad de optimizar la relación costo-beneficio, sobre la base de réplicas eficientes.
- **Evaluaciones de impacto.** Sobre las medidas implementadas de adaptación al cambio climático, debe registrarse, documentarse, evaluarse y difundir el comportamiento de las actividades y procedimientos aplicados con miras a posibles implantaciones o descartes de dichos procesos, como registros documentales en beneficio de la comunidad científica, técnica o responsables de toma de decisiones.
- **Experiencias de adaptación.** A lo largo de los últimos años se han venido implementando medidas de adaptación que pueden ser públicas y/o privadas en diversos sectores que podrían ser afectados por el cambio climático y en varias regiones del mundo, lo que permite acumular experiencias que permitan replicar sobre la base de zonas con características físicas similares o condiciones producción semejantes.
- **Políticas de adaptación.** De los resultados de planes integrales de gestión de riesgos y planes integrales de gestión de los recursos hídricos, deben desencadenar en políticas públicas a diferentes niveles de gobiernos nacionales, y locales con estructuras naturales de planificación como son las cuencas hidrográficas con horizontes de ejecución a corto, mediano y largo plazo.

Alrededor del mundo han sido implementadas diferente tipo de medidas de adaptación al cambio climático, y en América del Sur la adaptación se centra en los ecosistemas que comprenden áreas protegidas y bosques protectores, de acuerdo con las prioridades de conservación y gestión comunitaria. En algunas zonas agrícolas han

sido incorporadas variedades de semillas y cultivos resistentes, en función de las predisposiciones climáticas y gestión integrada de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas. (IPCC, 2014)

8.4. Medidas de adaptación de los recursos hídricos al cambio climático en la planificación integrada de cuencas hidrográficas

La adaptación y la mitigación son estrategias complementarias para reducir y manejar los riesgos ante el cambio climático, bajo el concepto de desarrollo sostenible como base para la formulación de políticas públicas en el ámbito climático. Para el efecto, es imprescindible concientizar sobre los efectos del cambio climático, a los involucrados individuales y/o colectivos (personas y/o sociedad), de tal forma que se logre el empoderamiento sobre los niveles de exposición a los riesgos y las incertidumbres, en vista de que el cambio climático, es un problema de acción colectiva a escala mundial.

Las acciones de adaptación a nivel local, necesitan guardar la relación de la exposición y vulnerabilidad con el uso y aprovechamiento del recurso hídrico a nivel de cuenca hidrográfica, considerando que, a través de los múltiples estudios actuales, no es posible prever de forma fiable cambios específicos a escala de cuenca, pero sí es seguro que los cambios en el clima podrían afectar gravemente a los sistemas de gestión de los recursos hídricos.

Los cuatro (4) escenarios de emisión de las denominadas trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés), definidas en el Quinto Informe (IPCC, 2014), muestran que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de FR muy bajo (RCP2.6); escenario de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0); y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5).

En el componente de adaptación de los recursos hídricos ante el cambio climático, la cuenca hidrográfica es la mejor unidad para la planificación integral, por la relación directa del agua en la concepción del principio de conservación de masas, que obedece al ciclo hidrológico, donde la alteración de una variable, por ejemplo, la temperatura, por el principio de conservación de masas, alteraría al resto del sistema.

El principio de conservación de masas, también llamada ecuación de continuidad para representación del ciclo hidrológico, se enmarca dentro de los cálculos del balance hídrico de una cuenca hidrográfica.

El balance hídrico, tal como se describió con antelación, donde los volúmenes de agua de entradas y salidas del sistema están condicionados por la variación del agua almacenada y ante las condiciones inequívocas del cambio climático futuro, el incremento de la temperatura alterará el volumen de agua almacenado, lo que infiere a calcular el balance hídrico directo, mediante modelamientos hidrológicos para diferentes escenarios de incrementos de temperatura.

Los resultados de los modelamientos del balance hídrico en la cuenca hidrográfica para los diferentes escenarios ante el incremento previsto de las temperaturas diarias máximas y mínimas de la atmosfera, permitirán definir los valores de alteración del ciclo hidrológico, donde la evapotranspiración y por ende el volumen de agua serían afectados, subsecuentemente influyendo en la producción de cultivos; el caudal de los ríos, captación de agua para consumo humano y riego, así como el hábitat acuático.

Para la caracterización y comparación de posibles cambios en el sistema y la descripción en cada una de las fases que compone en ciclo hidrológico para los diferentes escenarios, es utilizado el Índice de Aridez (IDA), como indicador que permite la discriminación cualitativa de las sequías.

La sequía se caracteriza por su frecuencia, intensidad, extensión espacial y duración, que puede ocurrir por varios procesos hidrometeorológicos, que disminuye la disponibilidad del agua superficial y subterránea, limita de otra manera la humedad disponible hasta un punto potencial perjudicial.

Los efectos de las externalidades negativas por las sequías, se centran principalmente en el déficit del agua que se destina para sus usos y aprovechamientos, consuntivos y no consuntivos del agua. Por lo cual han sido desarrollados múltiples índices de sequía que permitan cuantificar y/o cualificar su gravedad, en función de los indicadores meteorológicos, humedad de suelo, hidrológicos, teledetección y mixtas o modelados (OMM-GWP, 2016).

La complejidad del pronóstico efectivo sobre el cambio climático es alta, pero sí es seguro que los impactos recaen sobre el ser humano con déficit de agua y alimentos. Sin embargo; sobre la base de los resultados del (IA) es posible la identificación de las zonas con alteraciones de humedad en espacio y tiempo, y ante lo cual, será necesario tomar medidas de adaptación, en beneficio del desarrollo a corto plazo y reducción de la vulnerabilidad a largo plazo, donde dichas soluciones sean compromisos entre los actores de la cuenca hidrográfica para la toma de decisiones de alcance inmediato y el planteamiento de objetivos de largo plazo, en el marco de un proceso de planificación.

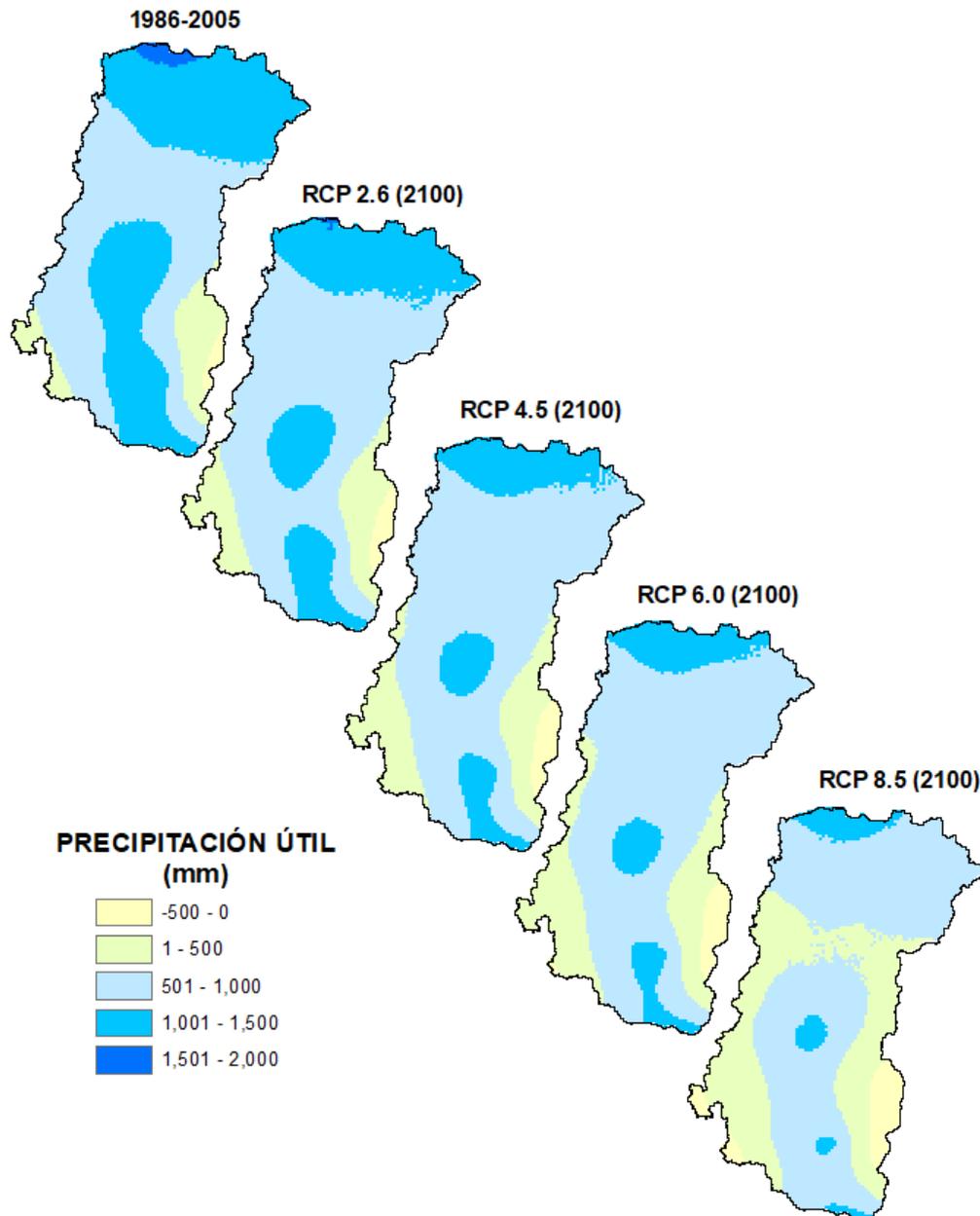
Las medidas que se adopten dentro de la formulación de la adaptación de la planificación integrada de los recursos hídricos al cambio climático, tiene etapas de ejecución a corto, mediano y largo plazo para los diversos escenarios. En algunos casos, es identificada alta vulnerabilidad y una baja capacidad de adaptación, donde serán requeridos grandes procesos de transformación. Las medidas de adaptación están sujetas a dependencias de la voluntad política, capacidades técnicas-científicas y disponibilidad financiera.

El cambio climático, tendrá su mayor impacto en los sectores relacionados directamente con el agua como la población, agricultura, flora y fauna, turismo y productivo, ante lo descrito se plantean algunas medidas que se han sido adoptadas en otras latitudes alrededor del mundo con resultados positivos que permiten la reducción de la exposición y la vulnerabilidad ante condiciones de escasez del recurso hídrico:

- Captación tradicional de aguas superficiales y subterráneas, sistemas de almacenamiento y trasvase de agua.
- Gestión eficiente en las asignaciones del recurso hídrico para los usos y aprovechamientos que demandan agua.
- Optimización y tecnificación de los sistemas de irrigación.
- Agricultura de conservación, rotación de cultivos y diversificación de los medios de subsistencia.
- Uso de variedades de cosecha resistentes a las sequías.
- Sistemas de alerta temprana que integre: predicciones estacionales con las proyecciones de sequías, y comunicación eficiente para los usuarios.
- Mancomunación de los riesgos a nivel regional.

Capítulo III.

CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA



III. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA

Dentro de la DH Guayas, se encuentra la cuenca hidrográfica del río Babahoyo, que se ubica en el centro-oriente de la DH Guayas entre los paralelos 01°49'S y 01°07'W de latitud sur y entre los meridianos 79°04'W y 79°09'W de longitud oeste. La salida de la cuenca se encuentra ubicada a los -01°51' de latitud sur y -79°39' de longitud oeste. (Figura 1). La superficie total drenada es 7.516 Km², que corresponden a una extensión aproximada del 17% de la DH Guayas. Sus principales tributarios con los ríos son: Catarama, Clementina y San Pablo. Su ubicación es estratégica por encontrarse entre las dos ciudades más importantes de Ecuador: Quito, la capital y Guayaquil, la ciudad más poblada.

La caracterización territorial de la cuenca hidrográfica, es la consolidación de una visión general del área de estudio. En el cual, se describe la estructura de la composición de los subsistemas que vertebran el territorio que se componen en, medio físico, poblacional, poblados e infraestructuras y marco jurídico e institucional.

Siendo los subsistemas, los objetivos sobre cuales se debe formular la adaptación de la planificación de la gestión integrada de los recursos hídricos ante el cambio climático.

1. Medio físico

El medio físico de la cuenca hidrográfica, se caracteriza en dos grupos, el medio biótico y el medio inerte o abiótico. El cual se compone de elementos y procesos naturales (Gómez, 2008).

El subsistema físico, para la situación actual general se describe a continuación desde una óptica de análisis del clima, agua, suelo y cobertura vegetal.

1.1. Medio biótico

Áreas protegidas y bosques protectores

En Ecuador, la cobertura de las áreas protegidas y bosques protectores a nivel nacional cubren una superficie aproximada del 20%. Las áreas protegidas, son espacios naturales terrestre o marítimo, preestablecidos para preservar la diversidad biológica del país (EDUFUTURO, 2006). Definidas como zonas ideales para la conservación de la flora y fauna, su importancia radica en la contribución para la regulación hídrica, el control de erosión, la preservación de especies en peligro de extinción, preservación de las fuentes de agua, además de proporcionar espacios para el ecoturismo y la educación ambiental (Planeta Ecuador, 2007).

Los bosques o vegetación protectora, tienen como finalidad la conservación de la biodiversidad y protección erosiva e hidrológica. Estos ecosistemas pueden ser públicos o privados. Los privados se formalizan mediante un mecanismo de declaratoria legal con

el Ministerio del Ambiente, sobre un área específica, con la voluntad del propietario a conservar el suelo y la biodiversidad de la zona.

Las áreas protegidas y bosques protectores, son catalogados por la legislación ambiental nacional, con categoría de máxima protección. Son parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP), conocido también como Patrimonio de Áreas Naturales del Estado (PANE), que conforman 51 áreas protegidas, distribuidas a lo largo del territorio continental e insular.

Estas áreas concentran una importante riqueza biológica y servicios ecosistémicos, los cuales benefician a los sistemas humanos y naturales; brindando una riqueza paisajística que permite el turismo y la recreación. Un claro ejemplo de ello son los bosques protectores, que ocupan una superficie de 2,20 millones de hectáreas a lo largo del país (SENPLADES, 2010), dada su importancia ecológica, trascienden fronteras y son reconocidos a nivel internacional.

Dentro de la cuenca hidrográfica del río Babahoyo, se encuentran dos áreas protegidas con una superficie de 216,99 Km² y seis bosques protectores con una superficie de 57,86 Km². Los datos de estas áreas protegidas y de los bosques protectores se muestran en las (Tablas 9 y 10); y sus ubicaciones en la (Figura 13).

Tabla 9.

Áreas protegidas en el área de estudio.

CÓDIGO	NOMBRE	ÁREA (Km²)
HB01019	Los Ilinizas	211,45
HB01023	Chimborazo	5,54
TOTAL:		216,99

Tabla 10.

Bosques Protectores en el área de estudio

CÓDIGO	NOMBRE	ÁREA (Km²)
HB02010	Toachi Pilatón	0,49
HB02017	Gineales Samana y Mumbes	34,25
HB02031	Chillanes Bucay	11,36
HB02040	Hacienda Shishimbe	0,32
HB02049	Subcuencas de los Ríos Matiavi y Mulidianhuan (Peña Blanca)	9,73
HB02055	Naranja Pata	1,71
TOTAL:		57,86

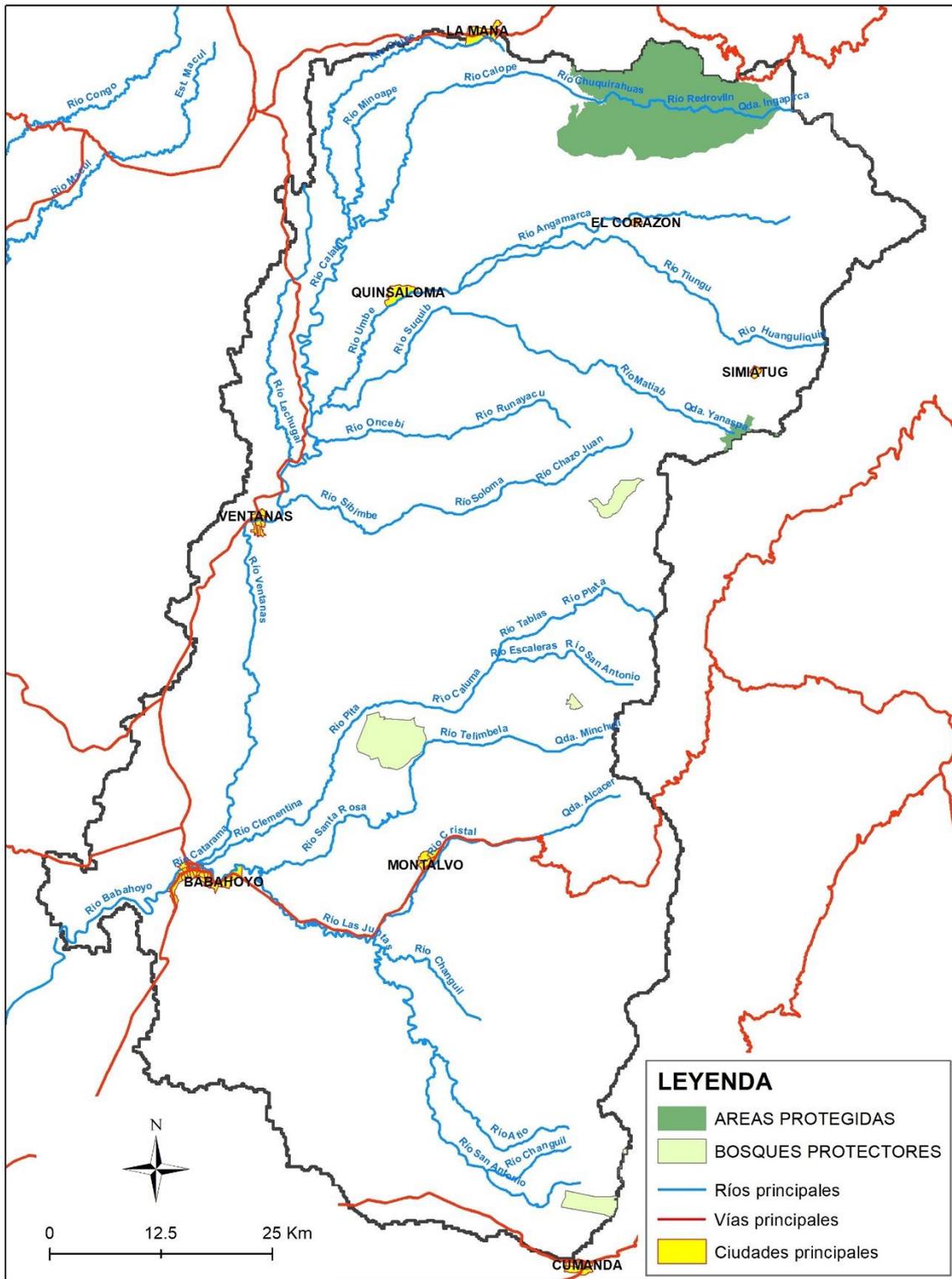


Figura 13. Mapa de las áreas protegidas y bosques protectores en el área de estudio.

Fuente: MAE, 2011.

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

Usos del suelo

La cobertura del uso del suelo actual se recoge en el mapa de cobertura y mapa de usos de la tierra del Ecuador continental 2013-2014 (MAE-MAGAP, 2015) a escala 1:100.000. La mayor cobertura de las tierras de la cuenca del río Babahoyo son suelos destinados para la agricultura y ganadería, cubren una superficie de 6,288.47 km², que representa el 83% del área de estudio. El mayor de los usos del suelo dentro de las Tierras agropecuarias corresponde a pastizales, cultivos anuales y mosaicos agrícolas, que representan el 72% (Tabla 11 y Figura 14).

Tabla 11.

Usos del suelo en el área de estudio.

USOS DEL SUELO	ÁREA (Km ²)	SUBUSOS DEL SUELO	ÁREA (Km ²)
BOSQUE	832,35	BOSQUE NATIVO	780,88
		PLANTACIÓN FORESTAL	51,47
CUERPO DE AGUA	43,76	ARTIFICIAL	0,58
		NATURAL	43,19
OTRAS ÁREAS	1,28	SIN COBERTURA	
		VEGETAL	1,28
TIERRA AGROPECUARIA	6.288,47	CULTIVO ANUAL	1.450,05
		CULTIVO PERMANENTE	838,83
		CULTIVO SEMI-PERMANENTE	819,66
		MOSAICO AGROPECUARIO	1.437,86
		OTRAS TIERRAS AGRÍCOLAS	108,98
		PASTIZAL	1.633,09
VEGETACIÓN ARBUSTIVA Y HERBÁCEA	330,04	PÁRAMO	306,12
		VEGETACIÓN ARBUSTIVA	19,85
		VEGETACIÓN HERBÁCEA	4,07
ZONA ANTRÓPICA	42,14	ÁREA POBLADA	41,46
		INFRAESTRUCTURA	0,68
TOTAL:	7.516,00		7.516,00

Fuente: MAE-MAGAP, 2015.

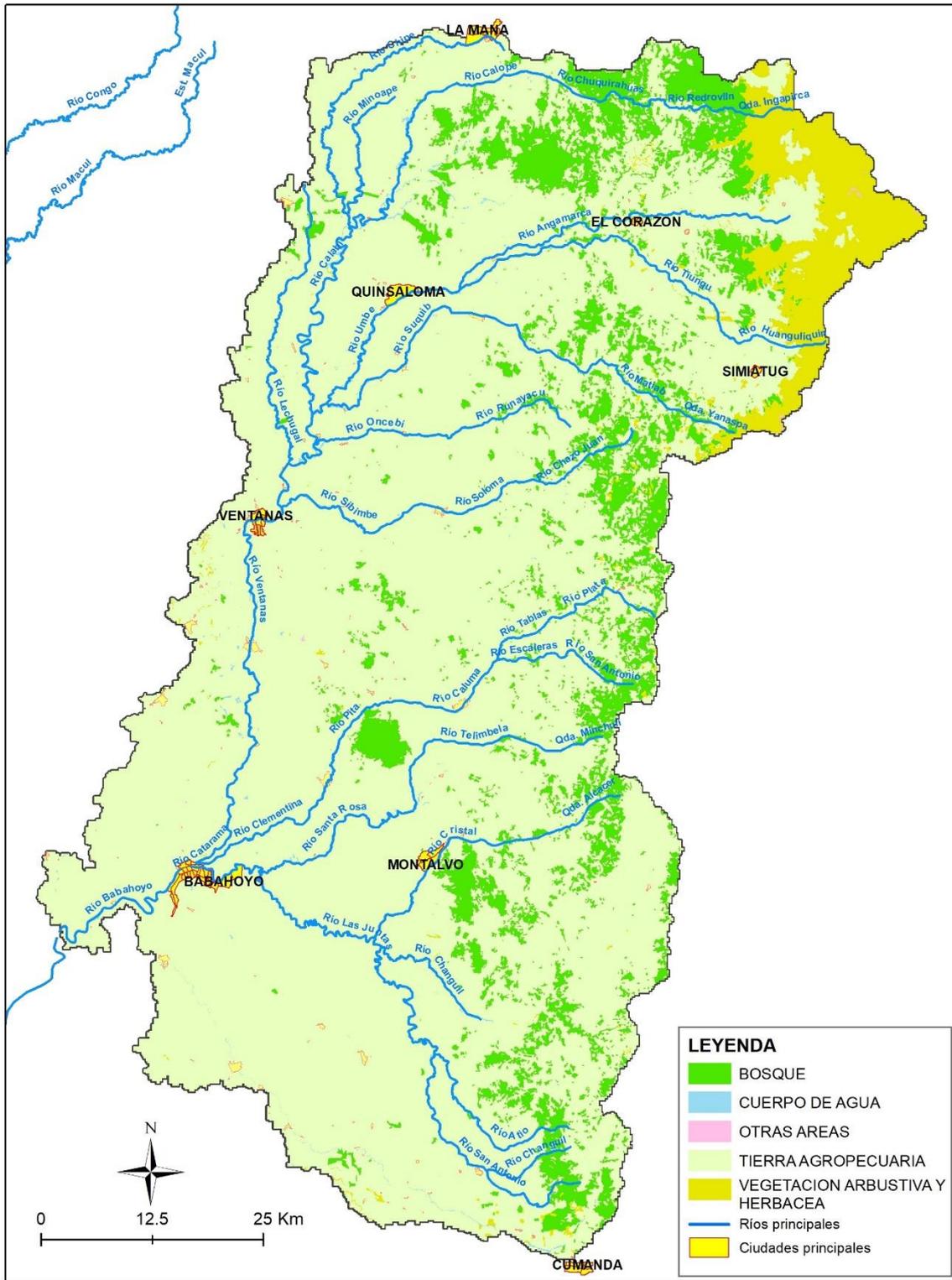


Figura 14. Usos del suelo en la cuenca del río Babahoyo.

Fuente: MAE-MAGAP, 2015

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

1.2. Medio inerte

El subsistema medio inerte se constituye por el aire, Tierra y agua. Para una mejor comprensión, desde la perspectiva de la GIRH, se han agrupado en clima, agua y suelos:

Precipitación

Ecuador, por su condición natural se divide en cuatro regiones naturales bien definidas y diversas, que van desde las costas del océano Pacífico hasta el inicio de las estribaciones de la cordillera de los Andes, región denominada como litoral o costa. A continuación, está la región Andina o sierra que es la zona donde se emplaza la cordillera de los Andes y concluye la parte continental con la región Oriental o Amazónica. La región Insular o Galápagos, es un conjunto de islas que se encuentran en el océano Pacífico a una distancia aproximada de 1.000 Km desde la costa ecuatoriana.

El clima en Ecuador tiene gran influencia oceánica y sumado a la singularidad de su ubicación sobre la línea ecuatorial, donde confluye, la corriente oceánica de Humboldt que es una corriente de agua fría que nace en la Antártida y se desplaza de sur a norte siguiendo la costa Sudamérica del Pacífico, y la corriente oceánica de El Niño que es una corriente cálida que se desplaza de norte a sur y termina en las costas ecuatorianas y peruanas.

En la zona continental, una franja promedio de 400 Km se encuentra entre la costa del Pacífico y la cordillera de los Andes, con una característica particular de incremento de altura de este a oeste que va desde 0 a 6.000 metros sobre el nivel del mar (msnm). Lo que permite tener características climáticas únicas.

La cuenca del río Babahoyo está localizada en una región de clima tropical con dos variedades estacionarias definidas. Entre los meses de junio a noviembre se registra una estación seca, o llamada también de verano; y, entre diciembre y mayo una época lluviosa, o llamada de invierno.

El promedio de precipitación anual en la cuenca del río Babahoyo varía desde occidente hacia oriente. Con una precipitación de 1.500 mm al este de la cuenca, que se encuentra sobre la cota de 10 msnm, hasta alcanzar el valor máximo de 2.500 mm en el centro de la cuenca, en las inmediaciones de la cota de los 2.000 msnm; para luego, empezar a disminuir con el incremento en altura llegando hasta una precipitación 1.000 mm en la cota máxima de 4.000 msnm (Figura 15). El comportamiento de la precipitación anual en la cuenca está relacionado con la altura. Para alturas intermedias la precipitación es la más alta, y en los extremos de las alturas (menor y mayor) la precipitación disminuye.

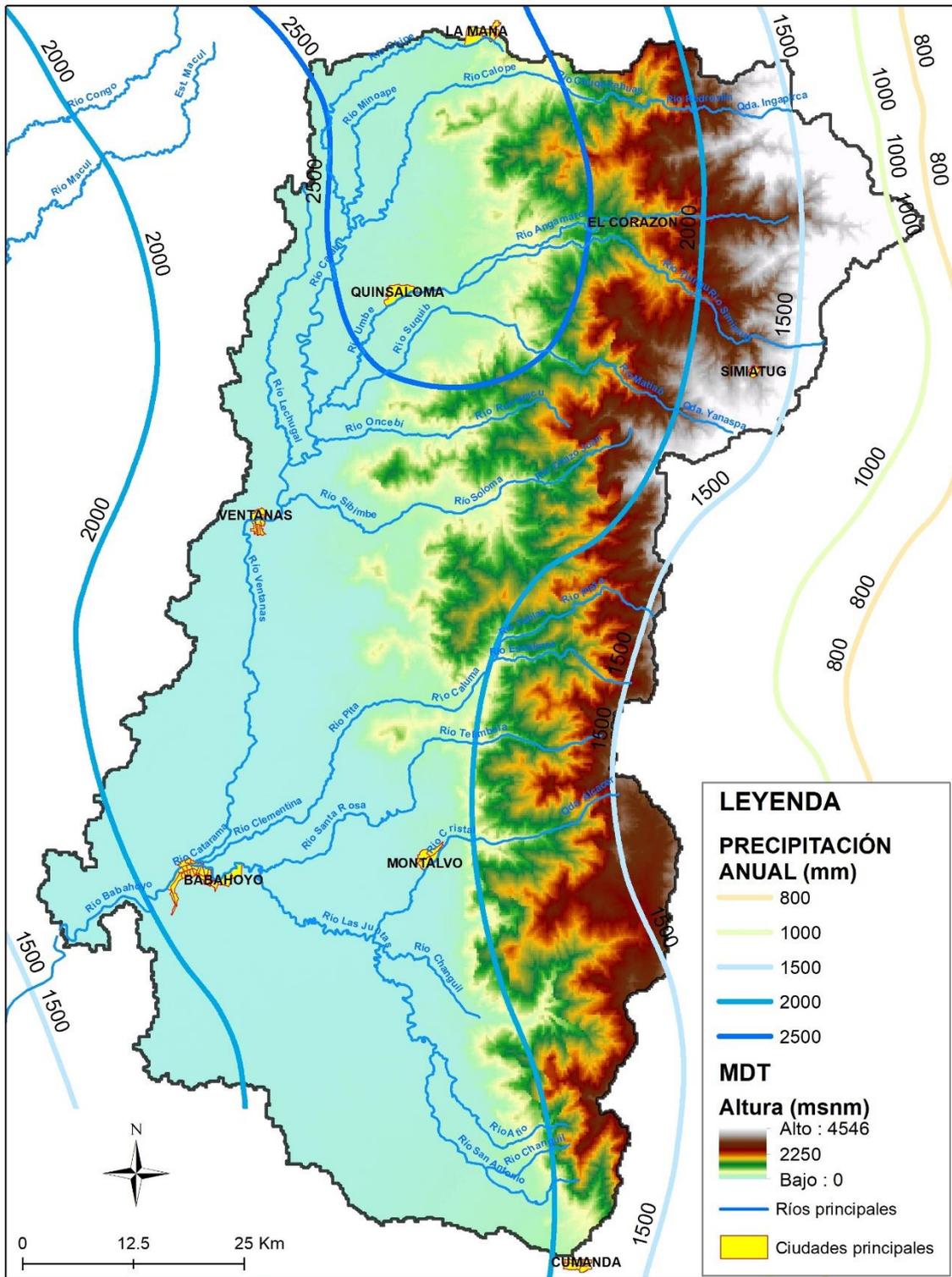


Figura 15. Mapa de Isoyetas.
 Fuente: PNGIRH, 2016.
 Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

Temperatura

La temperatura (máxima y mínima) en la cuenca del río Babahoyo, de acuerdo a los análisis estadísticos basado en los registros de datos diarios para el periodo entre 1986 y 2005, tienen un comportamiento casi constante durante el año y para cada una de las estaciones involucradas en la presente tesis doctoral. La variación de la temperatura está estrechamente relacionada con la cota sobre el nivel del mar en la que se encuentra la estación, a mayor altura menor temperatura.

La temperatura máxima, varía entre estaciones. La estación Babahoyo, se encuentra en la cota 7 msnm, con una temperatura media máxima anual de 30°C; y la estación Chillanes, que está en una cota de 2.300 msnm, tiene una temperatura media máxima anual de 20°C. En la (Figura 16) se aprecia la temperatura media máxima mensual para el periodo de estudio de las estaciones utilizadas en la cuenca, su comportamiento a lo largo del año de cada una de las estaciones es casi constante.

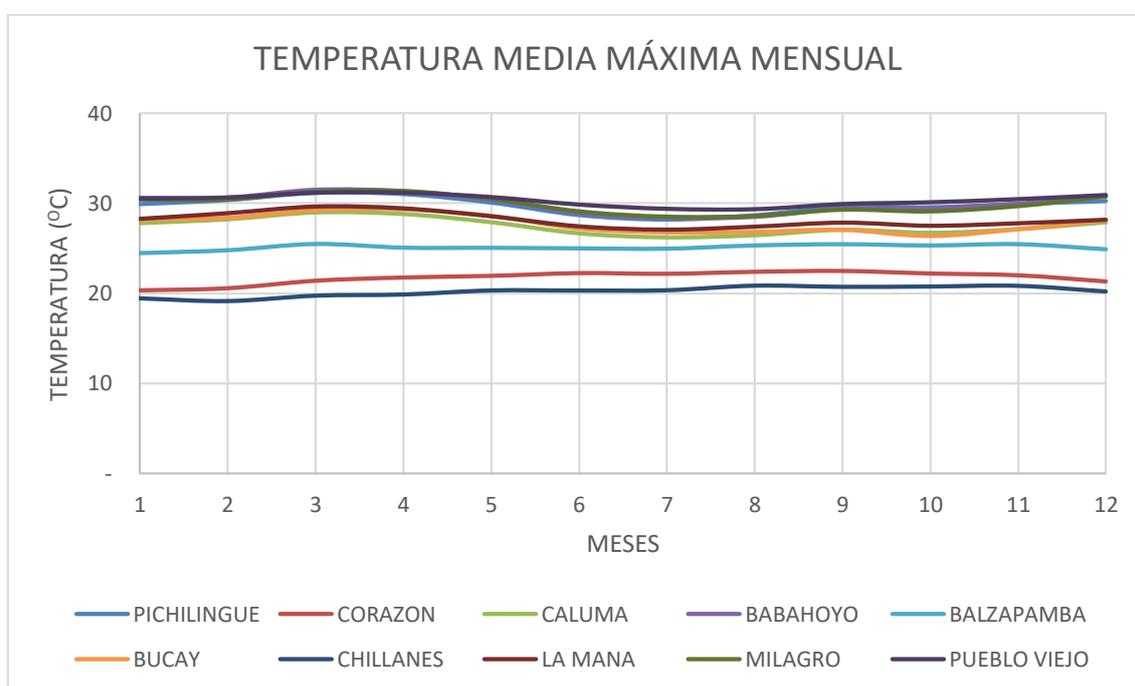


Figura 16. Temperatura media máxima mensual de las estaciones en la cuenca de estudio.

Fuente: INAMHI.

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

La temperatura mínima, varía al igual que la temperatura máxima. La estación Babahoyo, registra una temperatura media mínima anual de 22°C; mientras que, la estación Chillanes registra una temperatura media anual de 8°C. En la (Figura 17) se aprecia la temperatura media mínima mensual para el periodo de estudio de las estaciones utilizadas en la cuenca, su comportamiento a lo largo del año de cada una de las estaciones es casi constante.

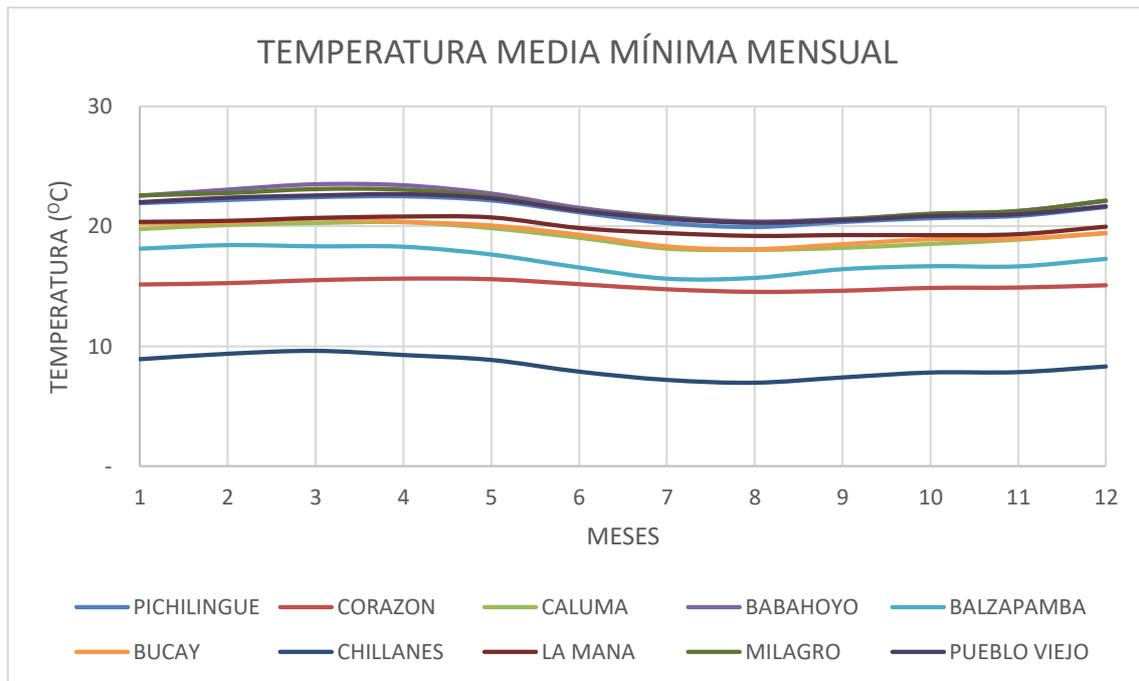


Figura 17. Temperatura media mínima mensual de las estaciones en la cuenca de estudio.

Fuente: INAMHI.

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

Hidrografía

El río Babahoyo, es el principal tributario del río Guayas, con una longitud de 170 km desde el nacimiento del río hasta su salida de la cuenca, con un área de drenaje de 7.516 km² y una escorrentía media anual de 11,91 hm³. Un caudal promedio anual de 380 m³/s, de los cuales, el caudal promedio máximo mensual es marzo con 960 m³/s y el caudal promedio mínimo mensual es octubre con 40 m³/s. Sus principales tributarios son los ríos, Catarama, Clementina, San Pablo y Jujan. El río Catarama es el mayor tributario (Figura 18).

Geomorfología

El relieve de la cuenca del río Babahoyo se caracteriza fisiográficamente por 3 grandes conjuntos geomorfológicos, formados por la acción orogénica pasada y por los procesos erosivos presentes. Estos conjuntos son: la zona de páramos andinos, que está ubicada en altitudes superiores a los 3.600 msnm, cuyo relieve predominante es montañoso, con una cobertura mayoritaria que tiene pendientes mayores al 70%; la zona de declives o laderas, con pendientes entre el 25% y el 70% y se localizan entre las cotas 3.200 y 4.000 msnm; y la llanura de inundación, correspondiente a la cuenca baja del río Babahoyo, determinada básicamente por la dinámica fluvial. (Figura 19).

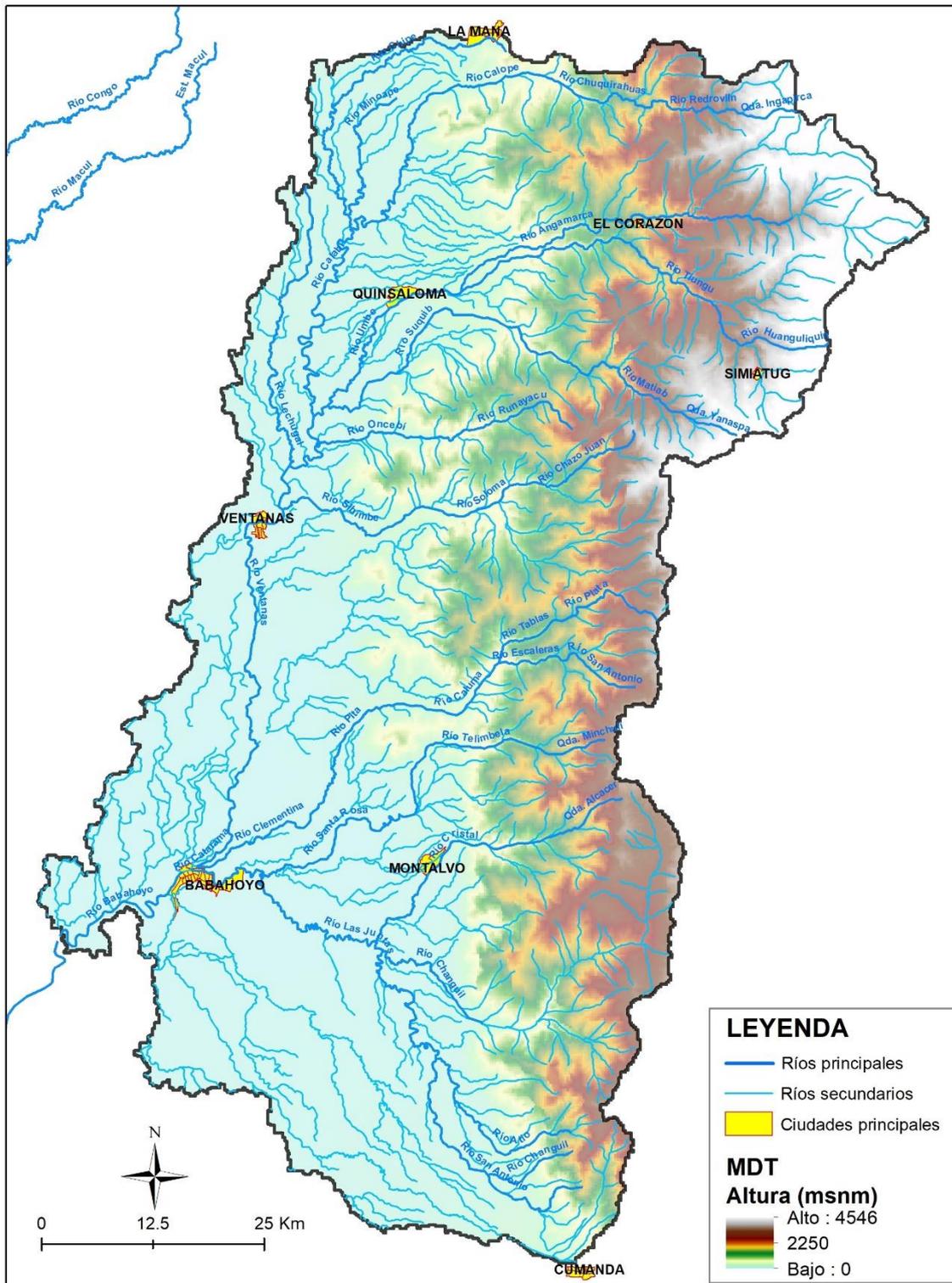


Figura 18. Sistema Hídrico de la cuenca del río Babahoyo.

Fuente: IGM

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

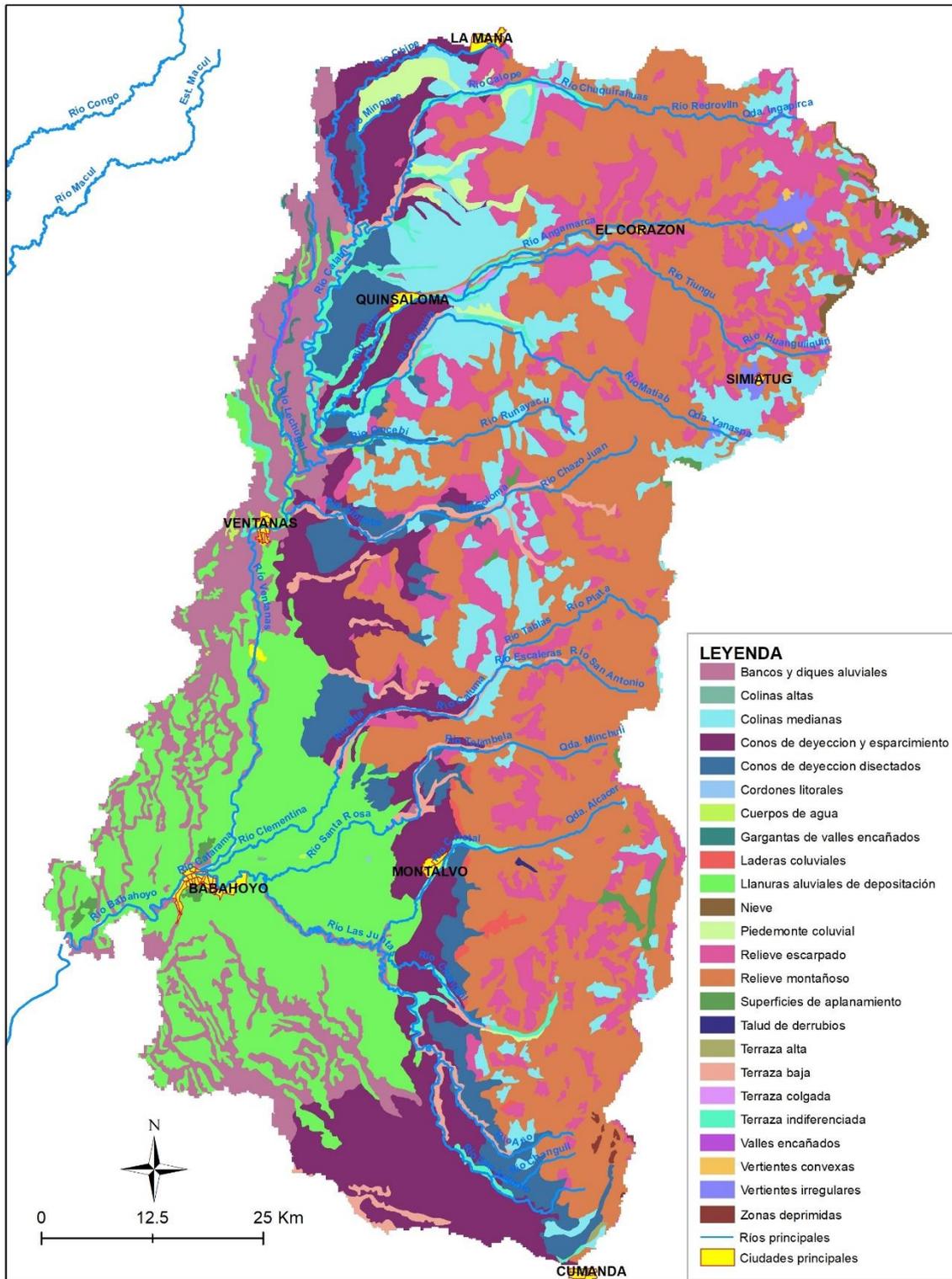


Figura 19. Mapa de formaciones geomorfológicas en la cuenca.

Fuente: MAGAP. 1993.

Procesamiento: Paúl Sotomayor

Litología

La geología de la cuenca del río Guayas data de la era Mesozoica, que comprende los periodos que van desde el Jurásico hasta el Cuaternario. Su litología se caracteriza por la presencia de rocas de origen oceánico y molusco. En la parte oriental se identifican rocas ígneas y volcánicas; mientras que, en la cuenca baja de la demarcación afloran rocas volcánicas y sedimentarias. La principal formación geológica que se identifica en la cuenca del río Babahoyo es Macuchi; la cual, se encuentra localizada en la parte este de la cuenca, en los cantones de Guaranda, Chillanes, La Mana, San Miguel y Echeandía. Litológicamente está constituida por rocas volcánicas particularmente tobos con clastos de varios tamaños (se conocen como brechas), flujos de rocas ígneas de tipo andesitas, coladas de diabasas enfriadas en profundidad dando una textura porfirítica, mantos de espilitas y ceniza volcánica silicificada hasta formar lutitas duras (Proaño, 2009) (Figura 20).

Edafología

La cuenca del río Babahoyo, de acuerdo a la clasificación taxonómica de la USDA, presenta principalmente suelos inceptisoles, entisoles e inceptisoles-entisoles. Los tres suelos de mayor cobertura se describen a continuación. i) Los inceptisoles, que representan el 34,17%, son depósitos fluviónicos como residuales y están formados por materiales líticos de naturaleza volcánica y sedimentaria, son superficiales a moderadamente profundos y de topografía plana a quebrada. ii) Los entisoles, que representan el 16,65%, son suelos minerales derivados tanto de materiales aluviónicos como residuales, de textura moderadamente gruesa a fina, de topografía variable entre plana a extremadamente empinada. iii) Los inceptisoles-entisoles, que representan el 22,86%. (Tabla 12 y Figura 21).

Tabla 12.

Tipos de suelo en la cuenca del estudio.

TIPOS DE SUELOS	ÁREA (Km ²)	PORCENTAJE (%)
ÁREA URBANA	10,12	0,13
ALFISOL	606,31	8,04
ALFISOL+INCEPTISOL	83,36	1,11
CUERPO DE AGUA NATURAL	3,99	0,05
ENTISOL	1.233,28	16,65
ENTISOL+ALFISOL	243,46	3,23
IALFISOL+ENTISOL	279,06	3,70
INCEPTISOL	2.575,78	34,17
INCEPTISOL/ALFISOL	196,23	2,60
INCEPTISOL+ALFISOL	317,98	4,22
INCEPTISOL+ENTISOL	1.723,27	22,86
MOLLISOL	214,55	2,85
NIEVE Y HIELO	25,14	0,33
VERTISOL	3,50	0,05
TOTAL	7.516,00	100,00

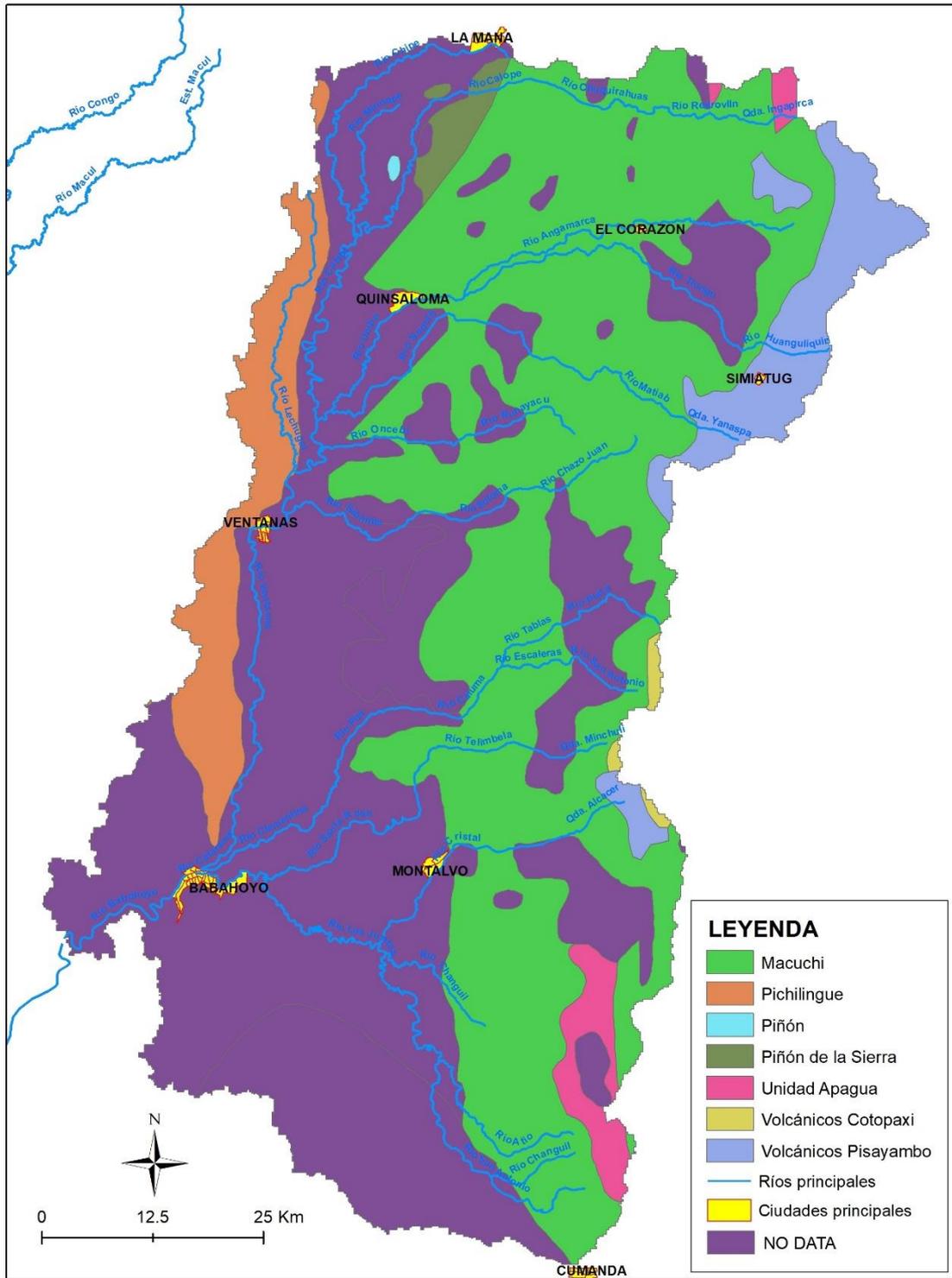


Figura 20. Mapa de formaciones geológicas en la cuenca.

Fuente: MAGAP, 1993.

Procesamiento: Paul Sotomayor G.

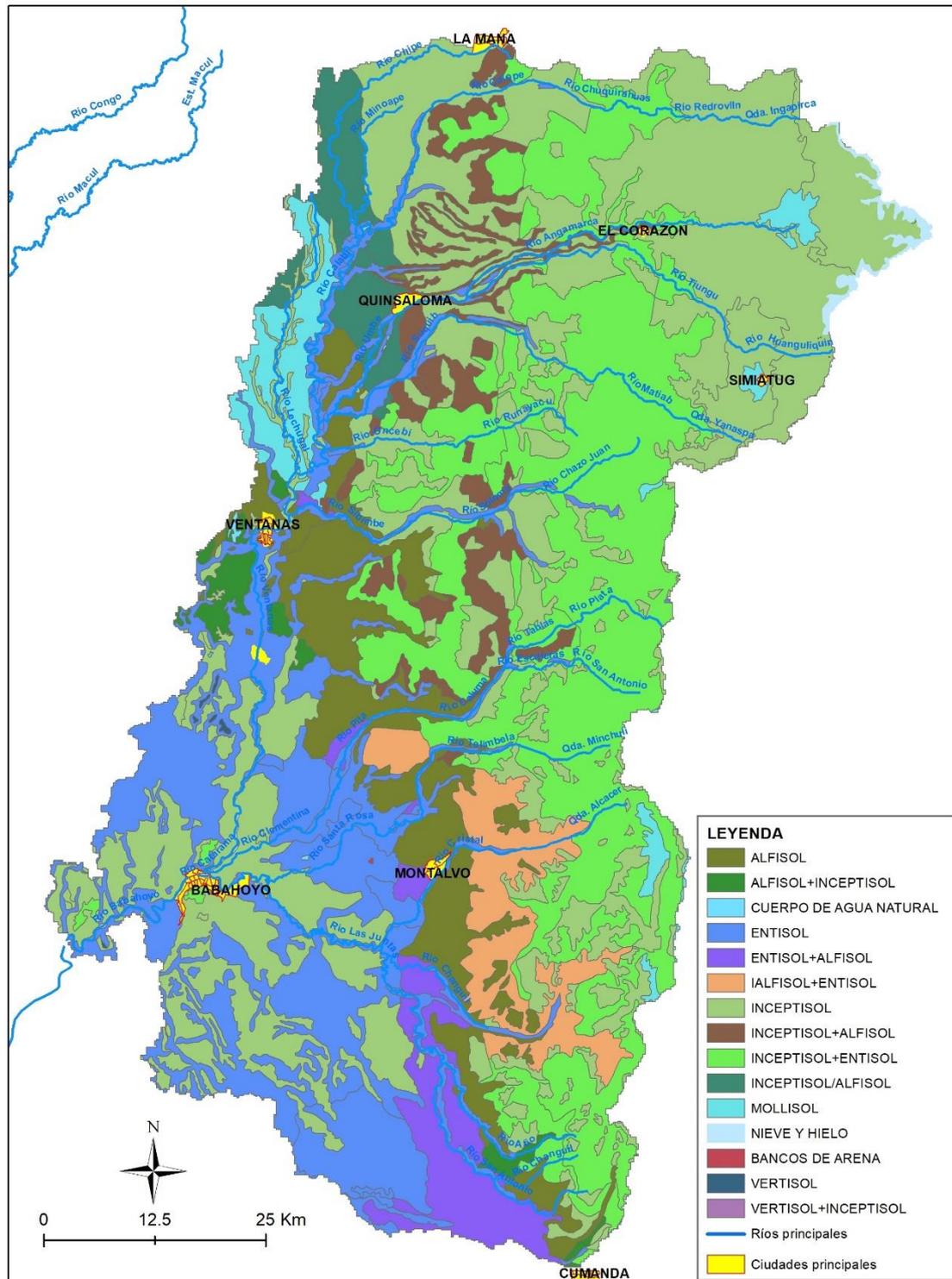


Figura 21. Clasificación taxonómica de los suelos.

Fuente: MAG, PRONAREG-ORSTOM, 1983-1986.

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

2. Centros poblados e infraestructura

Dentro de la cuenca se localiza la ciudad de Babahoyo, que es la capital de la provincia de Los Ríos; y, además, 11 cabeceras cantonales, las mismas que en su mayoría están conectadas por la red vial primaria estatal. La red vial primaria, de segundo y tercer orden más los caminos vecinales, cubren en gran parte la conectividad dentro de la cuenca que permite la fluidez de las actividades agrícolas del 83% del territorio (Figura 22).

La población total de los principales centros poblados dentro de la cuenca es de 183.104 habitantes, representa el 34,57% de la población total del área de estudio (Tabla 13).

Tabla 13.

Población de las principales ciudades en la cuenca.

PROVINCIA	CIUDAD	POBLACIÓN
BOLÍVAR	CALUMA	6.269
	ECHEANDÍA	6.170
	LAS NAVES	1.485
GUAYAS	ALFREDO BAQUERIZO MORENO	8.343
	SIMÓN BOLÍVAR	7.300
LOS RÍOS	BABAHOYO	90.191
	MONTALVO	12.734
	PUEBLO VIEJO	7.871
	VENTANAS	38.168
	QUINSALOMA	4.573
TOTAL:		183.104

Fuente: INEC, 2010.

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

La red vial en el área de estudio cubre una longitud aproximada de 4.600 km, lo que equivale a 0,61 km/km², mayor a la densidad nacional que es de 0,32 km/km² (Tabla 14).

Tabla 14.

Red vial en área de estudio.

CAMINOS	LONGITUD (km)
PAVIMENTADO	221,84
LASTRADO	1.752,78
VERANO	1.987,68
HERRADURA	634,84
TOTAL:	4.597,13

Fuente: PNGIRH, 2016.

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

Los principales sistemas de riego son estatales, con una superficie de área regable de 13.446 ha. En la provincia de Guayas se encuentra el Sistema Chilintomo, y en la provincia de Los Ríos los sistemas Babahoyo y Catarama (Tabla 15).

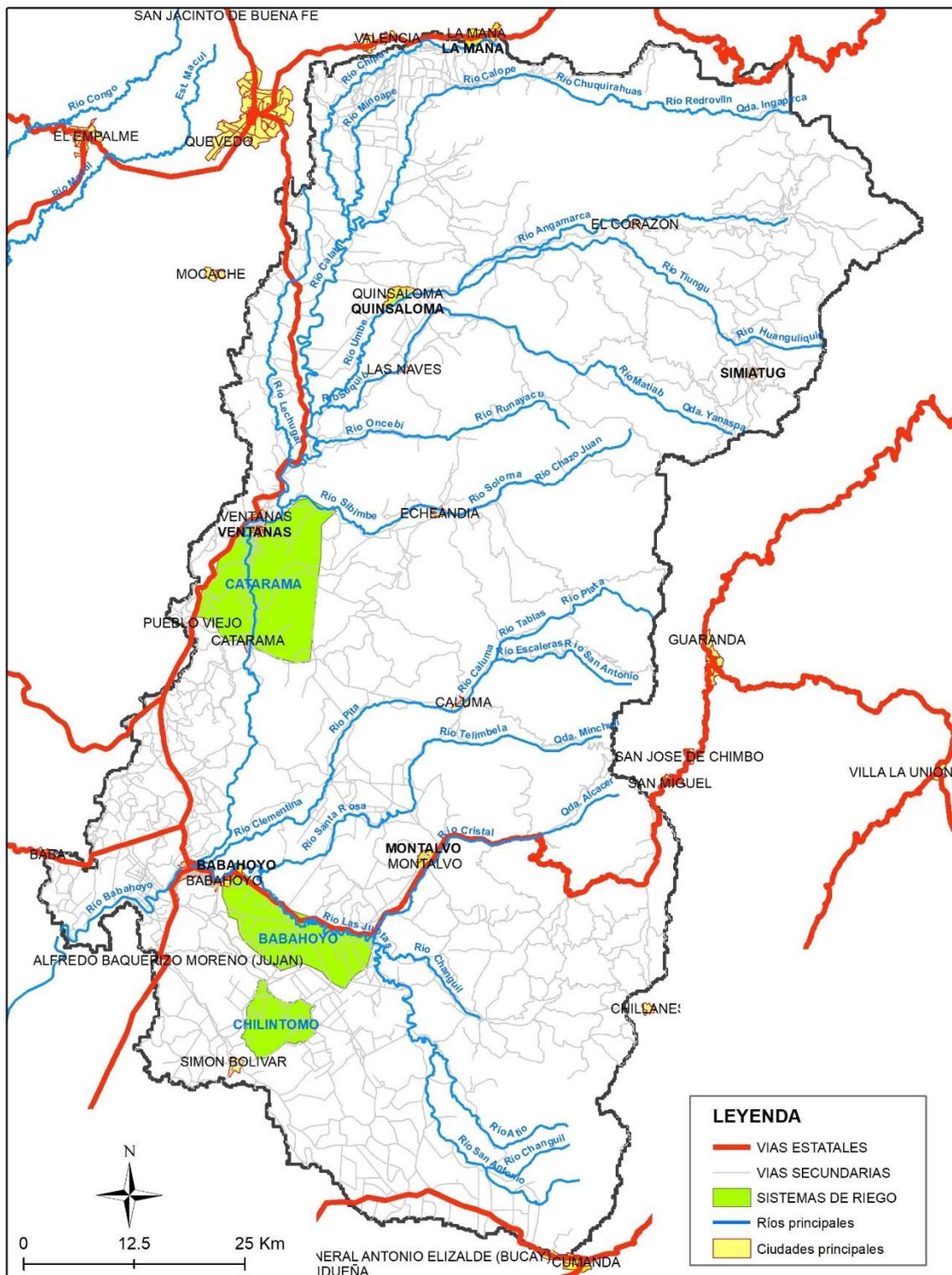


Figura 22. Centros poblados e infraestructuras principales.

Fuente: PNGIRH, 2016.

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

Tabla 15.

Principales Áreas de Riego. Presas y Embalses, SENAGUA, 2012; Sistemas de riego estatales, MAGAP.

Nombre del Sistema de Riego	Provincia	Área Regable (ha)	Área Regada (ha)	Número Usuarios	Caudal Concesionado (l/s)
CHILINTOMO	Guayas	1.539	800	86	2.450
BABAHOYO	Los Ríos	10.507	5.000	922	4.300
CATARAMA	Los Ríos	1.400	722	500	6.800
TOTAL:		13.446	6.522	1.508	13.550

3. Población

De acuerdo con la información del censo de población, realizado en noviembre del año 2010 por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). La estructura de la pirámide poblacional refleja una población joven con rápido crecimiento (Figura 23). Esto puede llevar también a incrementar la demanda de agua tanto de la “cantidad útil agua” total de la cuenca como la de consumo en otros usos como el agrícola.

La población en la cuenca del río Babahoyo es de 529.636 habitantes (Tabla 16). Esta población está compuesta por 268.686 hombres y 260.950 mujeres, con una densidad poblacional promedio de 70 hab./km² (Figura 24).

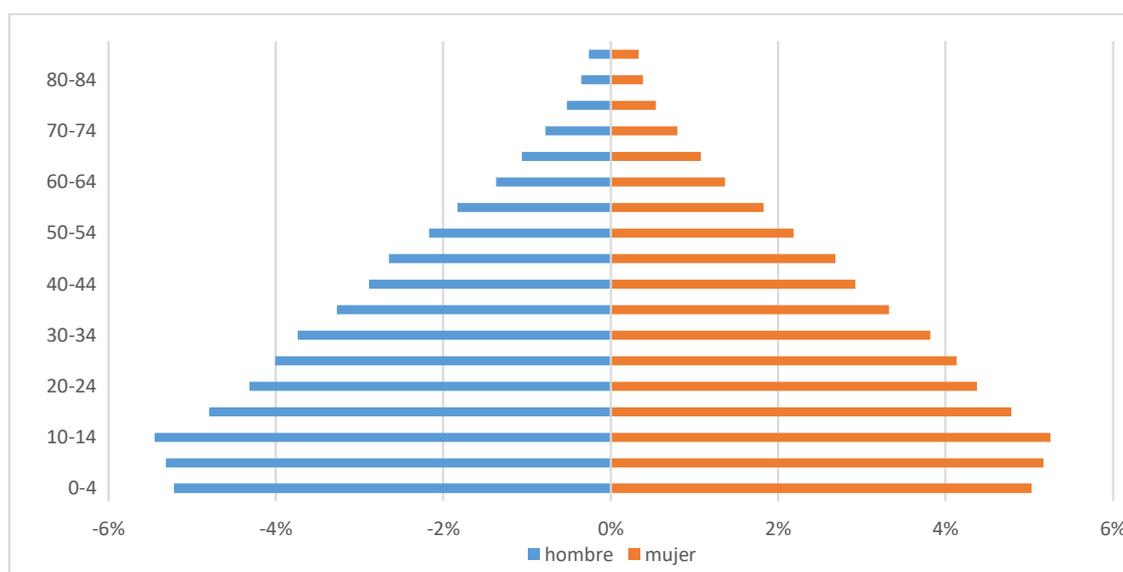


Figura 23. Estructura poblacional, según censo de Población y Vivienda.

Fuente: INEC, 2010.

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

Tabla 16.

Población de la cuenca en estudio.

PROVINCIA	POBLACIÓN	CANTÓN	POBLACIÓN
BOLÍVAR	104.471	CALUMA	13.123
		CHILLANES	9.973
		CHIMBO	5.010
		ECHEANDÍA	12.114
		GUARANDA	43.776
		LAS NAVES	6.092
		SAN MIGUEL	14.383
COTOPAXI	4.,780	LA MANÁ	13.310
		PANGUA	21.935
		PUJILÍ	7.514
		SALCEDO	21
GUAYAS	63.735	ALFREDO BAQUERIZO MORENO	16.726
		GNRAL. ANTONIO ELIZALDE	8.326
		MILAGRO	6.753
		NARANJITO	10.735
		SIMÓN BOLÍVAR	21.195
LOS RÍOS	318.650	BABA	5.637
		BABAHOYO	139.530
		MOCACHE	4.105
		MONTALVO	24.164
		PUEBLOVIEJO	20.483
		QUEVEDO	16.209
		QUINSALOMA	16.476
		URDANETA	29.263
		VALENCIA	624
VENTANAS	62.159		
TOTAL	529.636		529.636

Fuente: INEC, 2010.

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

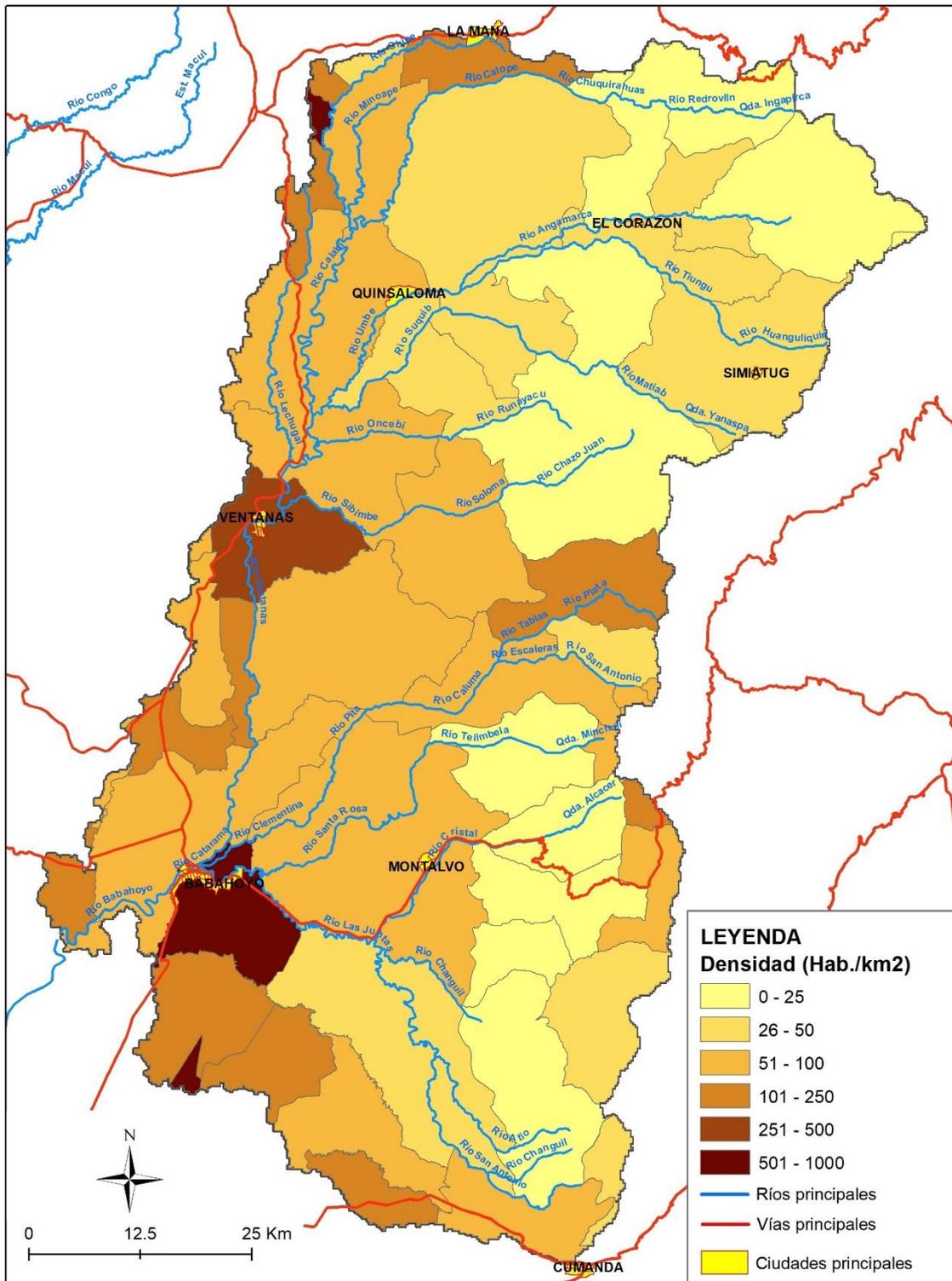


Figura 24. Mapa de densidad poblacional.

Fuente: INEC, 2010.

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

4. Marco jurídico e institucional

Para el estudio del marco jurídico e institucional en relación a los recursos hídricos, es considerado, en primer lugar, lo referido en la Constitución del año 2008, sobre los recursos hídricos (4.1) para pasar, a continuación, a realizar un examen más detallado del resto de normativa vigente (4.2) y concluye con una visión general de fortalecimiento en el marco jurídico en la aplicación de normativas técnicas ante la formulación de la adaptación de los planes de gestión integrada de los recursos hídricos ante el cambio climático (4.3).

4.1. Constitución de la Republica de Ecuador

La Constitución de la República del Ecuador, como carta magna, se encuentra vigente desde su publicación en el Registro Oficial del 20 de octubre de 2008. La misma que fue redactada entre el 30 de noviembre de 2007 y el 24 de julio del 2008, por la Asamblea Nacional Constituyente en Montecristi (Manabí) y aprobada a través de referéndum constitucional el 28 de septiembre de 2008.

La Constitución, en materia de los recursos hídricos y cambio climático y en relación al presente estudio, trata fundamentalmente de los siguientes temas: Derecho humano al agua; Planificación de los recursos hídricos, Protección del patrimonio natural y Competencias de los Gobiernos Autónomos Descentralizados.

A continuación, se desarrollan sucintamente los principales preceptos dedicados a cada uno de los temas.

Derecho humano al agua.

En relación a este tema la Constitución afirma que el derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable, el mismo que se constituye como patrimonio nacional de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida. (Art. 12)

Así mismo, dentro de los deberes primordiales del Estado, se garantiza sin discriminación alguna, el efectivo goce de los derechos establecidos en la Constitución, enumerándose entre ellos el del agua para sus habitantes. (Art. 3, numeral 1)

El agua es de dominio inalienable e imprescriptible del Estado y constituye un elemento vital para la naturaleza y para la existencia de los seres humanos. Se prohíbe toda forma de privatización del agua. (Art. 318). Y con la finalidad de no poner en riesgo el derecho al agua, se afirma que el Estado debe promover la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías limpias y sanas. (Art. 413).

Planificación de los Recursos Hídricos

Dentro de los deberes primordiales del Estado se encuentra la planificación del desarrollo nacional. Para lo cual, el Estado a través de la autoridad única del agua, es el responsable de la planificación y gestión de los recursos hídricos que se destinará para consumo humano, riego que garantice la soberanía alimentaria, caudal ecológico y actividades productivas, en este orden de prelación. Dentro de lo cual, la gestión del

agua es exclusivamente de las autoridades públicas o comunitarias, que será responsable de su planificación, regulación y control, para lo cual cooperará y coordinará con la gestora ambiental para garantizar el manejo del agua con un enfoque ecosistémico. (Arts. 318 y 412).

Protección del patrimonio natural

La Constitución dedica un capítulo exclusivo para los derechos de la naturaleza, dentro del cual, no se menciona específicamente a los recursos hídricos, pero se sobreentiende por ser un elemento vital para la naturaleza, la misma que tiene el derecho a que se la respete íntegramente su existencia y el mantenimiento, así como la regeneración de sus ciclos vitales, y su restauración. (Arts. 71 y 72). Asimismo, se estipula en el Art. 73 que: “El Estado aplicará medidas de precaución y restricción para las actividades que puedan conducir a la extinción de especies, la destrucción de ecosistemas o la alteración de los ciclos naturales.” Siendo el ciclo hidrológico un ciclo natural, se deben contemplar medidas de precaución con la finalidad de no alterarlo en cantidad y calidad.

También, en relación a la conservación de suelos y su capa fértil, se indica la necesidad de tener un marco normativo para la protección y uso sustentable que prevenga la degradación que provoca la contaminación, la desertificación y la erosión. Para las áreas afectadas por los procesos de degradación y desertificación, el Estado desarrollará y estimulará proyectos de forestación, reforestación y revegetación (Art. 409)

Además, el Estado debe garantizar la conservación, recuperación y manejo integrado de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico (Art. 411). Asimismo, el Estado debe regular la conservación, manejo y uso sustentable, recuperación, y limitaciones de dominio de los ecosistemas frágiles y amenazados; entre otros, los páramos, humedales, bosques y manglares (Art. 406).

En relación a la adaptabilidad al cambio climático, se especifica en el Art. 414 que: “El Estado adoptará medidas adecuadas y transversales para la mitigación del cambio climático, mediante la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero, de la deforestación y de la contaminación atmosférica; tomará medidas para la conservación de los bosques y la vegetación, y protegerá a la población en riesgo.”

Competencias de los gobiernos autónomos descentralizados

El Estado es organizado en forma de república y es gobernado de manera descentralizada (Art. 1). Para lo cual, el estado es distribuido territorialmente en regiones, provincias, cantones y parroquias rurales. Por razones de conservación ambiental, étnico-cultural o de población podrán constituirse regiones especiales (Art. 242).

En relación a los recursos hídricos las competencias del Estado y de los gobiernos autónomos descentralizados son las siguientes:

- El Estado: Planificación nacional, áreas naturales protegidas, los recursos naturales y recursos hídricos. (Art. 261)
- Regiones: Gestionar el ordenamiento de cuencas hidrográficas y propiciar la creación de los consejos de cuenca. (Art. 262)
- Provincias: Ejecutar, en coordinación con el gobierno regional, obras en cuencas y microcuencas; y planificar, construir, operar y mantener los sistemas de riego. (Art. 263)
- Cantones: Prestar los servicios públicos de agua potable, alcantarillado, y depuración de aguas residuales; regular, autorizar y controlar la explotación de materiales áridos y pétreos, que se encuentren en los lechos de los ríos, lagos, playas de mar y canteras. (Art. 264)
- Parroquias rurales: Gestionar, coordinar y administrar los servicios públicos que le sean delegados o descentralizados por otros niveles de gobierno. (Art. 267)

Con la finalidad de cumplir los mandatos constitucionales antes descritos en los temas del derecho al agua, protección de patrimonio natural a través de las competencias exclusivas del Estado y de los Gobiernos Autónomos Descentralizados, es necesario contar con la planificación y gestión integral de los recursos hídricos a nivel de cuencas hidrográficas, en el cual, también deben ser contempladas las actividades que puedan afectar la calidad y cantidad de agua y el equilibrio de los ecosistemas, en especial las fuentes y zonas de recarga de agua. (Art. 411).

Es fácil observar que algunos preceptos constitucionales han sido objeto de desarrollo mientras que otros (por ejemplo, todo lo relativo a las regiones) no ha alcanzado un desarrollo constitucional, probablemente porque no se ha sentido la necesidad de introducir un nivel más de gobierno territorial.

El desarrollo fundamental de todos estos temas ha operado a través de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua sobre lo que se trata a continuación.

4.2. Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamientos del Agua (LORHUyA).

La Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (LORHUyA), entró en vigencia a partir de la promulgación en el Registro Oficial N° 305 del 6 de agosto de 2014. En virtud de cumplir el objeto de la Ley, se enmarca en cuatro principales directrices que son: el derecho humano al agua; regular y controlar los recursos hídricos; usos y aprovechamientos del agua; y la gestión integrada de los recursos hídricos.

Para el objetivo del presente estudio se estructurará un esquema de mandato para actualización de Ley en relación a una secuencia lógica similar a la que se esquematiza en el enfoque técnico, el cual se describe de la siguiente manera:

Los principios de la LORHUyA

El contenido definitorio de la Constitución se repite, con cambios no esenciales, en la LORHUyA (art. 1): el agua es “patrimonio nacional estratégico de uso público, dominio inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida, elemento vital de la naturaleza y fundamental para garantizar la soberanía alimentaria” (Figura 25). Luego, son resumidos los principios de la ley en donde se mencionan algunos de los ya expresados en el artículo 1 y se adiciona la integración de todas las aguas en el ciclo hidrológico, el mandato de conservación del agua como recurso natural, la prohibición de cualquier tipo de propiedad privada, la garantía del derecho humano al agua, el “acceso equitativo al agua”, la “gestión integral, integrada y participativa del agua” y que la gestión del agua es pública o comunitaria (Art. 4). Algunos de estos principios son objeto de posterior desarrollo. Destaca la extensa exposición de supuestos para hacer realidad la prohibición de cualquier forma de privatización del agua (Art. 6), o la aparición de la cuenca hidrográfica (y su definición) como manifestación de lo que se entiende por gestión integrada de los recursos hídricos (Art. 8).

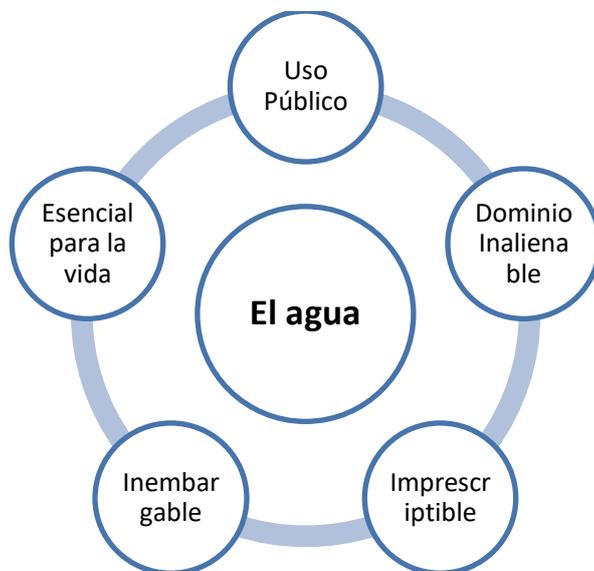


Figura 25. Organigrama de los principios básicos del agua

Fuente: Constitución de la República y LORHUyA.

Derecho humano al agua

La LORHUyA, de forma congruente con las referencias constitucionales, contiene una serie de preceptos sobre el derecho humano al agua (Art. 57 y subsiguientes). Define este derecho como el de todas las personas a disponer de agua limpia, suficiente, salubre, aceptable, accesible y asequible para el uso personal y doméstico en cantidad, calidad, continuidad y cobertura. Se indica que también forma parte de este derecho “el acceso al saneamiento ambiental que asegure la dignidad humana, la salud, evite la contaminación y garantice la calidad de las reservas de agua para consumo humano”.

Se regulan otras características del derecho (fundamental e irrenunciable) y se remite a la Autoridad Única del Agua para que establezca, de conformidad con las normas y

directrices nacionales e internacionales, la “cantidad vital de agua por persona, para satisfacer sus necesidades básicas y de uso doméstico, cuyo acceso configura el contenido esencial del derecho humano al agua” (Art. 69).

Competencias en materia de los Recursos Hídricos

Por ser el agua, patrimonio nacional y ser un sector estratégico; las decisiones, control y competencias son exclusivos del estado, las mismas que se ejercen concurrentemente entre el Gobierno Central y los Gobiernos Autónomos Descentralizados (Art. 1).

Con la finalidad de buscar la globalidad dentro de las competencias designadas al Estado Central y Gobiernos Autónomos Descentralizados, de acuerdo a la LORHUyA (Art. 15), se crea el Sistema Nacional Estratégico del Agua, el mismo que está conformado por la Autoridad Única del Agua, quien forma parte relevante y dirige tal sistema, pero esto no se concreta en ninguna entidad específica.

En el Reglamento del 31 de marzo de 2015 en el que se designa específicamente a la Secretaría del Agua como la Autoridad Única del Agua e integra una variada nómina de entidades como el Consejo Intercultural y Plurinacional del Agua, las instituciones de la función ejecutiva que cumplan competencias vinculadas a la Gestión Integral de los Recursos Hídricos, la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), adscrita a la Autoridad Única del Agua, los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs) y los Consejos de Cuencas.

La Autoridad Única del Agua es la clave de todo y se define como “persona jurídica de derecho público” y responsable de la rectoría, planificación y gestión de los recursos hídricos, siendo su gestión “desconcentrada en el territorio” (en lo que se tiene que ver la necesaria conexión con la cuenca hidrográfica como unidad de gestión).

La Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA) creada antes de la aprobación de la LORHUyA, mediante Decreto Ejecutivo de marzo de 2014, es definida como un “organismo de derecho público, de carácter técnico-administrativo, adscrito a la Autoridad Única del Agua, con personería jurídica, autonomía administrativa y financiera, con patrimonio propio y jurisdicción nacional” (Art. 21), cuya función es: Regulación y control de la gestión integral e integrada de los recursos hídricos, de la cantidad y calidad de agua en sus fuentes y zonas de recarga, calidad de los servicios públicos relacionados al sector agua y en todos los usos, aprovechamientos y destinos del agua (art. 21).

Las relaciones del ARCA con la Secretaría del Agua son objeto de tratamiento en el Reglamento, con lo que queda perfectamente establecida la relación entre un órgano de control de la actividad de la Secretaría (el ARCA), siendo determinante su intervención en el otorgamiento de autorizaciones para el uso de agua por parte de la Secretaría pero que, a su vez, es dependiente de ésta y que, como tal, tiene que ser evaluada en su función precisamente por la Secretaría.

El Consejo Intercultural y Plurinacional del Agua, definido para ser integrado por los representantes de los pueblos y nacionalidades indígenas, afroecuatorianos y montubios, sistemas comunitarios de agua potable y riego, organización de usuarios por sectores económicos, organizaciones ciudadanas de consumidores de servicios públicos y universidades. Este consejo aún no se encuentra conformado, hasta la fecha de redacción de la presente investigación.

Las atribuciones principales son las siguientes: control social sobre la garantía y el ejercicio del derecho humano al agua y su distribución equitativa; participar en la formulación, evaluación y control de las políticas públicas de los recursos hídricos; participar en la formulación de las directrices y seguimiento del Plan Nacional de Recursos Hídricos y otros que se relacionan directamente con la participación social en relación al recurso hídrico.

En relación con las competencias, son designados los Gobiernos Autónomos Descentralizados, de nivel de gobiernos provinciales y municipales. Los gobiernos provinciales tienen la competencia exclusiva de planificar, construir, operar y mantener sistemas de riego; y los gobiernos municipales la de prestar los servicios públicos de agua potable, alcantarillado, depuración de aguas residuales.

Los Consejos de Cuenca, son de carácter consultivo, liderado por la Autoridad Única del Agua e integrado por los representantes de las organizaciones de usuarios, con la finalidad de participar en la formulación, planificación, evaluación y control de los recursos hídricos en las respectivas cuencas. (Art. 25)

A continuación, es presentado un organigrama con los niveles de entidades públicas y privadas en materia de recursos hídricos (Figura 26).

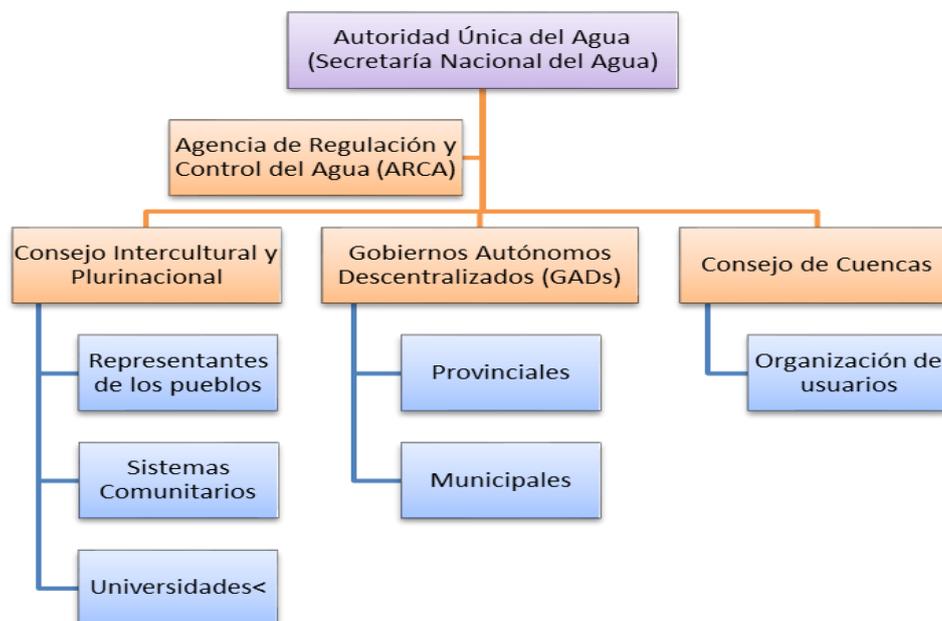


Figura 26. Organigrama de entidades públicas y privadas en materia de los Recursos Hídricos.

Fuente: LORHUy A.

Planificación y gestión de los recursos hídricos

Siguiendo las definiciones constitucionales, la LORHUyA califica al agua como dominio inalienable, imprescriptible e inembargable (Art. 1). Contiene la expresión “dominio hídrico público” para reunir los variados “elementos naturales” (Art. 10) que se integrarían en el mismo. En ese precepto se enumeran los ríos, lagos, lagunas, humedales, nevados, glaciares y caídas naturales; las aguas subterráneas, los acuíferos a los efectos de protección y disposición de los recursos hídricos.

Igualmente se consideran dominio hídrico público, las obras o infraestructura hidráulica de titularidad pública y sus zonas de protección hidráulica. El Reglamento contiene una serie de definiciones y aclaraciones sobre esta cuestión capital que contribuyen a hacer más fácil la comprensión y, sobre todo, la aplicación de todos estos conceptos.

De conformidad con la modernidad que impregna la LORHUyA, existen unos preceptos dedicados a la planificación hídrica (Arts. 28 y subsiguientes). En ellos se regula la fundamental competencia de la Autoridad Única del Agua en su elaboración y aprobación, y se contiene un precepto sobre el contenido de los planes hídricos y otro sobre la elaboración de los planes.

La LORHUyA regula todo lo relativo a la utilización del agua (art. 86 y subsiguientes). Esta regulación parte de la reproducción del orden de prelación entre los diversos destinos del agua que ya se ha visto en la Constitución, precisando la Ley que dentro del “riego que garantice la soberanía alimentaria” hay que tomar en cuenta otros usos como son el abrevadero de animales, la acuicultura y otras actividades de la producción agropecuaria alimentaria doméstica. Se introduce una todavía más difícil posibilidad de entendimiento en relación con las actividades productivas que figuran en último lugar en el orden de prelación. Ello porque también el abrevadero de animales, la acuicultura y “otras actividades de la producción agropecuaria alimentaria doméstica” forman parte del concepto de actividad productiva no ofreciendo ningún criterio la LORHUyA para saber cuándo una actividad podrá considerarse dentro de la situación privilegiada del “riego que garantice la soberanía alimentaria” o cuando estará en el último lugar (lo que también tiene trascendencia sobre el sistema tarifario, muy privilegiado para los aprovechamientos que se encuadren en la soberanía alimentaria).

Esta diferenciación de conceptos se aplica también a la tipología de autorizaciones. Se llama “autorización para uso de agua” a la vinculada para el consumo humano o para el riego para la soberanía alimentaria. Se define como “autorización para el aprovechamiento productivo del agua”, al resto.

La unidad territorial para la gestión del agua es la cuenca hidrográfica (Art. 8). Igualmente, y dentro de los principios de la gestión de los recursos hídricos, el artículo 35 se refiere a la cuenca hidrográfica que “constituirá la unidad de planificación y Gestión Integrada de los Recursos Hídricos”.

De forma consecuente, la LORHUyA contiene una definición de cuenca hidrográfica que es “la unidad territorial delimitada por la línea divisoria de sus aguas que drenan superficialmente hacia un cauce común, incluyen en este espacio poblaciones, infraestructura, áreas de conservación, protección y zonas productivas” (Art. 8).

Se encarga a la Autoridad Única del Agua que apruebe la delimitación concreta de las cuencas hidrográficas y su posible agrupación a efectos de planificación y gestión, así como la atribución de las aguas subterráneas a la cuenca que corresponda.

La protección y conservación de los recursos hídricos.

En uno de los principios de la LORHUyA (Art. 4), se clarifica sobre la protección y conservación del agua como recurso natural mediante la gestión sustentable y sostenible que garantice en calidad y cantidad el agua. Al igual, se estipula en el artículo 12, sobre la protección, recuperación y conservación de fuentes en el cual el estado, los sistemas comunitarios, juntas de agua potable y juntas de riego, los consumidores y usuarios, son corresponsables en la protección, recuperación y conservación de las fuentes de agua. También, en los contenidos de los planes hídricos (art. 29) se clarifica su contenido en el Plan Nacional de Recursos Hídricos y en los Planes de Gestión Integral de los recursos Hídricos por Cuencas Hidrográficas, en los cuales se indica sobre los factores de conservación y protección de agua y de los ecosistemas; la preservación del agua para el cumplimiento del plan de cuencas; y los medios de salvaguardar las fuentes de agua y sus áreas de protección hídrica de las cuencas.

El Cambio climático en la planificación integral de los recursos hídricos

No se describe textualmente, sin embargo, se regulan por parte del estado las afectaciones de las actividades que de una u otra forma alterarían los recursos hídricos futuros tanto en calidad y cantidad del agua y busca el equilibrio de los ecosistemas que abastecen agua para el consumo humano y riego. (Art. 14)

El Código Orgánico Ambiental expedido en 2018, contiene apartados sobre adaptación al cambio climático, que no especifica su vinculación tácita con los recursos hídricos o su planificación, sin embargo; insta a las instituciones gubernamentales a la aplicación coordinada y conjunta de medidas de mitigación y adaptación, multisectorial frente al cambio climático.

4.3. Visión general de fortalecimiento jurídico ante el cambio climático.

La Constitución de la Republica de Ecuador y la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamientos dentro del marco jurídico que ampara a los recursos hídricos, se clarifica los derechos humanos al agua, la planificación de los recursos hídricos, la protección natural y las competencias de los Gobiernos Autónomos Descentralizados. Sin embargo, la descripción del cambio climático no se describe textualmente, pero si la regulación estatal de las actividades que alteran los recursos hídricos en cantidad y calidad.

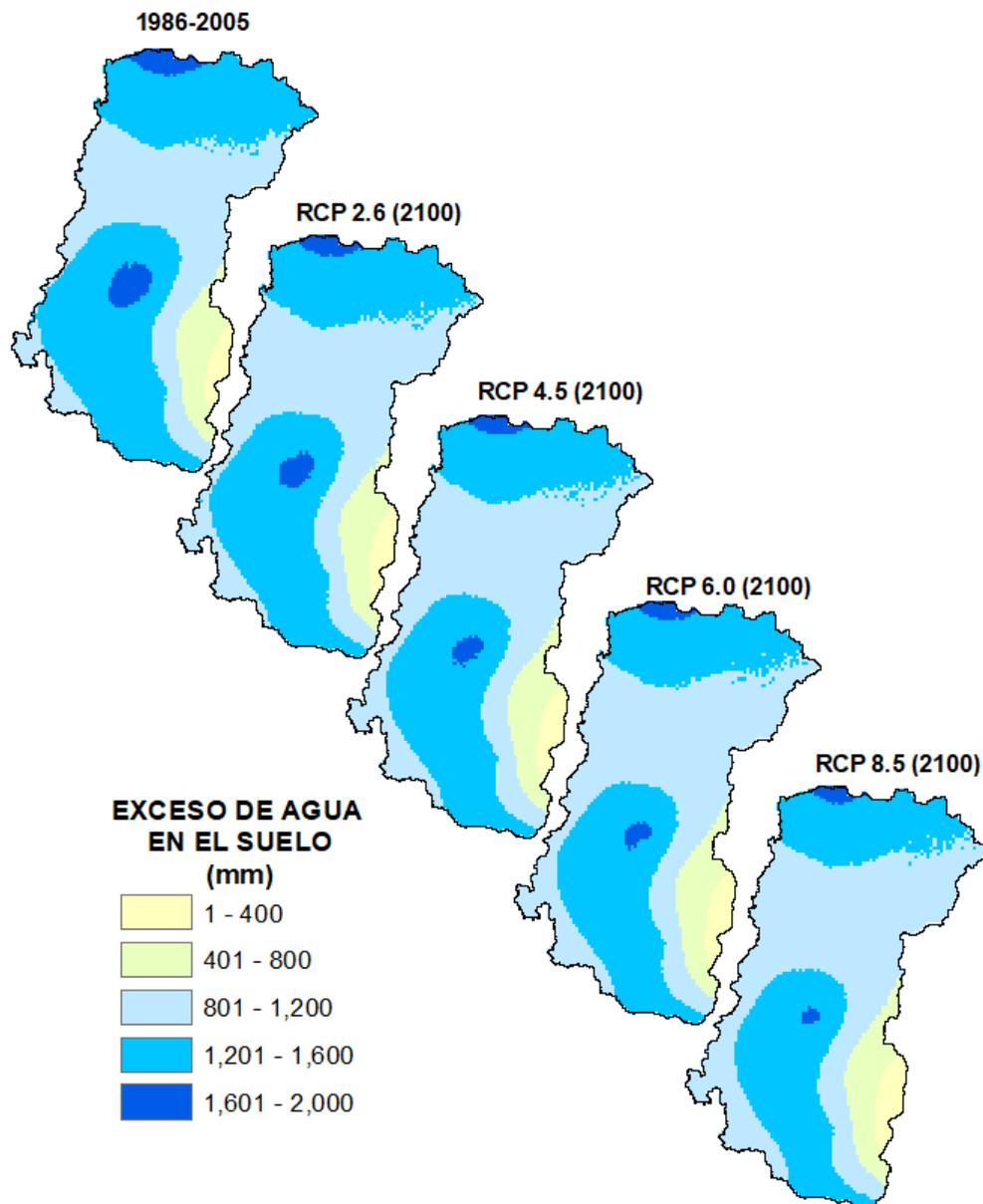
Ante lo cual, la entidad competente en materia de los Recursos Hídricos como la Autoridad Única del Agua que integra al Consejo Intercultural y Plurinacional del Agua, Agencia de Regulación y Control del Agua, Gobiernos Autónomos Descentralizados y Consejos de Cuencas, dentro de sus competencias deberán estar normada en la reglamentación de la LORHUyA el consenso para la aprobación y aplicabilidad de normativas que coadyuven en la formulación de la adaptación de los planes de gestión integrada de los recursos hídricos de las cuencas hidrográficas ante el cambio climático.

Sin embargo, el marco jurídico en relación a la planificación de los recursos hídricos debe considerar el uso de metodologías que permita la cuantificación volumétrica de los recursos hídricos en las cuencas hidrográficas sobre los posibles escenarios futuros de oferta y demanda del agua ante el inequívoco cambio climático, lo que conlleva a una reconfiguración en la asignación de los usos y aprovechamientos del recurso hídrico.

La presente investigación, es un inicio de consideración de una base metodológica que permita avizorar los posibles cambios futuros de las cantidades del agua en el ciclo hidrológico que podrían afectar el cumplimiento de la asignación del recurso hídrico en una cuenca hidrográfica.

Capítulo IV.

DATOS Y METODOLOGÍA



IV. DATOS Y METODOLOGÍA

La metodología en el marco de investigación de la presente tesis doctoral, se orienta en la identificación de los posibles cambios de los patrones de riesgo que se asocian al clima (incremento de temperatura), mediante la aplicación de modelamiento hidrológico, orientado para la toma de decisión, que permita la incorporación de medidas futuras de adaptabilidad en la sostenibilidad de los recursos hídricos en la planificación de la cuenca del río Babahoyo.

El desarrollo metodológico utilizado parte del modelamiento hidrológico para el cálculo del volumen de agua en los diferentes estados del ciclo hidrológico, lo que conforma el balance hídrico. Para dicho análisis es requerida la información de cobertura de suelos, cobertura vegetal, modelo digital del terreno y climatología. La data de clima es de frecuencia diaria para un periodo comprendido entre los años 1986 y 2005.

Posteriormente se realiza el modelamiento del balance hídrico actual y estimado para fin de siglo (2081 - 2100), considerando los cuatro escenarios RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 en los cuales las temperaturas medias incrementan en 1,00°C, 1,85°C, 2,25°C y 3,70°C, respectivamente.

De los resultados de BH son comparados los índices de aridez (IDA) mensual, mediante métodos cualitativos que corresponde a mapas que representan espacialmente los cambios de humedad y tablas que permiten la apreciación de los valores cuantitativos. Dicha información es la base para optar por las medidas de adaptación de la planificación integral de los recursos hídricos ante el cambio climático, que permita la disminución de la vulnerabilidad y la exposición de las posibles zonas afectadas (Figura 27).

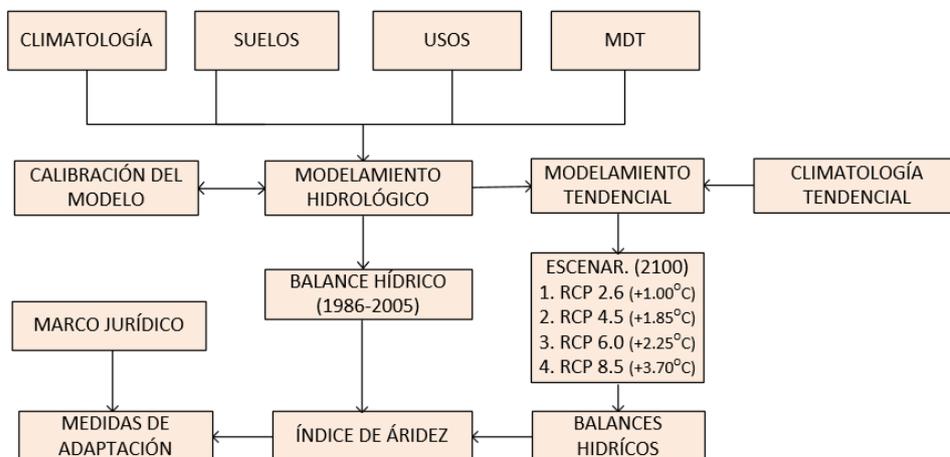


Figura 27. Metodología aplicada en la presente investigación.

Elaboración: Paúl Sotomayor G.

1. Datos hidrometeorológicos: recolección, análisis, validación

La data hidrometeorológica corresponde a los registros obtenidos de las estaciones meteorológicas e hidrológicas que son parte de la red nacional de estaciones. Estas registran determinada data de diferentes variables meteorológicas e hidrológicas de acuerdo al objetivo de la estación.

Una red de estaciones hidrológicas o meteorológicas, es un conjunto de actividades para la recopilación de datos, diseñada y utilizada para cumplir un objetivo o un conjunto de objetivos compatibles. Una estación o instrumentos de medición hidrológica o meteorológica pueden ser parte de más de una red si sus datos se utilizan para más de una finalidad. (OMM, 2011).

En los años ochenta y noventa muchos países redujeron considerablemente sus redes hidrológicas, debido a la reducción presupuestaria que afectó a las instancias que estaban a cargo del control de los recursos hídricos (Pearson, 1998). Ecuador no fue excepción.

Definiéndose como una red básica (OMM, 2011), la que permita proporcionar un volumen de datos hidrológicos y meteorológicos, que excluya la posibilidad de cometer errores graves en la información sobre los recursos hídricos. Para ello, deberán verificarse como mínimo tres criterios:

1. Transferir los datos hidrológicos desde los lugares en que se recopilan los datos;
2. Disponer de un medio que permita estimar el volumen de datos hidrológicos o de su incertidumbre;
3. Entre las decisiones tomadas deberá existir la posibilidad de recopilar un mayor número de datos antes de optar por la decisión final.

En otras palabras, una red básica establecerá un marco de aplicación que permitirá cubrir las necesidades de procesar información para la toma de decisiones acerca de los diferentes usos y aprovechamiento del agua, y de las condiciones climatológicas extremas que provocan inundaciones y sequías.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1992), a través de sus miembros de diferentes países en el que evaluaron un estudio efectuado en 1991, se pronunciaron sobre las redes básicas, en la que se recomienda los valores de densidad mínima en referencia a los diferentes tipos de estaciones hidrometeorológicas para las diferentes zonas climáticas y geográficas (Tabla 17). Dentro del área de estudio, las estaciones seleccionadas por su distribución espacial e información registrada son un total de 10 estaciones, lo que representa una densidad de estación por cada 750 km², encontrándose por debajo de la densidad mínima recomendada por la OMM.

Tabla 17.

Valores mínimos recomendados de densidad de estaciones (superficie, en Km² por estación) (OMM, 1992).

Unidad Fisiográfica	Precipitación		Evaporación	Flujo fluvial	Sedimentos	Calidad del agua
	No registradoras	Registradoras				
Costa	900	9.000	50.000	2.750	18.300	55.000
Montaña	250	2.500	50.000	1.000	6.700	20.000
Planicie interior	575	5.750	5.000	1.875	12.500	37.500
Montes/ ondulaciones	575	5.750	50.000	1.875	12.500	47.500
Islas pequeñas	25	250	50.000	300	2.000	6.000
Áreas urbanas	-	10 a 20	-	-	-	-
Polos/Tierras áridas	10.000	100.000	100.000	20.000	200.000	200.000

La estación hidrológica de Zapotal en Lechugal, con código H0364, es la estación seleccionada de las 24 estaciones dentro de la cuenca del río Babahoyo, que cumple con las características de contener la serie con mayor cantidad de registros de datos diarios de caudales, por encima del 90% de datos con respecto a las demás estaciones y ubicarse espacialmente en el centro de la cuenca (Tabla 18). Lo que permite calibrar y validar la eficiencia del modelamiento hidrológico mediante la comparación de los datos diarios observados y simulados.

El periodo de recopilación de información es de 35 años (1981-2015), el registro de vacío de información de la serie para el periodo descrito es de 9,67%.

Tabla 18.

Datos de la estación hidrológica considerada para calibrar y validar el balance hídrico.

CÓDIGO	NOMBRE DE ESTACIONES	REGISTROS DIARIOS	LAGUNAS DE DATOS DIARIOS	PORCENTAJE DE LAGUNAS (%)
H0346	ZAPOTAL EN LECHUGAL	12.784	1.236	9.67

1.1. Análisis de la información meteorológica

Las treinta (30) estaciones que se encuentran dentro del área de influencia de la cuenca del río Babahoyo, registran datos diarios para las diferentes variables meteorológicas; las cuales, se clasifican en: Agrometeorológicas (2), Climatológicas Principales (6), Climatológicas Ordinarias (9), Pluviométricas (12) y Pluviográfica (1). Dichas estaciones registran una variable, algunas variables o todas las variables

meteorológicas que son las utilizadas para el modelamiento hidrológico, que son: precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, radiación solar, punto de rocío, humedad relativa y velocidad del viento.

Los primeros datos diarios registrados son desde los años sesenta del siglo pasado, la estación Pichilingue es la más antigua de la zona, registra datos desde 1963. El siguiente grupo de estaciones implementadas registra data desde 1981, que son la mayoría de las estaciones del área de influencia de la cuenca. El nombre de las estaciones con sus características y ubicación se presentan en la (Tabla 19) y (Figura 28).

Tabla 19.

Estaciones meteorológicas en el área de estudio.

CÓDIGO	NOMBRE	TIPO DE ESTACIÓN	ELEVACIÓN	LONGITUD	LATITUD
M0037	MILAGRO(INGENIO VALDEZ)	Agrometeorológica	13	79°35'57"W	02°06'56"S
M0006	PICHILINGUE	Agrometeorológica	120	79°27'42"W	01°06'00"S
M0218	INGENIO SAN CARLOS (BATEY)	Climatológica ordinaria	35	79°26'34"W	02°12'00"S
M0129	CALUMA	Climatológica ordinaria	350	79°17'34"W	01°37'12"S
M0466	VINCES INAMHI	Climatológica ordinaria	14	79°45'00"W	01°32'57"S
M0172	PUEBLO VIEJO	Climatológica ordinaria	19	79°32'29"W	01°31'05"S
M0124	SAN JUAN LA MANÁ	Climatológica ordinaria	215	79°14'43"W	00°54'59"S
M0391	PALLATANGA	Climatológica ordinaria	1.500	78°57'54"W	01°59'57"S
M0130	CHILLANES	Climatológica ordinaria	2.330	79°03'47"W	01°58'32"S
M0122	PILALO	Climatológica ordinaria	2.504	78°59'42"W	00°56'36"S
M0051	BABAHoyo-UTB	Climatológica principal	7	79°31'59"W	01°47'48"S
M0123	EL CORAZÓN	Climatológica principal	1.471	79°04'31"W	01°08'02"S
M1117	INSTITUTO TÉCNICO 3 DE MARZO	Climatológica principal	2.504	79°02'04"W	01°40'46"S
M1107	LAGUACOTO	Climatológica principal	2.622	78°59'54"W	01°36'51"S
M1069	CALAMACA CONVENIO INAMHI	Climatológica principal	3.402	78°49'08"W	01°16'33"S
M0388	RÍO SAN ANTONIO-MONJAS	Pluviográfica	2.200	79°13'59"W	01°56'59"S
M0465	VENTANAS INAMHI	Pluviométrica	52	79°27'55"W	01°26'39"S
M0470	MOCACHE	Pluviométrica	55	79°29'38"W	01°10'36"S
M0471	ZAPOTAL-LOS RÍOS	Pluviométrica	141	79°19'02"W	01°21'10"S
M0374	SAN ANTONIO DEL DELTA (PATE)	Pluviométrica	260	79°14'49"W	00°52'03"S
M0368	MORASPUNGO-COTOPAXI	Pluviométrica	409	79°13'20"W	01°10'33"S
M0402	CHIMBO DJ PANGOR	Pluviométrica	1.452	79°00'16"W	01°56'23"S
M0370	RAMÓN CAMPAÑA	Pluviométrica	1.462	79°05'09"W	01°06'59"S
M0367	PINLLOPATA	Pluviométrica	2.259	79°01'33"W	01°08'26"S
M0404	CAÑI-LIMBE	Pluviométrica	2.800	78°59'25"W	01°46'18"S
M0385	SALINAS-BOLÍVAR	Pluviométrica	3.600	79°01'05"W	01°24'12"S
M0376	PILAHUIN	Pluviométrica	3.314	78°43'55"W	01°18'06"S
M0132	BALZAPAMBA	Climatológica ordinaria	920	79°10'00"W	01°46'16"S
M0039	BUCAY	Climatológica principal	480	79°08'00"W	02°11'44"S
M0383	ECHEANDÍA	Pluviométrica	370	79°16'16"W	01°25'55"S

Fuente: INAMHI. Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

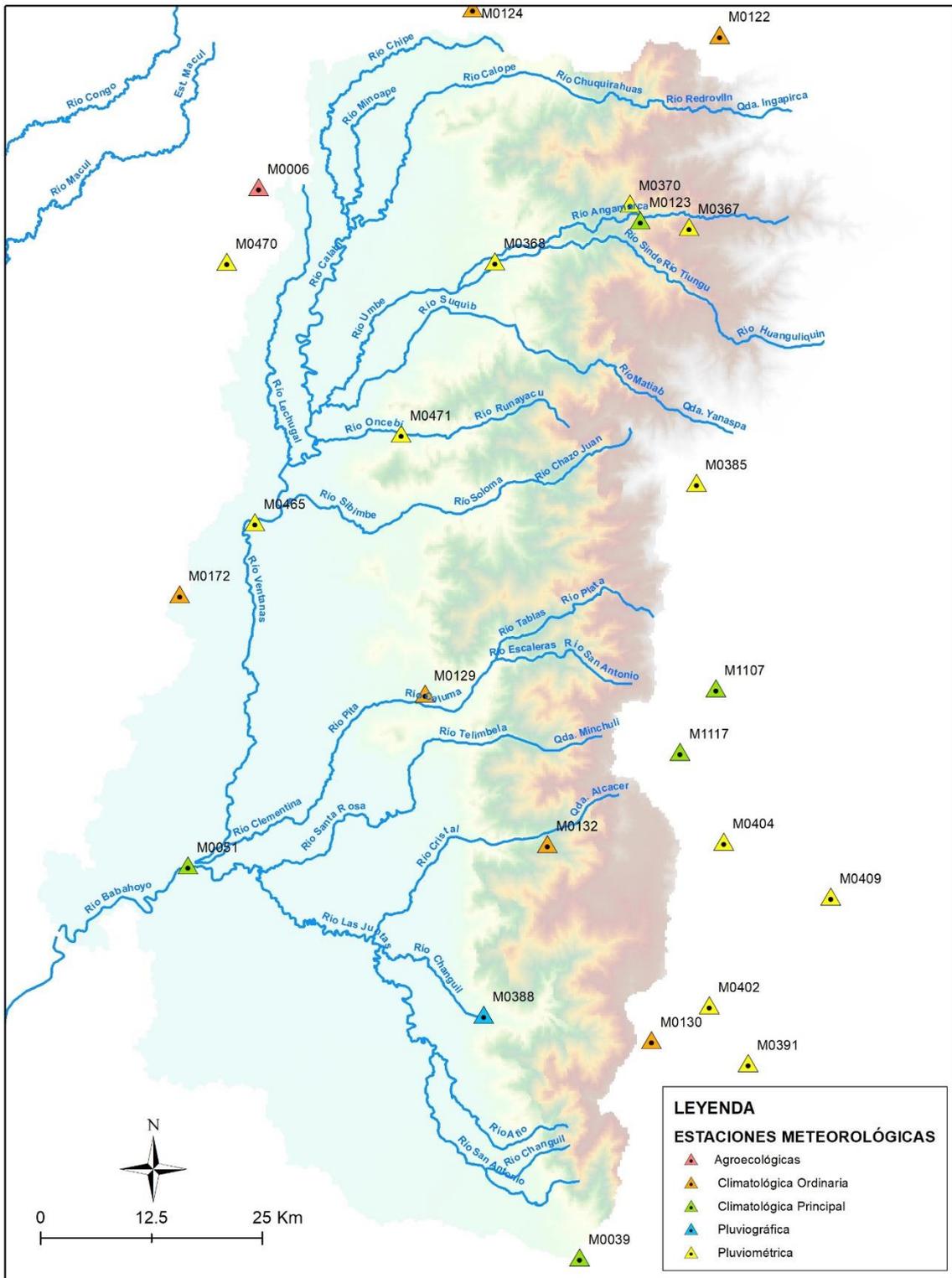


Figura 28. Estaciones meteorológicas en el área de estudio.

Fuente: INAMHI.

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

1.2. Complementación de datos diarios

En la actualidad y a nivel mundial existen varias bases de datos de precipitación con información a escala mensual y anual (Mitchell and Jones, 2005; Becker et al., 2013) y a nivel regional (Klein-Tank et al., 2002; Li et al., 2009). Sin embargo, la precipitación de registro diario ha sido relegado en la investigación del clima a un segundo plano por la dificultad existente para trabajar con observatorios de diferentes características y especialmente de diferentes fuentes (Vicente-Serrano et al., 2010).

Existen muchos estudios que complementan series de precipitación diarias, como la expuesta en el X Congreso Internacional AEC: Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio (Alicante, 2016).

Serrano-Notivoli, Beguería, Saz, De Luis, (2016), presentan un método de reconstrucción de series que permite filtrar y complementar series originales y crear series continuas; para lo cual, utiliza dos valores de referencia: predicción binomial (PB), que expresa la probabilidad de que un día sea seco o húmedo, y, predicción de magnitud (PM) que es la cantidad de precipitación estimada.

En la presente tesis doctoral para rellenar series diarias fueron utilizados dos métodos. El primero, que es propio del sistema de modelamiento hidrológico que es un generador de series climáticas de datos diarios (WXGEN) para las variables de precipitación, temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento. El segundo, denominado complementar datos diarios de dos estaciones correlativas (CDDDEC), que es una contribución de un método desarrollado en la presente investigación para complementar las series de dos estaciones con una alta correlación que se rige bajo el principio de predicción binomial y predicción de magnitud, e incorporando iteraciones múltiples de la PM para luego comparar los resultados con el que mejor se acerque a los valores de correlación entre las estaciones.

1.3. Generador de clima WXGEN

El modelamiento hidrológico requiere información diaria de precipitación, temperatura (máxima y mínima), radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento. Dicha información puede ser leída de un archivo de datos diarios observado o pueden ser generados.

Para la generación de la data diaria es necesario datos estadísticos mensuales. La estimación de la data climática es generada en dos instancias: cuando se especifica la simulación de la variable climática; o, cuando se requiere complementar data inexistente (Neitsch, Arnold, Kiniry, and Williams, 2005).

Los datos estadísticos, para la generación de la información diaria para las variables climáticas de precipitación, temperatura (máxima y mínima), radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento, que se utilizan para el modelamiento hidrológico del programa SWAT aplicado en la presente tesis doctoral son detallados en la Tabla 20.

Tabla 20.
Ecuaciones estadísticas para generar data climática.

VARIABLE	ECUACIÓN	DESCRIPCIÓN
TMPMX(mes)	$\mu mx_{mes} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{mx,mes}}{N}$	Temperatura media máxima diaria para un mes (°C).
TMPMN(mes)	$\mu mn_{mes} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{mn,mes}}{N}$	Temperatura media mínima diaria para un mes (°C).
TMPSTDMX(mes)	$\sigma mx_{mes} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{d=1}^N (T_{mx,mes} - \mu mx_{mes})^2}{N - 1}\right)}$	Desviación estándar de la temperatura máxima diaria del aire para un mes.
TMPSTDMN(mes)	$\sigma mn_{mes} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{d=1}^N (T_{mn,mes} - \mu mn_{mes})^2}{N - 1}\right)}$	Desviación estándar de la temperatura mínima diaria del aire para un mes.
PCPMM(mes)	$\bar{R}_{mes} = \frac{\sum_{d=1}^N R_{dia,mes}}{años}$	Precipitación media diaria para un mes (mm H ₂ O).
PCPSTD(mes)	$\sigma_{mes} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{d=1}^N (R_{dia,mes} - \bar{R}_{mes})^2}{N - 1}\right)}$	Desviación estándar para la precipitación diaria para un mes (mm H ₂ O / día).
PCPSKW(mes)	$g_{mes} = \frac{N \cdot \sum_{d=1}^N (R_{dia,mes} - \bar{R}_{mes})^3}{(N - 1)(N - 2)(\sigma_{mes})^3}$	Coficiente de asimetría de precipitación diaria para un mes.
PR_H(1,mes)	$P_i(H/S) = \frac{dias_{W/D,i}}{dias_{seco,i}}$	Probabilidad de un día húmedo después de un día seco en un mes.
PR_H(2,mes)	$P_i(H/H) = \frac{dias_{W/W,i}}{dias_{húmedo,i}}$	Probabilidad de un día húmedo después de un día húmedo en un mes.
PCPD(mes)	$\bar{d}_{húmedo,i} = \frac{dias_{húmedo,i}}{años}$	Promedio de días de precipitación en un mes.
SOLARAV(mes)	$\mu rad_{mes} = \frac{\sum_{d=1}^N H_{dia,mes}}{N}$	Promedio de radiación solar diaria en un mes (MJ / m ² / día).
DEWPT(mes)	$\mu dew_{mes} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{húmedo,mes}}{N}$	Temperatura promedio del punto de rocío diario para un mes (°C) o humedad relativa (fracción).

$$\text{WND}_{\text{DAV}}(\text{mes}) = \frac{\sum_{d=1}^N \mu_{\text{húmedo,mes}}}{N} \quad \text{Velocidad media diaria del viento para un mes (m/s).}$$

Para la complementación de datos de las series diarias de precipitación, se utilizan dos valores referenciales: predicción binomial (PB) que expresa la probabilidad de que un día sea seco o húmedo, y, una predicción de magnitud (PM) que es la cantidad de precipitación estimada.

La predicción binomial (PB), es calculada por el método de distribución de la cadena Markov de primer orden, sobre la probabilidad de un día que sea considerado como húmedo o seco en relación al día anterior. El día húmedo es considerado cuando la lluvia es mayor a 0,1 mm. Se considera la siguiente información: las probabilidades de ocurrencias de un día húmedo precedido de un día húmedo $P(H/H)$; día húmedo precedido de un día seco $P(H/S)$; día seco precedido de un día húmedo $P(S/H)$ y día seco precedido de un día seco $P(S/S)$. Donde, $P(H/H) + P(S/H) = 1$, y $P(H/S) + P(S/S) = 1$.

La predicción de magnitud (PM) es el valor de precipitación para un día dado, que es calculada con la ecuación de la cadena Markov de distribución asimetría, que necesita de la siguiente información estadística: (μ_{mes}) es la precipitación media diaria (mm H₂O) para un mes; (σ_{mes}) es la desviación estándar de precipitación diaria (mm H₂O) para un mes; ($SND_{\text{día}}$) es la desviación normal estándar calculada para un día, (g_{mes}) es el coeficiente de asimetría para la precipitación diaria en el mes y ($R_{\text{día}}$) el valor de la precipitación diaria de acuerdo al cálculo de la Ecuación 5:

$$R_{\text{día}} = \mu_{\text{mes}} + 2 * \sigma_{\text{mes}} * \left[\frac{\left[\left(\frac{SND_{\text{día}} - g_{\text{mes}}}{6} \right) * \left(\frac{g_{\text{mes}}}{6} \right) + 1 \right]^3 - 1}{g_{\text{mes}}} \right] \quad (5)$$

La desviación normal estándar para un día se calcula con dos números aleatorios (rnd_1) y (rnd_2) que están entre 0.0 y 1.0, calculado con la Ecuación 6:

$$SND_{\text{día}} = \cos(6.283 * rnd_2) * \sqrt{-2 * \ln(rnd_1)} \quad (6)$$

1.4. Método complementar datos diarios de dos estaciones correlativas (CDDDEC)

El procedimiento de este método de estimación del valor de precipitación (Figura 29), se inicia con el análisis de la estimación de las correlaciones periódicas entre las dos estaciones cercanas para periodos entre dos (2) y treinta (30) días, seleccionando la mejor correlación y el tiempo más corto, para dicho periodo se calcula la ecuación lineal de primer orden. A continuación, se determina la probabilidad de que sea un día húmedo o seco (PB), de ser un día húmedo se estima el valor con la ecuación de la cadena Markov de distribución exponencial (Williams, J.R. 1995), este procedimiento se repite “n” veces. La sumatoria de los valores de precipitación diaria para el determinado

periodo para las “n” veces, se compara con el valor de la ecuación lineal, y el mejor valor es seleccionado para lo cual se complementa con los valores diarios de lagunas de datos.

Análisis de la periodicidad

Para el desarrollo de la metodología de complementación de la data diaria de precipitación, fue analizada la información de la lluvia diaria de las series que registran las estaciones meteorológicas, de las cuales dos estaciones próximas, cuentan con una alta correlación mensual. Las estaciones consideradas para el análisis del método utilizado son: las estaciones Babahoyo (M0051) y Pueblo Viejo (M0172).

Las series de datos de precipitación de las estaciones analizadas y seleccionadas, entre los años 1990 y 2014 (25 años), cuentan con información sin lagunas en un periodo de nueve años discontinuos que son: 1990, 1991, 1992, 1994, 1995, 1996, 2006, 2007 y 2008.

Una vez identificados los periodos, y la suma de precipitación desde dos días hasta treinta días, fueron correlacionados dichos periodos entre las dos estaciones seleccionadas; siendo los resultados los descritos en la (Figura 30).

Considerando que en el año existen treinta (30) periodos, los mismos que se agrupan en veinticuatro (24) periodos de doce (12) días y seis (6) periodos de trece (13) días, que son entre los meses más secos (agosto y septiembre); de tal forma que no se vea una afectación mayor de la precipitación en el periodo. El método más adecuado para realizar los cálculos estadísticos, que van a permitir la complementación de la data diaria de las series de precipitación, es el método estocástico de las estaciones correlativas por proximidad de Babahoyo (M0051) y Pueblo Viejo (M0172).

En la Figura 31, son representadas las correlaciones (R^2) para los periodos entre dos y treinta días. Existiendo un punto de inflexión de correlación lineal en el periodo de doce (12) días con un $R^2=0,8126$.

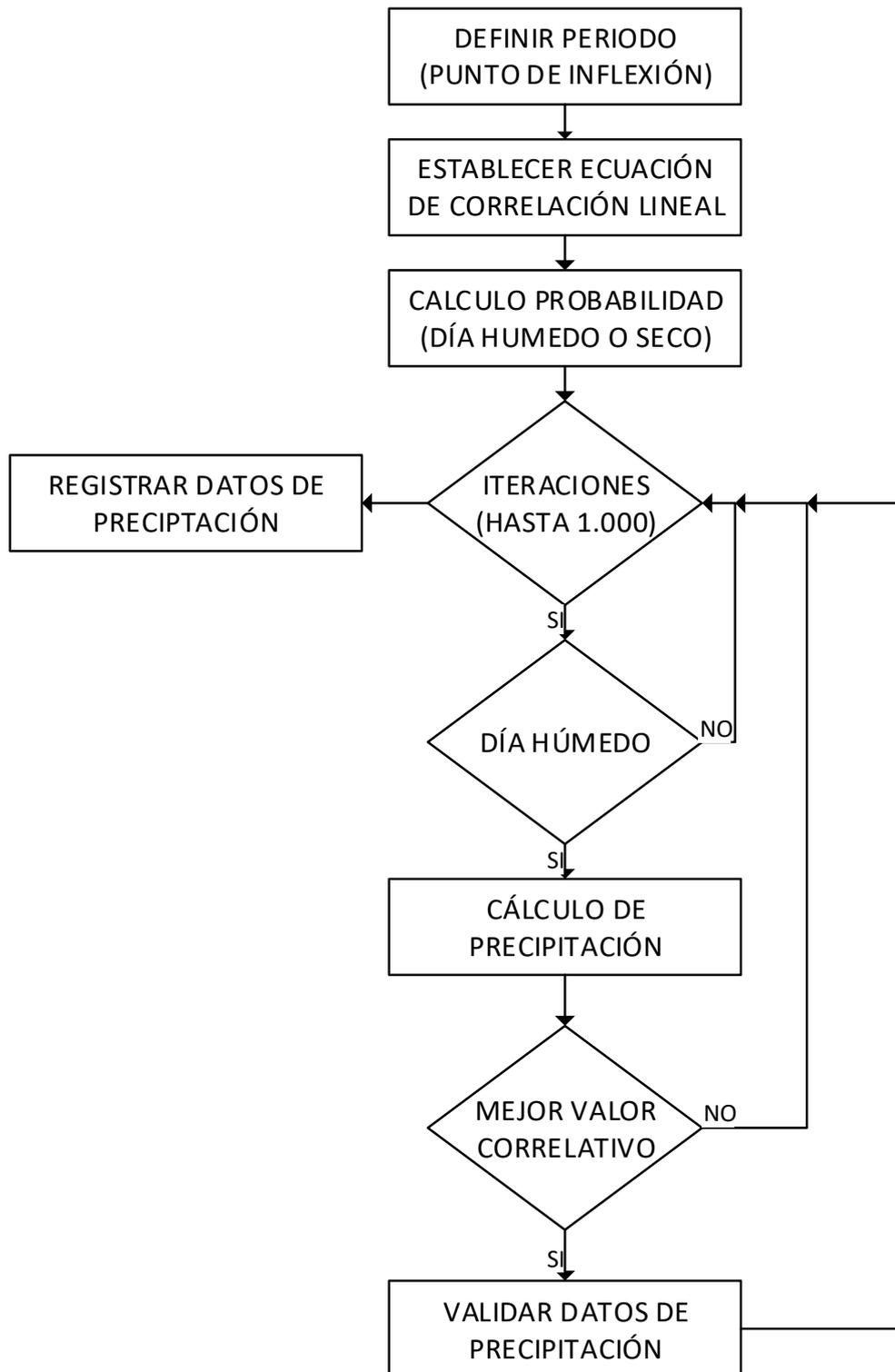


Figura 29. Flujo de cálculo de estimación de precipitación diaria.

Elaboración: Paúl Sotomayor G.

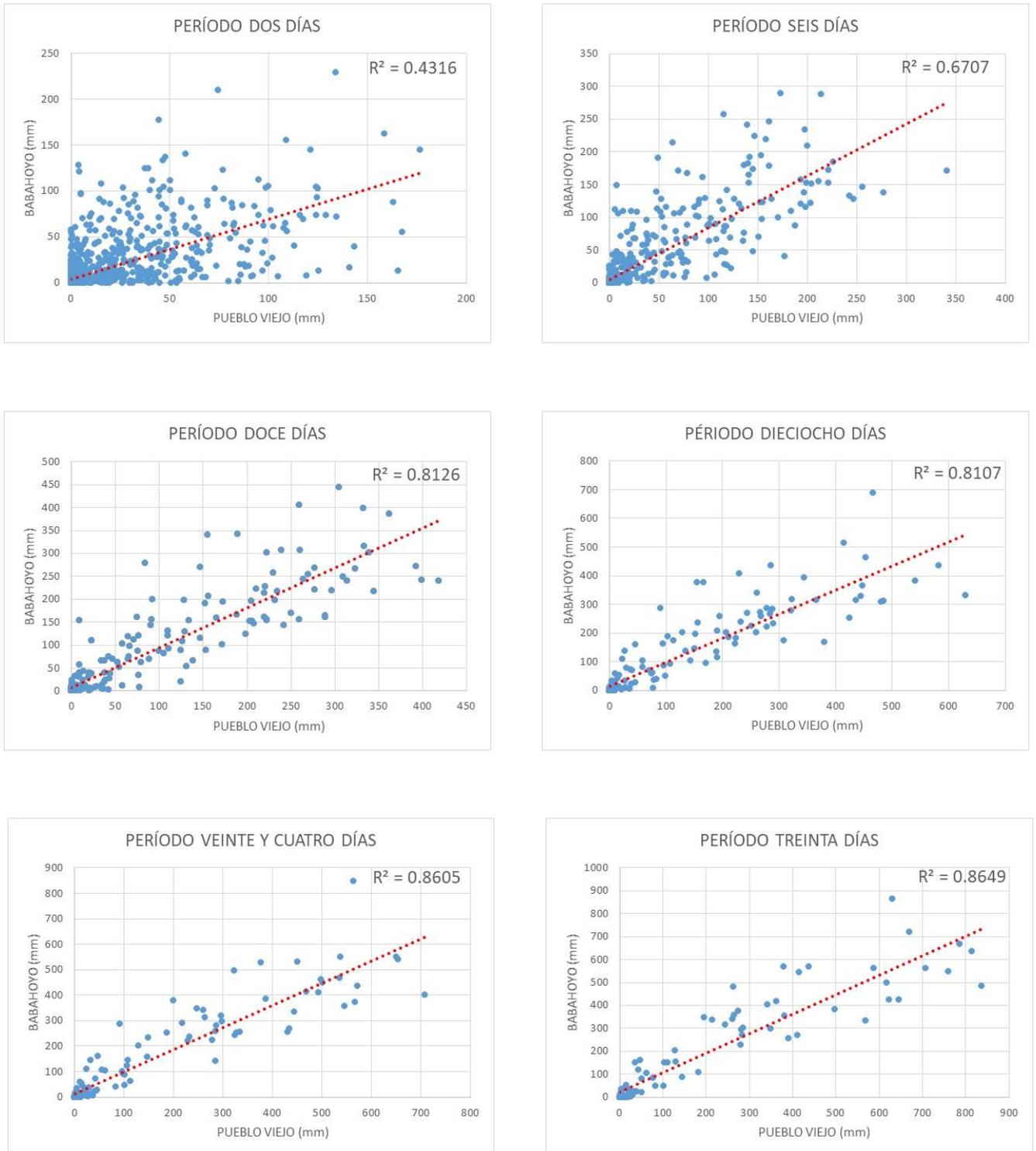


Figura 30. Correlaciones de precipitaciones de periodicidad para las estaciones Babahoyo (M0051) y Pueblo Viejo (M0172).

Fuente: INAMHI.

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.



Figura 31. Correlaciones de periodicidad para las estaciones Babahoyo y Pueblo Viejo. Procesamiento: Paúl Sotomayor G

Cálculo de ecuación lineal entre estaciones.

La ecuación lineal (Figura 32) que se ajusta a las dos estaciones se describe en la (Ecuación 7) con una correlación de $R^2=0,8126$:

$$y = 0,871x + 6,929 \quad (7)$$

Donde, “**y**” es la sumatoria de la data diaria de precipitación para un periodo de doce días de la estación de Babahoyo (M0051); “**x**” es la sumatoria de la data diaria de precipitación para un periodo de doce días de la estación de Pueblo Viejo (M0172).

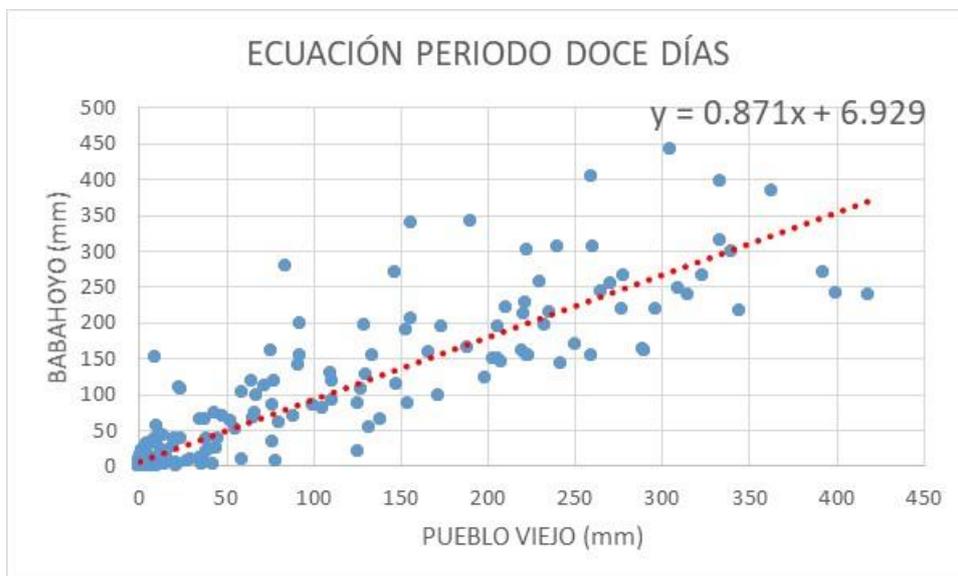


Figura 32. Ecuación lineal para las estaciones Babahoyo y Pueblo Viejo. Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

Probabilidad de día húmedo o seco

Este método es aplicable cuando uno de los datos de alguna de las dos series, es una laguna. Sobre la base de las series completas de las dos estaciones, se cuentan con nueve años entre el periodo desde 1990 hasta el 2014, en el cual se registran 3.285 datos diarios. La probabilidad de ocurrencia para ambas estaciones que sea un día húmedo o un día seco es del 82,89%.

Generación de valores de precipitación.

Para la generación de un valor de precipitación diario, primero debe existir la probabilidad de ocurrencia de que sea un día húmedo o seco. En el presente estudio fueron considerados dos métodos para la definición de un día húmedo o seco:

- i.) Cálculo de la correlación de la probabilidad entre días húmedos y días secos cuando exista laguna de datos de una de las dos series de las estaciones, y
- ii.) Uso de la serie de distribución de Markov cuando existe laguna de datos de precipitación para un mismo día de los registros en ambas estaciones.

Cuando la ocurrencia es un día húmedo, se procede con el cálculo del valor estimado de precipitación de la distribución de la cadena de Markov distribución exponencial (Ecuación 8).

$$R_{\text{día}} = \mu_{\text{doc}} * (-\ln(\text{rnd}_1))^{\text{rexp}} \quad (8)$$

La ecuación para el cálculo de un día dado, se valora con la μ_{doc} , que es la precipitación media diaria (mm H₂O) para un periodo dado, y un valor constante rexp , que es un valor exponente entre 1,0 y 2,0.

1.5. Análisis de resultados (CDDDEC)

Probabilidad de día húmedo o seco.

La probabilidad de ocurrencia es del 82,89% que el día sea seco o húmedo, dependiendo del día que se registra en la estación de Babahoyo (M0051), Si la probabilidad es (1), significa que en la estación Pueblo Viejo ese día es similar al día en la estación Babahoyo (húmedo o seco). Si la probabilidad es (0), significa que ese día en la estación Pueblo Viejo es diferente a lo ocurrido en la estación Babahoyo. El valor -99 expresa que no hay dato de lluvia registrado en ese día.

En la columna (HÚMEDO) se registra si el día es húmedo (1) o seco (0) para la estación Pueblo Viejo. (Tabla 21).

Tabla 21.

Probabilidad de día húmedo (1) o día seco (0).

FECHA	BABAHOYO	PUEBLO VIEJO	PROBABILIDAD	HÚMEDO
11/2/1993	0	-99	1	0
11/3/1993	0	-99	1	0
11/4/1993	0,2	-99	0	0
11/5/1993	0,1	-99	1	1
11/6/1993	0	-99	1	0
11/7/1993	0	-99	1	0
11/8/1993	0	-99	1	0
11/9/1993	0	-99	0	1
11/10/1993	0	-99	1	0
11/11/1993	0,7	-99	1	1
11/12/1993	0	-99	1	0
11/13/1993	0	-99	1	0
11/14/1993	0	-99	1	0
11/15/1993	0	-99	1	0
11/16/1993	0	-99	1	0
11/17/1993	0	-99	1	0
11/18/1993	0	-99	0	1
11/19/1993	0	-99	1	0
11/20/1993	0	-99	0	1
11/21/1993	0	-99	1	0
11/22/1993	0,3	-99	1	1
11/23/1993	0	-99	0	1
11/24/1993	0	-99	1	0
11/25/1993	0	-99	1	0

Calculo de la precipitación diaria

Generación del número aleatorio: Se generaron diez números aleatorio para el cálculo de precipitación diaria, los valores aleatorios se presentan (Tabla 22).

Tabla 22.

Datos aleatorios para la estación Pueblo Viejo.

FECHA	BABAHOYO	PV	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
11/2/1993	0	-99	0,49	0,03	0,90	0,96	0,19	0,19	0,62	0,63	0,70	0,13
11/3/1993	0	-99	0,15	0,08	0,38	0,28	0,17	0,76	0,24	0,36	0,36	0,36
11/4/1993	0,2	-99	0,34	0,29	0,17	0,69	0,33	0,42	0,13	0,23	0,15	0,02
11/5/1993	0,1	-99	0,92	0,89	0,83	0,70	0,18	0,06	0,22	0,11	0,56	0,64
11/6/1993	0	-99	0,57	0,67	0,23	0,06	1,00	0,95	0,72	0,46	0,39	0,85
11/7/1993	0	-99	0,71	0,26	0,74	0,18	0,89	0,90	0,41	0,87	0,75	0,92
11/8/1993	0	-99	0,44	0,88	0,63	0,34	0,11	0,20	0,68	0,68	0,32	0,85
11/9/1993	0	-99	0,14	0,02	0,08	0,09	0,55	0,99	0,69	0,60	0,67	0,39
11/10/1993	0	-99	0,34	0,16	0,58	0,98	0,61	0,94	0,09	0,95	0,35	0,46
11/11/1993	0,7	-99	0,35	0,74	0,13	0,07	0,55	0,49	0,03	0,50	0,73	0,74
11/12/1993	0	-99	0,96	0,17	0,43	0,30	0,72	0,82	0,16	0,23	0,11	0,32
11/13/1993	0	-99	0,41	0,67	0,43	0,24	0,04	0,64	0,21	0,69	0,08	0,69
11/14/1993	0	-99	0,49	0,95	0,70	0,01	0,64	0,85	0,27	0,50	0,51	0,17
11/15/1993	0	-99	0,65	0,54	0,80	0,28	0,33	0,34	0,94	0,95	0,84	0,38
11/16/1993	0	-99	0,40	0,78	0,01	0,67	0,49	0,52	0,61	0,48	0,39	0,96
11/17/1993	0	-99	0,62	0,05	0,72	0,50	0,10	0,90	0,55	0,94	0,22	0,96
11/18/1993	0	-99	0,90	0,71	0,06	0,04	0,54	0,03	0,39	0,49	0,11	0,81
11/19/1993	0	-99	0,11	0,41	0,64	0,97	0,24	0,31	0,37	0,36	0,95	0,95
11/20/1993	0	-99	0,16	0,75	0,63	0,42	0,63	0,45	0,83	0,54	0,85	0,16
11/21/1993	0	-99	0,46	0,87	0,21	0,71	0,37	0,80	0,70	0,20	0,52	0,77
11/22/1993	0,3	-99	0,95	0,54	0,39	0,67	0,95	0,64	0,49	0,58	0,77	0,09
11/23/1993	0	-99	0,11	0,31	0,80	0,92	0,91	0,58	0,55	0,72	0,40	0,67
11/24/1993	0	-99	0,55	0,52	0,02	0,80	0,70	0,01	0,96	0,16	0,42	0,16
11/25/1993	0	-99	0,06	0,26	0,59	0,66	0,41	0,86	0,94	0,49	0,43	0,40

Calculo de precipitación diaria. Los datos calculados con el valor aleatorio según la Ecuación 8 se describen en la (Tabla 23).

Tabla 23.

Precipitación diaria para la estación Pueblo Viejo.

FECHA	BABAHOYO	PV	PV.1	PV.2	PV.3	PV.4	PV.5	PV.6	PV.7	PV.8	PV.9	PV.10
11/2/1993	0	-99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/3/1993	0	-99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/4/1993	0,2	-99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/5/1993	0,1	-99	0,29	0,06	0,10	0,22	1,42	0,68	0,11	0,60	0,06	0,20
11/6/1993	0	-99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/7/1993	0	-99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/8/1993	0	-99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/9/1993	0	-99	18,08	0,78	0,07	0,26	0,05	0,00	0,27	0,29	0,18	0,61
11/10/1993	0	-99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/11/1993	0,7	-99	7,94	0,07	1,91	0,43	0,04	0,36	2,47	0,02	0,11	0,15
11/12/1993	0	-99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/13/1993	0	-99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/14/1993	0	-99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/15/1993	0	-99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/16/1993	0	-99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/17/1993	0	-99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/18/1993	0	-99	0,02	0,22	2,83	0,26	0,02	2,79	0,03	0,25	1,41	0,01
11/19/1993	0	-99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/20/1993	0	-99	0,84	0,03	0,27	0,52	0,15	0,47	0,05	0,44	0,05	1,87
11/21/1993	0	-99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/22/1993	0,3	-99	0,01	0,51	0,49	0,12	0,01	0,34	0,42	0,22	0,10	2,45
11/23/1993	0	-99	1,06	0,14	0,04	0,03	0,04	0,42	0,30	0,13	0,64	0,12
11/24/1993	0	-99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/25/1993	0	-99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Selección del mejor valor para los periodos. De la Ecuación 9 que relaciona las estaciones Babahoyo (M051) y Pueblo Viejo (M0172) con una correlación de $R^2=0.8126$. Los variables 'y' representa la estación Babahoyo y 'x' representa la estación Pueblo Viejo.

$$y = 0.871x + 6.929 \quad (9)$$

Los valores para el periodo 26 del año 1993 de la estación Babahoyo es de -6.80, siendo el valor más próximo a ese valor de la estación Pueblo Viejo es de 0,35. El valor para el periodo 27 del año 1993 de la estación Babahoyo es de -7,61, siendo el valor más cercano de la estación Pueblo Viejo es de 0,23 (Tabla 24).

Tabla 24.

Sumatoria de precipitación de los periodos (26) y (27) que mejor se ajusta a la estación Pueblo Viejo.

PERIODO	PV.1	PV.2	PV.3	PV.4	PV.5	PV.6	PV.7	PV.8	PV.9	PV.10
26	26,31	0,91	2,09	0,91	1,50	1,04	2,85	0,90	0,35	0,96
27	1,94	0,91	3,63	0,93	0,23	4,02	0,79	1,04	2,21	4,45

Valores de precipitación diaria. Los valores diarios de precipitación para complementar las lagunas de datos de la estación Pueblo Viejo para los periodos (26) y (27) se describen en la (Tabla 25).

Tabla 25.

Datos diarios de precipitación de la estación Pueblo Viejo.

FECHA	PERIODO	PUEBLO VIEJO
11/2/1993		0,00
11/3/1993		0,00
11/4/1993		0,00
11/5/1993		0,06
11/6/1993		0,00
11/7/1993		0,00
11/8/1993	26	0,00
11/9/1993		0,18
11/10/1993		0,00
11/11/1993		0,11
11/12/1993		0,00
11/13/1993		0,00
11/14/1993		0,00
11/15/1993		0,00
11/16/1993		0,00
11/17/1993		0,00
11/18/1993		0,02
11/19/1993		0,00
11/20/1993	27	0,15
11/21/1993		0,00
11/22/1993		0,01
11/23/1993		0,04
11/24/1993		0,00
11/25/1993		0,0

Análisis de resultados con el método CDDDEC

El método CDDDEC, como herramienta para complementar datos diarios entre estaciones cercanas y con correlación alta ($R^2 > 0,80$) es considerado como adecuado. En el estudio fueron utilizados tres años no consecutivos de datos (1985, 1989 y 2005) con el fin de calcular los valores estimados de precipitación diaria de la estación Pueblo Viejo (M0172).

En la (Tabla 26), son presentados los resultados de las sumatoria diaria de los datos observados y de los datos estimados para cada uno de los periodos para los años 1985, 1989 y 2005, de acuerdo al flujo de cálculo de estimación de precipitación diaria.

Los valores de cálculo de la efectividad del método CDDDEC son: Coeficiente de Correlación R^2 es de 0,75, Nash-Sutcliffe es 0,74, y CES^2 es de 0,83 (Ecuación lineal, $y=1,04x + 9,70$ y $R=0,6607$) (Figura 33).

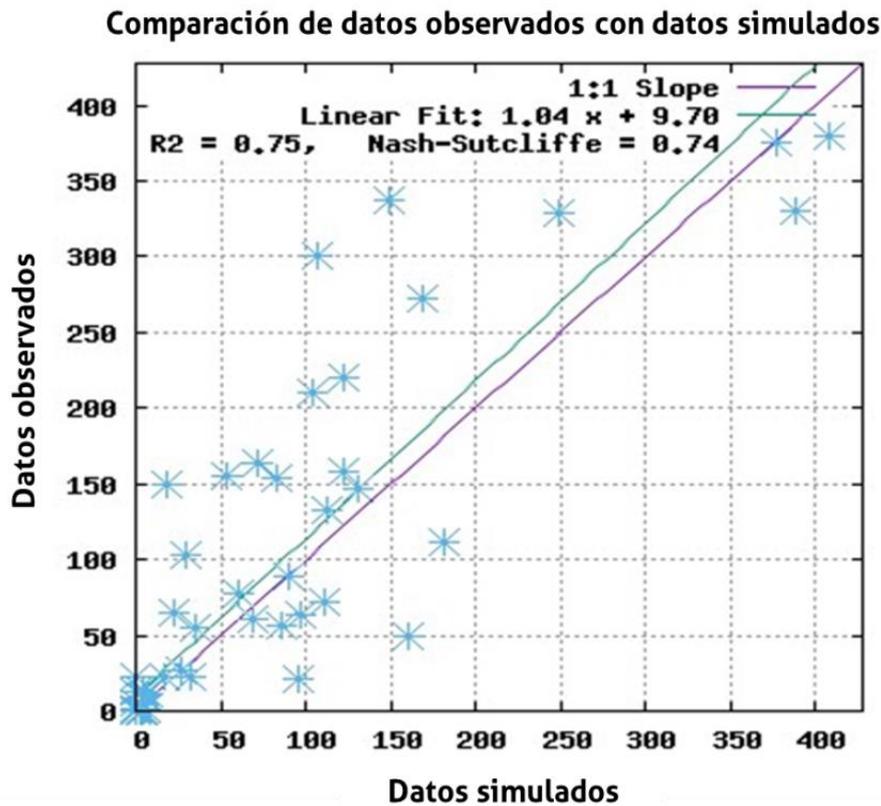


Figura 33. Precipitación periódica simulados vs. observados.

Tabla 26.

Datos observados y estimados para periodos de los años 1985, 1989 y 2005.

PRECIPITACIÓN POR PERIODO						
PERIODO	OBSERVADOS			MEJOR ESTIMACIÓN		
	1985	1989	2005	1985	1989	2005
1	78,3	157,5	27,4	60,98	122,56	26,40
2	72,1	209,6	64,4	111,21	104,51	22,58
3	6,1	329,7	22,7	68,26	388,42	32,67
4	88,3	146,4	63,9	89,62	131,12	96,38
5	133,2	379,1	20,9	112,13	407,17	96,05
6	328,1	271,7	112,0	248,63	169,00	181,55
7	55,1	ND	163,0	35,70	299,89	71,40
8	ND	220,5	102,3	15,97	121,81	30,07
9	ND	301,1	154,2	22,84	106,18	82,90
10	ND	155,8	337,6	137,36	53,54	148,82
11	1,1	149,5	0	5,05	18,29	2,31
12	11,3	22,5	0	7,65	0,65	4,79
13	12,0	10,0	0	4,29	4,49	0,00
14	0	0	0	0,22	0,03	0,39
15	0	12,5	0	0,01	0,02	0,00
16	0	0	0,5	0,13	0,08	0,11
17	0	0	0	0,03	0,00	0,06
18	0	0	0	0,00	0,07	0,01
19	0	0	0	0,02	0,07	0,08
20	0	0	0	0,10	0,14	0,00
21	0	0	0	0,00	0,03	0,00
22	0	0	0	0,01	0,00	0,00
23	0	0	0	0,01	0,00	0,01
24	0	6	0	0,10	0,10	0,09
25	0	0	1,1	0,05	0,15	0,26
26	0	0	1	0,05	0,54	0,58
27	1,4	0	0	0,03	0,02	0,03
28	0	0	0	0,46	0,24	0,03
29	21,9	0	0	17,32	2,30	2,58
30	57,0	10,1	49,9	85,68	6,04	159,89

Los resultados del proceso de relleno de las lagunas de información de las series de precipitación diaria presentan un error alrededor del 75%, dicho error puede propagar a otros cálculos basados en los datos de relleno (Serrano-Notivoli, et al., 2016). Como medida de control de calidad de las series diarias de precipitación, el método muy bien puede ser utilizado. Sin embargo, para complementar series diarias el método está sujeto a los objetivos requeridos, siendo necesario realizar de antemano la validación respectiva en razón de comprobar su eficiencia. No obstante, su investigación se debería

profundizar en comparación con otros métodos que coadyuven en la complementación de series diarias de precipitación.

El método tiene sus limitaciones, ya que se ajusta a solo dos estaciones cercanas con correlaciones altas. Siendo una primera investigación de complementar datos diarios de precipitación, en estaciones climáticas en Ecuador, es un avance sustancial en miras de continuar con las investigaciones; en lo posible, para poder llegar a tener métodos de reconstrucción de series de precipitación diaria que permitan filtrar y completar series originales de precipitación y crear series continuas en cualquier punto del territorio, y como método de validación de información de series diarias de precipitación.

2. Modelamiento hidrológico

2.1. Ecuaciones

En modelización con software SWAT, es utilizado el balance hídrico como respuesta a la simulación de las diferentes variables que se puedan analizar dentro de la cuenca de estudio, para la predicción del movimiento de pesticidas, sedimentos o nutrientes y simulación del ciclo hidrológico dentro de la cuenca de estudio.

El SWAT, se basa en la ecuación de balance hídrico para la modelación de los diferentes escenarios o variables de estudios que se suscitan dentro de una cuenca (Ecuación 10).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{I=1}^t (P_{day} - Q_{surf} - ET_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (10)$$

Donde SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mmH_2O); SW_0 es el contenido de agua inicial en el día i (mmH_2O); t es el tiempo (día); P_{day} es la cantidad de precipitación en el día i (mmH_2O); Q_{surf} es la escorrentía superficial en el día i , ET_a es la cantidad de evapotranspiración en el día i , w_{seep} es la cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del perfil del suelo en el día i (mmH_2O); Q_{gw} es la cantidad de flujo de agua de retorno en el día i (mmH_2O). (Neitshc, *et al.*, 2005).

El modelo está conformado por un conjunto de submodelos, los cuales se emplean para simular los distintos procesos hidrológicos, las diferentes entradas y procesos involucrados en la fase del ciclo hidrológico se encuentra separada en dos grandes divisiones. La primera división, la fase de la Tierra en el ciclo hidrológico, la que se encuentra resumida en siete componentes: clima, hidrología, cobertura del suelo y crecimiento de la planta, erosión, nutrientes, pesticidas y manejo de cultivos. La segunda división, está definida por el movimiento del agua, sedimentos, etc. esta la conforma la red hídrica dentro de la cuenca. (Neitshc, *et al.*, 2005).

2.2. Precipitación

La información de precipitación que ingresa al modelo, es de dos formas. Una serie de datos diarios registrada o valores generados de precipitación diaria. Para el segundo, se calcula la precipitación diaria a partir de la probabilidad de un día húmedo, se calcula mediante la cadena Markov de distribución exponencial los valores de precipitación, que obedecen a la Ecuación 11, la ecuación para el cálculo de un día dado, se valora con la μ_{doc} que es la precipitación media diaria (mm H₂O), un valor constante r_{exp} que es un valor exponente entre 1,0 y 2,0, y un valor aleatorio que esta entre 0,0 y 1,0. En el presente estudio el valor utilizado es de 1.3.

$$\blacksquare R_{dia} = \mu_{doc} * (-\ln(rnd_1))^{r_{exp}} \quad (11)$$

2.3. Ecuación de escorrentía superficial

La escorrentía superficial, corresponde al agua que no se infiltra en ningún momento, producto de una mayor intensidad de precipitación con respecto a la capacidad de infiltración del suelo, y que alcanza la red de drenaje moviéndose por la superficie del terreno bajo la acción de la gravedad. (Martínez y Navarro, 1995).

Para la estimación de la escorrentía superficial, el SWAT utiliza el método de distribución de Número de Curvas del SCS. (Soil Conservation Service, 1972) y el método de infiltración Green y Ampt (1911).

Los mapas mensuales de escorrentía, son el resultado del modelamiento hidrológico para cada una de las subcuencas, los resultados mensuales se presentan en (Anexo 6. Escorrentía mensual).

Método de número de curvas del SCS (1972)

La ecuación de escorrentía del SCS, es un modelo empírico producto de más de 20 años de estudios entre la relación de escorrentía y precipitación en pequeñas cuencas rurales en los Estados Unidos. El modelo fue desarrollado para proveer una base consistente en la estimación de la cantidad de escorrentía bajo la variabilidad del uso del suelo y los tipos de suelo. (Rallison y Miller, 1981).

La ecuación para el cálculo de la escorrentía superficial, según el método de número de curvas de la SCS (Ecuación 12):

$$Q_{surf} = \frac{(P_{day} - I_a)^2}{(P_{day} - I_a - S)} \quad (12)$$

Donde, Q_{surf} es la escorrentía o el exceso de precipitación del día (mm); P_{day} es la precipitación total del día (mm); I_a es la abstracción inicial antes de que el suelo se sature (mm); S es la retención potencial máxima del día (mm).

Los parámetros de retención varían espacialmente debido a los cambios del suelo, prácticas de cultivos, pendiente y temporalmente debido al cambio del contenido del agua del suelo. (Neitsch *et al.*, 2005). Los parámetros de retención están definidos (Ecuación 13):

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (13)$$

Donde, CN es el número de curva para el día; I_a es aproximadamente a $0.2S$, convirtiéndose la ecuación (Ecuación 14):

$$Q_{surf} = \frac{(P_{day} - 0.2S)^2}{(P_{day} + 0.8S)} \quad (14)$$

La escorrentía solo ocurre cuando $P_{day} > I_a$. Según la ecuación (8) para diferentes CN , nos da una solución gráfica que se aprecia en la (Figura 34).

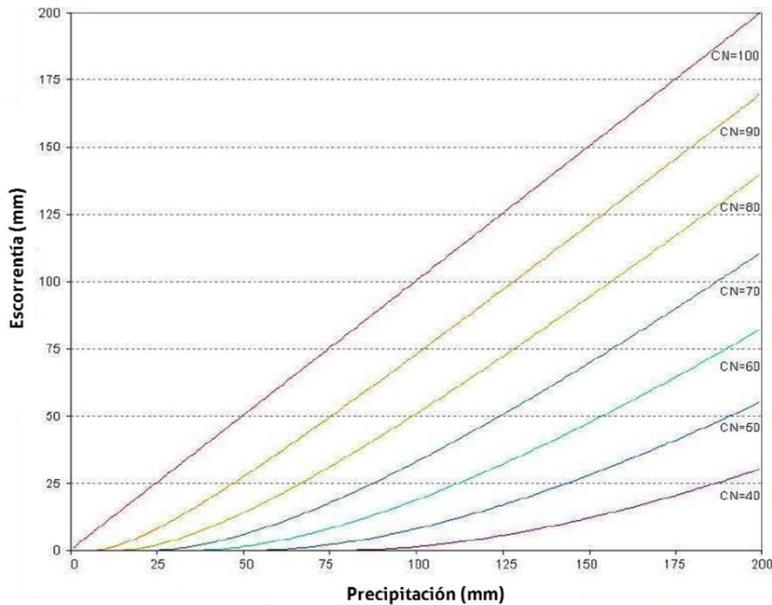


Figura 34. Relación entre escorrentía y precipitación según el método SCS

Método de infiltración Green y Ampt (1911)

La ecuación Green y Ampt (1911) fue desarrollada para predecir infiltraciones bajo la consideración de un suelo totalmente saturado, como un modelo abreviado de la ecuación de Darcy, a través de simplificaciones en el fenómeno de propagación del frente húmedo en el interior del suelo. La ecuación asume que el perfil del suelo es homogéneo y la humedad es distribuida uniformemente.

Mein y Larson (1973) desarrollaron una metodología para la determinación del tiempo de estancamiento con infiltración utilizando la ecuación de Green y Ampt.

El índice de infiltración Green-Ampt y Mein-Larson (Ecuación 15):

$$f_{inf,t} = K_e \cdot \left(1 + \frac{\Psi_{wf} \cdot \Delta\theta_v}{F_{inf,t}} \right) \quad (15)$$

Donde, $f_{inf,t}$ es el índice o velocidad de infiltración en el tiempo t (mm/hr), K_e conductividad hidráulica efectiva (mm/hr), Ψ_{wf} potencial del frente húmedo (mm), $\Delta\theta_v$ cambio de contenido volumétrico de humedad a través del frente húmedo (mm/mm) y $F_{inf,t}$ es la infiltración acumulada en el tiempo t (mm).

Cuando la intensidad de lluvia es menor al índice de infiltración, toda la lluvia se infiltra durante el periodo de tiempo y la infiltración acumulada para ese periodo de calcula (Ecuación 16):

$$F_{inf,t} = F_{inf,t-1} + P_{\Delta t} \quad (16)$$

Donde, $F_{inf,t}$ es la infiltración acumulada para un tiempo dado (mm), $F_{inf,t-1}$ es la infiltración acumulada para un tiempo previo (mm), y $P_{\Delta t}$ es la cantidad de lluvia que cae durante el tiempo dado y el tiempo previo (mm).

2.4. Ecuación de evapotranspiración

La evapotranspiración es la pérdida de agua en forma de vapor a través de la vegetación y desde la superficie del suelo hacia la atmósfera. (Martínez y Navarro, 1995)

Existen muchos métodos para la estimación de la evapotranspiración potencial (ETP), tres de estos métodos han sido incorporados en el SWAT: Penman-Monteith (Monteith, 1965; Allen, 1986; Allen *et al.*, 1989), Priestley-Taylor (Priestley and Taylor, 1972) y Hargreaves (Hargreaves *et al.*, 1985).

Método Penman-Monteith

La ecuación de Penman-Monteith, combina los componentes de balance de energía y el aerodinámico, su ecuación (Ecuación 17):

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot \frac{e_z^o - e_z}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)} \quad (17)$$

Donde, λE es la densidad latente del flujo de calor ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), E es la tasa de evaporación (mm d^{-1}), Δ es la pendiente del vapor de saturación de la curva presión-temperatura, de/dT ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), H_{net} es la radiación neta ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G es la densidad de flujo de calor a la Tierra ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), ρ_{air} es la densidad del aire (kg m^{-3}), c_p es el calor específico a presión constante ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), e_z^o es la presión del vapor saturado del aire a la altura z (kPa), e_z es la presión del vapor de agua del aire a la altura z (kPa), γ es la

constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), r_c es la resistencia de las hojas de la copa de la planta (s m^{-1}), y r_a es la resistencia difusa de la capa del aire (resistencia aerodinámica) (s m^{-1}).

Método Priestley-Taylor

Priestley y Taylor (1972) desarrollaron una versión simplificada de la ecuación combina de Penman, cuando el área de la superficie esta mojada. El componente aerodinámico es removido y el componente de energía es multiplicado por un coeficiente, $\alpha_{pet} = 1,28$, cuando los alrededores están mojados o se encuentra en condiciones húmedas (Ecuación 18).

$$\lambda E_o = \alpha_{pet} \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (H_{net} - G) \quad (18)$$

Donde λ es el calor latente de evaporación (MJ kg^{-1}), E_o es la evapotranspiración potencial (mm d^{-1}), α_{pet} es un coeficiente, Δ es la pendiente del vapor de saturación de la curva presión-temperatura, de/dT ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), γ es la constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), H_{net} es la radiación neta ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), y G es la densidad de flujo de calor a la Tierra ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

La ecuación de Priestley y Taylor estima la evapotranspiración potencial para condiciones de advección bajas. En áreas semiáridas o áridas donde los componentes de advección son significativos la ecuación podría sobreestimar la evapotranspiración potencial.

Método Hargreaves

La ecuación de Hargreaves (Ecuación 19) utilizada en el SWAT fue publicada en 1985 (Hargreaves et al., 1985):

$$\lambda E_o = 0.0023 \cdot H_0 \cdot (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} \cdot (\bar{T}_{av} + 17.8) \quad (19)$$

Donde λ es el calor latente de evaporación (MJ kg^{-1}), E_o es la evapotranspiración potencial (mm d^{-1}), H_0 es la radiación extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), T_{mx} es la temperatura máxima del aire para un día dado ($^\circ\text{C}$), T_{mn} es la temperatura mínima del aire para un día dado ($^\circ\text{C}$), y T_{av} es la temperatura media del aire para un día dado ($^\circ\text{C}$).

2.5. Evapotranspiración Potencial

Los mapas de evapotranspiración potencial mensuales fueron elaborados utilizando los datos de la evapotranspiración potencial de cada una de las 28 subcuencas que

conforman la cuenca del río Babahoyo, aplicando el cálculo de modelamiento hidrológico mediante el uso del método de Thornthwaite y Mather, 1955.

Los datos son asignados geográficamente a cada una de las subcuencas y para cada uno de los escenarios RCP, definiendo el centro de gravedad con las herramientas de SIG y asignando dichos datos al punto georreferenciado.

Con el método co-kriging, fueron construidos los mapas de evapotranspiración potencial mensuales, con los datos de cada punto georeferenciado y el MDT de la cuenca (Anexo 1. Evapotranspiración potencial mensual). El mapa evapotranspiración potencial anual es la suma de los mapas evapotranspiración potencial mensual.

2.6. Ecuación de agua subterránea

El agua que ingresa al suelo, se puede mover en varias direcciones, ser removida del suelo por la absorción de las plantas o por evaporación, infiltrarse más allá del perfil del suelo y convertirse en recarga de acuíferos, así como moverse de forma lateral en el perfil y contribuir al flujo pluvial.

Percolación

La filtración es calculada para cada capa del perfil del suelo. El agua se filtra si el contenido de agua en la capa de suelo excede la capacidad de campo para dicha capa, y la capa inferior no se encuentra saturada.

El volumen de agua disponible para la filtración en la capa del suelo se calcula (Ecuación 20) y (Ecuación 21):

$$SW_{lyexcess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad Si \quad SW_{ly} < FC_{ly} \quad (20)$$

$$SW_{lyexcess} = 0 \quad Si \quad SW_{ly} < FC_{ly} \quad (21)$$

Donde $SW_{lyexcess}$ es el volumen drenable de agua en la capa del suelo en un día dado (mm), SW_{ly} es el contenido de agua en la capa de suelo en un día dado (mm) y FC_{ly} es el contenido de agua de la capacidad de campo para la capa del suelo (mm).

La cantidad de agua que se mueve de una capa a la capa inferior, se calcula utilizando el método de encaminamiento del almacenamiento. La ecuación utilizada (Ecuación 22):

$$w_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \cdot \left(1 - \exp \left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (22)$$

Donde $w_{perc,ly}$ es la cantidad de agua filtrada a la capa inferior en un día dado (mm), $SW_{ly,excess}$ es el volumen drenable de agua en la capa de suelo en un día dado (mm), Δt es el periodo de tiempo (horas), y TT_{perc} es el tiempo de percolación (horas).

El tiempo de percolación es único para cada capa, la ecuación (Ecuación 23):

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad (23)$$

Donde TT_{perc} es el tiempo de percolación (horas), SAT_{ly} es la cantidad de agua en la capa del suelo cuando está totalmente saturado (mm), FC_{ly} es el contenido de agua de la capacidad de campo para la capa del suelo (mm), y K_{sat} es la conductividad hidráulica saturada para la capa (mm/hora).

Aguas subterráneas

Los acuíferos poco profundos contribuyen al flujo normal de los cauces de los ríos en las cuencas hidrográficas. El régimen del río, perenne, intermitente o efímero, depende de la persistencia del caudal de base, la cual viene determinada por el nivel piezométrico. En los ríos perennes, el caudal de base se presenta casi constante de manera que el río normalmente es efluente y presenta un caudal durante todo el año (Gordon et. Al., 1992).

El cálculo del flujo de recarga de las aguas subterráneas (Hooghoudt, 1940) (Ecuación 24)

$$Q_{gw} = \frac{8000 \cdot K_{sat}}{L_{gw}^2} \cdot h_{wtbl} \quad (24)$$

Donde Q_{gw} es el flujo de agua subterránea, o caudal de base, dentro del cauce del río principal para un día i (mm), K_{sat} es conductividad hidráulica del acuífero (mm/día), L_{gw} es la distancia desde la divisoria de la subcuenca para el sistema freático al cauce del río principal (m) y h_{wtbl} es la altura del nivel freático.

2.7. Ecuación de sedimentación

La erosión (del latín erosio=roedura) consiste en, una pérdida gradual del material que constituye el suelo, al ir siendo arrastradas las partículas (disgregadas, arrancadas y transportadas), a medida que van quedando en la superficie. (Porta et al, 2003)

La energía cinética de la lluvia puede desprender partículas del suelo, siendo mayor en suelos desprotegidos de cobertura vegetal, estas son transportadas por pequeños riachuelos para luego ser depositadas en algún lugar a lo largo de los ríos. Cuando la erosión ocurre sin intervención de la influencia humana se llama erosión geológica. (Neitshc, et al., 2005).

La erosión causada por la precipitación y escorrentía es calculada en el SWAT con la ecuación MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) (Williams, 1975). MUSLE es una versión modificada de la USLE (*Universal Soil Loss Equation*) desarrollada por Wischmeir y Smith (1965, 1978).

USLE mide la pérdida potencial media anual del suelo debido a la erosión laminar en una función de la energía cinética de la precipitación y MUSLE reemplaza la energía cinética de la precipitación por el factor de escorrentía. (Neitsch, *et al.*, 2005).

La ecuación MUSLE (Ecuación 25):

$$sed = 11.8 * (Q_{surf} * q_{peak} * area_{hru})^{0.56} * K_{USLE} * C_{USLE} * P_{USLE} * LS_{USLE} * CFRG \quad (25)$$

Donde *sed* es la pérdida de sedimentos en un día (toneladas métricas), Q_{surf} es el volumen de escorrentía (mm H₂O/ha), q_{peak} es el pico de escorrentía (m³/s), $area_{hru}$ es el área del HRU (ha), K_{USLE} es el factor de erosionabilidad de USLE (0.013 toneladas métricas m² hr/(m³ toneladas métricas cm)), C_{USLE} es el factor de cobertura vegetal de USLE, P_{USLE} es factor de prácticas de conservación, LS_{USLE} es el factor topográfico de USLE (longitud-inclinación) y $CFRG$ es el factor de fragmentación de la roca.

2.8. Análisis estadístico de resultados

El análisis estadístico brinda una visión más clara sobre la fiabilidad de la simulación de salida. En el presente estudio, fueron utilizados cinco métodos para evaluar las simulaciones, un método es propio del autor Coeficiente de Eficiencia y Simetría Sotomayor (*CES*²).

El coeficiente de correlación al cuadrado R^2 , es una medida de regresión lineal entre los valores observados y los simulados. R^2 puede escribirse (Ecuación 26):

$$R^2 = \frac{Cov(Q_o, Q_m)^2}{\sigma_o^2 \sigma_m^2} \quad (26)$$

Dónde:

Q_o , caudal de observado;

Q_m , caudal simulado;

$Cov(Q_o, Q_m)$, es la covarianza de los datos observados y simulados;

σ_o^2 , varianza del caudal observado;

σ_m^2 , varianza de caudal simulado.

R^2 pueden tener valores entre 0 y 1, donde 0 indica que no existe correlación y 1 indica una perfecta regresión lineal. Sin embargo; un alto valor de R^2 , por sí sola, no es garantía de que la calibración del modelo sea aceptable, puesto que en este valor no se incluyen los errores sistemáticos.

La raíz del error cuadrático medio (*RMSE*) y el coeficiente de eficiencia (*EF*) de Nash y Sutcliffe (1970), también llamado eficiencia de simulación, son utilizados para analizar este tipo de errores. El *RMSE* es una medida de ajuste de la simulación, y se calcula de la siguiente manera (Ecuación 27):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_o(i) - Q_m(i))^2}{n}} \quad (27)$$

El *RMSE*, tiene la misma dimensión y es utilizado para comparar los valores de la primera simulación y los resultados de la validación de la misma cuenca. Las dimensiones del coeficiente de eficiencia (*EF*), es utilizado para evaluar el factor de predicción de los modelos hidrológicos, que corresponde a la diferencia entre la varianza observada y el error cuadrático medio (MSE), dividido para la varianza observada.

Los valores de la eficiencia pueden variar desde $-\infty$ a 1. Una eficiencia de 1 ($EF=1$), corresponde a un perfecto ajuste de los datos medidos y los simulados. Una eficiencia de 0 ($EF=0$) indica que las predicciones del modelo son tan exactas como la media de los datos observados, mientras que un rendimiento inferior a cero ($-\infty < EF < 0$) se produce cuando los valores modelados no tienen una buena predicción. Básicamente, cuanto más se acerca el modelo de eficiencia a 1, el modelo es más exacto. Esto puede ser escrito de la siguiente forma (Ecuación 28):

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o(i) - Q_m(i))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o(i) - \bar{Q}_o)^2} \quad (28)$$

Dónde:

Q_o es la media del caudal observado y *EF*, no tiene dimensión. Ésta técnica es particularmente útil para comparar resultados de la modelación de las diferentes cuencas hidrográficas.

El relativo sesgo de la simulación con respecto a los valores observados se calcula con la siguiente ecuación (Ecuación 29):

$$sesgo = \frac{\bar{Q}_m - \bar{Q}_o}{\bar{Q}_o} * 100\% \quad (29)$$

Multiplicando por 100%, el sesgo relativo es calculado en términos porcentuales, indicando la simetría de la distribución, si el valor es cero la distribución es simétrica; si el sesgo es positivo la distribución tendrá una cola asimétrica extendida hacia los valores positivos. Un sesgo negativo indica una distribución con una cola asimétrica extendida hacia los valores negativos.

Los datos resultantes de los análisis estadísticos en la determinación de la eficiencia del modelo, son discriminados por la correlación entre los datos simulados versus los observados, y por la simetría entre los mismos respecto de la ecuación lineal ($y = x$).

Los resultados son analizados por separado. Para la unificación de la correlación y la simetría es utilizado el Coeficiente de Eficiencia y Simetría Sotomayor (CES^2), método implementado por el autor, que consiste en la multiplicación del coeficiente de correlación (R) resultado de la ecuación de línea de tendencia con la intersección en el punto de origen de los valores simulados y los observados multiplicado por la pendiente de la línea de tendencia (Ecuación 30).

$$CES^2 = R * (1 - |1 - m|) \quad (30)$$

Para la aplicación del método de CES^2 , debe ser considerado el valor de la pendiente (m) de la ecuación de la línea de tendencia, que debe estar entre los valores: mayor a cero y menor a uno. Dentro del cual, el valor de CES^2 entre más cercano sea al valor de 1 más eficiente es el modelo. También, se puede identificar si la simetría a la ecuación ($y = x$) es positiva o negativa que representa subestimación o desestimación respectivamente, esto depende del valor positivo (+) o negativo (-) del resultado de $(1 - m)$.

2.9. Configuración del modelo

En esta sección son descritos los procesos de la configuración del modelo SWAT y la información de las bases de datos necesarias para las simulaciones. La base teórica e ingreso de la información al modelo, se encuentran disponible con mayor detalle en los libros: *The theoretical Documentation* (Neitsch et al., 2005) e *Input/Output file documentation* (Neitsch et al., 2005).

La versión de SWAT utilizada, para la simulación de caudales en la cuenca del río Babahoyo, es ArcSWAT 2012.10 con interfase de ArcGIS 10.1 de ESRI. La configuración del modelamiento se esquematiza en la (Figura 35).

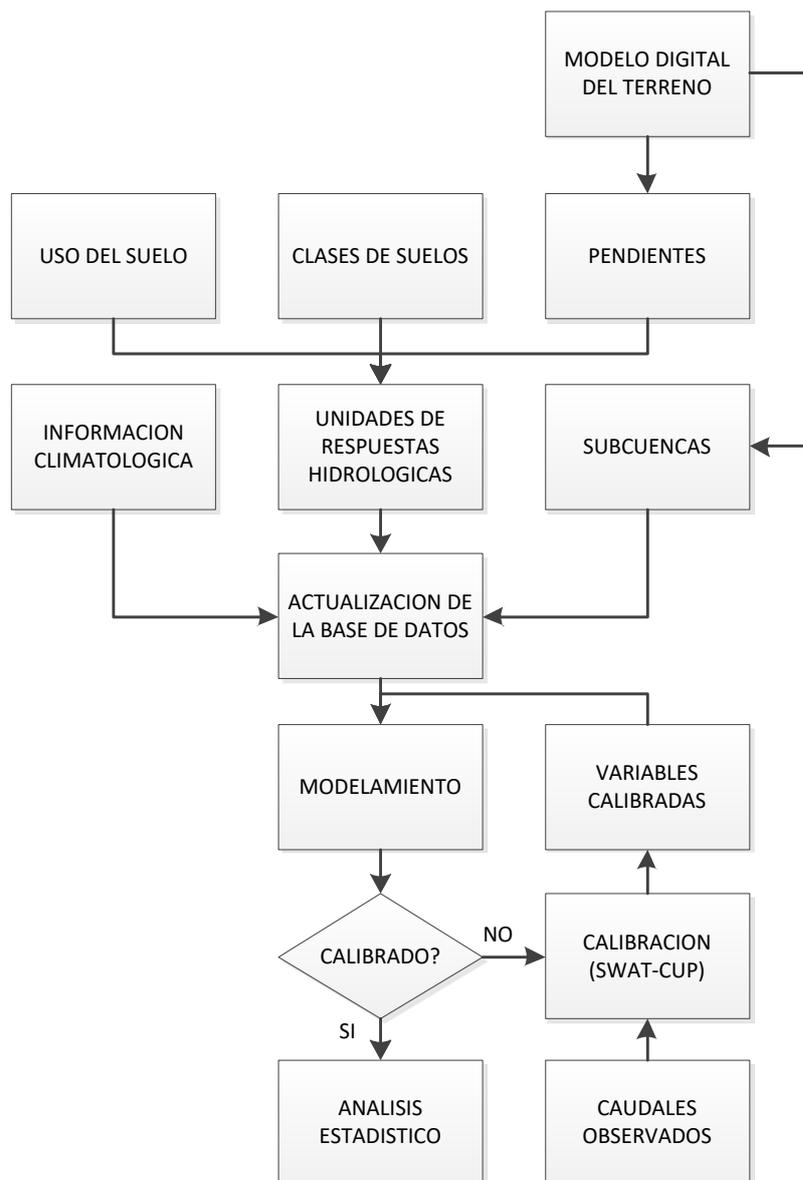


Figura 35. Esquema de modelamiento en SWAT.

Fuente: Neitsch et al., 2005.

Modelo digital del terreno (MDT)

La base para la delimitación de las cuencas y subcuencas hidrográficas, cauces de los ríos y pendientes, es el modelo digital del terreno (MDT). La USGS (U.S. Geological Survey) y la NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) han trabajado en conjunto para producir una versión mejorada que reemplace al CTOPO30, denominada GMTED2010 (Global Multi-Resolution Terrain Elevation Data 2010). Este nuevo producto está desarrollado para tres resoluciones: 30 segundos de arco (aproximadamente 1 kilómetro), 15 segundos de arco (unos 500 metros) y 7,5 segundos de arco (unos 250 metros).

El GMTED2010 presenta siete modelos de elevación disponibles para cada resolución: elevación mínima, elevación máxima, elevación media, elevación mediana, desviación estándar de elevación, submuestra sistemática (SYSTEMATIC SUBSAMPLE) y énfasis de línea de ruptura (ELR) (BREAKLINE EMPHASIS).

El modelo de elevación ELR (Énfasis de Línea de Ruptura), se diferencia de los otros modelos porque mantienen las características de flujo (cauces) y de cresta (divisoria) para escalas reducida, como si fuera un modelo de datos originales de alta resolución (Gesch, 1999). El ELR, mantiene las características topográficas críticas dentro del terreno al mantener los valores mínimos y máximos de elevación como las líneas divisorias dentro del área específica del análisis, los valores de elevación restantes se generalizan usando la estadística mediana. La metodología de énfasis de ELR se puede resumir en tres pasos (Danieslon-Gesch 2011):

1. Las líneas de quiebre topográfico (cimas y arroyos) se extraen del MDT original y son utilizados para la generalización de los nuevos valores de altura.
2. La delimitación de los cauces o flujos de agua son automáticamente delimitados, lo que permite la extracción fácil del primer nivel de la clasificación de cauces de Strahler.
3. La resolución de las cimas se extrae seleccionando los valores de acumulación de flujo que son iguales a cero. Usando funciones de procesamiento de raster focal y de bloque, las cimas son disminuidas de manera que sólo se mantienen divisorias críticas.

El modelo ELR, es especialmente utilizado en el campo hidrológico o aplicaciones de modelamiento hidrológico en grandes áreas (Danieslon-Gesch 2008). Los resultados de efectividad del modelo para la generación de cuencas hidrográficas y comparar con los resultados de cuencas de fuentes de datos de mayor resolución, fue realizado en dos regiones fisiográficas muy diferentes para las cuencas de los ríos Allegheny y James en los Estados Unidos, teniendo resultados de eficiencia del 97.3% comparando el modelo ELR con el modelo de mayor resolución en 97,3%.

Para el área de estudio, el MDT utilizado es el GMTED2010-ELR de resolución de 7,5 segundos. La delimitación de la cuenca, subcuencas y cauces de los ríos es un proceso semiautomático dentro de la herramienta del SWAT, que hace uso de las aplicaciones que proporciona los Sistemas de Información Geográfico (SIG), entre las cuales está la del cálculo de flujo (dirección y acumulación) sobre el MDT; para lo cual, se define el punto de salida de la cuenca del río Babahoyo y los umbrales de superficie que deberían tener las subcuencas.

Los resultados de la divisoria de la cuenca, deriva en 28 subcuencas, donde el promedio de superficie es de 268 Km², que se encuentra en el rango entre 0,5 Km² y 640 Km².

La distribución de las subcuencas por superficies es descrita en la Figura 36. En el cual, diecinueve (19) subcuencas se encuentran entre 100 y 500 km², que corresponde al 68%.

En la (Figura 37) es descrito el mapa de distribución espacial de las subcuencas y en la (Tabla 27) un análisis general cuantitativo de cada una de las subcuencas.

Cabe indicar que las cuencas con superficies pequeñas son producto de la delimitación semiautomática propia del modelamiento.

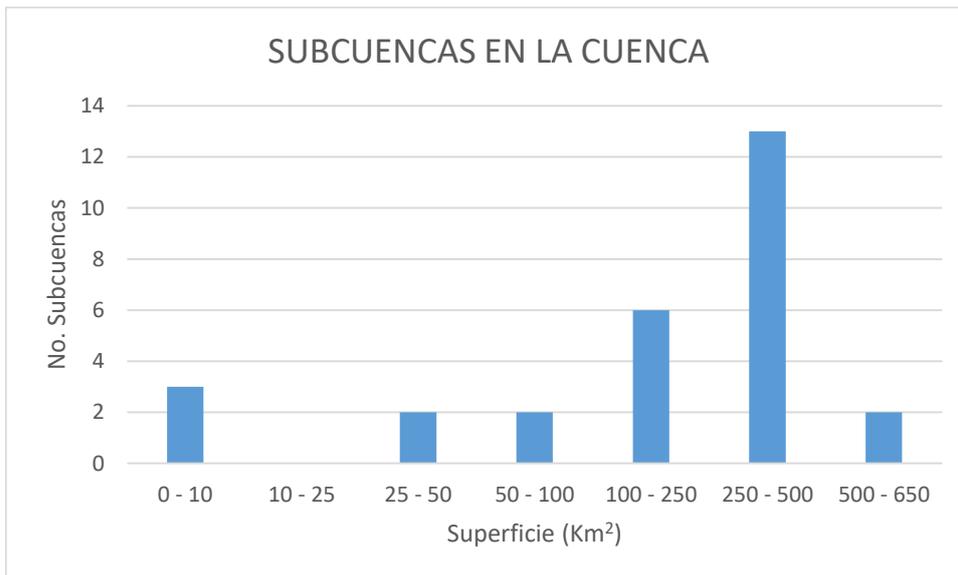


Figura 36. Distribución de las subcuencas según su superficie.
Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

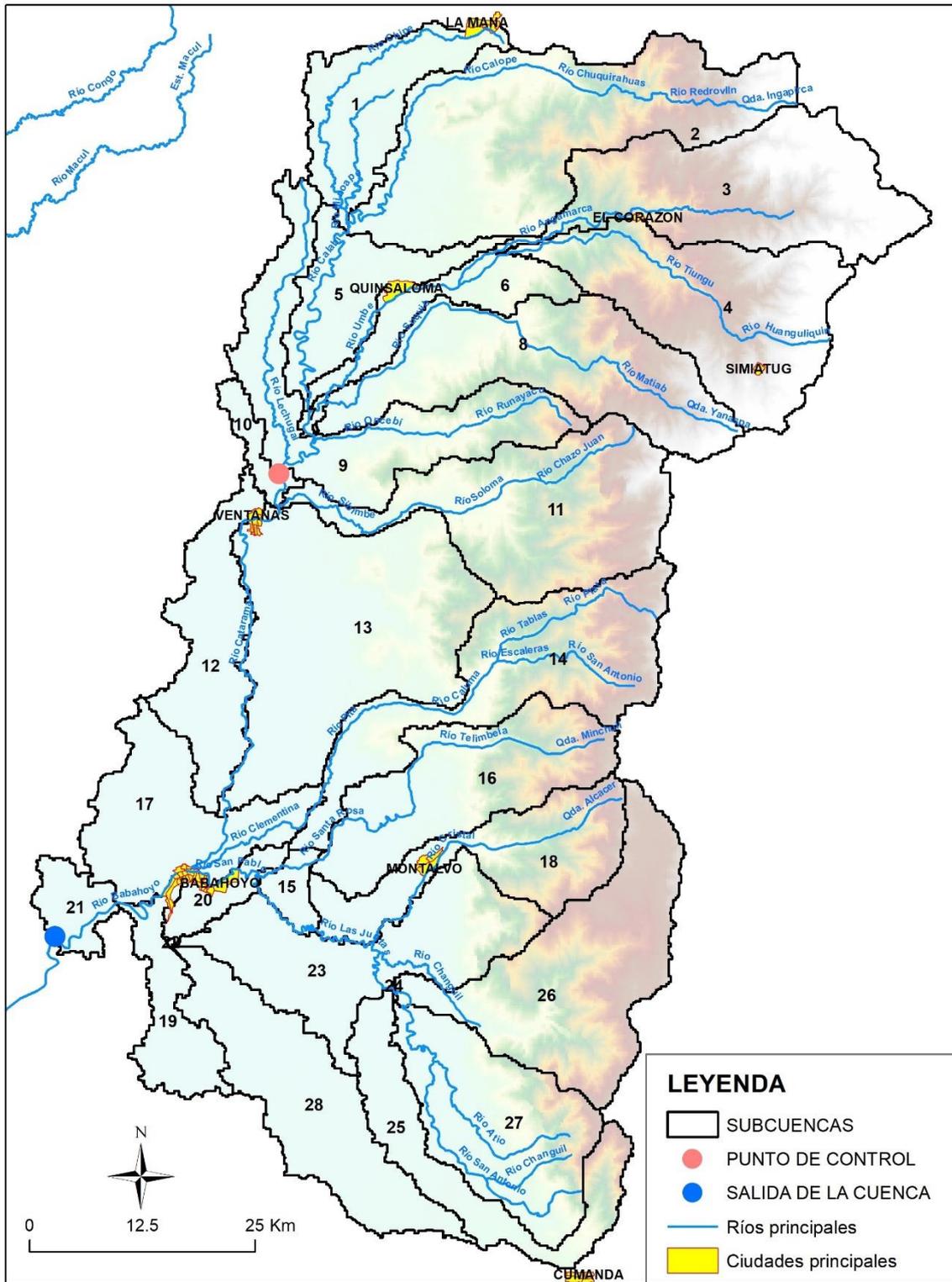


Figura 37. Subcuencas del río Babahoyo.
 Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

Tabla 27.

Características de las subcuencas del río Babahoyo.

SUBCUENCA	ÁREA (Km ²)	PERÍMETRO (Km)	COMPACIDAD	ELEVACIÓN		
				MÍNIMA	MÁXIMA	PROMEDIO
1	218.76	118.42	2.26	62.00	712.00	119.37
2	638.72	189.33	2.11	62.00	4,370.00	1,130.27
3	449.83	169.00	2.25	311.00	4,546.00	2,928.96
4	433.25	145.87	1.98	311.00	4,515.00	2,764.54
5	183.69	118.17	2.46	31.00	445.00	102.54
6	130.46	114.10	2.82	31.00	1,701.00	321.45
7	7.94	18.81	1.88	27.00	65.00	39.03
8	433.72	169.00	2.29	28.00	4,374.00	1,435.71
9	372.07	225.92	3.30	22.00	2,798.00	418.90
10	41.78	58.45	2.55	18.00	73.00	41.17
11	447.15	162.13	2.16	23.00	3,828.00	1,394.99
12	235.71	145.62	2.67	4.00	50.00	16.13
13	616.76	176.11	2.00	6.00	1,639.00	211.11
14	408.90	195.93	2.73	6.00	3,498.00	1,236.77
15	40.04	39.14	1.74	5.00	20.00	8.54
16	346.47	133.67	2.03	5.00	3,041.00	733.94
17	276.43	137.48	2.33	1.00	27.00	10.04
18	264.01	146.89	2.55	5.00	3,153.00	1,046.90
19	126.76	114.10	2.86	4.00	37.00	14.25
20	59.75	64.29	2.35	3.00	21.00	8.31
21	67.67	56.93	1.95	-	26.00	8.55
22	0.74	7.62	2.49	4.00	13.00	7.24
23	357.78	174.59	2.60	2.00	2,468.00	214.06
24	0.47	4.57	1.89	16.00	27.00	19.24
25	223.65	176.11	3.32	16.00	2,665.00	402.97
26	444.92	156.80	2.10	15.00	3,264.00	1,709.66
27	343.56	116.14	1.77	17.00	2,898.00	489.18
28	336.67	163.41	2.51	4.00	148.00	38.70

Cobertura de perfiles de suelos

Del mapa de aptitudes agrícolas a escala 1:200.000 (Figura 39) elaborado por el Ministerio de Agricultura de Ecuador (MAG), Programa Nacional Regional (PRONAREG) y ORSTOM (Instituto Francés de Investigación Científica y Técnica para el Desarrollo en Cooperación) entre 1983 y 1986, fue reclasificada la nomenclatura de los perfiles de suelos, de acuerdo con las variables de entrada requeridas por el SWAT, que corresponden a materia orgánica, pedregosidad, profundidad y textura (Figura 38). Dicha nomenclatura puede bien ser utilizada para todo el país.



Figura 38. Nomenclatura de los perfiles del suelo.

Textura: La textura del suelo se codifica de acuerdo con la textura del tamaño de las partículas que conforma el perfil del suelo, descrito por un identificador de dos números de acuerdo con la (Tabla 28).

Tabla 28.

Codificación de los perfiles de suelo.

TEXTURA	CÓDIGO	ID	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
1	11	g	ARENOSO	GRUESA
	12		ARENOSO-FRANCO	
2	21	mg	FRANCO-ARENOSO	MODERADA GRUESA
	22		FRANCO-LIMOSO	
3	31	m	FRANCO	MEDIA
	32		LIMOSO	
	33		FRANCO-ARCILLOSO	
	34		FRANCO-ARCILLOSO-ARENOSO	
	35		FRANCO-ARCILLO-LIMOSO	
4	41	f	FRANCO-ARCILLOSO	FINA
	42		ARCILLOSO	
	43		ARCILLO-ARENOSO	
	44		ARCILLO-LIMOSO	
5	51	mf	ARCILLOSO	MUY FINA

Profundidad: La profundidad del suelo es el perfil del corte vertical que va desde su superficie hasta la roca madre (Tabla 29).

Tabla 29.

Clasificación de la profundidad del suelo.

CÓDIGO	ID	NOMBRE	PROFUNDIDAD (cm)
1	s	SUPERFICIAL	0 - 20
2	pp	POCO PROFUNDO	20 - 50
3	mp	MODERADO PROFUNDO	50 - 100
4	p	PROFUNDO	> 100

Pedregosidad: Es el porcentaje de rocas que se encuentra en determinado perfil del suelo (Tabla 30).

Tabla 30.

Clasificación de pedregosidad

CÓDIGO	ID	NOMBRE	PEDREGOSIDAD (cm)
1	s	SIN	< 10
2	p	POCAS	10 - 25
3	fr	FRECUENTE	25 - 50
4	a	ABUNDANTE	50 - 75
5	r	PEDREGOSO O ROCOSO	> 75

Materia Orgánica: Es el porcentaje de materia orgánica que se encuentra en el perfil del suelo (Tabla 31).

Tabla 31.

Codificación de la materia orgánica

CÓDIGO	ID	NOMBRE	MATERIA ORGÁNICA (%)
1	mb	MUY BAJO	< 1
2	b	BAJO	1 - 2
3	mb	MEDIO	2 - 4
4	a	ALTO	4 - 10
5	ma	MUY ALTO	> 10

La distribución espacial de los diferentes perfiles de suelos en la cuenca, es descrita en la (Figura 39) y en la (Tabla 32) se presenta un detalle cuantitativo de los tipos de suelo.

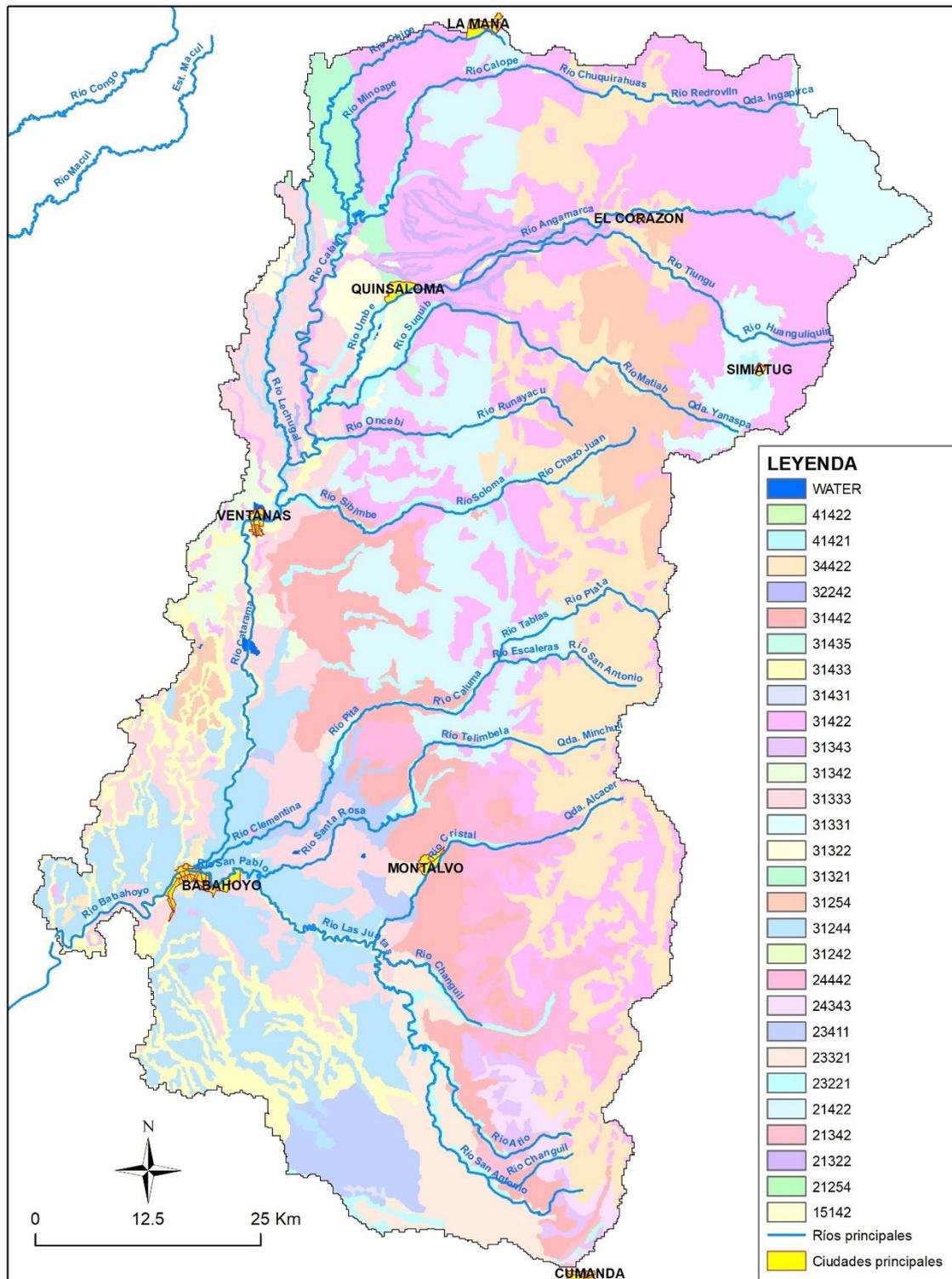


Figura 39. Los perfiles de suelos en la cuenca del río Babahoyo.

Fuente: PRONAREG-ORSTOM, 1983-1986.

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

Tabla 32.

Tipos de suelo en la cuenca del río Babahoyo

SUELOS	MATERIA				TEXTURA
	ÁREA (Km ²)	ORGÁNICA (%)	PEDREGOSIDAD (%)	PROFUNDIDAD (cm)	
15142	0,40	< 1	> 75	0 -20	Fina
21254	0,03	1 - 2	< 10	20 -50	Muy fina
21322	65,91	1 - 2	< 10	50 -100	Moderada gruesa
21342	20,65	1 - 2	< 10	50 -100	Fina
21422	592,30	1 - 2	< 10	> 100	Moderada gruesa
23221	204,32	1 - 2	25 - 50	20 -50	Moderada gruesa
23321	242,04	1 - 2	25 - 50	50 -100	Moderada gruesa
23411	210,38	1 - 2	25 - 50	> 100	Gruesa
24343	66,07	1 - 2	50 - 75	50 -100	Fina
24442	277,61	1 - 2	50 - 75	> 100	Fina
31242	0,24	2 - 4	< 10	20 -50	Fina
31244	633,18	2 - 4	< 10	20 -50	Fina
31254	301,15	2 - 4	< 10	20 -50	
31321	111,18	2 - 4	< 10	50 -100	Moderada gruesa
31322	85,26	2 - 4	< 10	50 -100	Moderada gruesa
31331	242,30	2 - 4	< 10	50 -100	Media
31333	604,34	2 - 4	< 10	50 -100	Media
31342	100,33	2 - 4	< 10	50 -100	Fina
31343	47,32	2 - 4	< 10	50 -100	Fina
31422	1.687,37	2 - 4	< 10	> 100	Moderada gruesa
31431	14,18	2 - 4	< 10	> 100	Media
31433	389,93	2 - 4	< 10	> 100	Media
31435	1,73	2 - 4	< 10	> 100	Media
31442	519,38	2 - 4	< 10	> 100	Fina
32242	2,66	2 - 4	10 - 25	20 -50	Fina
34422	1.033,20	2 - 4	50 - 75	> 100	Moderada gruesa
41421	32,66	4 - 10	< 10	> 100	Moderada gruesa
41422	0,79	4 - 10	< 10	> 100	Moderada gruesa
WATER	11.67	-	-	-	-

Cobertura de Usos del Suelo

El Ministerio de Agricultura (MAGAP) y el Ministerio del Ambiente (MAE) elaboraron el “Mapa de Cobertura y Uso de la Tierra del Ecuador Continental 2013-2014 MAGAP-MAE” a escala 1:100.000”, a partir de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica como ayuda para la discriminación de usos del suelo. Con la información disponible del mapa a nivel nacional se delimita la zona de trabajo de la cuenca

hidrográfica y se clasifica los usos del suelo predominantes con los códigos preestablecidos en la Base de Datos del SWAT. Se describen en la (Figura 40) y (Tabla 33).

Tabla 33.

Usos del suelo en la cuenca del río Babahoyo.

ID	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	ÁREA (Km ²)
0	URML	ZONA POBLADA	41,49
1001	FRSE	BOSQUE	829,01
1002	PAST	PASTIZALES	2,765,74
1004	RNGB	MATORRAL	19,96
1005	WATR	CUERPOS DE AGUA	43,29
1006	CORN	MAÍZ	966,66
1008	SUGC	CAÑA DE AZÚCAR	60,61
1009	RICE	ARROZ	742,08
1010	PTBN	LEGUMINOSAS	10,80
1011	POTA	PAPA	14,53
1013	OILP	ACEITA DE OLIVA	103,04
1014	BANA	BANANA	315,26
1015	BARR	SUELO DESNUDO	1,40
1017	COCT	CACAO	730,21
1018	WETL	PARAMO	306,38
1417	ORCD	FRUTALES	557,18

Cobertura de clases de pendientes

Con el Modelo Digital del Terreno de énfasis de línea de ruptura (ELR) del GMTED2010, son definidos tres grupos de pendientes, el primer rango está entre 0-5%, el segundo rango entre 5-25%, y el tercer rango mayor a 25%. Los resultados del proceso, son presentados con detalle en la (Figura 41) y (Tabla 34).

Tabla 34.

Rango de pendientes en la cuenca del río Babahoyo

RANGO	PENDIENTE (%)	ÁREA (Km ²)
1	0-5	3.074,52
2	5-25	1.722,51
3	> 25	2.710,60

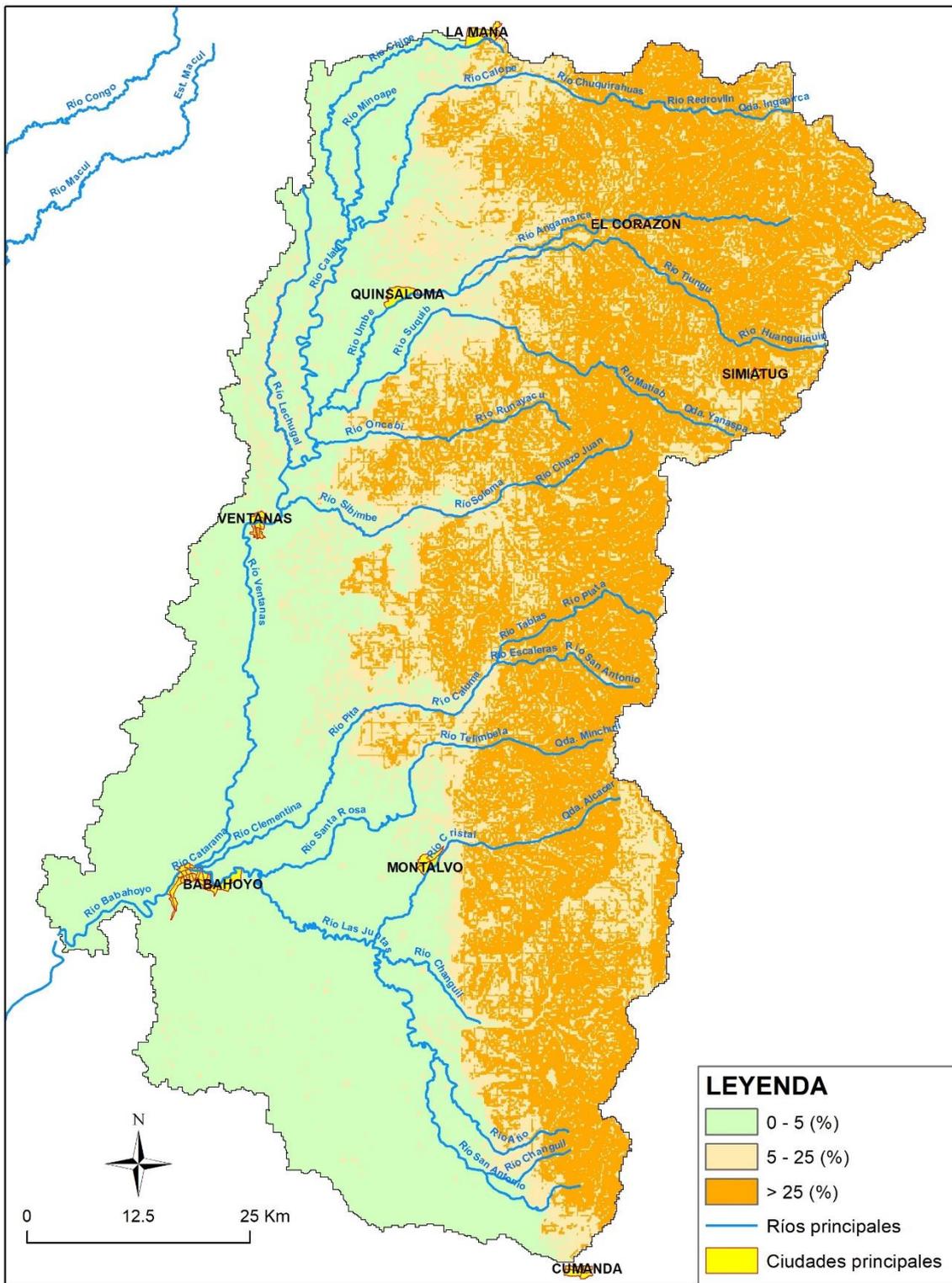


Figura 41. Distribución de las pendientes en la cuenca del río Babahoyo

Fuente: IGM

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

Unidad de respuesta hidrológica (HRU)

Las áreas homogéneas de una cuenca en términos de respuesta hidrológicas y características geoclimáticas se cataloga como HRU (Tabla 35). No se debe confundir como unidades de subcuencas, todo lo contrario. Son áreas independientes que se integran con propiedades comunes en cada una de las subcuencas, desde el punto de vista hidrológico, como son: pendiente (que determina la velocidad de la escorrentía superficial), tipo de suelo (la capacidad de infiltración) y usos del suelo (la evapotranspiración).

Tabla 35.

Unidades de respuestas hidrológicas de la cuenca.

SUB	HRU	USO DEL SUELO	SUELO	PENDIENTE	ÁREA (Km ²)	SUB	HRU	USO DEL SUELO	SUELO	PENDIENTE	ÁREA (Km ²)
1	1	CORN	31321	0.5	28.569	12	55	RICE	31244	0.5	23.385
1	2	CORN	31422	0.5	45.465	12	56	RICE	31254	0.5	25.523
1	3	OILP	31321	0.5	34.953	12	57	RICE	31333	0.5	19.932
1	4	OILP	31422	0.5	42.502	12	58	BANA	31333	0.5	27.263
1	5	ORCD	31321	0.5	15.337	12	59	BANA	31483	0.5	65.22
1	6	ORCD	31422	0.5	52.194	13	60	PAST	21422	25.9999	254.56
2	7	FRSE	31422	25.9999	118.03	13	61	PAST	21422	5.25	153.98
2	8	FRSE	31422	5.25	37.416	13	62	PAST	31442	0.5	119.62
2	9	FRSE	34422	25.9999	113.14	13	63	PAST	31442	5.25	87.656
2	10	PAST	21422	25.9999	41.441	14	64	FRSE	24442	5.25	22.831
2	11	PAST	21422	5.25	55.572	14	65	FRSE	24442	25.9999	13.257
2	12	PAST	31422	5.25	167.85	14	66	FRSE	34422	25.9999	81.301
2	13	PAST	31422	25.9999	106.03	14	67	PAST	21422	25.9999	96.265
3	14	PAST	31422	25.9999	198.54	14	68	PAST	34422	25.9999	195.74
3	15	PAST	31422	5.25	51.173	15	69	RICE	31244	0.5	40.089
3	16	WETL	31331	5.25	31.701	16	70	PAST	31422	5.25	26.176
3	17	WETL	31331	25.9999	116.37	16	71	PAST	31422	25.9999	82.588
3	18	WETL	31422	25.9999	52.581	16	72	PAST	34422	25.9999	238.12
4	19	PAST	31422	25.9999	218.59	17	73	RICE	31244	0.5	155.81
4	20	PAST	31422	5.25	85.101	17	74	BANA	31333	0.5	66.995
4	21	WETL	31422	5.25	34.578	17	75	BANA	31483	0.5	51.352
4	22	WETL	31422	25.9999	95.505	18	76	PAST	24442	25.9999	47.829
5	23	CORN	31322	0.5	26.117	18	77	PAST	24442	5.25	14.978
5	24	CORN	31333	0.5	52.299	18	78	PAST	34422	25.9999	92.368
5	25	CORN	31422	5.25	9.1387	18	79	CORN	34422	25.9999	109.16
5	26	CORN	31422	0.5	18.767	19	80	PAST	31244	0.5	30.704
5	27	ORCD	31322	0.5	48.358	19	81	PAST	31483	0.5	20.869
5	28	ORCD	31333	0.5	29.23	19	82	RICE	31244	0.5	39.801
6	29	PAST	31422	0.5	14.056	19	83	RICE	31483	0.5	34.293
6	30	PAST	31422	5.25	36.994	20	84	RICE	31244	0.5	59.827
6	31	PAST	34422	5.25	11.293	21	85	RICE	31244	0.5	34.36
6	32	PAST	34422	25.9999	2.229	21	86	RICE	31483	0.5	31.06
6	33	ORCD	31422	5.25	12.386	22	87	RICE	31244	0.5	03.887
6	34	ORCD	31422	0.5	6.0421	22	88	RICE	31483	0.5	03.549
6	35	ORCD	34422	5.25	12.432	23	89	RICE	31244	0.5	166.37
6	36	ORCD	34422	25.9999	15.119	23	90	RICE	31333	0.5	191.85
7	37	CORN	31333	0.5	3.0986	24	91	RICE	23221	0.5	0.24555
7	38	CORN	31422	0.5	3.3569	24	92	RICE	23321	0.5	0.22323
7	39	CORN	31422	5.25	1.4977	25	93	PAST	23321	0.5	86.635
8	40	PAST	31254	25.9999	229.85	25	94	PAST	34422	25.9999	61.557
8	41	PAST	31422	25.9999	88.184	25	95	COCT	23321	0.5	75.726
8	42	PAST	31422	5.25	116.21	26	96	PAST	31422	25.9999	104.64
9	43	PAST	21422	5.25	25.745	26	97	PAST	31422	5.25	110.51
9	44	PAST	21422	25.9999	58.233	26	98	PAST	34422	25.9999	158.95
9	45	PAST	31422	25.9999	51.128	26	99	PAST	34422	5.25	71.359
9	46	PAST	31422	5.25	41.368	27	100	PAST	23321	0.5	125.58
9	47	CORN	31333	0.5	147.38	27	101	PAST	34422	25.9999	89.013
9	48	CORN	31333	5.25	48.671	27	102	COCT	23321	0.5	57.652
10	49	CORN	31333	0.5	41.835	27	103	COCT	31442	0.5	34.372
11	50	PAST	31422	25.9999	103.09	27	104	COCT	31442	5.25	37.356
11	51	PAST	31422	5.25	100.84	28	105	CORN	31244	0.5	100.96
11	52	PAST	34422	25.9999	19.446	28	106	CORN	31483	0.5	51.952
11	53	PAST	34422	5.25	49.302	28	107	COCT	23411	0.5	98.401
12	54	CORN	31342	0.5	73.458	28	108	COCT	31483	0.5	85.757

2.10. Calibración y validación del modelo

La calibración del modelo, es la ejecución del modelamiento para la definición de los parámetros que determinan el comportamiento del área de estudio (Sorooshian y Gupta 1995). Consiste en dos etapas:

- i) Los parámetros se configuran con valores iniciales, que se denominan “especificación de parámetros”, son datos físicos y de procesos que han sido prestablecidos y que se encuentran en un determinado rango, obedecen a principios hidrológicos;
- ii) El uso de diversas técnicas que permiten la estimación de los parámetros del proceso que reduce la incertidumbre del modelamiento, que consiste en ajustar a los nuevos valores iniciales.

Los parámetros físicos son datos medibles, que representan las propiedades físicas de la cuenca; tales como, área de la cuenca o pendientes. Los parámetros del proceso corresponden a información que no es factible medir directamente en el campo, debido a su complejidad, tales como el factor del tiempo de transporte del flujo lateral.

La calibración del modelado en la herramienta del SWAT, bajo el principio descrito es lograr un ajuste satisfactorio entre los caudales observados y los simulados, mediante el cambio en los valores de los parámetros de mayor influencia.

Existen dos formas para determinar la estimación de los parámetros, según (Sorooshian y Gupta, 1995; Refsgaard y Storm, 1996), calibración manual y automática.

La calibración manual, es un método prueba-error, donde se ajustan los parámetros manualmente y se analizan los cambios resultantes hasta llegar al umbral óptimo. Este método es muy utilizado particularmente por expertos en la materia, sobre todo para agrupar los modelos conceptuales, y es recomendado para modelos más complejos. La calibración manual puede ser una tarea demasiado laboriosa, especialmente para los modeladores con poca experiencia, en este tipo de calibración es difícil mantener un juicio objetivo durante el proceso (Krajenbrink, 2007).

La calibración automática, es otra forma de ajustar los parámetros, donde son utilizadas funciones objetivas (también llamado criterio de funciones). Las funciones objetivas son fórmulas utilizadas para calcular una medida numérica itinerante que disminuya la diferencia entre los datos simulados por el modelado y los observados (Sorooshian y Gupta, 1995). La calibración automática puede ser mucho más rápida que la calibración manual.

Para esta investigación fue adoptada la calibración automática. La información utilizada para la calibración, fue el valor de caudales diarios de la estación de aforo sitio de Zapotal, en Lechugal, para el periodo del primero de enero de 1986 al 31 diciembre de 2005; y la validación, fue realizada para el periodo 2006 al 2015.

Calibración

En la simulación que corresponde a la calibración del modelamiento es aplicado al periodo 1986-2005, ejecutando el modelamiento con los valores iniciales de los parámetros de configuración. Los resultados de caudales simulados fueron comparados con los valores medios mensuales, registrados en la estación Zapotal, en Lechugal, que corresponde a la subcuenca número 9. Las comparaciones son apreciables en las (Figura 42) y (Figura 43).

Los valores de cálculo de la efectividad del modelo para el Coeficiente de Correlación R^2 es de 0,83 y Nash-Sutcliffe es de 0,83; RMSE es de 76,36; y CES^2 es de 0,90 resultado de la ecuación lineal ($y=0,9884x$).

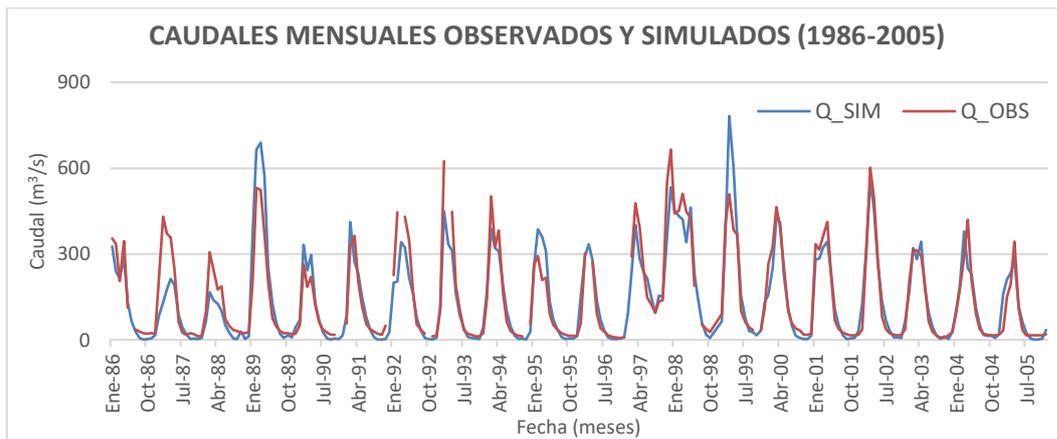


Figura 42. Diagrama de caudales observados vs simulados.

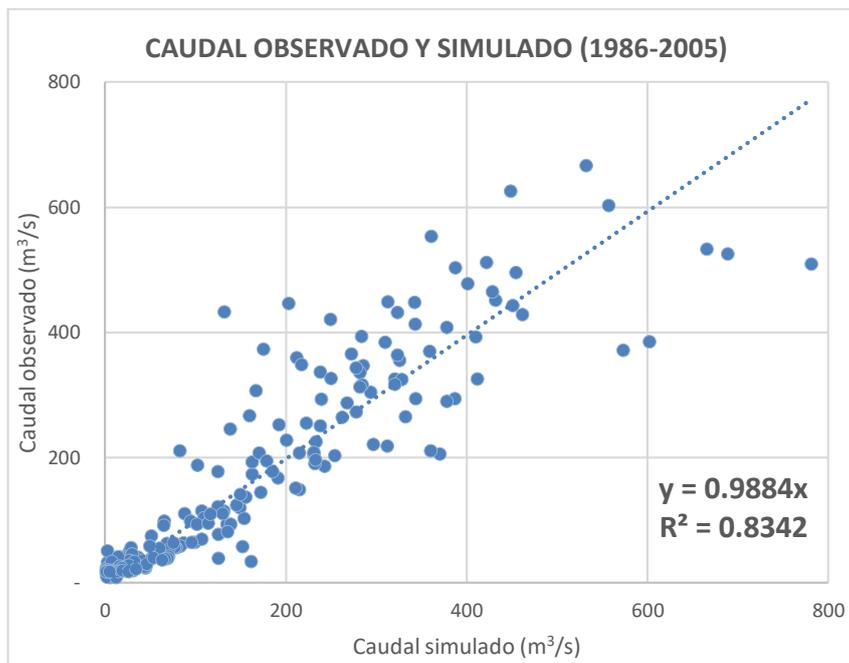


Figura 43. Calibración. Correlaciones caudales mensuales observados vs simulados.

Sensibilidad del modelo

El SWAT, para el modelamiento requiere una gran cantidad de parámetros. El objetivo del análisis de sensibilidad es la determinación de un conjunto de parámetros que tienen mayor incidencia en el modelamiento entre los valores de entrada y los de salida. El método de Parasol que se utiliza en la sensibilidad del modelo incorpora la función objetivo (OF) dentro de un criterio de optimización global (GOC), el cual minimiza los OF o GOC haciendo uso de un algoritmo aleatorio complejo y optimización del análisis de incertidumbre (SCE-UA) con la selección de dos conceptos estadísticos (Abbaspour, 2015).

La implementación del análisis de sensibilidad se identificó 13 parámetros claves que influyen en el modelamiento del SWAT. Los tres parámetros del análisis de sensibilidad que mayor influencia tienen en la escorrentía de la cuenca, son el número de curva de escorrentía (CN2), factor alfa del flujo base (ALFA_BF) y retardo del agua hacia el agua subterránea (GW_DELAY). (Tabla 36)

Tabla 36.

Orden y valor de los parámetros de sensibilidad en la cuenca.

ORDEN	PARÁMETRO	VARIABLE	RANGO	SENSIBILIDAD
1	Número de curva de escorrentía CN II	CN2	-0,2 a 0,2	0,14
2	Factor alfa del flujo base (días)	ALPHA_BF	0 a 1	0,98
3	Retardo del agua subterránea (días)	GW_DELAY	30 a 450	31,99
4	Profundidad del umbral de agua del acuífero (mm)	GWQMN	0 a 2	1,26
5	Coefficiente de evaporación del agua subterránea	GW_REVAP	0 a 0.2	0,01
6	Factor de compensación de evaporación del suelo	ESCO	0,8 a 1	0,93
7	Numero de Manning's para el canal principal	CH_N2	0 a 0,3	0,15
8	Conductividad hidráulica en el canal principal (mm/h)	CH_K2	5 a 130	80,83
9	Factor alfa del flujo base de cuerpo de agua (días)	ALPHA_BNK	0 a 1	0,15
10	Disponibilidad de contenido de agua en el suelo	SOL_AWC(1)	-0,2 a 0,4	0,37
11	Conductividad hidráulica saturada (mm/h)	SOL_K(1)	-0,8 a 0,8	0,41
12	Densidad de humedad (g/cm ³)	SOL_BD(1)	-0,5 – 0,6	-0,10
13	Temperatura de la nieve (°C)	SFTMP	-5 a 5	-4,19

Validación

En la simulación que corresponde a la validación del modelamiento para el periodo 2006-2015, fue ejecutado el modelamiento con los parámetros que son los valores resultados de la sensibilidad del modelado. Las comparaciones de eficiencia del

modelamiento son detalladas en las (Figura 44) y (Figura 45). Los valores de cálculo de la efectividad del modelo para el Coeficiente de Correlación R^2 es de 0,84 y Nash-Sutcliffe es de 0,79; RMSE es de 89,55; y CES^2 es de 0,79 resultado de la ecuación lineal ($y=0,8644x$).

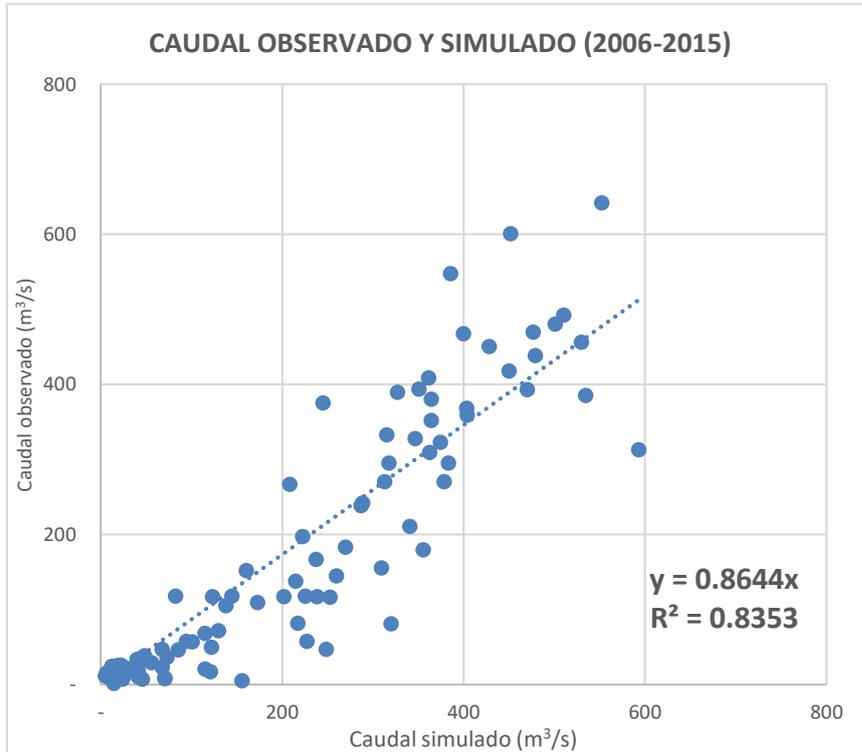


Figura 44. Validación. Correlación caudales mensuales observados vs simulados.

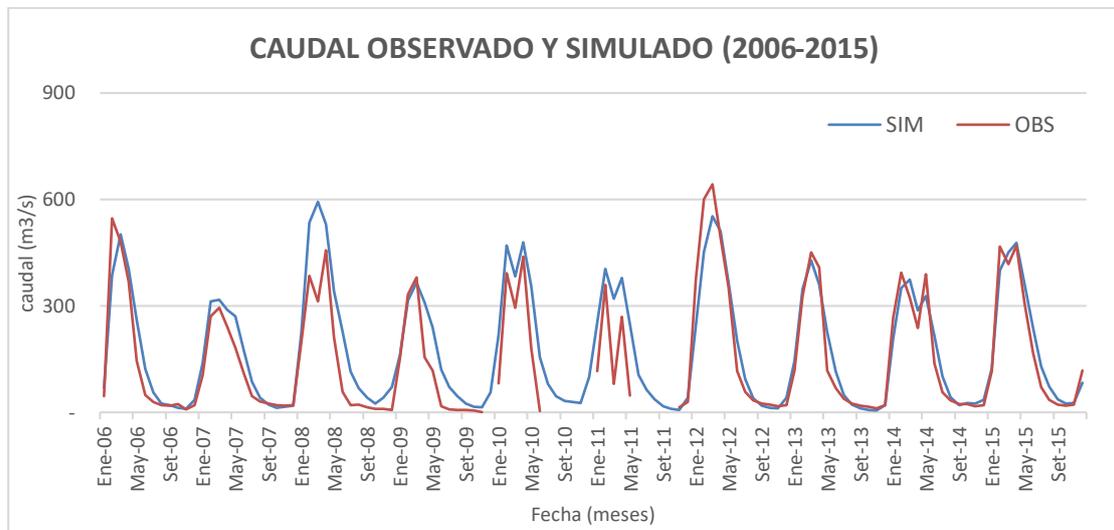


Figura 45. Validación. Diagrama caudales mensuales observados vs simulados.

3. Cálculo del balance hídrico directo (BHD)

3.1. Balance hídrico (BH)

La ecuación del balance hídrico, para una cuenca hidrográfica, indica los valores relativos de entrada y salida de caudales y la variación del volumen de agua almacenada en la cuenca. En general, las entradas en la ecuación del balance hídrico comprenden la precipitación (P), en forma de lluvia o nieve, recibida en la superficie del suelo, y las aguas superficiales y subterráneas dentro de la cuenca de los caudales desde fuera (Q_{SI} y Q_{UI}).

Las salidas en la ecuación incluyen la evapotranspiración desde la superficie de la cuenca (ET_a) y la salida de los caudales de la cuenca de agua superficial y subterránea (Q_{SO} y Q_{UO}). Cuando las entradas superan a las salidas, el volumen de agua almacenada en la cuenca (ΔS) aumenta, y, cuando ocurre lo contrario, disminuye. Todos los componentes del balance hídrico están sujetos a errores de medida o estimación, y la ecuación del balance deberá incluir, por tanto, un término residual (ε).

Por tanto, el balance hídrico para una cuenca hidrográfica para cualquier intervalo de tiempo, en su forma general, se representada por la Ecuación 31.

$$P + Q_{SI} + Q_{UI} - ET_a - Q_{SO} - Q_{UO} - \Delta S - \varepsilon = 0 \quad (31)$$

En una cuenca hidrográfica, si las aportaciones subterráneas de otra cuenca son despreciables $Q_{UI} = 0$ y no existen aportaciones por trasvases de otras cuencas, por lo tanto $Q_{SI} = 0$. La ecuación de balance hídrico para una cuenca hidrográfica queda definida con la Ecuación 32.

$$P - ET_a - Q - \Delta S - \varepsilon = 0 \quad (32)$$

3.2. Balance hídrico directo (BHD)

El balance hídrico adquiere auge a raíz del concepto de "evapotranspiración potencial" para una superficie, este método es muy empleado por su simplicidad y estimación para cualquier lugar, desarrollado en 1948, y mejorado en 1955 (Thornthwaite, 1948, 1955). También conocido como balance hídrico directo (BHD).

El BHD es un método empírico que estima el balance de todo el sistema, utilizando el cálculo de la precipitación mensual y anual para el año hidrológico en análisis, y la estimación de la evapotranspiración potencial mensual y anual (Marini & Piccolo, 2000). Partiendo del conocimiento de las precipitaciones medias mensuales y de la evapotranspiración mensual estimada, es estudiado el balance del agua en el suelo a lo largo del año.

El conocimiento del balance hídrico, es necesario para definir el déficit y exceso de agua, siendo además de aplicación para las clasificaciones climáticas, para la definición de la hidrología de una zona y para la planificación hidráulica. En el método directo el agua del suelo se va perdiendo mes a mes hasta agotar la reserva, a fin de cubrir las necesidades de agua (evapotranspiración), mientras que cuando está seco no es posible extraer agua y, por tanto, no se puede llegar a la evapotranspiración. Salvo que la precipitación en esa zona sea superior a la evapotranspiración potencia.

Este método consiste en estimar mes a mes los siguientes parámetros (Almorox, 2003):

- **Precipitación (P):** es el componente de mayor importancia, al ser el que aporta directamente el recurso hacia el sistema.
- **Evapotranspiración potencial (ETP):** fue calculada mediante el método de Thornthwaite (1948), el cual brinda una aproximación de lo que se puede evapotranspirar en el sistema si éste no tuviera restricción alguna del recurso hídrico.
- **$P-ETP$:** al calcular esta diferencia entre las entradas y salidas potenciales de agua en el suelo, fue posible clasificar los meses húmedos (si $P > ETP$) y los meses secos (si $P < ETP$).
- **Reserva de agua en el suelo (R):** depende de las características físicas y biológicas del suelo (textura del suelo y cobertura vegetal). En algunos casos se puede utilizar como reserva máxima 100 mm (Thornthwaite, 1948), sin hacer diferencia entre el tipo de suelo y la cobertura vegetal. Se estima sumando los incrementos $P-ETP$ sólo cuando son meses húmedos. A estos incrementos se le agrega la reserva del mes anterior al mes que se está calculando (Ecuación 33):

$$R = R_{I-1} + (P - ETP) \quad (33)$$

- **Variación de la reserva (VR):** calculada con la diferencia entre la reserva del mes en el que se realiza el cálculo y la reserva del mes anterior (Ecuación 34):

$$VR = R_I - R_{I-1} \quad (34)$$

- **Evapotranspiración real (ETR):** considerada como el volumen de agua que realmente se evapotranspira en el mes y depende estrechamente del volumen de agua disponible. Es decir, que la P en el mes considerado y la R existente será el agua disponible para evaporar. Cuando la P cubre la demanda potencial (generalmente en el periodo húmedo), se puede decir que (Ecuación 35):

$$ETR = ETP \quad (35)$$

- Si la *ETP* excede a la *P* (periodo seco), el agua que se evapora será la de la *P* + *VR* (tomada como valor absoluto) (Ecuación 36):

$$ETR = P + |VR| \quad (36)$$

- **Déficit de agua (*F*):** considerado como el volumen de agua faltante para cubrir las necesidades hídricas potenciales del sistema para evapotranspirar (Ecuación 37):

$$F = ETP - ETR \quad (37)$$

- **Exceso de agua (*Ex*):** es el recurso que excede la reserva máxima y que se habrá perdido por escurrimiento superficial (Ecuación 38):

$$Ex = P - ETP - VR \quad (38)$$

Modelo de cálculo semiautomático de los parámetros del Balance Hídrico Directo

Considerando que la disponibilidad de los datos climáticos es un problema por la dispersión en espacio y tiempo para la elaboración de los mapas de precipitación y evapotranspiración potencia (Vicente et al. 2008), han sido desarrollados muchos métodos geo-estadísticos para solventar la problemática espacial para predecir los valores de las variables climáticas en la construcción de un mapa continuo.

Estos métodos difieren en su concepto y matemática de formulación (Borrough y McDonnell 1998). Entre los modelos más utilizados figuran los globales, locales, geo-estadísticos y mixtos que combinan los globales y locales. En el presente trabajo, fue utilizado el método co-kriging para la precipitación y para la evapotranspiración potencial, el mismo han sido utilizados y probados en varias investigaciones científicas con excelentes resultados en precipitación de $R^2=0.98$ (Vicente et al. 2008). Todo esto con la ayuda de la versatilidad de los modelos geo-estadísticos incorporados en la herramienta SIG.

De los mapas mensuales de precipitación y evapotranspiración potencial se automatizo con algebra de mapas la elaboración de los componentes del balance hídrico directo.

3.3. Reserva de agua en el suelo

La reserva del agua en el suelo depende de las características físicas y biológicas del suelo (textura del suelo y cobertura vegetal). En algunos casos se puede utilizar como reserva máxima 100 mm (Thornthwaite, 1948), sin hacer diferencia entre el tipo de suelo y la cobertura vegetal, utilizando dicho valor para el presente trabajo.

Se estima sumando los incrementos (P-ETP) sólo cuando son meses húmedos. A estos incrementos se le agrega la reserva del mes anterior al mes que se está calculando.

Cuando en un mes se produzcan más entradas que salidas, ($P > ET$) el agua sobrante pasará a engrosar la reserva del suelo; por el contrario, cuando las salidas sean mayores que las entradas se reducirá la reserva del suelo. Sin embargo, el suelo tiene una capacidad de retención de humedad en función de sus características físicas y cuando se alcance la capacidad de retención máxima del suelo, el agua añadida "en exceso" escurrirá superficialmente o en profundidad.

Los mapas de reserva de agua en el suelo se muestran en el (Anexo 3. Reserva de agua en el suelo mensual)

3.4. Déficit de agua en el suelo

Los mapas de déficit de agua mensuales, corresponden al volumen de agua faltante para cubrir las necesidades hídricas potenciales del sistema por evapotranspiración, se muestran en el (Anexo 5. Déficit de agua en el suelo mensual). Se calcula como la diferencia entre la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real. El mapa anual de déficit de agua en el suelo es la suma de los mapas mensuales.

3.5. Exceso de agua en el suelo

Los mapas de excesos de agua mensuales, son el producto del mapa de precipitación mensual menos el mapa de evapotranspiración potencial y el mapa de la variación de la reserva del agua en el suelo (100 mm), se muestran en el (Anexo 4. Exceso de agua en el suelo mensual). El mapa anual de exceso de agua en el suelo es la suma de los mapas mensuales.

4. Índice de Aridez

Los indicadores e índices son útiles en la planificación de la GIRH de las cuencas hidrográficas y con la ayuda de los sistemas de información geográfica, permiten la determinación de las zonas afectadas espacial y temporalmente. Por lo cual, han adquirido gran relevancia en la aplicación de políticas, en relación con el programa de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC).

El índice de aridez (IDA), caracteriza y delimita las zonas áridas, semiáridas, subhúmedas y húmedas (Tabla 37), los mismos que se utilizaron en el "*Atlas de Zonas Áridas de América Latina y el Caribe, 2010*" y "*Guía metodológica para elaboración de mapas de zonas áridas, semiáridas, y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe, 2006*." Este índice fue propuesto por (Hassan y Dregne, 1997), utilizado en el "*Atlas Mundial de Desertificación (UNEP, 1997)*."

Tabla 37.
Clasificación del Índice P/ET_o.

ZONA	P/ET _o
HIPERÁRIDO	< 0,05
ÁRIDO	0,05 a < 0,20
SEMIÁRIDO	0,20 a < 0,50
SUBHÚMEDO SECA	0,50 a < 0,65
SUBHÚMEDO HÚMEDO	0,65 a 1
HÚMEDO	> 1

El Índice de Aridez (IDA), permite definir los lapsos de deficiencia y excedencia climática de agua en un período específico, el cual relaciona la precipitación (P) y la evapotranspiración de referencia del periodo (ET_o) en el sistema considerado, se calcula mediante la Ecuación 39.

$$IA = \frac{P}{ET_o} \quad (39)$$

5. Periodo de análisis de la información

La información hidrometeorológica que tiene influencia directa e indirecta en la cuenca hidrográfica del río Babahoyo, registra datos en la estación Pichilingue desde 1963 como la más antigua de la zona, periódica y progresivamente han sumado la implementación de estaciones hidrometeorológicas hasta la década de los ochenta, a partir de esta fecha algunas estaciones sufrieron un proceso de descuido y olvido. En la mayoría de las estaciones, existen lagunas de datos diarios y pocas tienen una consideración elevada de falta de datos.

El periodo de trabajo aplicado para el modelamiento hidrológico es de 20 años, que datan desde 1986 hasta el 2005, con la finalidad de asemejar las proyecciones de temperatura media global en la superficie de la Tierra para fines de siglo (2081-2100) con respecto a los años 1986-2005 que utiliza el IPCC.

6. Resultados de la observación global y adaptación local

Las primeras medidas de adaptación ante el cambio climático a nivel global deben estar orientadas a la reducción de la vulnerabilidad y exposición como coadyuvante en aumentar la resiliencia, siendo estas de carácter heterogéneo por las condiciones geográficas y principios técnicos, financieros y políticos.

6.1. Aplicación de medidas a nivel global (ACC)

Planificación integrada de los recursos hídricos. Las afectaciones de escasez de agua, predominante en la época de estiaje, requieren de soluciones ingenieriles, tecnológicas, y protección y conservación de las fuentes hídricas.

Soluciones probadas. A lo largo del mundo, la gestión de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas se ha desarrollado con resultados positivos en torno a la adaptación al cambio climático, con nuevas opciones sectoriales con enfoque integrador para optimizar el costo-beneficio de las acciones a ser aplicables con efectividad.

Registro de medidas. La implementación de medidas de adaptación al cambio climático en cuencas hidrográficas, deben ser registradas, documentadas, evaluadas y difundidas sobre el comportamiento de la aplicabilidad o descarte de dichos procedimientos que muy bien podrían ser extrapolados a otras cuencas hidrográficas. Todo esto en beneficio de la comunidad científica, técnica y de los tomadores de decisiones en el ámbito nacional como internacional.

Experiencias acumuladas. En los últimos años, se han implementado medidas específicas de adaptación en varios sectores desarrolladas por públicos y/o privados, las mismas que han sido afectadas por el cambio climático. Lo que ha permitido acumulación de experiencias que muy bien pueden ser replicadas en zonas con características similares físicas y productivas.

Políticas de adaptación. El resultado de la formulación del plan nacional de recursos hídricos y los planes de gestión integral de recursos hídricos por cuenca hidrográfica con enfoque de adaptación ante el cambio climático, deberán ser puesto a consideración de las autoridades políticas de los diferentes niveles de gobierno central y locales, con la finalidad de implementar las políticas públicas a diferentes horizontes de ejecución: corto, mediano y largo plazo.

Ahorro de agua para riego. La prioridad e incentivo para la reducción del consumo de agua en el sector agrícola deberá estar enmarcada dentro del ámbito de dotaciones máximas por hectárea y por cultivos, priorizando las nuevas técnicas de irrigación. Con el fin de redistribuir las autorizaciones de usos y aprovechamientos del recurso hídrico que permitan el incremento de nuevas áreas de irrigación.

Ahorro de agua para consumo humano. En relación al agua para consumo humano se debe definir la cantidad mínima vital por persona. Pasada esa cantidad, cobro de agua a los gobiernos locales municipales para persuadir que mejoren la red de agua potable por pérdidas en las tuberías y el consumo óptimo de agua.

Nuevas especies de cultivos. Investigaciones científicas han determinado cultivos mejorados genéticamente que resisten con demandas hídricas menores a las dotaciones normales. Ante lo cual, el incentivo por parte del estado a emigrar a nuevas especies que permitan dotaciones menores de agua para sus cultivos y contrarrestar pérdidas productivas en épocas secas.

Disminución del consumo de agua. Ante las autorizaciones de usos y aprovechamientos del recurso hídrico, el ahorro al consumo debería ser incentivado para motivar al uso racional de demanda.

Protección de fuentes de agua. La protección de las zonas de recargas hídricas y fuentes de aguas deben ser motivadas a través de incentivos por los servicios ambientales que prestan.

Normas específicas para situaciones de sequías. La formulación de planes específicos de gestión de sequías.

6.2. Balance hídrico actual y escenarios futuros de cambio climático

Los resultados de cálculo de la presente investigación, sobre la tendencia del cambio climático, en referencia a la variación incremental de la temperatura y precipitación constante como los indicadores relevantes en el cálculo del BH, utilizando el método de balance hídrico directo logró la construcción del Índice de Aridez para la determinación del cambio cuantitativo y cualitativo debido al cambio climático en la cuenca hidrográfica del río Babahoyo.

En referencia a la temperatura, son considerados los valores de los cuatro escenarios descritos en el Quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC del año 2014. En cada uno de los escenarios es determinado el valor de forzamiento radiativo, que se representa en W/m^2 y son: RCP2.6=+2,6, RCP4.5=+4,5, RCP6=+6,0 y RCP8.5=+8,5. El incremento de la temperatura media para la cuenca de estudio en el periodo (2081-2100) con respecto al periodo (1986-2005) serían: 1,00 °C; 1,85 °C; 2,25 °C y 3,70 °C, respectivamente. Considerando el efecto del cambio de la distribución de la temperatura futura como un simple desplazamiento de toda la distribución hacia un clima más cálido (IPCC, 2012).

De acuerdo con el informe del IPCC año 2014, la precipitación promedio anual se vería incrementada en un máximo del 10% para el escenario RCP8.5, considerando que la mayor precipitación se presente en las regiones y estaciones húmedas, mientras que menores precipitaciones sería registradas en las regiones y estaciones secas.

Basado en la aplicación del principio de conservación de masas que representa el ciclo hidrológico, previendo que, en la época de estiaje o meses secos, el cambio del comportamiento de la precipitación no varía, convirtiéndose en un factor no preponderante en dicho periodo, en términos generales de las etapas del ciclo hidrológico, las variables que se verían afectadas básicamente por el incremento de la temperatura son la escorrentía, evapotranspiración, agua subterránea y flujo laterales.

7. Adaptación local del uso de los recursos hídricos ante el cambio climático

Dentro de las medidas generales que se describen a continuación a ser consideradas en la adaptación de la formulación de la planificación integral de los recursos hídricos

de cuencas hidrográficas, producto de investigación técnica, científica internacional y nacional, los resultados son complementados con ciertas recomendaciones a la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Uso y Aprovechamiento del Agua y su reglamento, para beneficio de fortalecer los niveles de resiliencia de los sistemas ante el cambio climático.

Los resultados de las fases del ciclo hidrológico para fines de siglo comparados con el periodo base para los diferentes escenarios RCP, permiten avizorar cambios considerables y de alta susceptibilidad, como el del déficit hídrico en el periodo de transición desde meses húmedos hacia los meses secos; para lo cual, las medidas de adaptación deben ser consideradas desde una perspectiva técnica, científica, jurídica y política.

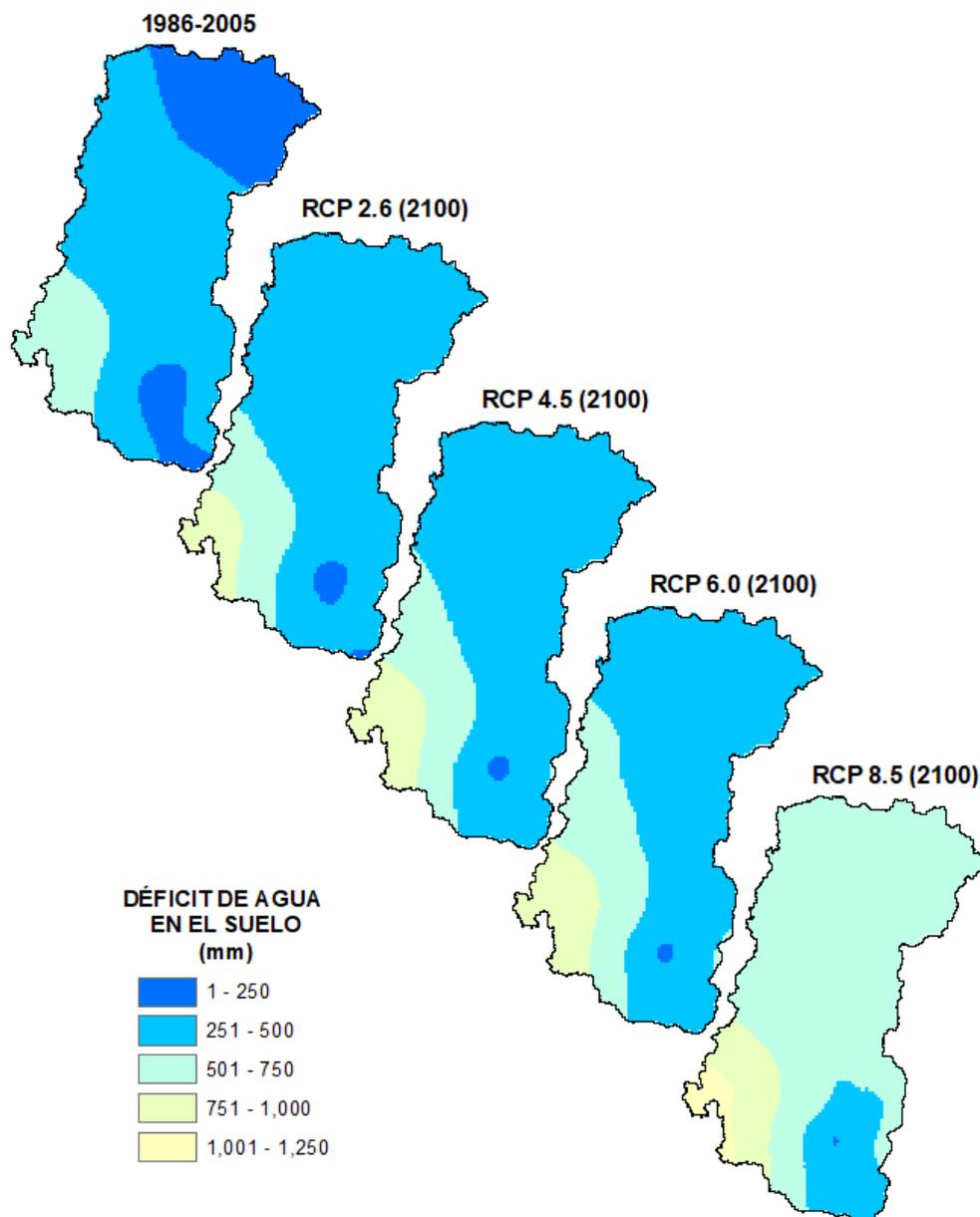
La actuación a nivel local (municipal) y a nivel de cuenca hidrográfica, es clave debido a que las medidas de adaptación son formuladas e implementadas a ese nivel para los planes de gestión integrada de los recursos hídricos. Para la exitosa implementación de las medidas de adaptación, éstas deberían en primera instancia contar con el respaldo de las leyes y políticas propias de cada país.

En el caso específico ecuatoriano, el marco jurídico sobre el plan nacional de recursos hídricos y los planes de gestión integral de recursos hídricos por cuenca hidrográfica, adolecen, en cierta medida la clarificación sobre medidas de adaptación al cambio climático en las cuencas hidrográficas. Ante lo cual, son esbozadas varias medidas generales que podrían coadyuvar como resultados de investigación del presente estudio aplicable y extrapolable a nivel de cuenca hidrográfica.

El efecto del incremento de la temperatura del aire por el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, es de índole global, sin embargo, las afectaciones son diferenciadas y localizadas. En la presente investigación son abordadas las posibles medidas de adaptación que permitan fortalecer la capacidad de resiliencia de los sistemas ante los efectos del cambio climático en la cuenca hidrográfica del río Babahoyo.

Capítulo V.

RESULTADOS



V. RESULTADOS

En el presente capítulo se exponen los resultados del modelamiento hidrológico y cálculo del balance hídrico directo para la cuenca del río Babahoyo. Los resultados son presentados por variables y para los periodos de estudio y proyección de escenarios, mediante análisis cualitativos como los mapas de frecuencia mensual y anual, y análisis cuantitativos con las tablas numéricas que representan volumen (m^3) o laminada de agua (mm).

Si bien es cierto, los cálculos al interior del modelamiento hidrológico se realizan a nivel de zonas homogéneas conexas entre sí en términos de unidades de respuestas hidrológicas (HRU), las mismas que configuran las subcuencas. Clarificando que para el presente trabajo de investigación, se presentan los análisis de los resultados de los componentes del ciclo hidrológico a nivel de la cuenca hidrográfica.

Sin embargo, los datos y mapas muy bien pueden ser utilizados a nivel de subcuencas como unidad de GIRH. Como ejemplo, la contabilidad de la oferta y demanda de una subcuenca que permite la gestión de las asignaciones de concesiones de agua para los diferentes usos y aprovechamientos del recurso hídrico.

1. Precipitación

Los mapas de precipitación mensual, fueron elaborados con el método geoespacial co-kriging del software ArcGis (SIG), partiendo del promedio mensual de precipitación correspondiente a las estaciones seleccionadas, para el periodo 1986-2005 y el MDT.

El mapa anual es el producto de la suma de los mapas mensuales (Figura 46). El comportamiento de la precipitación anual se intensifica de este a oeste con relación a la elevación (mayor altura mayor precipitación) con valores entre 1.501-2.000 mm hasta llegar a centro de la cuenca donde se registra entre 2.501-3.000 mm, para iniciar un descenso de precipitación (a mayor altura menor precipitación) que va desde 1.500 mm a 750 mm.

La precipitación media anual para el periodo de estudio es de 2.200 mm, siendo los meses de febrero y marzo los más lluviosos con 440 y 442 mm, respectivamente. La máxima precipitación en los veinte años para los meses de febrero y marzo son de 596 y 562 mm, y la mínima en los mismos meses es de 169 y 185 mm, respectivamente. (Tabla 38) y (Figura 47).

Los meses húmedos van de diciembre a mayo y los meses secos de junio a noviembre, considerando que el año hidrológico empieza en diciembre, en la Figura 48 se describe la precipitación media mensual multianual.

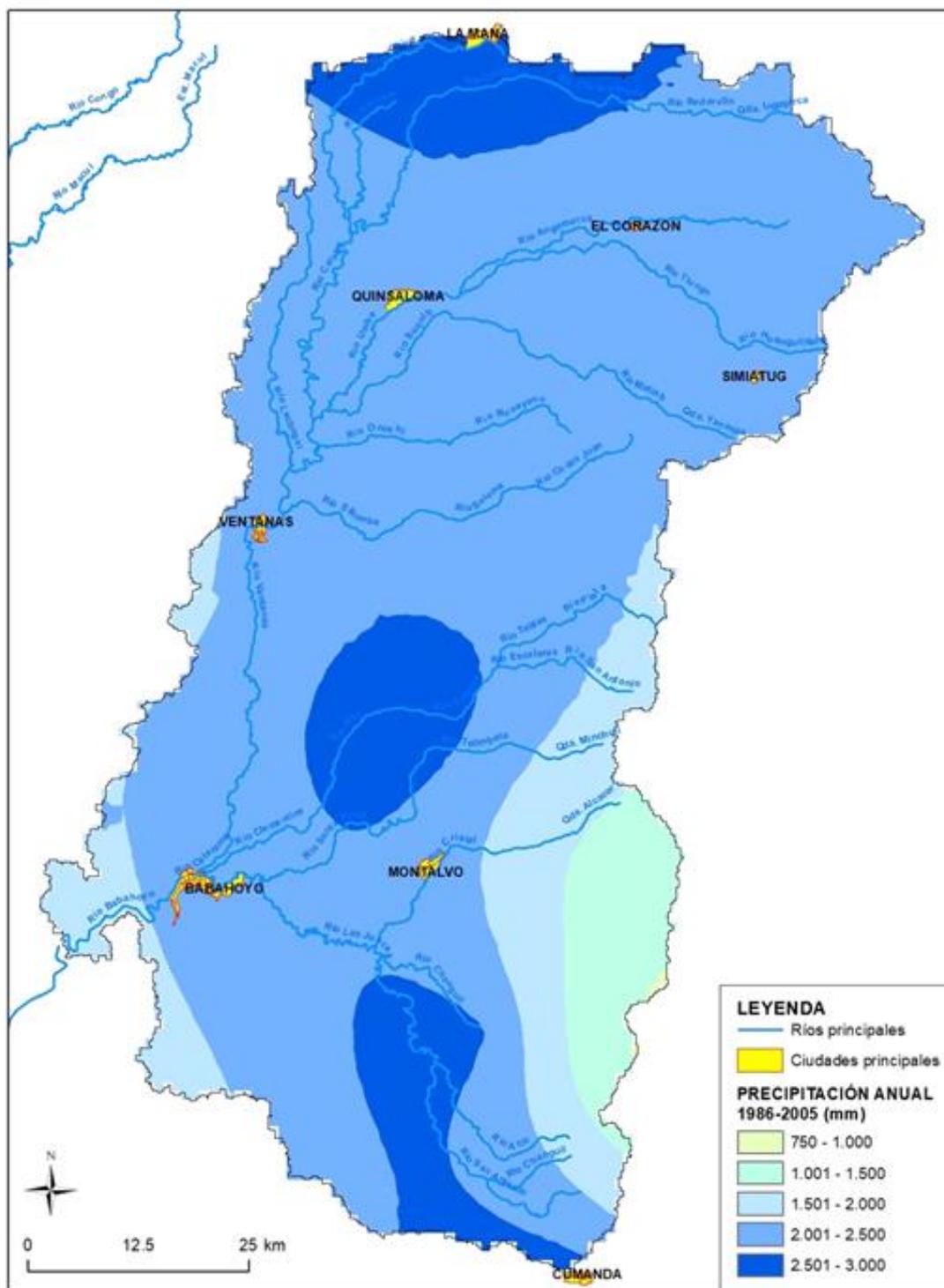


Figura 46. Precipitación media anual 1986-2005 (mm).
Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

Tabla 38.

Precipitación media mensual 1986-2005 (mm) en la cuenca.

MES	MEDIA	MÍNIMA	MÁXIMA	DESV. EST.
ENE	363,54	142,00	531,00	111,49
FEB	440,19	169,00	596,00	121,72
MAR	442,77	185,00	562,00	108,03
ABR	363,38	170,00	497,00	93,32
MAY	162,81	68,00	268,00	57,79
JUN	54,83	17,00	112,00	26,65
JUL	35,48	11,00	87,00	21,24
AGO	16,74	3,00	53,00	13,59
SEP	31,75	12,00	88,00	21,17
OCT	35,10	10,00	63,00	15,59
NOV	68,66	22,00	156,00	37,47
DIC	184,60	87,00	261,00	49,18
TOTAL	2.199,82			

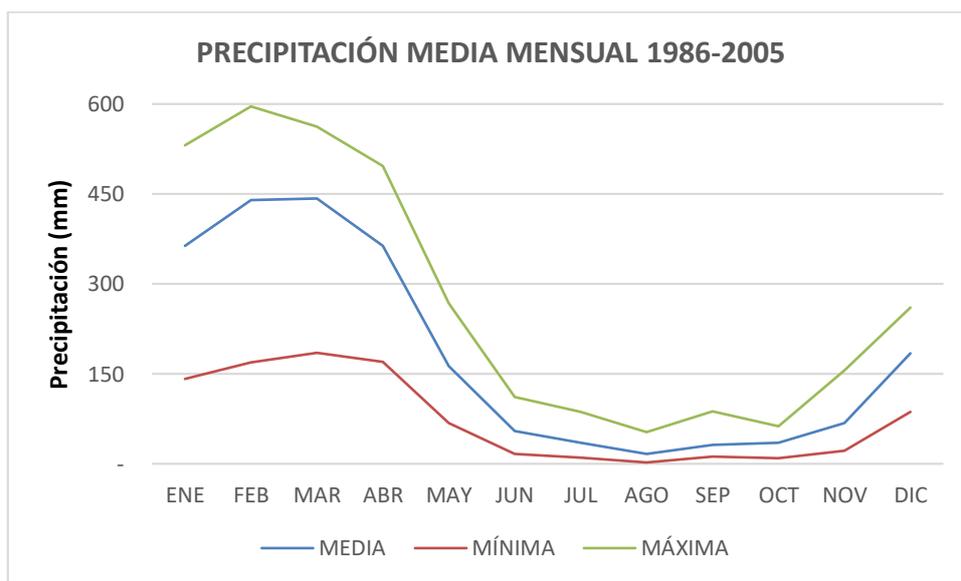


Figura 47. Precipitación media mensual 1986-2005 (mm) en la cuenca.

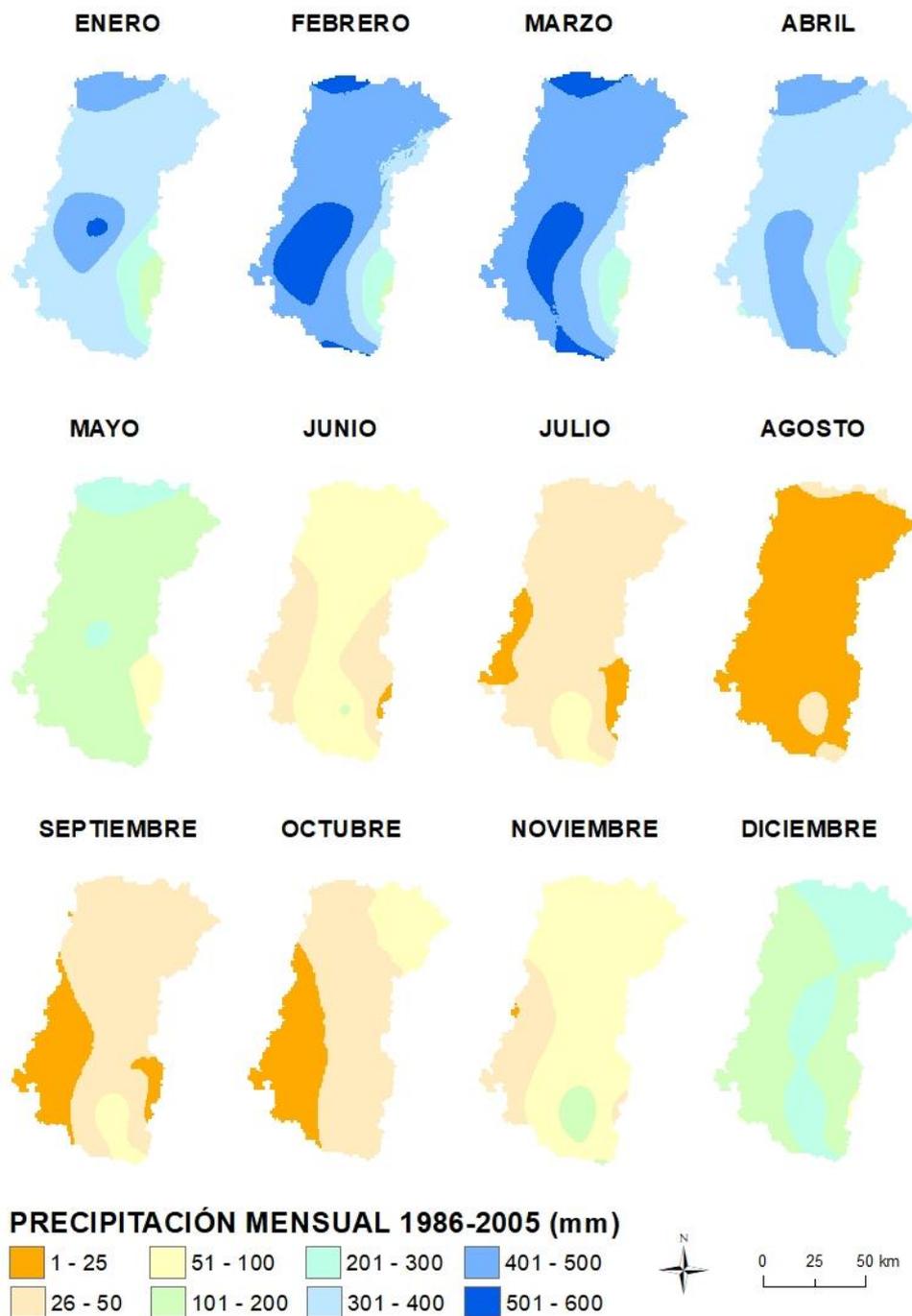


Figura 48. Precipitación media mensual periodo (1986-2005)

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

En síntesis, general se puede indicar que la variación de la precipitación media anual y media mensual dentro de la cuenca hidrográfica presenta un comportamiento espacial heterogéneo. En la cual las mayores precipitaciones, se encuentran en el centro de la cuenca con una orientación de norte a sur, disminuyendo hacia los extremos de la cuenca. La menor precipitación se encuentra en la parte suroeste que es la zona de mayor altitud dentro de la cuenca.

2. Evapotranspiración potencial anual

La evapotranspiración potencial anual en el periodo (2081-2100) para los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 es de 1.380, 1470, 1.509 y 1.625 mm (Figura 49) y la media mensual es de 115, 122, 126 y 135 mm, respectivamente.

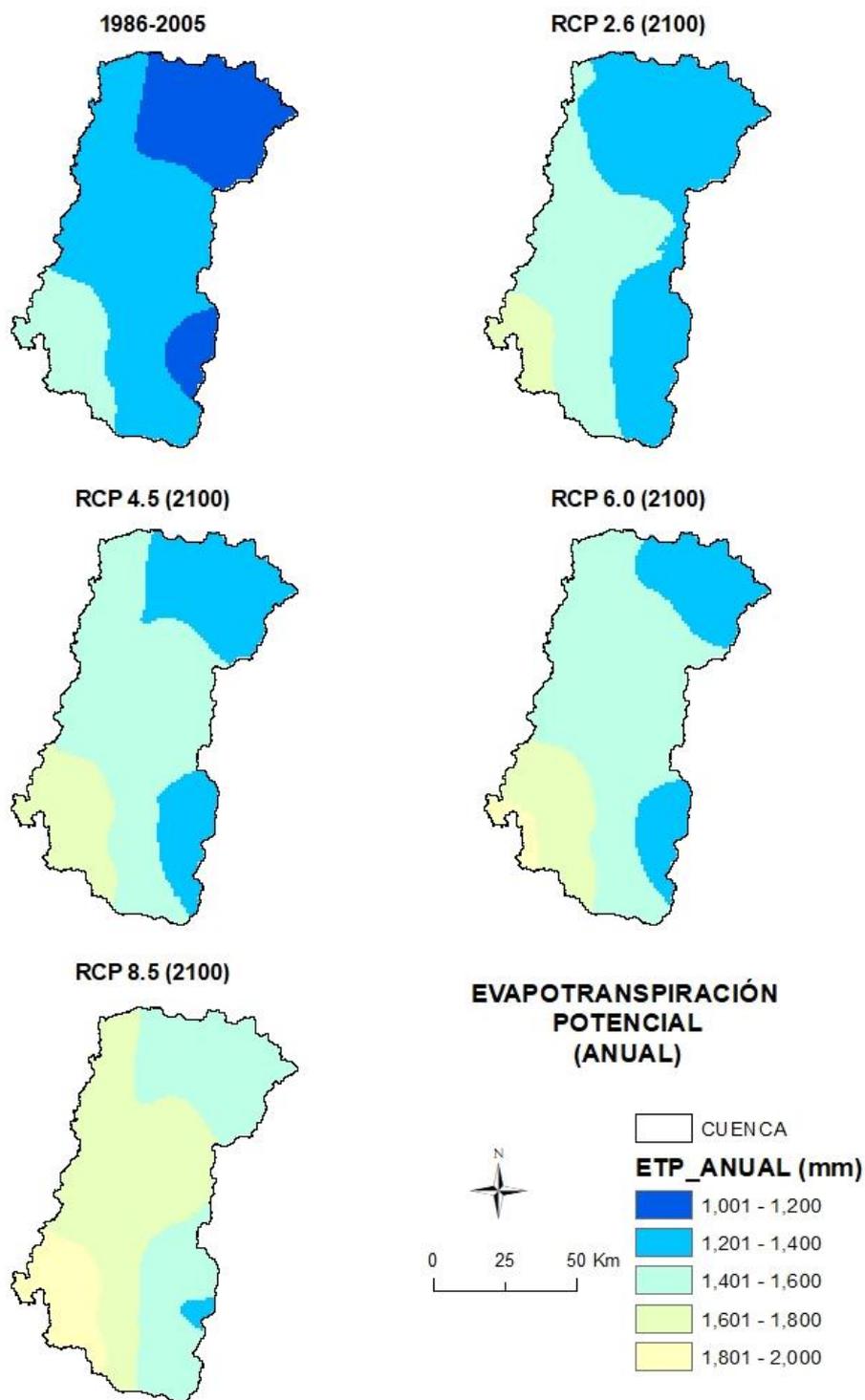


Figura 49. Evapotranspiración potencial anual (mm) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP.

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

Comparada con el periodo de estudio 1986-2005, se incrementa en los siguientes valores: RCP2.6, 8,71%; RCP4.5, 15,79%, RCP6.0, 18,86% Y RCP8.5, 28,03% (Tabla 39) y (Figura 50).

Tabla 39.

Evapotranspiración potencial mensual (mm) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 en la cuenca.

MES	1986-2005	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
ENE	94,94	101,19	105,40	107,28	111,90
FEB	85,27	89,48	91,90	92,75	96,85
MAR	103,09	108,21	112,03	112,99	118,21
ABR	90,82	96,87	101,78	103,71	107,00
MAY	95,73	102,02	107,15	109,38	116,64
JUN	94,38	103,06	110,23	113,45	124,43
JUL	105,29	116,84	126,73	131,21	146,82
AGO	115,35	128,86	140,41	145,67	163,90
SEP	118,12	131,57	142,93	148,08	165,94
OCT	122,53	135,44	146,24	151,09	167,16
NOV	125,58	137,43	147,17	151,47	160,89
DIC	118,15	128,86	137,67	141,51	145,29
TOTAL:	1.269,24	1.379,82	1.469,64	1.508,58	1.625,05
MEDIA:	105,77	114,99	122,47	125,72	135,42
INCREMENTO (%)	0,00	8,71	15,79	18,86	28,03

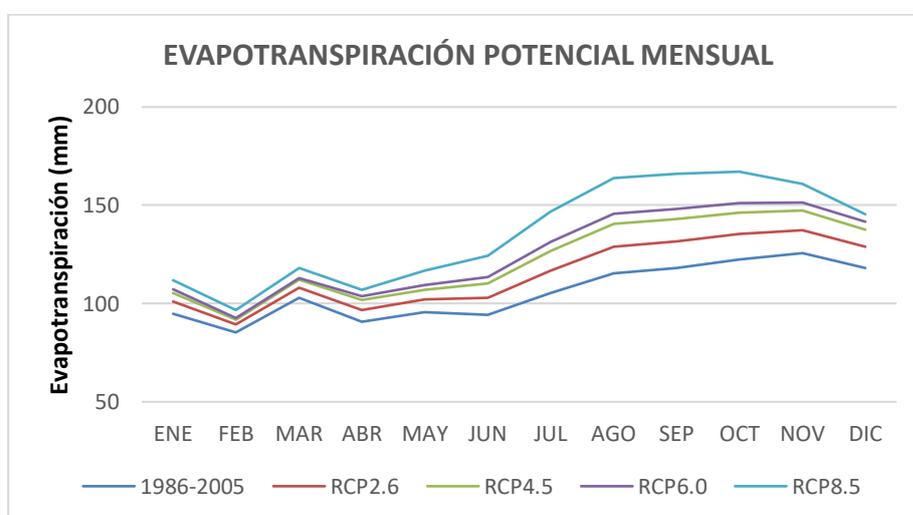


Figura 50. Evapotranspiración potencial mensual ETP mensual (mm) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP en la cuenca

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

La evapotranspiración potencial anual en la zona de estudio para los diferentes escenarios comparados con el periodo base, se puede indicar que existe una variación incremental desde oeste a este.

En la cuenca hidrográfica las zonas con menor evapotranspiración potencial anual son las zonas noreste y sureste, y las de menor evapotranspiración potencia anual es la zona con menor altitud que coincide con la desembocadura de la cuenca del estudio.

3. Precipitación útil (P-ETP)

Los mapas de precipitación útil mensual es producto de las diferencias entre los mapas de precipitación mensual y evapotranspiración potencial mensual (álgebra de mapas).

La interpretación de los resultados es la clasificación en meses húmedos (si $P > ETP$) y meses secos (si $P < ETP$) (Anexo 2. Precipitación útil mensual). El mapa precipitación útil anual es la suma de los mapas precipitación útil mensuales (Figura 51).

La variación de meses húmedos a meses secos es mínima, en particular en superficie se encuentra la variación en la zona suroeste de la cuenca.

La precipitación útil anual para fin de siglo de los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 es de 820, 730, 691 y 575 mm. Comparada con el periodo de estudio 1986-2005, se decremento en los siguientes valores: RCP2.6, 11,87%; RCP4.5, 21,52%, RCP6.0, 25,70% Y RCP8.5, 38,22% (Tabla 40) y (Figura 52).

Tabla 40.

Precipitación útil mensual (mm) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 en la cuenca.

MES	1986-2005	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
ENE	268,09	261,87	257,65	255,76	251,14
FEB	354,43	350,21	347,79	346,94	342,84
MAR	339,18	334,06	330,24	329,28	324,06
ABR	272,06	266,01	261,09	259,17	255,87
MAY	66,59	60,33	55,20	52,98	45,74
JUN	-39,06	-47,74	-54,90	-58,11	-69,11
JUL	-69,31	-80,87	-90,75	-95,25	-110,85
AGO	-98,11	-111,61	-123,14	-128,41	-146,67
SEP	-85,87	-99,31	-110,69	-115,84	-133,70
OCT	-86,95	-99,86	-110,65	-115,49	-131,57
NOV	-56,45	-68,27	-78,01	-82,31	-91,73
DIC	66,05	55,35	46,59	42,74	38,98
TOTAL:	930,66	820,18	730,43	691,47	575,00
INCREMENTO					
(%)	0,00	-11,87	-21,52	-25,70	-38,22

Procesamiento: Paúl Sotomayor

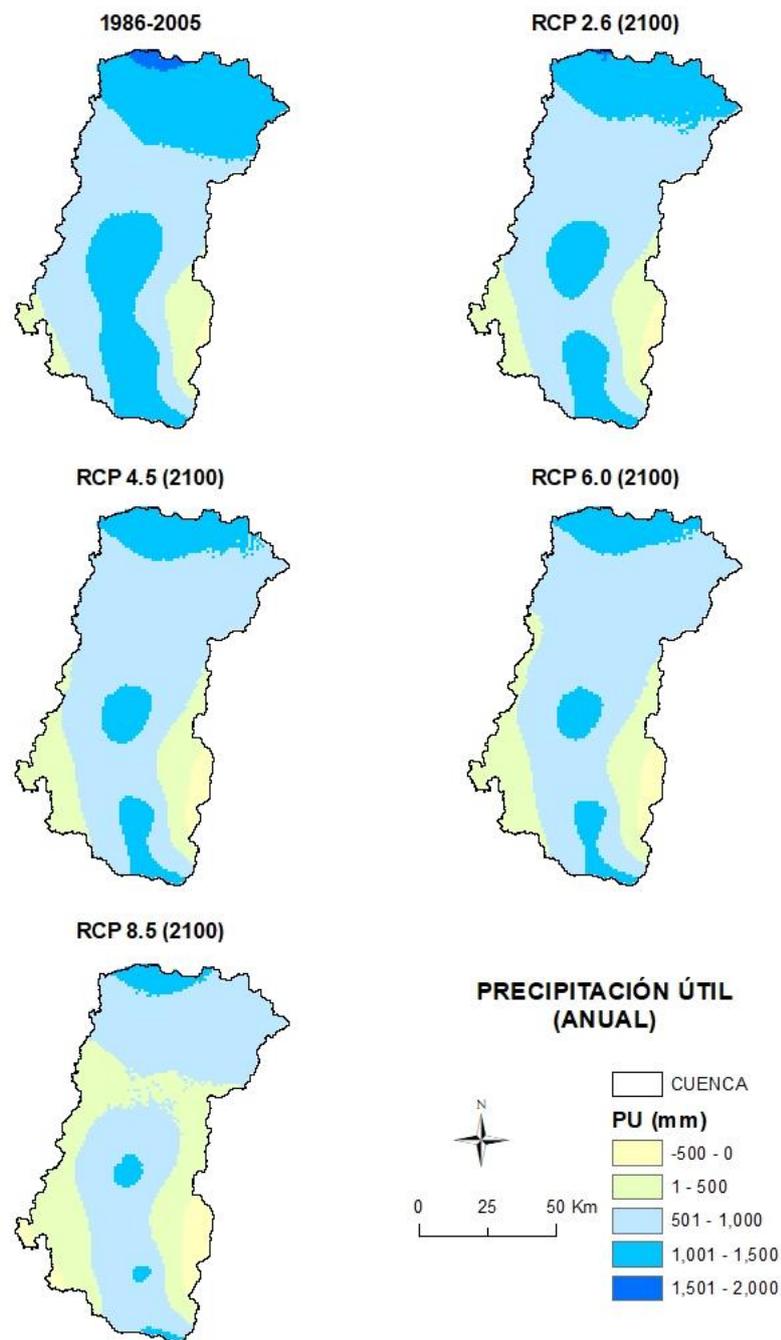


Figura 51. Precipitación útil anual (mm) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5.

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

La precipitación útil en la cuenca hidrográfica presenta un comportamiento de disminución para los diferentes escenarios comparado con el periodo base en la parte central, intensificándose en la zona suroeste que es el área de mayor altitud de la zona de estudio.

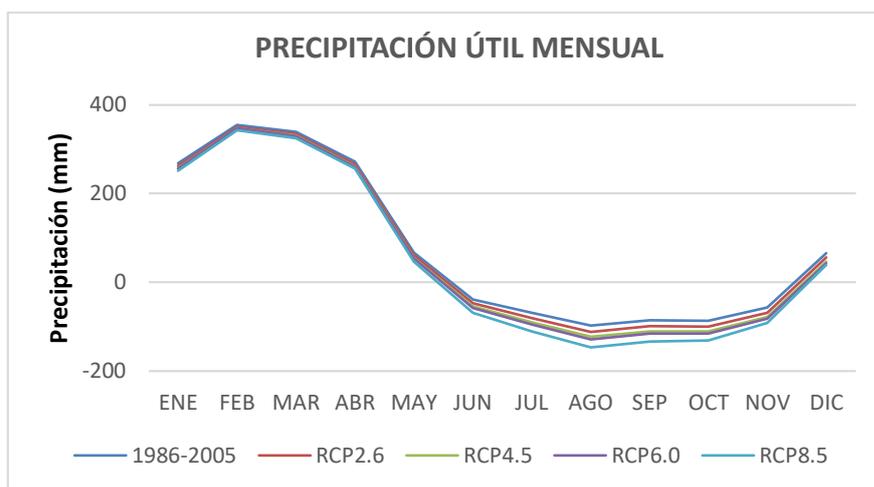


Figura 52. Precipitación útil mensual (mm) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 en la cuenca

4. Reserva de agua en el suelo

La reserva del agua en el suelo para fin de siglo de los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 es de 610, 595, 589 y 573 mm. Comparada con el periodo de estudio 1986-2005, se decremento en los siguientes valores: RCP2.6, 3,17%; RCP4.5, 5,53%, RCP6.0, 6,59% Y RCP8.5, 9,10% (Tabla 41) y (Figura 53).

Para el mes de junio, comparando los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 respecto al periodo de estudio la reserva del agua del suelo se ve afectado en gran medida en los siguientes porcentajes respectivamente: 15,00%, 26,67%, 33,33% y 51,67%.

Tabla 41.

Reserva de agua en el suelo mensual (mm).

MES	1986-2005	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
ENE	100	99	99	99	99
FEB	100	100	100	100	100
MAR	100	100	100	100	100
ABR	100	100	100	100	100
MAY	100	100	99	99	99
JUN	60	51	44	40	29
JUL	5	1	1	0	0
AGO	0	0	0	0	0
SEP	0	0	0	0	0
OCT	0	0	0	0	0
NOV	0	0	0	0	0
DIC	66	59	53	50	46
TOTAL:	630	610	595	589	573
INCREMENTO (%)	0.00	-3,17	-5,53	-6,59	-9,10

Nota: Reserva de agua en el suelo mensual (mm) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5.

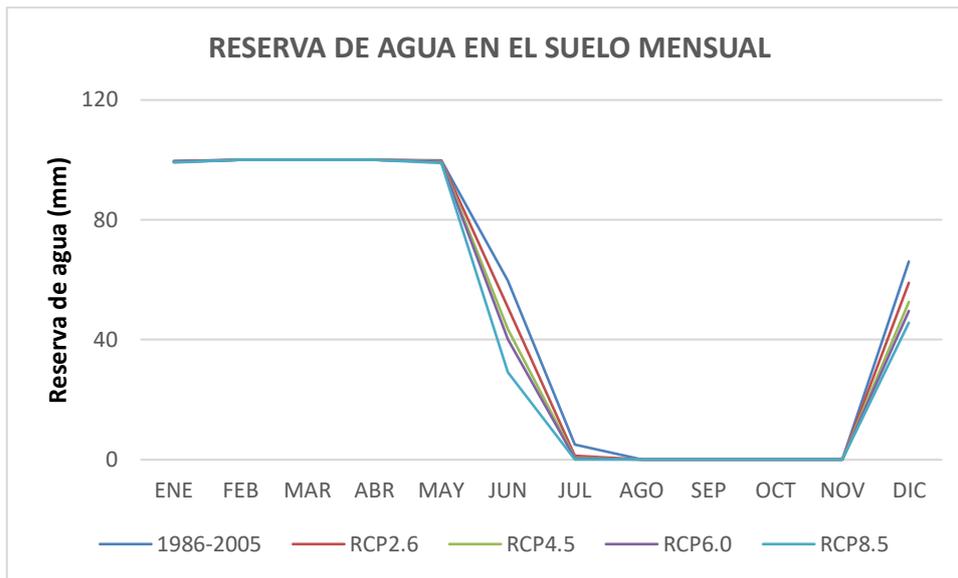


Figura 53. Reserva de agua en el suelo mensual (mm) Reserva de agua en el suelo mensual (mm) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5.

La reserva del agua en el suelo para los diferentes escenarios comparados con el periodo base se ve disminuida en la zona céntrica de la cuenca con un comportamiento de sur a norte, siendo el mes de junio el que más se vería afectado seguidos de los meses de julio y diciembre en menor medida, coincidiendo con los meses de transición entre meses húmedos a secos y viceversa.

5. Exceso de agua en el suelo

El exceso de agua anual para fin de siglo de los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 es de 1.174, 1.153, 1.145 y 1.212 mm (Figura 54). Comparada con el periodo de estudio 1986-2005, decrece en los siguientes valores: RCP2.6, 2,48%; RCP4.5, 4,25%, RCP6.0, 4,90% Y RCP8.5, 6,90% (Tabla 42) y (Figura 55)

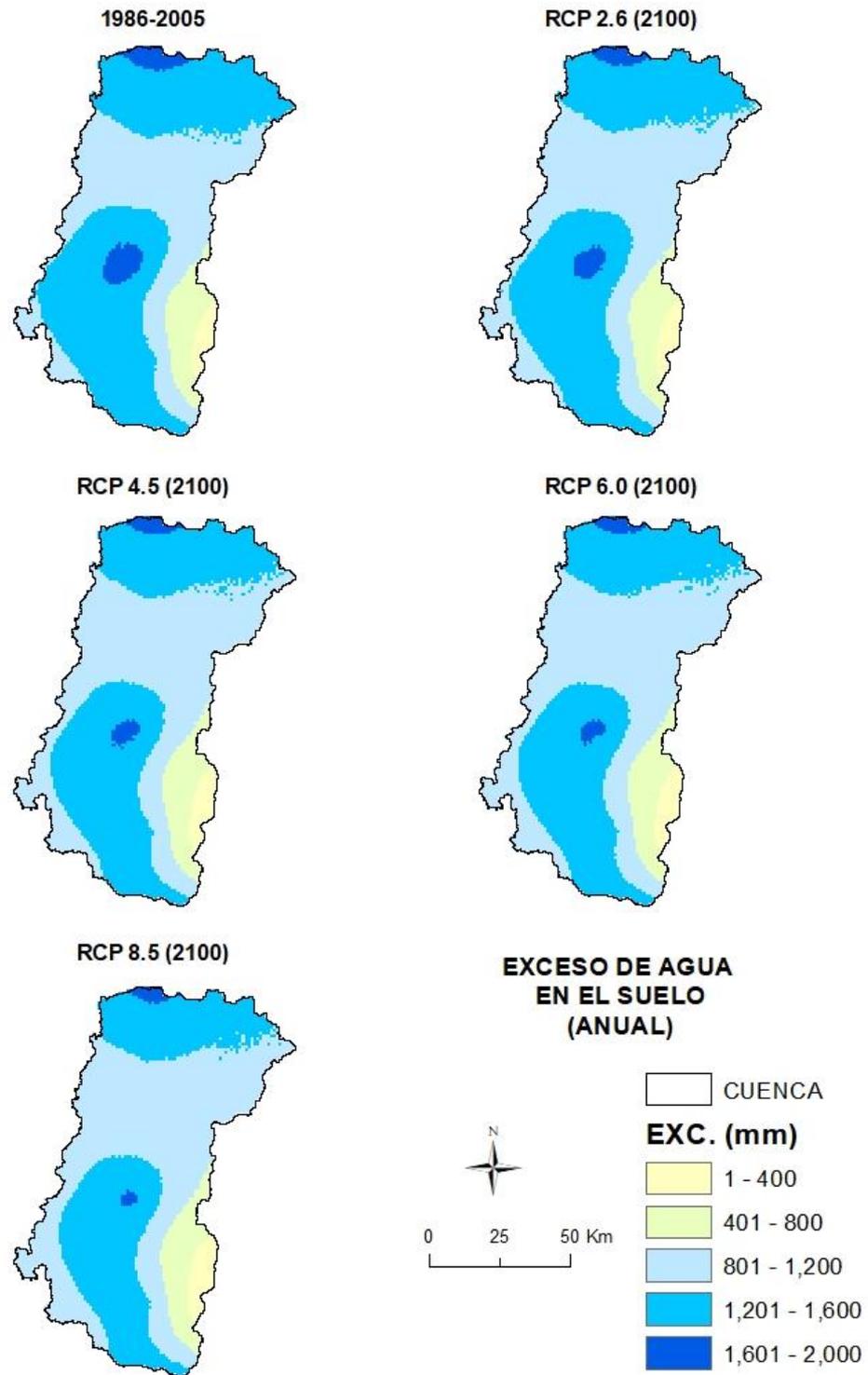


Figura 54. Exceso de agua en el suelo anual (mm) Exceso de agua en el suelo anual (mm) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5. Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

Tabla 42.

Exceso de agua (mm) en el suelo mensual.

MES	1986-2005	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
ENE	169	162	158	157	152
FEB	354	350	347	346	342
MAR	339	334	330	329	324
ABR	272	266	261	259	256
MAY	67	61	56	54	47
JUN	0	0	0	0	0
JUL	0	0	0	0	0
AGO	0	0	0	0	0
SEP	0	0	0	0	0
OCT	0	0	0	0	0
NOV	0	0	0	0	0
DIC	3	1	0	0	0
TOTAL:	1.204	1.174	1.153	1.145	1.121
INCREMENTO (%)	0,00	-2,48	-4,25	-4,90	-6,90

Nota: Exceso de agua (mm) en el suelo mensual (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 en la cuenca.

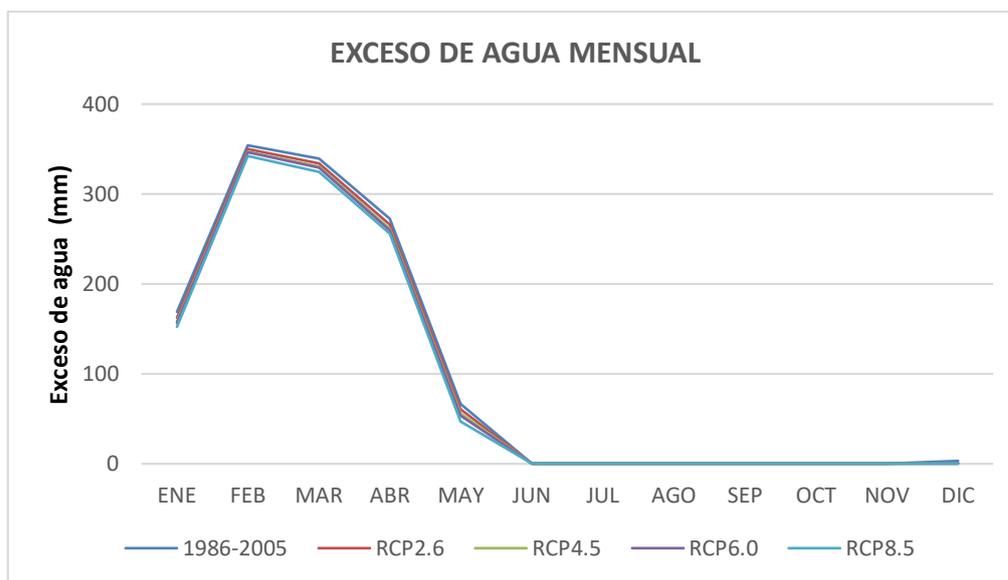


Figura 55. Exceso de agua en el suelo mensual (mm) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 en la cuenca.

El exceso de agua en el suelo en el área de estudio se ve disminuido en el proceso comparativo de los escenarios futuros con el periodo bases, su presencia se da en la zona más baja del área de estudio y que coincide con la desembocadura de la cuenca hidrográfica. No se presentarse cambios sustanciales.

6. Déficit de agua en el suelo

El déficit anual de agua en el suelo para fin de siglo con los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 es respectivamente de 413,31, 475,38, 503,45 y 592,04 mm (Figura 57). En comparación con el periodo de estudio 1986-2005, se evidencia incremento en los siguientes valores: RCP2.6, 21,61%; RCP4.5, 39,88%, RCP6.0, 48,14% Y RCP8.5, 74,20%. Siendo el mes de julio el más afectado de acuerdo con los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 en 30,99, 47,31, 54,96 y 81,33 mm, respectivamente. Realizando una comparación con el mes de julio para periodo de estudio 1986-2005, existe decremento en los siguientes valores: RCP2.6, 113,14%; RCP4.5, 225,38%, RCP6.0, 277,79% Y RCP8.5, 459,35% (Tabla 43) y (Figura 56).

Tabla 43.

Déficit de agua en el suelo (mm) mensual.

MES	1986-2005	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
ENE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FEB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MAR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ABR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MAY	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
JUN	0,00	0,00	0,00	0,02	0,34
JUL	14,54	30,99	47,31	54,93	81,33
AGO	92,85	110,17	122,56	128,00	146,56
SEP	85,86	99,31	110,69	115,84	133,70
OCT	86,95	99,86	110,65	115,49	131,57
NOV	56,52	68,29	78,02	82,31	91,73
DIC	3,14	4,69	6,16	6,86	6,81
TOTAL:	339,86	413,31	475,38	503,45	592,04
INCREMENTO (%)	0,00	21,61	39,88	48,14	74,20

Nota: Déficit de agua en el suelo (mm) mensual (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 en la cuenca.

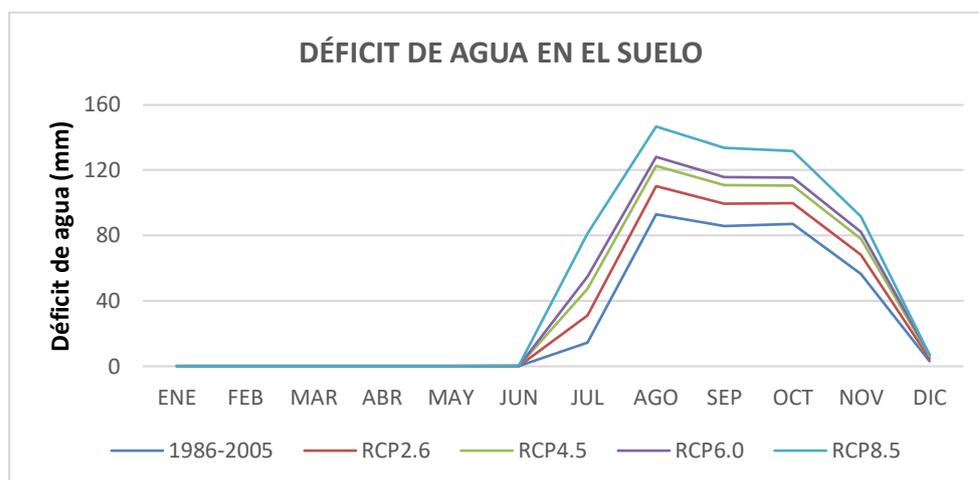


Figura 56. Déficit de agua en el suelo (mm) mensual (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 en la cuenca.

La superficie de déficit de agua en el suelo anual es representativa para el mes de julio para fin de siglo de los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 que es de 6.765, 7.240, 7.320 y 7.453 Km², respectivamente. En valores comparativos con el periodo base del estudio 1986-2005 que tiene una superficie de 4.741 km², se aprecia una disminución en los siguientes valores porcentuales: RCP2.6, 42,69%; RCP4.5, 52,71%, RCP6.0, 54,40% Y RCP8.5, 57,20%. (Tabla 44) y (Figura 58).

Tabla 44.

Superficie de déficit de agua en el suelo (km²) mensual.

MES	1986-2005	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
ENE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FEB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MAR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ABR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MAY	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
JUN	0,00	0,00	9,00	31,00	270,00
JUL	4.741,00	6.765,00	7.240,00	7.320,00	7.453,00
AGO	7.507,00	7.515,00	7.516,00	7.516,00	7.516,00
SEP	7.516,00	7.516,00	7.516,00	7.516,00	7.516,00
OCT	7.516,00	7.516,00	7.516,00	7.516,00	7.516,00
NOV	7.445,00	7.484,00	7.505,00	7.507,00	7.514,00
DIC	738,00	931,00	1.096,00	1.178,00	1.296,00

El déficit del agua en el suelo, dentro de la cuenca hidrográfica presenta un incremento que va en dirección noroeste hacia el sureste, siendo las zonas más deficitarias el área en la desembocadura de la cuenca, de acuerdo a los resultados comparativos de los escenarios modelados y el periodo base.

El mes de julio, es el más afectado, seguido de los meses de junio y diciembre, dichos meses coinciden con los meses de transición entre meses húmedos a secos y viceversa. Existe un cambio sustancial para el escenario RCP2.6 con respecto al periodo base, siendo el indicador del déficit de agua muy susceptible al incremento de la temperatura.

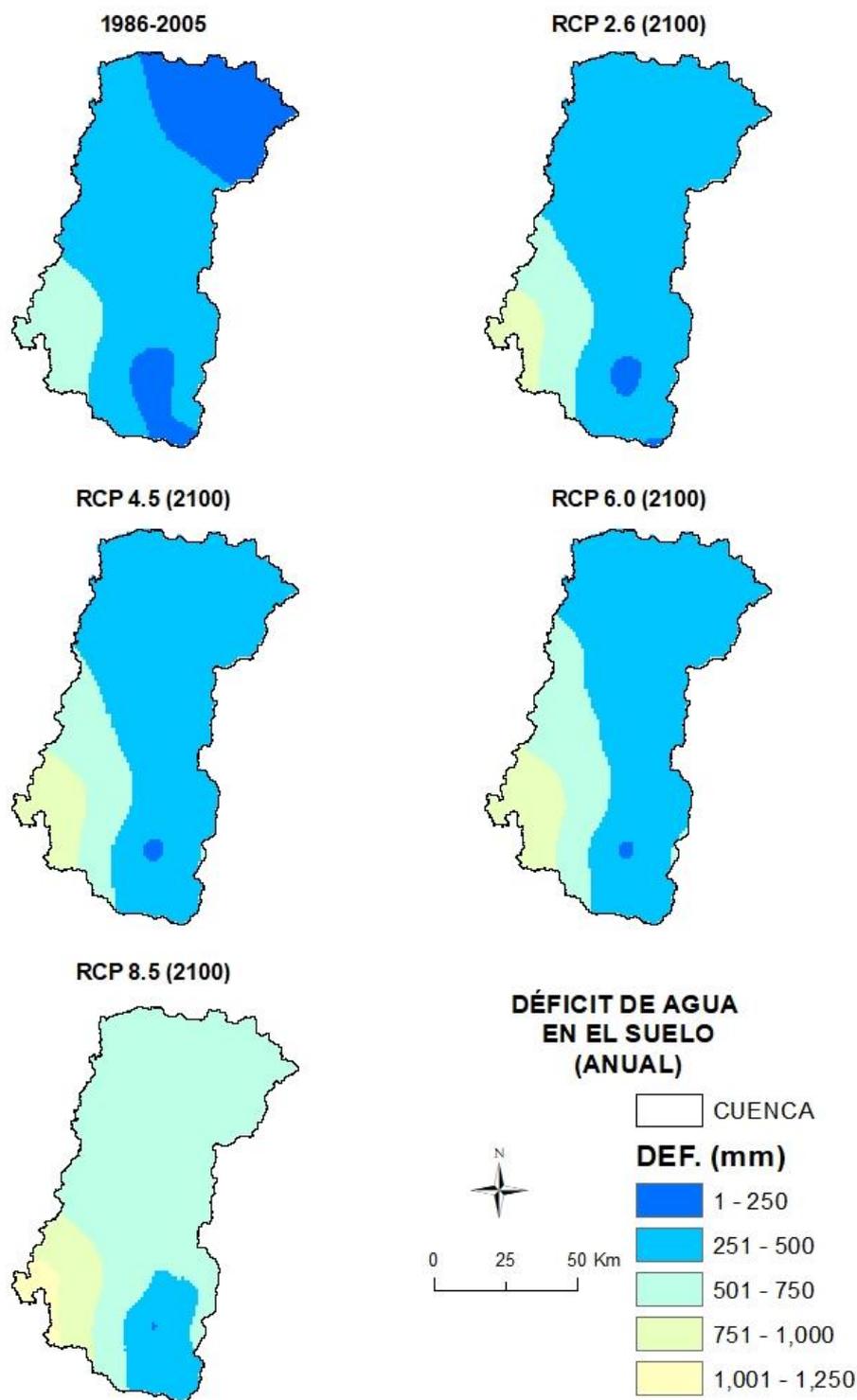


Figura 57. Mapa del déficit de agua en el suelo anual (mm)

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

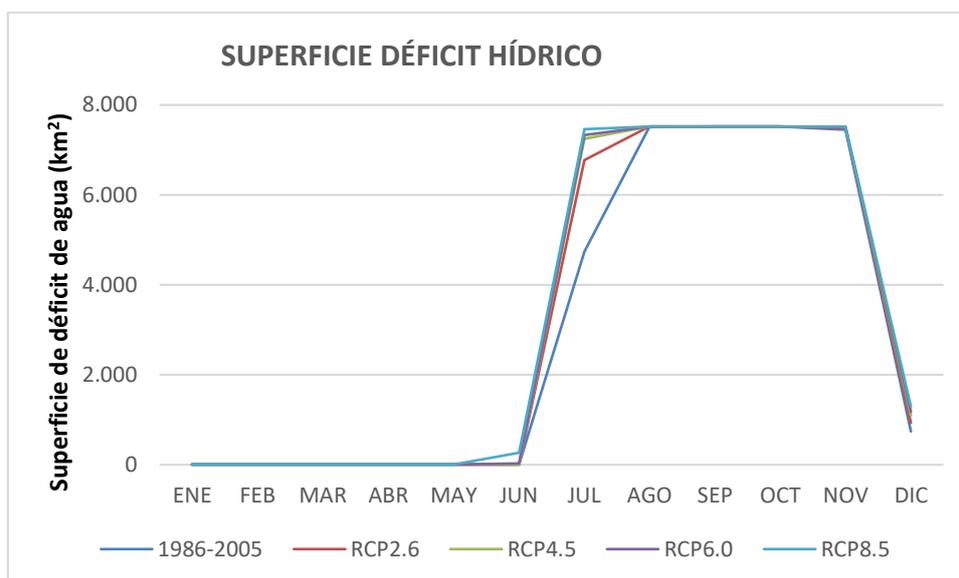


Figura 58. Superficie de déficit de agua en el suelo (km^2) mensual (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 en la cuenca.

7. Escorrentía superficial

La escorrentía media para fin de siglo para los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 es de 369,64, 363,80, 361,62 y 355,85 m^3/s (Figura 59). Comparada con el periodo de estudio 1986-2005, se evidencia decremento en los siguientes valores: RCP2.6, 2,17%; RCP4.5, 3,71%, RCP6.0, 4,29% Y RCP8.5, 5,82% (Tabla 45) y (Figura 60).

Tabla 45.

Escorrentía mensual a la salida de la cuenca (m^3/s) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP

MES	1986-2005	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
ENE	520,80	508,98	501,16	497,96	492,07
FEB	913,67	900,18	890,90	887,31	878,51
MAR	960,97	948,77	940,06	937,11	927,30
ABR	862,83	849,74	839,80	836,45	826,87
MAY	518,04	506,54	497,79	494,73	486,68
JUN	262,65	254,33	248,08	245,82	239,95
JUL	139,62	133,29	128,63	126,80	121,74
AGO	62,95	57,64	53,79	52,25	47,59
SEP	46,73	42,92	40,21	39,07	35,71
OCT	38,94	35,83	33,71	32,81	30,17
NOV	63,34	60,17	58,04	57,13	54,72
DIC	143,49	137,37	133,45	131,95	128,84
MEDIA:	377,83	369,64	363,80	361,62	355,85
INCREMENTO (%)	0,00	-2,17	-3,71	-4,29	-5,82

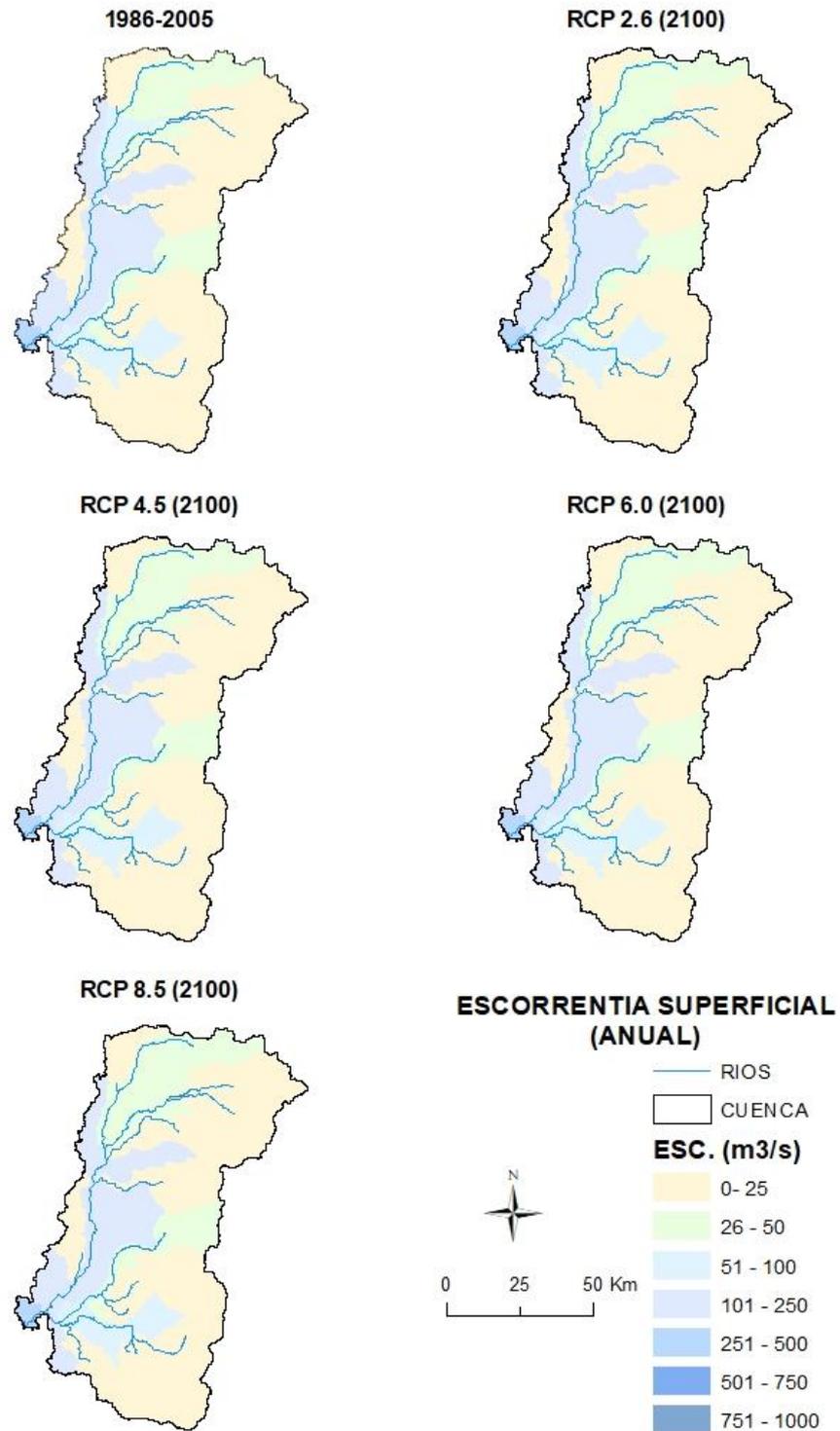


Figura 59. Escorrentía superficial media anual en la cuenca (m³/s) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP.

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

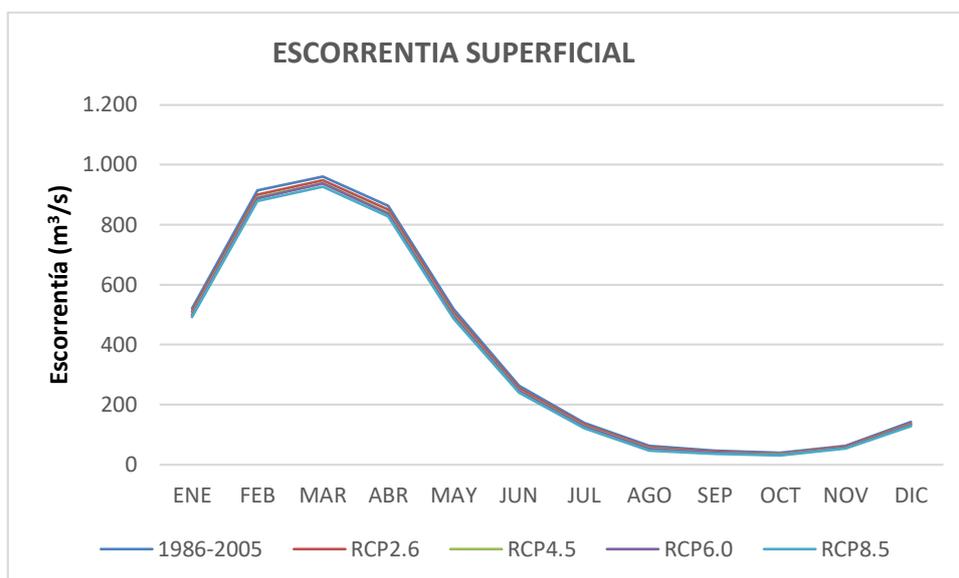


Figura 60. Escorrentía mensual a la salida de la cuenca (m³/s) (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP.

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

La escorrentía superficial en la zona de estudio comparada para los escenarios con respecto al periodo base, se aprecia la disminución en las subcuencas altas que a la vez influye en la escorrentía a la salida de la cuenca, apreciando que los cambios no presentan decrementos sustanciales.

8. Índice de aridez

Los mapas mensuales de la cuenca de índice de aridez (IDA) de la relación de la precipitación mensual dividido para la evapotranspiración potencial mensual ($IDA=P/ETP$) se describen en el (Anexo 7. Índice de aridez mensual). El mapa anual de la cuenca para los diferentes escenarios para el año 2100 (Figura 61).

Los resultados del IDA por zonas en la cuenca del río Babahoyo para el periodo anual se clasifican en subhúmedo húmedo y húmedo, los cambios para los diferentes escenarios no sufren cambios sustanciales, los resultados se describen en la (Tabla 46).

Tabla 46.

Índice de aridez anual en la cuenca por zonas.

ZONA	UNIDAD	1986-2005	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
SUBHÚMEDO	Superficie (Km ²)	82	148	201	224	380
	Porcentaje (%)	1,09	1,97	2,67	2,98	5,06
	Incremento (%)	0	80,49	145,12	173,17	363,41
HÚMEDO	Superficie (Km ²)	7.434	7.368	7.315	7.292	7.136
	Porcentaje (%)	98,91	98,03	97,33	97,02	94,94
	Incremento (%)	0,00	-0,89	-1,60	-1,91	-4,01

Nota: Índice de Aridez anual en la cuenca por zonas (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5.

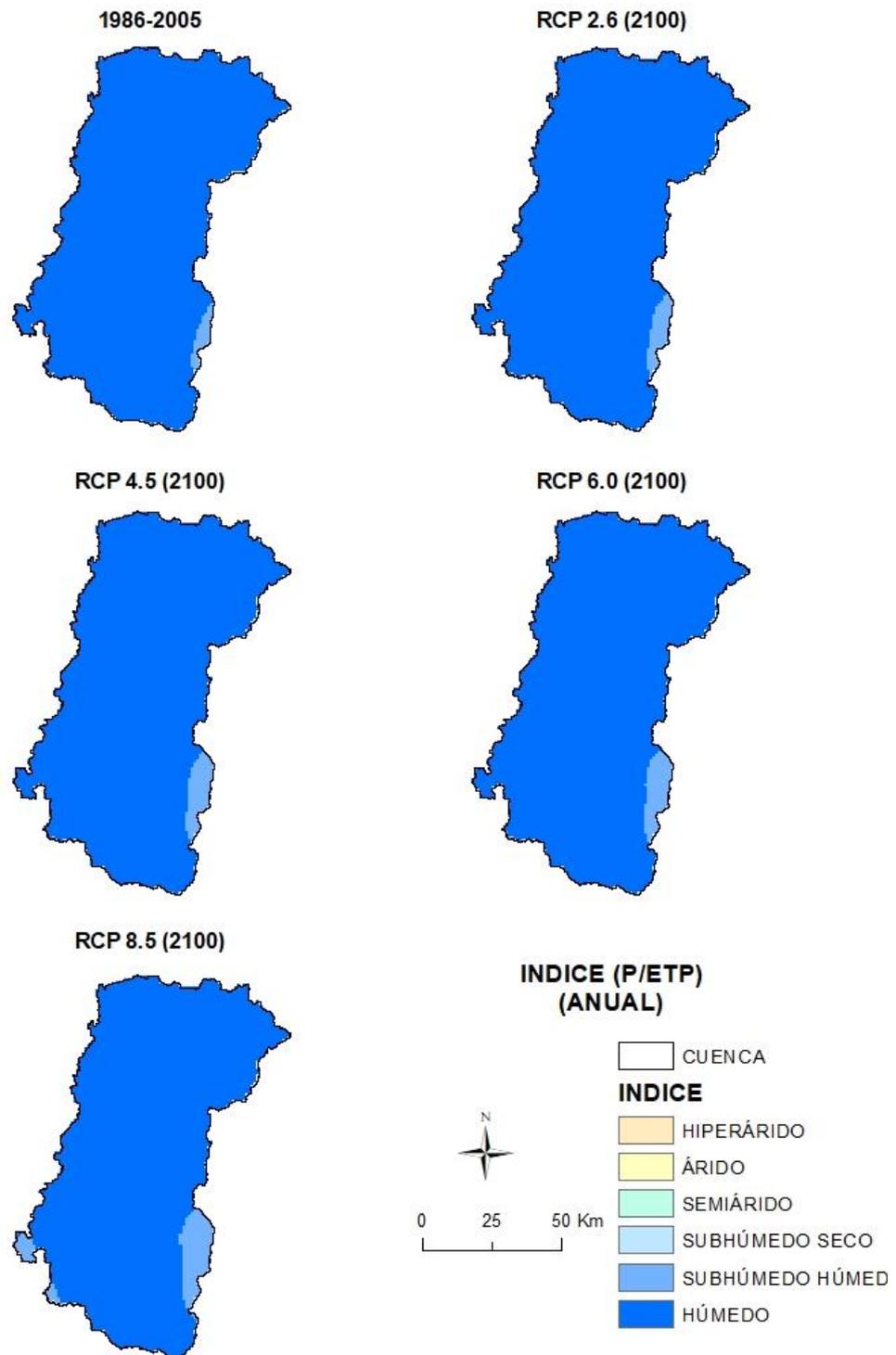


Figura 61. Índice de aridez anual en la cuenca por zonas (1986-2005) y escenarios (2081-2100) RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5.

Procesamiento: Paúl Sotomayor G.

Para los periodos mensuales se aprecia cambios relevantes, especialmente para los meses entre junio y noviembre, en los cuales resaltan cambios en las superficies de las zonas de IDA de semiárido hacia árido (Figura 62).

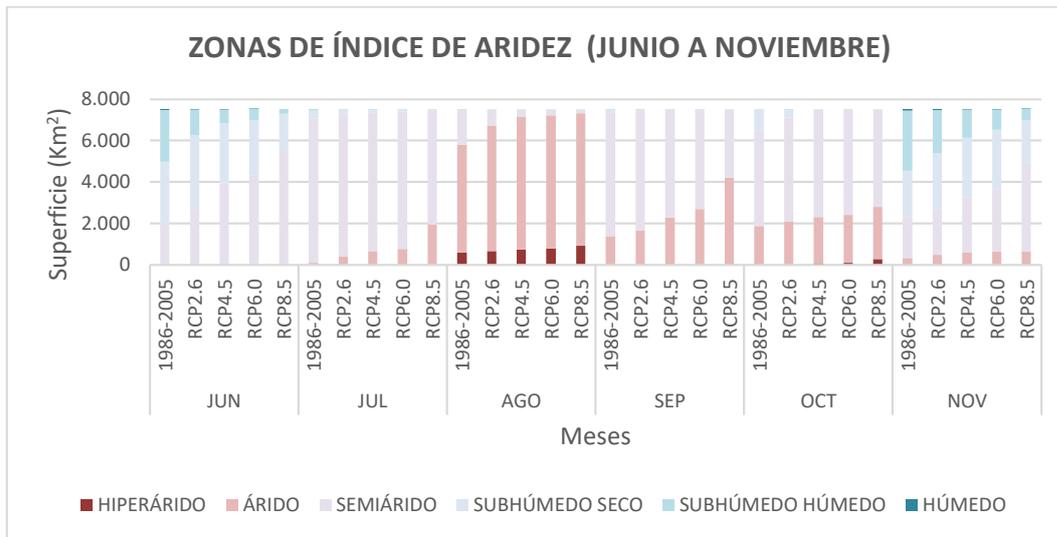


Figura 62. Índice de aridez entre los meses junio y noviembre en la cuenca

El mes de septiembre es el mes que presenta más cambios de superficie afectada, para fin de siglo en los escenarios RCP con respecto al periodo (1986-2005). La zona árida incrementa las superficies en 284, 906, 1.330 y 2.830 Km², para los 4 escenarios RCP, que corresponde a 20,65%; 65,89%, 96,73% y 205,82%, respectivamente.

La zona semiárida decrece las superficies en 220, 810, 1.229 y 2.706 Km², para los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 correspondiente 3,67%; 14,03%, 23,70% y 56,78% (Tabla 47).

El índice de aridez anual respecto a la zona de estudio se ve afectado en las zonas de la salida de la cuenca hidrográfica que es la parte más baja y la zona suroeste que es la parte con mayor altitud, pudiéndose apreciar que no existen cambios sustanciales al periodo anual.

Sin embargo, los cambios en el periodo de junio a noviembre son apreciables, resaltando el mes de junio el que mayores cambios presenta, que es cuando ocurre el periodo de transición de los meses húmedos a los meses secos. Las zonas que mayor afectación mensual presenta, es la zona céntrica de la cuenca hidrográfica, con una orientación de sur a norte.

Tabla 47.

Superficies (km²) de las zonas climáticas para el periodo base y escenarios.

MES	ESCENARIO	HIPERÁRIDO	ÁRIDO	SEMIÁRIDO	SUBHÚMEDO SECO	SUBHÚMEDO HÚMEDO	HÚMEDO
ENE	1986-2005	0	0	0	0	0	7516
	RCP2.6	0	0	0	0	0	7516
	RCP4.5	0	0	0	0	0	7516
	RCP6.0	0	0	0	0	0	7516
	RCP8.5	0	0	0	0	0	7516
FEB	1986-2005	0	0	0	0	0	7516
	RCP2.6	0	0	0	0	0	7516
	RCP4.5	0	0	0	0	0	7516
	RCP6.0	0	0	0	0	0	7516
	RCP8.5	0	0	0	0	0	7516
MAR	1986-2005	0	0	0	0	0	7516
	RCP2.6	0	0	0	0	0	7516
	RCP4.5	0	0	0	0	0	7516
	RCP6.0	0	0	0	0	0	7516
	RCP8.5	0	0	0	0	0	7516
ABR	1986-2005	0	0	0	0	0	7516
	RCP2.6	0	0	0	0	0	7516
	RCP4.5	0	0	0	0	0	7516
	RCP6.0	0	0	0	0	0	7516
	RCP8.5	0	0	0	0	0	7516
MAY	1986-2005	0	0	0	0	215	7301
	RCP2.6	0	0	0	0	290	7229
	RCP4.5	0	0	0	0	352	7164
	RCP6.0	0	0	0	0	381	7135
	RCP8.5	0	0	0	0	530	6986
JUN	1986-2005	0	1	1960	3035	2477	43
	RCP2.6	0	1	2752	3526	1223	14
	RCP4.5	0	4	3916	2906	688	2
	RCP6.0	0	6	4312	2676	521	1
	RCP8.5	0	12	5547	1740	217	0
JUL	1986-2005	0	108	6964	389	55	0
	RCP2.6	0	423	6874	197	22	0
	RCP4.5	0	668	6712	127	9	0
	RCP6.0	0	773	6631	107	5	0
	RCP8.5	0	1950	5509	57	0	0
AGO	1986-2005	581	5230	1705	0	0	0
	RCP2.6	671	6058	764	23	0	0
	RCP4.5	756	6386	348	26	0	0
	RCP6.0	796	6414	283	23	0	0
	RCP8.5	923	6388	182	23	0	0
SEP	1986-2005	0	1375	5995	135	11	0
	RCP2.6	0	1659	5775	80	2	0
	RCP4.5	0	2281	5185	50	0	0
	RCP6.0	0	2705	4766	45	0	0
	RCP8.5	0	4205	3289	22	0	0
OCT	1986-2005	0	1879	4609	1028	0	0
	RCP2.6	0	2107	5003	397	9	0
	RCP4.5	71	2238	5182	25	0	0
	RCP6.0	114	2293	5079	30	0	0
	RCP8.5	276	2531	4685	24	0	0
NOV	1986-2005	0	329	1953	2272	2896	66
	RCP2.6	0	491	2172	2720	2104	29
	RCP4.5	0	600	2654	2876	1376	10
	RCP6.0	0	644	3016	2858	990	8
	RCP8.5	0	639	4305	2049	522	1
DIC	1986-2005	0	0	0	46	701	6769
	RCP2.6	0	0	0	159	784	6573
	RCP4.5	0	0	1	273	838	6404
	RCP6.0	0	0	4	312	877	6323
	RCP8.5	0	0	1	279	1029	6207

9. Aplicación del modelo hidrológico

La calibración del modelo hidrológico para el periodo 1986-2005, se describió en el numeral 2.10 Calibración y validación del modelo del Capítulo IV. DATOS Y METODOLOGÍA, del cual los valores de eficiencia de la calibración del modelo para las diferentes variables son, Coeficiente de Correlación $R^2=0,83$ y Nash-Sutcliffe= $0,83$; $RMSE=76,36$; y $CES^2=0,90$. Según (Moriasi et al, 2007), la eficiencia del modelo es muy buena, si el valor de Nash-Sutcliffe se encuentra en el rango 0,7 y 1,0. En la presente investigación el valor es de 0,83. Ante lo cual, la calibración del modelo se califica como muy buena.

El esquema del modelamiento hidrológico del balance hídrico descrito con sus componentes para el periodo base (1986-2005) y los cuatro diferentes escenarios RCP para el periodo (2081-2100), se detallan a continuación en forma cualitativa y cuantitativa que se describen mediante figuras y tablas.

Los valores de los componentes que se describen son datos multianuales y son: precipitación, escorrentía superficial, flujo lateral, rendimiento hídrico, evapotranspiración real, sedimentos y evapotranspiración potencial (PET).

Balance hídrico del modelamiento hidrológico (1986-2005), se describe en la (Figura 63) y (Tabla 48).

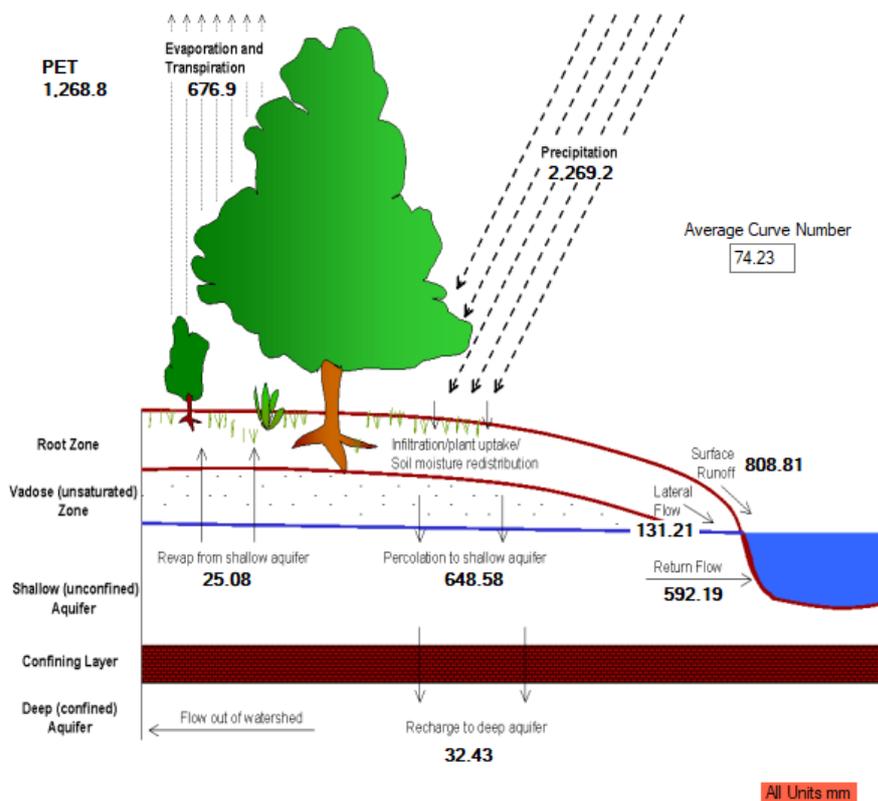


Figura 63. Esquema del modelamiento hidrológico periodo (1986-2005)

Tabla 48.
Resultados del modelamiento hidrológico periodo (1986-2005)

Mon	Rain (MM)	Snow Fall (MM)	SURF Q (MM)	LAT Q (MM)	Water Yield (MM)	ET (MM)	Sed. Yield (MM)	PET (MM)
1	387.03	0.00	142.40	18.86	185.31	58.10	22.54	95.44
2	449.96	0.00	193.46	25.80	284.56	64.00	21.80	85.41
3	450.60	0.00	198.64	26.11	341.64	88.42	20.43	103.71
4	366.86	0.00	148.96	22.52	296.79	82.71	11.62	92.96
5	171.94	0.00	54.28	13.01	184.37	81.33	2.68	96.61
6	51.89	0.00	9.30	4.29	90.75	54.36	0.33	94.80
7	37.46	0.00	4.14	2.36	50.17	41.26	0.09	105.33
8	26.26	0.00	1.65	1.54	22.99	41.06	0.04	114.85
9	43.65	0.00	5.71	2.12	16.70	37.54	0.16	117.13
10	51.11	0.00	3.94	3.01	14.54	39.88	0.18	120.58
11	63.89	0.00	11.58	3.44	22.49	39.48	0.33	123.78
12	164.55	0.00	33.03	7.92	51.63	48.17	1.29	117.41

Balance hídrico escenario RCP2.6 para el periodo (2081-2100), se describe en la (Figura 64) y (Tabla 49).

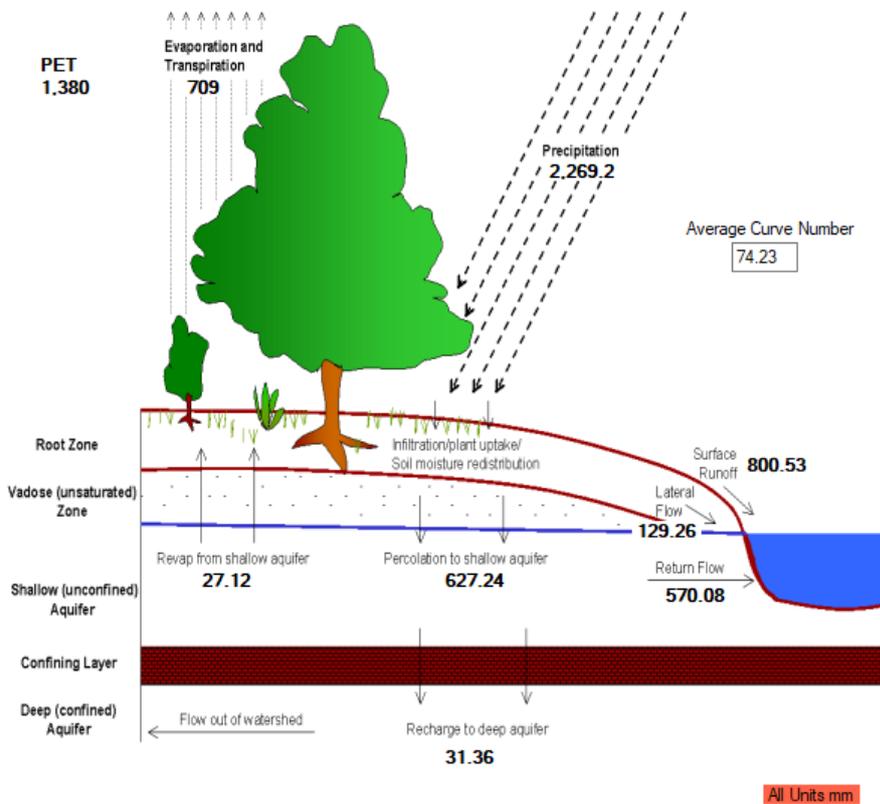


Figura 64. Esquema del modelamiento hidrológico periodo (2081-2100). Escenario RCP2.6

Tabla 49.

Resultados del modelamiento hidrológico periodo (2081-2100). Escenario RCP2.6

Mon	Rain (MM)	Snow Fall (MM)	SURF Q (MM)	LAT Q (MM)	Water Yield (MM)	ET (MM)	Sed. Yield (MM)	PET (MM)
1	387.03	0.00	140.59	18.39	181.16	60.50	23.45	101.76
2	449.96	0.00	192.66	25.53	280.40	66.72	23.58	89.67
3	450.60	0.00	197.64	25.88	337.31	92.97	21.54	108.94
4	366.86	0.00	147.70	22.25	292.31	88.58	11.62	99.78
5	171.94	0.00	53.59	12.81	180.33	86.51	2.51	103.07
6	51.89	0.00	9.04	4.21	87.94	57.38	0.30	103.41
7	37.46	0.00	3.94	2.29	47.99	43.82	0.09	116.91
8	26.26	0.00	1.50	1.48	21.18	43.07	0.04	128.41
9	43.65	0.00	5.41	2.07	15.46	38.17	0.15	130.46
10	51.11	0.00	3.66	2.97	13.51	40.88	0.16	133.29
11	63.89	0.00	11.26	3.37	21.47	40.37	0.32	135.47
12	164.55	0.00	31.81	7.78	49.52	49.42	1.29	128.02

Balance hídrico escenario RCP4.5 para el periodo (2081-2100), se describe en la (Figura 65) y (Tabla 50).

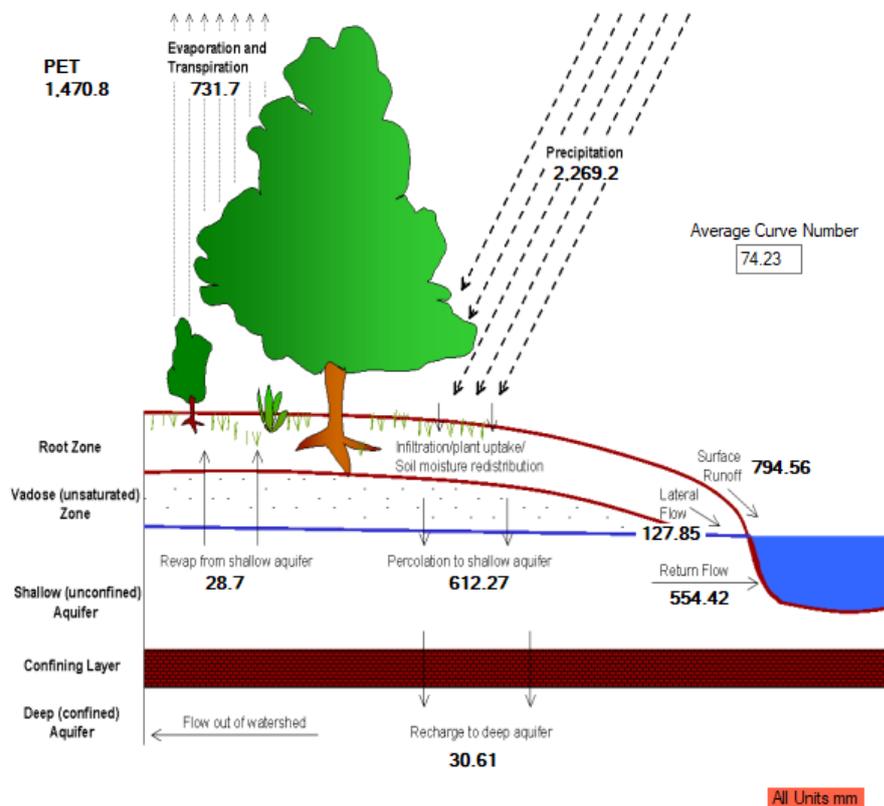


Figura 65. Esquema del modelamiento hidrológico periodo (2081-2100). Escenario RCP4.5

Tabla 50.

Resultados del modelamiento hidrológico periodo (2081-2100). Escenario RCP4.5

Mon	Rain (MM)	Snow Fall (MM)	SURF Q (MM)	LAT Q (MM)	Water Yield (MM)	ET (MM)	Sed. Yield (MM)	PET (MM)
1	387.03	0.00	139.28	18.10	178.39	62.32	24.30	106.27
2	449.96	0.00	192.07	25.31	277.49	68.48	25.16	92.18
3	450.60	0.00	196.88	25.71	334.24	96.49	22.27	112.84
4	366.86	0.00	146.67	22.03	288.94	93.33	11.43	105.28
5	171.94	0.00	53.05	12.65	177.26	90.30	2.33	108.33
6	51.89	0.00	8.86	4.15	85.83	59.19	0.28	110.63
7	37.46	0.00	3.81	2.24	46.39	45.67	0.09	126.82
8	26.26	0.00	1.39	1.45	19.87	44.28	0.04	140.05
9	43.65	0.00	5.22	2.04	14.60	38.50	0.14	141.80
10	51.11	0.00	3.48	2.93	12.82	41.70	0.15	143.94
11	63.89	0.00	11.04	3.33	20.79	40.68	0.34	145.10
12	164.55	0.00	31.08	7.70	48.19	50.16	1.38	136.74

Balance hídrico escenario RCP6.0 para el periodo (2081-2100), se describe en la (Figura 66) y (Tabla 51).

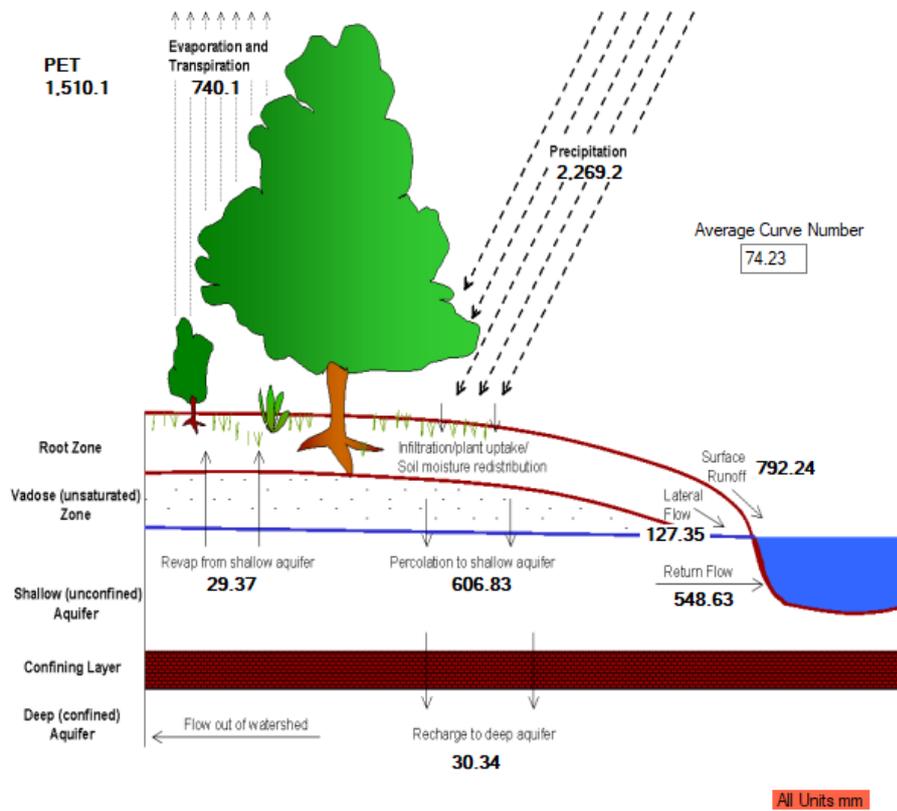


Figura 66. Esquema del modelamiento hidrológico periodo (2081-2100). Escenario RCP6.0

Tabla 51.

Resultados del modelamiento hidrológico periodo (2081-2100). Escenario RCP6.0

Mon	Rain (MM)	Snow Fall (MM)	SURF Q (MM)	LAT Q (MM)	Water Yield (MM)	ET (MM)	Sed. Yield (MM)	PET (MM)
1	387.03	0.00	138.69	18.00	177.27	62.99	24.61	108.11
2	449.96	0.00	191.87	25.23	276.37	68.97	25.76	92.83
3	450.60	0.00	196.65	25.67	333.19	97.35	22.36	114.00
4	366.86	0.00	146.30	21.95	287.82	95.21	11.33	107.48
5	171.94	0.00	52.85	12.59	176.17	91.82	2.26	110.61
6	51.89	0.00	8.79	4.12	85.07	59.90	0.28	113.89
7	37.46	0.00	3.75	2.22	45.76	46.36	0.09	131.35
8	26.26	0.00	1.34	1.43	19.35	44.81	0.04	145.40
9	43.65	0.00	5.13	2.02	14.23	38.67	0.14	146.95
10	51.11	0.00	3.41	2.92	12.52	41.92	0.15	148.73
11	63.89	0.00	10.95	3.31	20.51	40.84	0.35	149.33
12	164.55	0.00	30.80	7.66	47.67	50.63	1.42	140.59

Balance hídrico escenario RCP8.5 para el periodo (2081-2100), se describe en la (Figura 67) y (Tabla 52).

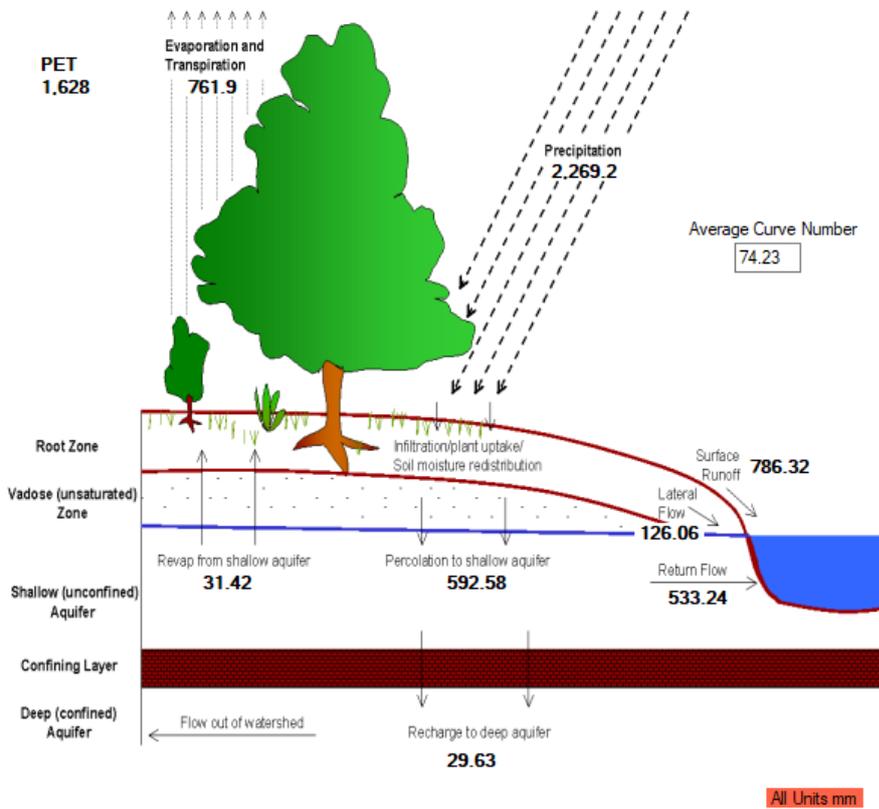


Figura 67. Esquema del modelamiento hidrológico periodo (2081-2100). Escenario RCP8.5

Tabla 52.

Resultados del modelamiento hidrológico periodo (2081-2100). Escenario RCP8.5

Mon	Rain (MM)	Snow Fall (MM)	SURF Q (MM)	LAT Q (MM)	Water Yield (MM)	ET (MM)	Sed. Yield (MM)	PET (MM)
1	387.03	0.00	137.75	17.83	175.23	64.82	26.51	112.29
2	449.96	0.00	191.14	25.01	273.65	71.58	28.92	96.81
3	450.60	0.00	195.61	25.45	329.78	102.00	23.54	119.31
4	366.86	0.00	145.39	21.79	284.53	97.92	11.13	110.39
5	171.94	0.00	52.30	12.44	173.37	96.27	2.08	118.06
6	51.89	0.00	8.60	4.05	83.12	62.40	0.27	124.95
7	37.46	0.00	3.57	2.16	44.05	49.20	0.09	147.11
8	26.26	0.00	1.21	1.38	17.80	46.25	0.04	163.97
9	43.65	0.00	4.84	1.97	13.18	38.93	0.13	164.94
10	51.11	0.00	3.23	2.88	11.69	42.02	0.15	165.03
11	63.89	0.00	10.71	3.27	19.70	40.35	0.38	159.22
12	164.55	0.00	30.27	7.60	46.58	49.48	1.64	145.06

Cambio en el balance hídrico

El incremento en la variación mensual de la evapotranspiración real para fin de siglo para el escenario más pesimista RCP8.5 con respecto al periodo base, presenta variación entre el 13,58% y 42,09%, para los meses de febrero y agosto, respectivamente. Siendo agosto el mes más afectado con 42,09%. (Tabla 53) y (Figura 68).

Tabla 53.

Variación porcentual de la evapotranspiración real.

MES	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
ENE	6,58	11,02	13,00	17,86
FEB	4,94	7,78	8,77	13,58
MAR	4,97	8,67	9,60	14,67
ABR	6,66	12,07	14,19	17,82
MAY	6,57	11,93	14,26	21,84
JUN	9,20	16,79	20,21	31,84
JUL	10,97	20,36	24,62	39,44
AGO	11,71	21,73	26,29	42,09
SEP	11,39	21,00	25,36	40,48
OCT	10,54	19,35	23,31	36,42
NOV	9,44	17,19	20,62	28,12
DIC	9,06	16,52	19,77	22,97

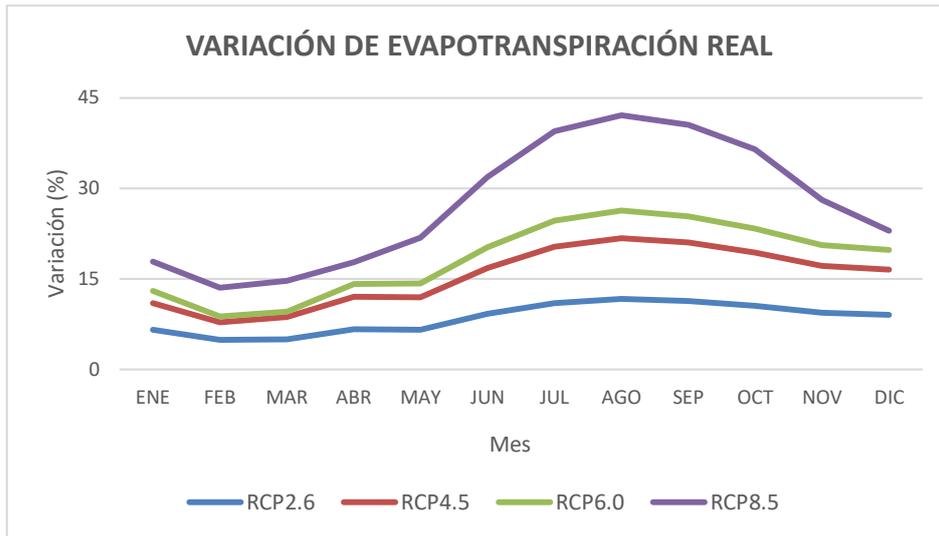


Figura 68. Variación porcentual de la evapotranspiración real

El rendimiento hídrico (Water yield), se vería disminuido por el incremento de la evapotranspiración y este a su vez está compuesto por los recursos hídricos que no se evaporan y que se mantienen en la Tierra, como son la escorrentía superficial, flujo lateral, flujo de retorno y agua subterránea.

El rendimiento hídrico comparado con el periodo base se vería afectado en 89,36 mm para el periodo (2081-2100) que corresponde al 5,72%, siendo los meses de mayor afectación, desde una perspectiva relativa, el mes de agosto con 22,58% que corresponde a 5,19 mm, y por el lado absoluto la mayor disminución sería para el mes de abril con 12,26 mm que representa el 4,13% (Tabla 54) y (Figura 69).

Tabla 54.

Variación porcentual del rendimiento hídrico para fin de siglo comparado con el periodo (1986-2005).

MES	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
ENE	2.24	3.73	4.34	5.44
FEB	1.46	2.48	2.88	3.83
MAR	1.27	2.17	2.47	3.47
ABR	1.51	2.64	3.02	4.13
MAY	2.19	3.86	4.45	5.97
JUN	3.10	5.42	6.26	8.41
JUL	4.35	7.53	8.79	12.20
AGO	7.87	13.57	15.83	22.58
SEP	7.43	12.57	14.79	21.08
OCT	7.08	11.83	13.89	19.60
NOV	4.54	7.56	8.80	12.41
DIC	4.09	6.66	7.67	9.97

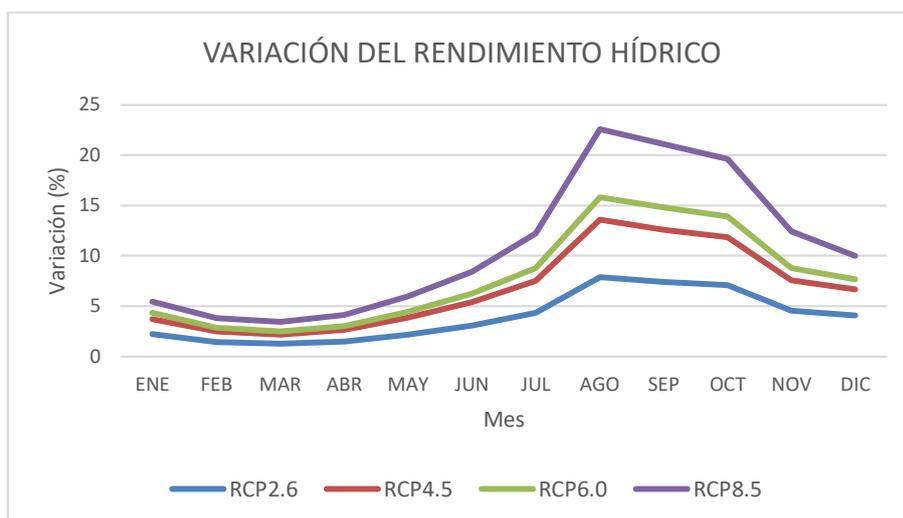


Figura 69. Variación porcentual del rendimiento hídrico para fin de siglo.

Otro indicador que se vería afectado en el balance hídrico por el cambio climático es el déficit de agua en el suelo, que corresponde entre los meses de julio y diciembre. El mes de julio presentaría mayor afectación relativa con un 459.35% en el escenario RCP8.5 en relación con el periodo base (Tabla 55) y (Figura 70) que es de 14.54 mm.

Para el mismo mes incrementará la superficie con déficit hídrico pasando de 4.741 Km² a 7.453 Km², lo que representa un incremento del 57.20%. Para el escenario más optimista RCP2.6, la superficie que se verá afectada por déficit de agua es de 2.024 Km² que representa el 42.69%. Siendo este indicador el de mayor susceptibilidad ante el cambio climático.

Tabla 55.

Variación porcentual del déficit de agua en el suelo.

MES	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
ENE	-	-	-	-
FEB	-	-	-	-
MAR	-	-	-	-
ABR	-	-	-	-
MAY	-	-	-	-
JUN	-	-	-	-
JUL	113.14	225.38	277.79	459.35
AGO	18.65	32.00	37.86	57.85
SEP	15.67	28.92	34.92	55.72
OCT	14.85	27.26	32.82	51.32
NOV	20.82	38.04	45.63	62.30
DIC	49.36	96.18	118.47	116.88

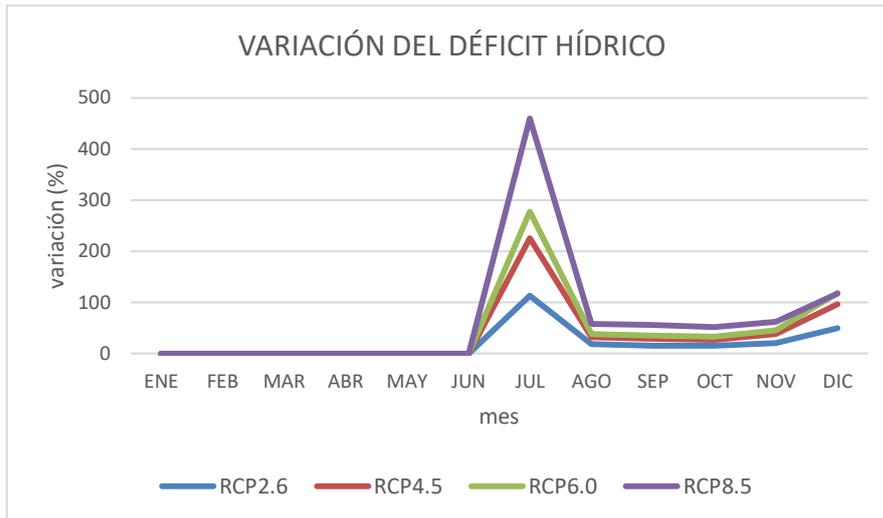


Figura 70. Variación porcentual del déficit de agua en el suelo.

10. Proyección del balance hídrico ante escenarios de cambio climático

Los resultados de las variables del balance hídrico de la cuenca hidrográfica del río Babahoyo para el periodo (2081-2100), y para los escenarios RCP comparados con el periodo (1986-2005), son presentados en la (Figura 71), donde el mayor cambio y posibles externalidades negativas que afecten al recurso hídrico superficial se enfocarían sobre la evapotranspiración, escorrentía superficial y rendimiento hídrico (Water yield).

La evapotranspiración real es el componente que más se vería afectado, en el escenario más pesimista para el periodo (2081-2100) se incrementa en 92 mm que representa el 13,11% con respecto al periodo base (1986-2005). Este incremento por principio de conservación de masas se desagrega en, flujo lateral en 65 mm, escorrentía superficial en 23 mm y agua subterránea en 3 mm (Figura 71).

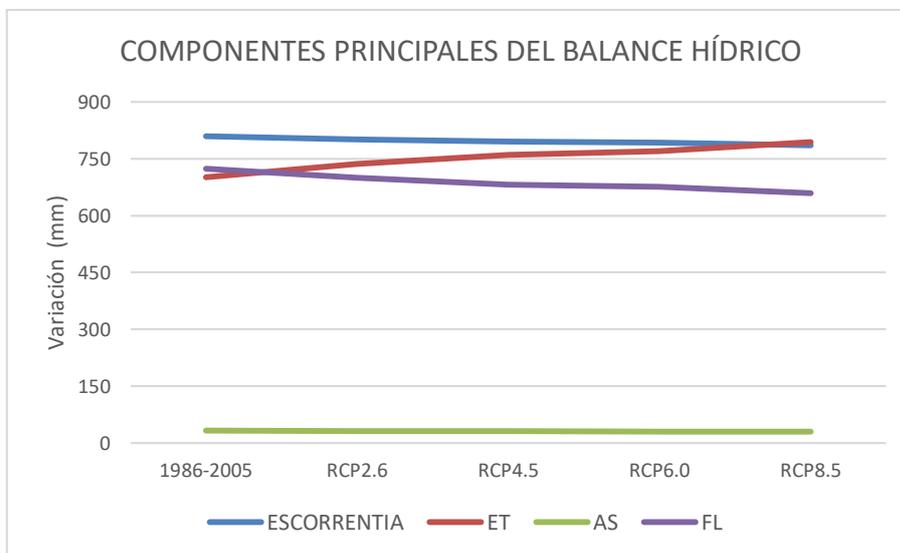


Figura 71. Variación anual de los componentes principales del Balance Hídrico.

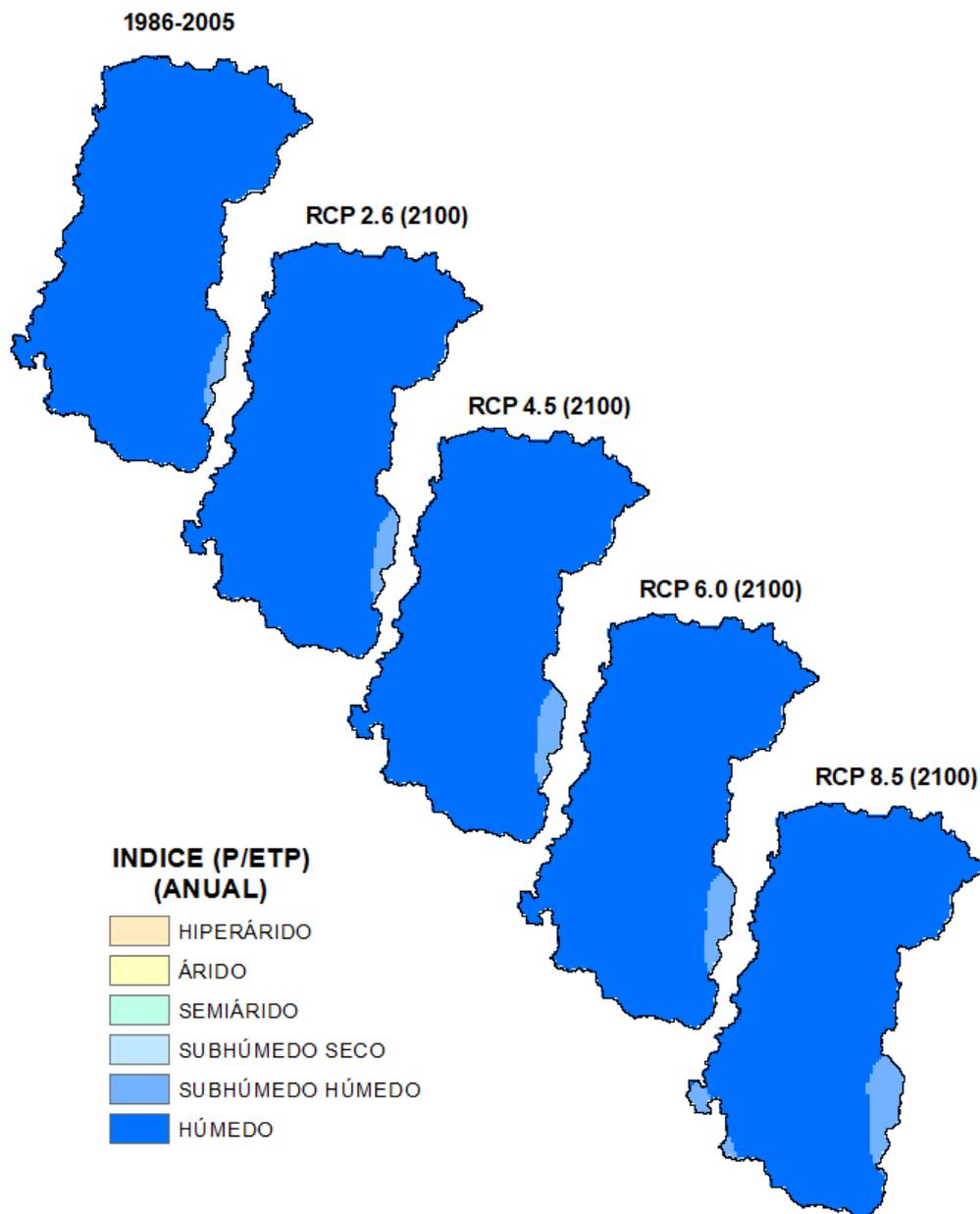
11. Adaptación local del uso de los recursos hídricos ante el cambio climático

Las medidas específicas de adaptación para mitigar la vulnerabilidad y exposición por los efectos del cambio climático que se describen a continuación, son producto de los resultados obtenidos en el desarrollo de los cálculos del balance hídrico en la cuenca hidrográfica del río Babahoyo, muchos coinciden con los medidas de adaptación y mitigación descritos por el IPCC, 2014.

- La reserva de agua en el suelo, presentará cambios para final de siglo. En el escenario más optimista (RCP2.6) se vería disminuido en un 3,17% y para el más pesimista (RCP8.5) en 9,10%. En este contexto el mes de mayor afectación sería junio. Las medidas aplicables que se desagregan ante esta externalidad negativa son: i) Implantación de obras hidráulicas que permitan trasvasar agua a las zonas identificadas. ii) Incorporar nuevos cultivos resistentes ante las condiciones cambiantes. iii) Captación de agua subterránea. iv) Conservación y protección de las fuentes de agua. v) Educación a la población en el uso adecuado y sostenible de los recursos hídricos.
- El déficit de agua, entre los meses de julio a noviembre se aprecia cambio espacial del déficit hídrico relativo, experimentado el mes de octubre déficit extremo en ciertas zonas y el mes de julio es el mes de mayor incremento de superficie deficitaria. Las medidas que podrían paliar el déficit hídrico son: i) Implantación de obras hidráulicas que permitan trasvasar agua a las zonas deficitarias de agua. ii) Incorporar nuevos cultivos resistentes ante las condiciones cambiantes. iii) Captación de agua subterránea. iv) Conservación y protección de las fuentes de agua. v) Ordenación del uso del suelo. vi) Educación a la población en el uso adecuado y sostenible de los recursos hídricos.
- La escorrentía, para el escenario más pesimista, se vería disminuida el caudal de salida de la cuenca en valore relativos de 24,40%, 23,58% y 22,52% que corresponde a los meses agosto, septiembre y octubre, relativamente. Siendo estos meses, lo que menos caudal tiene a lo largo del año que corresponde a la época de estiaje. Las medidas que podrían mitigar las necesidades de agua en la época de estiaje son: i) Implantación de obras hidráulicas que garanticen el recurso hídrico para los usos y aprovechamientos para consumo humano, riego y productivo. ii) Mejorar las condiciones hidráulicas de los cauces naturales.

Capítulo VI.

CONCLUSIONES



VI. CONCLUSIONES

Las conclusiones de la presente investigación constituyen en un aporte técnico y científico en la aplicabilidad de una metodología analítica, que permita comparar y cuantificar los posibles resultados de los componentes del balance hídrico de un periodo base con escenarios futuros de cambio climático, con miras a planificar y gestionar los recursos hídricos en cuencas hidrográficas de Ecuador ante los inminentes efectos del cambio climático.

La base de los resultados finales de la metodología desarrollada en el presente estudio, es la información de partida que se integra en un Sistema de Información Geográfica las coberturas de, modelo digital del terreno, usos del suelo, tipos de suelos y la data hidrometeorológica. La información debe estar integrada en una base de datos, con la finalidad de acceder fácilmente a datos validados y homogenizados de las distintas coberturas y datos.

· **Complementar información.** En la recopilación y análisis de la información, se encontró que las series diarias de precipitación de las estaciones en referencia a la zona de estudio se encontraban con lagunas de datos y sin un procesamiento de validación y homogenización, información relevante para el modelamiento hidrológico. La precipitación de registro diario ha sido relegado en la investigación del clima a un segundo plano por la dificultad existente para trabajar con observatorios de diferentes características y especialmente de diferentes fuentes (Vicente-Serrano et al., 2010).

Ante lo cual, se implementa un método de relleno y validación de información de las series diarias de precipitación - Complementar Datos Diarios de Dos Estaciones Correlativas (CDDDEC)- en la presente investigación con dos estaciones correlativas, presentó resultados de $R^2=0,75$.

Por lo que, en la zona de estudio el método como herramienta de control de la calidad de la data diaria de las series de precipitación muy bien puede ser utilizado. Sin embargo, para complementar series diarias el método debe comprobar su eficiencia antes de su aplicación. La limitación del método, se presenta por su ajuste a solo dos estaciones cercanas con correlaciones altas.

Además, el periodo hídrico para los cálculos es de 12 días, el mismo que presenta una correlación de $R^2=0,81$ comparada con las correlaciones mensuales de $R^2=0.86$. Periodo hídrico que puede ser utilizado como alternativo al periodo hídrico mensual.

El método es una primera aproximación, siendo un avance en la validación y complementación de la data diaria en series de precipitación de las estaciones climáticas en Ecuador, lo que conlleva a continuar con investigaciones referentes a la reconstrucción y validación de series diarias continuas de precipitación.

· **Modelamiento hidrológico.** Los resultados de los coeficientes de eficiencia para la calibración y validación del periodo (1986-2005), están por encima de los valores de un eficiente modelamiento. En particular el valor de Nash-Sutcliffe que es de 0,83 para la

calibración. Según (Moriassi et al, 2007) si el valor esta entre 0,7 y 1,0 el modelamiento hidrológico es muy bueno.

Ante lo cual, los resultados de eficiencia en la aplicación del uso de la herramienta ArcSWAT funciona muy bien en la cuenca hidrográfica del rio Babahoyo con la información existente en Ecuador, lo que conllevar a su uso al resto de cuencas del país, con las respectivas consideraciones particulares de cada unidad hidrográfica de estudio.

No obstante, el desarrollo de la metodología implementada para la homogenización de las coberturas existentes en Ecuador y requeridas en el modelamiento hidrológico de acuerdo a los estándares de la herramienta de ArcSWAT, es utilizables para la calibración y validación del modelado en otras cuencas del país.

- **Subcuencas hidrográficas.** Los análisis y cálculos realizados en la presente investigación son a nivel de la cuenca hidrográfica. Sin embargo, los resultados del modelamiento hidrológico se presentan en una base de datos que contiene los componentes del ciclo hidrológico que están a nivel de subcuencas o unidades hidrográficas, y en unidades de respuestas hidrológicas (HRU). Lo que implica, que los datos y mapas muy bien pueden ser trabajados a nivel de subcuencas como unidad de GIRH.

De acuerdo a la reglamentación jurídico ecuatoriano, la asignación de concesiones de agua para usos y aprovechamientos se hace a nivel de subcuencas, siendo propicio y practico el uso de la información hidrológica a nivel de subcuenca para su contabilidad de la oferta y demanda del recurso hídrico.

Por lo tanto, el uso de dicha información es un aporte significativo a la instancia rectora del agua que le permite la planificación y gestión de los recursos hídricos a nivel de subcuencas hidrográficas en relación a la concesión del agua, en razón que no se cuenta en Ecuador con una herramienta que le permita la contabilización del agua a nivel de subcuencas hidrográficas.

- **Balance hídrico.** El proceso semiautomático que se desarrolló en la presente tesis doctoral con las herramientas propias de programación orientada a objetos del ArcSWAT para el cálculo de los componentes del balance hídrico, fue implementado sobre el método de balance hídrico directo (BHD) en el que se calcula: precipitación útil, excesos de agua, déficit hídrico y reserva de agua en el suelo. Los resultados, se presentan a nivel de mapas para cada componente del balance hídrico con sus respectivos valores, el tamaño de la celda de los mapas es de un km².

Con la automatización del proceso se optimizo la cuantificación de los componentes del balance hídrico, ya que evita posibles errores de cálculo cuando se realizan manualmente y el tiempo de ejecución es considerablemente menor. Por lo que, se recomienda su incorporación a la caja de herramientas del ArcSWAT el módulo de cálculo de balance hídrico directo.

La comparación del balance hídrico del periodo 1986-2005 con los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 para fines de siglo, se desagrega en un incremento de la

evapotranspiración potencial que afecta a la escorrentía, reserva de agua en el suelo, déficit hídrico, flujo de agua y flujo de retorno.

La evapotranspiración potencial para el año 2100 va desde 1.380 mm hasta 1.625 mm, lo que representa un incremento comparado con el periodo base entre 8,71% y 28,03%. Decrementando la reserva del agua en el suelo entre 3,71% y 9,10%, siendo el mes de julio el más afectado relativamente que esta entre el 15,00% y 51,67%. El déficit de agua, es otro indicador que se vería afectado siendo la mayor afectación en la transición de época húmeda a la seca, en el mes de julio, en el cual se incrementa la superficie deficitaria de agua que pasa de 4.741 Km² a 7.453 Km² que representa 57,20% para el escenario RCP8.5, no obstante, para el escenario optimo RCP2.6 la afectación sería del 42,69%.

Concluyendo que el indicador de déficit hídrico, es el más susceptible a la variación por incremento de temperatura.

· **Índice de aridez (IDA).** El indicador IDA, propuesto por (Hassan y Dregne, 1997) en, “Guía metodológica para elaboración de mapas de zonas áridas, semiáridas, y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe, 2006”, se implementó para la caracterización y delimitación las zonas áridas, semiáridas, subhúmedas secas y subhúmedas húmedas en la cuenca hidrográfica del río Babahoyo.

Los resultados comparativos del IDA para el periodo base con los escenarios de cambio climático para fin de siglo, se aprecia un desplazamiento de la superficie de la zona semiárida a la zona árida. Las superficies y porcentajes de transición son: decremento de la zona semiárida entre 220 Km² y 2.706 Km² para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 que corresponde a 3,67% y 56,78%, respectivamente, y la zona árida se incrementa entre 284 Km² y 2.830 Km² para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 que corresponde a 20,65% y 205,82%, respectivamente.

Ante lo cual, se puede apreciar que el desplazamiento de la zona semiárida a la zona árida es significativo en el área de estudio, concluyendo que los resultados coadyuvan en los criterios a ser considerados en la planificación de la GIRH ante el cambio climático, y que IDA por su praxis y por su uso en Latinoamérica, es un índice cuyo uso se recomienda en la elaboración de mapas para la delimitación de zonas climáticas.

· **Medidas generales técnicas.** De la revisión de los estudios por parte de Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación (GTII IE5) del IPCC, concluye que, son más comunes los impactos negativos como el rendimiento de los cultivos antes que los impactos positivos, la vulnerabilidad y exposición con respecto al clima y las diferentes formas de producción tengan comportamientos dispares que afectan más a las personas y comunidades marginales en lo social, económico, político e institucional en virtud de no contar con capacidades de respuestas de adaptación y mitigación.

En términos generales, los resultados obtenidos en la presente investigación para la zona de estudio no discrepan con los impactos negativos presentados por el IPCC, concluyendo que los criterios para las medidas de adaptación, que deben ser

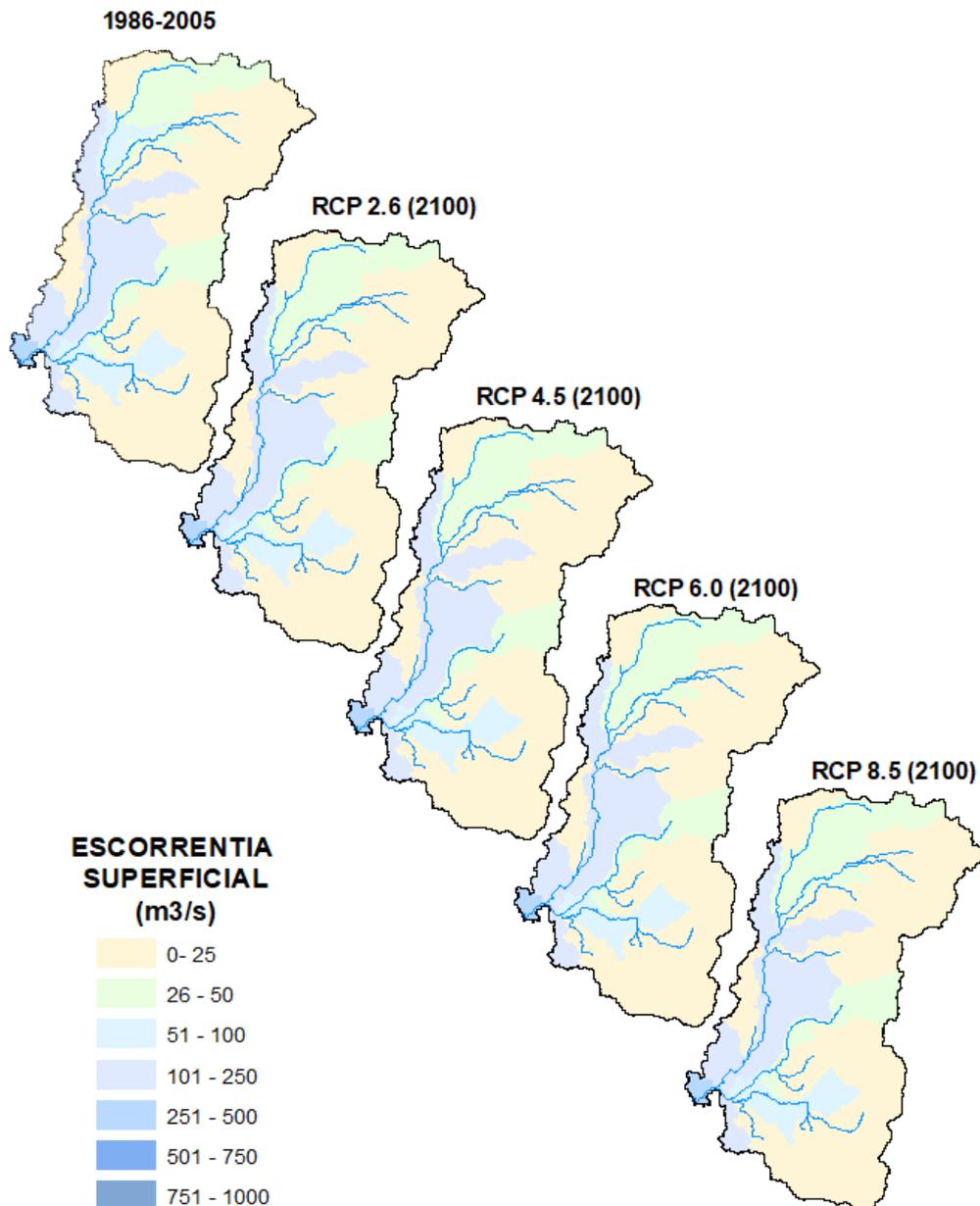
considerados en la formulación de los planes en la adaptación de la planificación de la gestión integrada de los recursos hídricos ante el cambio climático se desagregan en: i) Implantación de obras hidráulicas de propósito múltiple, que garanticen el uso y aprovechamiento del recurso hídrico para consumo humano, riego, caudales ecológicos; control de inundaciones y generación hidroeléctrica. ii) Incorporar nuevos cultivos resistentes ante las condiciones cambiantes. iii) Captación de agua subterránea. iv) Conservación y protección de las fuentes de agua. v) Mejorar las condiciones hidráulicas de los cauces naturales. vi) Ordenación del uso del suelo. vii) Empoderar a la población en el uso adecuado y sostenible de los recursos hídricos.

• **Medidas generales jurídicas.** La reglamentación jurídico de Ecuador en relación a la adaptación de la planificación de los recursos hídricos ante el cambio climático, adolece de una u otra forma de puntualización, en relación a ciertos tópicos que podrían ser perfectibles como medidas que permita disminuir los riesgos por la exposición y vulnerabilidad en relación a la posible escasez futura del agua, estos son: i) Incentivos a los usuarios por la reducción del consumo de agua en el sector agrícola, y para consumo humano la definición de la cantidad mínima vital que pasada esa cantidad se deberá cobrar el recurso hídrico. ii) Incentivos por la aplicación de nuevas técnicas de irrigación que permitan el ahorro del recurso hídrico. iii) Motivar la protección de las fuentes de agua por servicios ambientales. iv) normas específicas para planes de situaciones de sequías. v) Uso de metodologías que permita la cuantificar los recursos hídricos futuros en las cuencas hidrográficas.

• **Implementación de la metodología.** El desarrollo de la metodología tiene sus complejidades más que todo en la información base para la simulación de los modelamientos hidrológicos, que es la partida para los cálculos numéricos y elaboración de mapas de los componentes del BHD e IDA. Sin embargo, la implementación de dicha metodología en las cuencas hidrográficas de Ecuador, se puede aplicar en razón de los resultados obtenidos que son muy buenos. No obstante, la metodología puede ser perfectible en razón de ir mejorando los resultados, es un buen inicio a nivel de país ya que coadyuva en la formulación de planes de gestión integrada de los recursos hídricos ante el cambio climático.

Capítulo VII.

AGRADECIMIENTO



VII. AGRADECIMIENTO

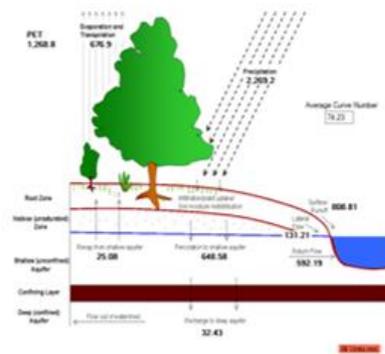
El presente trabajo investigativo está dedicado a mis hijos, Ana Paula, Carlos David y María Laura pilares de fortaleza y tenacidad que me impulsaron a concluir la investigación ante las adversidades que se presentaron en dicho periodo.

Agradecimiento a Paul Carrión, Director del CIPAT (Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra) de la ESPOL (Escuela Superior Politécnica del Litoral) y a su equipo de trabajo por el apoyo científico y acogida en sus oficinas; Patricia Álvarez, por el constante soporte en el día a día; y a Alexandra Rivadeneira, por las muchas horas de discusiones técnicas y científicas.

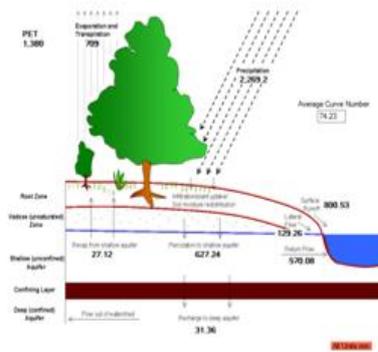
Capítulo VIII.

BIBLIOGRAFÍA

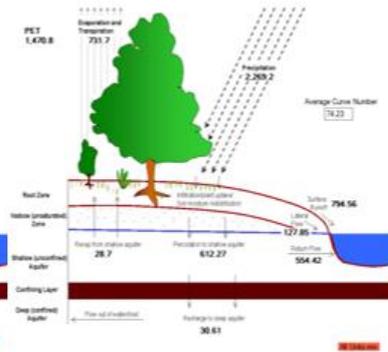
BALANCE HÍDRICO PERIODO 1986-2005



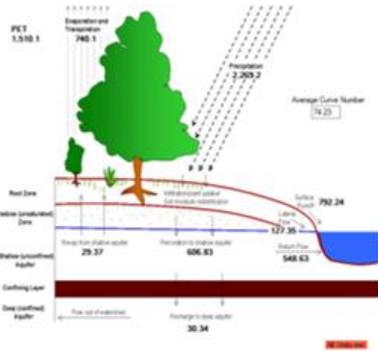
BALANCE HÍDRICO RCP2.6 (2081-2100)



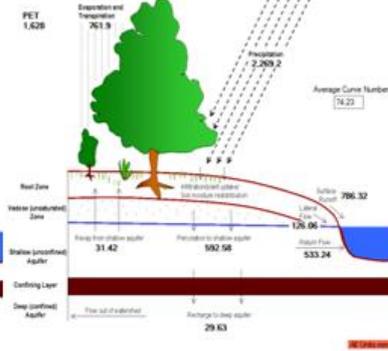
BALANCE HÍDRICO RCP4.5 (2081-2100)



BALANCE HÍDRICO RCP6.0 (2081-2100)



BALANCE HÍDRICO RCP8.5 (2081-2100)



VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Abbaspour, K.C. (2015). SWAT-CUP. SWAT Calibration and Uncertainty Programs – A User Manual. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.
- Allen, R.G. (1986). A Penman for all seasons. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 111(4), 348-368.
- Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright J.L. and Burman R.D. (1989). Operational estimates of evapotranspiration, *Agronomy Journal*, 81, 650–662.
- Almorox, J. (2003). *Climatología aplicada el medio ambiente y agricultura*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos.
- Arellano Monterrosas, J.L.L., (2005). Apropiación territorial, deterioro ambiental y gestión de recursos hídricos en la cuenca superior del Río Custepec, Chiapas (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- Arnold, J.G., Williams, J.R., Srinivasan R. and King, K. (1999). Soil and Water Assessment Tool. *USDA-ARS and the Texas A and M University Agricultural Experimental Station, Temple, Texas*.
- Arnold, J.G., Kiniry J.R., Srinivasan, R., Williams J.R., Haney, E.B. and Neitsch, S.L. (2012). Soil and Water Assessment Tools. *Input/Output Documentation*. Texas.
- Basagaoglu H., Yazicigil H., (1995). Optimal capacity-Expansion Planning in Multiaquifer Systems. *Water Resources Planning and Management* 120(6),836–856.
- Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Rudolf, B., Schamm, K., Schneider, U., Ziese, M. (2013). A description of the global land-surface precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901-present. *Earth Syst. Sci. Data*, 5, 71–99. doi: <http://dx.doi.org/10.5194/essd-5-71-2013>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (1998). *Strategy for Integrated Water Resources Management, Publication* (No. ENV-125). Washington D. C., Banco Interamericano de Desarrollo.
- Borrough PA, McDonnell RA. (1998). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press, Oxford.
- Bruce JP. (1994). Natural disaster reduction and global change. *Bulletin of the American Meteorological Society* 75, 1831–1835.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Christensen JH, Carter TR, Rummukainen M, Amanatidis G (2007) Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. *Climatic Change* 81:1–6. doi: 10.1007/s10584-006-9211-6

- Clarke, R & King, J. (2004). *The Water Atlas, A Unique Visual Analysis of the World's Most Critical Resource*, Spring. ISBN: 978-1-56584-907-5.
- Danielson, J.J., and Gesch, D.B. (2011): *Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010)*: U.S. Geological Survey. Open-File Report 2011-1073, 26 p.
- Döll P, Kaspar F, Alcamo J (1999) Computation of global water availability and water use at the scale of large drainage basins. *Mathematische Geologie* 4:111– 118.
- Döll P, Kaspar F, Lehner B (2003) A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. *Journal of Hydrology* 270:105– 134. doi: 10.1016/S0022-1694(02)00283-4
- Dooge, J. C. I., (1973). *Linear theory of hydrologic systems, Technical Bulletin No. 1468*. Agricultural Research Serv. Departamento de Agricultura de Estados Unidos, Washington D. C.
- EDUFUTURO. (2006). *Las Áreas Protegidas: Aliadas de la Biodiversidad*. Prefectura de Pichincha.
- Fiering, M.B. (1967). *Streamflow synthesis*. Harvard University Press, Cambridge.
- Gesch, D.B., Verdin, K.L., and Greenlee, S.K., 1999, New Land Surface Digital Elevation Model Covers the Earth: *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, v. 80, no. 6, p. 69–70.
- Genova, B., Girma, E.S., Kissel, A.N., Levy, S., MacCracken, P.R., Mastrandrea y L.L. White (eds.]. *Organización Meteorológica Mundial*, Ginebra, Suiza, 34 págs.
- Giorgi, F. and Mearns, L. (2001). Calculation of Average, Uncertainty Range, and Reliability of Regional Climate Changes from AOGCM Simulations via the “Reliability Ensemble Averaging” (REA) Method. *American Meteorological Society*, (15), 1141-1158.
- Gómez O. D. (2008). *Ordenación territorial*, 2da. Ed. Madrid, España.
- Gordon ND, MacMahon TA, Finlayson BL. 1992. *Stream Hydrology: An Introduction for Ecologists*. John Wiley & Sons: New York.
- Green, W.H. and Ampt, G.A. 1911. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences* 4:11-24.
- Hargreaves, G.H. and Samani Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applies Engineering in Agriculture*, (1), 96-99.
- Hassan, H., and Dregne, H. E. (1997). *Natural Habitats and Ecosystems Management in Drylands: an overview*. Natural Habitats and Ecosystems Management Series. *Environment Department Papers*. Washington DC. The World Bank.
- Hooghoudt, S.B. 1940. Bijdrage tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van de grond. *Versl. Landbouwk. Onderz.* 46: 515-707.

- Hsu N., Cheng W., Wei C., Yeh W. (2008). Optimization and capacity expansion of a water distribution system. *Advances in Water Resources*, (3), 776–786. doi:10.1016/j.advwatres.2008.01.009.
- Hurk B, Hirschi M, Schär C, et al. (2005) Soil control on runoff response to climate change in regional climate model simulations. *Journal of Climate* 18:3536–3551.
- Instituto Nacional de Ecología de México. (2007). Congreso Nacional y Reunión Mesoamericana de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Memorias del congreso, [CD-ROM]. INE-UAQ-FIRCO-RMRB. Queretaro.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2013) La meteorología en Ecuador. Recuperado de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/la-meteorologia-en-el-ecuador/>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (1994). *Anuario Hidrológico 1990*. Ecuador. Recuperado de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%201990.pdf>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (1994). *Anuario Hidrológico 1991*. Ecuador. Recuperado de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%201991.pdf>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (1995). *Anuario Hidrológico 1992*. Ecuador. Recuperado de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%201992.pdf>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (1995). *Anuario Hidrológico 1993*. Ecuador. Recuperado de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%201993.pdf>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (1996). *Anuario Hidrológico 1994*. Ecuador. Recuperado de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%201994.pdf>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (1999). *Anuario Hidrológico 1995*. Ecuador. Recuperado de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%201995.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2000). *Anuario Hidrológico 1996*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%201996.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2001). *Anuario Hidrológico 1997*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%201997.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2007). *Anuario Hidrológico 1998*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%201998.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2007). *Anuario Hidrológico 1999*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%201999.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2006). *Anuario Hidrológico 2000*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%202000.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2006). *Anuario Hidrológico 2001*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%202001.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2006). *Anuario Hidrológico 2002*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%202002.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2006). *Anuario Hidrológico 2003*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%202003.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2006). *Anuario Hidrológico 2004*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%202004.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2006). *Anuario Hidrológico 2005*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%202005.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2008). *Anuario Hidrológico 2006*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%202006.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2011). *Anuario Hidrológico 2007*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%202007.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2011). *Anuario Hidrológico 2008*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%202008.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2011). *Anuario Hidrológico 2009*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%202009.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2012). *Anuario Hidrológico 2010*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%202010.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2014). *Anuario Hidrológico 2011*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%202011.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2014). *Anuario Hidrológico 2012*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%202012.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2015). *Anuario Hidrológico 2013*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah%202013.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2016). *Anuario Hidrológico 2014-2016 estaciones automáticas*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah2014-2016-EHA.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2017). *Anuario Hidrológico 2014-2017 estaciones automáticas*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/hidrologicos/Ah2014-2017-EHA.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (1995). *Anuario Meteorológico 1990*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%201990.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (1995). *Anuario Meteorológico 1991*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%201991.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (1995). *Anuario Meteorológico 1992*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%201992.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (1995). *Anuario Meteorológico 1993*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%201993.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (1996). *Anuario Meteorológico 1994*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%201994.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (1999). *Anuario Meteorológico 1995*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%201995.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2000). *Anuario Meteorológico 1996*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%201996.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2000). *Anuario Meteorológico 1997*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%201997.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2001). *Anuario Meteorológico 1998*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%201998.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2002). *Anuario Meteorológico 1999*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%201999.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2006). *Anuario Meteorológico 2000*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202000.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2006). *Anuario Meteorológico 2001*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202001.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2006). *Anuario Meteorológico 2002*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202002.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2006). *Anuario Meteorológico 2003*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202003.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2006). *Anuario Meteorológico 2004*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202004.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2006). *Anuario Meteorológico 2005*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202005.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2008). *Anuario Meteorológico 2006*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202006.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2010). *Anuario Meteorológico 2007*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202007.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2010). *Anuario Meteorológico 2008*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202008.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2012). *Anuario Meteorológico 2009*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202009.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2012). *Anuario Meteorológico 2010*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202010.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2014). *Anuario Meteorológico 2011*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202011.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2015). *Anuario Meteorológico 2012*. Ecuador. Recuperado de

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202012.pdf>

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, Estados Unidos de América.

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. (2013). Cambio Climático. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático Resumen para responsables de políticas. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. (2014). Cambio climático 2014 Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II 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.

Global Water Partnership, GWP. (2000). Manejo integrado de recursos hídricos. Suecia

Klein-Tank, A.M.G., Wijngaard, J-B-, Können, G.P., Böhm, R., Demarée, G., Gocheva, A., Mileta, M., Pashiardis, S., Hejkrlik, L., Kern-Hansen, C., Heino, R., Bessemoulin, P., Müller-Westermeier, G., Tzanakou, M., Szalai, S., Pálsdóttir, T., Fitzgerald, D., Rubin, S., Capaldo, M., Maugeri, M., Leitass, A., Bukantis, A., Aberfeld, R., van Engelen, A.F.V., Forland, E., Mielus, M., Coelho, F., Mares, C., Razuvaev, V., Nieplova, E., Cegnar, T., López, J.A., Dahlström, B., Moberg, A., Kirchhofer, W., Ceylan, A., Pachaliuk, O., Alexander, L.V., Petrovic, P. (2002). Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *International Journal of Climatology*. (22), 1441–1453. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.773>

Li, Q., Zhang, H., Liu, X., Chen, J., & Li, W. (2009). A mainland China homogenized historical temperature dataset of 1951-2004. *Bulletin of the American Meteorological Society*. (90), 1062–1065. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2009BAMS2736.1>

Krajenbrink, H.J. (2007). Application of SWAT for rainfall-runoff modelling in small tropical mountainous catchments in Ecuador. *MSc Thesis Hydrology. Wageningen University*, 90 pp.

Leavesley GH, Markstrom SL, Restrepo PJ, Viger RJ (2002) A modular approach to addressing model design, scale, and parameter estimation issues in distributed hydrological modelling. *Hydrological Processes* 16:173–187. doi: 10.1002/hyp.344.

Marini, M., & Piccolo, M. (2000). El balance hídrico en la cuenca del río Quequén Salado, Argentina. *Papeles de Geografía, Murcia, España*, (31), 39-53.

- Martin, Q.W., 1987. Hierarchical algorithm for water supply expansion. *Water Resources Planning and Management* 113(5), 677–695.
- Martinez de Azagra, A., Navarro Hevia, J. 1995. *Hidrológica Forestal. El ciclo hidrológico*. Universidad de Valladolid, 286 pp.
- Mein, R.G. and Larson, C.L. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Res. Res.*, 9:384-94, 1973.
- Mitchell, T.D., Jones, P.D. (2005). An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, (25), 693–712.
- Monteith, J.L. (1965). Evaporation and the environment. *In The state and movement of water in living organisms*, XIXth Symposium. Soc. For Exp. Biol., Swansea, Cambridge University Press. 205-234.
- Naciones Unidas. (1992). *Declaración de Dublín sobre el agua y el desarrollo sostenible*. Recuperado de <http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/documents/espanol/icwedecs.html>.
- Naciones Unidas. (1992). *Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. Recuperado de https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/convsp.pdf
- Nash LL, Gleick PH (1993) Colorado river basin and climatic change. The sensitivity of streamflow and water supply to variations in temperature and precipitation, EPA, Policy, Planning and Evaluation. EPA 230-R-93-009 December 1993.
- Newson, M. (1992). *Land, Water and Development*. Routledge, London.
- Nicks, A.d. (1974). Stochastic generation of the occurrence, pattern, and location of maximum amount of daily rainfall. p. 154-171. In Proc. Symp. Statistical Hydrology, Aug. Sept. 1971, Tucson, AZ. *U.S. Department of Agriculture*, Misc. Publ. No. 1275.
- Nash, J., Sutcliffe, I., (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, (10), 282–290.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., and Williams J.R. (2005). *Soil and Water Assessment Tools Theoretical Documentation. Version 2005*. Agricultural Research Service, Texas, 494 pp.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE*, 50(3), 885-900.
- Obasi GOP. (1994). WMO's role in the international decade for natural disaster reduction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 75, 1655–1661.

- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO] y Organización Meteorológica Mundial [OMM]. (1993). *Evaluación de los recursos hídricos: manual para un estudio de apreciación de las actividades nacionales*. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001584/158461so.pdf>.
- Organización Meteorológica Mundial [OMM]. (1988). *Reglamento Técnico, Volumen III – Hidrología*. OMM-Nº 49. Ginebra.
- Organización Meteorológica Mundial. [OMM]. (1992). Proceedings of the International Workshop on Network Design Practices. 11 a 15 de noviembre de 1991. *Coblenza, Technical Report No. 50, WMO/TD-No. 671*, Ginebra.
- Organización Meteorológica Mundial. [OMM]. (2011). *Guía de prácticas hidrológicas. Volumen I. Gestión de los recursos hídricos y aplicación de las prácticas hidrológicas*. Recuperado de http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/guide/spanish/168_Vol_I_es.pdf
- Organización Meteorológica Mundial [OMM] y Asociación Mundial para el Agua [GWP]. (2016). *Manual de indicadores e índices de sequía (M. Svoboda y B.A. Fuchs)*. Programa de gestión integrada de sequías, Serie 2 de herramientas y directrices para la gestión integrada de sequías. Ginebra.
- Organización de las Naciones Unidas ONU. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Pearson, C. P. (1998). Changes to New Zealand's National Hydrometric Network in the 1990s, en *Journal of Hydrology*, 37(1), 1–17.
- Perevochtchikova, M., & Arellano-Monterrosas, J.L. (2008). Gestión de cuencas hidrográficas: experiencias y desafíos en México y Rusia. *Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4(3), 313-325.
- Planeta Ecuador. (2007). Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador SNAP. Ecuador: Autor.
- Porta, J.; López-Acevedo, M. & Roquero, C. (2003). *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 3ª Edición. Mundi-Prensa. 929 pp.
- Presidencia de Ecuador. (1961). Decreto Ejecutivo N° 1446. Creación del Servicio Meteorológico e Hidrológico Nacional del Ecuador. Registro Oficial N° 289, Quito, Ecuador, 15 de agosto de 1961.
- Presidencia de Ecuador. (2008) Decreto Ejecutivo N° 1088. Reorganización del Consejo Nacional de Recursos Hídricos mediante la creación de la Secretaría Nacional del Agua. Registro Oficial N°346, Quito, Ecuador, 27 de mayo de 2008.

- Presidencia de Ecuador. (2010) Decreto Ejecutivo N° 391. Reorganizase Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología y se lo adscribe a Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos. Registro Oficial N° 224, Quito, Ecuador, 29 de junio de 2010.
- Presidencia de Ecuador. (2014) Decreto Ejecutivo N° 310. Reorganizase a la Secretaría del Agua y créanse la Agencia de Regulación y Control del Agua, Arca, y la Empresa Pública del Agua, Epa. Registro Oficial N° 236, Quito, Ecuador, 30 de abril de 2014.
- Priestley, C.H.B., and Taylor R.J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Mon. Weather*, (100), 81-92.
- Proaño Cadena, G. N. (2009). Informe del estudio geológico y geotécnico para el relleno sanitario de la papelería nacional.
- Richardson, C.W. (1981). Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resources Res.* 17(1),182-190.
- Rallison, R.E., y Miller, N. (1981). Past, present and future CSC runoff procedure. Singh V.P. (ed.), *Rainfall runoff relationships*. Water Resource Publications (pp 353-364). Littleton, Colorado, Estados Unidos.
- Refsgaard, J., & Storm, B., (1996). Construction, calibration and validation of hydrological models. In Refsgaard, J., Abbott, M. (Eds.), *Distributed Hydrological Modelling*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 41-54.
- Taylor KE, Stouffer RJ, 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
- Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *American Geographical Society*, 38(1) pp. 55-94.
- Thornthwaite, C,W & Mather, J.R. (1955). The water budget and its use in irrigation. *Yearbook of Agriculture, USDA*, 8(1). 346-358.
- Tortajada, C. (2003, december). Workshop on Integrated Water Resources Management for South and South-East Asia. Conference Report. Bangkok, Thailand. *Water International*, 28(1),130–131.
- Sánchez C., E. y Andreu A., A. (2001). Optimización de la expansión de un sistema de recursos hídricos utilizando las metodologías del Algoritmo Genético y el Recocido Simulado. Universidad Politécnica de Valencia. *Ingeniería hidráulica en México*, XVI(2), 17-26.
- Sankarasubramanian A, Vogel RM (2002) Annual hydroclimatology of the United States. *Water Resources Research* 38:1–12.
- Saxton, K. E., W. J. Rawls, J. S. Romberger y R. I. Papendick, (1986). *Estimating generalized soil-water characteristics from texture*. Soil Science Society of America Journal, 50(4), 1031–1036

- SENPLADES. (2010). Atlas Geográfica de la Republica de Ecuador. Ecuador
- Serrano-Notivoli, R., de Luis, M., Begueria, S. (2016). An R package for daily precipitation climate series.
- Serrano-Notivoli, R., Beguería, S., Saz, y M.A., de Luis, M. (2016). Reconstrucción e incertidumbre en series de precipitación diaria instrumental. *X Congreso Internacional AEC: Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio*. Alicante España doi: <http://dx.doi.org/10.14198/XCongresoAECALicante2016-37>
- Sharpley, A.N., & Williams, J.R. (1990). EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator, 1. Model documentation. *U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Tech. Bull* 1768.
- Soil Conservation Service. (1972). Hydrology. *SCS National Engineering Handbook*.
- Sorooshian, S., & Gupta, V. (1995). Model calibration. In Singh, V. (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Ch. 2.
- SWAT. (2007). website <http://www.brc.tamus.edu/swat/>. SWAT: Soil and Water Assessment Tool.
- Taylor, Karl E., Ronald J. Stouffer, & Gerald A. Meehl. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485–498. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.
- Thorntwaite, C. W. y B. Holzman, (1941). *Evaporation and transpiration*. Yearbook of Agriculture, 1941, Departamento de Agricultura de Estados Unidos, Washington D. C., 545–855.
- UICN (2009). Delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas del Ecuador. Escala 1: 250.000, nivel 5 metodología pfafstetter. Ecuador.
- UN-Water. (2008). *Status Report on Integrated Water Resources Management and Water Efficiency Plans*. (<http://www.unwater.org/publications/status-report-integrated-water-resource-management-water-efficiency-plans-csd-16/>)
- UNESCO. (1981). Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de investigación y métodos. Francia.
- UNESCO. (2006). Guía metodológica para elaboración de mapas de zonas áridas, semiáridas, y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe. CAZALAC. Documento Técnico de PHI-LAC, No. 3.
- 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”. CAZALAC. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°25.
- USDA Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook. Section 4: Hydrology, Chapter 4-10.

- Vicente, S.M., Saz, M.A., & Cuadrat, J.M. (2008). Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperatura. *Climate Research*, 24(2),161-180.
- Vicente-Serrano, S., Beguería, S., López-Moreno, J., García-Vera, M., Stepanek, P. (2010). *A complete daily precipitation database for northeast Spain: reconstruction, quality control, and homogeneity*. *International Journal of Climatology*, 30(8), 1146-1163. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1850>.
- Williams, J.R. (1995). The EPIC Model. En *Computer Models of Watershed Hydrology*. *Water Resources Publications* (pp. 909-1000). Highlands Ranch, CO.
- Winchell, M., Srinivasan R., Di Luzio, M., & Arnold, J., (2013). *User's Guide*. *Arcswat Interface for Swat 2012*.
- WWAP, DHI Water Policy, UNEP-DHI Centre for Water and Environment. (2009). *Integrated Water Resources Management in Action*. (<http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001818/181891E.pdf>).
- Wurbs R, Muttiah R (2005) Incorporation of climate change in water availability modeling. *Journal of Hydrologic Engineering* 10:375–385. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2005)10:5(375).
- Xu ZX, Zhao FF, Li JY (2009) Response of streamflow to climate change in the headwater catchment of the Yellow River basin. *Quaternary International* 208:62–75. doi: 10.1016/j.quaint.2008.09.001.

Capítulo IX.

ANEXOS

IX. ANEXOS

Anexo 1. Evapotranspiración potencial mensual

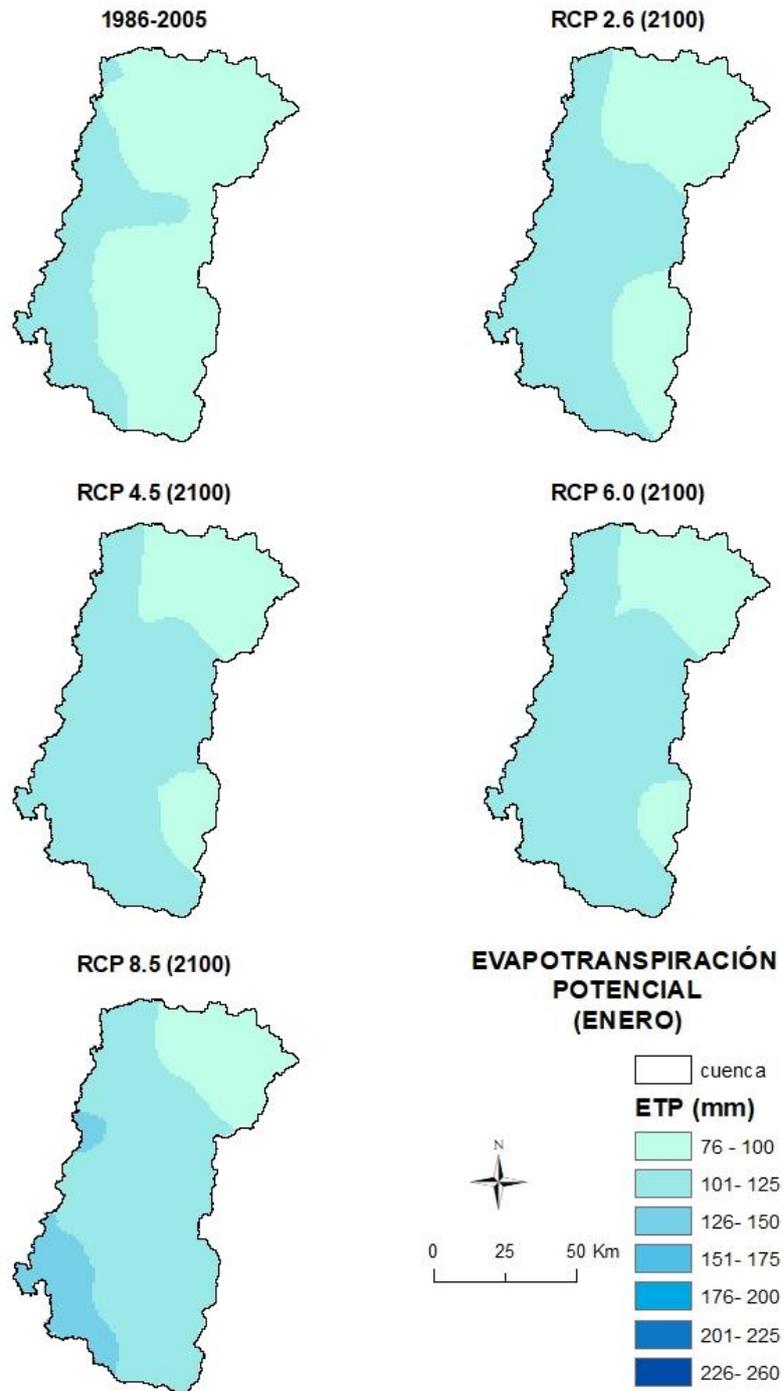


Figura 72. Evapotranspiración potencial mensual enero.

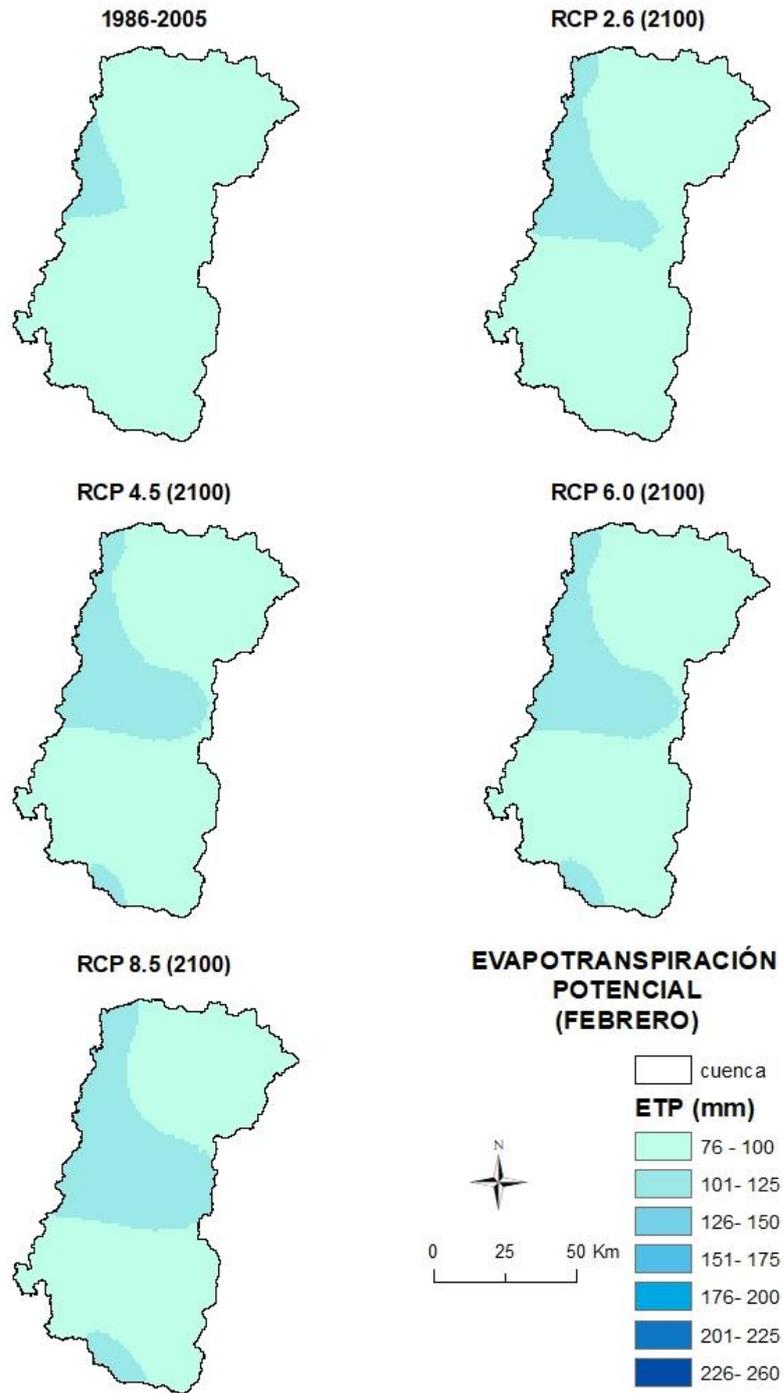


Figura 73. Evapotranspiración potencial media mensual febrero

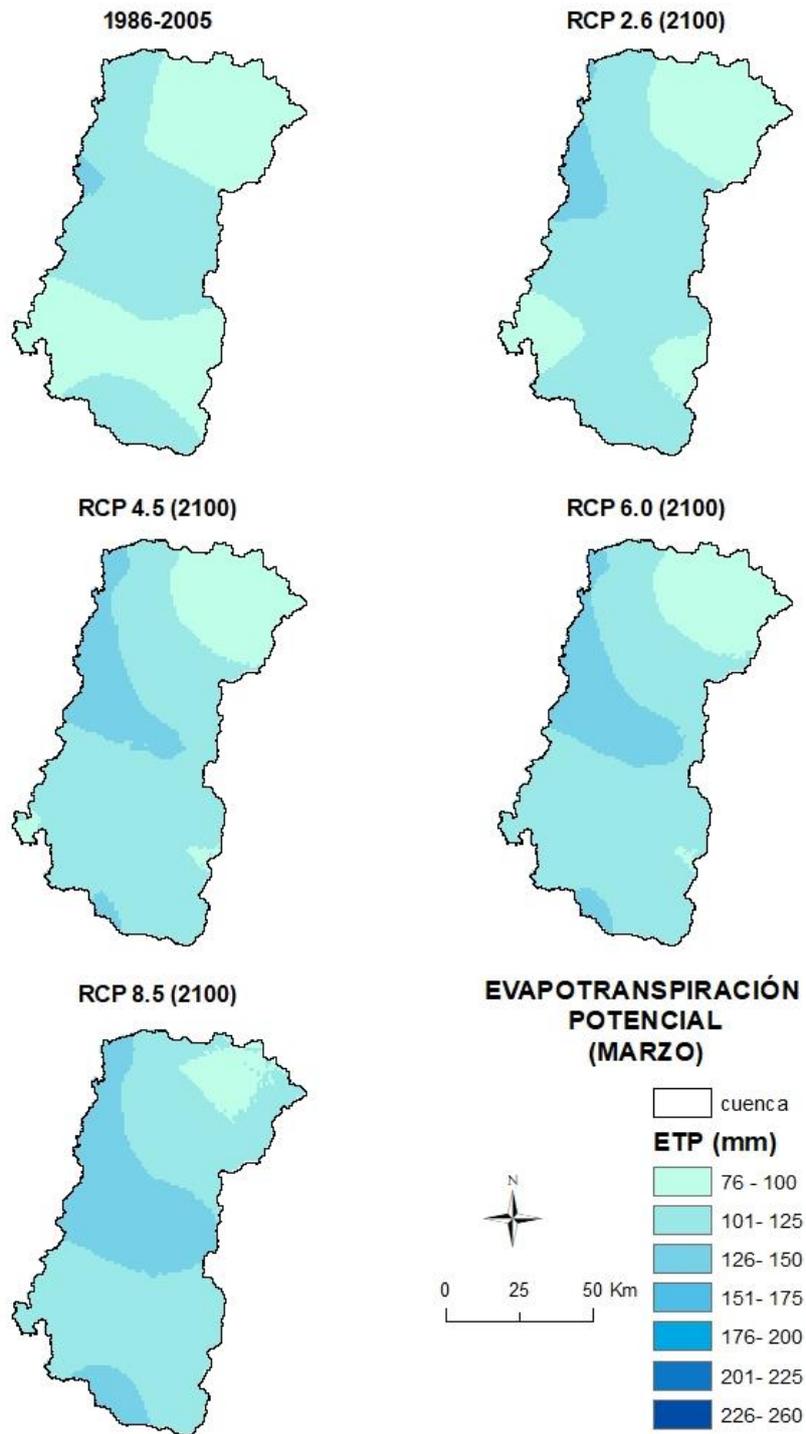


Figura 74. Evapotranspiración potencial media mensual marzo.

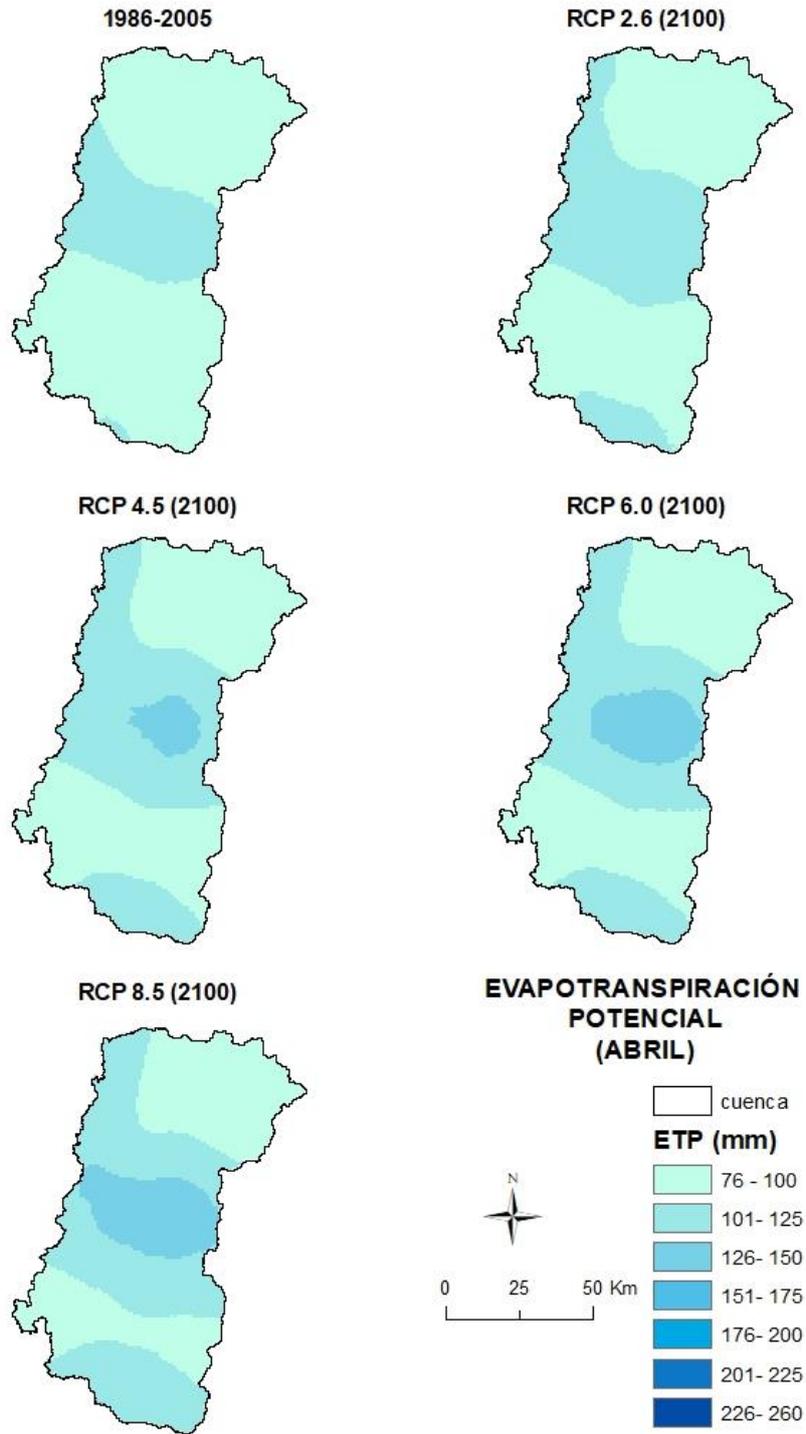


Figura 75. Evapotranspiración potencial media mensual abril.

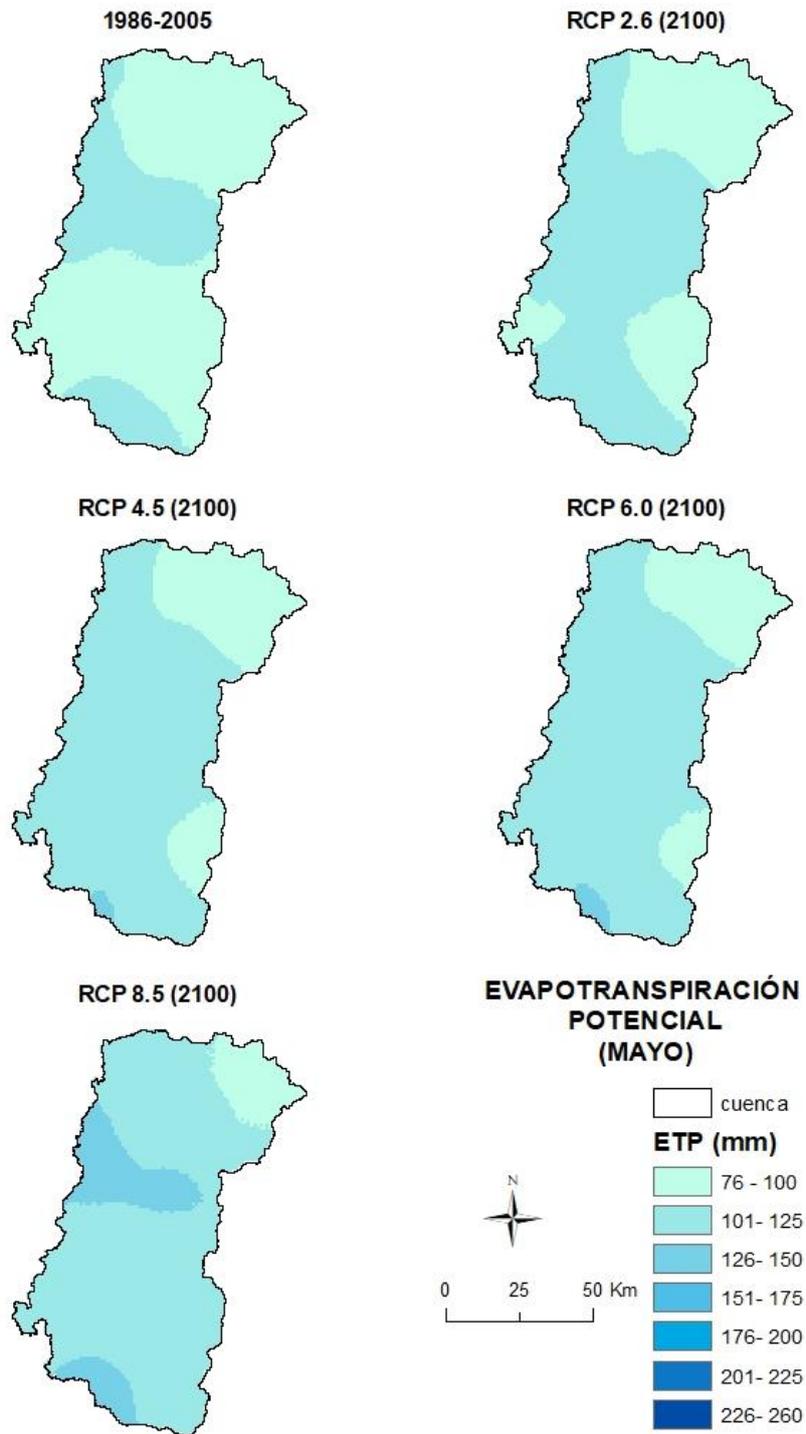


Figura 76. Evapotranspiración potencial media mensual mayo.

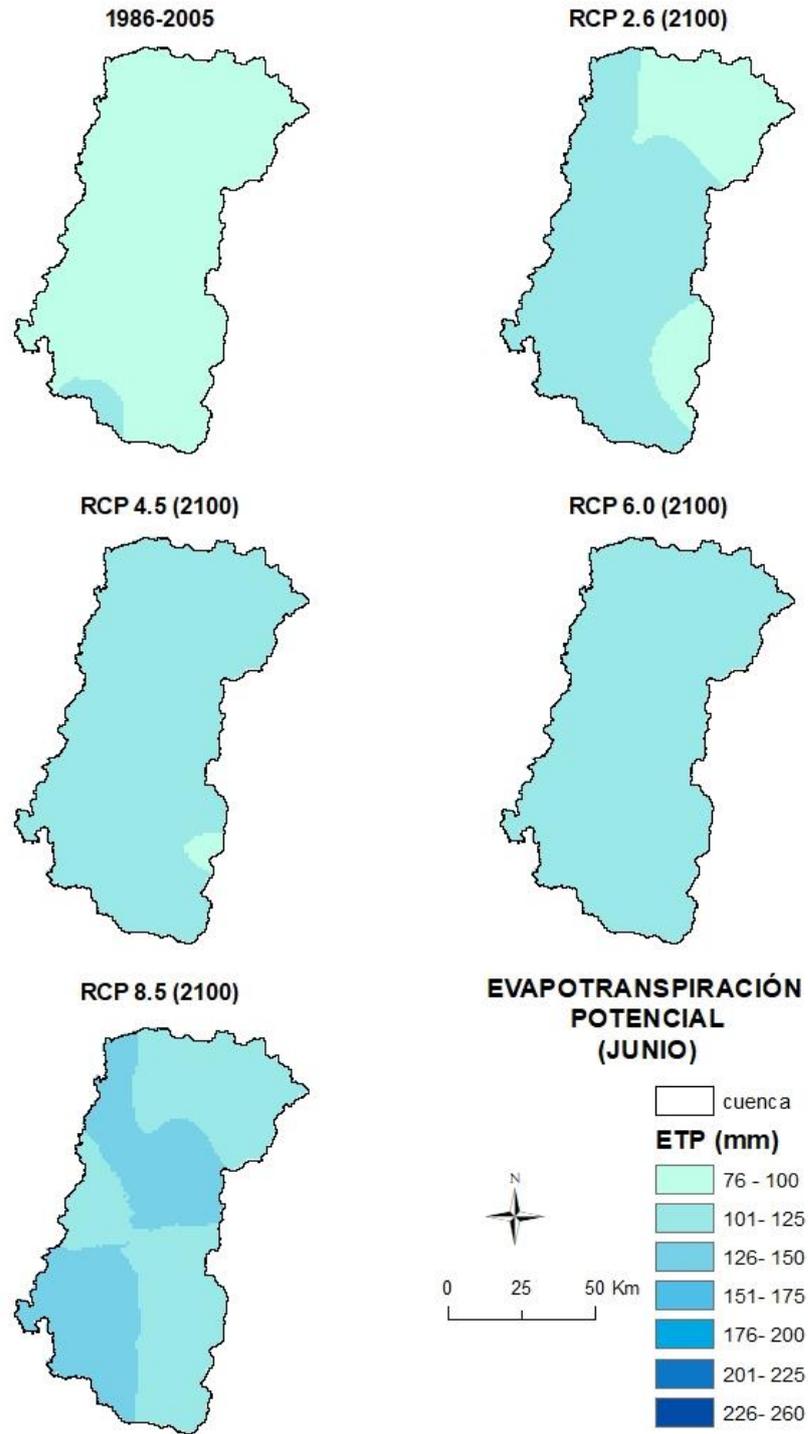


Figura 77. Evapotranspiración potencial media mensual junio

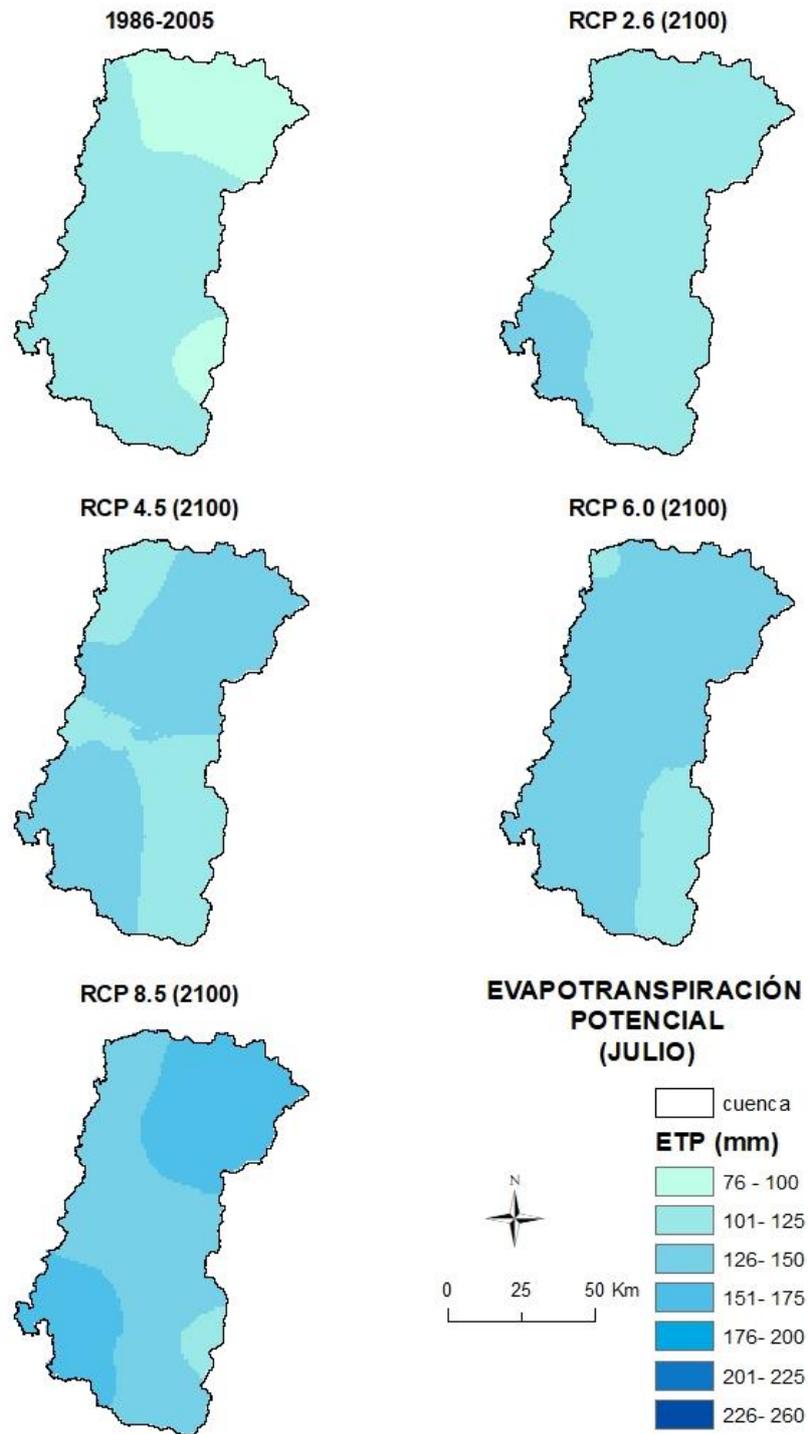


Figura 78. Evapotranspiración potencial media mensual julio.

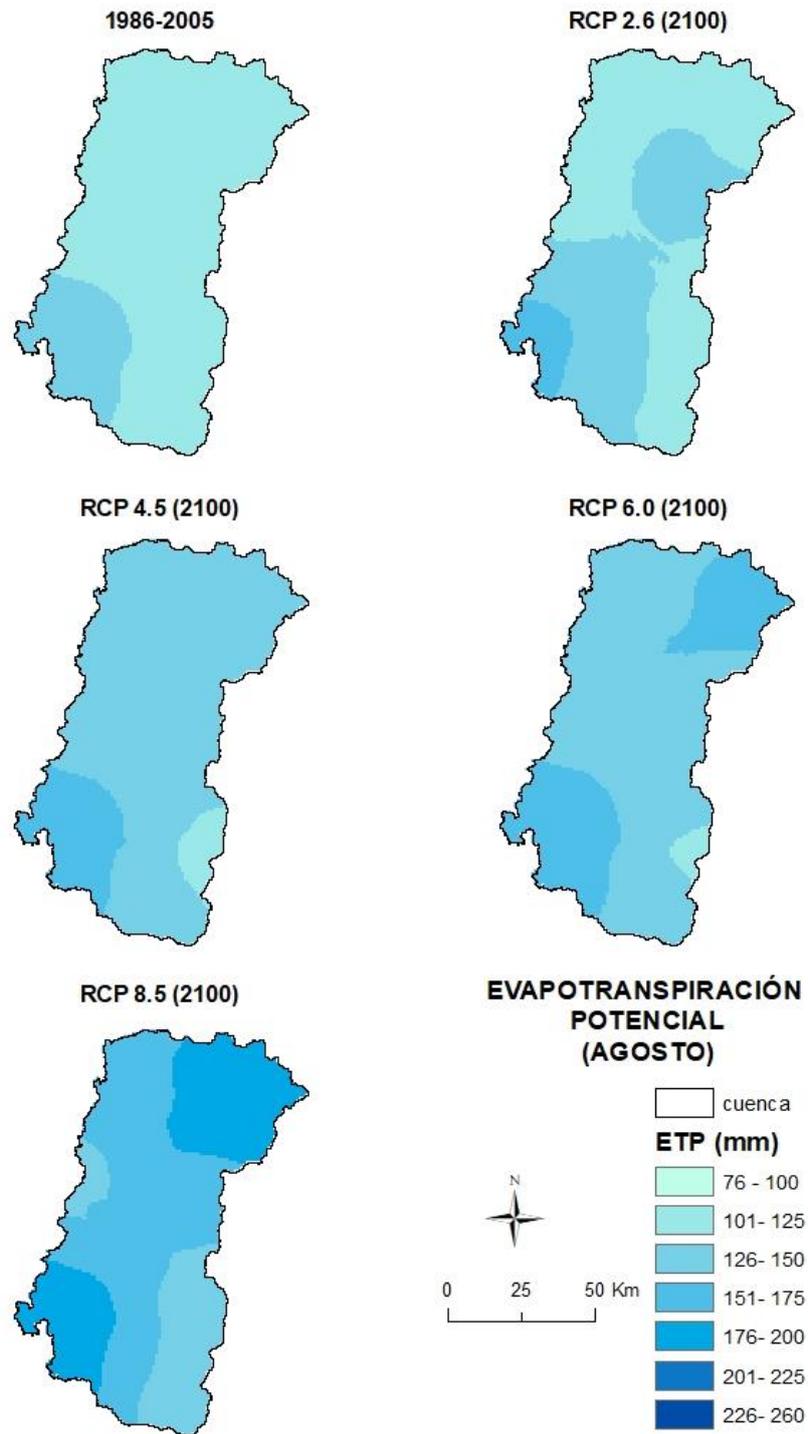


Figura 79. Evapotranspiración potencial media mensual agosto.

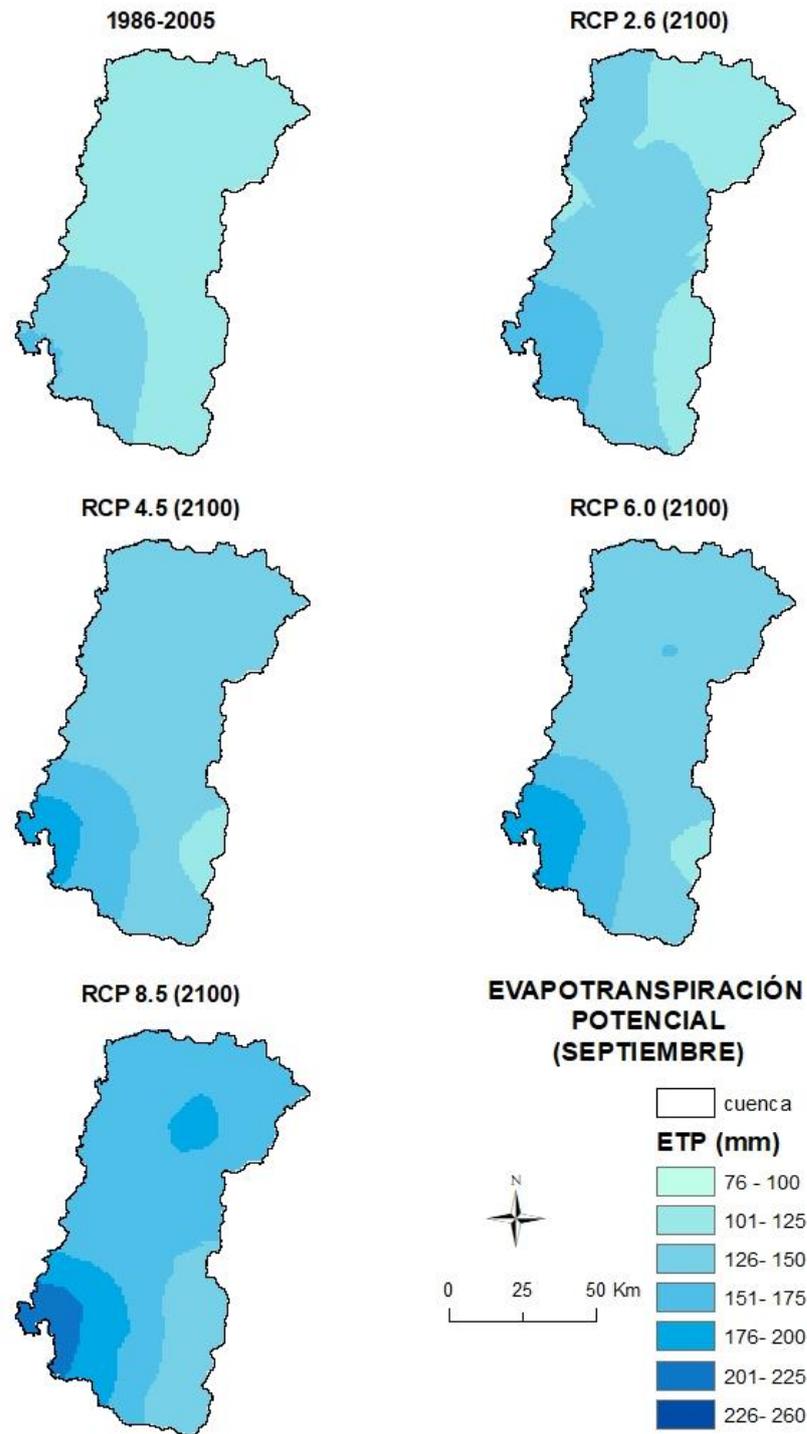


Figura 80. Evapotranspiración potencial media mensual septiembre.

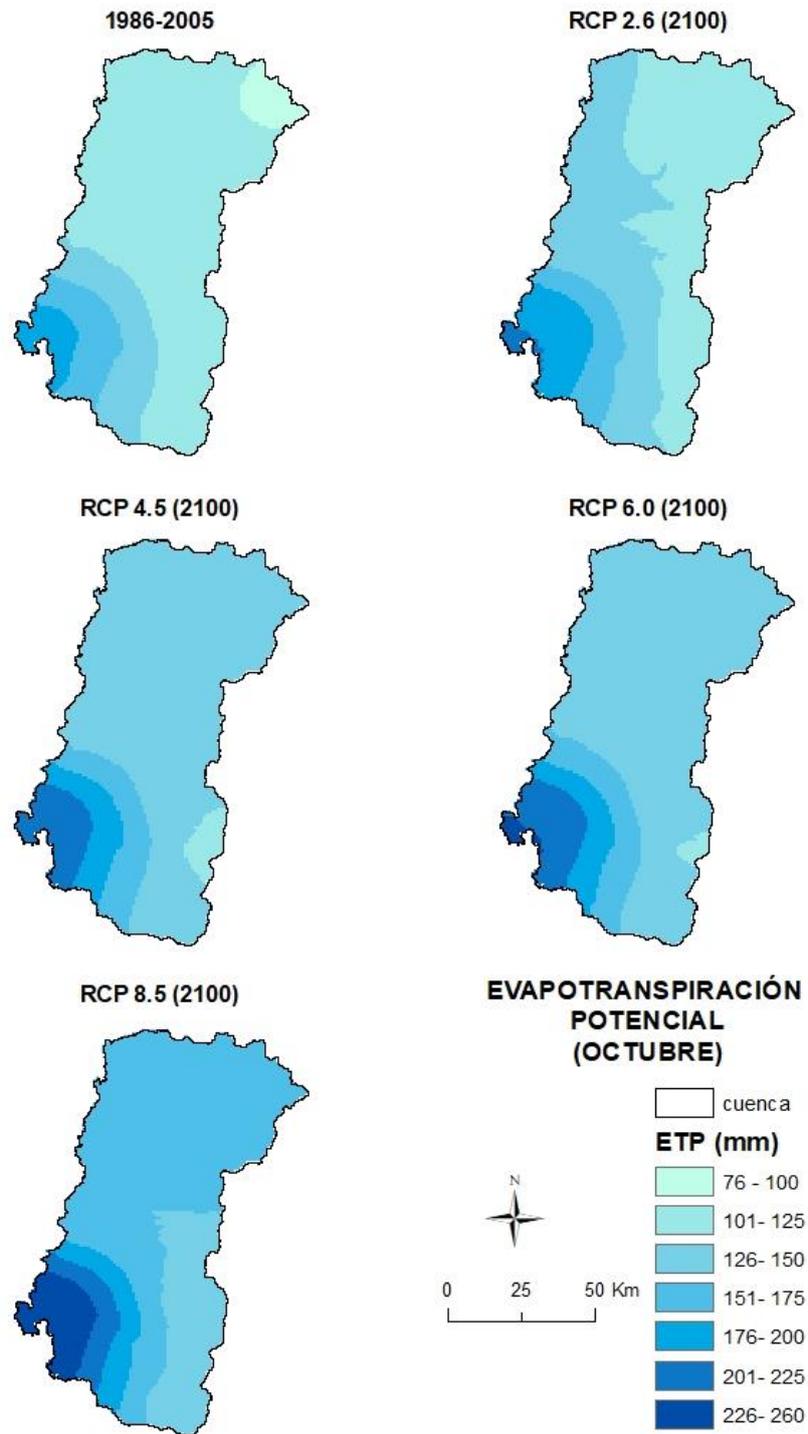


Figura 81. Evapotranspiración potencial media mensual octubre

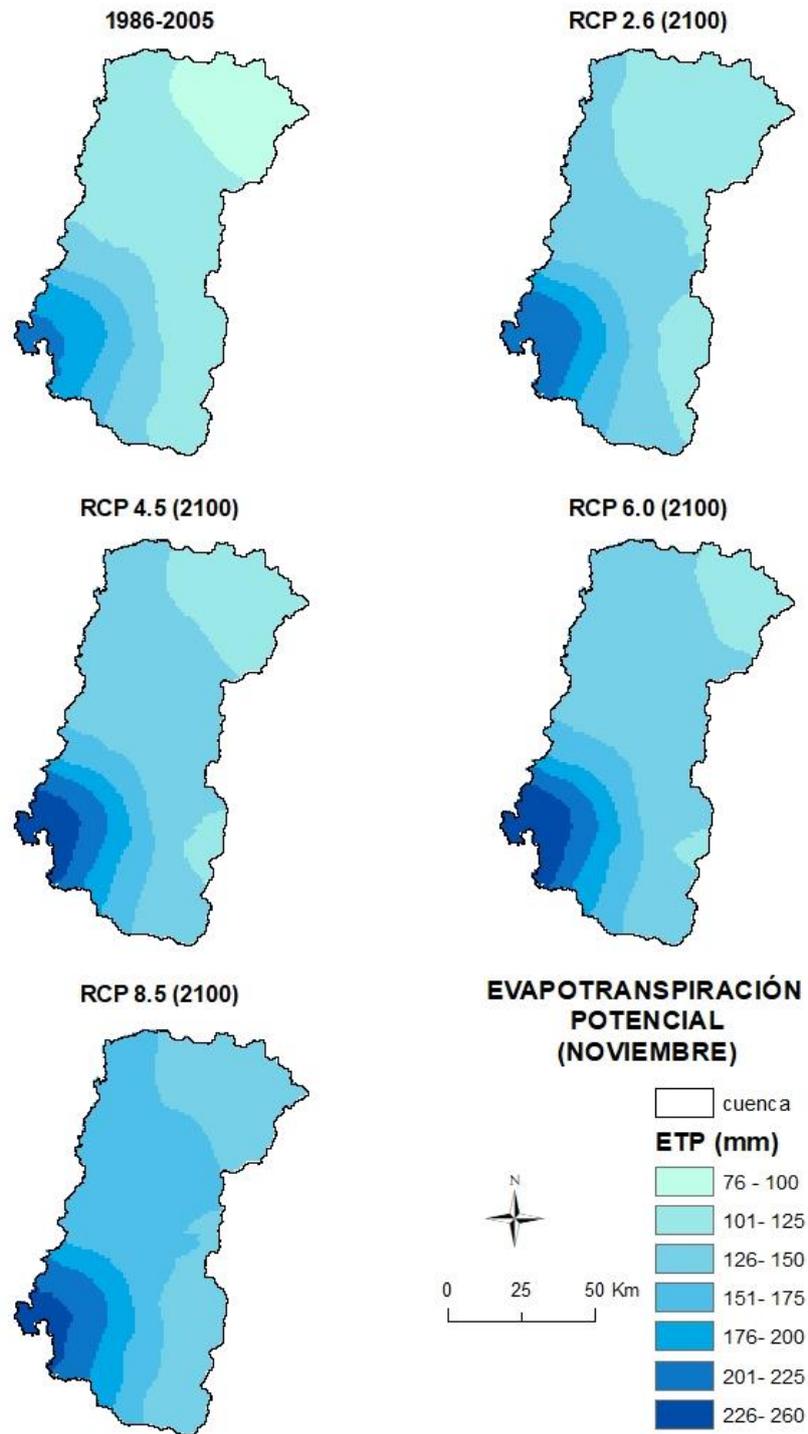


Figura 82. Evapotranspiración potencial media mensual noviembre.

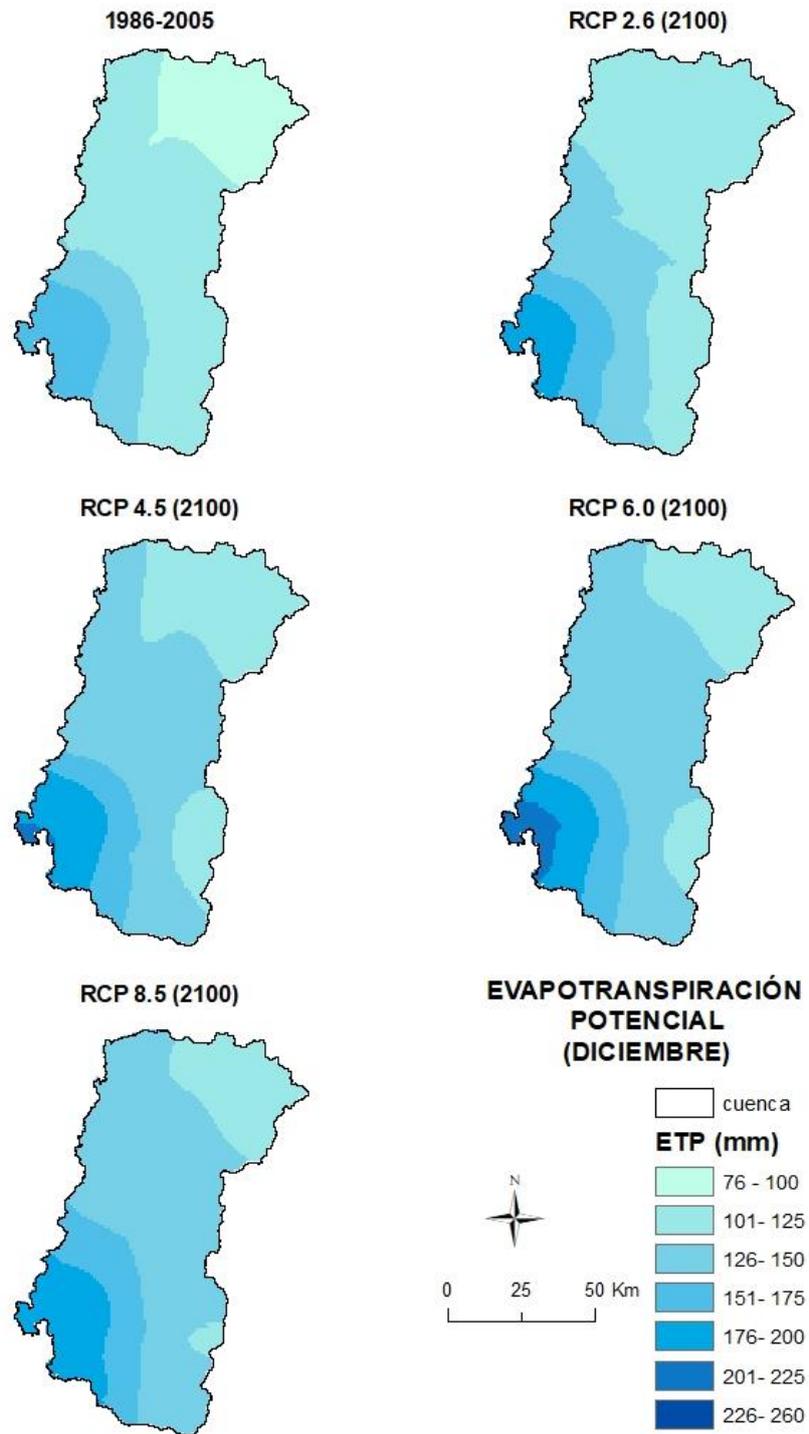


Figura 83. Evapotranspiración potencial media mensual diciembre.

Anexo 2. Precipitación útil mensual

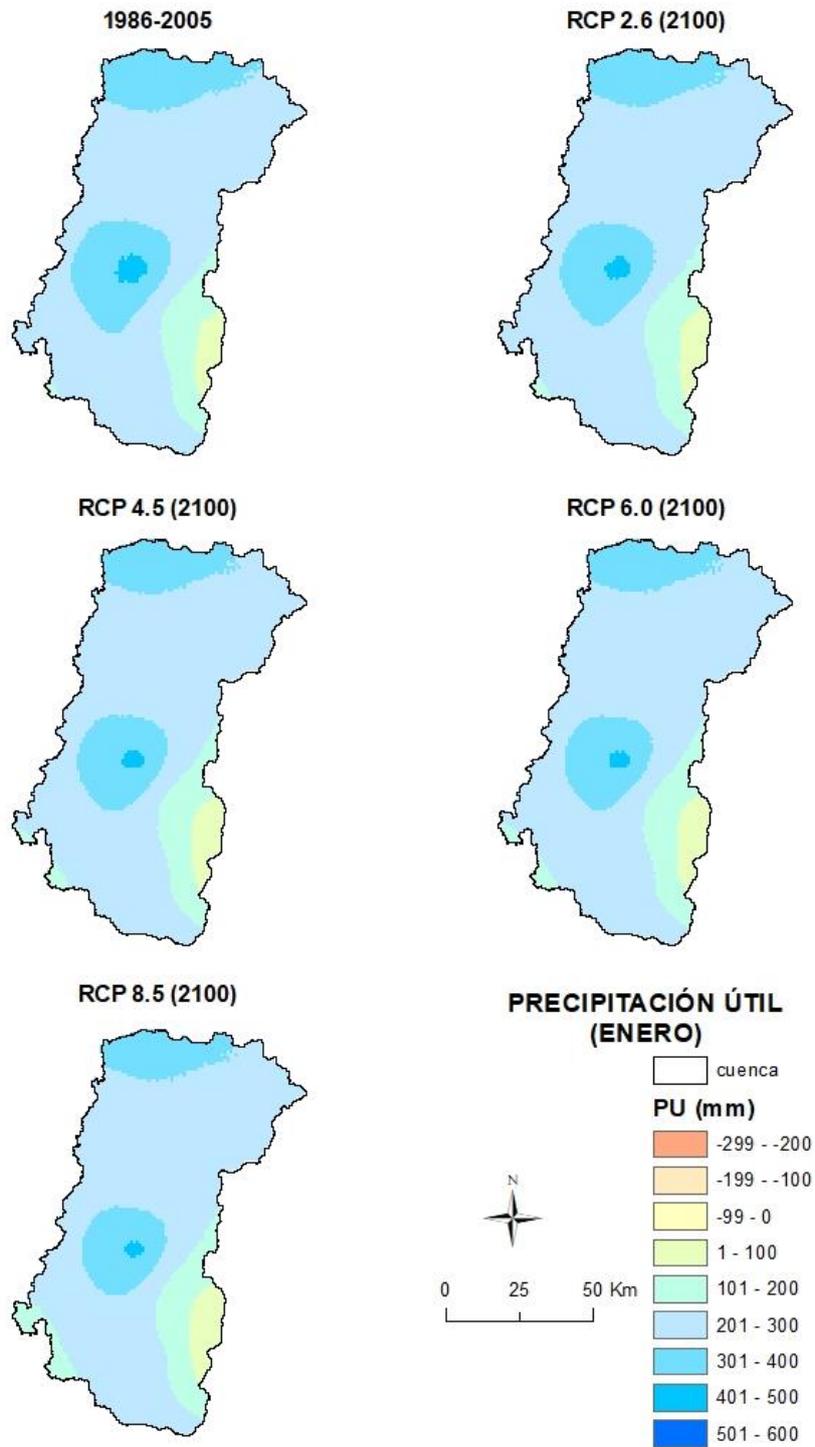


Figura 84. Precipitación útil media mensual enero.

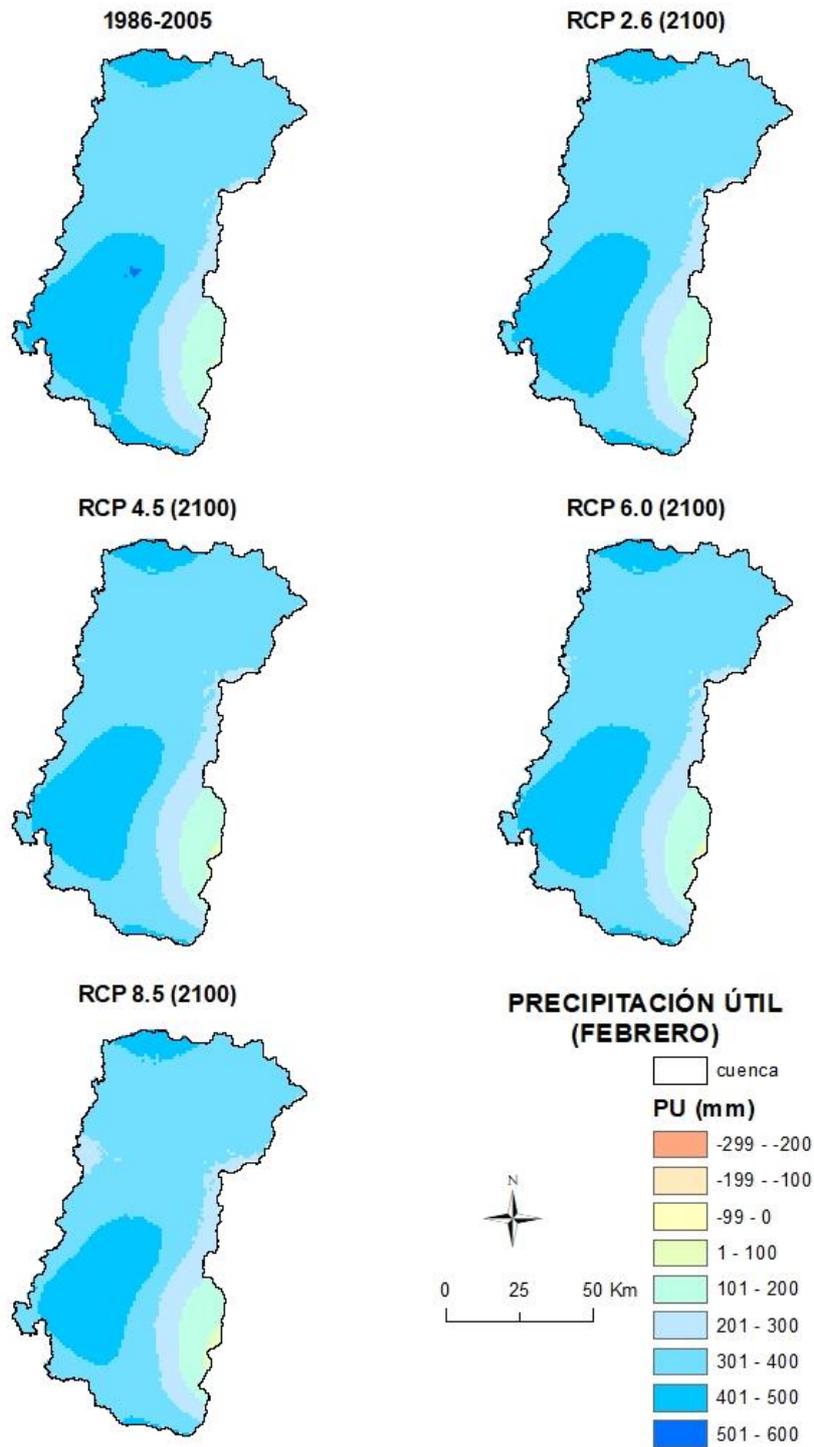


Figura 85. Precipitación útil media mensual febrero.

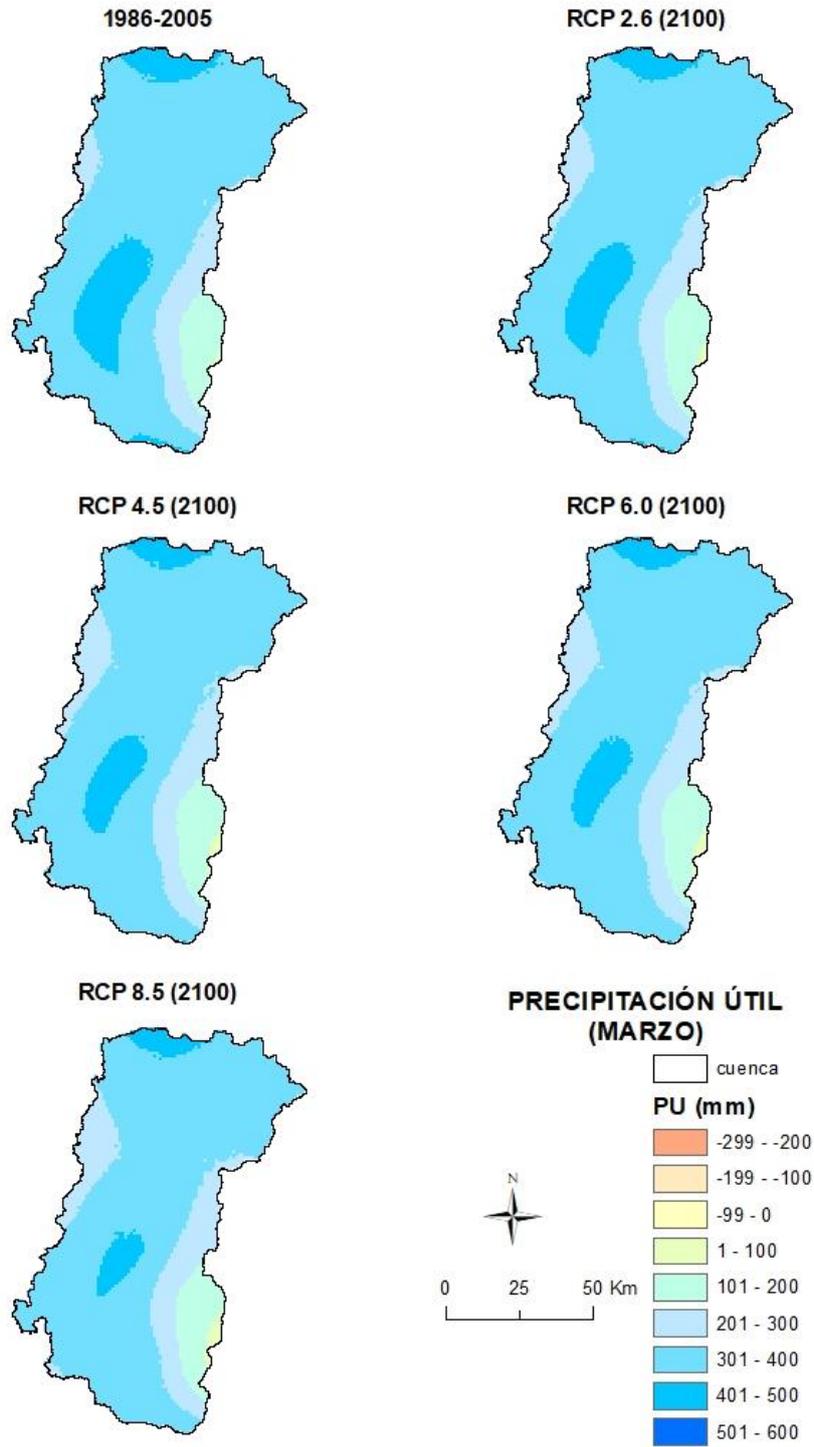


Figura 86. Precipitación útil media mensual marzo.

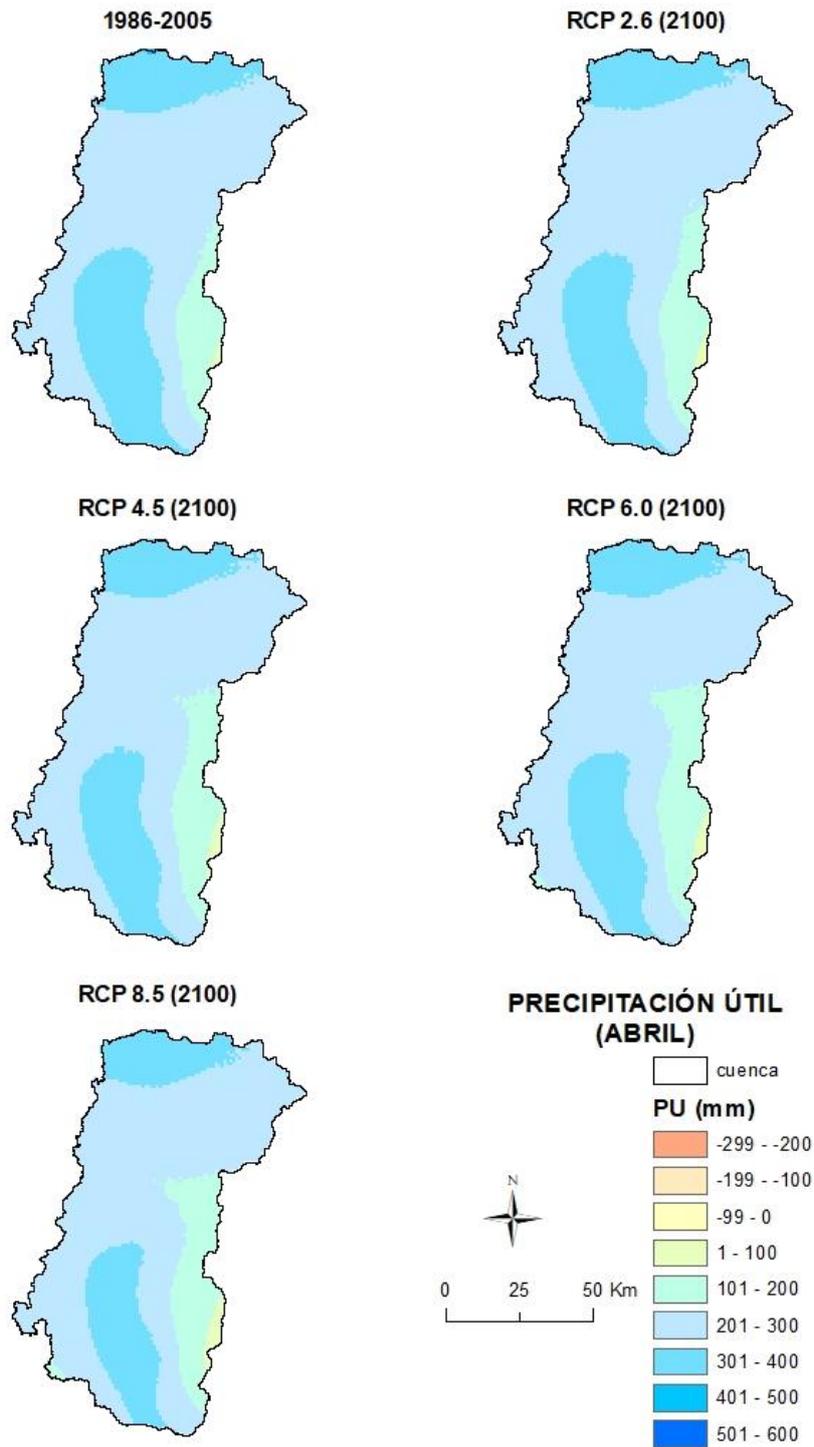


Figura 87. Precipitación útil media mensual abril.

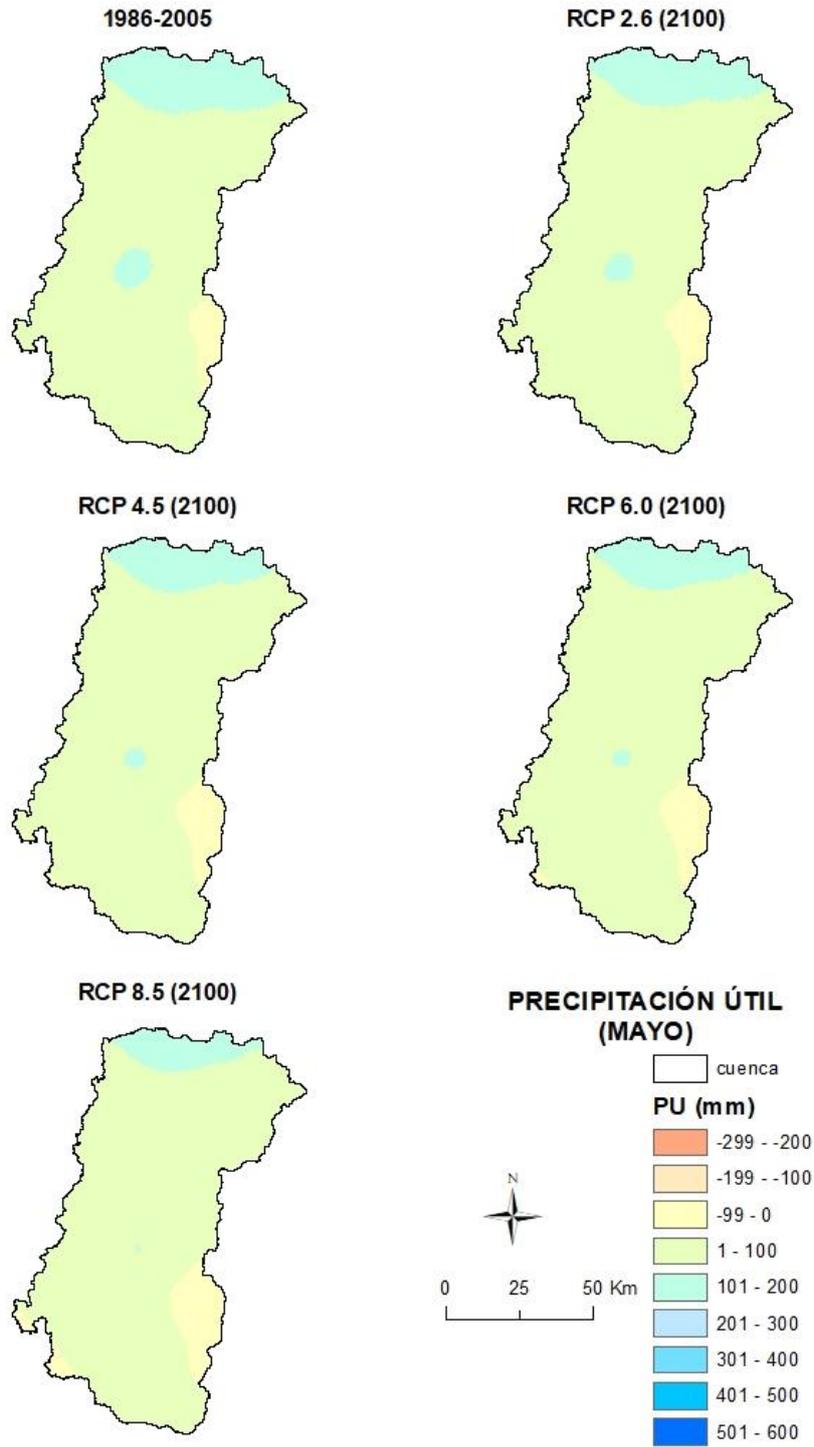


Figura 88. Precipitación útil media mensual mayo.

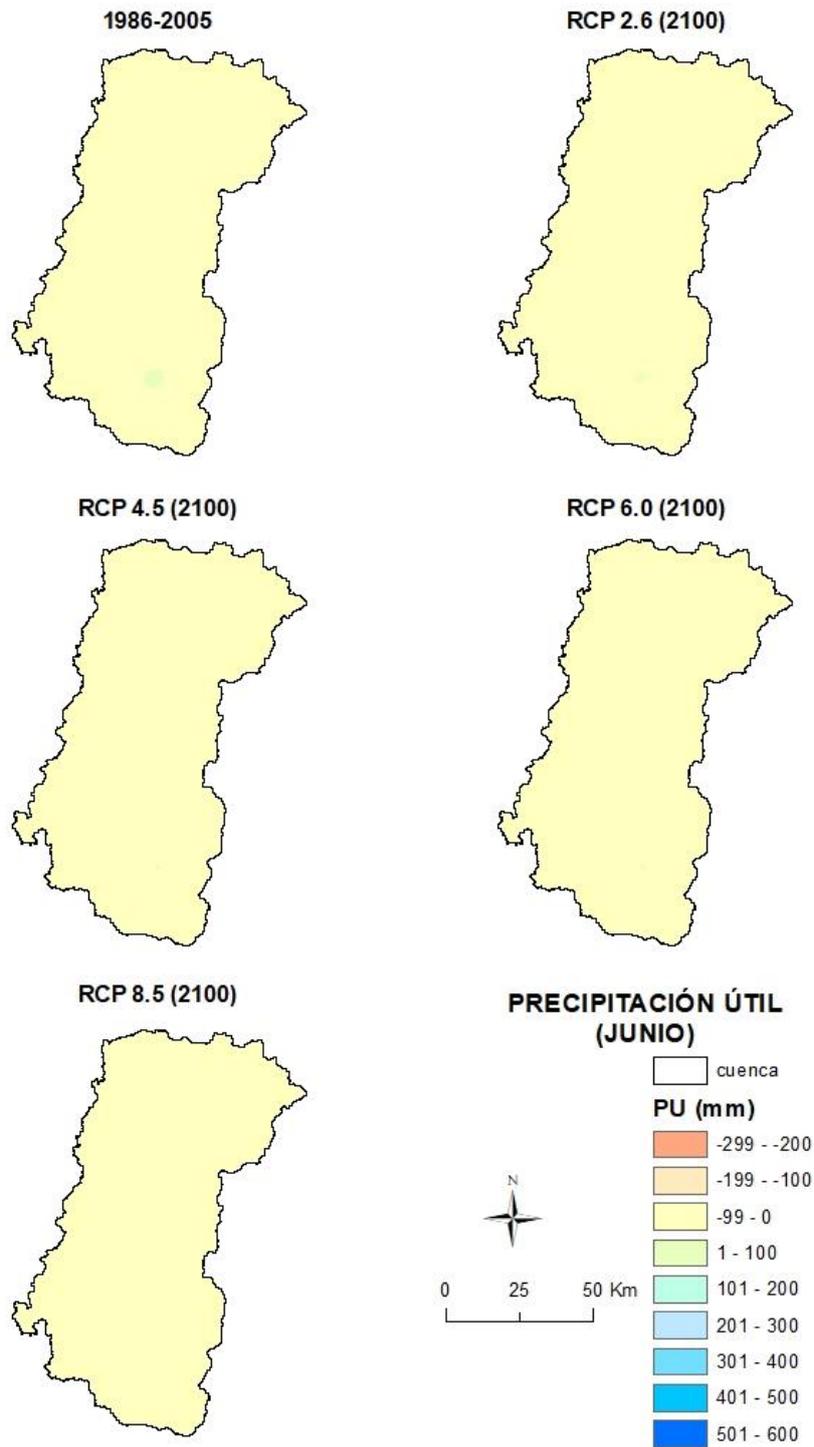


Figura 89. Precipitación útil media mensual junio.

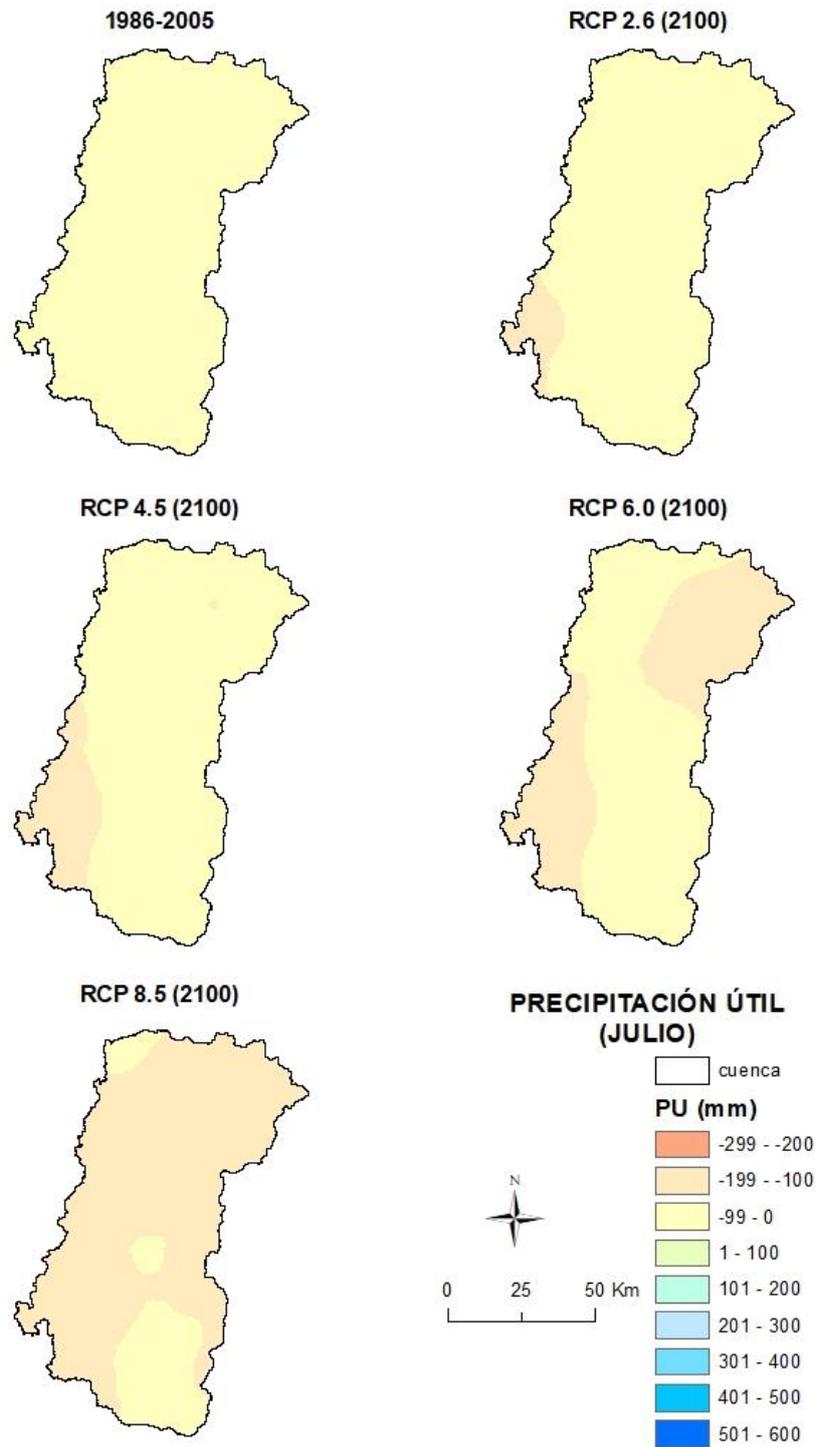


Figura 90. Precipitación útil media mensual julio.

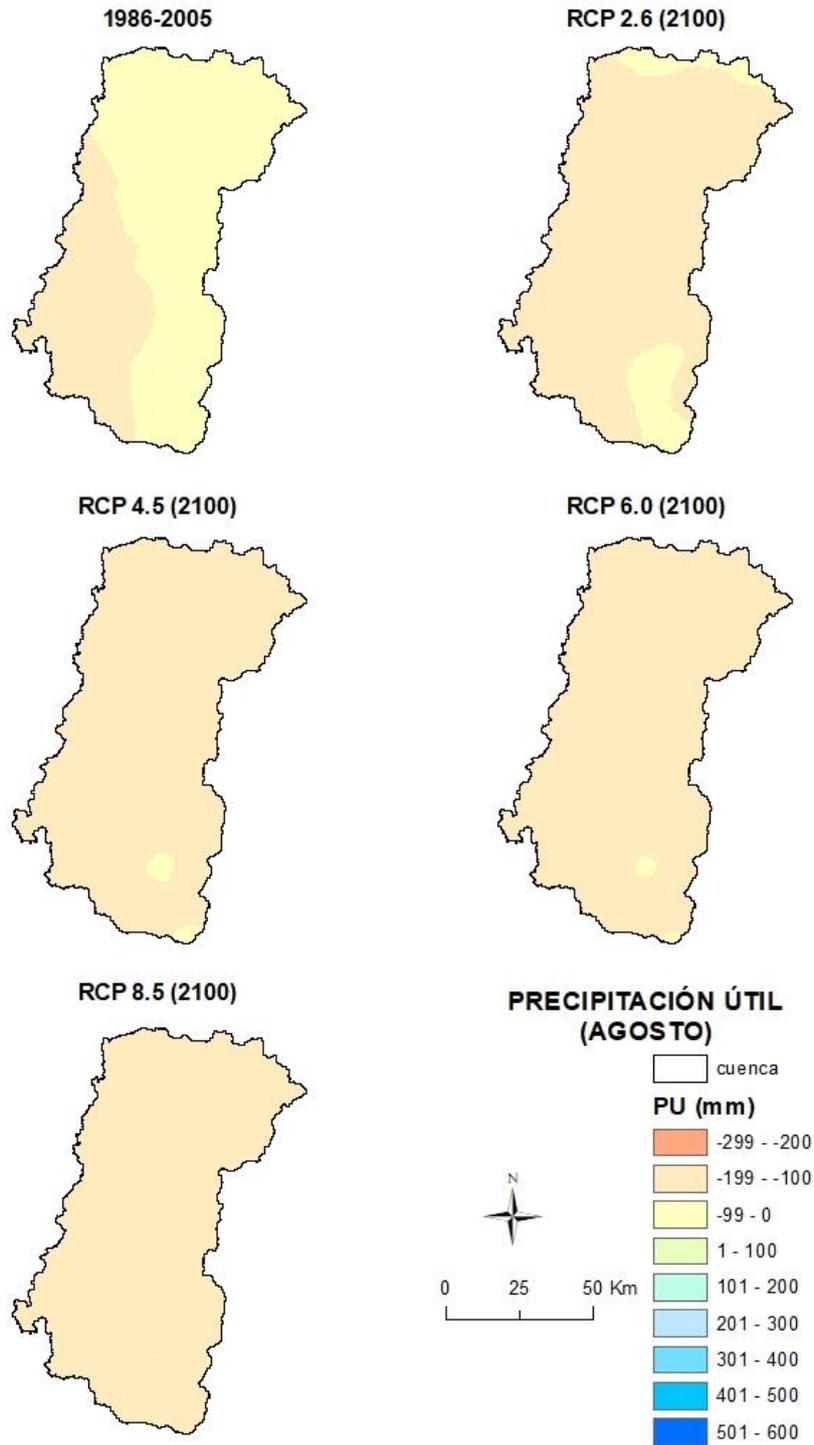


Figura 91. Precipitación útil media mensual agosto.

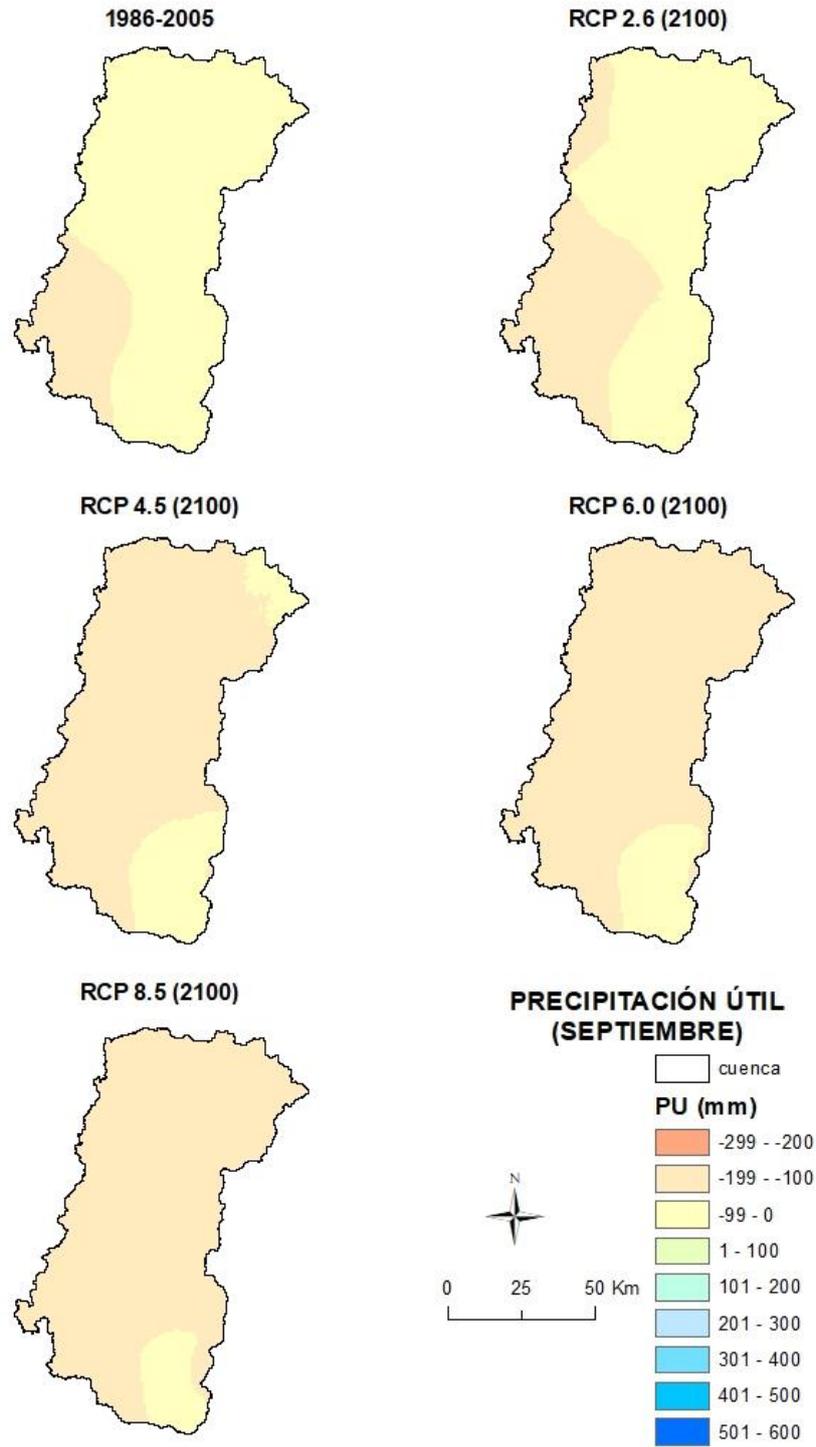


Figura 92. Precipitación útil media mensual septiembre.

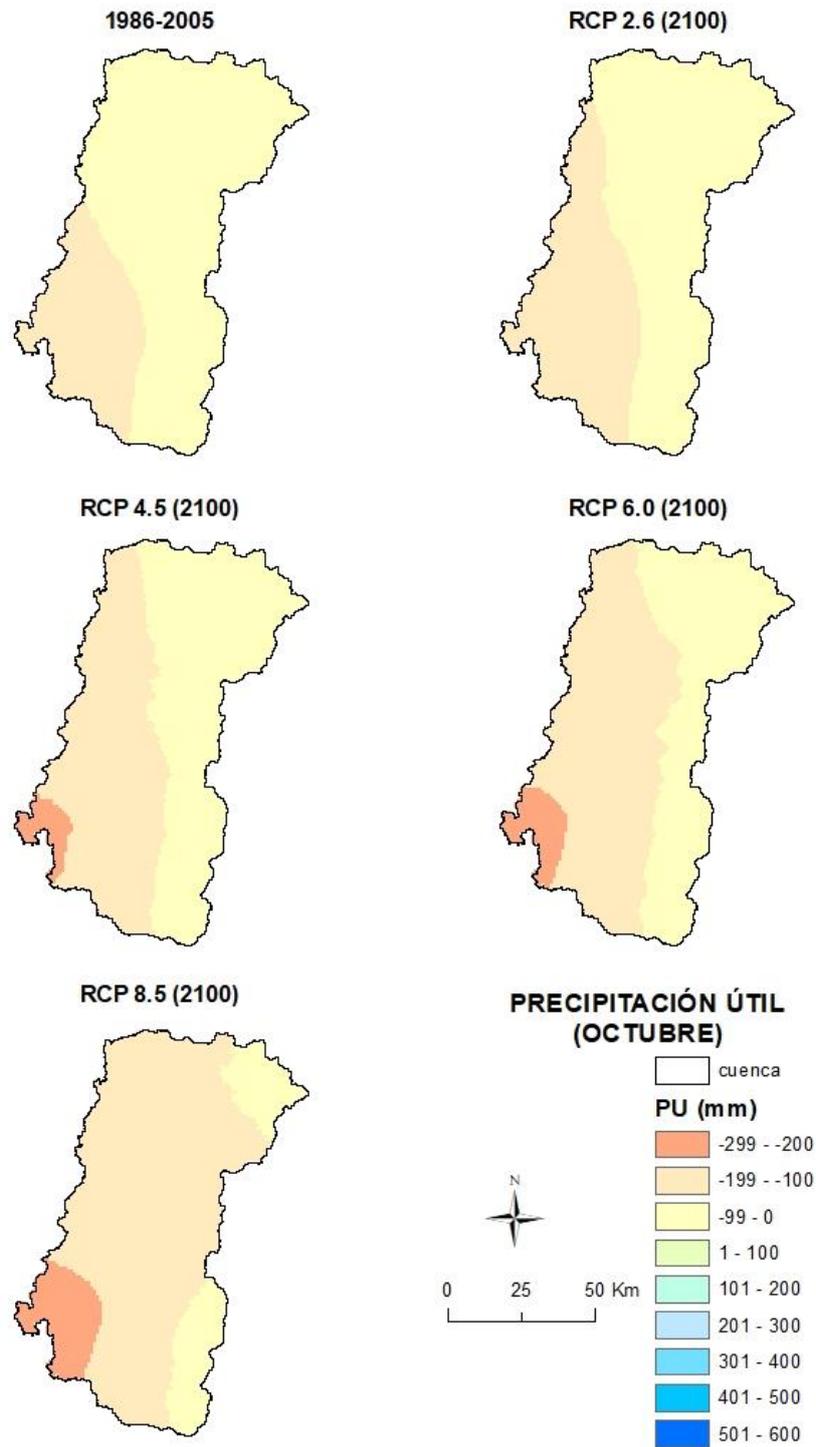


Figura 93. Precipitación útil media mensual octubre.

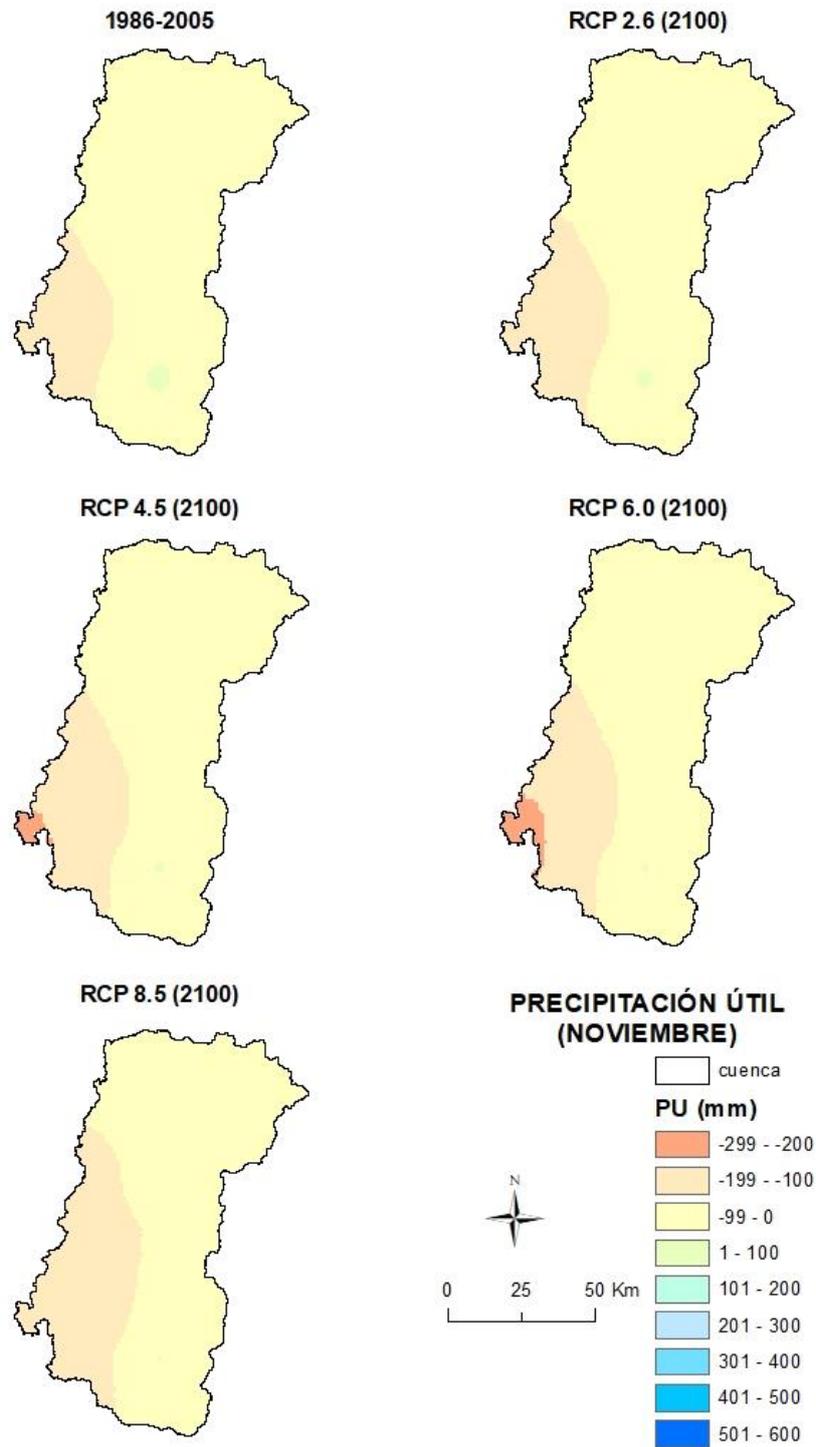


Figura 94. Precipitación útil media mensual noviembre.

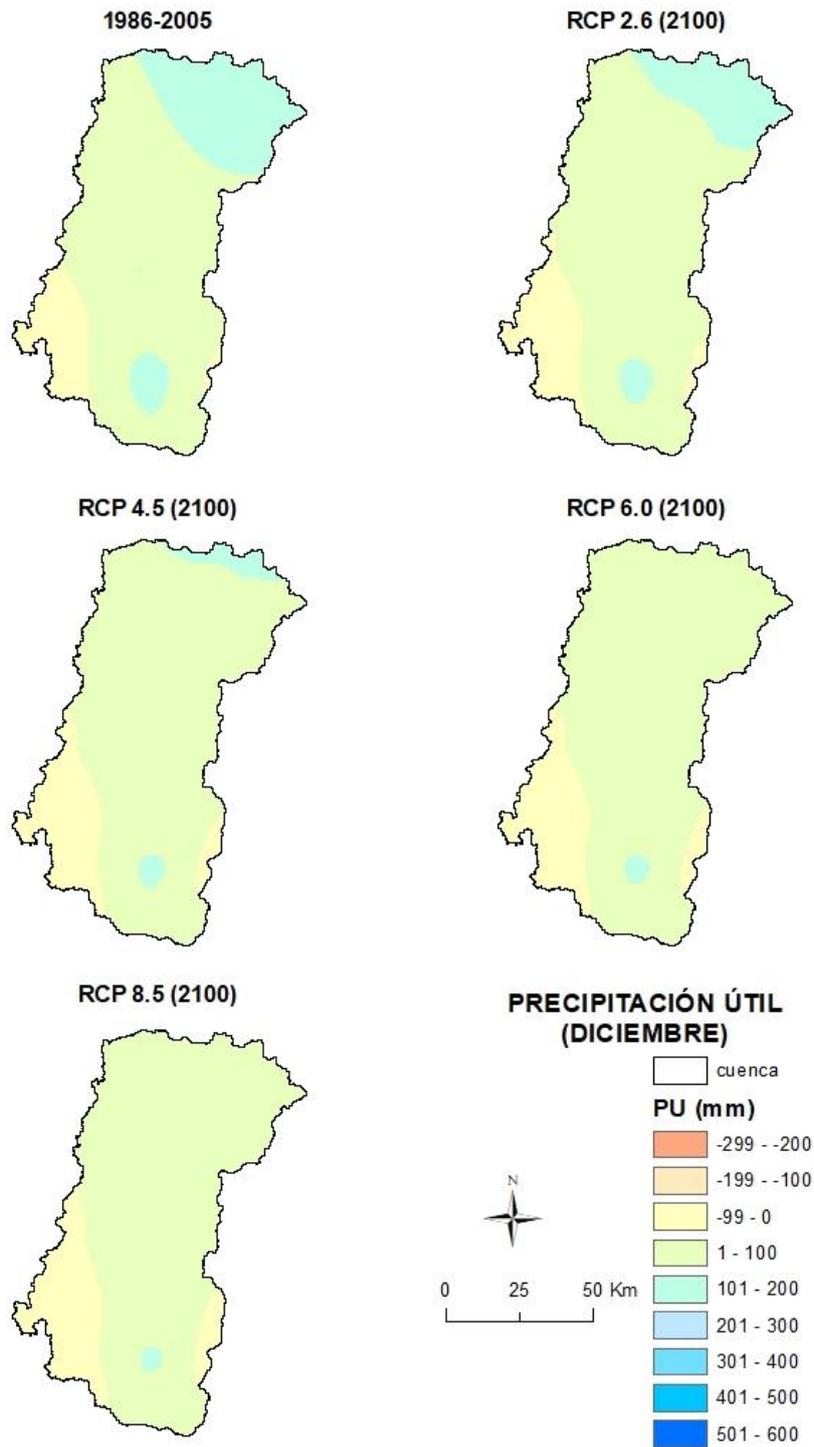


Figura 95. Precipitación útil media mensual diciembre.

Anexo 3. Reserva de agua en el suelo mensual

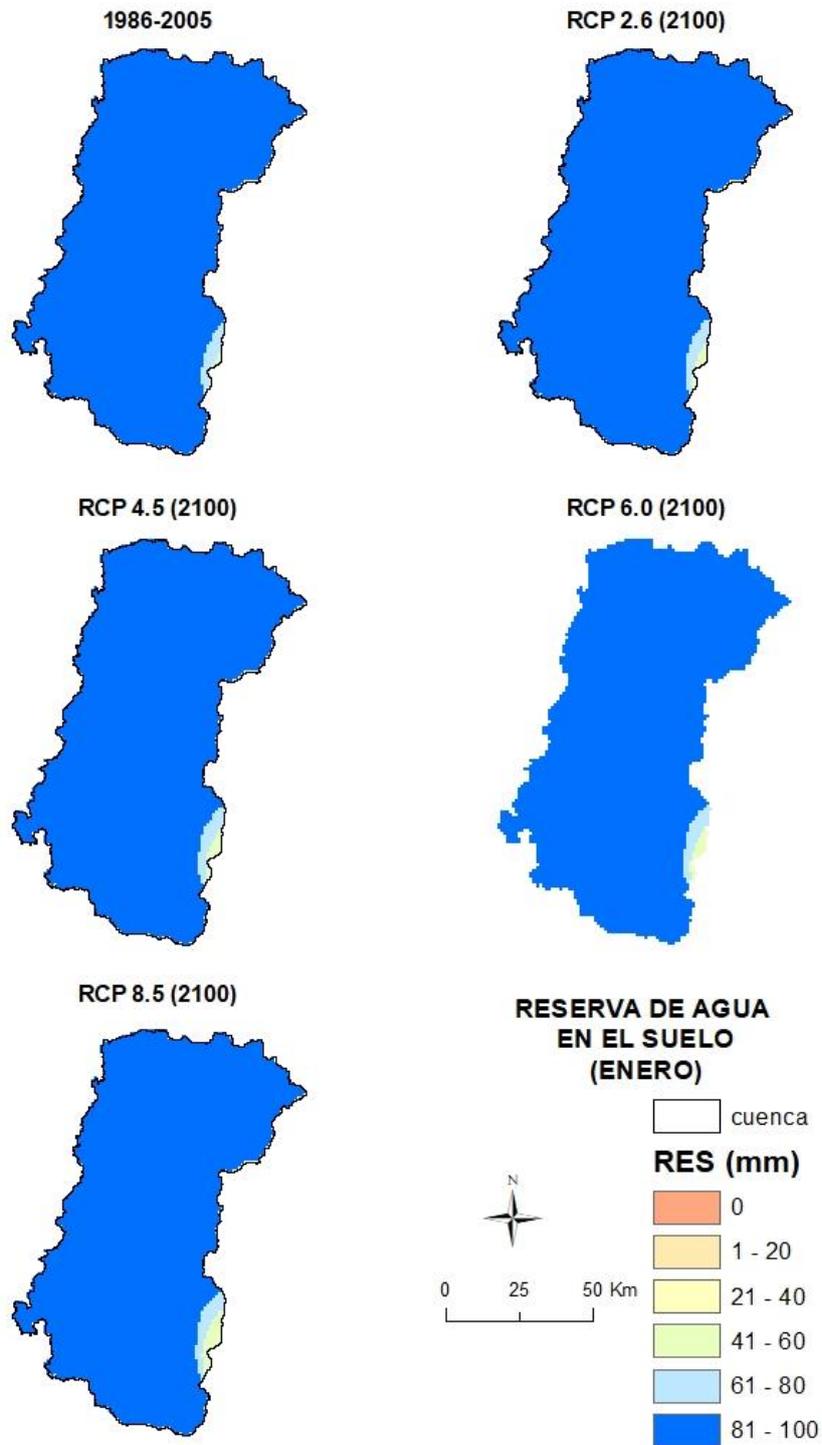


Figura 96. Reserva de agua en el suelo media mensual enero.

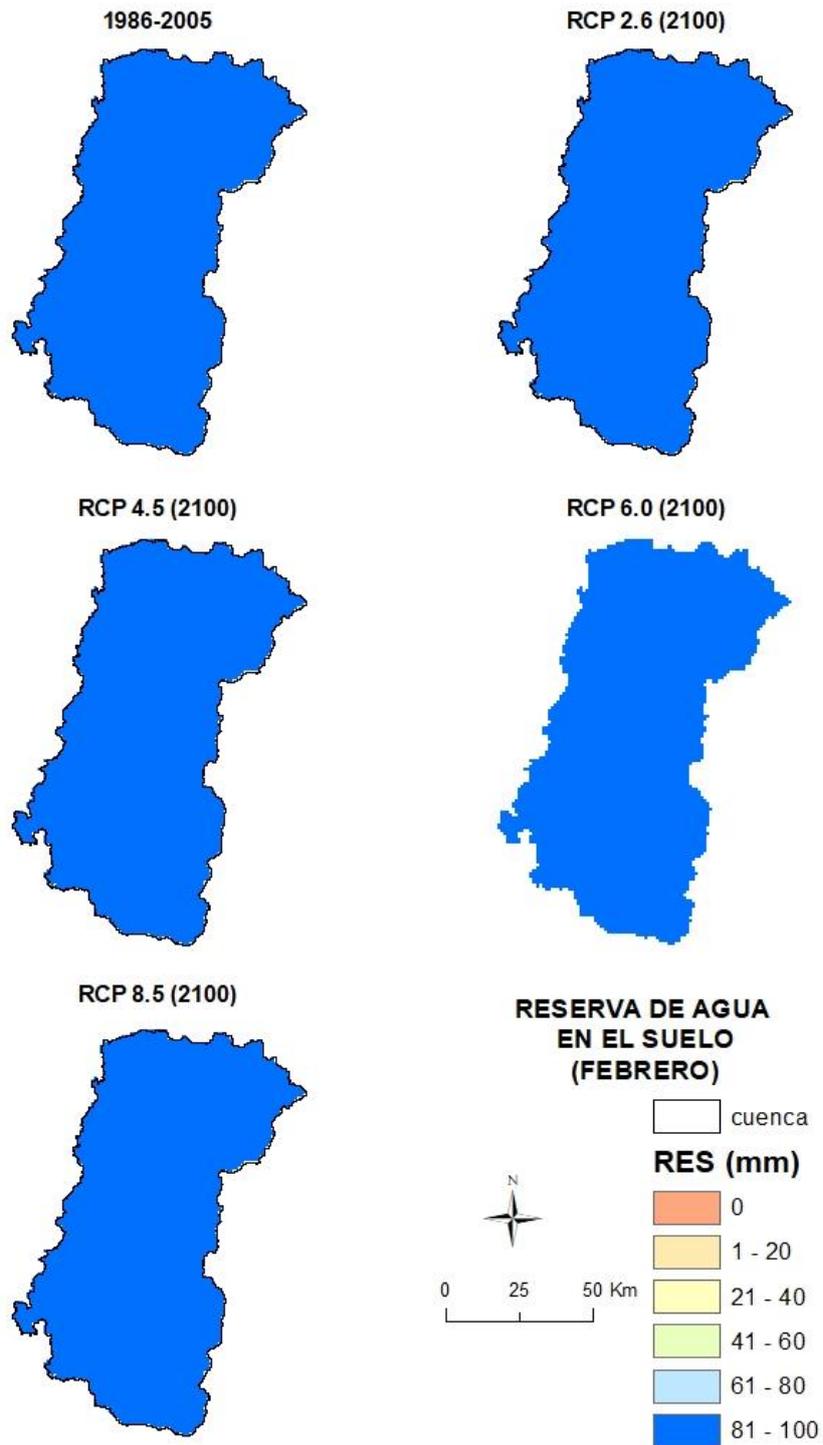


Figura 97. Reserva de agua en el suelo media mensual febrero.

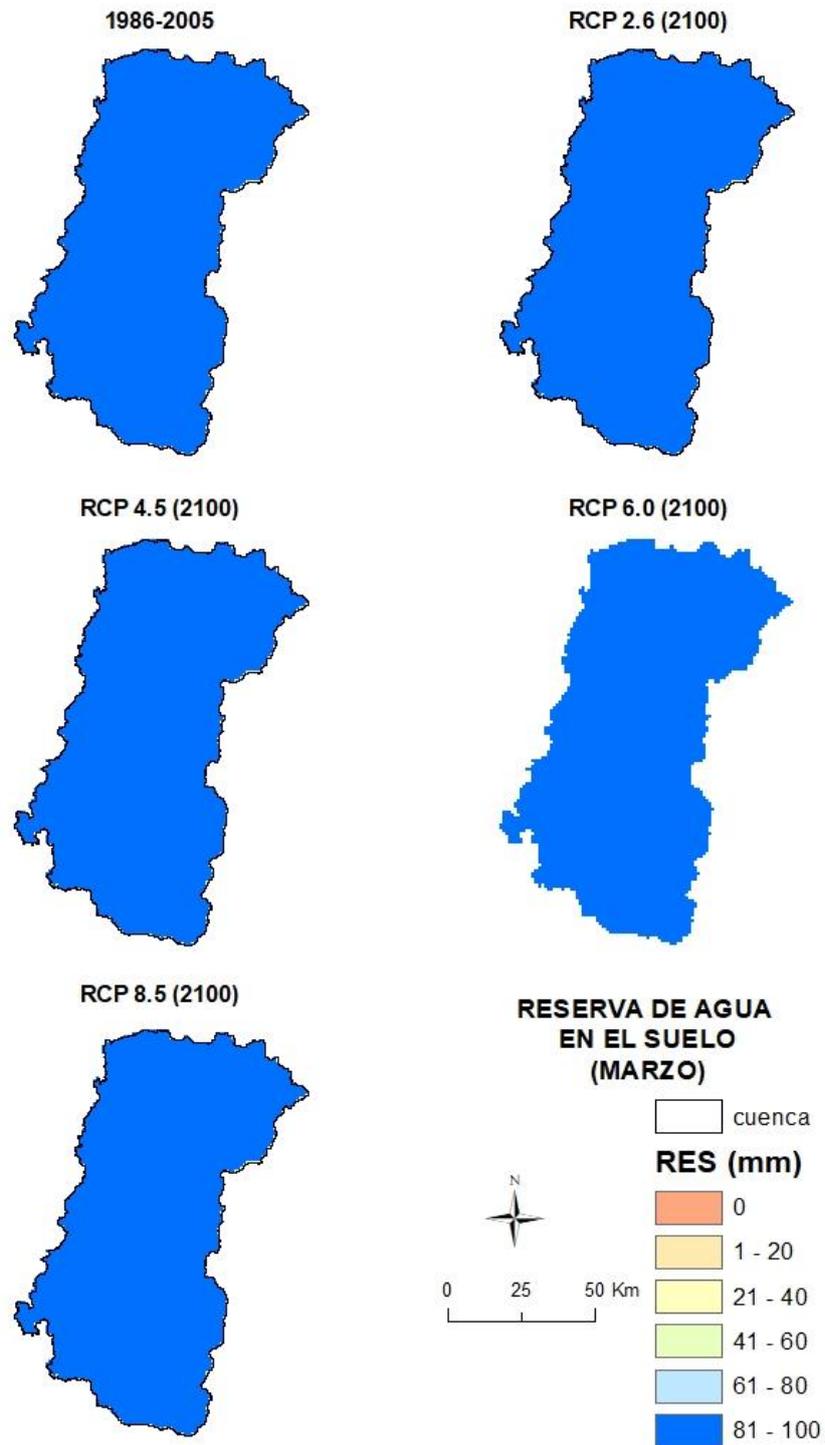


Figura 98. Reserva de agua en el suelo media mensual marzo.

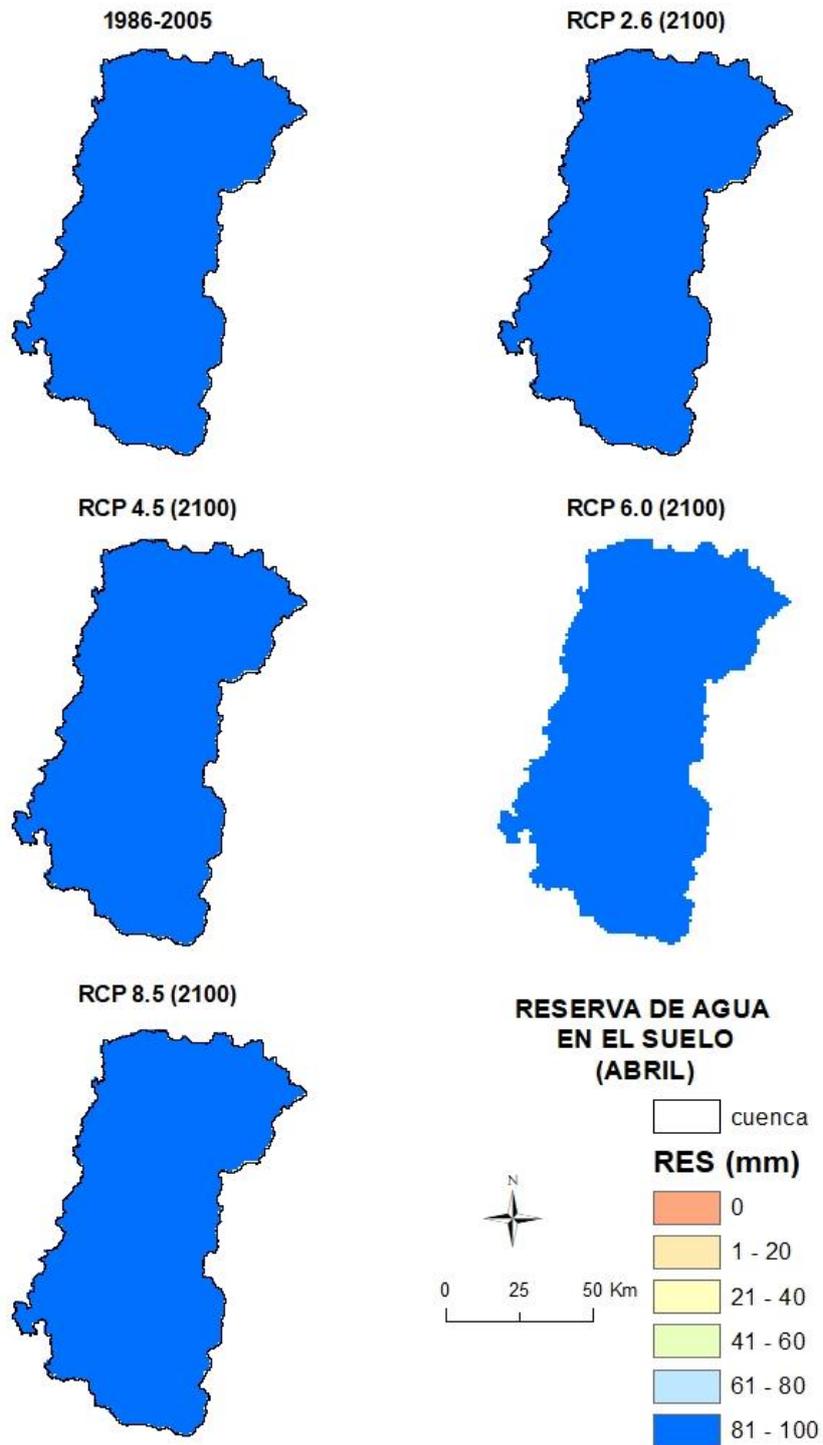


Figura 99. Reserva de agua en el suelo media mensual abril.

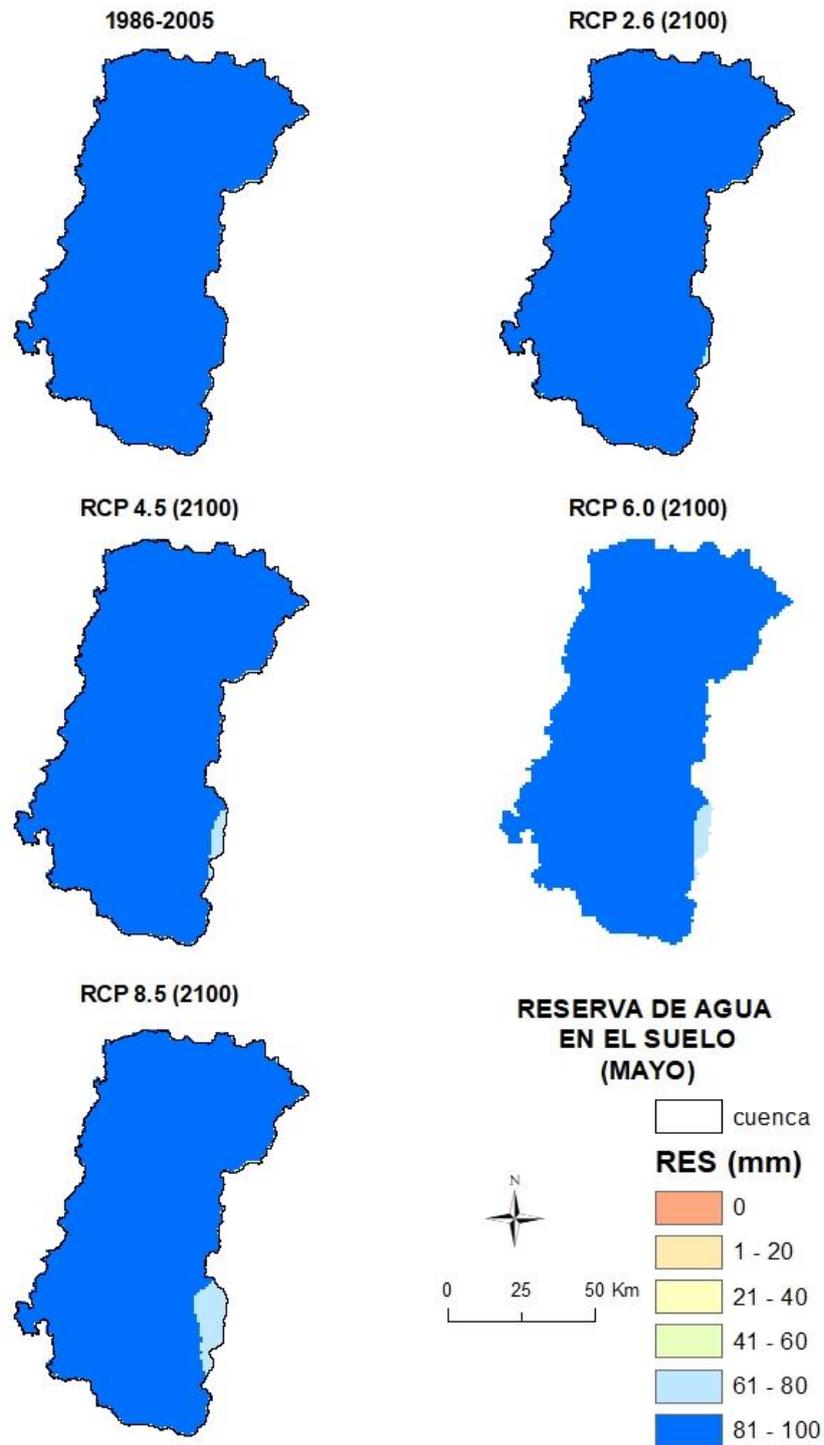


Figura 100. Reserva de agua en el suelo media mensual mayo.

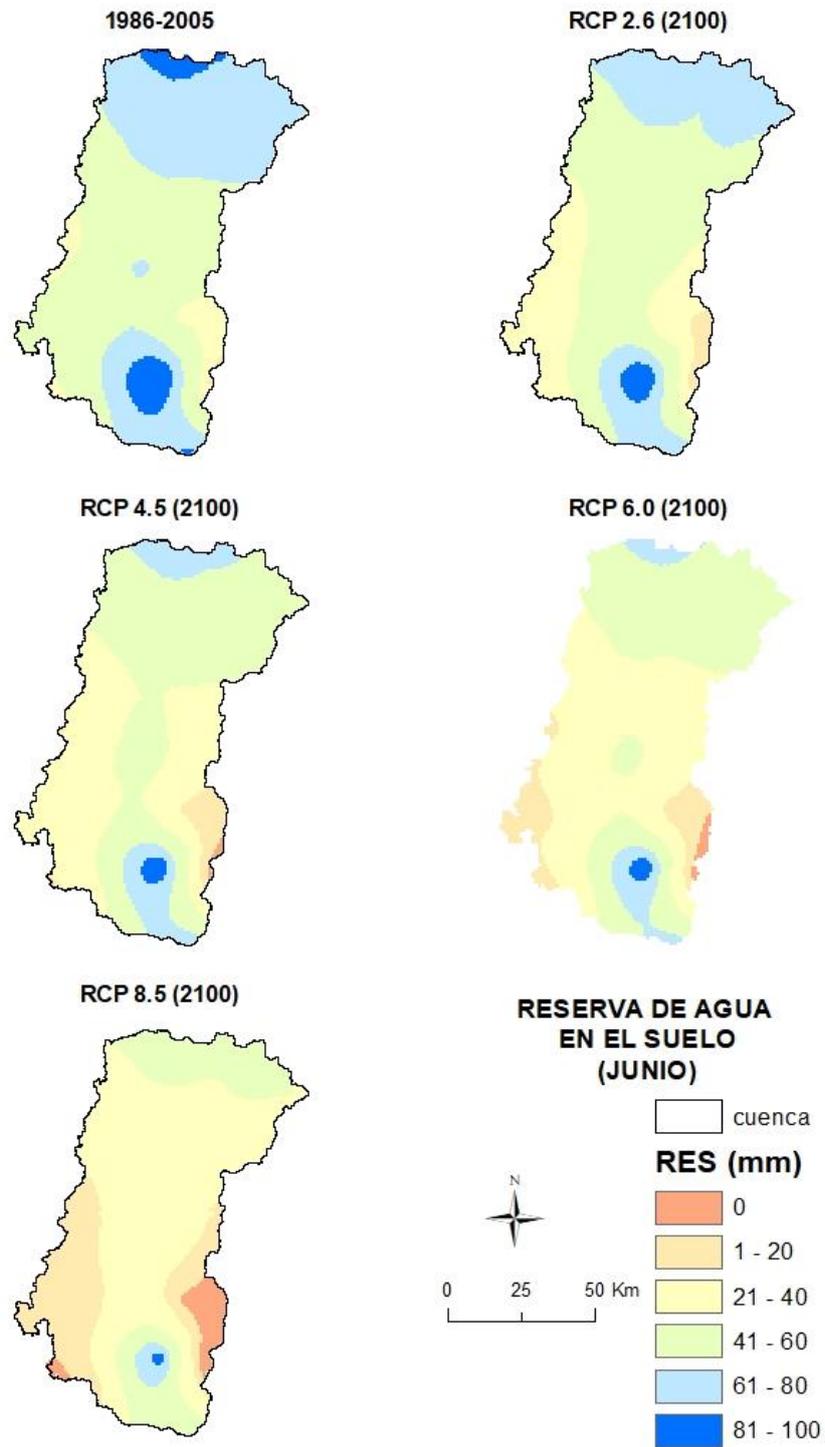


Figura 101. Reserva de agua en el suelo media mensual junio

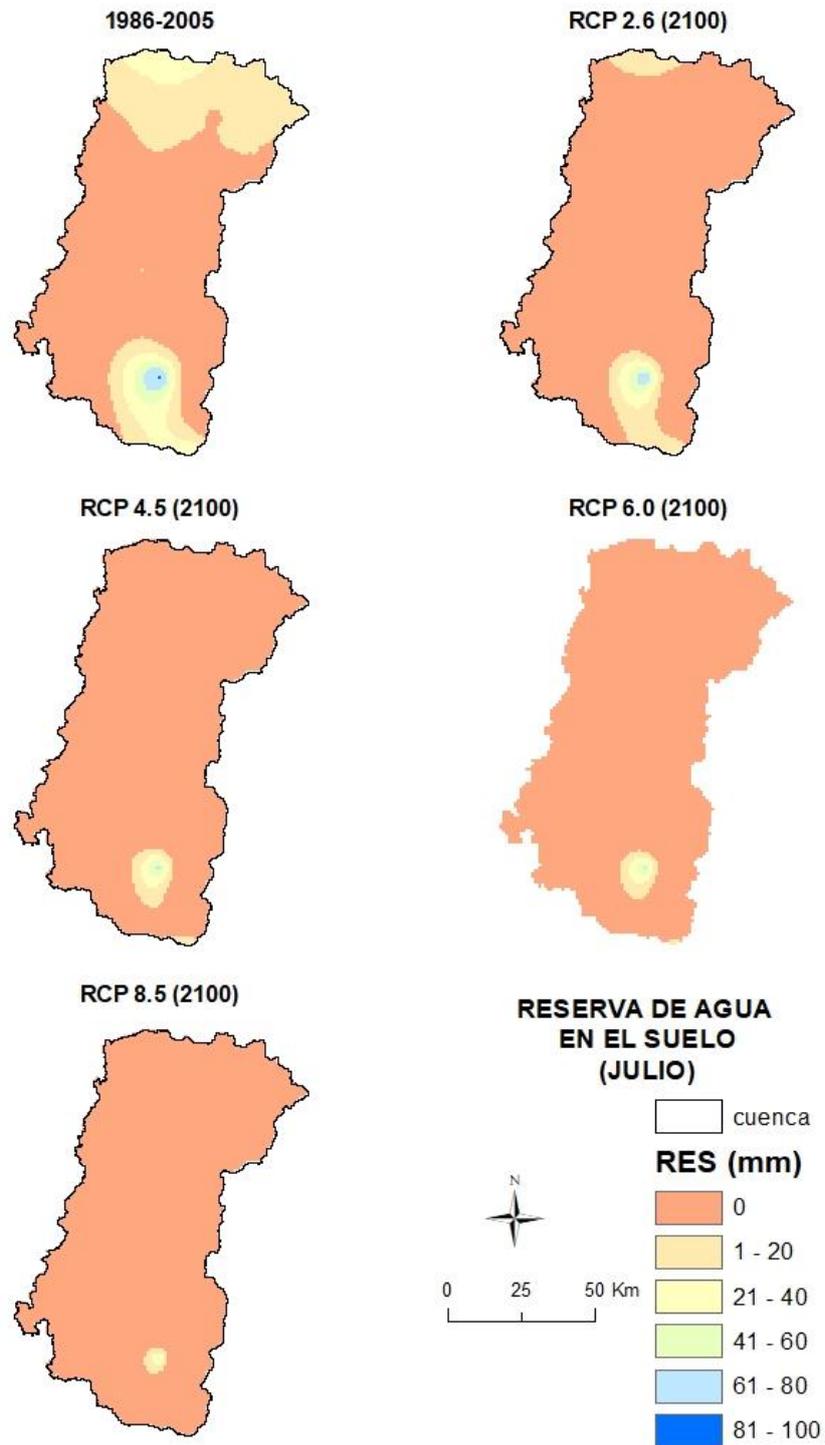


Figura 102. Reserva de agua en el suelo media mensual julio.

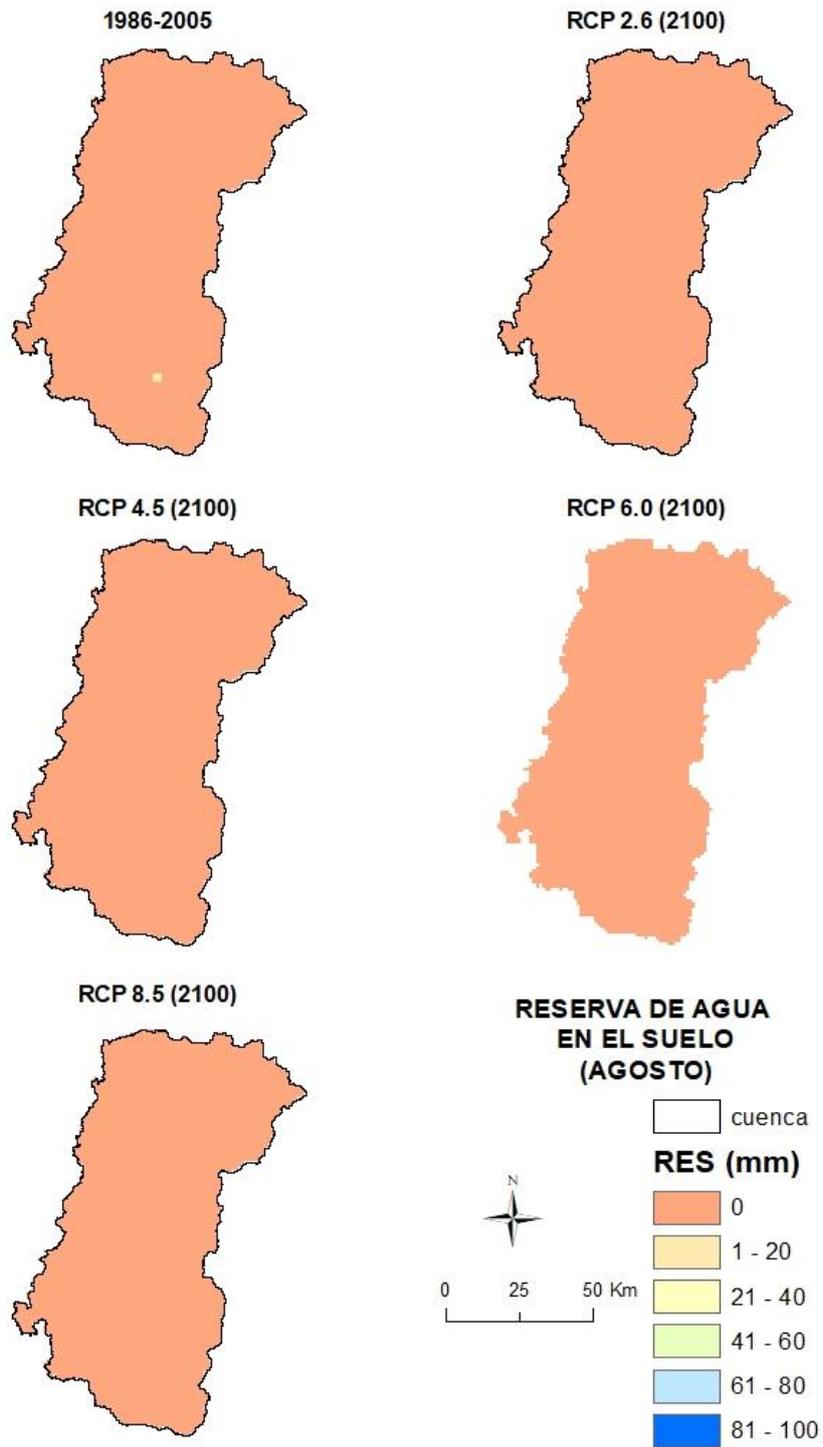


Figura 103. Reserva de agua en el suelo media mensual agosto

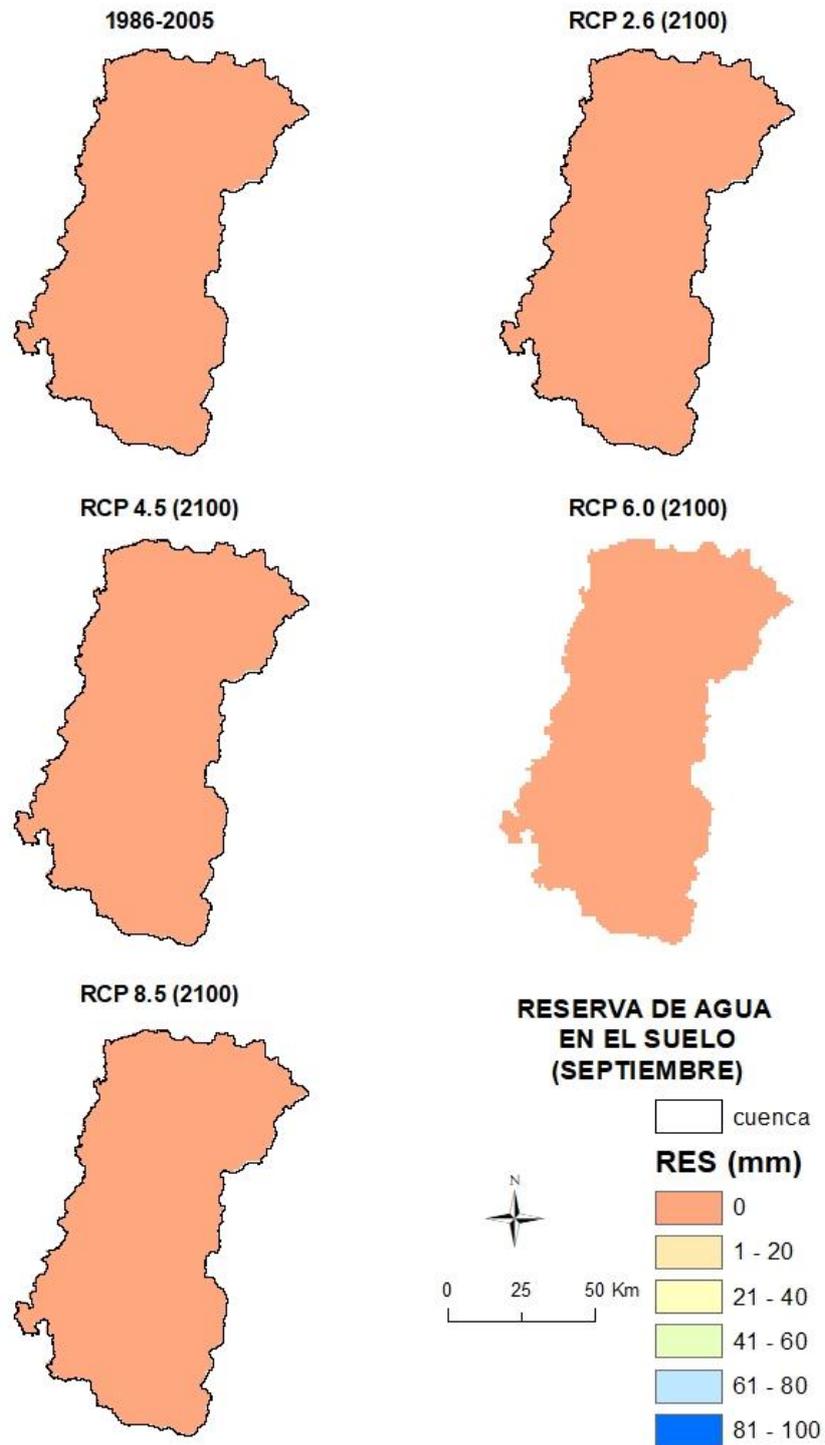


Figura 104. Reserva de agua en el suelo media mensual septiembre

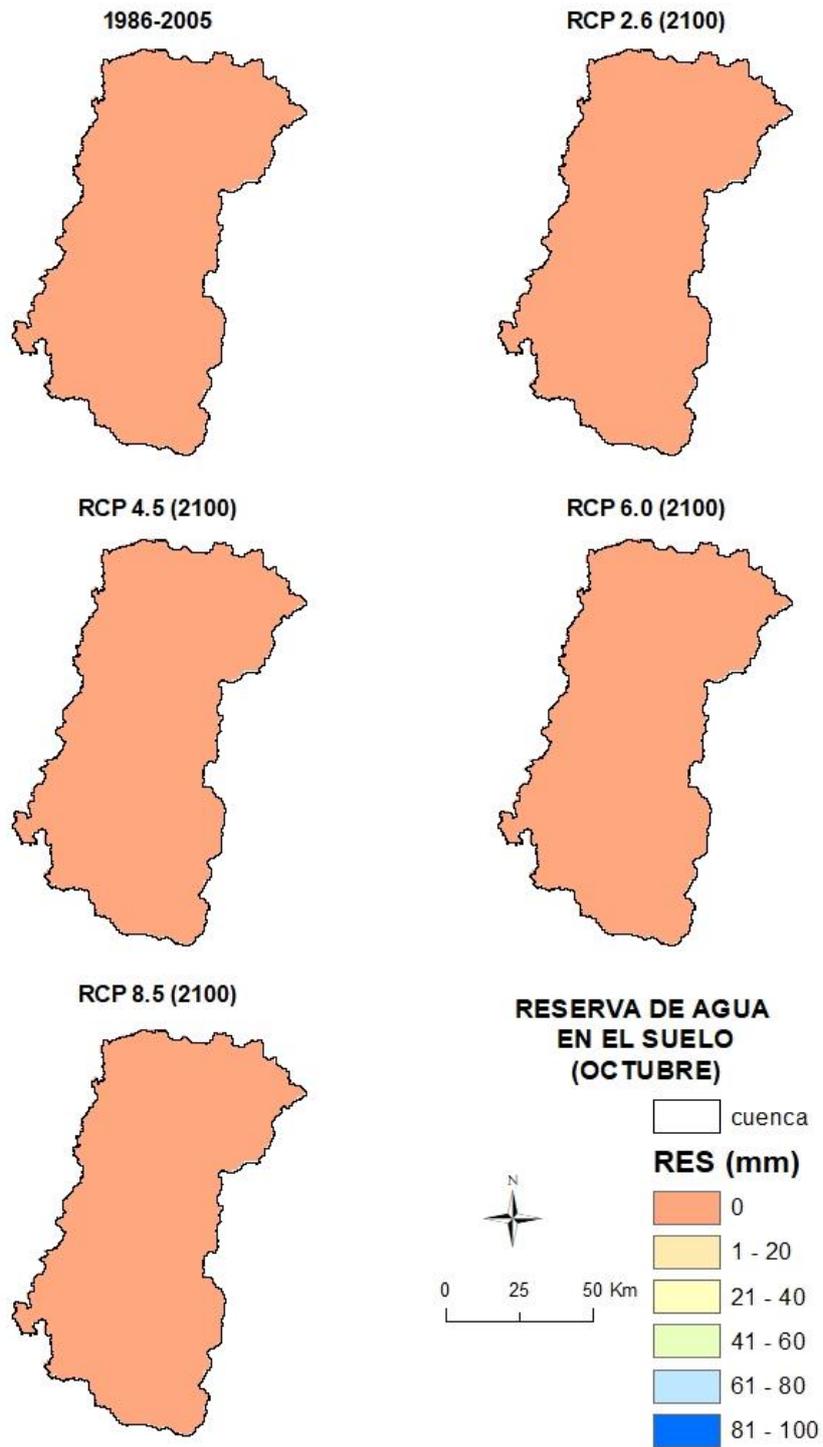


Figura 105. Reserva de agua en el suelo media mensual octubre.

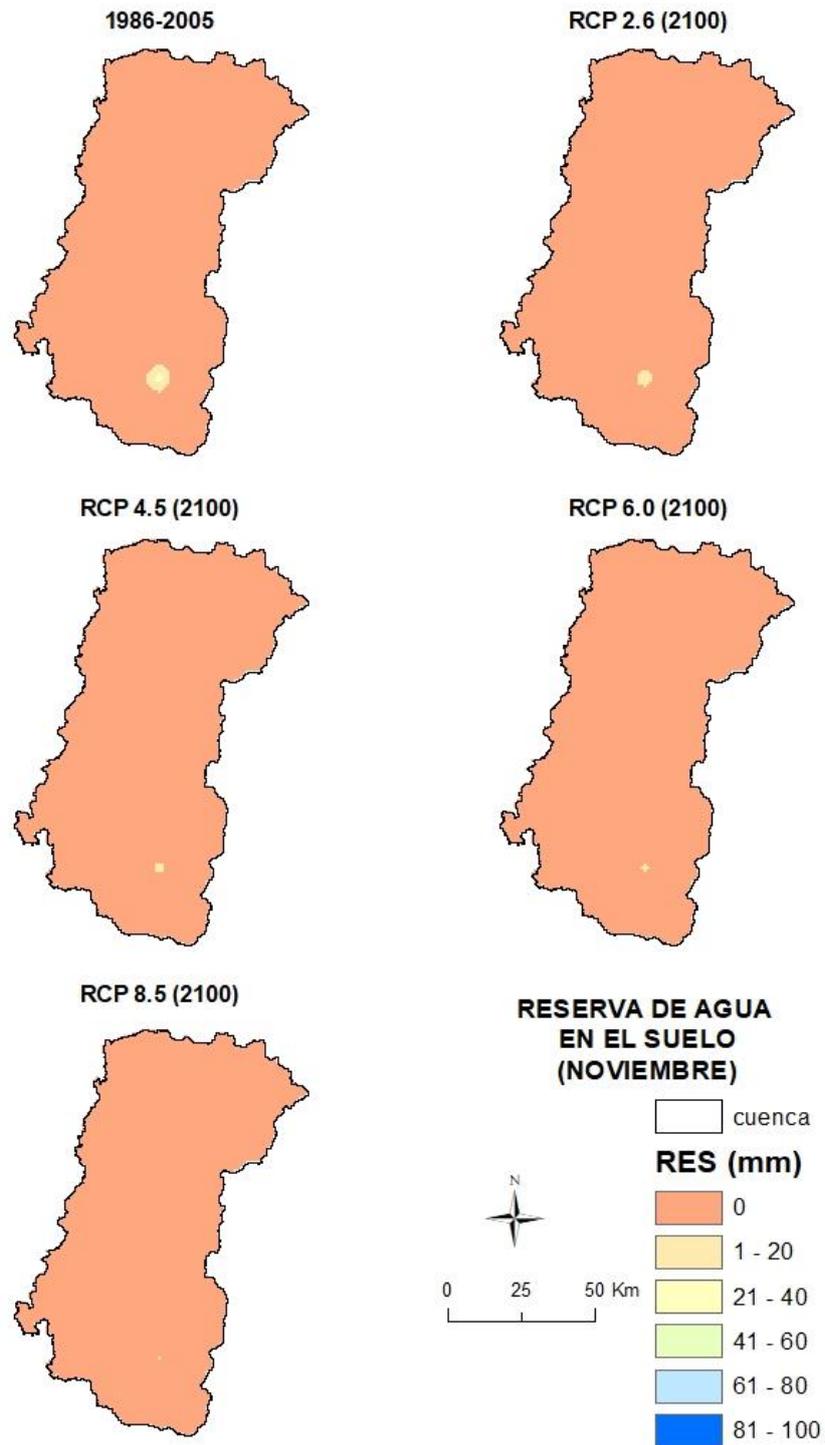


Figura 106. Reserva de agua en el suelo media mensual noviembre.

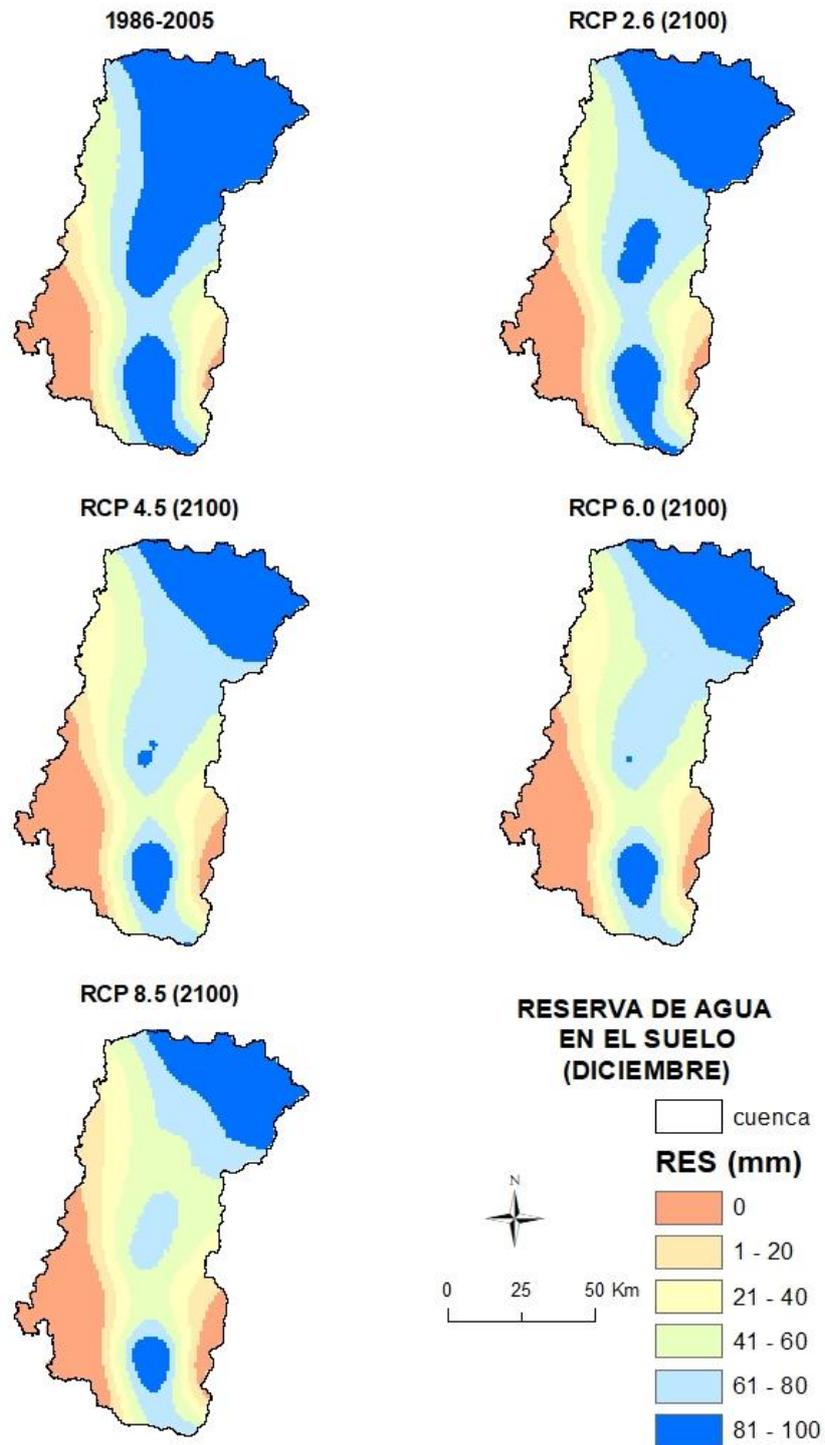


Figura 107. Reserva de agua en el suelo media mensual diciembre.

Anexo 4. Exceso de agua en el suelo mensual

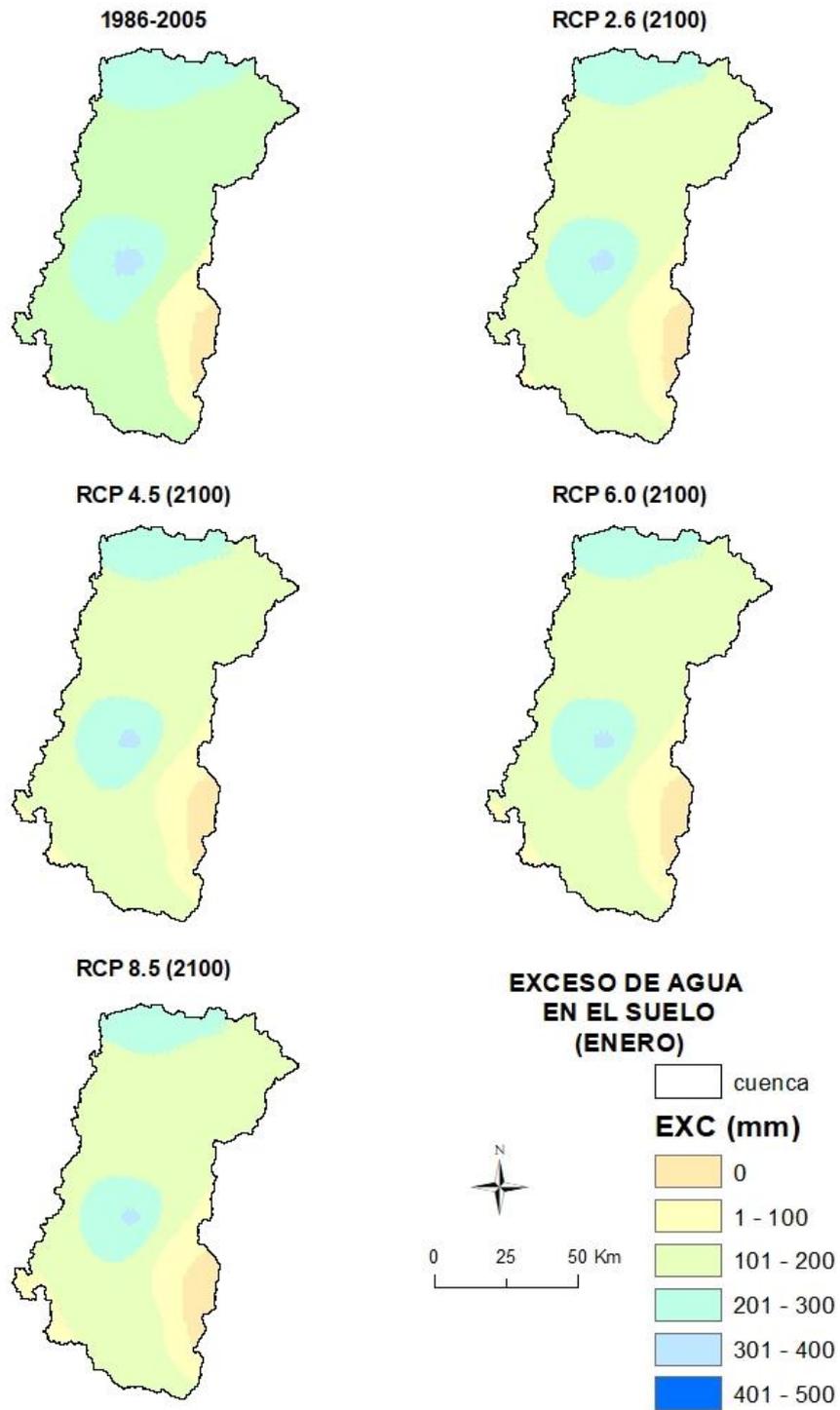


Figura 108. Exceso de agua media mensual enero.

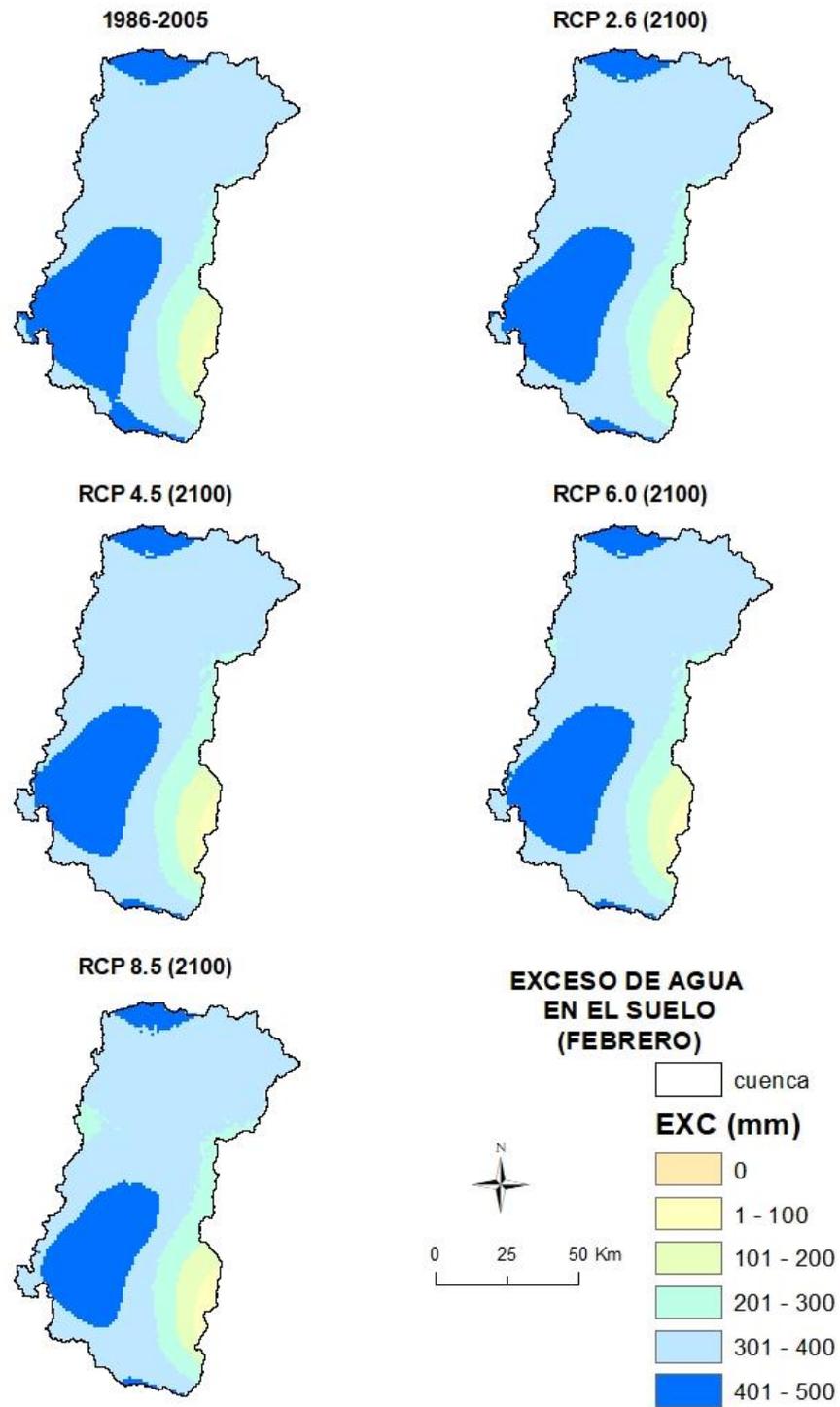


Figura 109. Exceso de agua media mensual febrero.

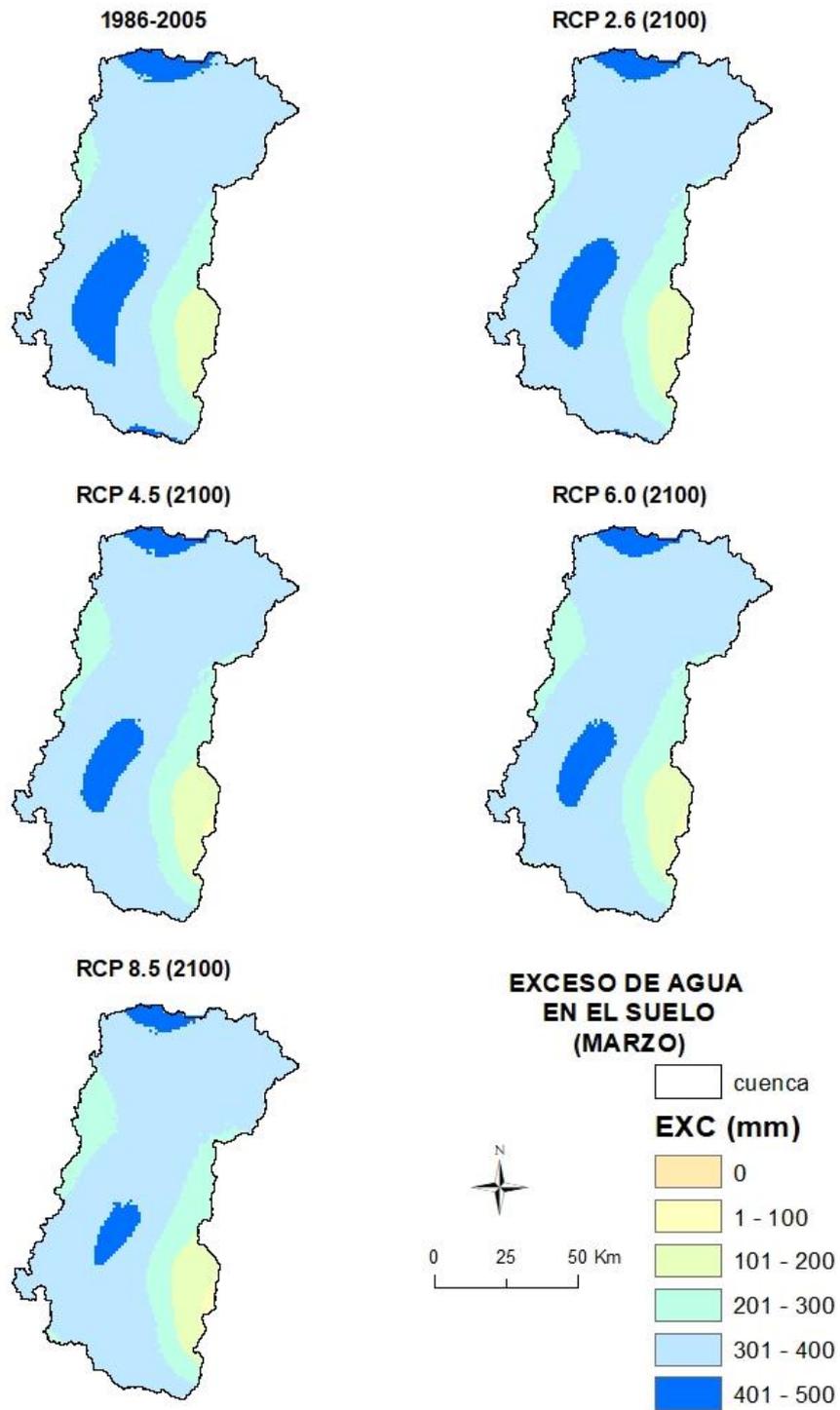


Figura 110. Exceso de agua media mensual marzo.

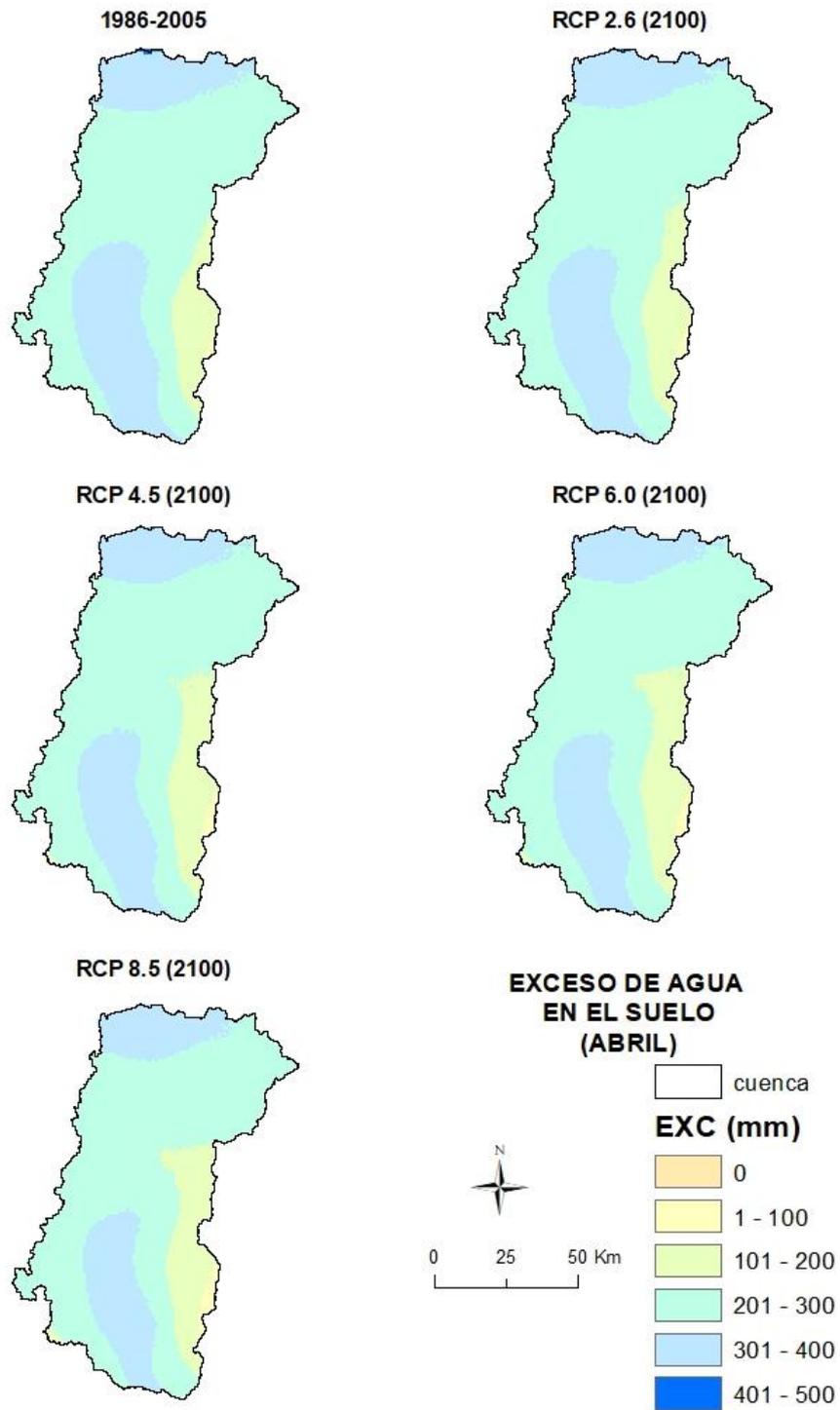


Figura 111. Exceso de agua media mensual abril.

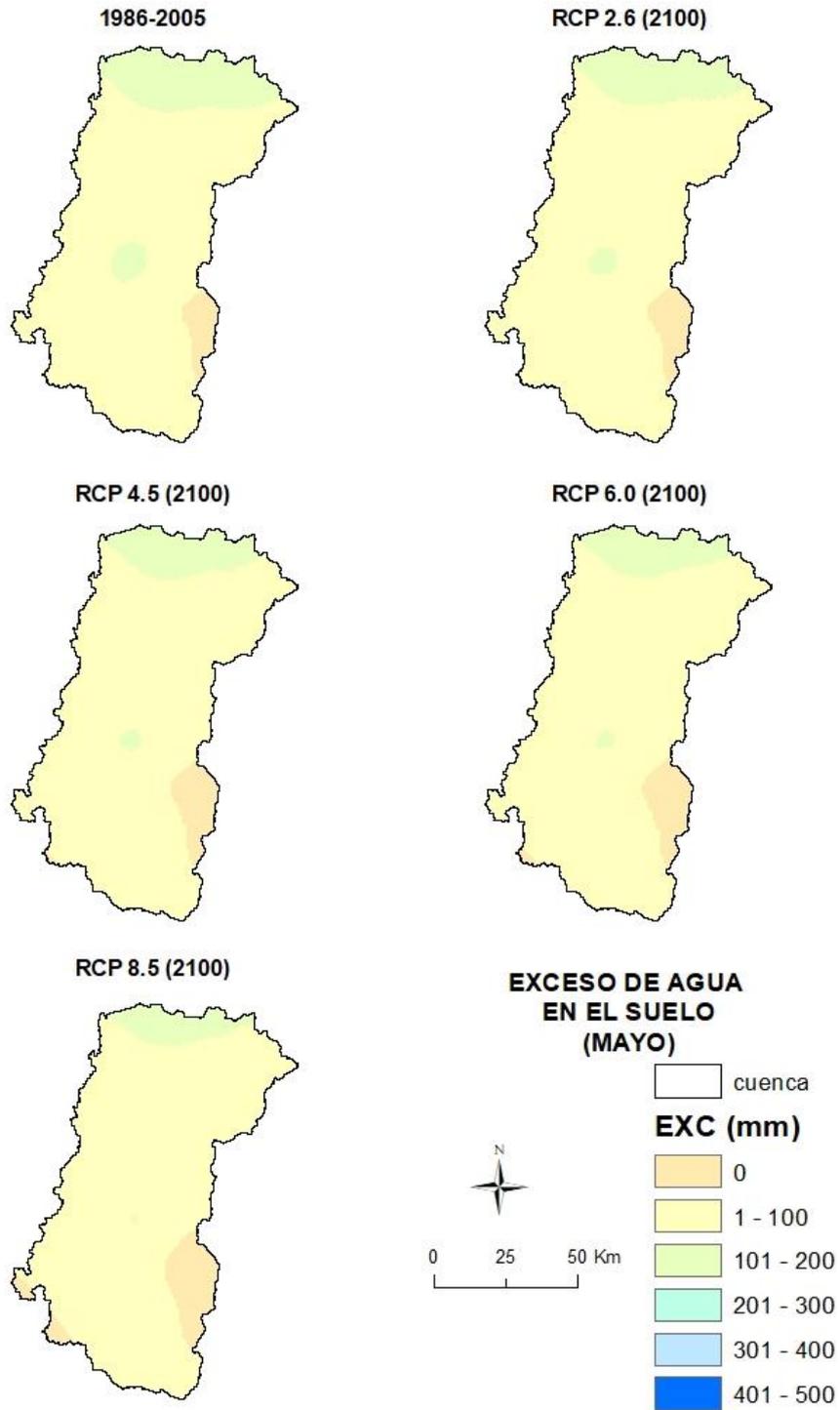


Figura 112. Exceso de agua media mensual mayo.

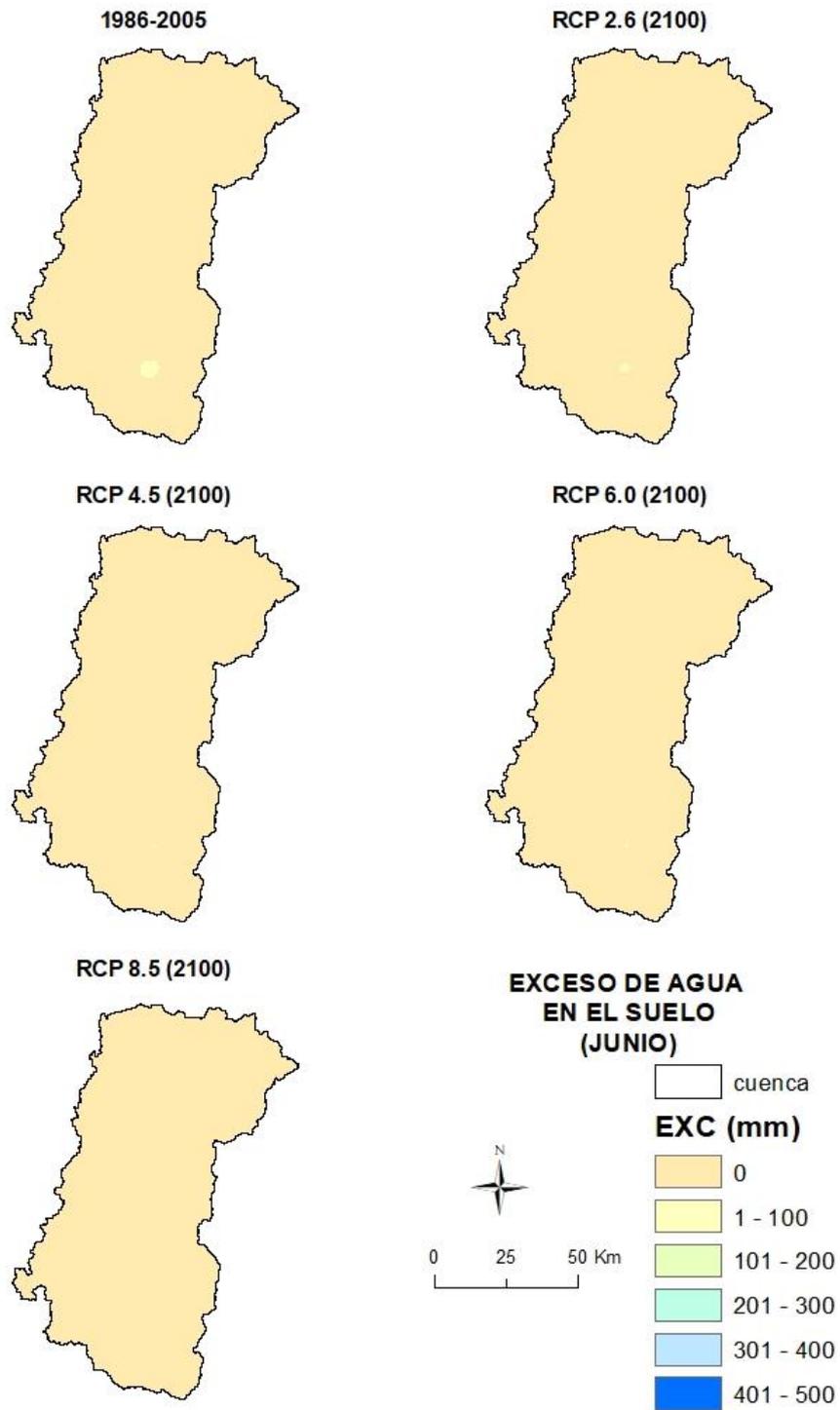


Figura 113. Exceso de agua media mensual junio.

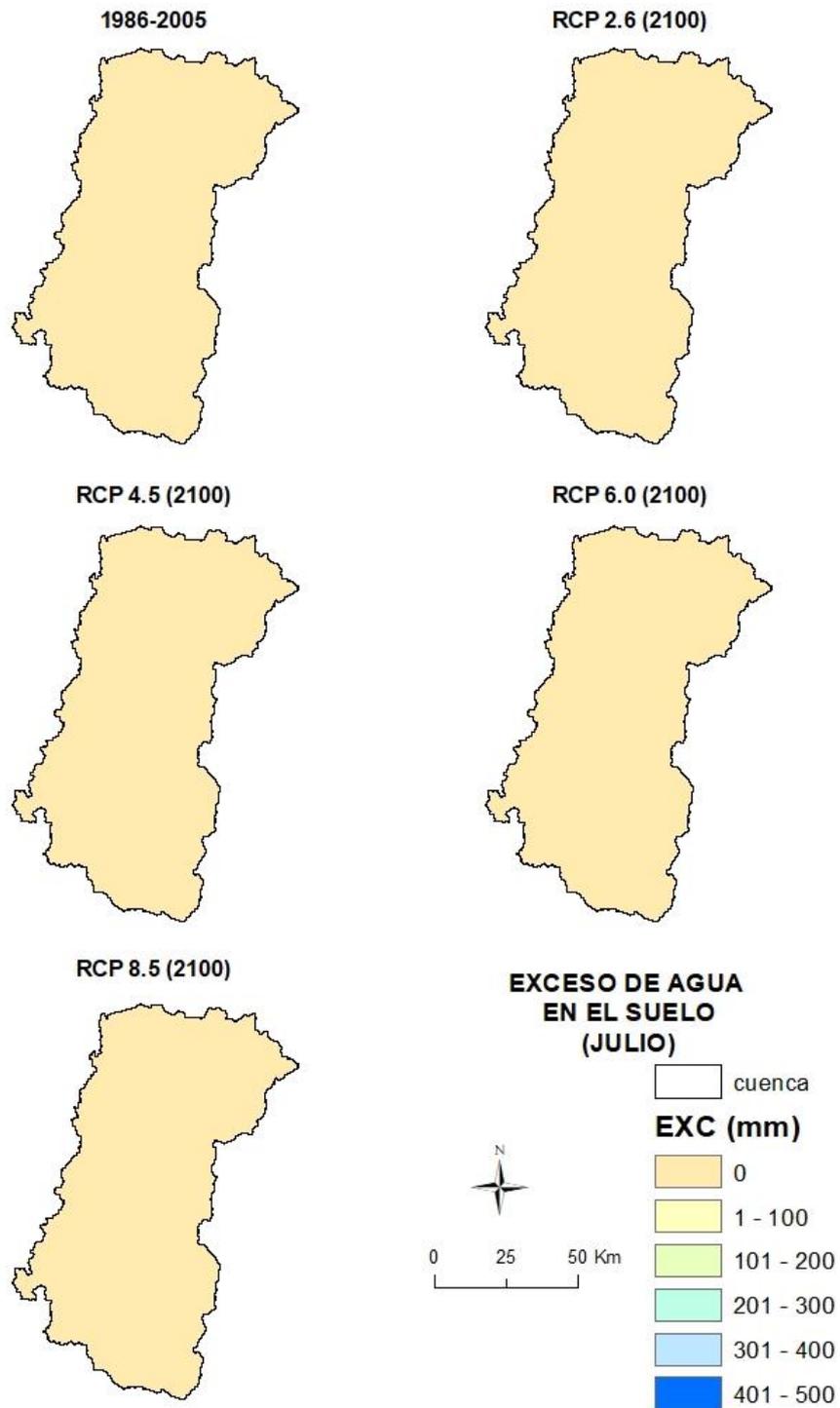


Figura 114. Exceso de agua media mensual julio.

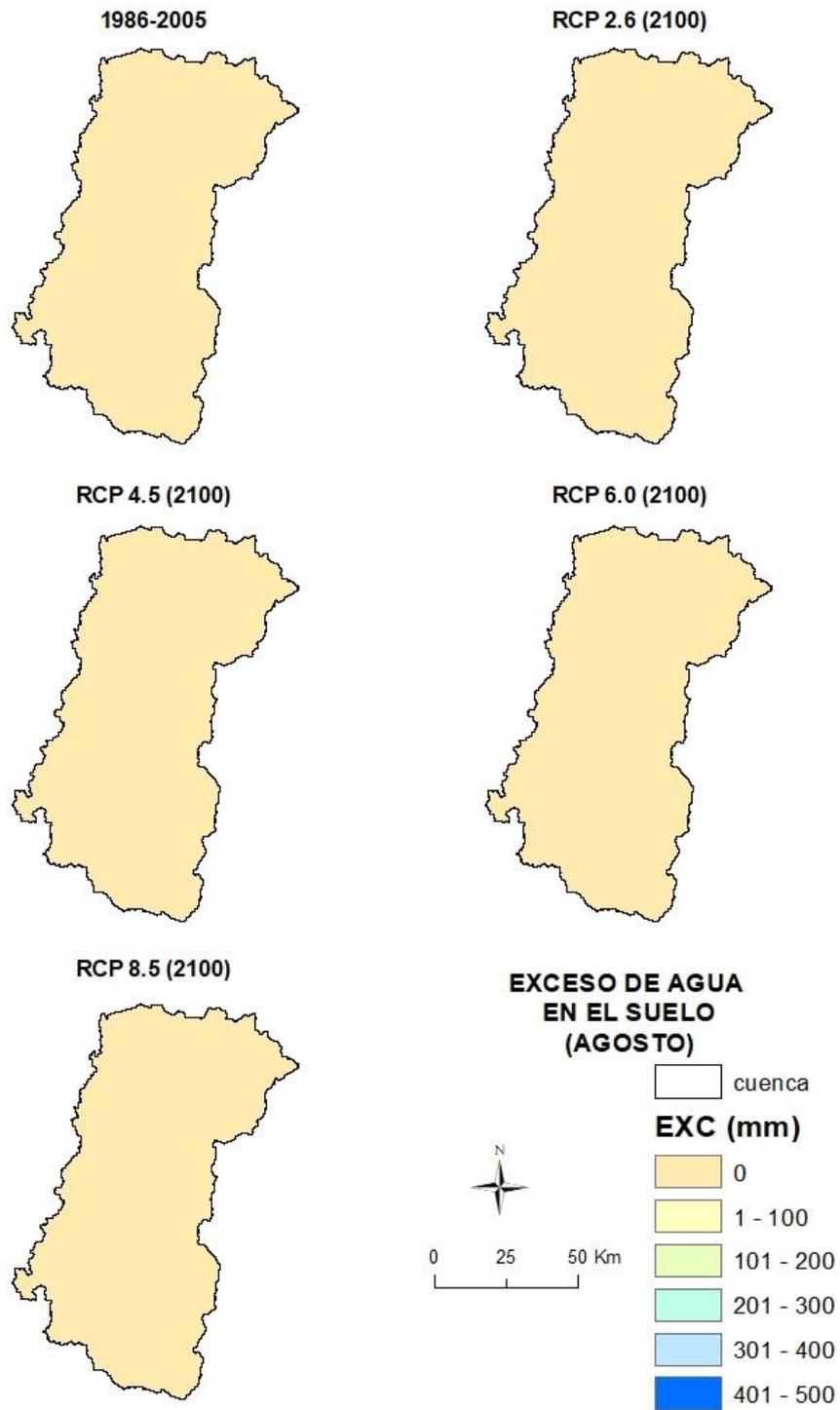


Figura 115. Exceso de agua media mensual agosto.

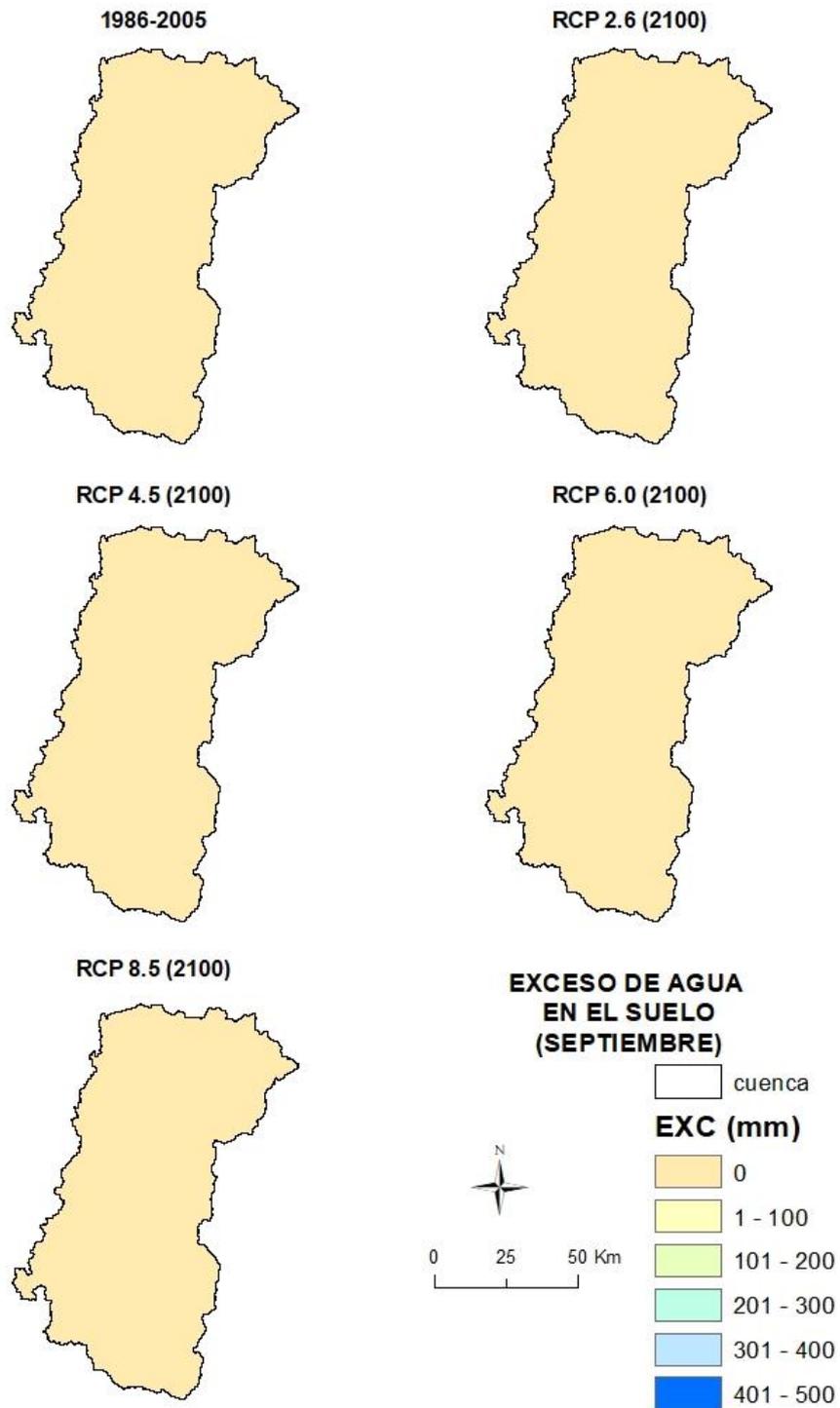


Figura 116. Exceso de agua media mensual septiembre.

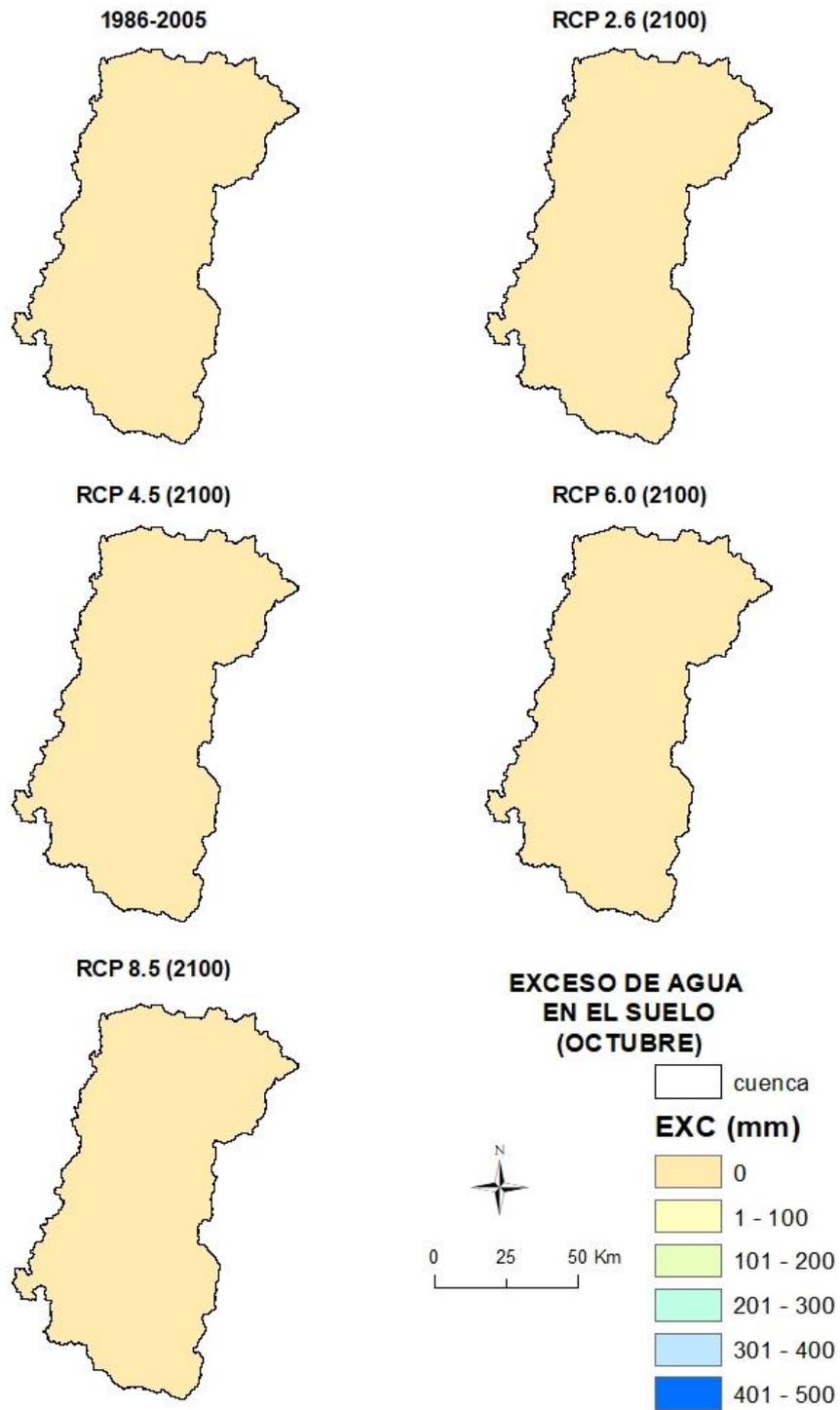


Figura 117. Exceso de agua media mensual octubre.

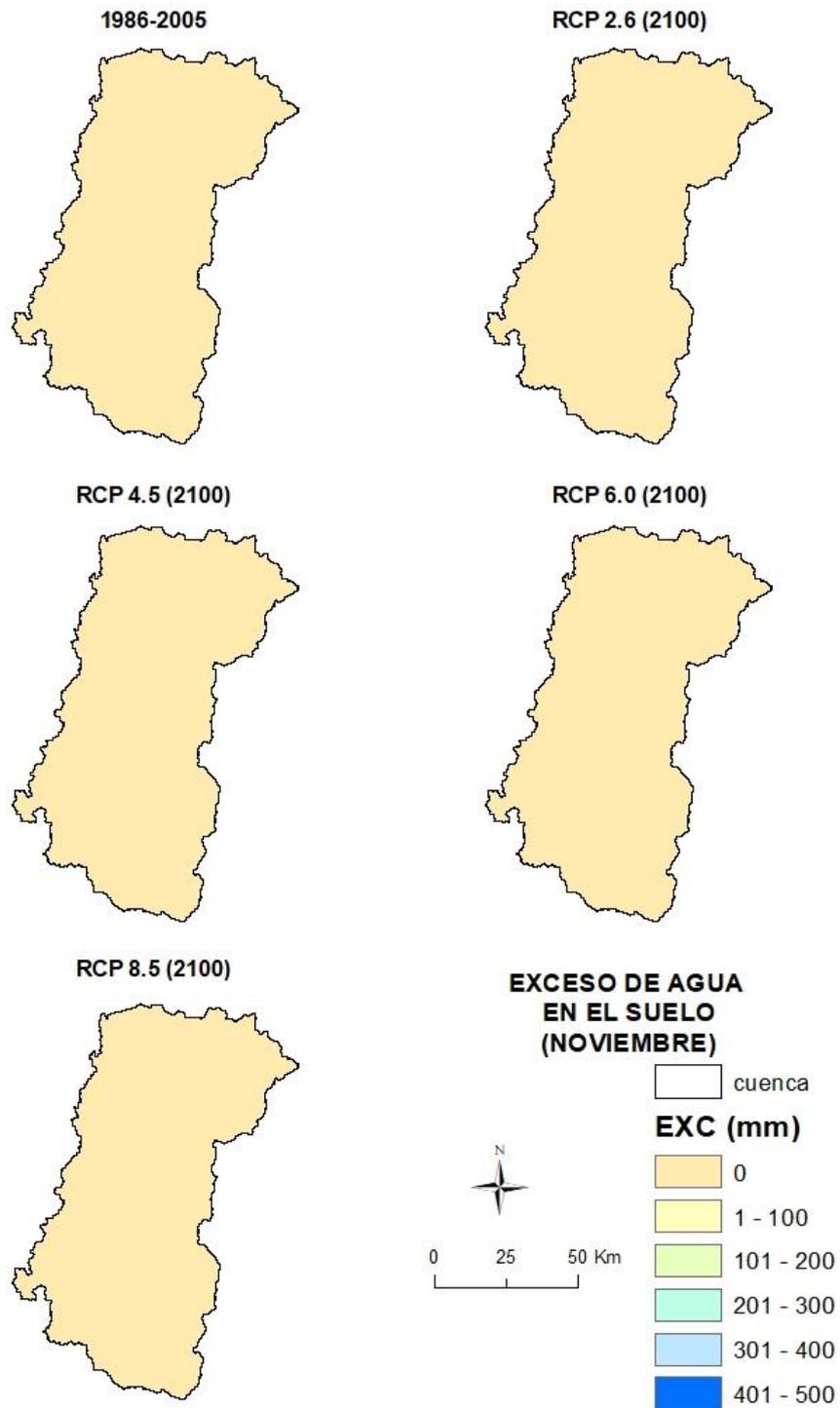


Figura 118. Exceso de agua media mensual noviembre.

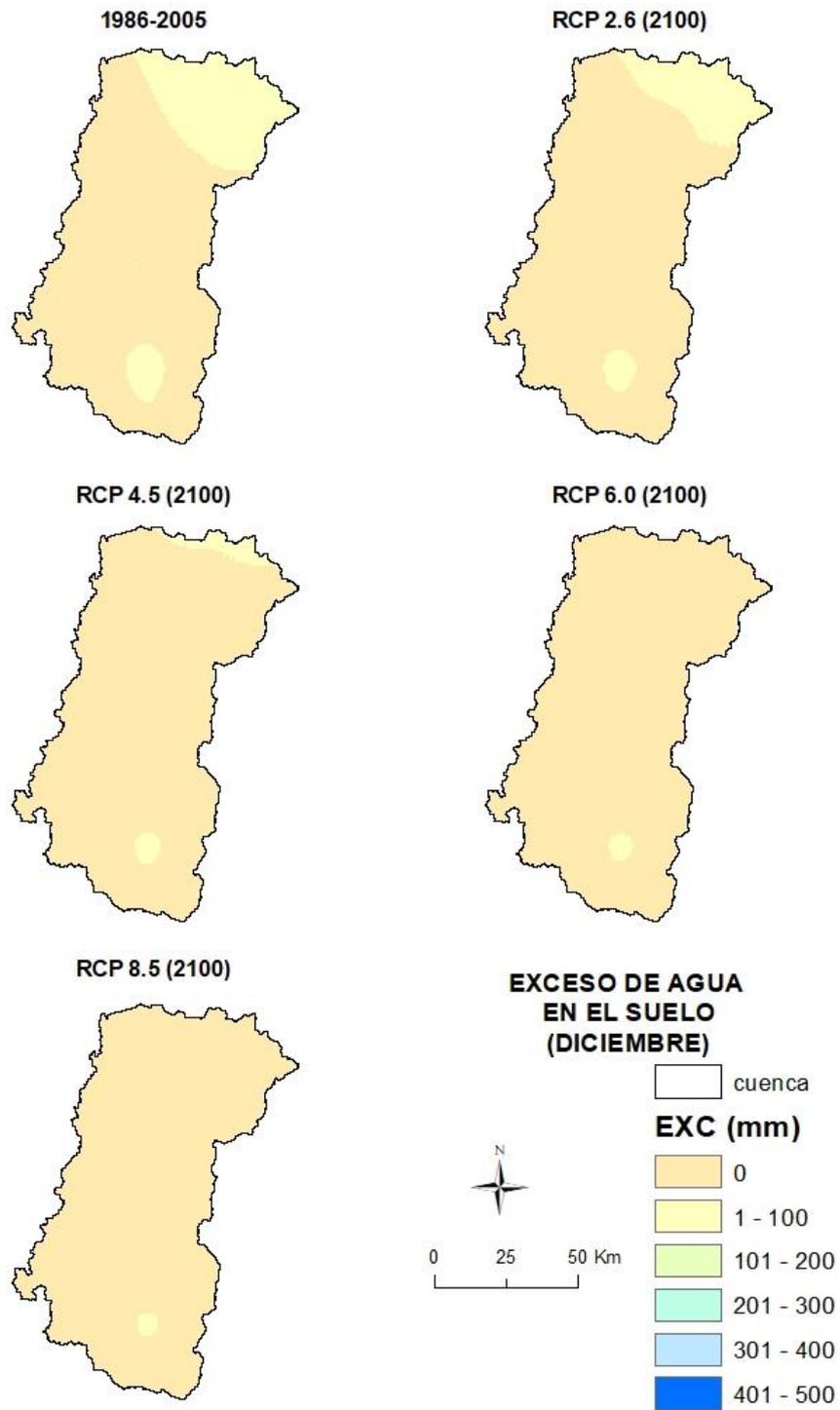


Figura 119. Exceso de agua media mensual diciembre.

Anexo 5. Déficit de agua en el suelo mensual

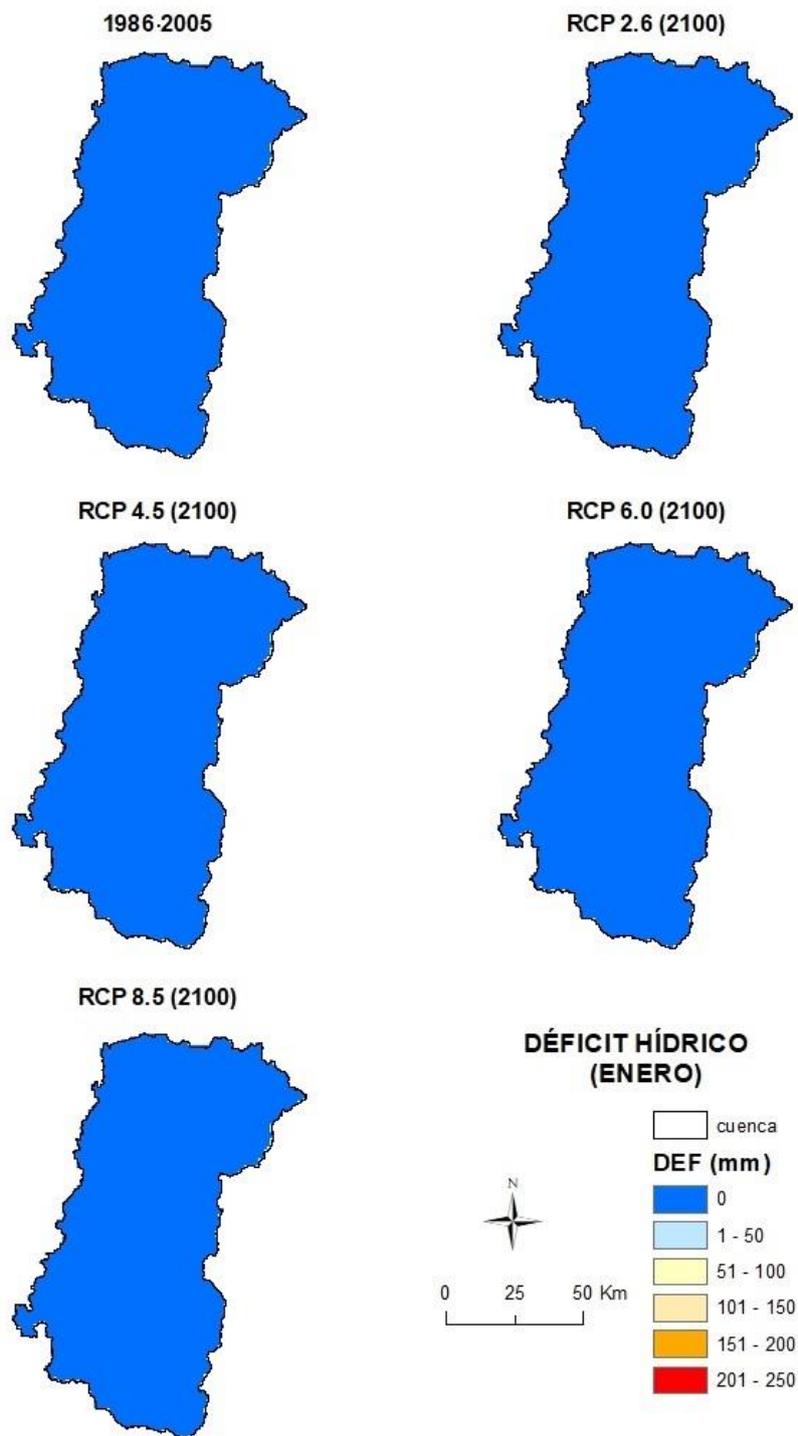


Figura 120. Déficit de agua media mensual enero.

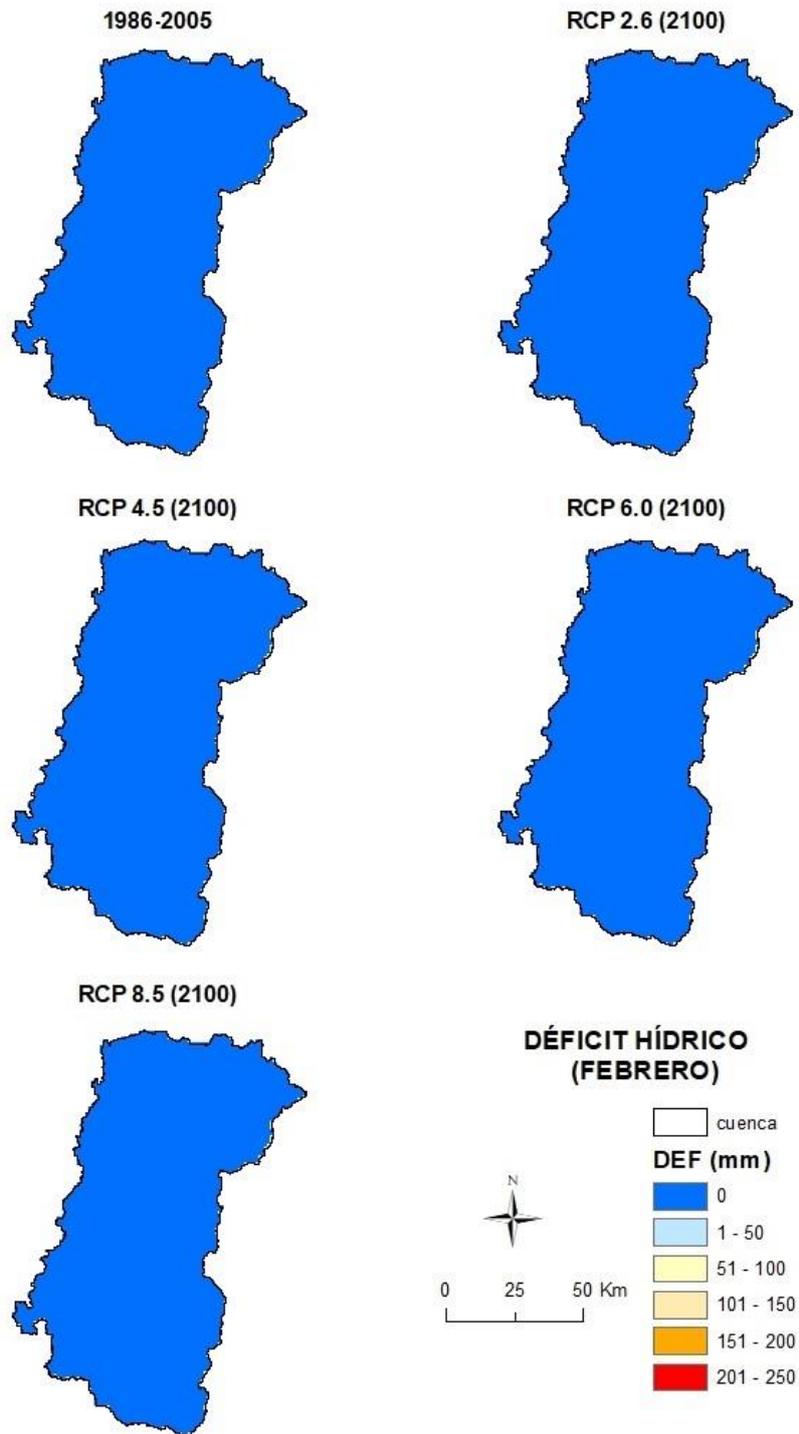


Figura 121. Déficit de agua media mensual febrero.

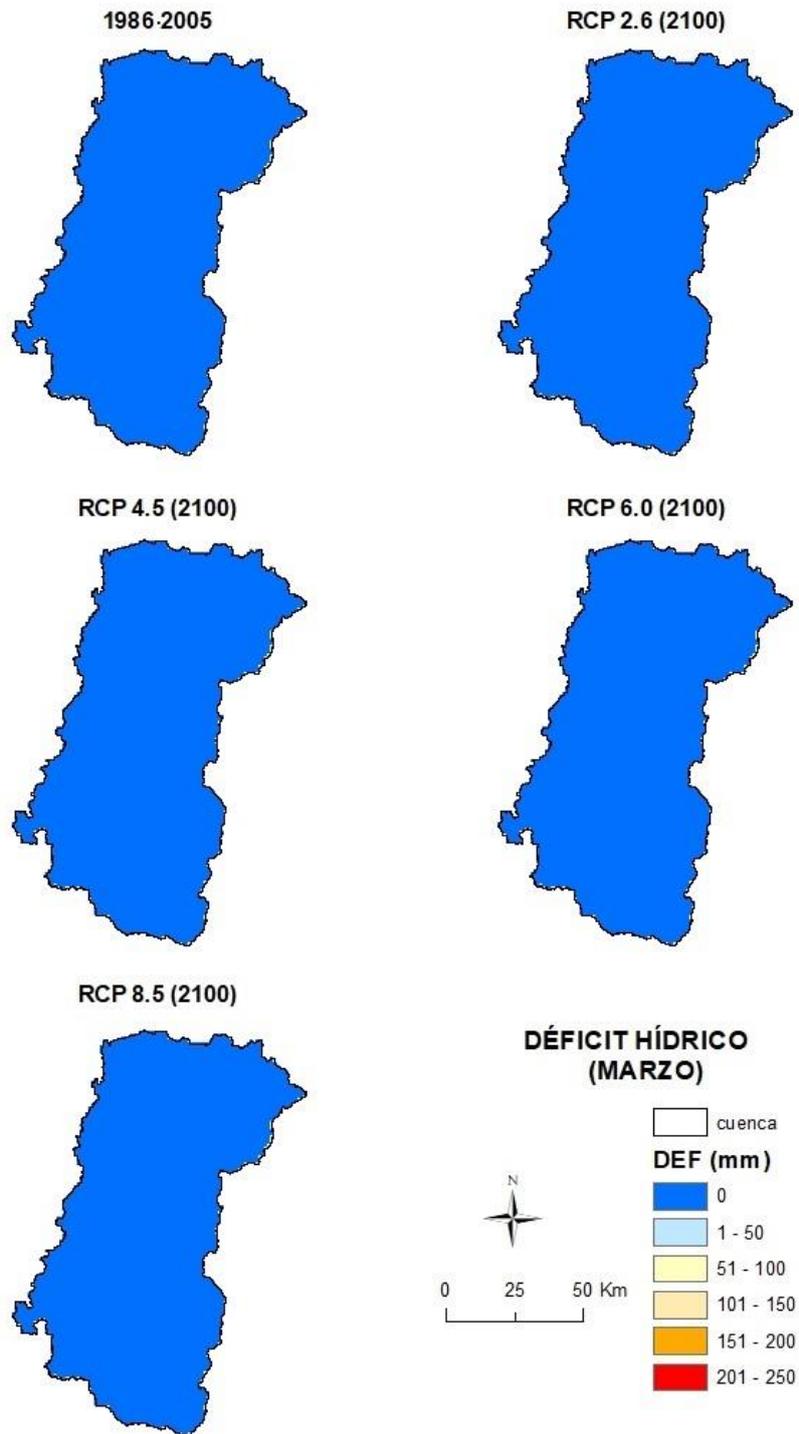


Figura 122. Déficit de agua media mensual marzo.

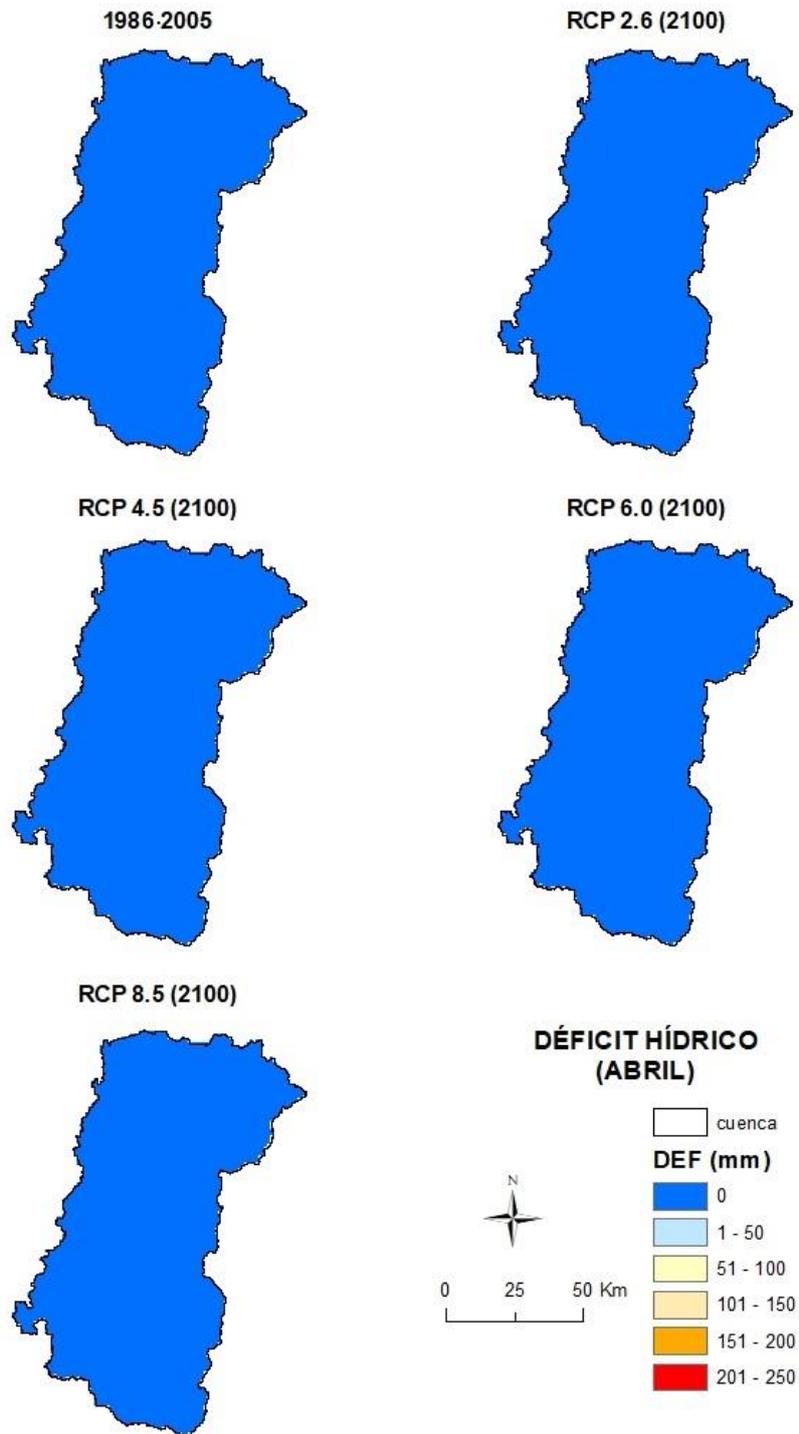


Figura 123. Déficit de agua media mensual abril.

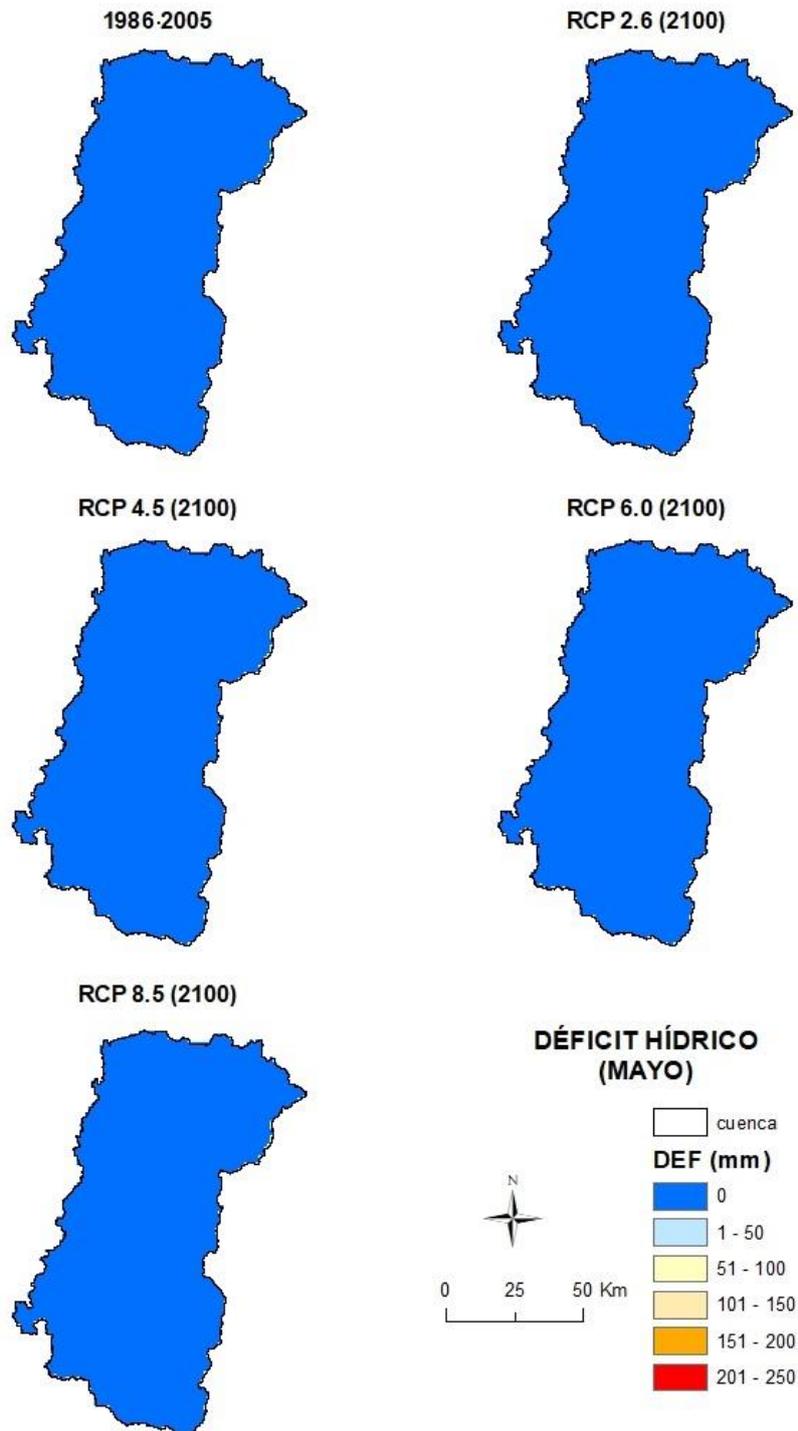


Figura 124. Déficit de agua media mensual mayo.

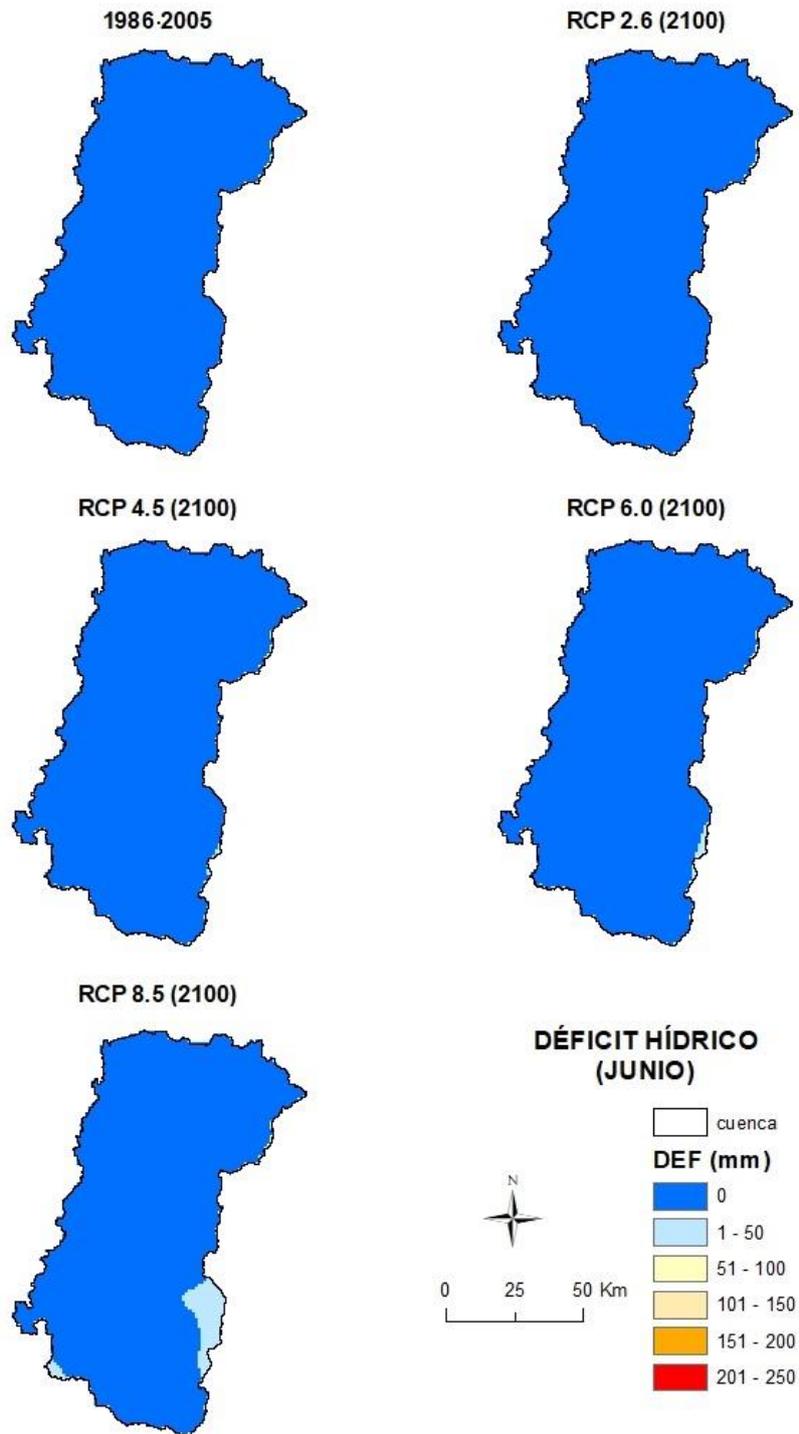


Figura 125. Déficit de agua media mensual junio.

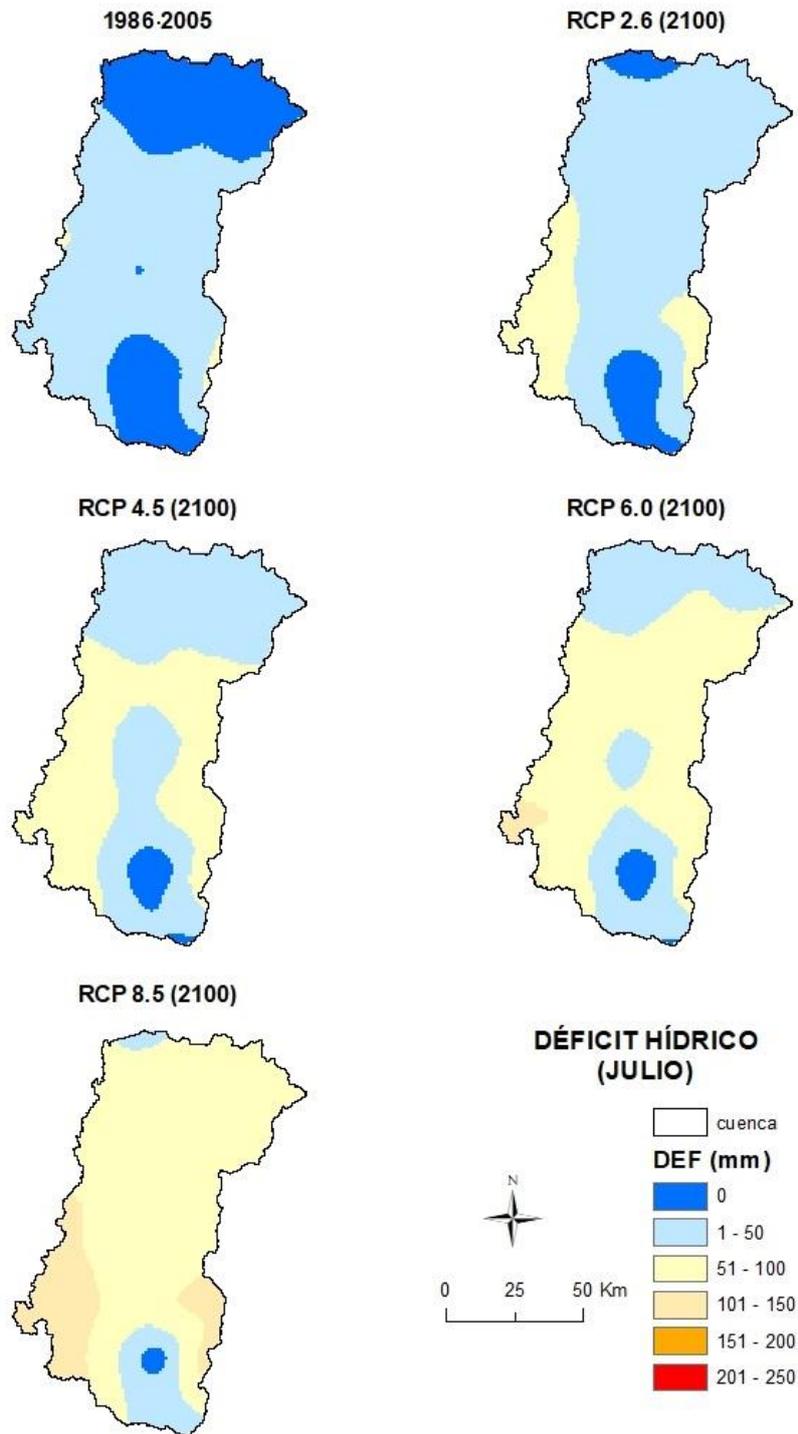


Figura 126. Déficit de agua media mensual julio.

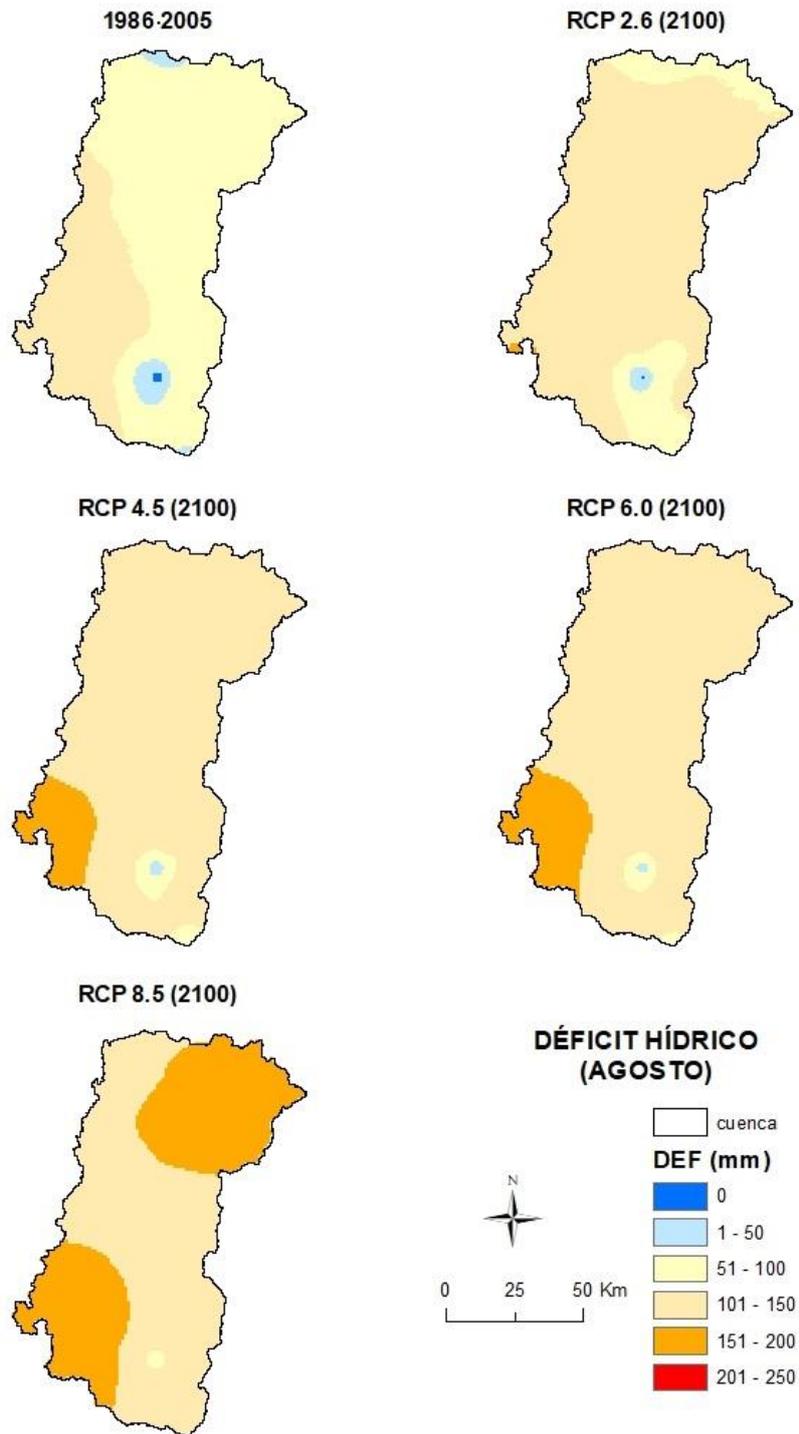


Figura 127. Déficit de agua media mensual agosto.

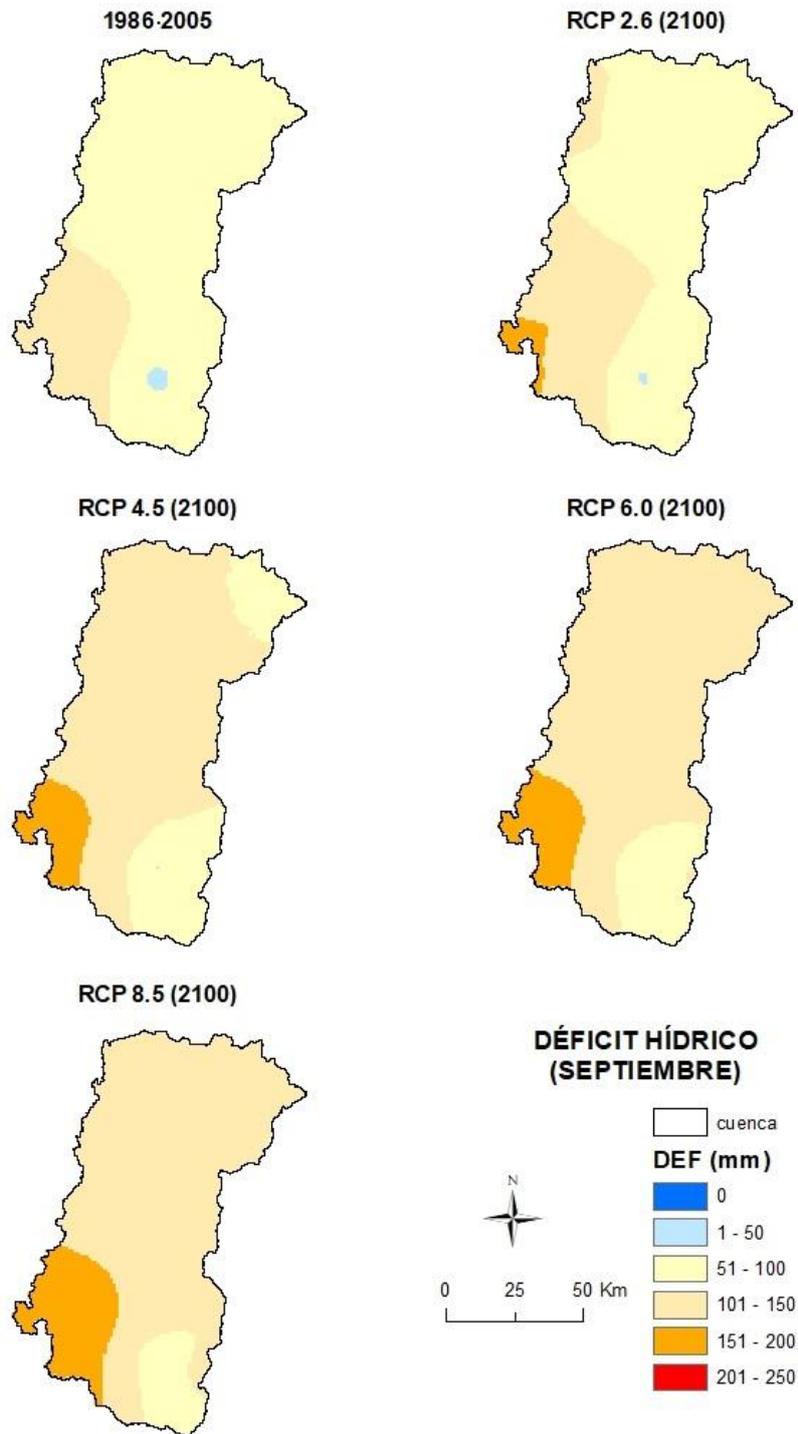


Figura 128. Déficit de agua media mensual septiembre.

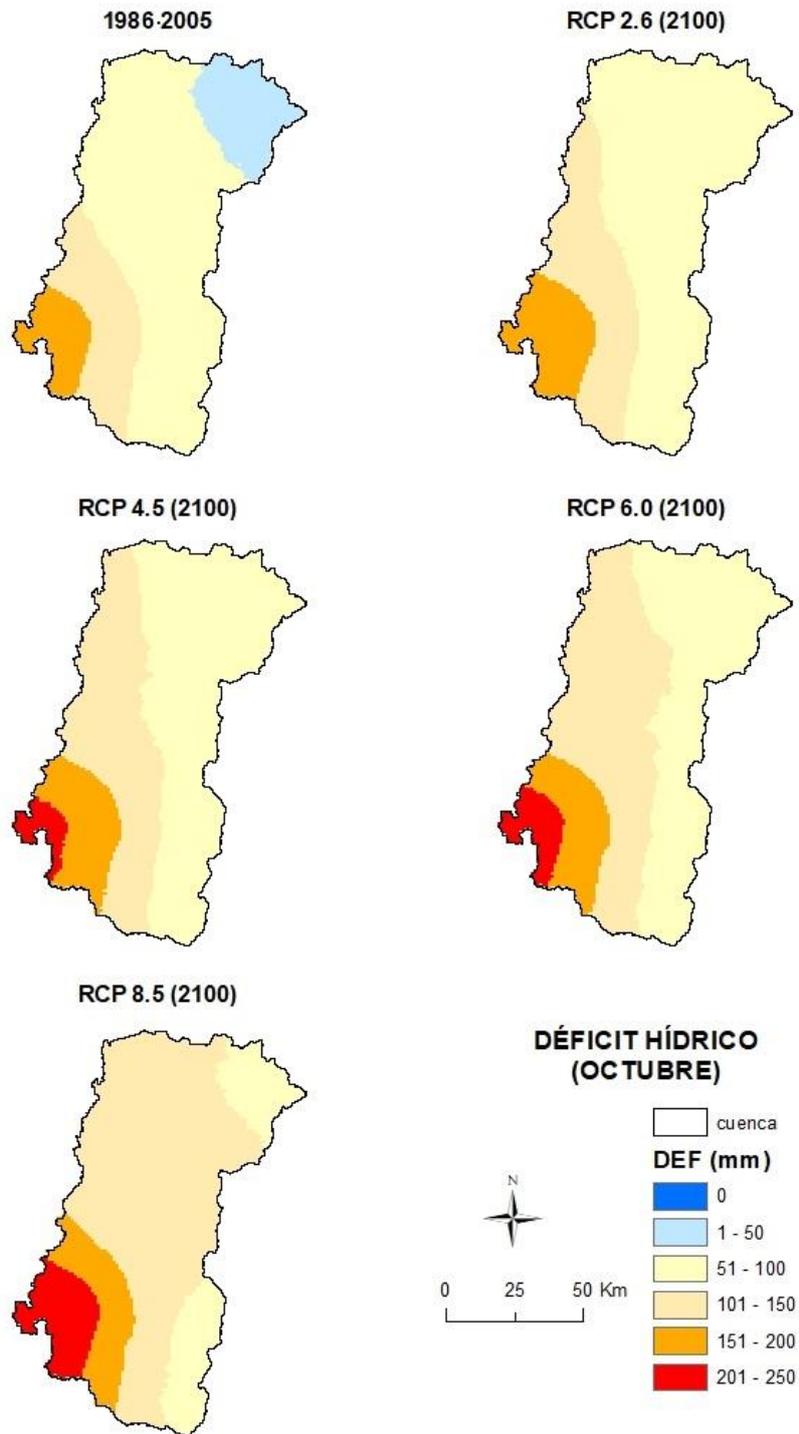


Figura 129. Déficit de agua media mensual octubre.

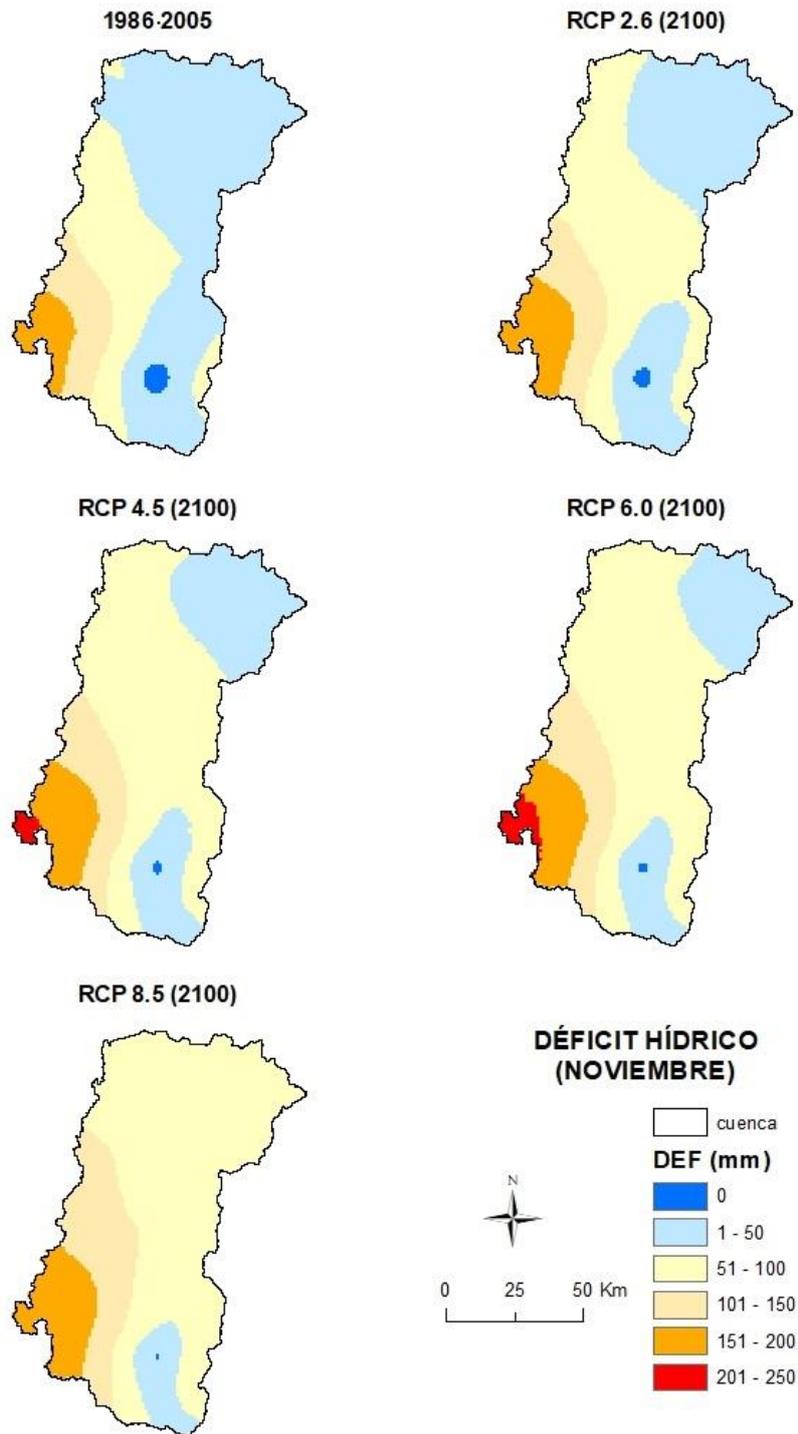


Figura 130. Déficit de agua media mensual noviembre.

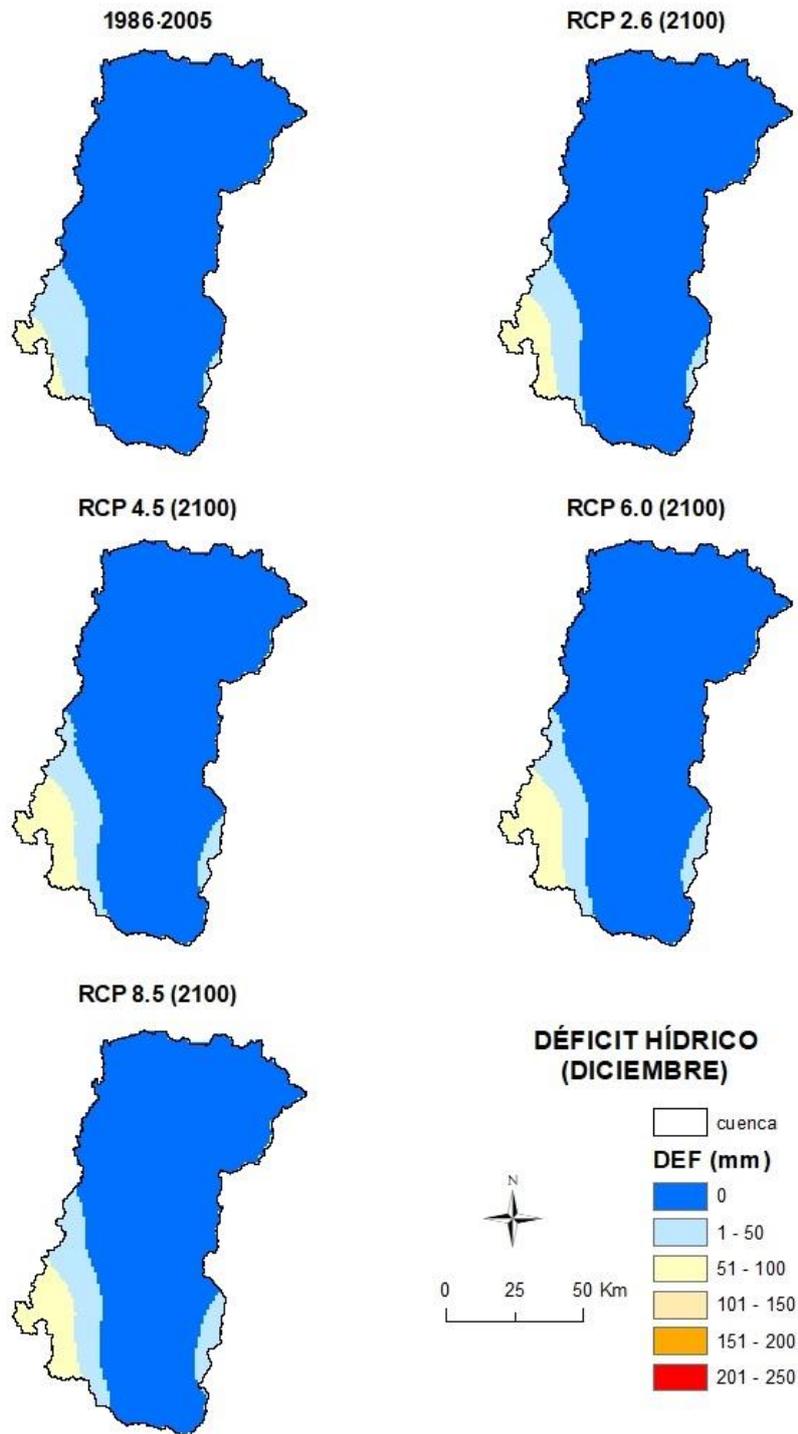


Figura 131. Déficit de agua media mensual diciembre.

Anexo 6. Escorrentía mensual

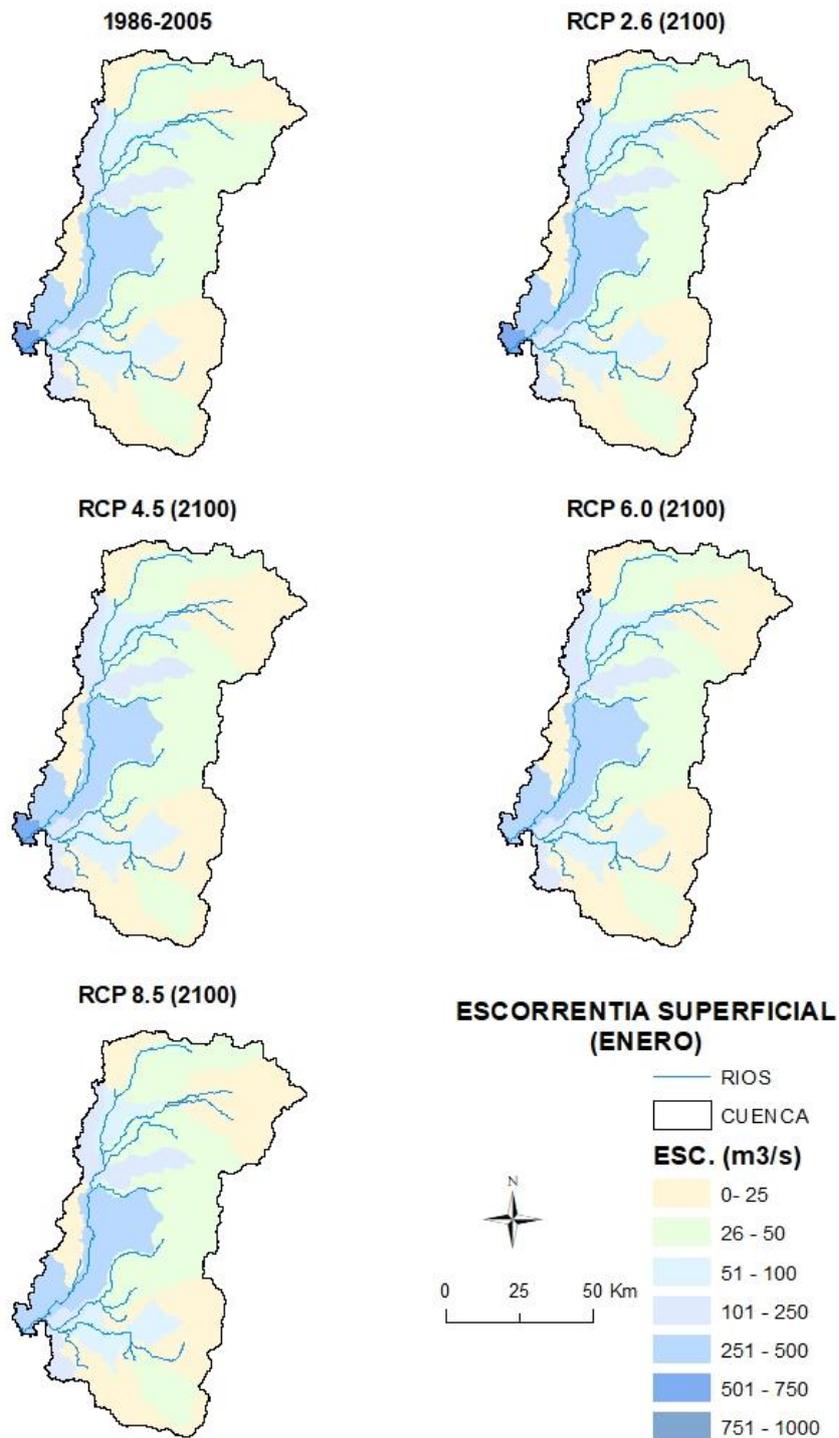


Figura 132. Escorrentía media mensual enero.

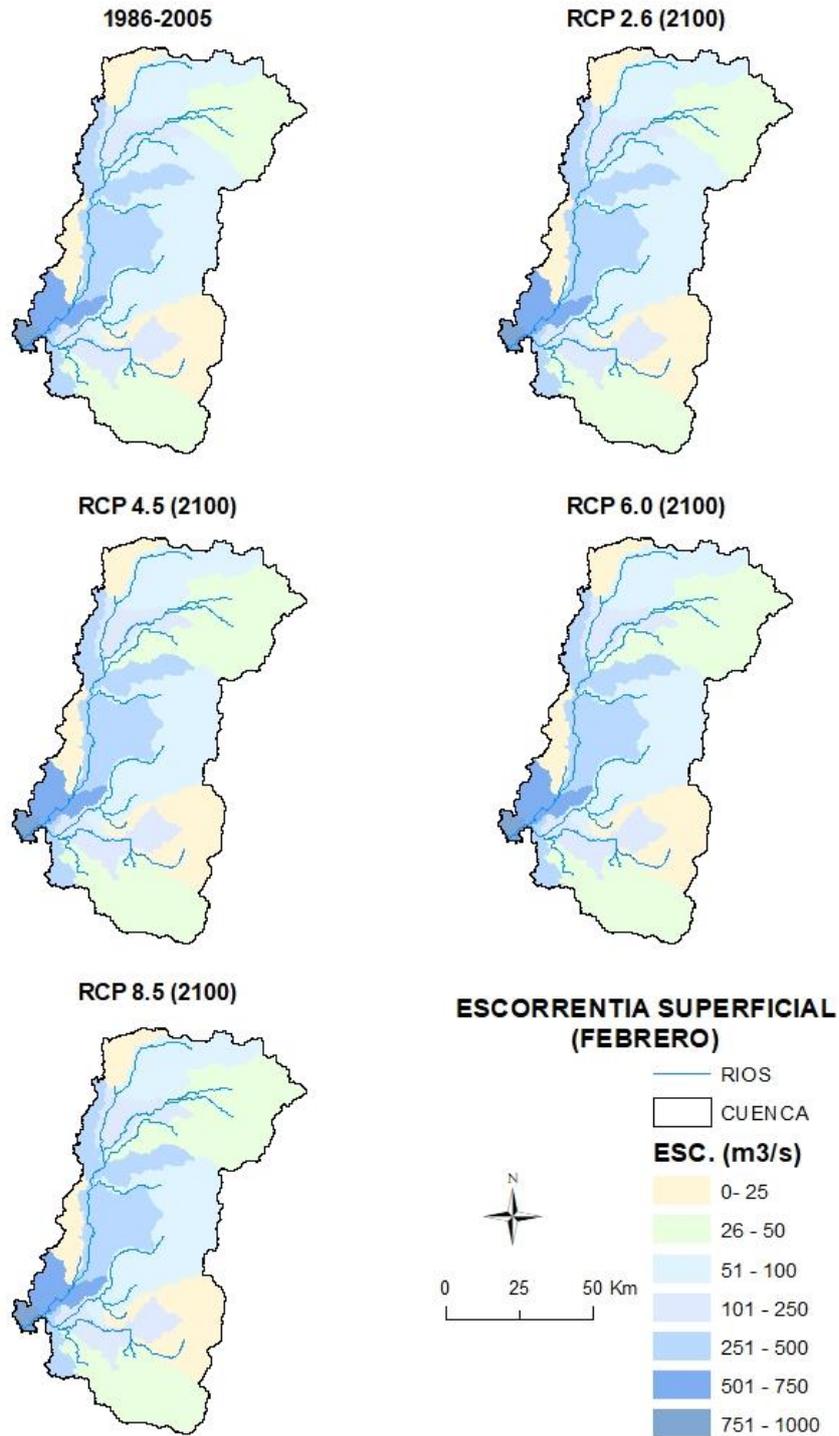


Figura 133. Escorrentía media mensual febrero.

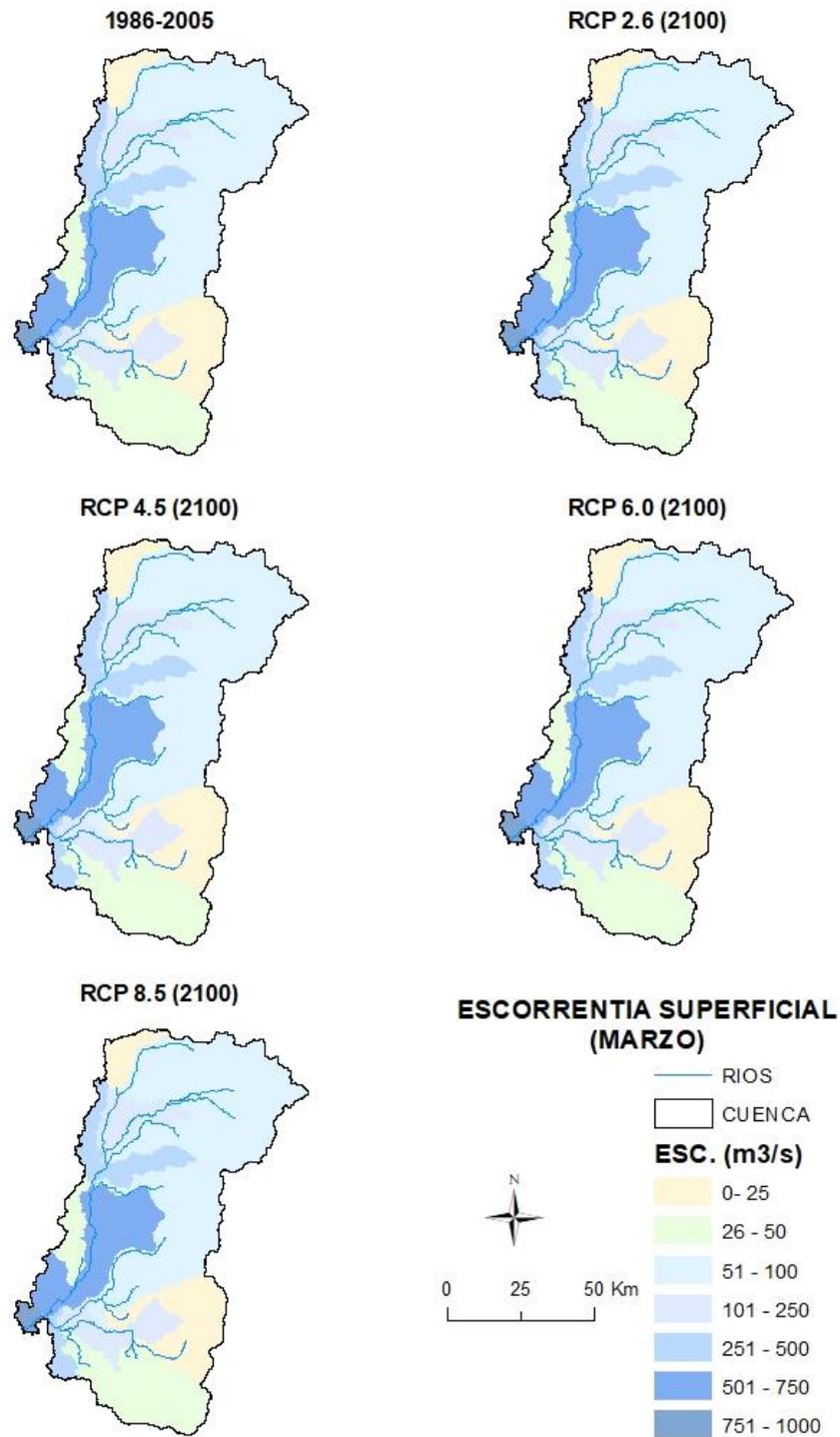


Figura 134. Escorrentía media mensual marzo.

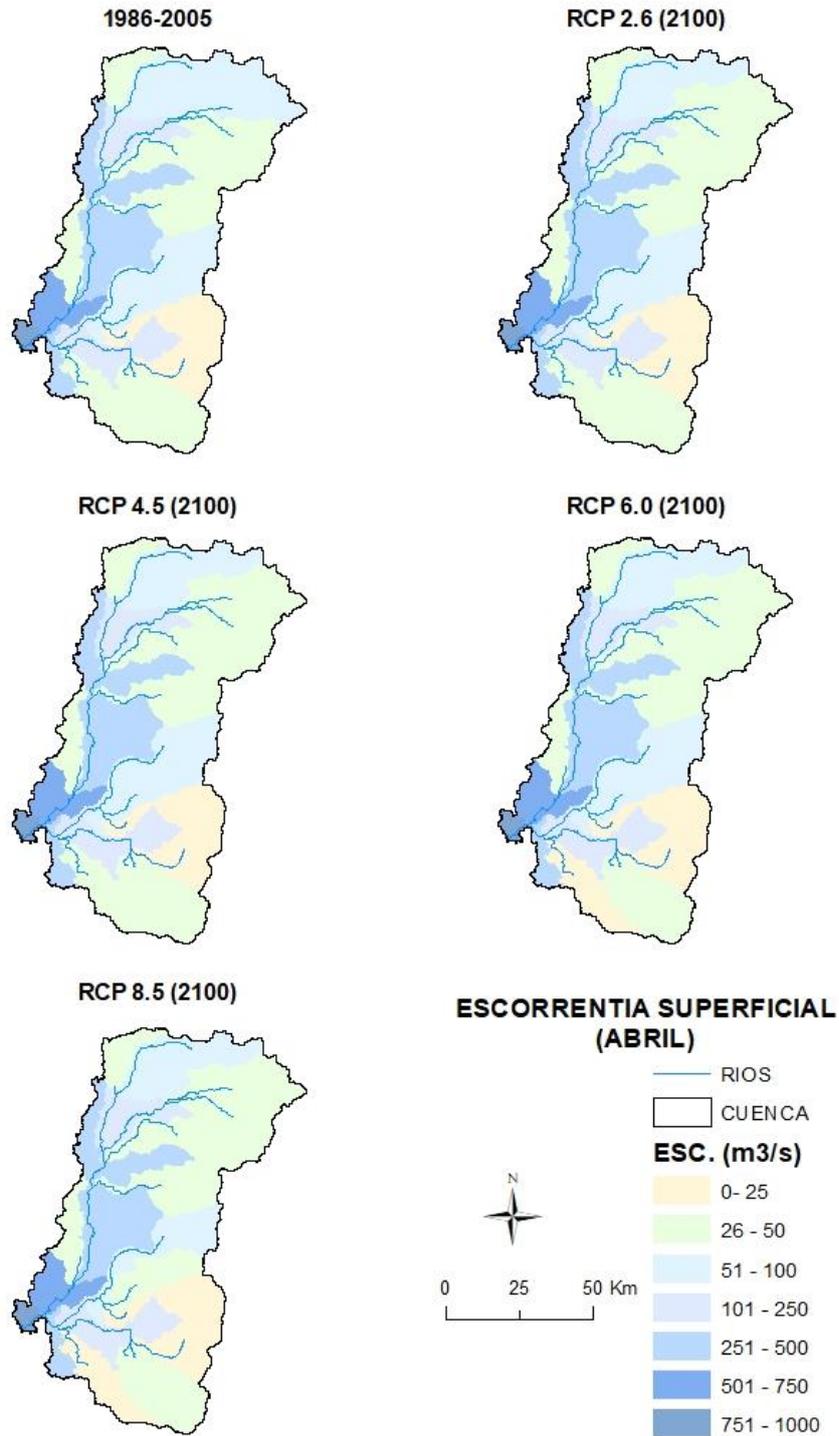


Figura 135. Escorrentía media mensual abril.

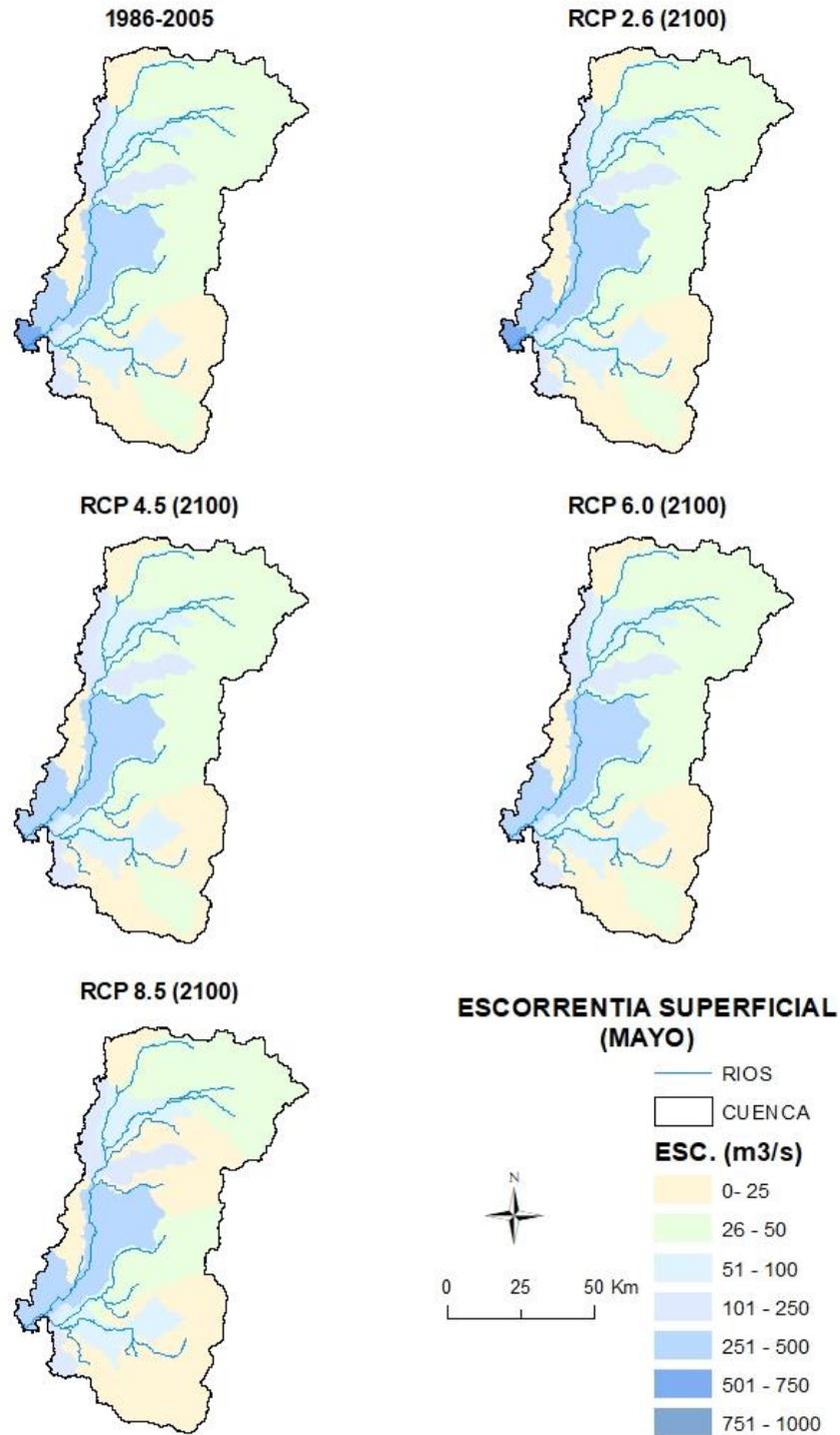


Figura 136. Escorrentía media mensual mayo.

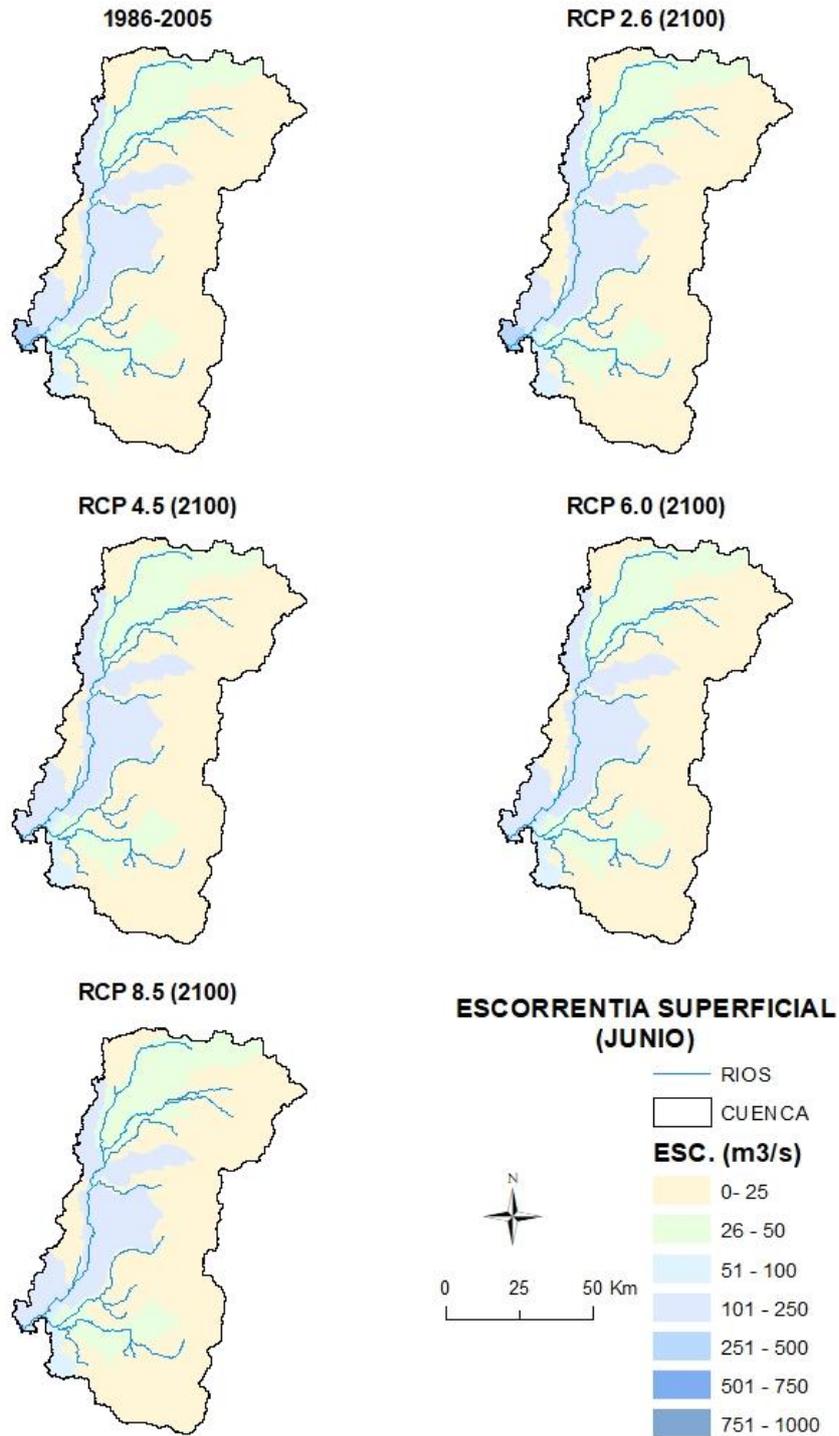


Figura 137. Escorrentía media mensual junio.

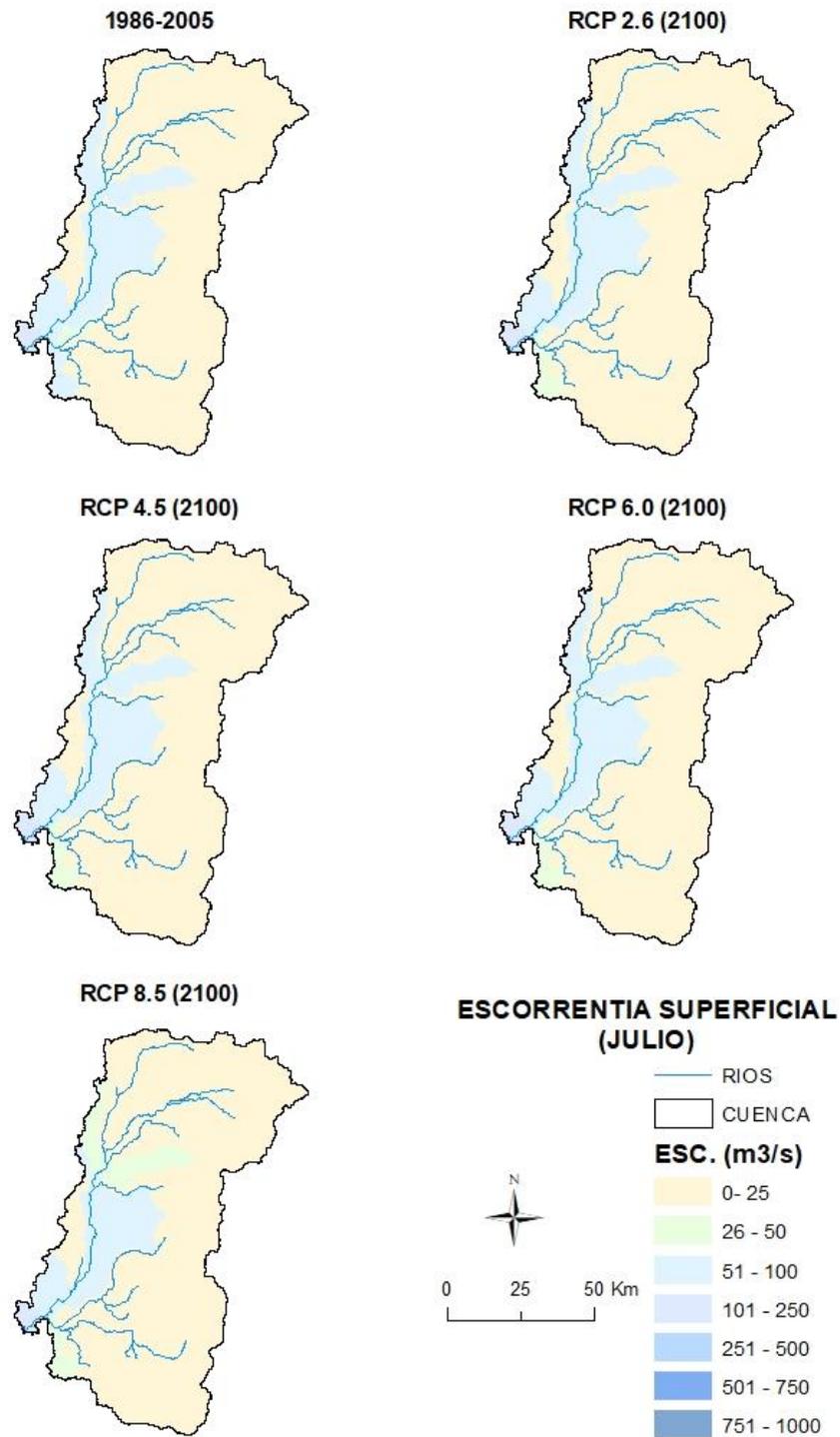


Figura 138. Escorrentía media mensual julio.

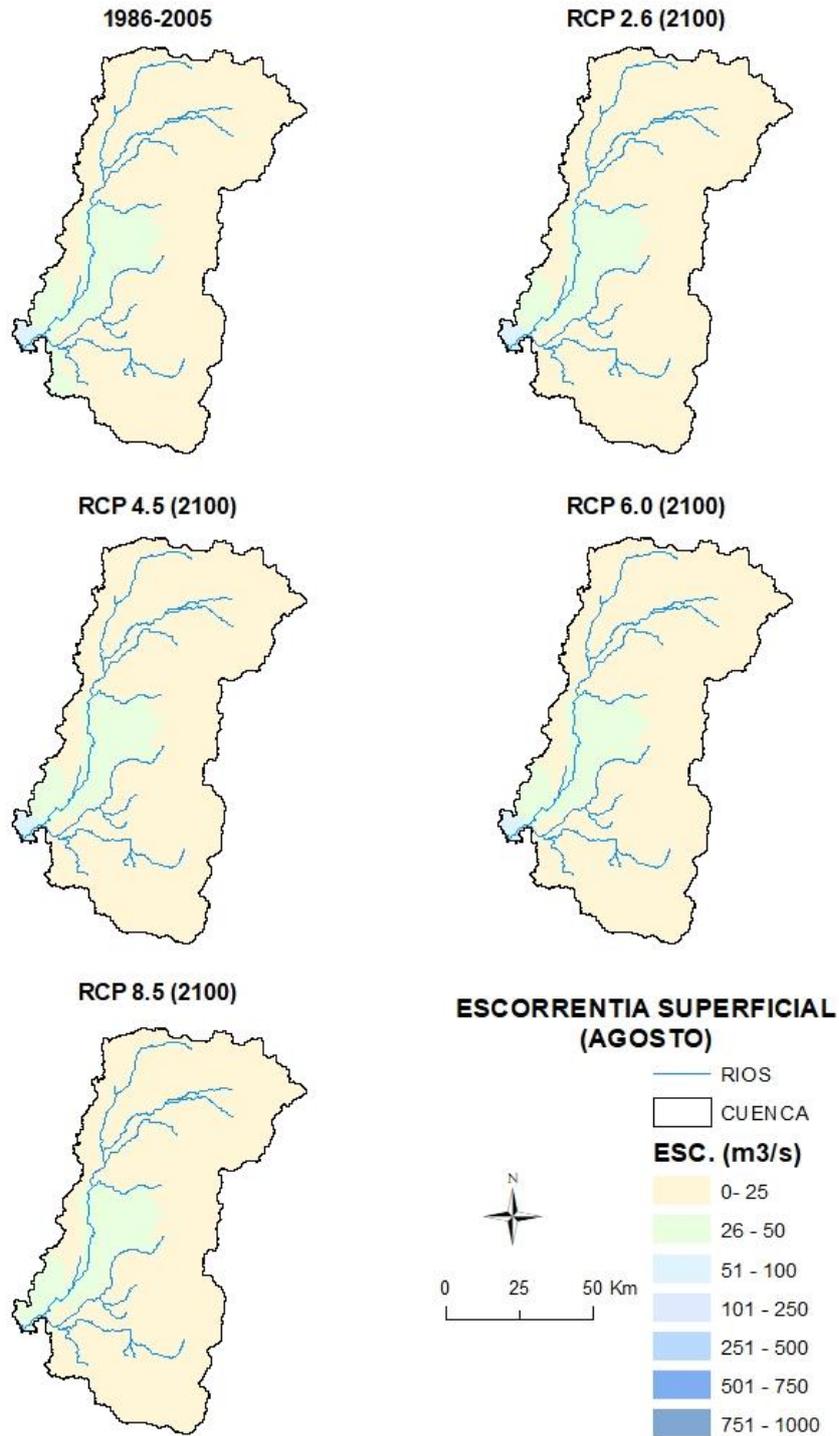


Figura 139. Escorrentía media mensual agosto.

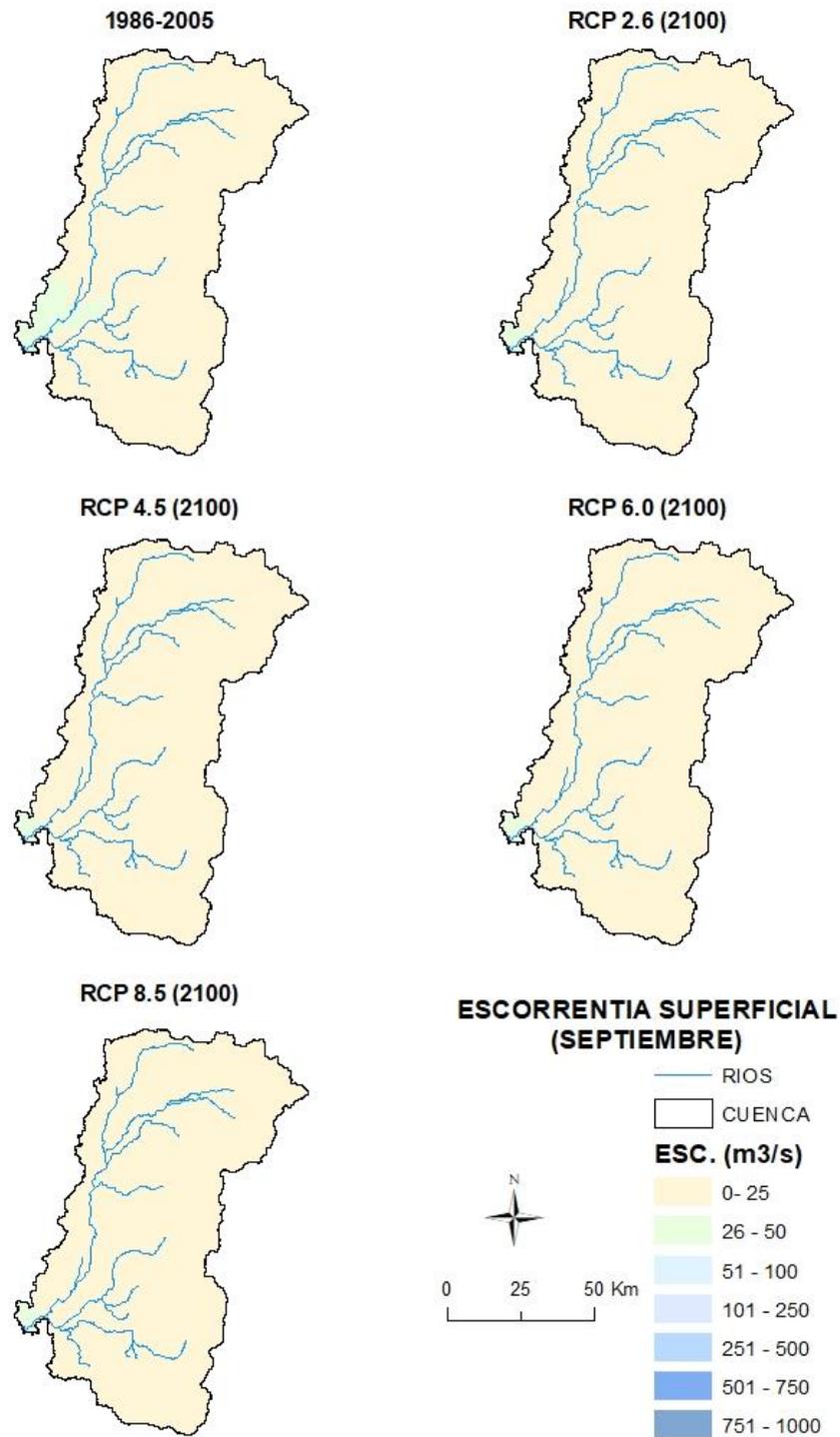


Figura 140. Escorrentía media mensual septiembre.

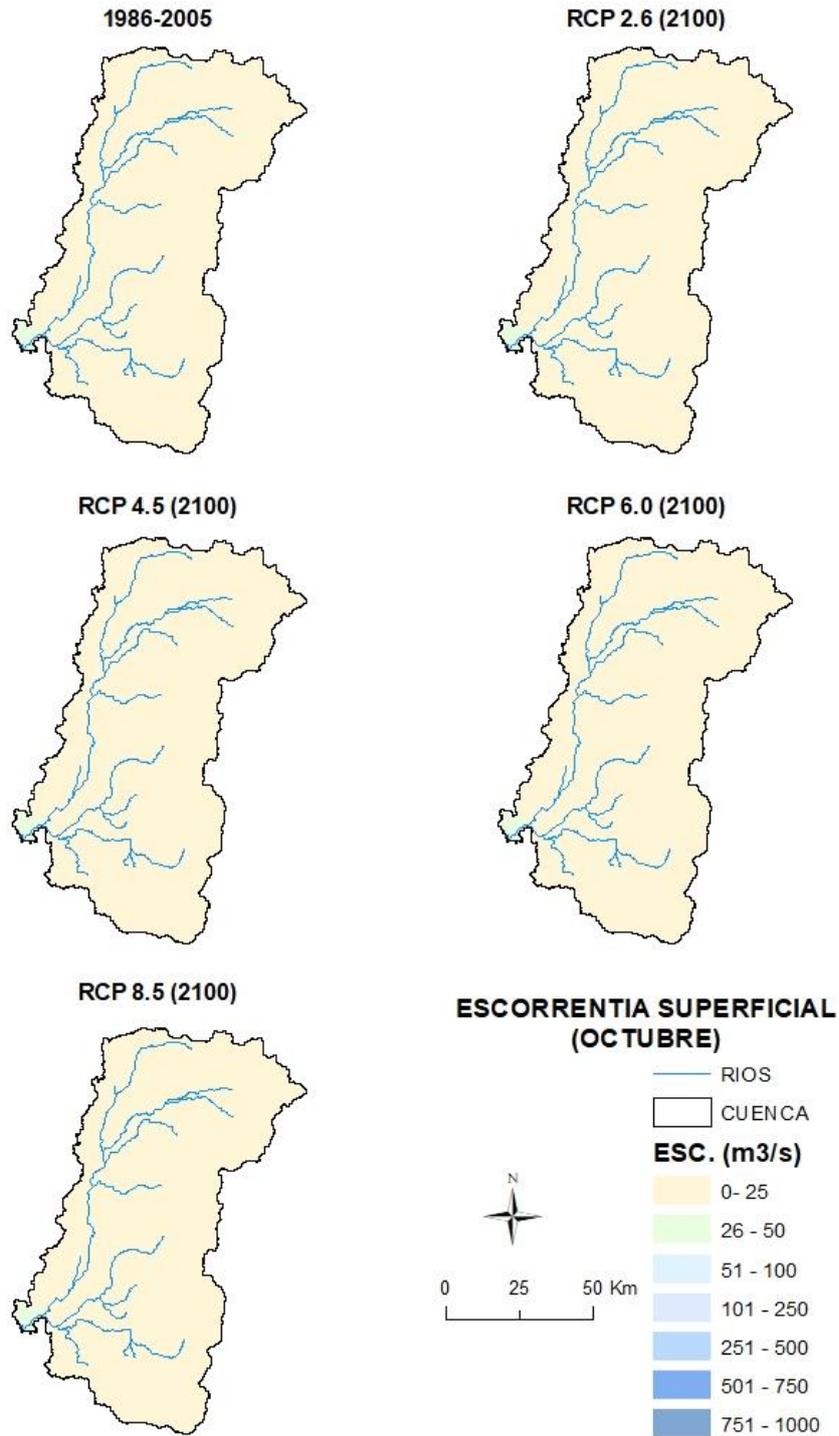


Figura 141. Escorrentía media mensual octubre.

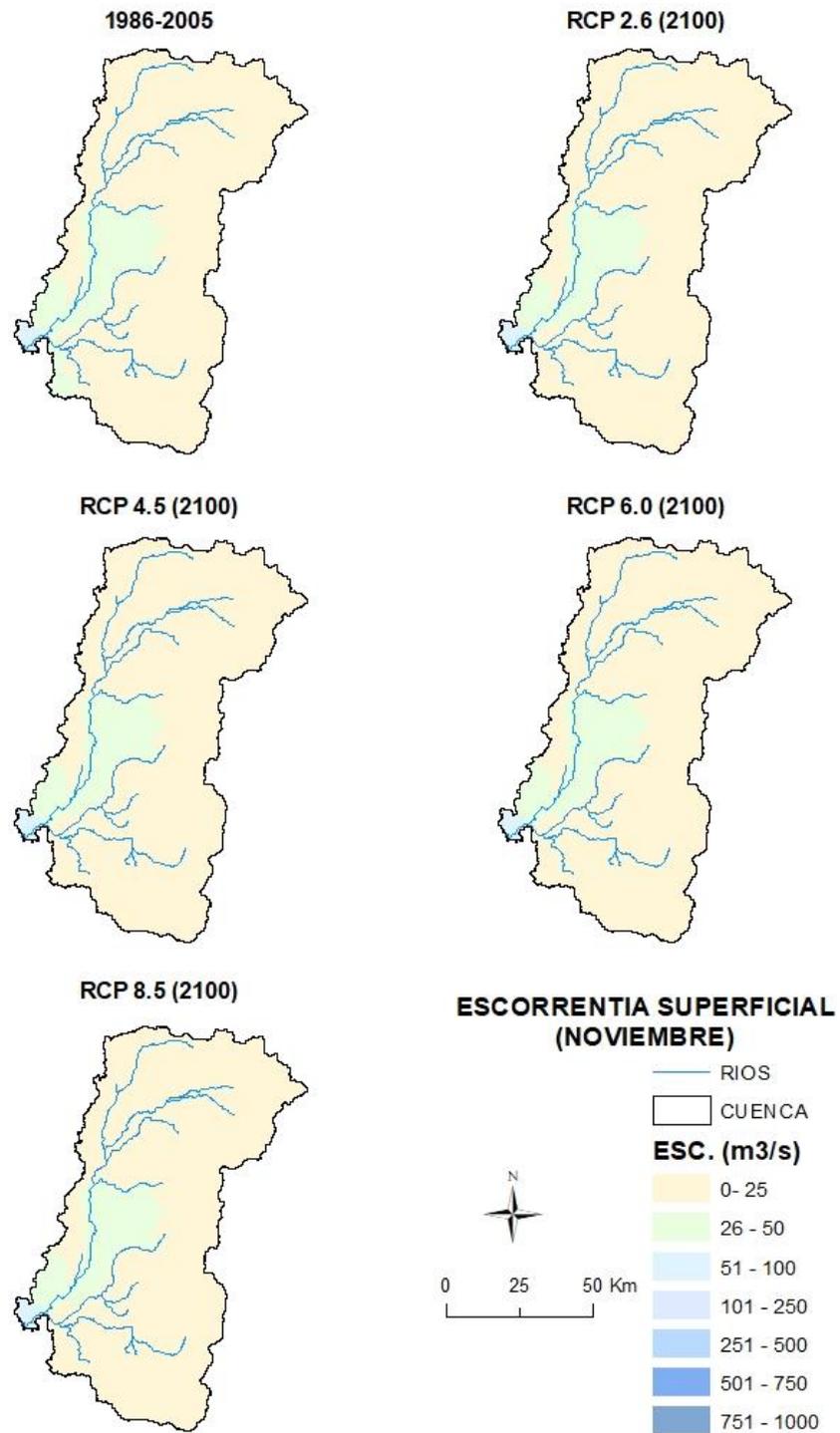


Figura 142. Escorrentía media mensual noviembre.

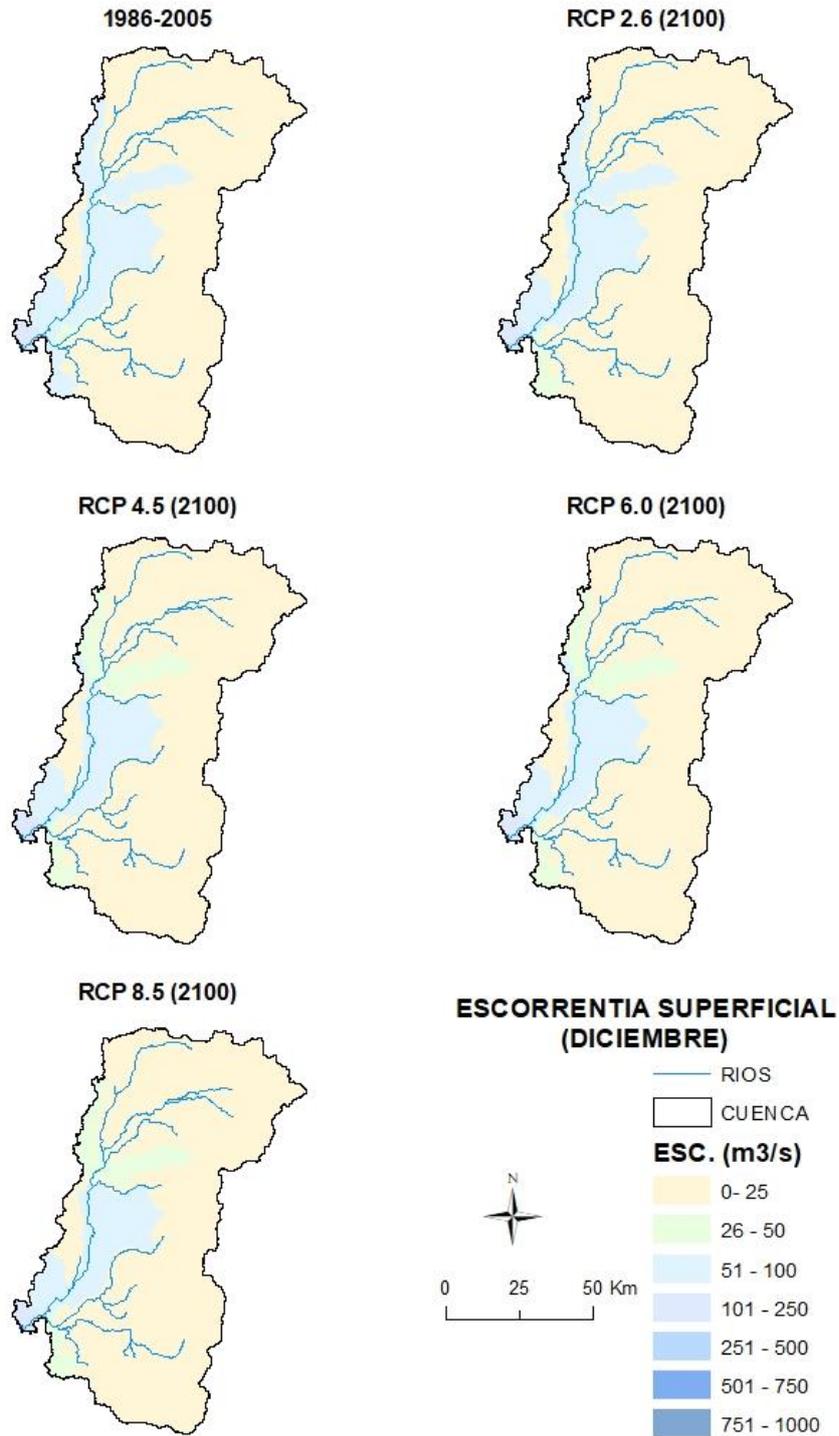


Figura 143. Escorrentía media mensual diciembre

Anexo 7. Índice de aridez (P/ETP) mensual

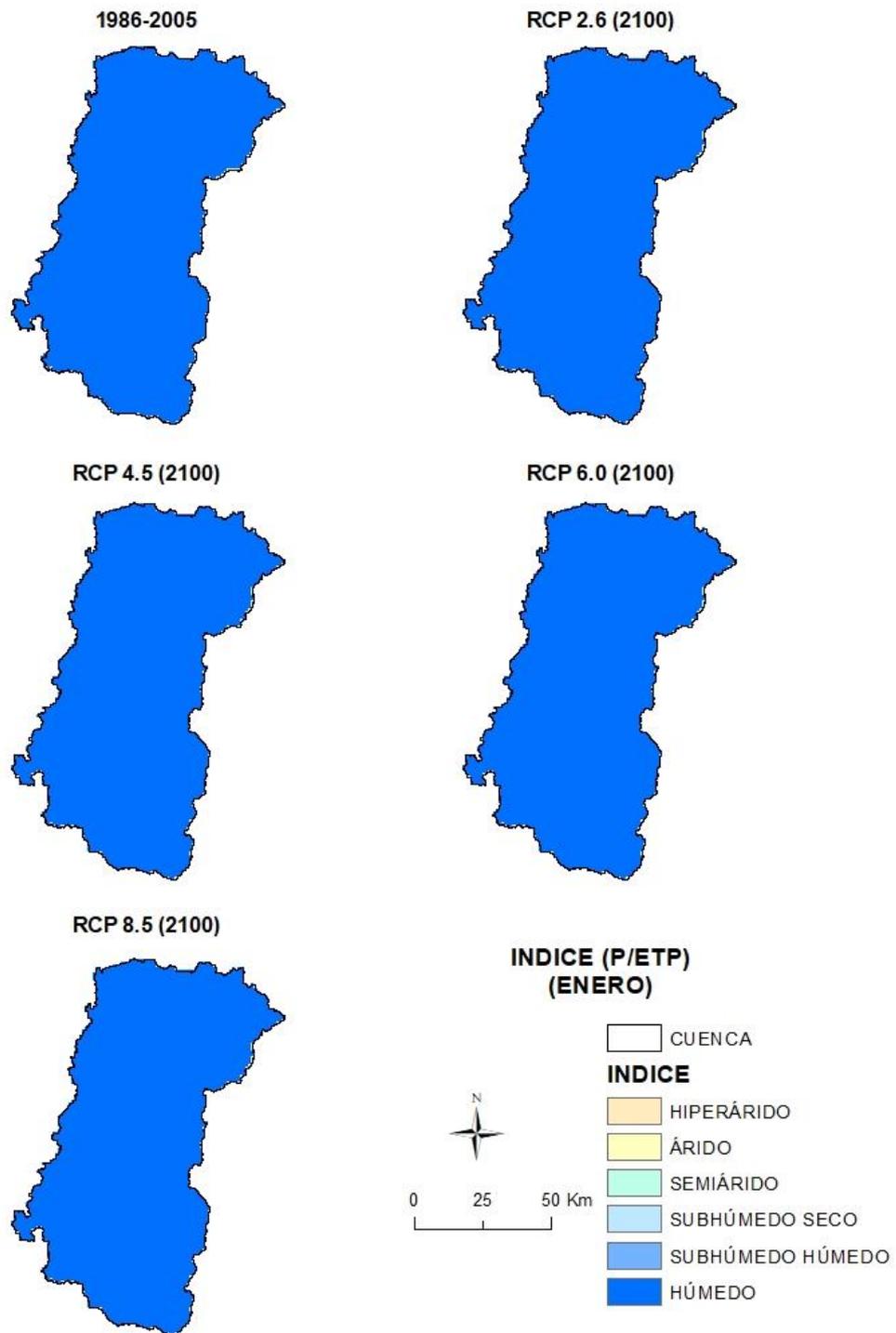


Figura 144. Índice de aridez media mensual enero.

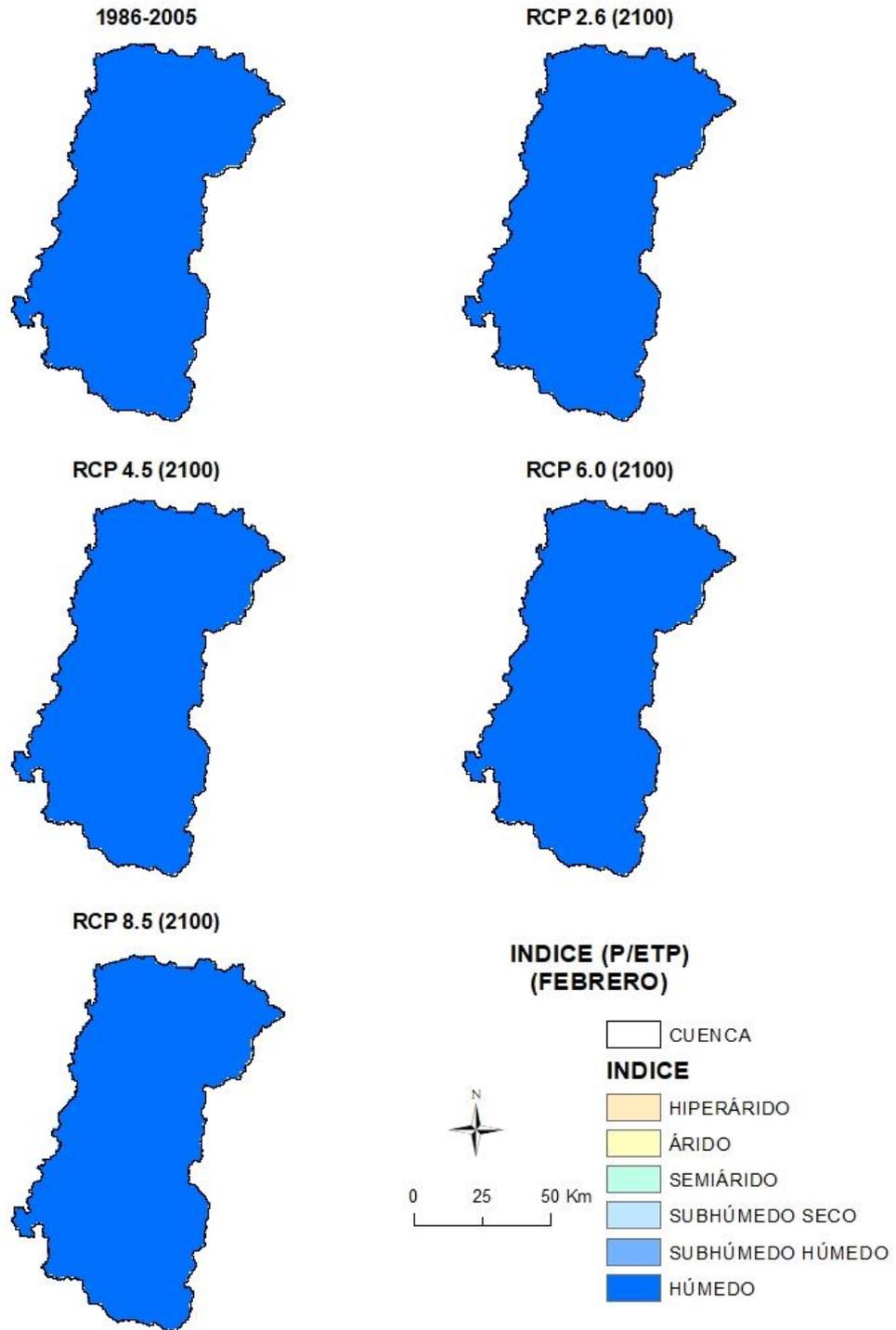


Figura 145. Índice de aridez media mensual febrero.

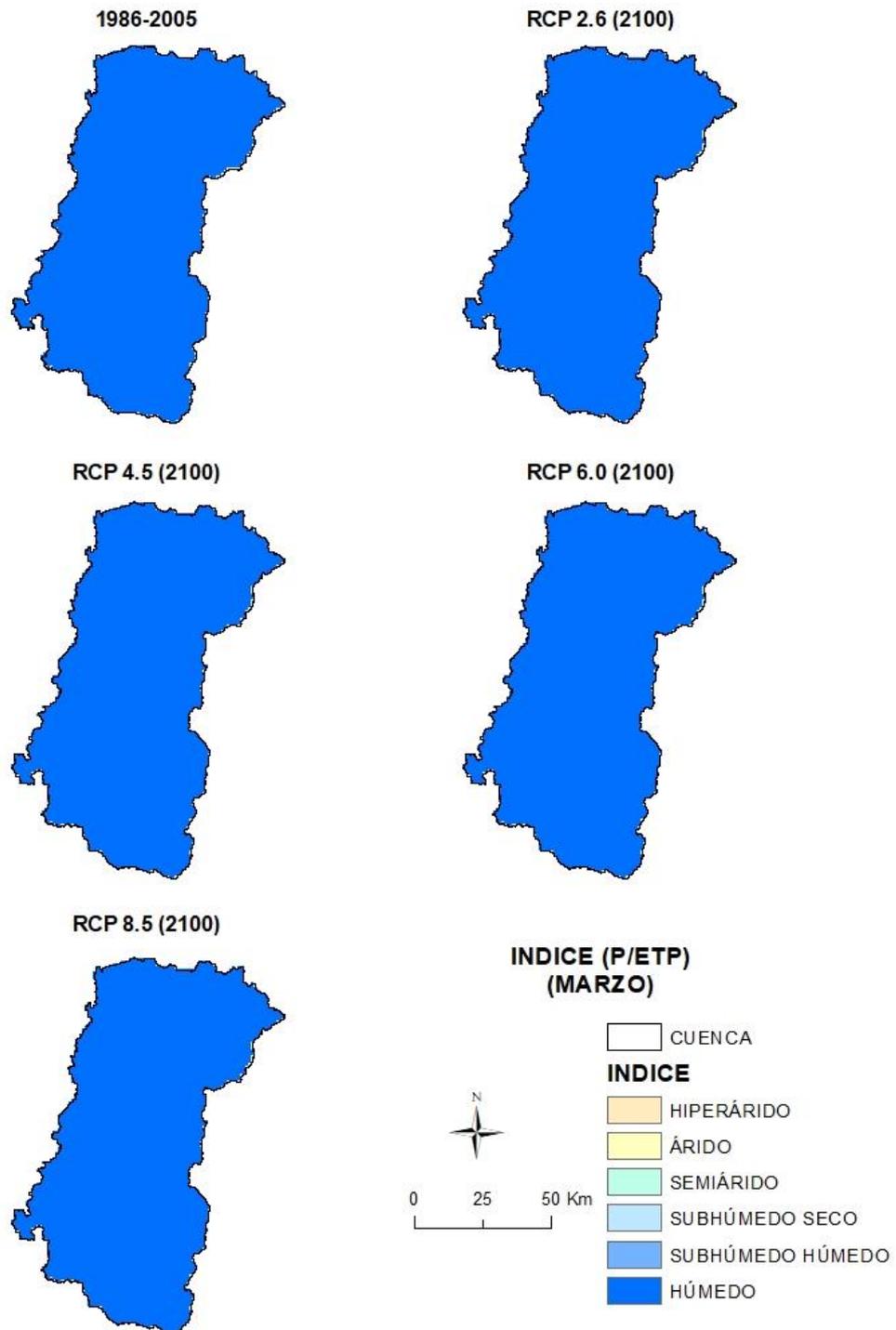


Figura 146. Índice de aridez media mensual marzo.

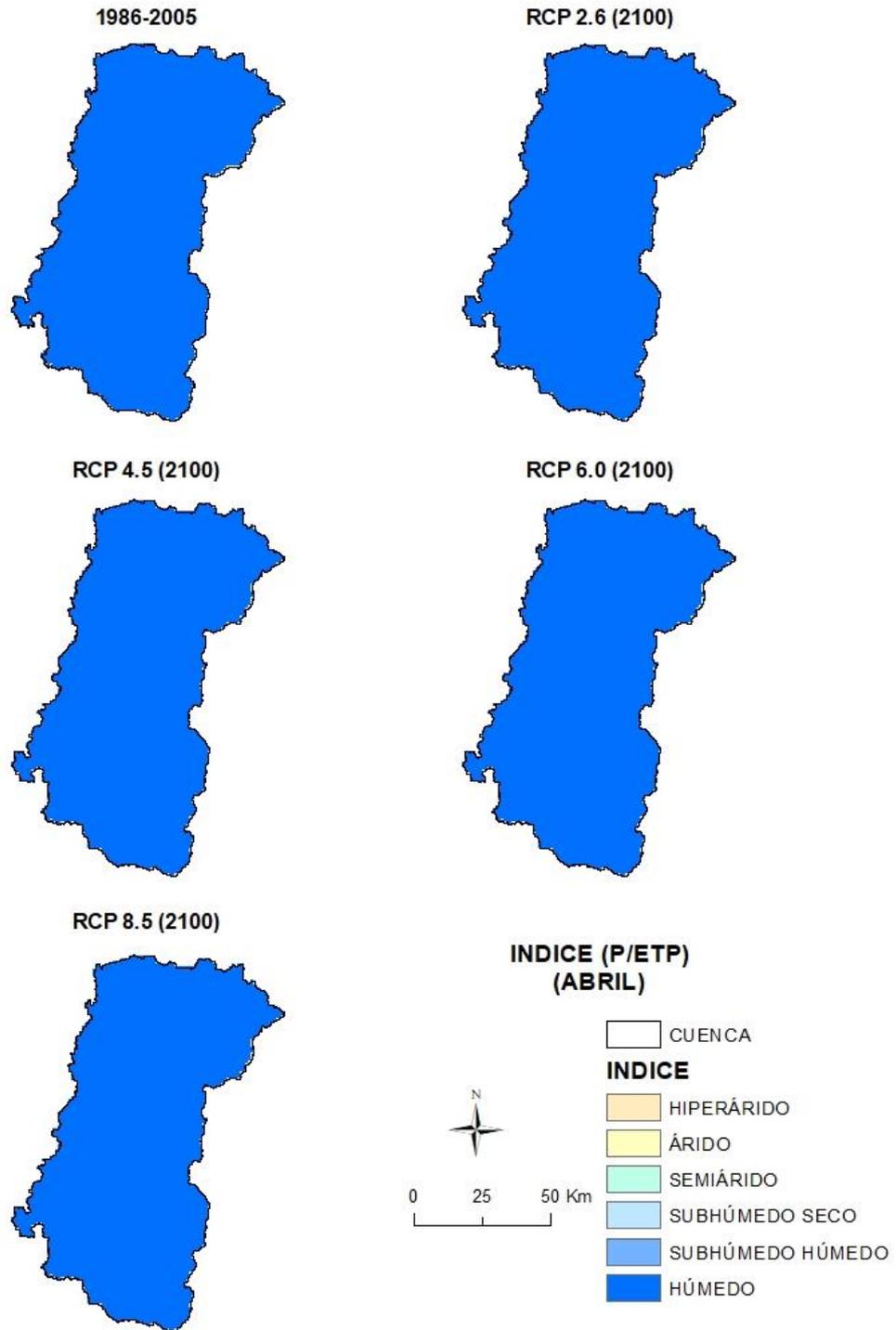


Figura 147. Índice de aridez media mensual abril.

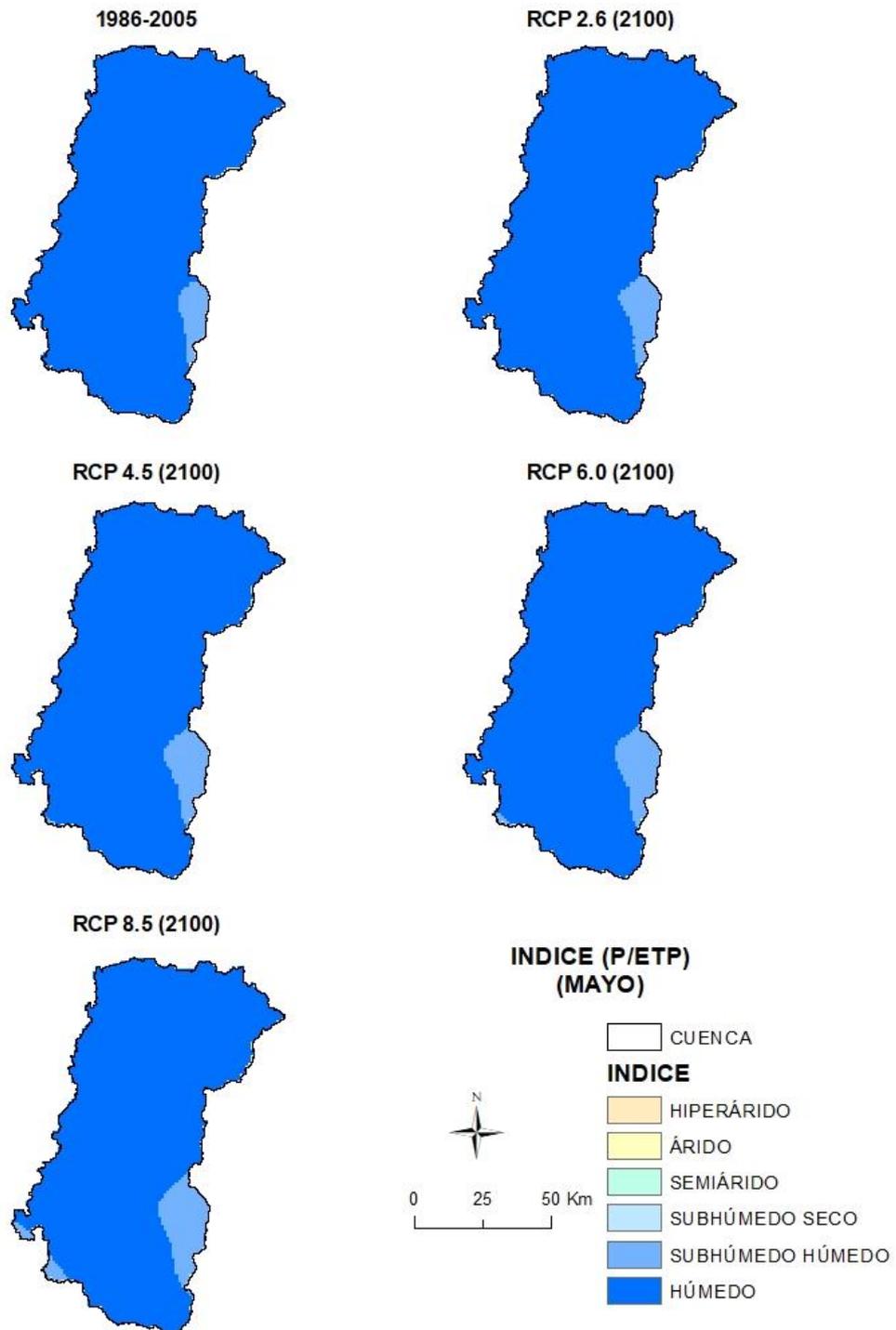


Figura 148. Índice de aridez media mensual mayo.

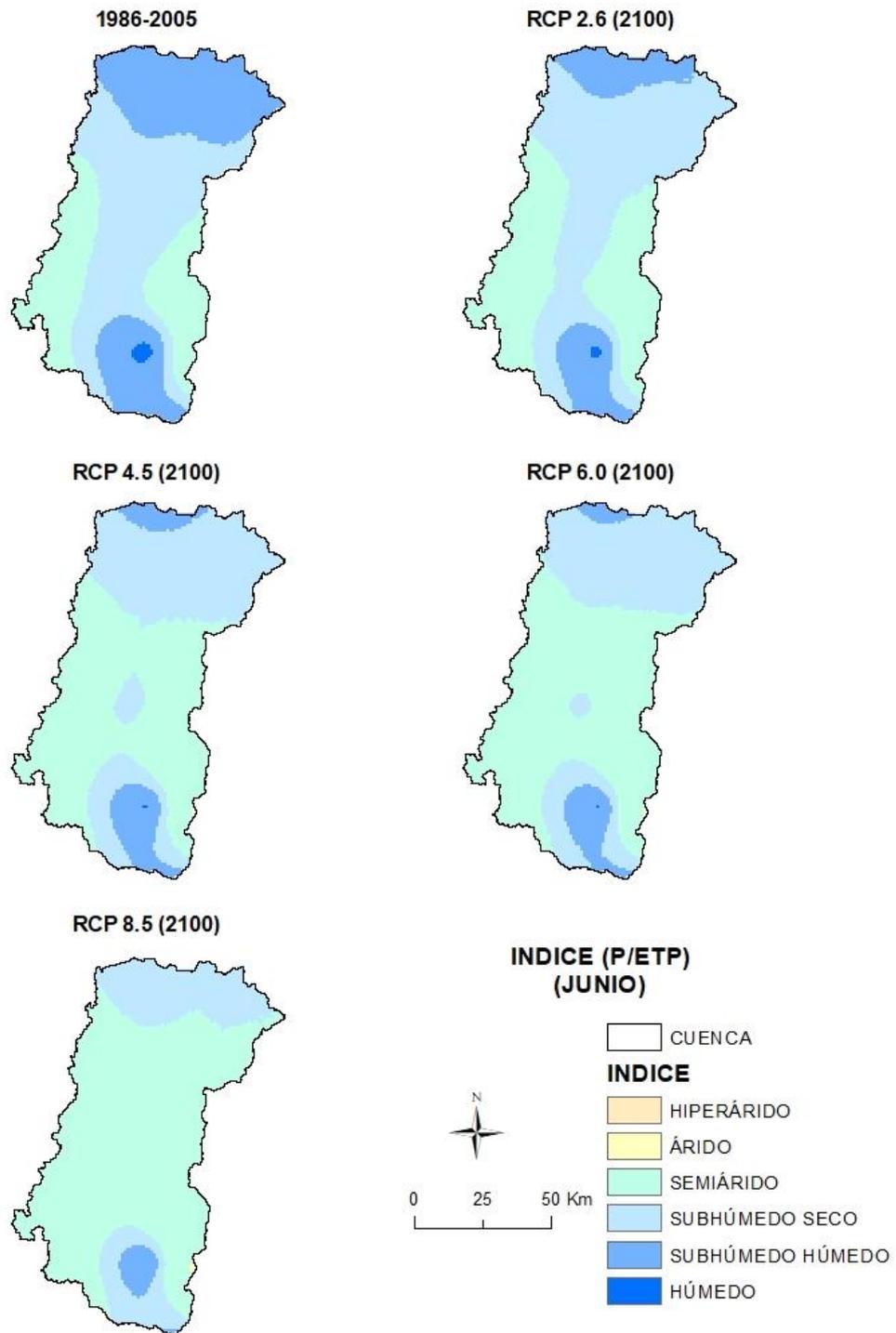


Figura 149. Índice de aridez media mensual junio.

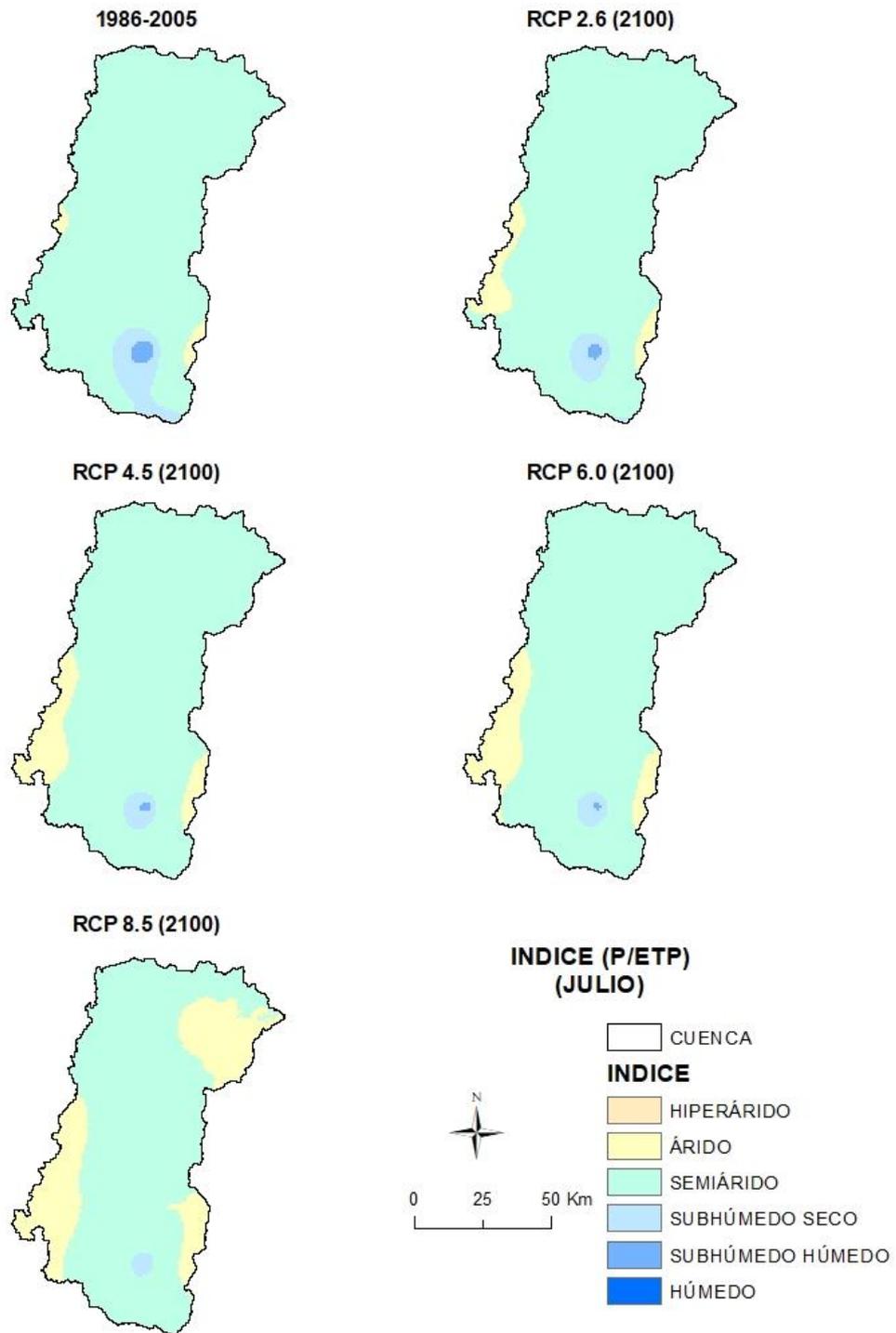


Figura 150. Índice de aridez media mensual julio.

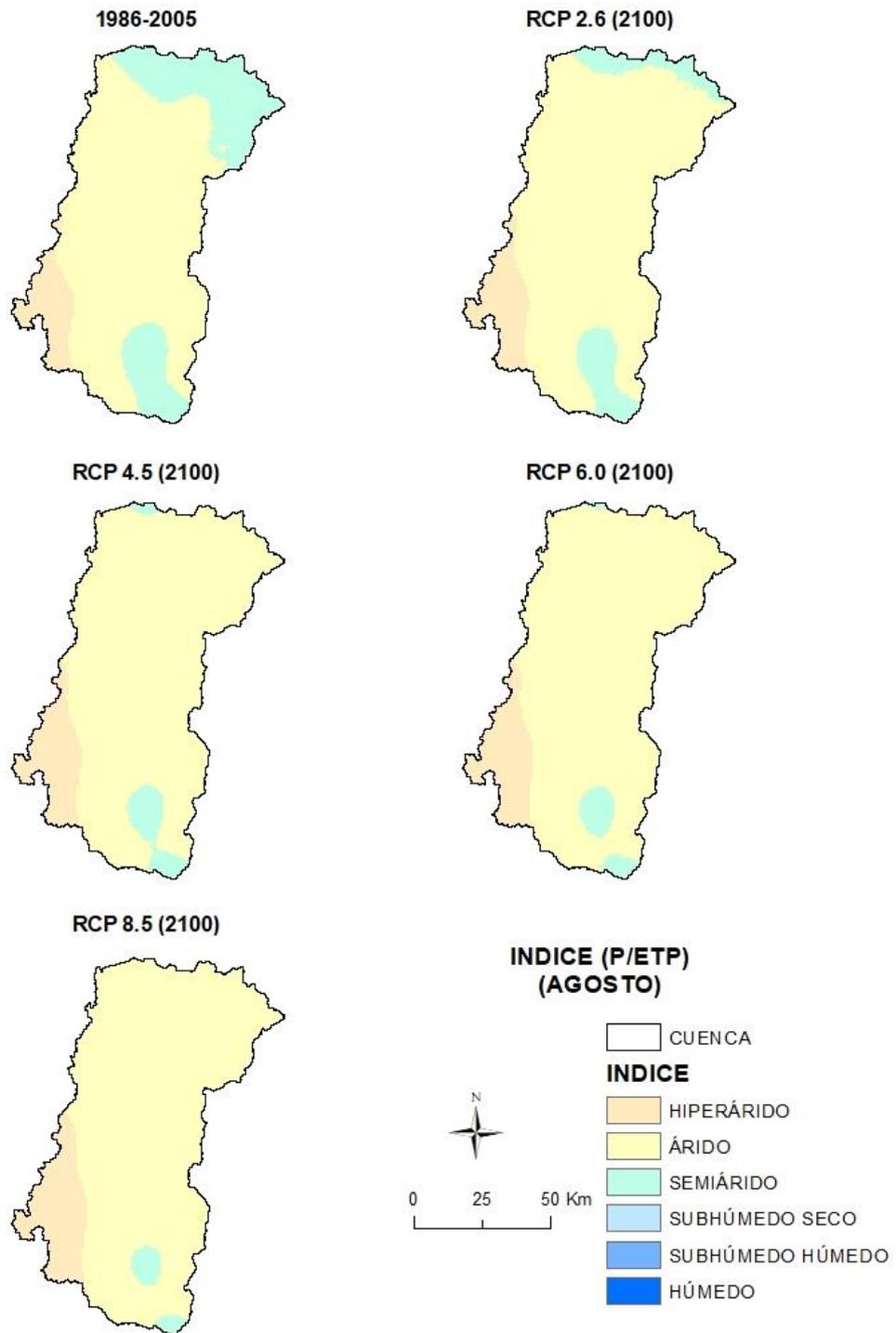


Figura 151. Índice de aridez media mensual agosto.

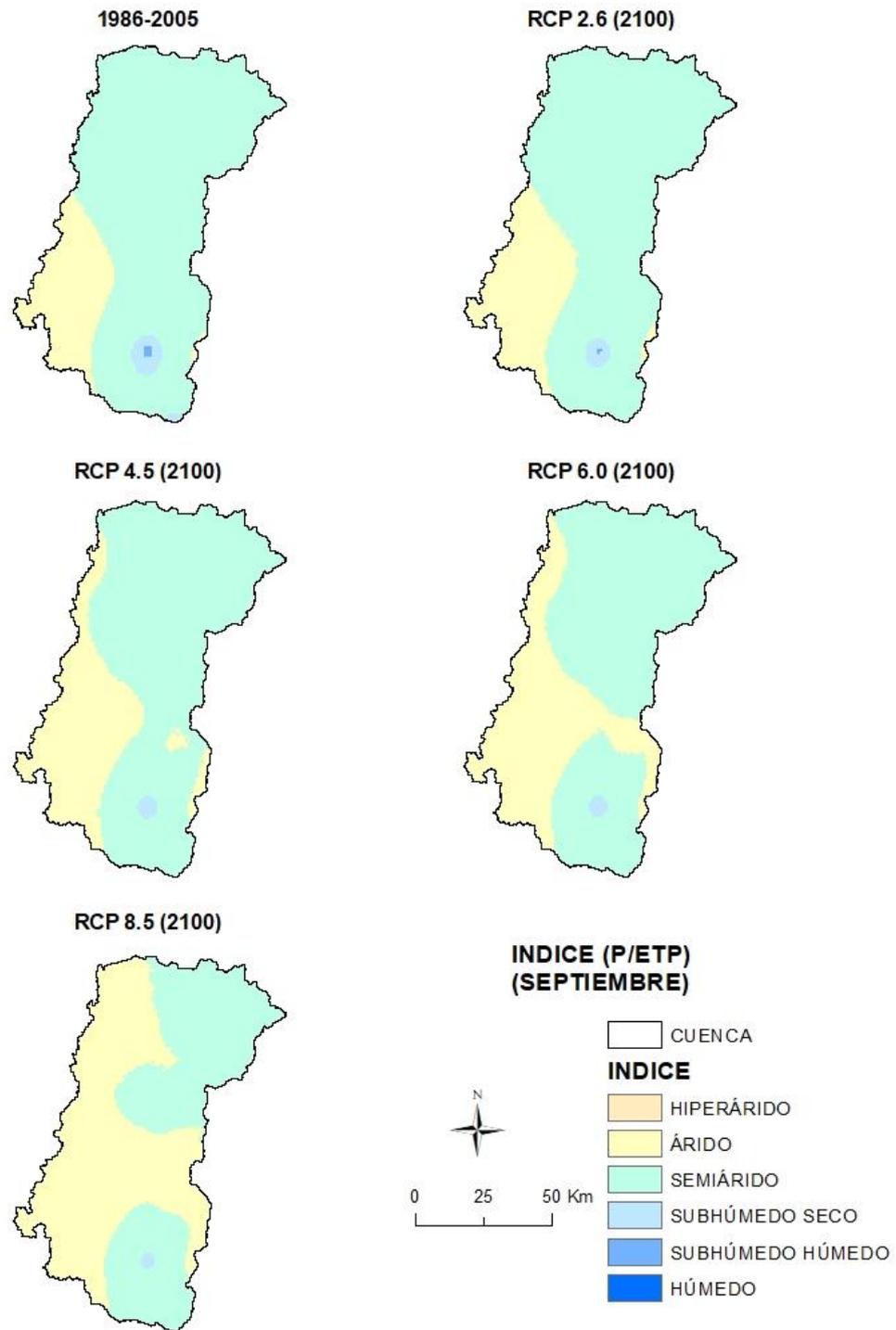


Figura 152. Índice de aridez media mensual septiembre.

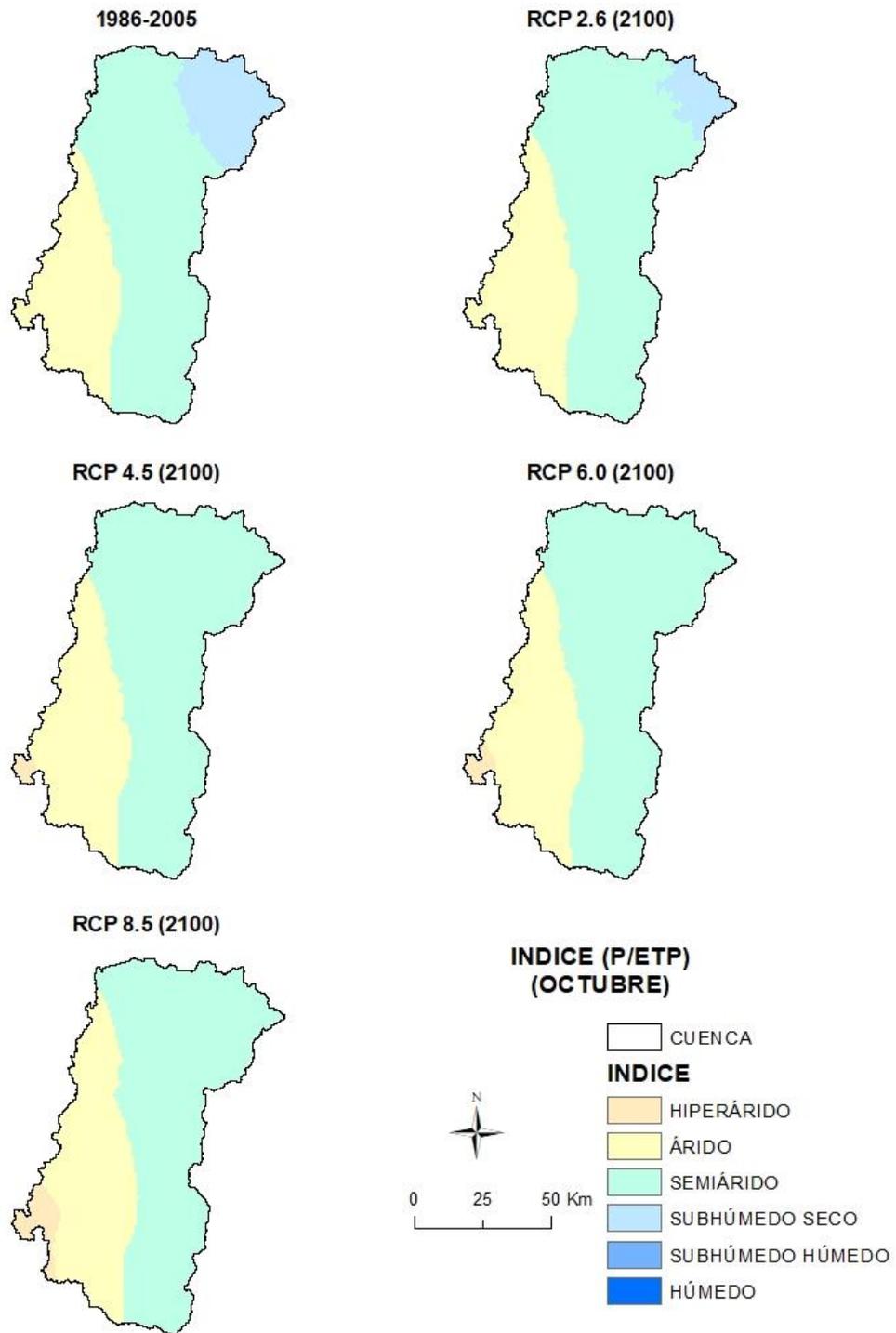


Figura 153. Índice de aridez media mensual octubre.

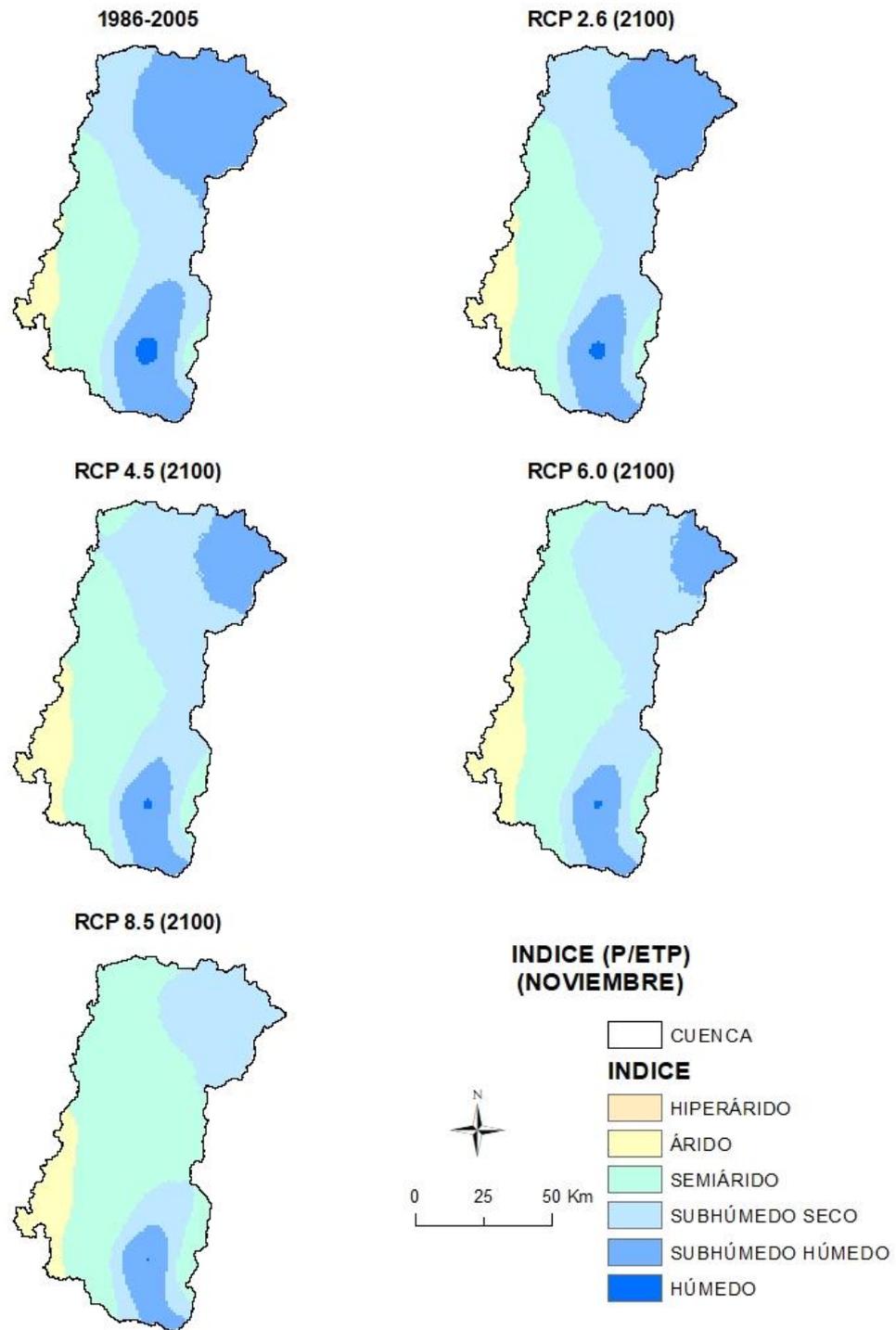


Figura 154. Índice de aridez media mensual noviembre.

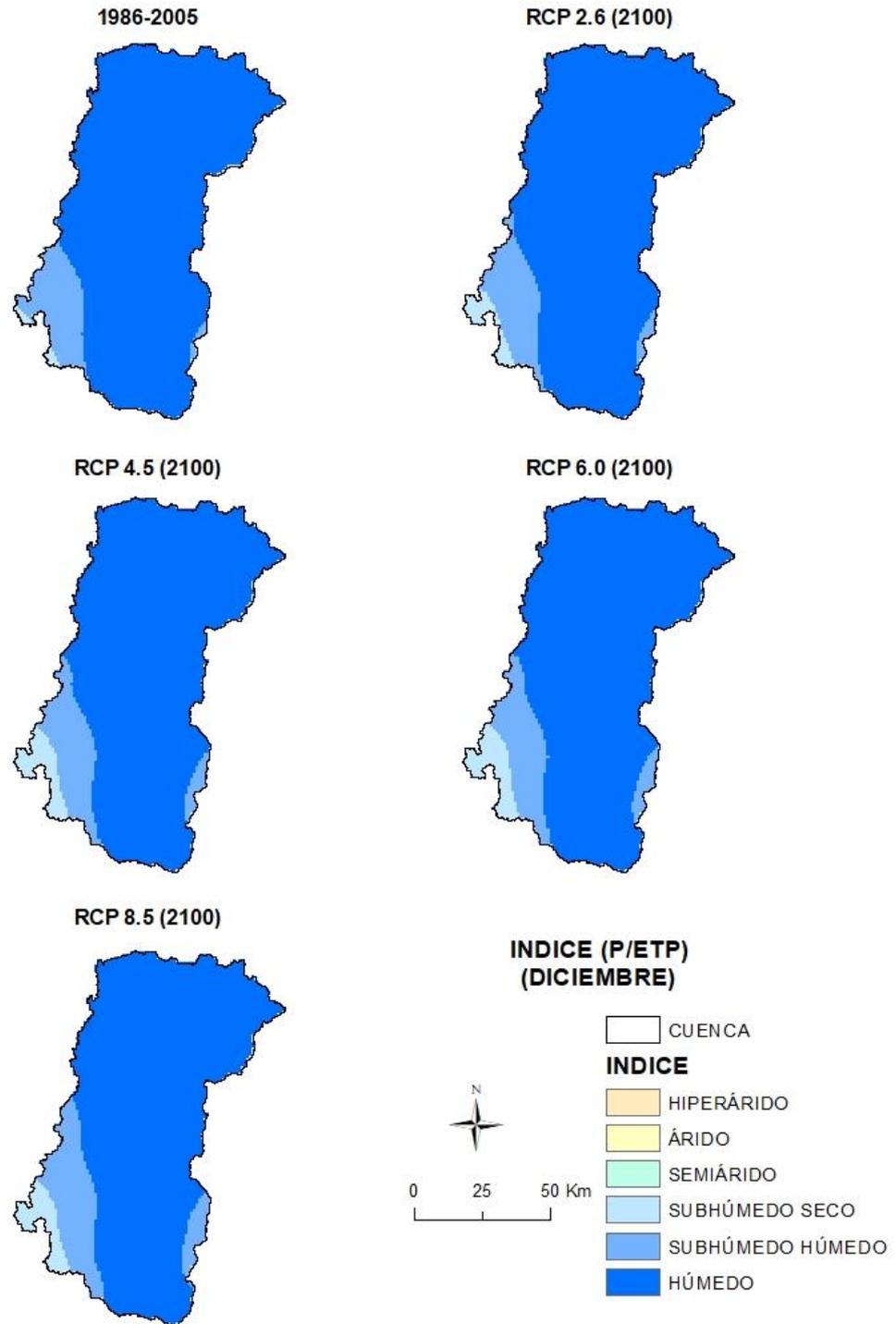


Figura 155. Índice de aridez media mensual diciembre.